



世界资源研究所
WORLD RESOURCES INSTITUTE

城市水源选择的水-能源 关联分析：以青岛为例

WATER ENERGY NEXUS IN THE URBAN WATER
SOURCE SELECTION: A CASE STUDY FROM QINGDAO

温华 钟丽锦 付晓天 Simon Spooner

WRI.ORG



设计：张烨

目录

VII 序

VIII 致谢

1 摘要

9 Executive Summary

17 前言

21 城市水系统中的水资源—能源关联

21 什么是水资源—能源关联

22 城市水系统中的水资源—能源关联

27 青岛市水资源管理现状

27 青岛概况

29 青岛市水资源利用现状

34 青岛市水资源管理政策综述

36 青岛市2020年用水需求预测

39 青岛市不同类型水源的特点及制水能源强度分析

40 不同类型水源的特征与风险比较

41 不同类型水资源的取水制水能耗分析

47 青岛市各类水源选择与能耗情景分析

49 青岛2020年水源选择与能耗情景分析

49 基准年：2011年青岛水源配置与制水能耗分析

53 青岛市2020年水源配置情景设置

58 地表35基础情景下的青岛市2020年制水能耗分析

67 地表40基础情景下的青岛市2020年制水能耗分析

72 地表55基础情景下的青岛市2020年制水能耗分析

77 不同基础情景下的制水能耗比较

78 不同类型水源的制水成本分析

81 结论与建议

85 附录一：2020年青岛市需水量测算

102 附录二：不同类型水源的特点与风险比较

104 名词解释

105 注释

108 参考文献

图目录

图1-1	世界城市化率及城市人口	18
图1-2	世界城市化进程比较（1950-2050年）	18
图2-1	水资源-能源关联示意图	22
图2-2	城市水系统示意图	23
图2-3	南加州不同类型水源的制水能耗	25
图3-1	青岛市行政区划调整情况	27
图3-2	青岛市人口分布情况（2010年）	28
图3-3	青岛市GDP、人均GDP增长率（2000-2011年）	29
图3-4	青岛与中东国家人均可利用水资源量的比较	30
图3-5	青岛市2004-2011年水资源总量变化情况	31
图3-6	青岛站2004-2011年月降水量分配	31
图3-7	青岛市各行政区水资源量（2004-2011年）	32
图3-8	青岛市2004-2011年各种水源利用情况	32
图3-9	青岛市分区用水量与水源类型（2011年）	33
图3-10	青岛市2004-2011年各行业用水情况	33
图3-11	青岛市各行政区分行业用水情况（2011年）	34
图3-12	国内外26个城市温室气体排放与水资源消耗水平	36
图4-1	英国各类水源的取水能耗比较	41
图4-2	青岛市本地地表水源取水、制水能耗	41
图4-3	青岛市地下水取水、制水能耗	42
图4-4	引黄济青工程线路图	42
图4-5	引黄济青工程的取水、制水能耗	43
图4-6	南水北调东线工程线路图	43
图4-7	南水北调工程东线逐级抽水示意图	44
图4-8	南水北调供青岛的取水、制水电耗	44
图4-9	各种海水淡化技术的能耗比较	45
图4-10	青岛市不同类型水源的供水潜力与取水制水能耗曲线	47
图5-1	青岛市2011年水源分配与利用桑基图	49
图5-2	青岛市2011年分区供水来源	50
图5-3	青岛市不同类型水源的供水比例以及制水能耗比例（2011年）	52
图5-4	青岛市分区水源制水能耗（2011年）	52
图5-5	青岛市2011年分区单位制水能耗	53
图5-6	地表35-海水淡化优先情景下的青岛市2020年水源分配和利用桑基图	55
图5-7	地表35-再生水情景下青岛市2020年水系统桑基图	55
图5-8	地表35-调水情景下青岛市2020年水系统桑基图	56
图5-9	青岛市制水能耗变化比较（地表35-海水淡化情景）	58
图5-10	地表35-海水淡化优先情景下各区制水能耗（2020年）	59

图5-11	地表35-海水淡化情景各区制水能耗变化趋势	60
图5-12	地表40-海水淡化情景下各区单位制水能耗（2020年）	60
图5-13	青岛市制水能耗比较（地表35-再生水优先情景）	61
图5-14	地表35-再生水情景下各区制水能耗（2020年）	62
图5-15	地表35-再生水情景下各区单位制水能耗（2020年）	62
图5-16	青岛市制水能耗比较（地表35-调水情景）	63
图5-17	地表35-调水情景下各区制水能耗（2020年）	64
图5-18	地表35-调水情景下各区单位制水能耗（2020年）	64
图5-19	地表35各情景能耗比较（2020年）	65
图5-20	地表35各情景的分区制水能耗比较（2020年）	65
图5-21	地表35不同情景下分区单位制水能耗比较	65
图5-22	青岛2011年及地表35情景下2020年制水过程的温室气体排放	66
图5-23	地表35情景下的单位制水碳排放（2020年）	67
图5-24	地表40不同情景下分区制水能耗分析（2020年）	67
图5-25	地表40不同情景下分区单位制水能耗分析（2020年）	69
图5-26	地表40不同情景下青岛市制水能耗分析比较	70
图5-27	地表40不同情景下青岛市分区供水单耗分析比较	70
图5-28	青岛2011年及2020地表40情景下制水过程的温室气体排放	71
图5-29	地表40情景下的单位制水碳排放	72
图5-30	地表55不同情景下分区制水能耗分析	73
图5-31	地表55不同情景下分区单位制水能耗分析	74
图5-32	地表55不同情景下青岛市制水能耗分析比较	75
图5-33	地表55不同情景下青岛市分区供水单耗分析比较	75
图5-34	地表55情景下的单位制水碳排放	76
图5-35	青岛2011年及2020地表55情景下制水过程的温室气体排放	76
图5-36	对3个情景的系统能耗比较	77
图5-37	青岛市各类水源制水成本曲线	79

附图目录

附图I-1	工业用水效率实际值与拟合值的对比	88
附图I-2	青岛及其他国家的万元工业增加值用水量比较（2011年）	89
附图I-3	青岛各区2020年工业用水与2011年基准值的比较	90
附图I-4	青岛各行政区人均生活用水量与人均GDP的关系	92
附图I-5	青岛2020年城市生活及市政公共用水与2011年基准值比较	93
附图I-6	青岛2020年农村生活用水与2010年基准值的比较	94
附图I-7	青岛主要畜禽养殖数量变化情况	96
附图I-8	青岛市2005-2011年灌溉用水量变化情况	98
附图I-9	青岛市今年实际灌溉用水与额定测算值的差距	90

表目录

表2-1	气候变化对世界水文的主要影响	21
表3-1	青岛市2015年经济社会及能源、水资源指标	28
表3-2	青岛市多年平均水资源总量	30
表3-3	全国、山东省和青岛市水资源管理三条红线目标比较	34
表3-4	青岛市2020年总需水量（单位：亿m ³ ）	37
表4-1	各类水源的供水风险比较	40
表5-1	青岛市2011年市政、工业及农业供水（万m ³ ）	51
表5-2	青岛市2011年分区供水来源（万m ³ ）	51
表5-3	青岛市规划海水淡化项目一览表	54
表5-4	地表35不同情景下的水量分配设置	56
表5-5	地表40不同情景下的水量分配设置	57
表5-6	地表55不同情景下的水量分配设置	57
表5-7	地表35-海水淡化情景下的水源结构及能耗（2020年）	58
表5-8	地表35-海水淡化情景分区制水能耗（2020年，万kWh）	59
表5-9	地表35-再生水利用情景下的水源结构及能耗（2020年）	61
表5-10	地表35-再生水情景分区制水能耗（2020年，万kWh）	61
表5-11	地表35-调水情景下的水源结构及能耗（2020年）	63
表5-12	地表35-调水情景分区制水能耗（2020年，万kWh）	63
表5-13	青岛市各类水源成本信息一览表	78
表6-1	青岛市分区水源选择优先性建议	83

专栏目录

专栏1	英国南方水务集团的碳足迹测算	24
专栏2	海水淡化与浓盐水综合利用	46

附表目录

附表 I-1	各种工业用水预测方法的比较	85
附表 I-2	青岛市分区万元工业增加值用水量（2011年）	86
附表 I-3	青岛市分区工业增加值测算表	87
附表 I-4	模型检验值表	88
附表 I-5	青岛市2020年分区工业用水需求量（万立方米）	89
附表 I-6	各种城镇生活用水预测方法的比较	91
附表 I-7	青岛市各行政区2020年城市人口预测表（万人）	92
附表 I-8	青岛市各区居民生活用水指标	92
附表 I-9	青岛市2020年生活及市政公用用水需求（万立方米）	93
附表 I-10	青岛市2020年农村人口预测表（万人）	94
附表 I-11	青岛市2020年农村生活用水需求（万立方米）	94
附表 I-12	青岛市2020年主要畜禽饲养量 预测表	96
附表 I-13	青岛市主要畜禽产区	97
附表 I-14	青岛市2020年主要畜禽用水定额（升/头·日）	97
附表 I-15	青岛市2020年养殖用水需求（万立方米）	97
附表 I-16	各种灌溉用水预测方法的比较	99
附表 I-17	青岛市2020年种植业灌溉定额	99
附表 I-18	青岛市各行政区有效灌溉面积预测（单位：万亩）	90
附表 I-19	青岛市各行政区2020年灌溉用水需求	90
附表 I-20	青岛市2020年总需水量（单位：万立方米）	91



序

水和能源是支撑社会经济发展的重要资源，也是影响城市可持续发展的主要制约因素。长期以来，人们围绕资源短缺与合理配置问题开展了大量研究，但是很少研究水源和能源的相互关系。由于相对割裂的视角，得出的结论往往偏重于某一方面，缺乏全面的分析。

中国快速城市化的过程面临着更为严峻的水资源和能源挑战，在制定城市或区域的水资源战略时，有必要综合考虑对能源消耗和温室气体排放的影响。因此，世界资源所可持续宜居城市项目组在青岛市开展了“城市水源选择的水-能源关联分析”研究，以更好地理解城市水系统中的能源问题以及两者之间的关系。

青岛是我国北方沿海严重缺水城市之一，同时也是供水水源多元化的典型。目前，其主要水源包括地表水、地下水、外调的黄河水、再生水和海水淡化等。此外，青岛也是长江南水北调的受水城市。面对多种水源，如何优化选择和合理调度，实现保障城市供水安全、降低城市供水系统碳排放量，是青岛市低碳发展、建设可持续宜居城市需要重视和解决的重要课题。

本研究分析了青岛市经济社会发展情况、水资源禀赋和利用现状，探讨了各类水源的供水潜力、风险特征和供水能耗，并结合对青岛城市需水量的趋势分析，通过不同水源利用情景预测了青岛市2020年制水能耗和温室气体排

放，为决策者制定可持续的低碳供水策略、优化配置各类水源提供了建议和参考。

我们希望本研究能为中国城市的水资源规划提供新的思路，从碳排放和气候变化的角度更加科学地考虑城市水问题，为低碳城市的设计和建设提供技术支持。



李来来

中国区首席代表
世界资源研究所

致谢

在完成《城市水源选择的水－能源关联分析》的研究和编写过程中，项目组得到了水资源和能源领域众多专家的指导和帮助，在此，我们向各位专家和同行表示诚挚的谢意。

我们要特别感谢住房城乡建设部张悦巡视员、国家发改委国家应对气候变化战略研究和国际合作中心邹骥副主任、青岛市发改委李振军副主任、青岛市发改委节能办刘彦飞主任和林群处长对项目的大力支持和指导，同时向中国区首代李来来博士、世界资源研究所全球办公室科学与研究副主席Janet Ranganathan女士、全球城市与交通代主任Holger Dalkmann先生、高级顾问Vijay Jagannathan先生、全球可持续交通中心首席运营官Clayton Lane先生、全球水项目主任Betsy Otto女士、中国城市与可持续交通主任张海涛先生，以及赵婷、王亚敏、王碧鸥等同事表示诚挚的谢意。感谢实习生姚幸颖和池明霞对本研究的支持与贡献。

最后，我们要感谢卡特彼勒基金会和英国外交与联邦事务部全球繁荣基金对本研究的慷慨资助。

对报告作出重要贡献的专家名单如下（排名不分先后）：

丁丁

国家应对气候变化战略研究和国际合作中心 | 评审专家

郦建强

水利部水利水电规划设计总局 | 评审专家

雷红鹏

世界资源研究所 | 评审专家

李兵

青岛市工程咨询院 | 评审专家

李宁

亚洲开发银行 | 评审专家

李园原

水利部水利水电规划设计总局 | 评审专家

刘世杰

青岛市水利勘测设计研究院 | 评审专家

罗天一

世界资源研究所 | 评审专家

毛紫薇

世界资源研究所 | 评审专家

夏克森

青岛中法海润供水有限公司 | 评审专家

薛欣喜

青岛市海润自来水集团有限公司 | 评审专家

尹蕾

世界资源研究所 | 评审专家

张国辉

青岛市市政公用局 | 评审专家

张悦

建设部 | 评审专家

赵云峰

青岛市城乡建设委员会 | 评审专家

陈永军

青岛市董家口开发建设办公室 | 咨询专家

李建波

大唐黄岛电厂 | 咨询专家

李云玲

水利部水利水电规划设计总院 | 咨询专家

林群

青岛市发展改革委 | 咨询专家

刘大伟

青岛市工程设计院 | 咨询专家

罗书凯

青岛碱业股份有限公司 | 咨询专家

宋宝来

青岛市水利局 | 咨询专家

温鲁哲

青岛市水利局 | 咨询专家

王建平

青岛新河生态化工产业基地 | 咨询专家

于丽丽

水利部水利水电规划设计总院 | 咨询专家

章程

青岛市工程咨询院 | 咨询专家

赵培春

青岛泽润中水有限公司 | 咨询专家

郑云龙

青岛市工程咨询院 | 咨询专家



执行摘要

水资源和能源是影响城市可持续发展的重要制约因素，两者之间同时还存在着不可割裂的紧密联系。能源生产需要大量的水资源，而水的生产，特别是非常规水资源（例如外调水、海水淡化等）也需要消耗大量的能源。随着水质要求的提高以及非常规水源的开发和利用，城市水系统的能耗可能会出现激增，增加城市的温室气体排放。但是，城市水系统的能耗问题往往被低估甚至忽略。

青岛是我国北方典型缺水海湾城市，人均水资源量约171立方米，仅为全国平均水平的12%。为了满足城市人口增长和经济发展带来的供水需求增长，青岛市正在考虑大力发展海水淡化和增加外调水供应。然而，海水淡化和外调水都将不可避免地增加城市供水系统能耗，并有可能影响青岛市的低碳城市发展目标。因而寻求既能保障供给，又能降低供水系统碳足迹的水源解决方案是青岛市未来建设和发展需要全盘考虑的问题之一。

为帮助青岛市建立可持续宜居城市，解决发展与环境资源之间的矛盾，世界资源研究所、阿特金斯（英国）与青岛市工程咨询院在卡特彼勒基金会和英国外交与联邦事务部全球繁荣基金的资助下，在青岛市发展和改革委员会、青岛市市政公用局、青岛市水利局的支持下，组织了一个由中、美、英三国专家组成的研究团队，帮助青岛市分析和寻求城市水源配置中的水资源与能源平衡，重点分析青岛市的不同水源选择对供水成本、能耗以及温室气体排放的影响。

本报告从青岛水资源禀赋分析、未来用水趋势、水系统潜在的能耗、2020年水系统能耗情景分析等方面入手，识别了青岛各类水源的供水潜力和优缺点，为决策者制定可持续的低碳供水策略，优化配置各类水源提供了建议。

青岛市水资源特点及利用现状

青岛市是我国北方沿海严重缺水城市之一，其水资源禀赋具有水资源时间分布不均（年际年内变化大），空间分布不均（人口密度最高、开发强度最大的中心城区却是水资源最为缺乏的区域），水资源连丰、连枯明显等特点。

经过多年努力，青岛市工业用水效率已经达到国内领先水平，人均居民用水量也处于中低水平，也就是说，青岛用水效率进一步提升的空间有限。随着人口增长、经济发展和居民生活水平的不断提高，城市用水需求将进一步增长，发展再生水、淡化海水等非常规水资源以及依靠外调水是解决青岛市日益增长的用水需求的必然选择。

青岛市2020年用水需求

根据本研究分析，预计青岛市2020年的总需水量将达到14.8亿 m^3 。其中，居民生活用水（含城镇居民生活用水、城镇公共用水）需水量将达到5.83亿 m^3 ，较2011年上升89%；工业需水量约3.01亿 m^3 ，同期上升58%；农业需水量（含农村居民生活用水、畜禽养殖、灌溉用水）约为4.86亿 m^3 ，同期上升7%；生态用水量为1.1亿 m^3 ，同期上升94%。可以看出，居民生活用水在未来将是最大的用水户，而农业用水将基本保持稳定。

根据《关于印发山东省实行最严格水资源管理制度考核办法的通知》（鲁政发[2013]14号），青岛市2020年用水总量控制目标为14.73亿 m^3 ，略低于研究预测值。这意味着青岛市将面临严峻的水资源挑战，不仅需要进一步加强节水工作、提高各行业用水效率（特别是农业和生活用水）；而且还需要考虑发展再生水、雨水利用和淡化海水等不计入用水总量指标的非常规水源。

青岛市各类水源的风险特征、供水潜力及制水能源强度分析

青岛市未来主要可用水源包括：本地地表水、本地地下水、黄河调水、长江调水、淡化海水和再生水。

- 不同水源风险特征（详见表0-1）：青岛的本地地表水主要依靠水库，其优点是水质较好、能耗低，但应对气候变化风险的能力较弱；地下水源现主要为农用，土地占用和资金投入小，但是过度开发不易恢复，不利于水资源保护；外调水有利于本地水资源的保育，但前期土地占用和资金投入大，能耗和成本相对较高，原水水质受沿岸污染影响的风险较大；海水淡化的优势在于供水保障率高、应对气候变化风险能力强，但是成本高、能耗高的缺点也比较明显；再生水的优点与海水淡化类似，且成本更低，能耗更小。

- 不同水源的供水潜力（详见图0-1）：根据分析，在不包括淡化海水的前提下，青岛市其他各类水源的供水总潜力为22.85亿 m^3 ，其中本地地表水和地下水的供水潜力为14.63亿 m^3 。如果提高青岛本地水生态安全系数，即地表水开发利用率不超过0.4，地下水开发利用率不超过0.5，则本地水资源供水潜力仅为11.04亿 m^3 （其中，地表水潜力6.4亿 m^3 ，地下水潜力4.64亿 m^3 ），远低于青岛市的用水需求。因而青岛市必须通过外调水、再生水，或者淡化海水来解决水资源供需矛盾。

- 不同水源的制水能耗（详见图0-1）：以达到饮用水水质为标准，淡化海水的单位制水能耗最高，约4kWh/ m^3 ，为能耗最低的本地地表水单位制水能耗的10倍之多。不同类型水源的制水能耗排序为：本地地表水<外调水（引黄）<地下水<高品质再生水（新生水）<外调水（引江）<苦咸水淡化<海水淡化。非常规水源中，高品质再生水（新生水）的单位制水能源为0.82kWh/ m^3 ，低于引江调水的制水能耗（1.136kWh/ m^3 ）。

表 0-1 | 各类水源的供水风险比较

指标	本地地表水 (水库)	本地地下水	外调水	海水淡化	再生水	雨水利用
水质风险影响	中	中	中	低	中—低	高
水源保证率 风险影响	中	中	中	低	低	高
土地占用 风险影响	高	低	高	低	低	低
资金投入 风险影响	高	低	高	高	中	低
能源消耗 风险影响	低	中	高	高	中—高	中
生态环境 风险影响	高	中	高	低	低	低
工程移民 风险影响	高	低	中	低	低	低
民众接受 风险影响	低	低	中	高	高	中
气候变化 风险影响	高	高	高	低	低	高

图 0-1 | 青岛市不同类型水源的供水潜力与取水制水能耗曲线

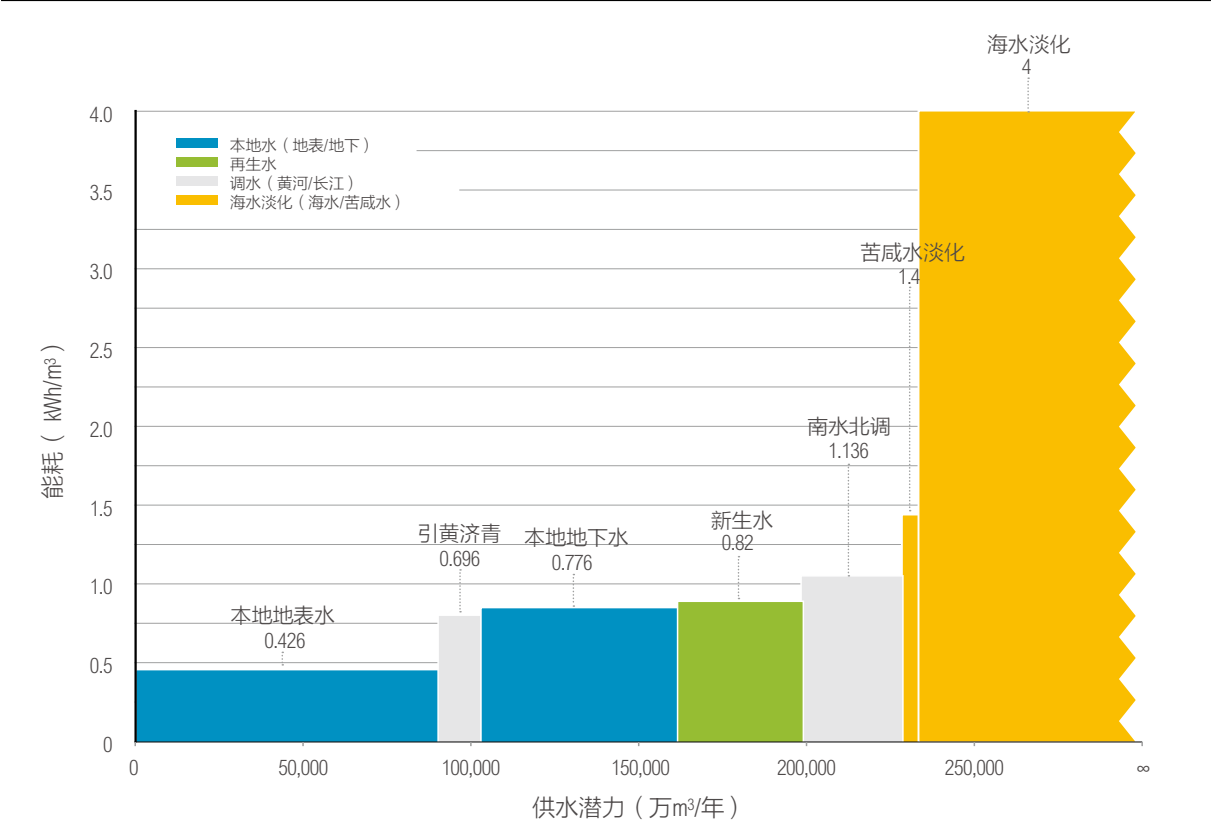


表 0-2 | 青岛市2020年水量分配情景设置

情景	水源类型	海水淡化优先情景 供水量 (亿m ³)	再生水利用优先情景 供水量 (亿m ³)	调水优先情景 供水量 (亿m ³)
地表 35 基础 情景	本地地表	5.60	5.60	5.60
	地下	5.50	5.50	5.50
	引黄	1.10	1.10	1.10
	引江	0.70	0.33	2.20
	海淡	1.53	0.04	0.04
	低品质再生水	0.37	0.37	0.37
	高品质再生水 (新生水)	0.00	1.87	0.00
	合计	14.80	14.80	14.80
	水源类型	海水淡化优先情景 供水量 (亿m ³)	再生水利用优先情景 供水量 (亿m ³)	调水优先情景 供水量 (亿m ³)
地表 40 基础 情景	本地地表	6.40	6.40	6.40
	地下	5.50	5.50	5.50
	引黄	1.00	0.63	1.10
	引江	0.00	0.00	1.40
	海淡	1.53	0.04	0.04
	低品质再生水	0.37	0.37	0.37
	高品质再生水 (新生水)	0.00	1.87	0.00
	合计	14.80	14.80	14.80
	水源类型	海水淡化优先情景 供水量 (亿m ³)	再生水利用优先情景 供水量 (亿m ³)	调水优先情景 供水量 (亿m ³)
地表 55 基础 情景	本地地表	8.80	8.80	8.80
	地下	5.50	5.50	5.50
	引黄	0.00	0.00	0.10
	引江	0.00	0.00	0.00
	海淡	0.13	0.04	0.04
	低品质再生水	0.37	0.37	0.37
	高品质再生水 (新生水)	0.00	0.10	0.00
	合计	14.80	14.80	14.80

2020年青島市制水能耗与温室气体排放情景分析

本研究以用水量低于国家下达的用水总量红线（14.73亿m³），以本地水资源开发为首选水源，以及考虑调水时优先使用黄河调水配额为基本条件，分别设置了地表水利用率达到35%（与青岛2011年本地地表水利用率持平）、40%（地表水合理开发利用上限）和55%三个基础情景（地表水开发利用极限），简称“地表35”、“地表40”和“地表55”情景。在此三个基本情景的基础上，我们分别设置再生水优先、海水淡化优先和调水优先等亚情景。其中，海水优先情景是指在非本地地表水以外的水资源中，优先考虑实现并配置青岛市2020年规划的海水淡化能力，再生水利用和黄河调水水量保持2011年水平；再生水利用优先情景中假设青岛市现有低品质再生水利用保持不变，同时增加高品质再生水（新生水）生产能力至其最大供水潜力的50%，海水淡化和黄河调水水量保持2011年水平，剩余供水缺口由长江调水补充；外调水优先情景下是指再生水利用、海水淡化，以及黄河调水水量保持2011年水平，供水缺口由长江调水补充。各情景的水量分配见表0-2。

根据分析结果，在维持地表水开发利用率35%的情景下，青岛市2020年的制水总能耗将比2011年显著上升，上升的幅度表现为：再生水利用情景<调水情景<海水淡化情景。三种亚情景较2011年的温室气体排放量

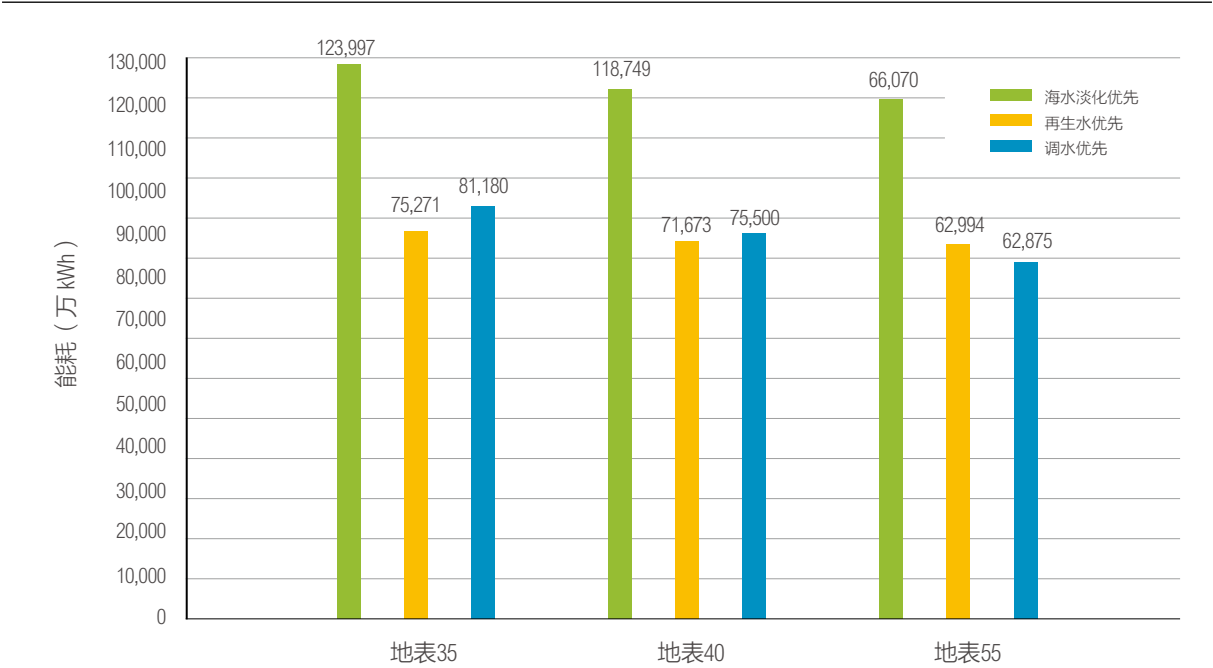
都所有上升。其中，上升幅度最大的是海水淡化情景，其次是调水情景，而再生水情景的排放量最小。再生水优先情景下，青岛水系统的温室气体排放量比调水情景低8%，比海水淡化情景低40%。

当青岛市地表水开发利用率达到40%的情景下，再生水利用情景的能耗最低，较2011年基准增加53%；其次是调水情景，同比增长61%；海水淡化情景能耗最高，约为2011年基准情景制水能耗的2.53倍。再生水利用方案所带来的碳排放最小，比海水淡化情境的排放量要低40%；调水方案的碳排放略高于再生水利用（高5%）。

如果青岛能将本地地表水资源的利用率提高到55%，本地地表水和地下水的供水总量将达到14.3亿，与14.8亿m³的需水量相比只有5000万m³的缺口。发展海水淡化和再生水利用的亚情景将完全不需要从异地调水，而调水亚情景也只需从黄河调水970万m³。就碳排放而言，采用海水淡化仍然是碳排放最高的方案，比调水情境和再生水方案的排放量要高5%。

综合“地表35”、“地表40”和“地表55”三个情景，能耗表现为地表35 >地表40 >地表55，即对本地地表水的利用率越高，整个供水系统的能耗就越低（图0-2）。总体看来，发展再生水，利用非常规水资源补充本地水资源的不足，将是青岛保障水源安全，建设低碳城市的最佳选择。

表 0-2 | 对3个情景的系统能耗比较



青岛市不同类型水源制水成本分析

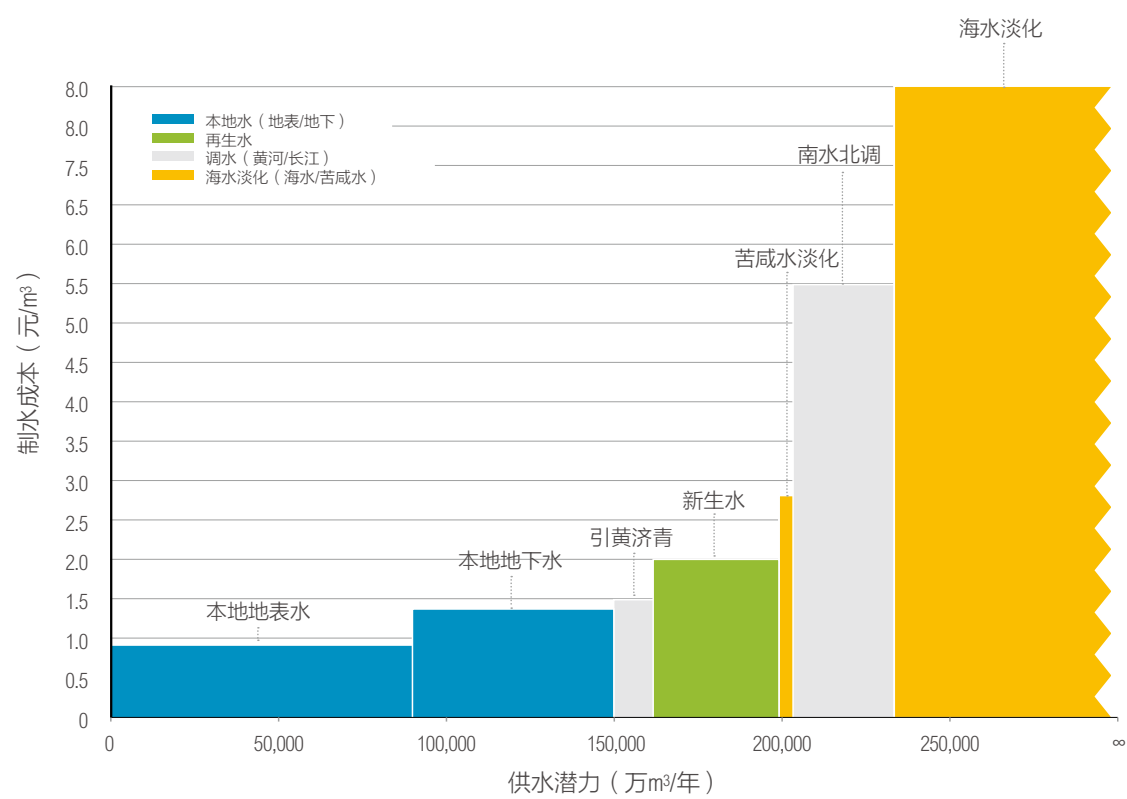
在目前的技术水平下，青岛市各类水源的制水成本为：本地地表水<地下水<引黄济青<新生水<苦咸水淡化<南水北调<海水淡化（图0-3）。在非常规水资源中，高品质再生水（新生水）的成本优势最明显，仅为海水淡化的1/4，甚至低于南水北调的成本。

从制水成本的角度考虑，青岛市应该优先利用本地水资源，其次是外调的黄河水和来自于城市污水的新生水；南水北调和海水淡化的成本都比较高，在增加制水过程碳排放的同时，也会造成供水成本的增加。

由于青岛市已经建成13.3万m³/日的海水淡化能力，从成本因素考虑，海水淡化优先用于工业用水将更为有利。虽然在目前的技术条件下，海水淡化与其他水资源相比并没有成本优势，但由于淡化水不受时空和气候影响，供应稳定，水质好，特别适合于需要纯水的工业企业，比如电力、化工、钢铁和芯片制造。

与此类似，新生水做工业用途的成本优势更加明显，比自来水制纯水可以节约一半的成本。

表 0-3 | 青岛市各类水源制水成本曲线



结论与建议

- 青岛市用水需求和水资源供给缺口将随着社会发展持续上升，城镇生活用水增速及占比居首，各区增速和驱动因素不一。预计青岛市2020年需求量将达到14.8亿立方米，较2011年增长47%。其中，工业需水量、农业需水量、城镇生活需水量（含城镇公共用水）增长幅度分别为58%、7%和89%；城镇生活用水将持续成为最主要的用水类型，占全社会用水的40%，工业用水占比将保持稳定，农业用水占比预计从2011年的45%下降到33%。

- 开发非常规水资源（包括远距离调水、污水再生利用、海水淡化）是解决青岛用水需求的必然选择，水源之间的配置直接影响城市水系统的能耗与碳排放。以达到饮用水水质标准为基础，青岛市可用水源类型的吨水制水能耗（含取水）为0.426-4kWh，制水能耗从低到高依次为本地地表水、引黄济青、地下水、再生水、南水北调、苦咸水淡化、海水淡化，其中，能耗最高的海水淡化是能耗最低的本地地表水的10倍之多。因而未来青岛市的水源选择以及不同类型水源之间的配置都将直接影响到青岛市城市水系统的能耗和碳排放，形成潜在的碳排放压力。

- 青岛市城市水系统不可避免面临能耗强度和碳排放的增长趋势，在水源规划中纳入碳核算和能源管理，降低城市水系统碳足迹，是低碳可持续发展的必然选择。预计青岛2020年制水系统温室气体排放将比2011年上升34%-164%。欧美国家已经开始关注因为城市水源结构调整以及水质要求提高带来的城市水系统能耗强度和碳排放增加问题，并已经针对城市水规划制定碳核算制度，要求选择更为低碳的城市水系统管理。随着青岛市经济的发展，城市水系统的能耗以及碳排放也将成为新的挑战，因此建议青岛市尽早在城市水源规划中纳入碳核算和能源管理机制，发展低碳可持续的城市水系统。

- 再生水在非常规水资源中最具碳排放和成本优势。在非常规水源中，高品质再生水（新生水）不仅具有较高的保证率，同时还具备比其他非常规水资源制水碳强度低和成本低的优势。根据测算，高品质再生水的单位吨水制水能耗为0.82kWh，低于南水北调和海水淡化；而且制水成本仅为海水淡化的四分之一，亦低于南水北调的成本。

- 不同类型水源的配置不仅要考虑成本和保证率等因素，还应充分考虑用水类型、制水能耗与碳排放、环境生态健康风险等因素。城市在选择水源时需要考虑多方面的因素，除了水源水质、保障率和经济成本以外，在环境保护和气候变化的背景之下，不同类型水源的能源消耗、生态环境影响及应对气候变化风险的能力等风险也应纳入到城市水源选择的考虑因素当中。

- 建立分用户、分水源的精细化城市水资源管理。青岛市应该根据各区的水资源禀赋和用水特点，合理配置水资源。未来，东岸城区将以居民生活和服务业为主，我们建议将本地地表水资源和外调水作为生活用水，同时发展（低品质）再生水用于市政绿化、居民冲厕等非接触、非饮用用途；在面临城市人口快速增长的工业发展的西岸城区，我们建议将（高品质）再生水作为工业用水的主要来源，而把外调水和本地水资源作为居民生活用水。

- 深化水价改革，继续强化节水管理。目前，青岛的水价依然偏低。考虑到青岛居民的收入水平相对较高，应当适当提高水价，力争做到成本回收；同时，推进阶梯水价的实施，兼顾社会公平，保障低收入家庭的基本用水需求。此外，建议从可持续发展角度，以价格手段，鼓励使用再生水、淡化海水等，适当加大对水循环利用的财政补贴，包括优惠价格的补贴。同时，政府要加大投入，通过多种形式，开展节水宣传教育，增强全社会尤其是公众的节水意识。



EXECUTIVE SUMMARY

Water and energy are inextricably linked. Energy production depends on water, while the urban water system – particularly inter-basin water transfer or desalination – requires a large amount of energy. Thus, water supply is closely connected to a city's energy consumption. With increasing expectations on water quality and exploitation of unconventional water resources, energy requirement of the urban water system may upsurge and subsequently raise greenhouse gas emissions.

Located in China's east coast, Qingdao faces chronic water shortage, where per capita water resources are only 12% of the national average. In order to meet its growing water demand, long-distance water transfer or the exploitation of unconventional water resources (such as desalination and reclaimed water) are already seen as a necessary step for. Since the energy intensity of producing water from desalination, reclaimed water or long-distance water diversion is much higher than that for supplying water from conventional sources, Qingdao must work out how to allocate its various water sources so that it can ensure the security of its water supply while also reducing the urban water supply's carbon emissions, if it is to become a low-carbon, sustainable and livable city.

With financial support from the Caterpillar Foundation and the UKFCO Strategic Prosperity Fund, and the help of Qingdao's Development and Reform Commission, the Qingdao Water Supply Division, and the Qingdao Municipal Water Conservancy Bureau, the World Resources Institute and Atkins (UK) formed an international research team of specialists from China, the US and the UK, to help Qingdao analyze and find a water-energy resource balance for its urban water allocation mix.

The project team used a multi-pronged approach to identify the water supply potential and the advantages and disadvantages of using various types of water sources by analyzing Qingdao's naturally-occurring water resources, predictions of the future trends in water use, potential energy consumption of the urban water system, and then developing scenario analyses of the energy demand of the urban water supply system in 2020. We then used the analyses to provide recommendations to policymakers to develop strategies for a sustainable, low-carbon water supply, and to optimize the allocation of water resources.

CHARACTERISTICS AND UTILIZATION OF QINGDAO'S WATER SOURCES

Qingdao suffers from an acute water shortage. Its water resources are unevenly distributed, both temporally (inter-annual and intra-annual variations are large) and spatially (the urban center, which has the highest population density and the highest development density, is the area which has the worst water shortages). It is characterized by having relatively plenty of water for a short period of time, and then followed by prolonged draught.

With decades of effort on water saving, Qingdao is now a national leader in industrial water efficiency and also has relatively low per capita domestic water use. But this also means that any further improvement to its water efficiency is severely limited. Along with economic development and the continual rise in living standards, per capita water consumption may rise further, and this means that the pressure on water supply will inevitably grow more intense. Reliance on alternative water sources, such as long-distance water transfer or desalination, which will drive up the urban water system's energy consumption and greenhouse gas emissions, will exert additional pressure on Qingdao to reduce its carbon emissions.

WATER DEMAND PROJECTION FOR QINGDAO IN 2020

By 2020, Qingdao's annual water demand will reach 1.48 billion m³. Of this, industrial water demand will be about 301 million m³, up 58% from 2011; agricultural water demand (including rural residents' water usage, water for livestock and for irrigation) will be

about 486 million m³, up 7% from 2011; domestic water demand (including householder use and urban public services) will be 583 million m³, up 89% from 2011; and environmental water demand will be 110 million m³, up 94% from 2011. We can see from this that the biggest water consumers in the future will be domestic consumers.

Based on the provincial water quotas scheme, Qingdao is expected to limit total water use under 1.47 billion by 2020, which is slightly lower than our projection. Therefore, Qingdao will need to further promote water conservation, and tap unconventional water resources (e.g. reclaimed wastewater, desalination) which are excluded from the government quotas.

RISKS CHARACTERISTICS, WATER SUPPLY POTENTIAL AND ASSOCIATED ENERGY INTENSITY OF VARIOUS WATER SOURCES IN QINGDAO

Qingdao's principal future exploitable water sources are: local surface water, local groundwater, water diversion from the Yellow River/Yangtze River, seawater desalination and reclaimed wastewater.

Table 0-1 shows the different types of risks associated with Qingdao's various water sources. Each water source has its own particular risks associated with it. For example, even though supplies of seawater for desalination are reliable, and desalination is not vulnerable to climate change, it consumes a lot of energy, it requires a lot of investment and public acceptance is low. Factors such as the investment needed, the environmental impact, and population resettlement for water diversion also pose a large risk.

Table 0-1 | Risks comparison of different water sources

INDICATORS	LOCAL SURFACE WATER (RESERVOIR)	LOCAL GROUNDWATER	WATER DIVERSION	SEAWATER DESALINATION	RECLAIMED WATER	RAINWATER
Water quality	Medium	Medium	Medium	Low	Low-High	High
Water continuity	Medium	Medium	Medium	Low	Low	High
Impact on land use	High	Low	High	Low	Low	Low
Investment	High	Low	High	High	Medium	Low
Energy consumption	Low	Medium	High	High	Medium-High	Medium
Environmental impact	High	Medium	High	Low	Low	Low
population resettlement	High	Low	Medium	Low	Low	Low
Public acceptance	Low	Low	Medium	High	High	Medium
Vulnerability to climate change	High	High	High	Low	Low	High

Figure O-1 shows the water supply potential and the energy consumption for unit water supply of various water sources.

- Not including desalination, the maximum water supply potential of all available water resources is 2.285 billion m³. Of this, the maximum available from local surface water and groundwater resources is 1.463 billion m³. The utilization rate for surface water must not exceed 40% if Qingdao wants to maintain its water use at a sustainable level, while for groundwater it must not exceed 50%. In that case, the local water supply potential will be 1.104 billion m³ (640 million m³ from surface water and 464 million m³ from groundwater). Therefore, for Qingdao to satisfy its 2020 demand for water, it must resort to water diversion, reclaimed water, and/or seawater desalination.

Figure O-1 The water supply potential and energy consumption of Qingdao's water sources

- Meeting drinking water quality standards, the energy consumption for unit water supply of seawater desalination is the highest at about 4kWh/m³, around 10 times higher than that for surface water, which has the lowest energy consumption. Arranged in order of energy consumption for unit water supply from the lowest to the highest, the water sources are: surface water < river diversion (Yellow River) < groundwater < reclaimed water (NEWater) < water diversion (Yangtze River) < brackish water desalination < seawater desalination.

Figure O-1 | The water supply potential and energy consumption of Qingdao's water sources

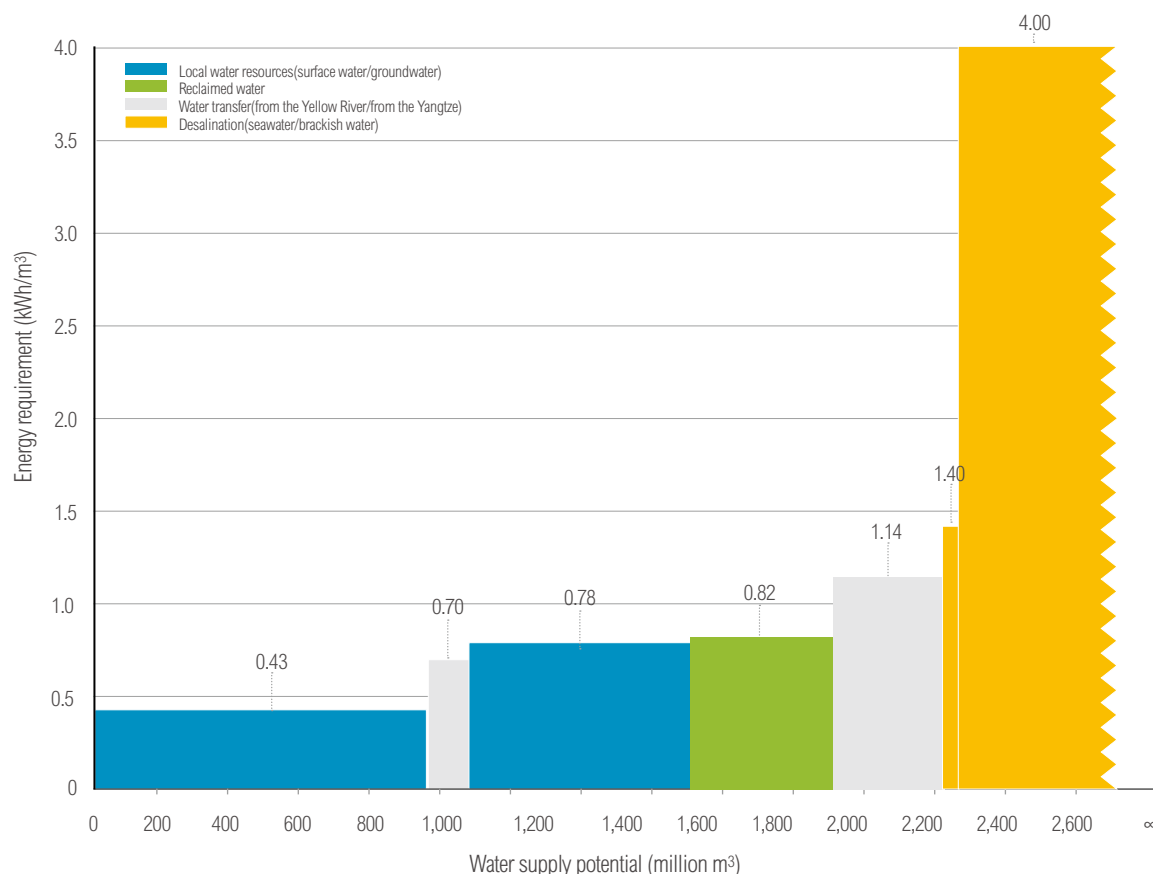


Table o-2 | **Water source allocation scenarios for Qingdao, 2020**

SCENARIO	TYPE OF WATER SOURCE	SEAWATER DESALINATION SUB-SCENARIO WATER SUPPLY (100 million m ³)	RECLAIMED WATER SUB-SCENARIO WATER SUPPLY (100 million m ³)	WATER DIVERSION SUB-SCENARIO WATER SUPPLY (100 million m ³)
Surface water 40 baseline scenario	Local surface water	6.4	6.4	6.4
	Groundwater	5.5	5.5	5.5
	River diversion (Yellow River)	1.1	1.1	1.1
	River diversion (Yangtze River)	0.78	0.04	1.91
	Seawater desalination	1.53	0.4	0.4
	Low-quality reclaimed water	0.37	0.37	0.37
	High-quality reclaimed water	0	1.87	0
	Total	15.68	15.68	15.68
	TYPE OF WATER SOURCE	SEAWATER DESALINATION SUB-SCENARIO WATER SUPPLY (100 million m ³)	RECLAIMED WATER SUB-SCENARIO WATER SUPPLY (100 million m ³)	RIVER DIVERSION SUB-SCENARIO WATER SUPPLY (100 million m ³)
Surface water red-line scenario	Local surface water	7.33	7.33	7.33
	Groundwater	5.34	5.5	5.5
	River diversion (Yellow River)	1.1	0.21	1.1
	River diversion (Yangtze River)	0	0	0.98
	Seawater desalination	1.53	0.4	0.4
	Low-quality reclaimed water	0.37	0.37	0.37
	High-quality reclaimed water	0	1.87	0
	Total	15.68	15.68	15.68
	TYPE OF WATER SOURCE	SEAWATER DESALINATION SUB-SCENARIO WATER SUPPLY (100 million m ³)	RECLAIMED WATER SUB-SCENARIO WATER SUPPLY (100 million m ³)	RIVER DIVERSION SUB-SCENARIO WATER SUPPLY (100 million m ³)
Surface water 55 scenario	Local surface water	8.8	8.8	8.8
	Groundwater	4.98	4.24	5.01
	River diversion (Yellow River)	0	0	1.1
	River diversion (Yangtze River)	0	0	0
	Seawater desalination	1.53	0.4	0.4
	Low-quality reclaimed water	0.37	0.37	0.37
	High-quality reclaimed water	0	1.87	0
	Total	15.68	15.68	15.68

ENERGY CONSUMPTION AND GREENHOUSE GAS EMISSIONS FROM QINGDAO'S WATER SECOTR IN 2020

Based on prerequisites of (1) meet water use target (1.473 billion cubic meters by 2020); (2) prioritize the exploitation of local water resources; and (3) when considering water diversion, it is preferable to divert from the Yellow River, we created three scenarios—one with a surface water utilization rate of 35% (current level, short as surface 35 scenario), one of 40% (keeping within sustainable exploitation and utilization limits, short as surface 40 scenario), and one of 55% (extreme condition, surface 55 scenario). Within these three scenarios we then created three sub-scenarios: one, which emphasizes seawater desalination, the second, which emphasizes reclaimed water, and the third, which emphasizes water diversion. In the desalination sub-scenario, we assume all of Qingdao's proposed desalination capacities were in place while the amount of reclaimed wastewater and transferred water remain the same as 2011. Similarly, we assume half of Qingdao's municipal wastewater was reused in the reclamation sub-scenario and more transferred water from the Yangtze were used in the transfer sub-scenario.

Table 0-2 shows the various source water allocations under the different scenarios. For a more detailed explanation please see the full report.

By 2020, if Qingdao keeps the current surface water utilization rate of 35%, total energy use will see a significant increase. The desalination sub-scenario has the highest growth in energy

requirement while the reclamation sub-scenario appears to be the lowest of three. Accordingly, greenhouse gas emissions from the water sector showed a similar upward trend, with the reclamation sub-scenario bringing the lowest emissions, or 40% lower than the desalination sub-scenario.

Under the surface 40 scenario, energy consumption of the reclamation sub-scenario will be the lowest, while seawater desalination has the highest energy consumption, rising 153% from 2011 level. In terms of greenhouse gas emissions, the desalination sub-scenario again dwarfs the other two sub-scenarios.

If Qingdao to increase its surface water utilization rate to 55%, local surface water and groundwater were expected to provide 1.43 billion cubic meters of water, only 50 million short from the total water demand. The scheme prioritizing water diversion will lead to a 34% increase in energy consumption compares to 2011 baseline level, while the reclamation sub-scenario and desalination sub-scenario show potential increase of 34.3 and 41%, respectively. The desalination sub-scenario is still the most carbon intensive solution, causing 5% higher greenhouse gas emissions than the water diversion sub-scenario or the reclaimed water scenario.

To compare the energy consumption of above three scenarios, we find the more local surface water is used, the lower energy requirement of the water supply system: surface 55 < surface 40 < surface 35 (Figure 0-2). Given Qingdao's elastic interannual variability, it's critical to close the demand-supply gap by choosing the least carbon intensive type of unconventional water.

Figure 0-2 | Comparison of three scenarios

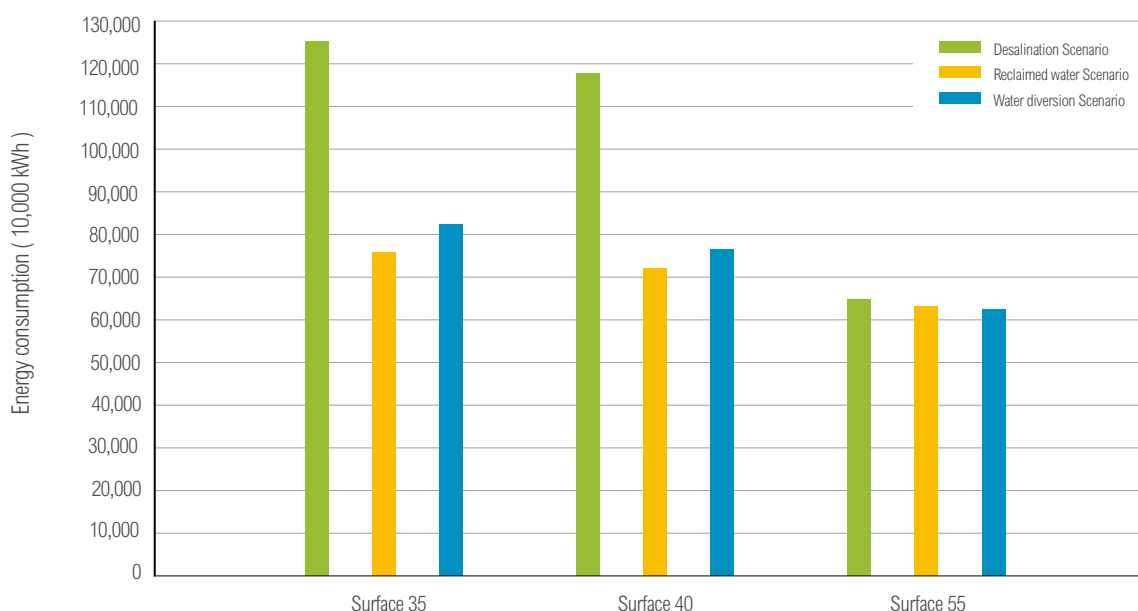
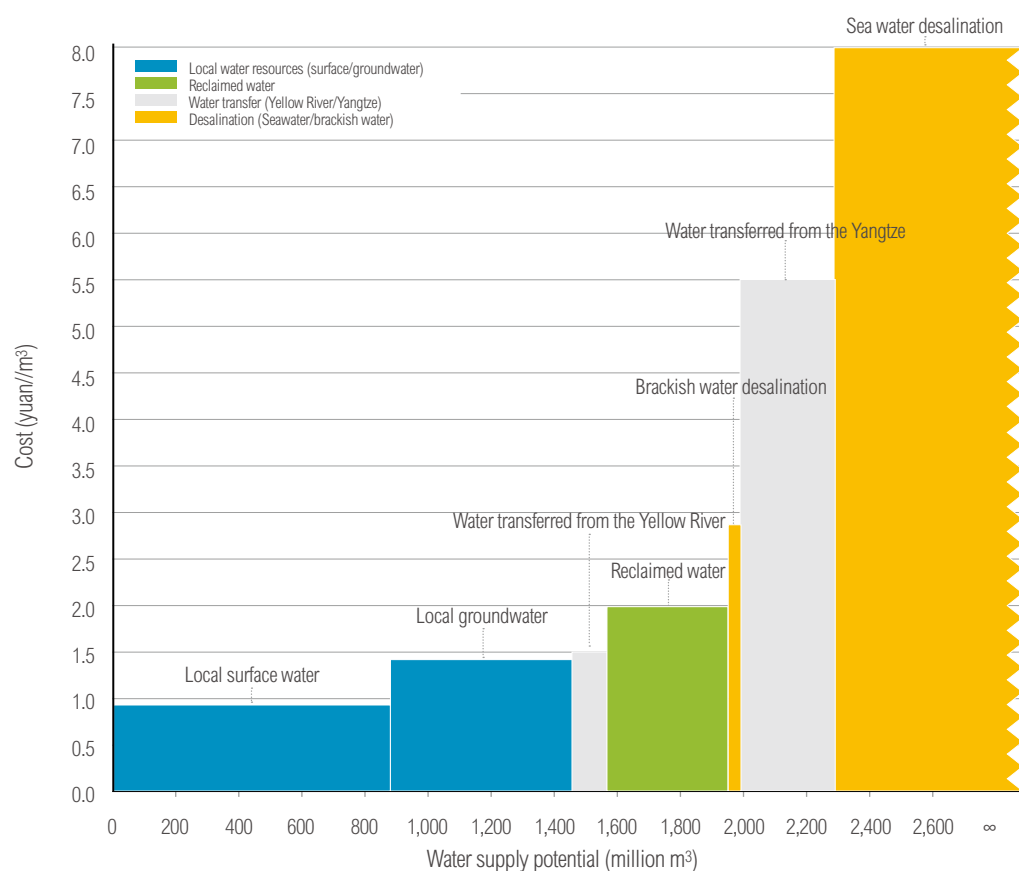


Figure 0-3 | **Costs of Qingdao's Water Sources**



A COST ANALYSIS OF QINGDAO'S WATER SUPPLY SOURCES

Figure 0-3 shows the water supply potential and the cost per unit water produced for Qingdao's various water source options. We can see that using current levels of technology, placed in order of increasing cost they are: local surface water < groundwater < water diversion (Yellow River) < NEWater < brackish water desalination < water diversion (Yangtze River) < seawater desalination. Of the conventional water sources, the cost advantages of NEWater are the most obvious; not only are they ¼ that of seawater desalination, but they are even lower than water diversion (Yangtze River).

From a cost perspective, Qingdao should preferentially choose local water resources, followed by water diversion and then high-grade reclaimed water. The costs of water diversion (Yangtze River) and seawater desalination are both fairly high, and as they also increase carbon emissions, that also adds to the costs of water supply.

Since Qingdao already has a desalination capacity of 133,000 m³/day, from cost considerations, we recommend that seawater desalination should be used to supply water for industrial use. Although using current technology, seawater desalination is not cost effective compared to other

water sources, since there is a stable supply of desalinated water and it is of good quality, irrespective of the time or weather, it is especially suited to those industries which require purified water, for example in the manufacture of electronics, chemicals, steel and microchips.

Similarly, the cost advantages of NEWater (reclaimed water) for industrial use are also clear. It costs about half as much to produce purified water from NEWater than purified water produced from tap water.

Conclusions and Recommendations

- The shortfall between Qingdao's water demand and water resources will continue to grow along with socio-economic development, the biggest contributor to this will be the growth in urban domestic water use. The speed of increase in domestic use and its proportion of all use will always be highest in urban areas and the speed of increase of use and the reason behind that increase will vary between districts. Water demand in Qingdao by 2020 is expected to reach 1.48 billion cubic meters, up 47% from 2011. The growth rate in industrial water demand will be 58%, agricultural water demand will grow 7% and urban domestic water demand (including urban public services) will grow by 89%. Urban domestic

users will continue to be the principal water consumers, comprising 40% of all society's water use. The percentage consumed by industry will remain stable, while the percentage used by agricultural consumers is expected to fall from 45% in 2011 to 33% by 2020.

- Qingdao must exploit unconventional water resources (including long-distance water diversion, reclaimed water, and seawater desalination) if it is to solve its water demand problem. Choice of water source allocation will have a direct impact on the energy consumption and carbon emissions of the urban water system. To meet drinking water quality standards, of the water sources available for Qingdao, the energy consumption is between 0.426 and 4 kWh per cubic meter. In order of increasing energy, the water sources are: local surface water < water diversion (Yellow River) < groundwater < NEWater < water diversion (Yangtze River) < desalination of brackish water < seawater desalination. As the most energy-intensive, seawater desalination has an energy consumption per unit water supply which is 10 times larger than that of local surface water, which is the least energy intensive. Thus, which water source Qingdao chooses for its future water supply will have a direct impact on its urban water system's energy consumption and carbon emissions.

- Qingdao's urban water system faces an inevitable rise in energy intensity and carbon emissions. It must incorporate carbon accounting and energy management into its water supply planning to help it reduce the urban water system's carbon footprint allowing it to pursue low-carbon sustainable development. We estimate that greenhouse gas emissions from Qingdao's water sector will increase by 34% to 164% percent under different policy scenarios. The US and Europe are already aware of how changes to the structure of urban water resources and the demand for better quality water have caused urban water system energy intensity and carbon emissions to rise. These nations are now using carbon accounting when drawing up their urban water plans, with the aim of deriving a low-carbon water source allocation system. As Qingdao's economy develops, the energy consumption and carbon emissions of its urban water system will become fresh challenges. Especially since Qingdao is under pressure to follow a low-carbon development path and reduce its carbon emissions, we recommend that the city incorporate carbon accounting and energy management into its urban water source planning as soon as possible and build a low-carbon and sustainable urban water system.

- Of all the unconventional sources of water, reclaimed water is the best in terms of carbon emissions and cost. High-grade reclaimed water (NEWater) is not only relatively secure in terms of supply, but compared to other unconventional water sources, its carbon intensity and cost of production is also lower. According to our calculations, the energy consumption is 0.82 kWh, lower than water diversion (Yangtze River) and seawater desalination; while its cost

is only one quarter of that of seawater desalination, and also lowers than that of water diversion (Yangtze River).

- Qingdao does not only need to consider factors such as cost and continuity of supply when deciding on a water source allocation mix, it also needs to thoroughly consider the type of water source, energy consumption for unit water supply, carbon emissions, and environmental risks etc. There are many factors that need to be considered when deciding which water sources should be developed. As well as the quality of the water, continuity of supply and the costs involved, because of environmental protection and climate change, energy requirements, environmental impacts, and vulnerability to climate change are also elements that need to be considered when the city decides on a source water allocation mix.

- Customize water source use in accordance with local conditions. Qingdao should adjust the water source allocation mix for each district according to its individual water resources and water use requirements. Because water-intensive industries are relocating out of the eastern coastal districts, in the future, the focus of water supply will be on consumers from the domestic and services sectors. We recommend that local water resources and water diversion to be used for domestic drinking water use, meanwhile (low-grade) reclaimed water can be used for urban greening, residential toilets, and other non-contact and non-potable use. In the industrially-developed western coastal districts, which will experience a rapid expansion in population growth, we recommend high-grade reclaimed water for industry's main supply, with water diversion and the exploitation of local water resources for domestic consumers.

- Qingdao should reform its water tariff and continue prioritizing water saving measures. To date, water tariff of Qingdao is still at a relatively low level against the fact that the city is among one of China's richest. Low water price hinders Qingdao's endeavors to improve urban water service and water use efficiency. In the long run, it would become crucial for the water service sector to fully recover the cost and reflect the true cost of water. Meanwhile, Qingdao should introduce increasing block tariff to encourage water saving. This approach should consider social equity and ensure the basic water demand from low income families. Meanwhile, Qingdao should improve public awareness on water efficiency through outreach activities. Incentives and subsidies should be given to deploy or upgrade water saving facilities.



前言

随着人口快速增长和城市化迅猛发展，全世界对自然资源的需求逐年上升。然而自然资源正面临枯竭危机，煤炭、石油、天然气等不可再生资源不断减少，水、土地等可再生资源也因人类不可持续的开发而出现系统功能退化，人类社会及城市发展正面临水资源、能源、环境、经济等多方面的挑战。

21世纪是城市化的世纪。截至目前，城市人口已经占世界总人口的50%，预计在未来20年内达到60%¹。发展中国家的城市化进程尤为迅速，据联合国经济和社会事务部分析，平均每月有500万人口从农村涌入发展中国家的城市。目前，全世界23个人口超千万的特大城市中有15个在发展中国家（见图1-1），其中4个在中国。预计到2050年，印度城市化率将由目前的30%提高到55%，而中国城市化率将从现在的50%上升至73%²。

图 1-1 | 世界城市化率及城市人口

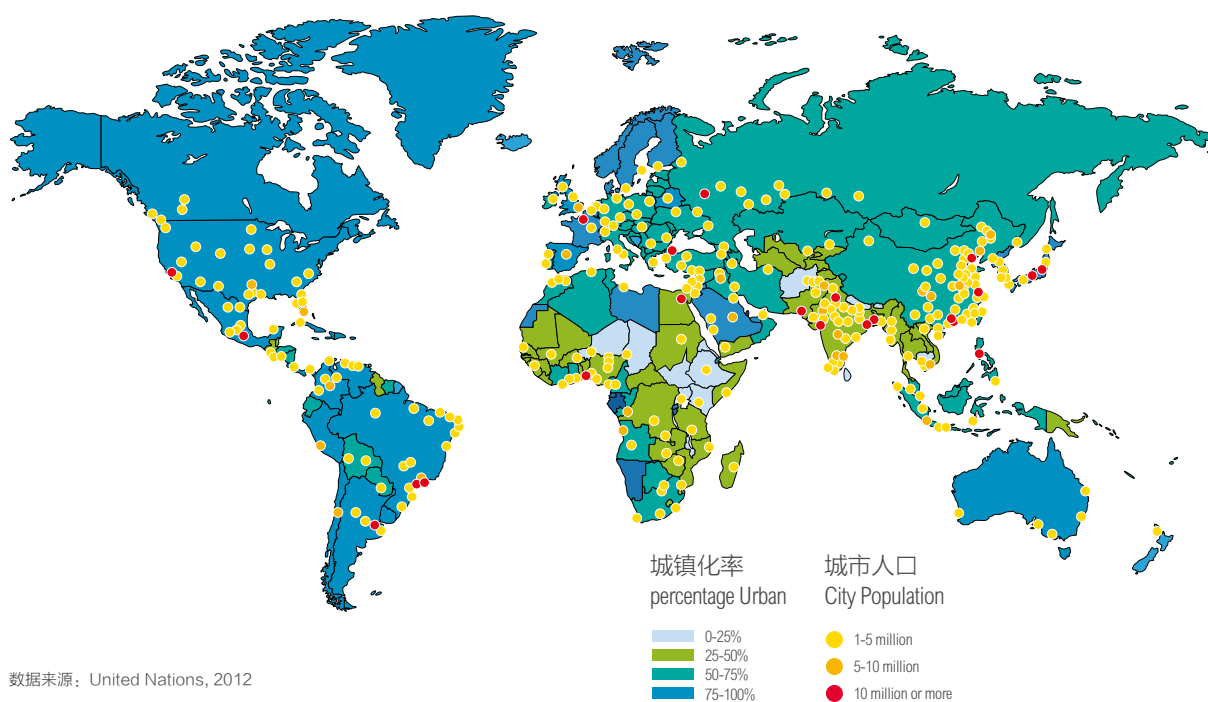
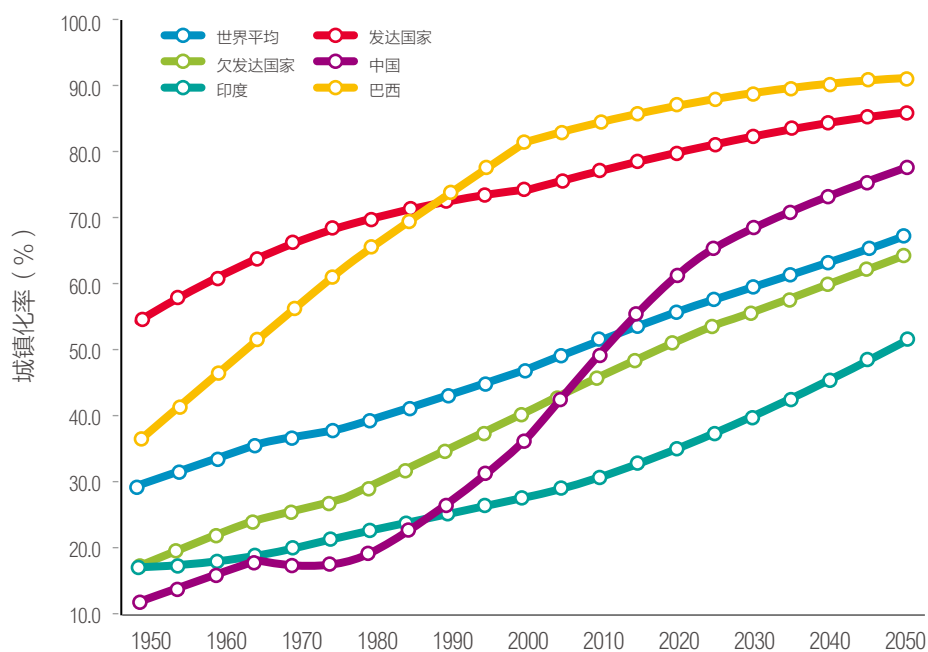


图 1-2 | 世界城市化进程比较（1950-2050年）



与发达国家的城市化进程相比，中国的城市化具有起步晚、增速快的特点（如图1-2所示），城市化率从17%提高到39%只用了40年，而美国花费了80年才实现相同的生长，英国则耗费了120年³。中国城市化所面临的资源环境压力在人类社会发展历史上将前所未有，需要在更加有限的时间内解决由快速城市化进程造成的各种环境与社会问题。

作为拉动经济增长的强大引擎，城市既承载着高强度的社会经济活动，同时也消耗了大量自然资源。联合国人居署（UN-HABITAT）在研究中指出，城市是化石能源消耗最集中的区域，全球75%的能源消耗及80%的温室气体排放都发生在城市；而全球10%的淡水资源被直接用于城市居民生活，20%用于电力生产⁴。预计到2030年，全球能源需求将增长40%，基本都来自城市及其相关工商业活动；与此同时，城市对水资源的需求也在不断增加，国际食物政策研究所（IFPRI）预计2025年全球生活用水量将比1995年增长75%，其中90%的增长将来自发展中国家的城市⁵，而麦肯锡公司（McKinsey & Company）则认为人类社会需水总量将在未来20年内超出可预测供水能力的40%⁶。

中国社会科学院指出，中国已结束以乡村型社会为主体的时代，开始进入以城市型社会为主体的新时代，但高消耗、高排放的粗放发展模式一时还难以从根本上扭转⁷，如我国城市居民的电力消费和生活用水量分别是农村居民的4倍和3倍⁸，能源资源和生态环境压力日益加大。一方面，中国需要更多能源支撑城市发展，全国总装机容量预计2020年将达到15.9亿kW，比2010年增加6.2亿kW⁹，新增量仍以火电和水电为主，需要更多的水资源来支撑能源的生产；另一方面，有限的水资源已经对中国城市发展构成严峻挑战，目前全国2/3的城市缺水，年平均缺水500多亿m³，不少地方水资源过度开发，如黄河流域开发利用程度已经达到76%，远远超出其承载能力¹⁰。

我国城市化程度最高、发展最快的沿海区域，却是中国水资源最紧缺的地区之一。11个沿海省（自治区、直辖市）所辖的52个沿海城市中，极度缺水18个，重度缺水10个，中度缺水9个，轻度缺水9个，近90%的沿海城市存在不同程度的缺水问题，水资源已经成为制约沿海地区经济社会可持续发展的瓶颈¹¹。青岛市便是其中最严重缺水的北方沿海城市之一，全市人均水资源占有量仅313m³，远低于世界公认的绝对缺水界限（人均500m³）；亩均耕地水资源占有量306m³，仅为全国平均值的15%。

为解决青岛市本地水资源严重短缺问题，外调水和开发非常规水资源（如海水淡化、污水再生利用）已经被视为青岛市发展的必然选择。但是，值得注意的是，海水淡化、污水再生利用以及外调水的制水能耗强度都高于常规地表或地下水资源，有些甚至高达10倍以上，青岛市未来水源的选择及配置方案必然会直接影响城市水系统的能源强度、能耗以及碳排放。同时，青岛市正致力于发展低碳的可持续宜居城市，水资源配置带来的供水能源强度激增有可能会加剧青岛市已经严峻的减排压力。因而，如何配置不同类型水资源，既能保障城市供水安全，同时还能够降低城市供水系统的碳排放，是青岛市低碳发展，建设可持续宜居城市需要重视和解决的重要课题。

世界资源研究所、阿特金斯（英国）与青岛市工程咨询院在卡特彼勒基金会和英国外交与联邦事务部全球繁荣基金的资助下，在青岛市发展和改革委员会、青岛市市政公用局、青岛市水利局的支持下，组织了一个由中、美、英三国专家组成的研究团队，帮助青岛市分析和寻求城市水源配置中的水资源与能源平衡，重点分析青岛市的不同的水源选择对供水成本、能耗以及温室气体排放的影响。主要内容包括：

- (1) 分析青岛各类水源（包括本地地表水、地下水、调水、海水淡化、再生水利用等）的制水能耗及成本；
- (2) 预测青岛2020年的城市需水量，并通过不同水源利用情景预测青岛市2020年制水能耗和温室气体排放；
- (3) 识别青岛各类水源的供水潜力和优缺点，为决策者制定可持续的低碳供水策略，优化配置各类水源提供建议。

本报告首先在第二章介绍了市政供水系统与能源消耗、城市温室气体排放之间的关系。第三章主要介绍青岛市经济社会发展情况、水资源禀赋和供水现状，并据此预测了全市2020年的需水量。结合对不同类型水源的特点及制水能源强度分析（第四章），我们在第五章通过情景分析预测了青岛市2020年制水能耗和温室气体排放。最后是结论与建议。

本研究虽然立足于青岛，但在水资源短缺日益突出的背景下，对于其他城市制定水资源战略也具有一定的借鉴意义。同时，本研究为城市水规划提出的分析评价方法，适用于大多数中国城市并有助于全盘考虑城市规划中的水、能源问题。



城市水系统中的水资源—能源关联

2.1 什么是水资源—能源关联

长期以来，人们通常将水资源与能源问题区别对待，水资源和能源的管理也分属不同部门。在制定能源政策或发展规划时，决策者虽然会考虑能源发展的用水需求，但是却很少考虑能源发展计划对该区域的水资源影响（包括水量和水质），也常常忽略当地水资源风险以及水资源短缺对其发展带来的潜在限制和阻碍；与之相应，城市在制定水资源政策和规划时，几乎不关注能源问题（如不同水源类型的制水能耗需求）以及城市水系统的能源管理。

然而，水资源与能源存在着复杂与微妙的关系。一方面，水在能源开采、电力生产中是不可或缺的要素——从煤炭开采到火力发电都离不开水；另一方面，水的生产、输配，以及污水处理和再生

利用都需要消耗大量的能源。水资源、能源二者相辅相成的关系被称作“水资源—能源关联”。

气候变化使得能源和水资源的双向联系变得更加紧密。研究表明，气候变化已经影响到了大气降水的时空分布，引起了洪水、干旱等极端天气的频繁发生（表2-1）。这些变化将影响可利用水资源量，并直接或间接地影响到能源生产和电力供应。例如，2012年印度东部、北部的水电和火电因持续干旱无法正常运行，造成了史上最严重的停电事故，约有6亿人受到影响¹²。能源活动，特别是化石燃料燃烧，将加剧气候变化的影响，进一步改变全球水循环并威胁到人类社会的供水安全。在气候变化的背景下，水和能源的关联已经不可忽视（见图2-1）。

表 2-1 | 气候变化对世界水文的主要影响

	已经确认的影响	预计在21世纪将产生的影响
降水量	全球趋势不明显，但北纬30度到85度地区降雨量增加，而南纬10度30度地区出现下降	全球降雨量将出现增加，但各区域的变化趋势不一
降水强度	极端降水事件的降雨量增加，全球极端天气的发生频次增加	全球平均温度每上升1度，极端降水事件将增加7%
干旱	按Palmer干旱严重程度指数计，全球旱灾增加。但是部分地区干旱程度有所缓解。	在局部地区出现季节性干旱的可能性增加
冰川	全球冰川总量下降，北半球高山雪线下移，冰川融水提前	全球冰川总量继续下降，雪线继续下移
海平面	20世纪海平面升高了0.2米	预计到2100年海平面将上升0.2-0.6米
海洋酸化	海洋平均酸碱度由8.2下降到8.1	海洋平均酸碱度由8.2下降到8.1
海洋表面温度	自1980年以来上升0.5度	继续上升

数据来源：UNEP, 2012

图 2-1 | 水资源-能源关联示意图



2.2 城市水系统中的水资源－能源关联

与一般工业行业相比较，城市水系统能耗相对较低，往往被城市管理者忽视，在中国这个问题尤为突出，甚至没有针对城市水系统的能耗统计信息，而城市管理者也因为缺乏水系统能耗信息而没有意识到这个系统的能耗增加趋势。但是，当越来越多的城市因为本地

水资源短缺不得不在其水源结构中加入海水淡化、污水再生利用、外调水等水源时，城市制水（包括取水）系统的能耗就会出现增加，而且会因为不同类型的水源需要面对不同的环境、生态、健康风险。



城市水系统的能源消耗主要来自以下几个方面（见图2-2）：

(1) 原水提取及输送：除少量采用重力流取水的地表水源，绝大多数水源（包括地表水、地下水、海水、再生水及外调水）都需要泵站将原水提升输送至自来水厂。由于取水点和受水点往往存在一定的高差，外调水的输水能耗一般较高。例如，美国加州西岸城市调水工程的输水能耗约 $2.5\text{kWh}/\text{m}^3$ 。

(2) 制水：常规自来水厂通过沉淀、过滤、消毒等工艺流程将原水进行净化并达到国家饮用水标准，其主要能耗来自泵站（将原水提升进入反应池、出场水加压输送至市政管网）和制水工艺流程。海水淡化和再生水利用由于制水工艺不同，制水能耗比常规自来水要高。

(3) 配水：自来水配水系统通过泵站加压将自来水输送至用水户。主要能耗为泵站能耗。

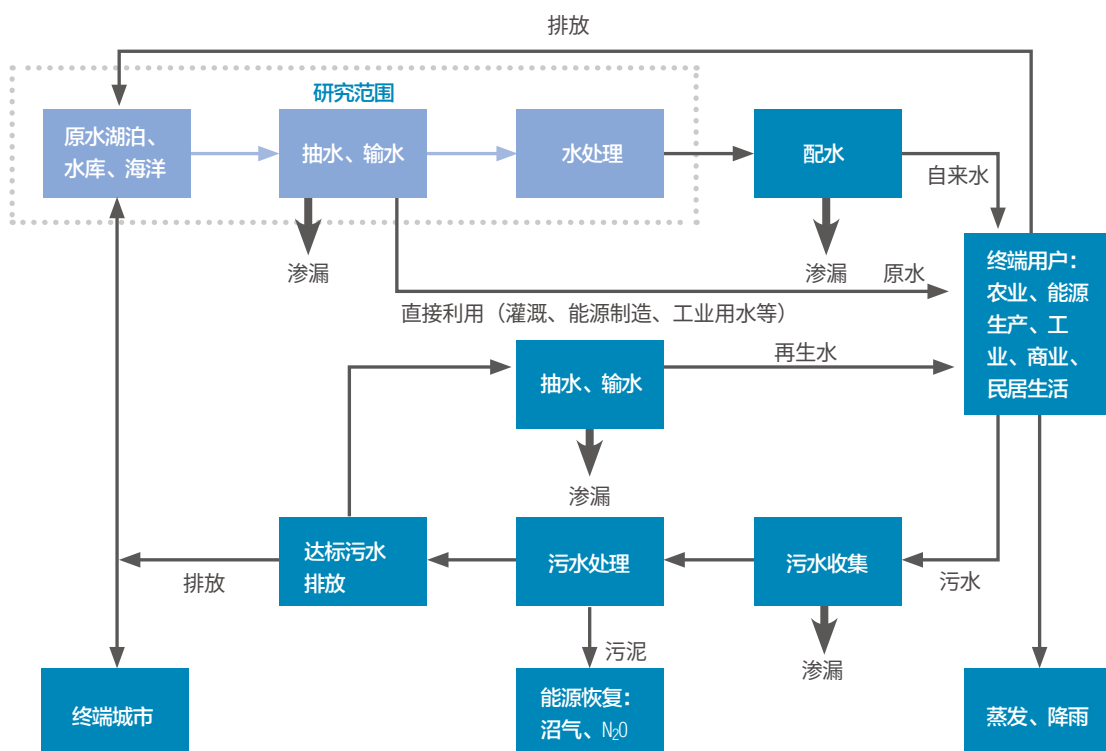
(4) 污水的收集、处理及排放：污水通过污水管网被输送至污水处理厂进行物化和生化处理。主要的耗能环节为泵站、风机、生化处理及深度处理（如臭氧或紫外消毒、膜处理等）。

不同供水基础设施建设的能耗和碳足迹差异较大，由于数据信息获取有限，本研究仅考虑取水和制水过程中的运行消耗，以下简称制水能耗。

城市水系统的能源消耗及其能源管理在欧美国家已经受到关注。以英国为例，自来水制水能耗为 $0.12\text{kWh}/\text{m}^3$ ，污水处理能耗约为 $0.21\text{kWh}/\text{m}^3$ ，但是居民生活（主要是热水）能耗却高达 $2.66\text{kWh}/\text{m}^3$ ，占到了整个城市水系统的89%。为了帮助实现英国低碳发展目标，英国水务办公室（Ofwat）从2008年开始要求所有城市水基础设施规划必须评估各类水源的供水能耗及碳排放。为此，英国环境保护署发布《水务行业温室气体排放测算指南》（以下简称《指南》）以及“水资源碳足迹计算工具”，用于指导水务企业核算生命周期（包括项目建设、原料获取及生产过程等）的温室气体排放。该计算器内嵌了多种计算模型，能够测算包括常规水资源（地下水、地表水）、非常规水资源（海水/苦咸水淡化、雨水利用、再生水）及配水系统（配水压力、管网漏损）的相关能耗，并将碳排放成本自动纳入项目的总体预算。

通过碳排放核算，水务行业不仅能帮助实现政府主导的碳减排计划，而且能通过降低能耗节省运行费用。英国南方水务集团在制定其水务发展计划（2010-2015年）时就利用水资源碳足迹计算工具测算了70多种情景之下的供水碳排放，并作为其决策支持的重要依据（专栏1）。

图 2-2 | 城市水系统示意图

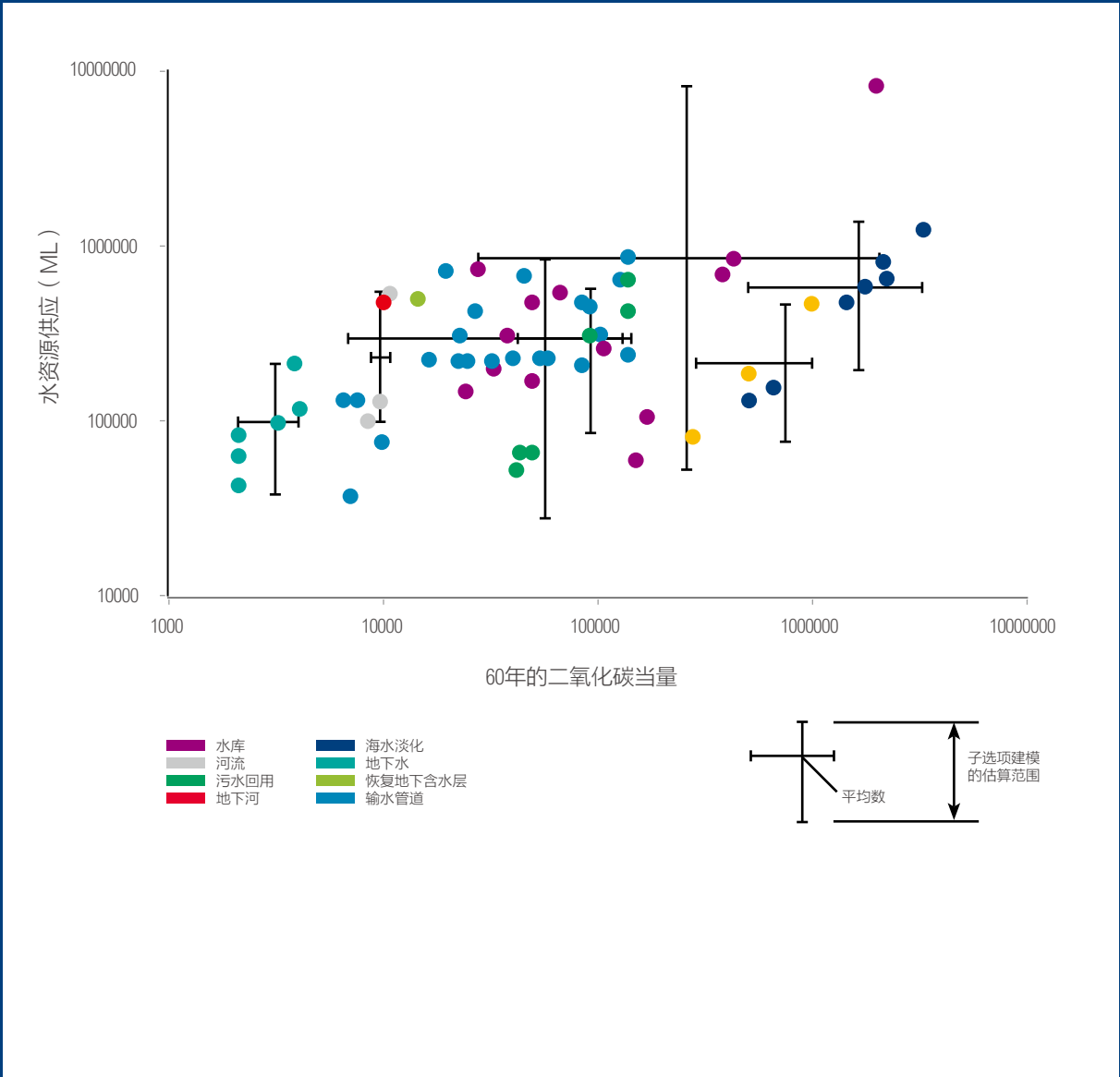


数据来源：根据Water in the West (2013) 修改¹³

专栏 1 | 英国南方水务集团的碳足迹测算

2008年，英国南方水务集团在制定水务发展规划时采用了碳足迹计算工具（CFP计算器）。CFP评估了各种供水水源和供水方式的碳排放量。由下图可见，在60年的设计寿命周期中，海水淡化方案的能耗是地下水方案的1000倍。

青岛可以借鉴类似的方法来估算各种水源的能源消耗和碳排放。在青岛，扩大水源供给的各类方案可能存在很大的能耗差异，在评价各种解决方案的经济可行性时，可以将能源需求和碳排放作为影响因素。

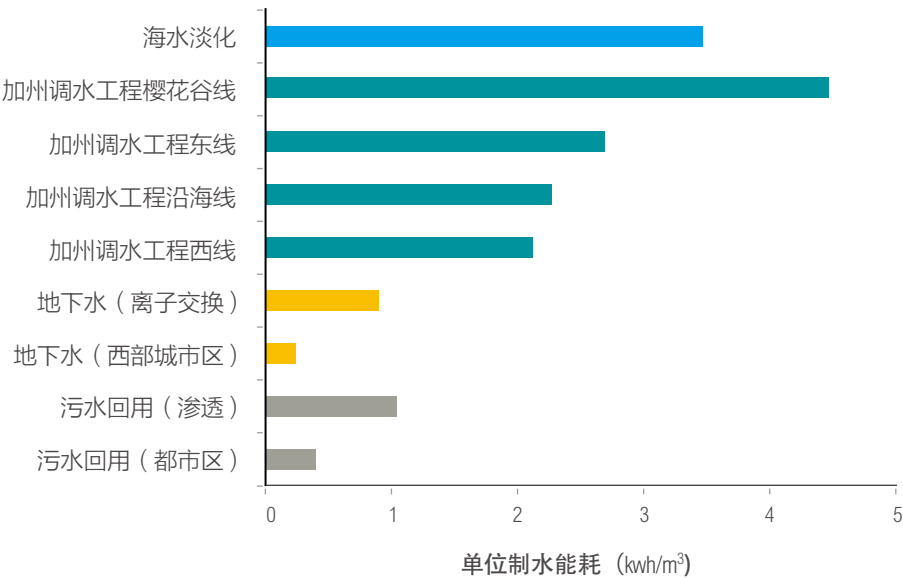


无论是外调水工程，还是非常规水资源的开发，城市的水资源结构已经在悄然发生变化，而且城市的水资源战略也将随着人口增长与经济发展变得更加多元化和复杂化。应当注意的是，城市供水水源类型的改变不仅是一个简单的供水问题，同时也将牵涉到城市供水系统的能源消耗和碳排放问题。不同类型的水资源具有不同的能耗，例如，海水淡化的单位制水能耗是常规地表水源的5-10倍。图2-3是美国加州大学对南加州各类水源的能耗分析¹⁴，可以看到不同水源的制水能耗差距高达10倍之多¹⁵。而加州目前20%的电力和30%的天然气被消耗于水的生产、运输和使用¹⁶，所以说城市水系统对能源需求的影响已经不容忽视。

因而，城市水源选择不仅是一个单纯的水问题，更是一个能源问题。不同的水源组合会对城市的能源需求及温室气体排放产生影响。供水系统将成为城市低碳发展不可缺少的重要组成部分，尤其是严重缺水的城市。

对于青岛市这样的海湾缺水城市，虽然目前制水能耗只占全社会用电量的1%（如果考虑配水能耗以及污水处理，则城市水系统的总能耗估计可以达到全社会用电量的4%-5%）¹⁷，但随着调水和海水淡化的增加，若水源配置不合理，将会导致供水系统碳足迹的激增，从而加剧城市发展与水源供给、能源消耗之间的矛盾。因此，在青岛市开展城市水源选择配置中的水资源-能源关联对于青岛市的低碳发展以及其他缺水城市的水资源管理都具有重要的现实意义。

图 2-3 | 南加州不同类型水源的制水能耗



数据来源：Wilkinson, 2010



青岛市水资源管理现状

3.1 青岛概况

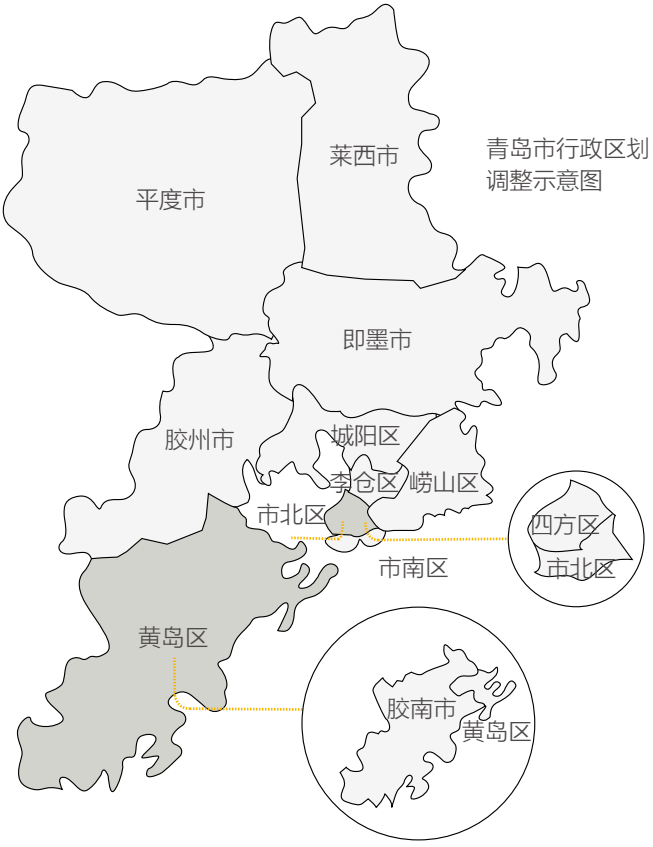
青岛市地处山东半岛南部，东南濒临黄海，东北与烟台市为邻，西南抵日照市，西与潍坊市接壤，是国家计划单列市、全国首批沿海开放城市、海滨旅游城市和重要的国际港口。

青岛市为海滨丘陵城市，地势东高西低、南北隆起。全市总面积10654km²，其中山地约占总面

积的15.4%，丘陵占25.1%，平原占37.8%，洼地占21.7%¹⁸。

自1994年起，青岛市下辖七区五县。2012年底，国务院批复青岛市关于调整行政区划的申请，调整为六区四市。撤销市北区、四方区，设立新的青岛市市北区；撤销青岛市黄岛区、县级胶南市，设立新的青岛市黄岛区（见图3-1）¹⁹。

图 3-1 | 青岛市行政区划调整情况

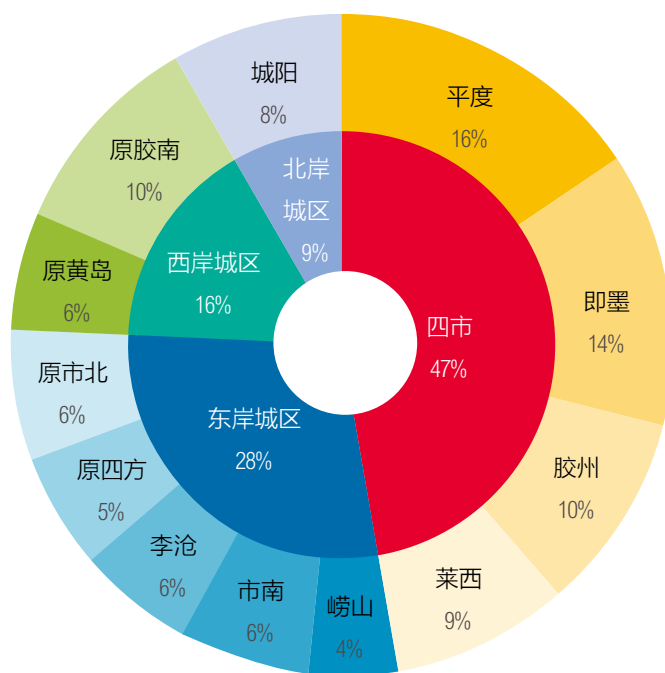


数据来源：半岛网：<http://news.bandao.cn/topic/b/2012/qdquhua/>

根据全国第六次人口普查，青岛市2010年全市常住人口871.51万人，其中城镇人口占66%²⁰。青岛市人口地区分布很不平衡，东岸、北岸和西岸城区（不包括原胶南市和崂山区）面积占青岛市域16%，却集中了39%的常住人口，人口密度1873人/平方公里，是全市平均人口密度的2.7倍（见图3-2）²¹。

随着青岛市“环境保护，拥湾发展”重大战略的实施，经济社会以及城市化将快速发展。据《青岛市国民经济和社会发展的第十二个五年规划》，到2015年全市常住人口将达950万人（较2010年增长9%），城市化率75%，国民生产总值提高76%，能源需求将同期增加41%，水资源需求增加42%（见表3-1）。

图 3-2 | 青岛市人口分布情况（2010年）



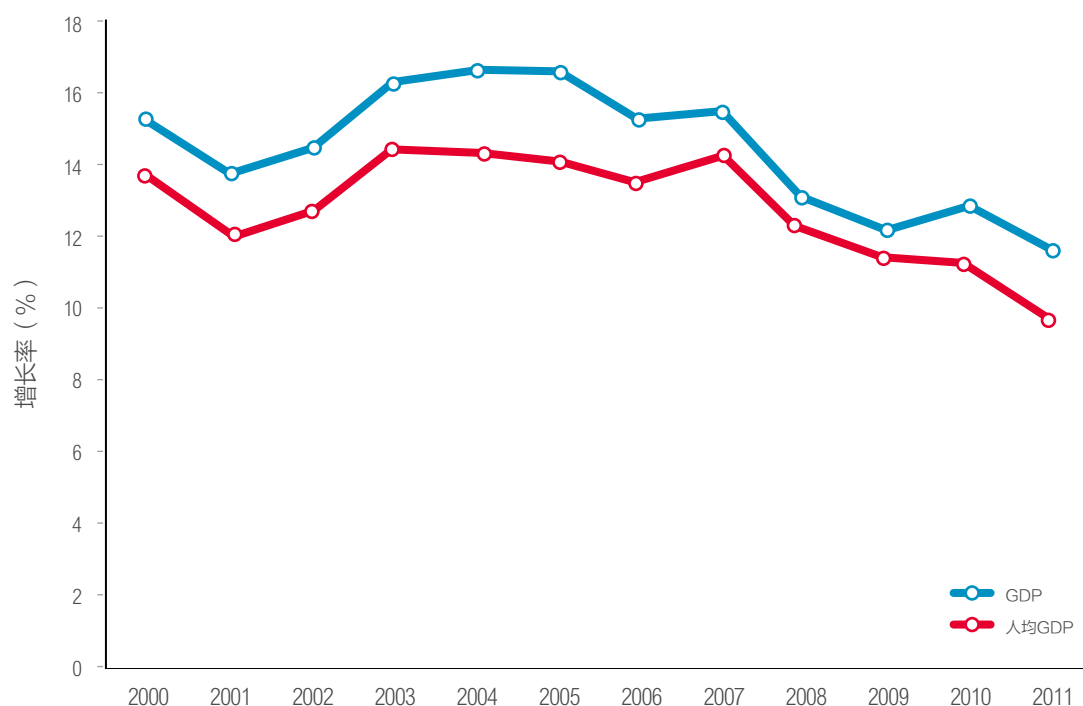
数据来源：青岛市2011年统计年鉴

表 3-1 | 青岛市2015年经济社会及能源、水资源指标

	指标	2010	2015
	国民生产总值（亿元）	5666	10000
	常住人口（万人）	871	950
	城镇化率（%）	67	75
	能源需求（万吨标煤）	3968	5606
	供水需求（万m ³ /日）	139	198

数据来源：青岛市国民经济和社会发展的第十二个五年规划

图 3-3 | 青岛市GDP、人均GDP增长率（2000-2011年）



数据来源：青岛市2011年统计年鉴

到2020年，预计全市总人口达1200万人，城镇化达到80%以上。其中东岸城区发展空间日趋饱和，“拥湾发展”重心将逐步向北岸和西海岸转移，未来城阳区、黄岛区将面临更大的人口增长压力。

青岛市是山东省最大的工业城市，也是中国经济发展最快的城市之一（见图3-3）。2010年青岛市地区生产总值达6615.6亿元人民币，人均GDP为75763元人民币，是全国人均GDP（35083元）的2.16倍²²；三次产业比例为4.6:47.6:47.8。在工业增加值前十的行业中，农副食品加工、化工、纺织、钢铁制品都是高耗水行业。预计到2015年，青岛市GDP将达到1万亿元，2020

年突破2万亿元。青岛市政府将东岸城区定位为以金融、信息、商务和旅游的现代服务业聚集地，北岸城区以二产、三产为主，定位为新型高科技产业区，西岸城区以二产为主，建设港口和制造业新城，将青岛建设成组团式、生态化的海湾型城市。

虽然农业在青岛经济结构中所占比例逐年下降，青岛市所辖的五个县级市均为全国商品粮生产基地，且胶州、即墨、平度和莱西还是《全国新增1000亿斤粮食生产能力建设规划》中的产粮大县，面临促进粮食增产和保障农业用水的双重挑战²³。

3.2 青岛市水资源利用现状

青岛市是我国北方沿海严重缺水城市之一。一方面，青岛市对水资源的需求呈快速增长态势；另一方面，本地可进一步开发的水资源量十分有限，对客水依赖程度将继续提高，地下水局部超采，城区用水、工业

用水以及农业灌溉用水之间的竞争不断增大，因而水资源的配置以及开发利用方式将对青岛市经济社会发展造成直接影响。

水资源总量及可利用量

青岛市多年平均降水量688.2mm，水资源总量22.1亿m³，其中多年平均地表水资源量16亿m³，多年平均地下水资源量为9.29亿m³，两者之间的重复计算量3.19亿m³（见表3-2）。全市人均占有水资源量313m³，亩均占有量306m³，分别为全国平均值的12%和15%²⁴。

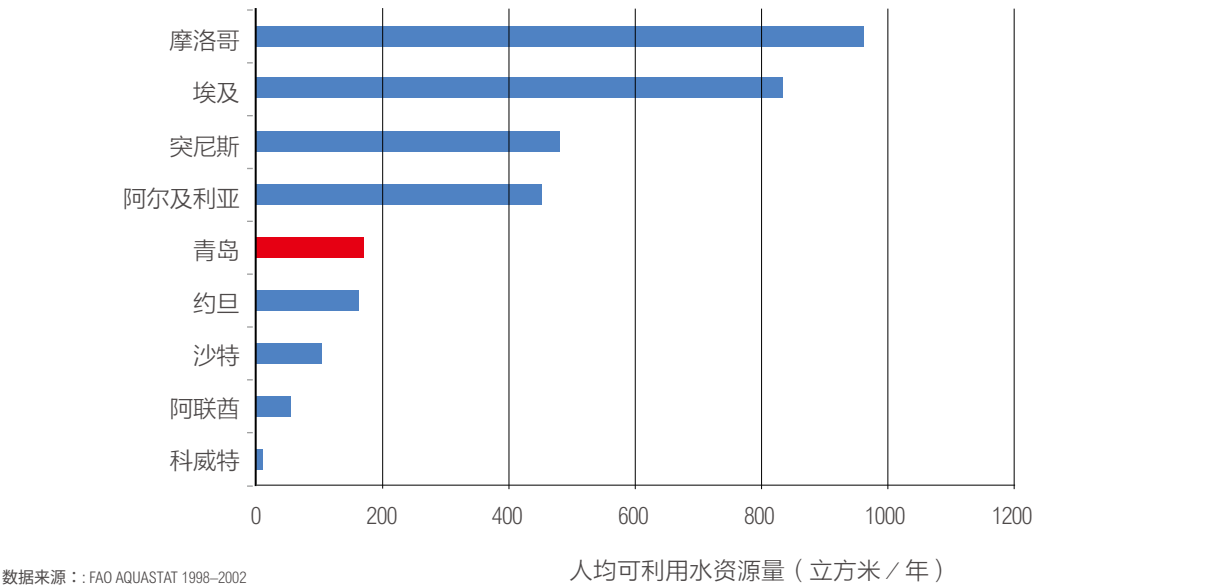
根据《青岛市“十五”水资源综合利用发展建设规划》²⁵，青岛多年平均可利用水资源总量为14.88亿m³，约占水资源总量的67%；其中，多年平均地表水资源可利用量为9.05亿m³（扣除重复计算量0.89亿m³），地下水资源可开采量为5.83亿m³。全市人均可利用水资源量约为171m³，低于很多中东国家水平（图3-4）；其中东岸城区的人均可利用水资源量仅为3.4m³/年，不到科威特（8m³/年）的一半。

表 3-2 | 青岛市多年平均水资源总量

行政分区	降水量		地表水资源量 (亿m ³)	地下水资源量 (亿m ³)	重复计算量 (亿m ³)	水资源总量 (亿m ³)
	mm	亿m ³				
市内四区	728.1	1.03	0.34	0.18	0.13	0.39
原黄岛区	737.1	2.08	0.51	0.21	0.09	0.63
崂山区	861	3.35	1.46	0.66	0.41	1.71
城阳区	698	2.92	0.83	0.47	0.16	1.14
胶州市	686.1	8.30	1.52	1.06	0.41	2.17
即墨市	678.5	11.72	2.68	1.29	0.54	3.43
平度市	638.7	20.22	3.28	2.41	0.36	5.33
莱西市	678.8	10.33	2.13	1.36	0.37	3.12
原胶南市	743.7	13.36	3.25	1.65	0.71	4.18
全市	688.2	73.32	16.0	9.29	3.19	22.1

数据来源：青岛市“十五”水资源综合利用发展建设规划

图 3-4 | 青岛与中东国家人均可利用水资源量的比较



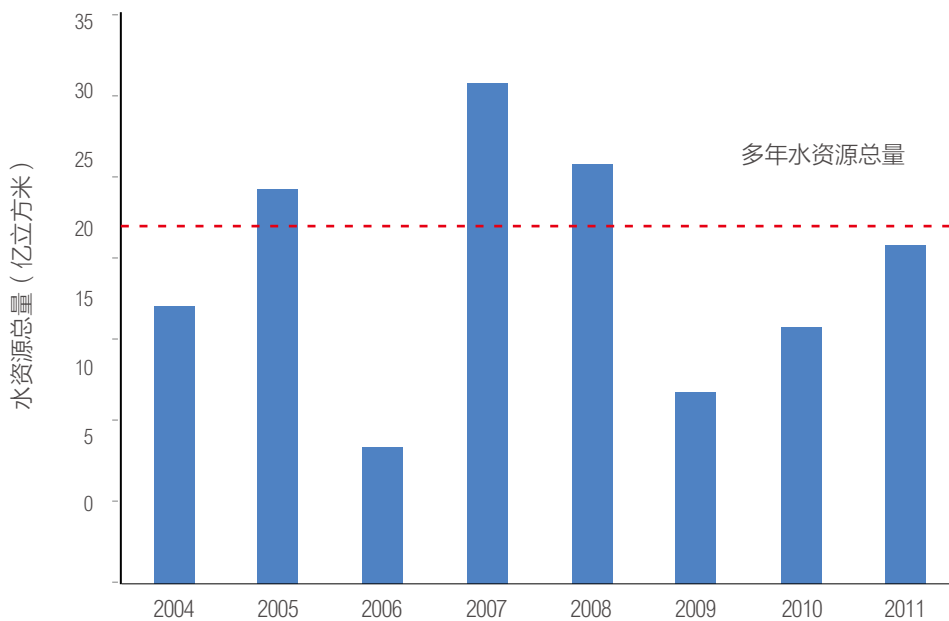
青岛市水资源具有以下几个特点：

1.水资源时间分布不均。

一是年际变化大。青岛本地水资源主要依靠大气降水补充，旱灾和涝灾发生频率分别为20%和17%²⁶，年

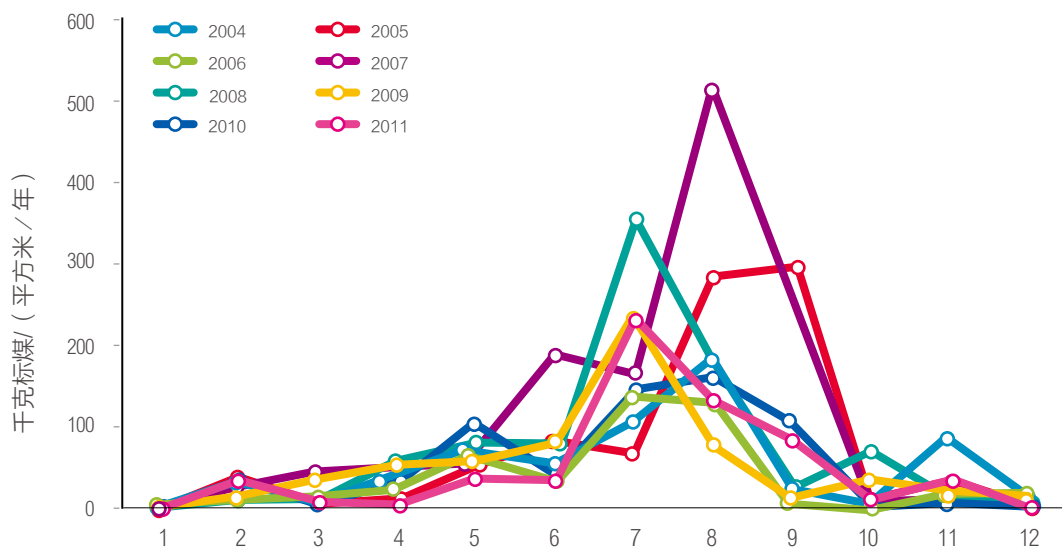
间波动较大，如图3-5所示，2004-2011年期间，62.5%的年份低于多年平均水资源量，2006年水资源量仅为2007年的27%。二是年内变化大。全市70%-75%的降水集中在汛期（6-9月），其中七、八月份约占全年降雨总量的50%左右，雨水利用比较困难（图3-6）。

图 3-5 | 青岛市2004-2011年水资源总量变化情况



数据来源：青岛市水资源公报2004-2011

图 3-6 | 青岛站2004-2011月降水量分配



数据来源：青岛市水资源公报2004-2011

2.水资源空间分布不均

自2004年以来，人口密度最高、开发强度最大的中心城区（原市北、原四方、市南、李沧、原黄岛、城阳）水资源量在全市总量中的份额维持在10%左右（见图3-7）。

3.水资源连丰、连枯特点明显。

根据1899年以来100年的降雨资料分析，青岛市降水量的丰、枯变化周期为60年左右，丰、枯期约为30年。目前，青岛正处于丰水期的降水偏少阶段，预计在2020年前后降水量将转为正常偏多，并于2036年迎来下一个枯水期²⁷。

水资源开发利用现状

青岛用水来源包括地表水（本地地表水和跨流域调水）、地下水和其他水源。自2005年，为了缓解地下水超采带来的各种环境问题，青岛市降低了地下水开发利用强度，地下水在总供水量的比例由2005年的50%下降到2011年的36%（见图3-8）；截至2011年，青岛约有45%供水来自本地地表水资源，但其开发潜力已非常有限；对外调水的依存度约15%；非常规水资源迅速发展，供水量为2005年非常规水源供水量的40倍。

按照行政区划，青岛市东岸城区对外调水的依赖程度已经超过50%；非常规水源的利用主要集中在北岸和东岸城区；西岸城区（原黄岛和胶南）的用水量已经超过东岸城区，且一半以上来自地下水（图3-9）。

图 3-7 | 青岛市各行政区水资源量（2004-2011年）

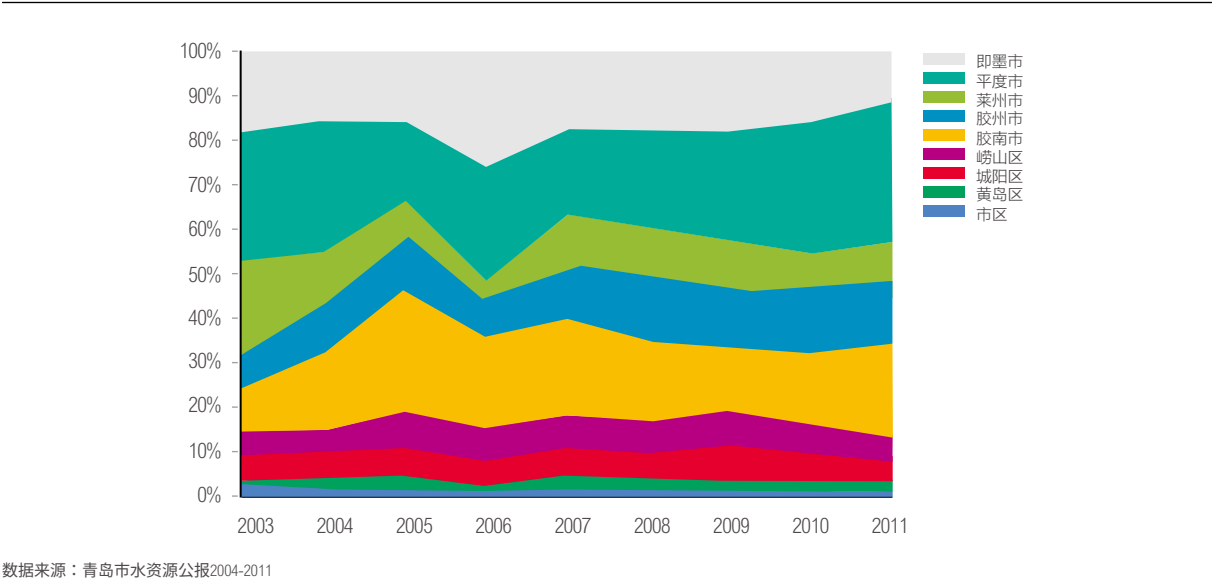


图 3-8 | 青岛市2004-2011年各种水源利用情况

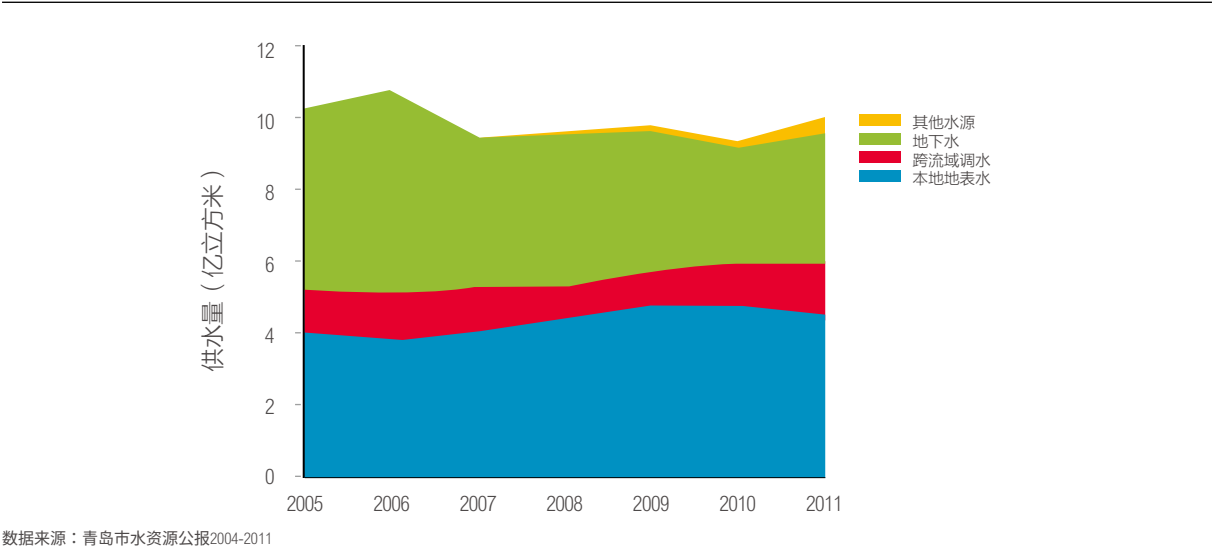
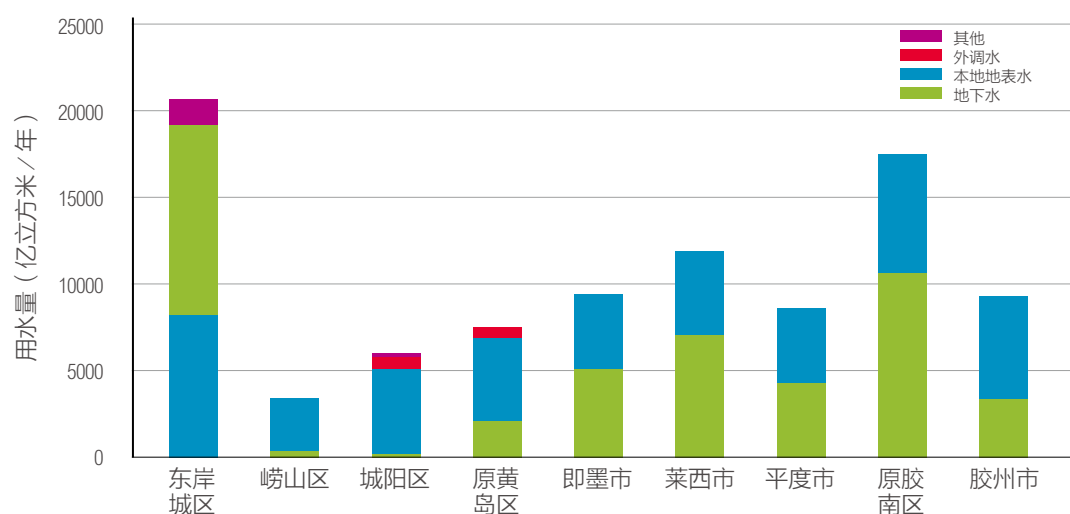
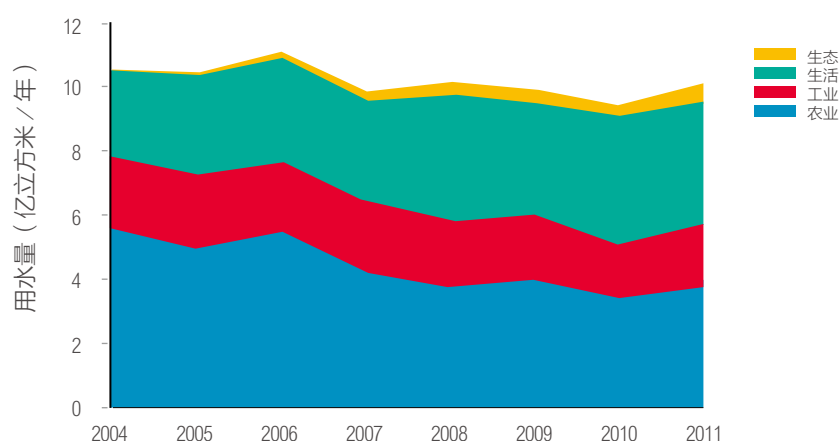


图 3-9 | 青岛市分区用水量与水源类型（2011年）



数据来源：青岛市水资源公报2004-2011

图 3-10 | 青岛市2004-2011年各行业用水情况



数据来源：青岛市2011年水资源公报

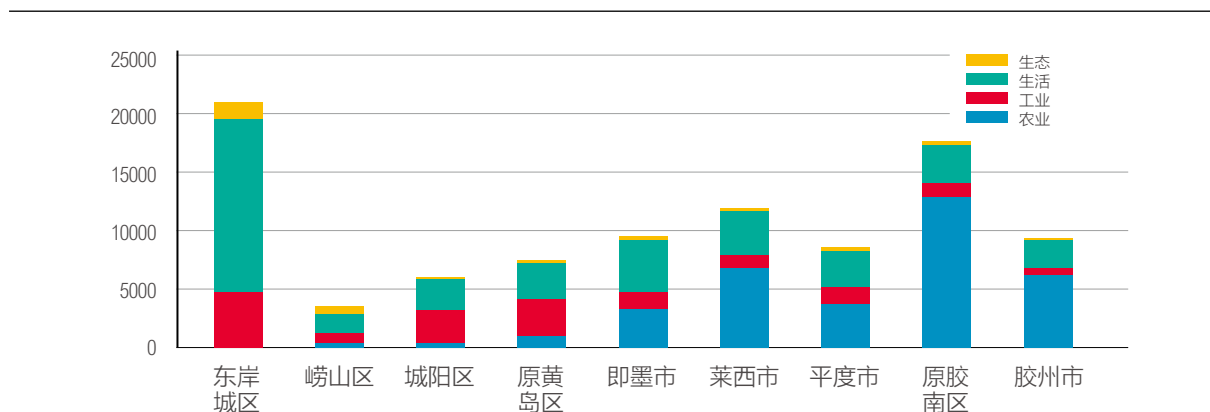
按照用水户特征，可以将青岛的用水组成为农业用水、工业用水、生活用水（含市政公用）和环境生态用水四类。从图3-10可以看出以下特点：

- (1) 用水总量在2006年出现一个峰值，之后略有下降并基本保持在10亿m³左右；
- (2) 农业用水明显下降，2011年农业用水量比2004年下降24%；
- (3) 工业用水稳中略有下降，占总用水量的比例基本维持在20%上下；
- (4) 生活用水量逐年增加，且用水占比逐年升高。2011年全市生活用水量较2004年上升75%；

- (5) 生态环境用水量平稳上升。

城市化进程无疑是青岛生活用水需求激增的重要推手。根据各行政区行业用水分析发现（图3-11），在城镇化率最高的东岸城区，生活用水占总用水量的比例高达71%，而在原胶南市仅为19%；城阳区和原黄岛区工业用水所占比例较高，分别为48%和41%，而原胶南市、胶州市的工业用水份额均在5%左右；农业用水在东岸城区、北岸城区几乎可以忽略不计，而在原胶南市却占据绝对主导份额（73%）。随着原胶南市合并入黄岛区，并将在未来成为西岸城区发展的重点，该区域的用水结构和需水量都将可能出现显著变化。

图 3-11 | 青岛市各行政区分行业用水情况（2011年）



数据来源：青岛市2011年水资源公报

表 3-3 | 全国、山东省和青岛市水资源管理三条红线目标比较

类型		水资源开发利用	用水效率			水功能区限制纳污
指标		用水总量	万元工业增加值用水量	万元GDP用水量	灌溉水有效利用系数	水功能区水质达标率
单位		亿立方米	立方米	立方米		
2011	青岛 ^b	10.08	6.83	15.24	0.58(2010)	
2015	全国 ^a	6350	<63	<105	0.53	60%
	山东 ^c	250.6	<15	<60	0.64	60%
	青岛 ^c	12.58	15.7	17.6	0.66	80%
	全国 ^a	6700	65		0.55	80%
2020	山东 ^c	276.59	<13		0.65	0.8
	青岛 ^c	14.73	10.1		0.68	85%
2030	全国 ^a	7000	40		0.6	95%
	山东 ^c	301.84				
	青岛 ^d	19.67	9.5		0.7	95%

数据来源：

a. 《关于实行最严格水资源管理制度的意见》（国发[2012]3号），国务院，2012.01.12

b. 《青岛市“十二五”循环经济发展规划》（成府发[2012]20号），青岛市发展和改革委员会，2011.09

c. 《关于印发山东省实行最严格水资源管理制度考核办法的通知》（鲁政发[2013]14号），山东省人民政府办公厅，2013.06

d. 《关于实行最严格水资源管理制度的实施意见》（青政发[2013]5号），青岛市政府，2013.01

3.3 青岛市水资源管理政策综述

为了解决城市水资源总量不足的问题，保障城市供水安全，青岛市一直在节约用水、非常规水资源（如海水淡化、污水再生利用等）和客水资源（外调水）开发与利用等方面不断努力，并制定相应的政策法规。

青岛市水资源管理目标

2012年，国务院提出水资源开发利用控制、用水效

率控制和水功能区限制纳污等三条红线量化目标之后，山东省人民政府办公厅于2012年6月发布《关于贯彻落实国发[2012]3号文件实行最严格水资源管理制度的实施意见》（鲁政发[2012]25号），确定全省水资源管理的红线目标。2013年，山东省通过《关于印发山东省实行最严格水资源管理制度考核办法的通知》（鲁政发[2013]14号），确定了青岛市水资源管理三条红线（即用水总量、用水效率、水功能区水质达标等目标）²⁸。

由表3-3可见青岛市水资源管理的指标较全国与山东省而言总体更为严格，其中，青岛市的工业用水效率已经达到了国际先进水平，2011年的实际万元工业增加值用水量就已经优于2020年目标值。

客水资源开发与利用管理

由于本地水资源极为有限，青岛的发展在一定程度上依赖于客水调用。1989年11月25日建成通水的“引黄济青”项目在很大程度上缓解了青岛市的用水问题。

在此基础上，南水北调东线工程已于2013年底通水，有望进一步保障青岛的供水安全。但水价可能是青岛利用调水的难题之一²⁹。根据国家发展改革委《关于南水北调东线一期主体工程运行初期供水价格政策的通知》³⁰，青岛线（东平湖以东）的原水综合水价为1.65元/m³，远高于本地地表水（0.35元/m³）和地下水（0.8元/m³）。据山东省南水北调工程建设管理局测算，终端用户的平均价格约6元/m³。³¹此外，原水质量也可能影响到青岛使用长江调水的积极性。

非常规水资源的开发与利用

海水、再生水和雨水等非常规水资源作为常规水资源的有力补充，在解决城市用水供需矛盾，保持城市经济可持续发展方面具有战略意义，对于水资源匮乏的青岛尤为必要。

(1) 海水淡化

根据《青岛市“十二五”循环经济发展规划》，要求2015年全市海水利用量和海水淡化规模分别实现超过15亿m³/年和达到25-30万m³/日的目标（截至2010年底，上述两项指标分别为13亿m³/年和3万m³/日³²）。全国最大规模的城市供水海水淡化项目——青岛百发（10万m³/日）于2012年底完成建设。

(2) 再生水利用

目前青岛市在再生水利用方面主要有两种模式：一是以城市污水处理厂的排放水为原水的集中再生水工程项目，截至2012年，青岛市有3座污水处理厂建设了以常规处理工艺为主，膜处理工艺为辅的再生水深度处理工程设施，并铺设再生水主干管道187公里，集中再生水供水能力达到5.5万m³/日。二是以企业单位或居民小区内部自产污水为原水的分散式再生水工程项目，目前共有分散式再生水利用设施70余座，处理总能力10.8万m³/日。

2011年，青岛市再生水利用率已达到25%³³，提前实现了《青岛市“十二五”循环经济发展规划》要

求2015年再生水利用率达到20%的要求。“十二五”期间，青岛市将新增再生水处理设施总规模37万m³/日，市区配套管网40km³⁴，并将继续研究制定再生水利用的相关鼓励政策，统筹污水处理和再生水利用设施建设，提高再生水再生利用率。

(3) 雨水利用

由于青岛市属于温带季风性气候，降水年内分配不均，降水量年际变化大，且地势起伏，雨水集蓄相对困难。青岛市目前并未将雨水利用作为大力发展的非常规性水源，仅在《青岛市再生水利用规划》中对雨水利用工作进行了简要规划。

节水管理政策及节水空间

由于水资源禀赋稀缺，节水一直是青岛市政府工作重点。青岛早于1964年率先成立节水办公室，对全市节水工作进行统筹管理³⁵，并逐步建立和完善多手段相结合的城市供水节水管理模式。特别是在政策方面，青岛市建立了总量控制值、定额管理、市场准入、惩罚水价和三同时制度³⁶，实行强制节水，于1983、1990、1995年连续三次蝉联全国节水先进城市称号，2002年成为全国首批十个节水型城市之一。

在工业节水方面，青岛市早在上世纪80年代初就明确规定，凡属大的耗水型建设项目一律不上。2011年，青岛市工业用水总量1.91亿m³，万元工业增加值用水量³⁷仅为6.83m³，是全国工业用水效率最高的城市之一，用水指标不仅低于国家下达的2020年、2030年指标（见表3-3），也低于日本、欧洲等发达国家水平（见附录一）。同时，青岛市要求利用淡化海水以及海水直流冷却解决火电行业的用水需求，火电行业用水量仅占工业用水量的5.3%，远远低于全国平均水平（40%左右）。据此，青岛工业节水的空间将非常有限。

在城市生活节水方面，青岛市主要围绕计量、推广节水型生活器具、利用价格杠杆作用、降低城市供水管网漏失率等方面展开³⁸。2010年青岛市城市生活用水量达2.12亿吨，比2005年下降了2.4%³⁹，主城区人均日生活用水量达178.05升，略低于东部地区的平均值184.53升⁴⁰，但是仍然高于北京、上海、天津、济南等城市（高出济南平均水平的59%）。所以，青岛在城市生活节水方面还有一定的空间。

在农业节水方面，青岛市农业灌溉用水有效利用系数达到0.58，好于全国同期水平0.50。根据《节水灌溉“十二五”规划》，计划到“十二五”末高效节水灌溉面积达到247万亩，新增面积71.6万亩（其中发展管道灌溉面积61.71万亩，喷灌面积3.7万亩，微灌面积6.19万亩）。在山东省“农业用水零增长”的控制目标下，青岛市农业用水量将保持稳定。

3.4 青岛市2020年用水需求预测

人均生活用水量、温室气体排放与经济发展的比较

世界资源研究所对世界范围内26个主要城市的人均温室气体排放、人均生活用水量和人均GDP进行比较分析，如图3-12所示，横轴表征城市人均GDP，纵轴显示人均生活用水量；同时，每个气泡代表一个城市，气泡大小反映人均温室气体排放量的多少。

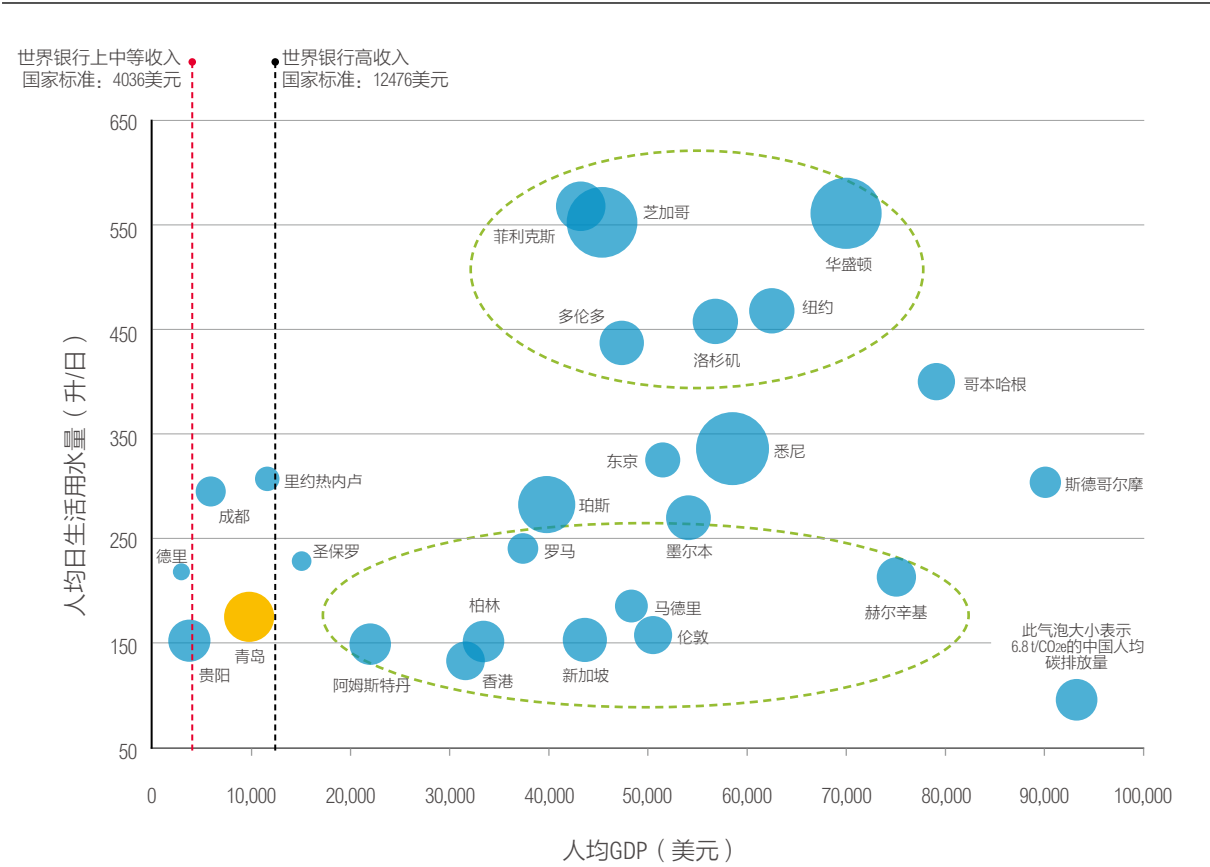
可以看出：

(1) 中国城市的人均居民用水量目前还处于中低水平，但人均温室气体排放量已与发达国家城市相近。青岛市人均GDP为9725美元，比世界银行提出的高收入标准（12476美元）低20%，经济增长具有广阔的上升空间；人均生活用水量为178升/日，低于大多数国外城市；人均温室气体排放量为9.6吨/年，高出中国平均水平近40%，减排压力艰巨。

(2) 基于人均生活用水和人均温室气体排放水平，发达国家城市在不同发展路径下的结果主要表现为2种类型：高碳排放高耗水城市（类型I，以北美城市为代表），低碳排放低耗水城市（类型II，以欧洲城市 and 香港、新加坡为代表）。值得注意的是，伦敦等类型II的城市在低于中国平均水耗和温室气体排放的情况下，也实现了高收入和高生活水平。

(3) 青岛目前较低的人均生活用水量与青岛市长期以来的节水工作密不可分，也意味着青岛用水效率进一步提升的空间有限。随着经济发展和生活水平的不断提高，人均用水量可能进一步增长，意味着青岛市水资源供给压力必然增大，而依靠外调水或海水淡化等水源必然带来城市水系统能耗和碳排放的增加，对青岛市的碳减排形成新的压力。

图 3-12 | 国内外26个城市温室气体排放与水资源消耗水平



数据来源：中国城市建设统计年鉴 2010, Latin-American Green City Index (2011), Asian Green City Index (2010), US and Canada Green City Index (2010), European Green City Index (2007), World Bank (2011)

表 3-4 | 青岛市2020年总需水量（单位：亿m³）

	市区	崂山	城阳	黄岛	胶南	胶州	即墨	平度	莱西	小计
工业	0.13	0.09	0.32	0.51	0.49	0.42	0.41	0.38	0.25	3.01
城镇居民 市政公用 公用	1.58	0.29	1.15	0.93	0.39	0.37	0.30	0.55	0.28	5.83
农村居民	0.00	0.00	0.01	0.00	0.15	0.12	0.14	0.15	0.11	0.67
畜禽养殖	0.00	0.00	0.01	0.00	0.04	0.03	0.04	0.07	0.09	0.28
灌溉	0	0.01	0.02	0.02	0.51	0.47	0.67	1.51	0.69	3.9
生态	0.40	0.17	0.06	0.08	0.07	0.10	0.09	0.07	0.06	1.10
合计	14.8									

青岛市2020年工业、农业、生活、生态用水需求预测

本报告分别针对青岛市2020年的工业用水需求、农业用水需求、市政生活用水需求，以及生态用水需求进行预测。具体测算过程详见附录一。

根据测算结果，预计2020年青岛市总需水量将达14.8亿m³，其中工业需水量约为3.01亿m³，较2011年上升58%，农业需水量（含农村居民生活用水、畜禽养殖、灌溉用水）约为4.86亿m³，同比上升7%，居民生活用水（含城镇居民生活用水、城镇公共用水）需水量达到5.83亿m³，同比上升89%，生态用水量为1.1亿m³，同比上升94%。可以看出，居民生活用水在未来将是最大的用水户，而农业用水将基本保持稳定。

各行政分区的用水需求预测见表3-4。到2020年，除了东岸城区（市南、市北和李沧）呈现出需水

量下降的趋势（较2011年减少8%），其余行政区都有不同程度的上升。其中，需水量上升最明显的是城阳区，比2011年增加154%，主要驱动因素是北岸城区发展和城镇人口激增带来的生活用水需求增长；其次是黄岛区（包括原黄岛区和胶南市），用水需求较2011年上升85%（其中，原黄岛同比增加152%，原胶南同比增加48%），驱动因素来自东岸城区的发展和工业转移带来的生活用水、工业用水需求；其余地区的用水需求均较2011年有25%到70%的增加，驱动因素以工业、农业发展用水为主。

根据《关于印发山东省实行最严格水资源管理制度考核办法的通知》（鲁政发[2013]14号），青岛市2020年用水总量控制目标为14.73亿m³，比研究预测值低0.07亿m³。这意味着，青岛将面临严峻的挑战，不仅要加强节水工作、提高各行业用水效率（特别是农业和生活用水）；而且还需要考虑发展再生水、雨水利用和淡化海水等不计入用水总量指标的非常规水源。



青岛市不同类型水源的特点及制水能源强度分析

目前，青岛市的市政、工业用水主要依赖本地地表水和外调水，农业用水则主要来自本地地下水。上个世纪80年代末期，引黄济青工程在很大程度上解决了青岛的用水难题，将来自290公里之外的黄河水运送到青岛，输水扬程33.5米⁴¹，由于泵站提升和沿途损耗，吨水能耗远远大于本地地表水资源。

为了提高城市供水安全，非常规水资源（包括海水淡化、再生水利用等）越来越受到重视。青岛已经有2个工业海水淡化项目（黄岛电厂和青岛碱业）投入运行，且全国第一个将淡化水引入市政用水的项目（百发）也已经完成建设。团岛污水和海泊河处理厂已经配套建设了再生水利用工程，向工业企业、建筑行业及居民提供非饮用水质的替代水源。海水淡化和再生水利用亦有较高的能源消耗强度。

本节将比较分析青岛市不同类型水源的特征、供水潜力以及制水能耗。

4.1 不同类型水源的特征与风险比较

城市在选择水源时需要考虑多方面的因素，除了水源水质、保障率和经济成本以外，在环境保护和气候变化的背景之下，越来越多的城市开始探索将非常规水资源作为城市缺水的解决方案，不同类型水源的能源消耗（制水）、生态环境影响及应对气候变化风险的能力等风险也应纳入到城市水源选择的考虑因素当中。

通过文献调研，我们从水质、水源保证率、土地占用、资金投入、能源消耗等9个方面对不同类型水源的风险特征进行比较，如表4-1所示（具体指标解释详见附录二）。

- 青岛的本地地表水主要依靠水库，其优点是水质较好、能耗低，缺点在于土地占用、工程移民和资金投入很大，应对气候变化风险的能力也较弱。
- 地下水源现主要为农用，优点是土地占用和资金投入小，缺点是过度开发不易恢复，不利于水资源保护，应对气候变化风险的能力较弱。

- 外调水（包括引黄和引江）的优点有利于本地水资源的保育，但是由于调水量必须听从流域内或者流域间的调度，必然受到调出区域的季节、气候的影响，在不同的丰枯条件下，水量保证率是不同的。缺点主要是土地占用和资金投入大，能耗相对较高，原水水质受沿岸污染影响的风险较大（包括违法排放、交通事故、自然灾害等）。
- 海水淡化的优势在于供水保障率高、应对气候变化风险能力强，缺点也比较明显，成本高、能耗高，而且民众对于饮用淡化水的接受程度低。
- 再生水利用可以根据出水用途分为一般市政杂用水（深度处理）和高品质的纯水（新生水）。二者的优点都是供水保障率高、应对气候变化风险能力强，缺点是新生水的能耗相对较高。
- 雨水利用最大的优点是土地占用、资金投入和能源消耗少，但缺点也很明显，即保障率非常低。据此，本研究不包括对雨水利用的分析。

表 4-1 | 各类水源的供水风险比较

指标	本地地表水 (水库)	本地地下水	外调水	海水淡化	再生水	雨水利用
水质风险影响	中	中	中	低	中—低 ¹²	高
水源保证率 风险影响	中	中	中	低	低	高
土地占用 风险影响	高	低	高	低	低	低
资金投入 风险影响	高	低	高	高	中	低
能源消耗 风险影响	低	中	高	高	中—高	中
生态环境 风险影响	高	中	高	低	低	低
工程移民 风险影响	高	低	中	低	低	低
民众接受 风险影响	低	低	中	高	高	中
气候变化 风险影响	低	高	高	低	低	高

图 4-1 | 英国各类水源的取水能耗比较

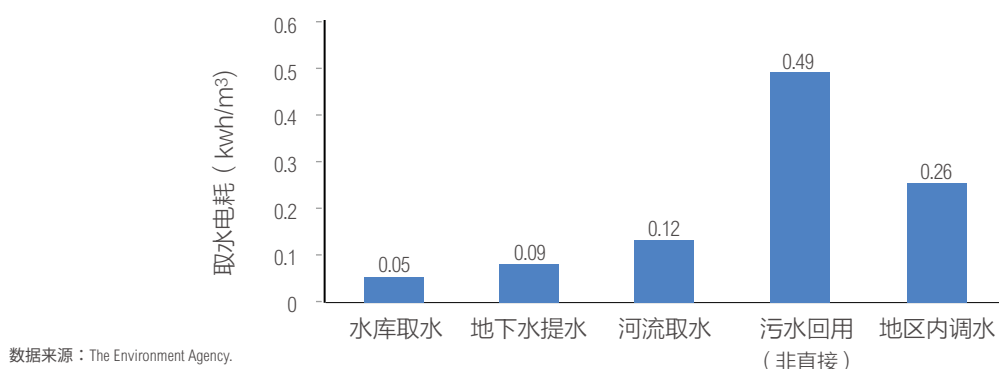
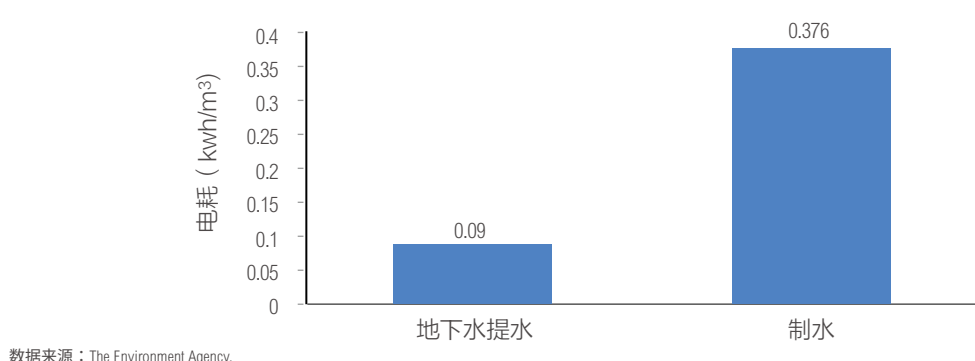


图 4-2 | 青岛市本地地表水源取水、制水能耗



4.2 不同类型水资源的取水制水能耗分析

本地地表水资源

青岛市的本地地表水主要源于三个水系：

(1) 大沽河：发源于山东省烟台市，由北向南入海，是胶东半岛的最大河流。干流全长179.9公里，流域总面积6131.3km²，其中青岛市境内面积4781km²，流经莱西市、平度市、即墨市、胶州市和城阳区。青岛境内流域上游建有两座大型水库（产芝水库、尹府水库），总库容达5.63亿m³，为青岛市最重要的本地水源。

(2) 北胶莱河：发源于平度市，经潍坊市流入莱州湾。干流全长100公里，总流域面积达3979km²。在青岛市境内的主要支流有泽河、龙王河、现河和白沙河等。

(3) 沿海诸河系（独立入海河流）：包括白沙河、墨水河、风河、白马河、吉利河、周疃河（莲阴河）等，总流域面积3960km²。

青岛的地表水资源利用以蓄水工程（水库）为主。2011年，水库供水占地表水源供水量的66.35%，另外24.28%来自跨流域调水⁴³。这些水库主要建造在

青岛市上游山地丘陵地区，泵站抽取原水后，利用自然高差将原水输送到自来水厂进行处理，所以取水和输水能耗相对较小。英国环境部相关研究报告也得到类似结论，水库的取水和输水能耗最低（0.05 kWh/m³，见图4-1）⁴⁴。

原水进入自来水厂之后，通过沉淀、过滤、消毒等工艺流程，将原水净化至达到国家饮用水标准。水的净化也是一个能源投入密集的过程，主要能耗在于泵站，泵站的效率直接影响水厂的送水电耗。以白沙河水厂为例，电耗是成本中最大的部分，约占总成本的40%（含建设成本）⁴⁵。在进行技术改革之前，白沙河的制水能耗为0.34kWh/m³，经改造更新高效水泵之后，制水电耗下降为0.26kWh/m³（下降了23%）。目前，青岛各自来水厂的平均制水电耗在0.376kWh/m³，仍有一定的节能减排空间。

目前，青岛市还没有针对水库取水的能耗进行计量，无法获取具体的数据。因此我们参考英国相关研究数据，确定水库的取水输水评价能耗为0.05kWh/m³。根据青岛市平均制水电耗，确定本地地表水源的取水制水电耗为0.426kWh/m³（图4-2）。

地下水资源

青岛的地下水主要用于农业灌溉及畜禽养殖，少量用于市政生活及工业。由于青岛市水利部门及农业部门都没有统计地下水的抽水能耗，课题组根据对平度和胶州农户的实地访谈，根据农户缴纳的电费测算出地下水取水耗电量为0.4kWh/m³⁴⁶。

通过与自来水厂工作人员的访谈得知，原水水质对制水电耗的影响不大。假设用地下水制水的电耗与本地地表水一致，即0.376kWh/m³。由此得出，若地下水仅作农业用水（不需要制水和配水），地下水的制水能耗是0.4kWh/m³；若作为市政供水，地下水的取水制水能耗为0.776kWh/m³（图4-3）。

青岛市的外调水工程

引黄济青

引黄济青工程是山东省“T”型调水大动脉的重要组成部分，工程于1986年4月15日开工，1989年11月25日建成通水。

引黄济青工程全长290公里，包括253公里人工衬砌输水明渠和22公里暗渠，设计总扬程33.52米。由山东省滨州市境内打渔张引黄闸引水到青岛市白沙水厂，途经滨州、东营、潍坊、青岛4市、10个县（市、区），建有渠首沉沙池一条，宋庄、王耨、亭口、棘洪滩等泵站四座，棘洪滩大型平原水库一座（图4-4）。工程设计在保证率95%的情况下，为青岛市供水30万m³/日。

由于公开的文献资料没有给出引黄济青供水的能耗，本研究根据相关的吨水电费和电价进行测算。根据《青岛市各类水源全成本分析和供水结构优化研究》，以1992年的物价水平为基准，入棘洪滩水库的电费为0.079元/m³，当年电价为0.25元/kWh，计算得出输水耗电约为0.32kWh/m³。进入自来水厂之后，平均制水电耗在0.376 kWh/m³，由此计算得到引黄济青外调水的取水制水能耗为0.696 kWh/m³（图4-6）。

图 4-3 | 青岛市地下水取水、制水能耗

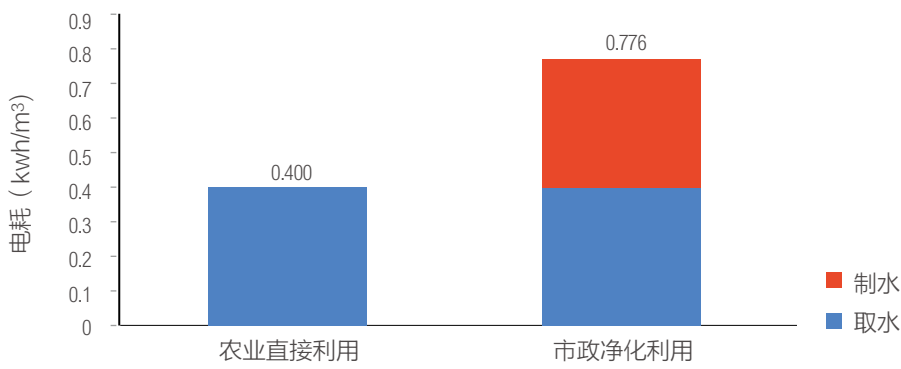
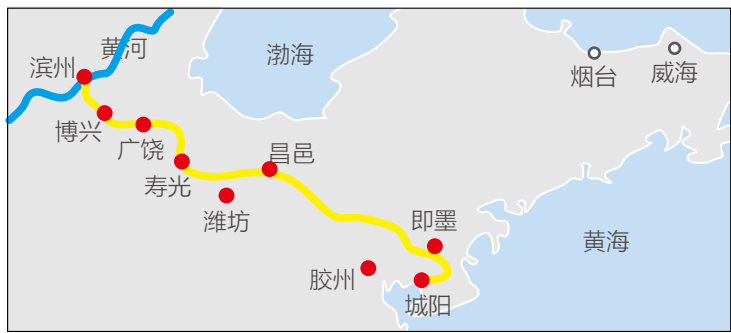
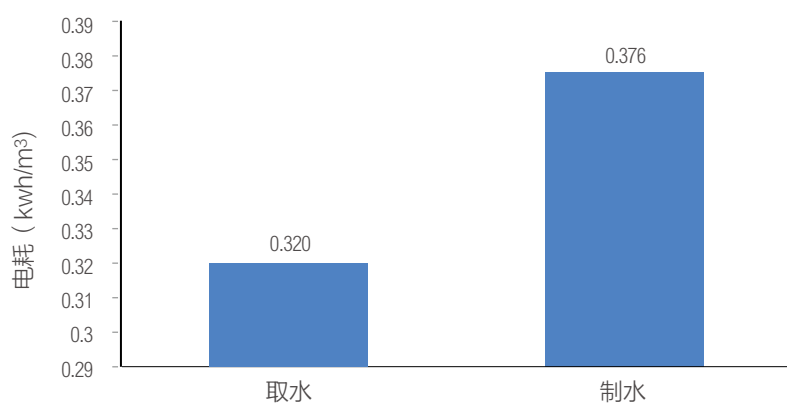


图 4-4 | 引黄济青工程线路图



数据来源：南水北调办公室

图 4-5 | 引黄济青工程的取水、制水能耗



数据来源：南水北调办公室，东线工程介绍

图 4-6 | 南水北调东线工程线路图



数据来源：南水北调办公室，东线工程介绍

南水北调东线

南水北调是为缓解中国北方水资源严重短缺问题的重大跨流域调水工程。其中，东线是南水北调总体布局中的重要组成部分，供水范围包括黄淮海平原东部和胶东地区，分为黄河以南、胶东地区和黄河以北三片⁴⁷。青岛即受益于胶东地区输水干线（图4-6）。

东线工程从江苏省扬州附近的长江干流引水，基本沿京杭大运河以及与其平行的河道逐级提水北送，连通洪泽湖、骆马湖、南四湖、东平湖，并作为调蓄水库。从长江至东平湖设13个梯级抽水站，总扬程65米（图4-7）。经泵站逐级提水进入东平湖后，分水两路，一路

向北穿黄河后自流到天津，另一路向东经新辟的胶东地区输水干线，即东平湖至引黄济青段240公里河道，通过引黄济青渠道向包括青岛在内的胶东地区供水⁴⁸。东线一期工程预计2014年前通车，根据山东省给青岛市下达的计划，青岛2015年引江（长江）水指标为1.46亿m³。

南水北调为青岛市供水的取水能耗计算分为两个步

骤：南水北调东线至东平湖段，电费0.22元/m³和电价0.5元/kWh，由此计算得电耗为0.44kWh/m³；⁴⁹继东平湖后进入引黄济青工程水渠，参考引黄济青工程电耗0.32kWh/m³。因此，南水北调到青岛的输水单位能耗估算为0.76kWh/m³。进入自来水厂之后，平均制水电耗在0.376kWh/m³，由此计算南水北调工程的取水制水能耗约1.136kWh/m³（图4-8）。

图4-7 | 南水北调工程东线逐级抽水示意图

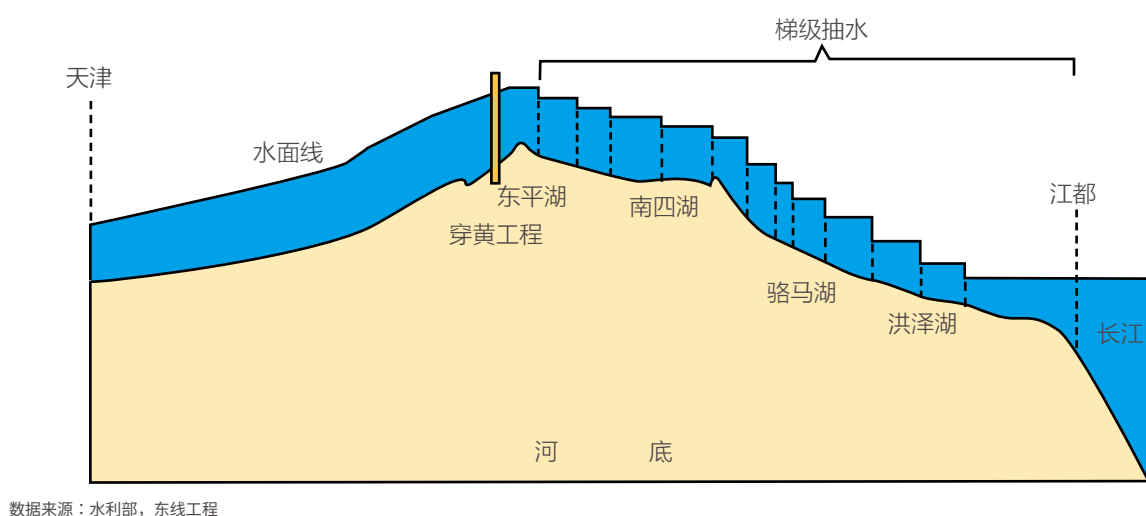


图 4-8 | 南水北调供青岛的取水、制水电耗

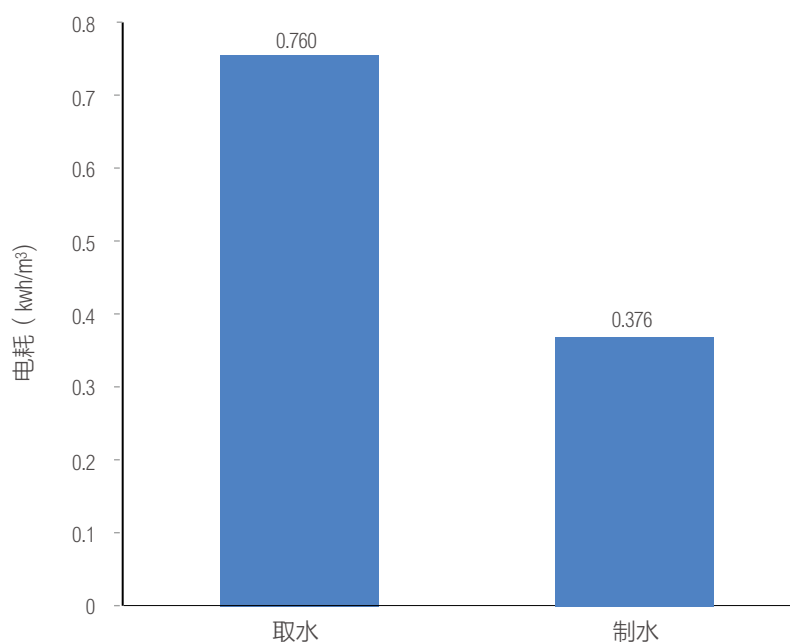
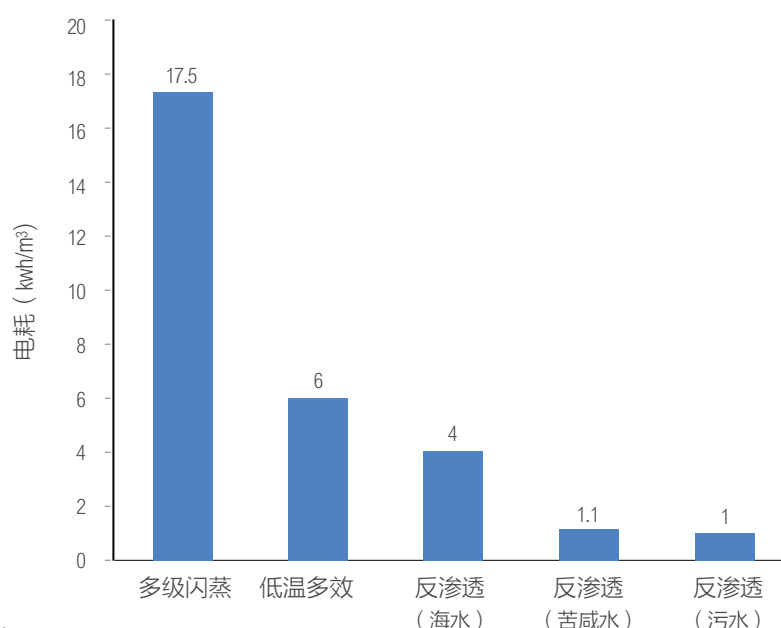


图 4-9 | 各种海水淡化技术的能耗比较



数据来源：Gary Amy，2009

淡化水

海水淡化

淡化水包括海水淡化和苦咸水淡化。经过多年的发展和不断的改进，海水淡化技术已成为解决淡水资源不足的一个重要途径。截至2012年，全球投产运行的海水淡化能力达到了7480万m³/日，其中约62%的产能供市政用水⁵⁰。

与天然水资源不同，取水能耗仅仅是海水淡化制水的很小部分，大多数能耗发生在制水过程中。目前，海水淡化的主要技术是热法和反渗透法，不同处理技术的能耗有较大差异（见图4-9）⁵¹。

热法海水淡化技术主要包括多级闪蒸、低温多效，能源消耗上以热能为主，电能作为辅助能源。其中，低温多效技术由于处理温度低，可以使用余热、废热等廉价能源作为热源，耗电量较小。例如，山东黄岛电厂3000m³/日的低温多效单元吨水电耗仅1.65kWh，但加上蒸汽消耗，总能耗仍然在6kWh/m³。近年来由于燃料成本上升，采用低温多效制水的经济效益下降，黄岛电厂的低温多效装置已经停机闲置。多级闪蒸技术燃料成本较高，综合能耗均值接近18kWh/m³。

反渗透技术需要较大的渗透压保证出水质量，其能源消耗以电能为主，能耗成本是其总成本中比重最高的一部分。反渗透技术的能耗与进水海水盐度有关，进水盐度越高，其能耗也越高，因此不同地区的反渗透海

水淡化设施能耗有一定差异。国内发展反渗透的时间较短，设施不多且普遍较新，吨水电耗平均值为4.2kWh左右。

目前，青岛市有两套运行的反渗透海水淡化装置用于工业用水，其中青岛碱业的单位能耗为3.5kWh/m³，黄岛电厂反渗透装置的单位能耗约5kWh/m³。已经建成但未运行的百发设计能耗为4kWh/m³。综上所述，青岛海水淡化的取水制水能耗为4kWh/m³。

海水淡化虽然被视为解决沿海城市缺水问题的重要手段之一，但是因为其高成本和高能耗，在欧洲国家一般作为城市战略的备用水源（如伦敦）。对于海水循环流动性较差的内海或者海湾，需要充分考虑浓盐水排放对海洋环境的影响（专栏2介绍了青岛碱业集团“海水淡化—盐化工联产”的案例）。此外，淡化海水与天然水源共同作为市政水源时，需要谨慎考虑混合、能源类型等问题。

苦咸水

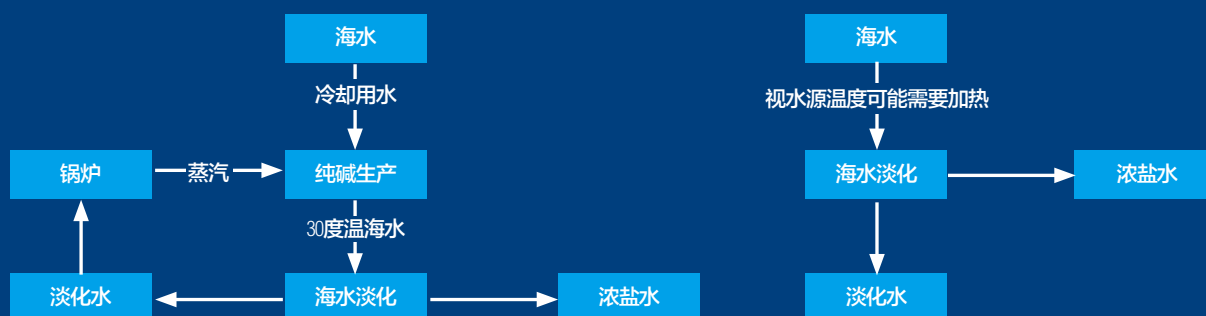
苦咸水淡化是另一个可能发展的方向。苦咸水的TDS浓度为1000-10,000mg/L之间，相当于海水的3%-28%⁵²，利用反渗透工艺进行淡化的能耗也相对较低，在0.3-1.4kWh/m³⁵³。青岛西北的平度市严重缺水，但具有比较丰富的苦咸水资源，若进行开发利用，在成本上和能耗上都较海水淡化具有优势。苦咸水的取水制水能耗为1.4kWh/m³。

专栏 2 | 海水淡化与浓盐水综合利用

浓盐水是海水淡化的副产品，其溶解性总固体含量（TDS）比海水高40%-350%，目前主要以深海排放的形式进行处理。目前，我国的海水淡化产业主要集中在北方海域，特别是海水循环流动性较差的渤海和胶州湾。随着海水淡化规模的扩张，直接排放可能破坏局部海域的生态环境，由此造成的海洋污染问题不容忽视。

青岛碱业集团的海水淡化工程采用“纯碱生产—海水淡化—浓盐水循环制碱”的模式，不仅解决了浓盐水直排的环境问题，还降低了海水淡化的能耗，提高了企业的综合效益。青岛碱业海水淡化工程设计规模为2万m³/日，一期工程（7000m³/日）于2010年6月投产运行。与其他海水淡化项目不同，青岛碱业采用纯碱生产过程排放的冷却水，即30度左右的温海水为水源。源自冷却系统的温海水经过反渗透设备处理，约有45%的水量形成淡水，经深度处理后成为高品质工业锅炉用水；55%的海水成为浓盐水，进入青岛碱业现有的盐水车间，供化盐使用。该工艺与常规海水淡化工艺的比较见下图。

青岛碱业海水淡化工艺与常规工艺的比较



该项目的主要优点在于：

利用冷却系统废热降低海水淡化系统的能耗。反渗透系统的最佳工作温度在30度左右。Abdulgader的研究表明，提高进水温度可以显著降低能耗，并提高淡水产水率。青岛碱业充分利用废热，海水淡化系统的吨水电耗在3-3.5kWh之间，比常规的反渗透系统低12.5%-25%。

利用淡化水做锅炉用水能降低对淡水资源的需求，并节约用水成本。青岛碱业的海水淡化工程每年可以节约淡水250万立方米。制水成本在8块/m³左右，较使用自来水做锅炉用水的成本低20%-30%（自来水需要经软化处理，成本更高）。

回收利用浓海水，实现环境和企业效益的双赢。据介绍，采用浓海水化盐制碱，每年可以节约6万吨工业盐，也就是将近2000万元的生产成本。此外，浓海水常年保持30度的水温，无需额外加热，进一步减少了生产过程中的能源消耗。

海水淡化项目还可以将浓海水直接用于制盐，可使制卤周期缩短50%以上，节约沿海地区大量宝贵的土地。在浓盐水中提取钾、溴、镁、锂等元素的研究也在进行之中。

数据来源：项目组在青岛碱业集团海水淡化厂的调研访谈；Abdulgader A. Maghrabi. EFFECT OF HIGH FEED TEMPERATURE ON NANOFILTRATION AND RO MEMBRANE PERFORMANCE. 2005

再生水

青岛市是全国最早开展再生水利用的城市之一。早在2003年就发布实施了《青岛市城市再生水利用管理办法》和《青岛市再生水利用规划》。目前，市区已建成了两个集中再生水利用工程项目。海泊河再生水利用示范工程处理规模4万m³/日，敷设供水管网43公里。团岛再生水利用工程设计处理规模0.5万m³/日，建设供水管网14公里。再生水主要用于工业冷却、生产工艺、绿地浇灌、市政清洁、河道景观、居民冲厕、基建施工、水源热泵等方面。

再生水处理的能耗取决于处理工艺和出水水质的要求。在出水作为非饮用/非接触用水的情况下，以膜生物反应器（MBR）为代表的生化处理工艺可直接处理城市污水，但其处理能耗在0.45-0.91kWh/m³之间⁵⁴；而以超滤（UF）为代表的膜分离技术更适合处理二级

污水处理厂的出水，其能耗在0.1kWh/m³左右⁵⁵。以青岛海泊河再生水利用示范工程为例，其水源来自经前端污水处理厂处理达到1级A标准的排水，处理工艺为生物滤池+超滤。根据调研分析，生物滤池的能耗大致为0.255kWh/m³（全国污水处理信息系统），加上超滤，系统的处理能耗为0.355kWh/m³。

再生水利用的另一个发展方向是利用反渗透技术制备高品质再生水（新生水）。根据新加坡新生水的能耗信息，高品质再生水（新生水）的制水能耗约为0.72-0.92kWh/m³，仅为海水淡化的1/4。目前，新加坡已经累计建成了46万m³/日的新生水设施⁵⁶，污水处理厂排水经超滤、反渗透处理后，得到高质量的成品水，主要用于工业生产（如芯片制造工业等）。此外，约有6%的再生水用于间接饮用水，与水库水混合之后作为饮用水源，相当于满足了新加坡1%的饮用水需求⁵⁷。

4.3 青岛市各类水源的供水潜力

青岛市未来主要可用水源包括：本地地表水、本地地下水、黄河调水、长江调水、淡化海水和再生水。不同类型水源的可供水潜力以及单位制水能耗分析见图4~10。图中，每个立柱表示一种水源，立柱宽度表示该水源的年供水潜力，而立柱高度则表示该水源类型在达到饮用水质量标准时的制水能耗。

根据分析，可以得出：

1. 不包括淡化海水，青岛市其他各类水源的供水总潜力为22.85亿m³，其中本地地表水和地下水的供水潜力为14.63亿m³。如果提高青岛本地水生态安全系数，地表水开发利用率不超过0.4，地下水开发利用率不超过0.5，则本地水资源供水潜力仅为11.04亿m³（其中，地表水潜力6.4亿m³，地下水潜力4.64亿m³），远低于青岛市的用水需求。因而青岛市必须通过调水、再生水和淡化海水来解决水资源供需矛盾。

(1) 地表水资源：一般国际上认为地表水资源开发利用比率达到0.4时为河流水资源开发的警戒线，有研究认为我国七大河流的水资源开发利用阈值应为0.31-0.45之间（王西琴、张远，2008），但是我国北方地区由于水资源匮乏，地表水资源的开发程度都较高，远远超过开发利用阈值，如海河开发利用率甚至接近90%⁵⁸。一般认为地表水资源开发利用超过55%时就会出现生态系统的高风险⁵⁹。当开发利用率为55%时，青岛市多年平均地表水资源的供水潜力⁶⁰为8.8亿m³。

(2) 地下水资源：根据《青岛市“十一五”水资源综合利用发展建设规划》（2007），青岛市地下水资源可开采量为5.83亿m³，即为青岛市地下水资源的供水潜力。

(3) 外调水：调水水量需由上级水行政部门批准。根据青岛市调水分配计划，引黄水量为1.10亿m³，引江水量为3.02亿m³⁶¹。

(4) 再生水利用：以青岛市2020年城镇居民用水达到5.83亿m³估测，预计2020年生活污水产生量为4.67亿m³。考虑再生水生产损耗（20%），则再生水的最大供水潜力可以达到3.74亿m³。

(5) 苦咸水：由于缺乏苦咸水储量信息，本报告根据青岛市的苦咸水淡化规模进行预测。根据与新河化工园提供的规划信息，园区拟建一座10万m³/日的苦咸水淡化厂，最大供水潜力为0.36亿m³。

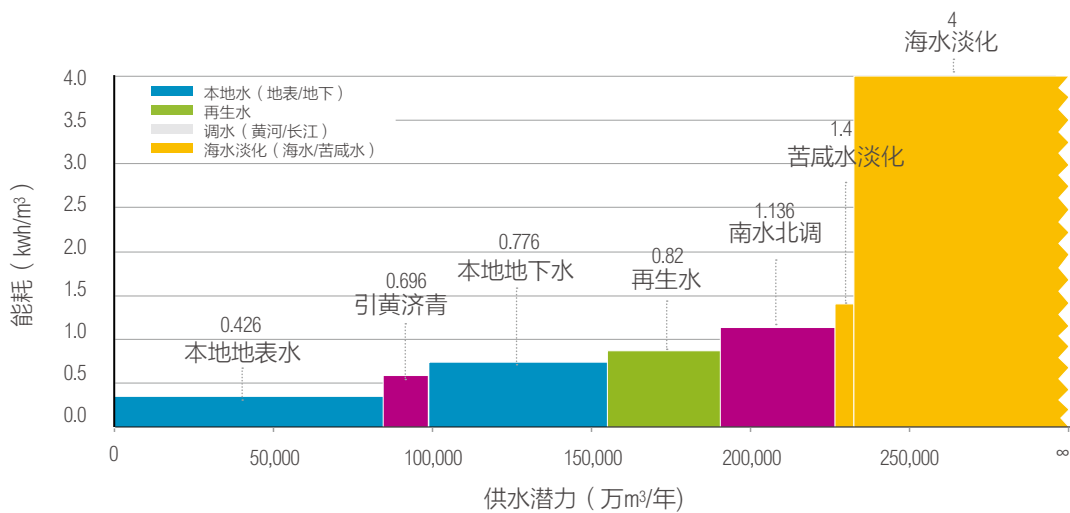
2. 以达到饮用水水质为标准，淡化海水的单位制水能耗最高，约4kWh/m³，为能耗最低的本地地表水单位制水能耗的10倍之多。不同类型水源的制水能耗排序为：本地地表水<外调水（引黄）<地下水<再生水（新生水）<外调水（引江）<苦咸水淡化<海水淡化。

3. 在外调水中，引黄水的单位制水能耗为引江的60%左右，青岛市优先选择从黄河调水将降低调水水源对制水能耗的影响。

4. 再生水利用不仅具有较大的供水潜力，而且是非常规水源中制水能耗最低的水源。高品质再生水（新生水）的单位制水能源为在0.72-0.92kWh/m³之间⁶²，甚至低于引江调水的制水能耗（1.136kWh/m³）。

5. 在水资源尤其匮乏的平度市，可以优先开发苦咸水资源，以海水淡化为补充。平度市的苦咸水资源丰富，苦咸水淡化的能耗在1.41kWh/m³以内，仅为海水淡化的1/4。

图 4-10 | 青岛市不同类型水源的供水潜力与取水制水能耗曲线





青岛2020年水源选择与能耗情景分析

5.1 基准年：2011年青岛水源配置与制水能耗分析

青岛市2011年各区水源配置情况

2011年，青岛市供水总量为10.082亿m³，其中新鲜水9.677亿m³，海水淡化0.035亿m³，污水回用0.37亿m³。图5-1为青岛市2011年水源分配与利用桑基图，可以看出：

本地地表水供水量为4.55亿m³，占多年平均地表水资源量的28%；本地地下水供水3.668亿m³，占多年平均地下水资源量的39%；外调水（引黄济青）供水1.46亿m³。

从用水类型来看，2011年青岛市市政供水（包括农村集中式供水）总量为5.301亿m³，未经处理直接利用的水量为4.376亿m³。根据测算，青岛市2011年的工业重复用水量为9.199亿m³，城市生活污水回用量0.370亿m³。

在市政供水中，约有0.08亿m³由于输水管网漏损，未经使用直接进入环境。其余2.3亿m³供城镇居民和市政公用，1.59亿m³供工业用水，0.609亿m³供农村居民生活用水；直接用水中，3.11亿m³用于农田灌溉，0.695亿m³用于林牧副渔，还有约0.568亿m³用于生态环境补水。

图 5-1 | 青岛市2011年水源分配与利用桑基图

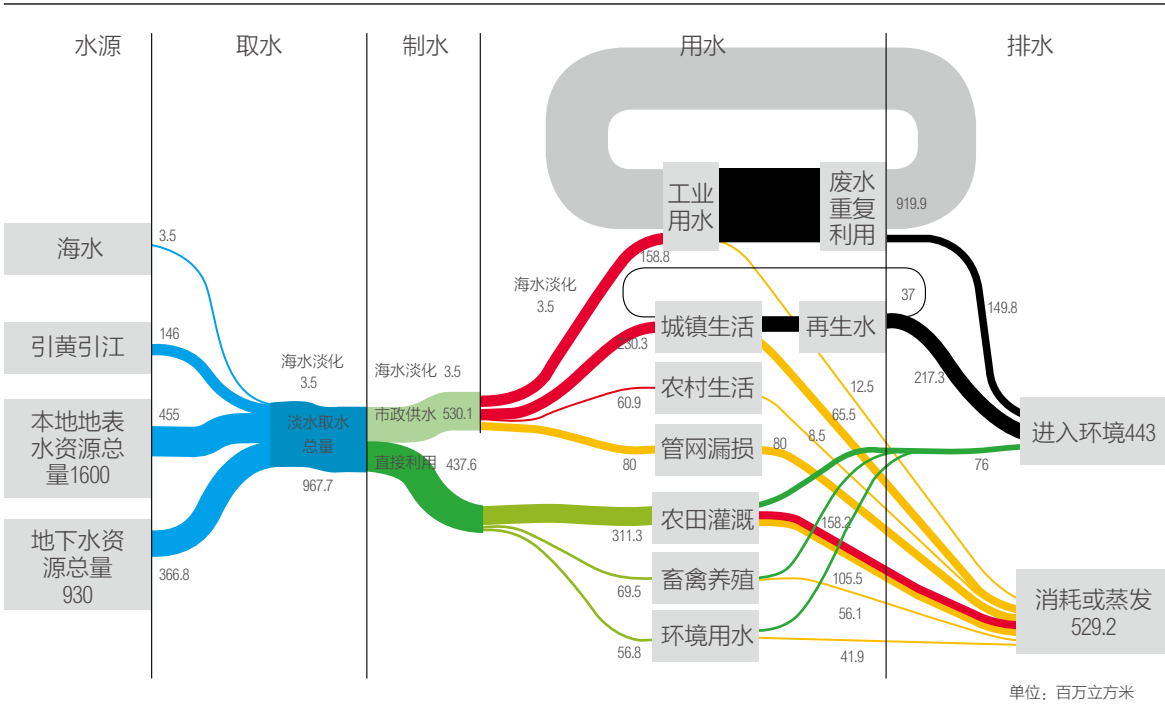
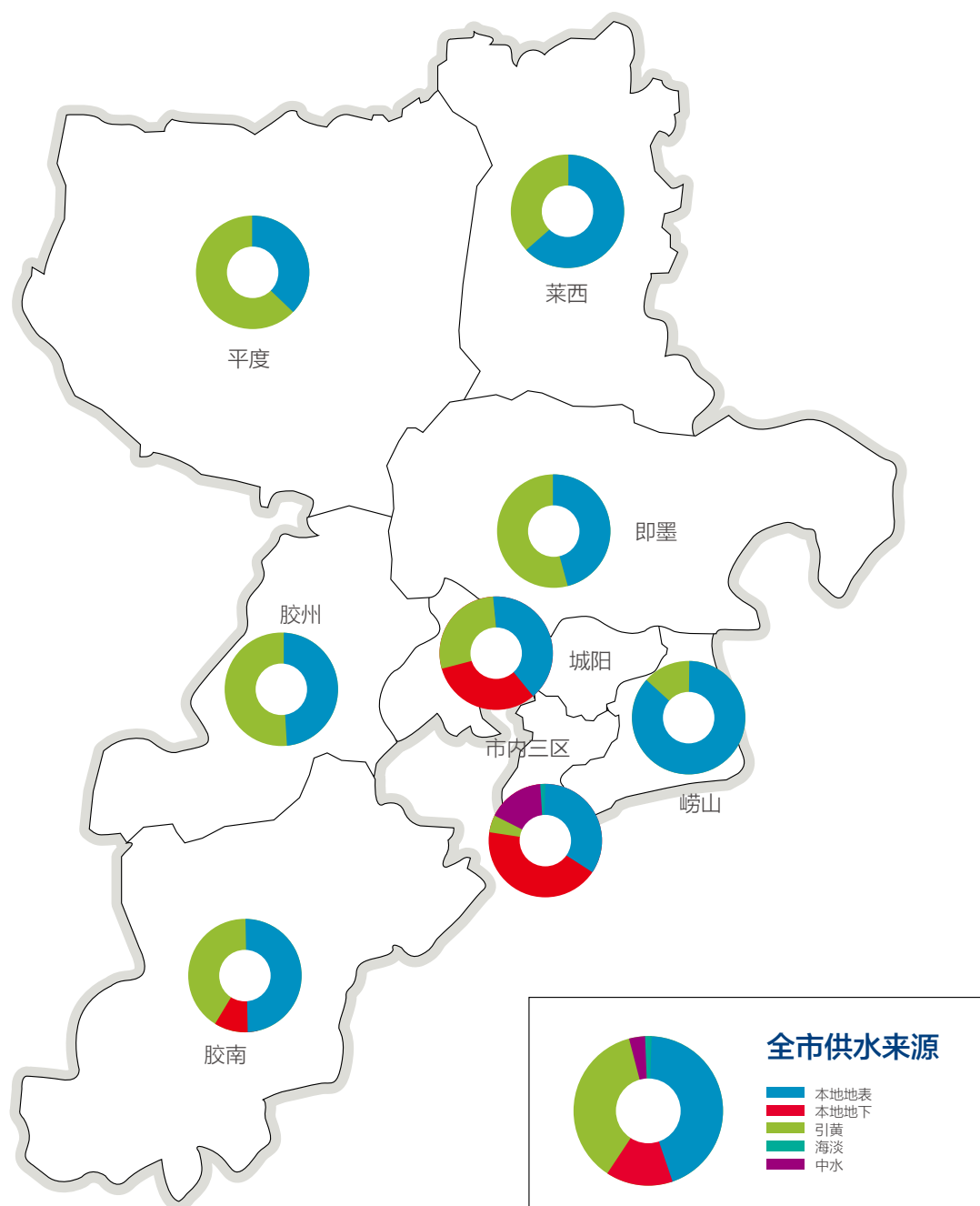


图 5-2 | 青岛市2011年分区供水来源



2011年青岛市各区的水源结构见图5-2。其中，市区供水来源以外调水、本地地表水为主。全市的再生水利用（目前的再生水为低品质再生水，主要用于市政杂

用）都在市区，占到了市区用水量的15%；黄岛区和城阳区部分使用了来自黄河的外调水；平度、莱西、即墨和胶州四市主要依靠本地的地表水和地下水。

青岛市2011年制水能耗分析

如第2.2节所言，本研究主要关注与水源类型直接相关的原水提取和制水过程中的能耗，以下简称制水能耗。生态用水的补给可以多元化，既可以是处理后的低品质再生水（会产生制水能耗），也可以是不经过处理

的地下水或地表水资源（仅包括取水能耗，而不需求制水能耗）。由于难以从现有水源中对生态用水来源进行剥离，因此在进行水源配置情景的制水能耗分析时，忽略生态用水的能耗问题。

表5-1和表5-2分别为2011年青岛市各行政区的分行业用水情况以及用水来源。

表 5-1 | 青岛市2011年市政、工业及农业供水（万m³）

	市区	崂山区	城阳区	黄岛区	即墨市	莱西市	平度市	胶南市	胶州市	合计
农田灌溉	0	57	400	140	2729	5605	13852	5087	3258	100821
林牧渔业	0	355	240	86	595	3225	978	910	562	
工业	5423	1086	2859	3270	1716	533	1357	1278	1576	
城镇公共	4498	348	536	489	794	453	941	607	643	
生活	9311	1507	1998	2036	3776	1839	2561	3042	2581	
生态环境	3739	218	150	110	350	271	311	225	310	
合计	22971	3571	6183	6131	9960	11926	20000	11149	8930	

数据来源：青岛市2011年水资源公报

表 5-2 | 青岛市2011年分区供水来源水（万m³）

	市区	崂山区	城阳区	黄岛区	即墨市	莱西市	平度市	胶南市	胶州市	合计
本地地表	7640	3090	2368	4188	4574	7525	7416	4328	4368	100821
引黄	10950	0	2000	1650	0	0	0	0	0	
本地地下	465	481	1815	162	5386	4401	12584	6821	4562	
再生水	3700	0	0	0	0	0	0	0	0	
海淡	216	0	0	131	0	0	0	0	0	

数据来源：青岛市2011年水资源公报

根据不同类型水源的单位制水能耗（见第4.2节）对2011年青岛市的制水能耗进行测算，约为4.69亿kWh（见图5-3）。其中，本地地表水制水能耗占41.3%（占供水量45.1%），引黄调水能耗占21.7%（占供水量14.5%），地下水能耗31.3%（占供水量36.4%），再生水能耗占2.8%（占供水量3.7%），海水淡化能耗占3%（占供水量0.3%）。

从各区的制水能耗来看（见图5-4），市区的制水能耗占比最大，其次是灌溉水量最大的平度市，崂山区的能耗占比最小。

图5-5对各区的平均制水能耗进行比较，可以看到市区、城阳、黄岛三地的平均制水能耗超过了全市平均值（0.465kWh/m³），这是因为以上区域较多地使用了外调水、海水淡化和再生水利用等单位能耗较高的水资源。

图 5-3 | 青岛市不同类型水源的供水比例以及制水能耗比例（2011年）

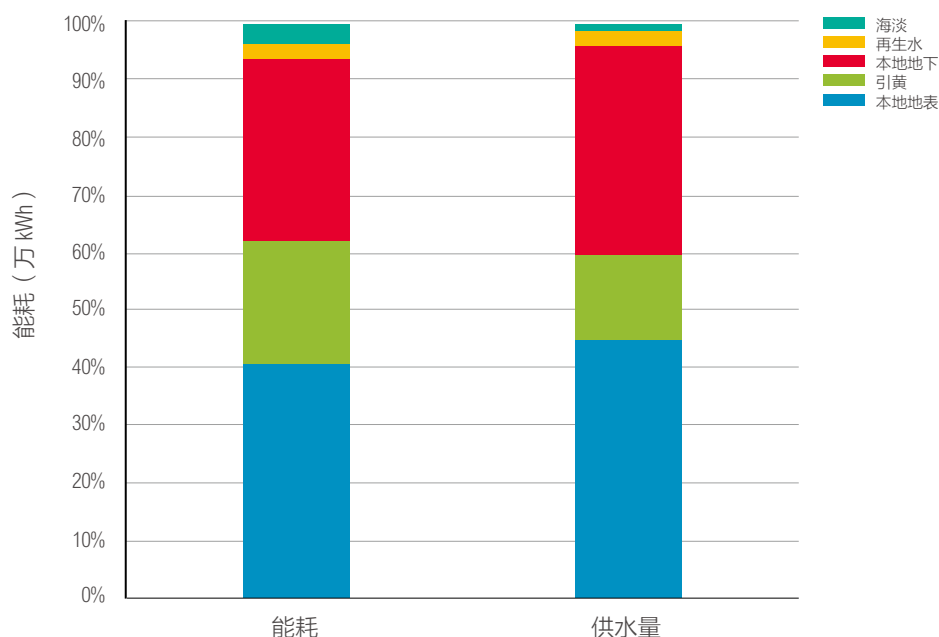


图 5-4 | 青岛市分区水源制水能耗（2011年）

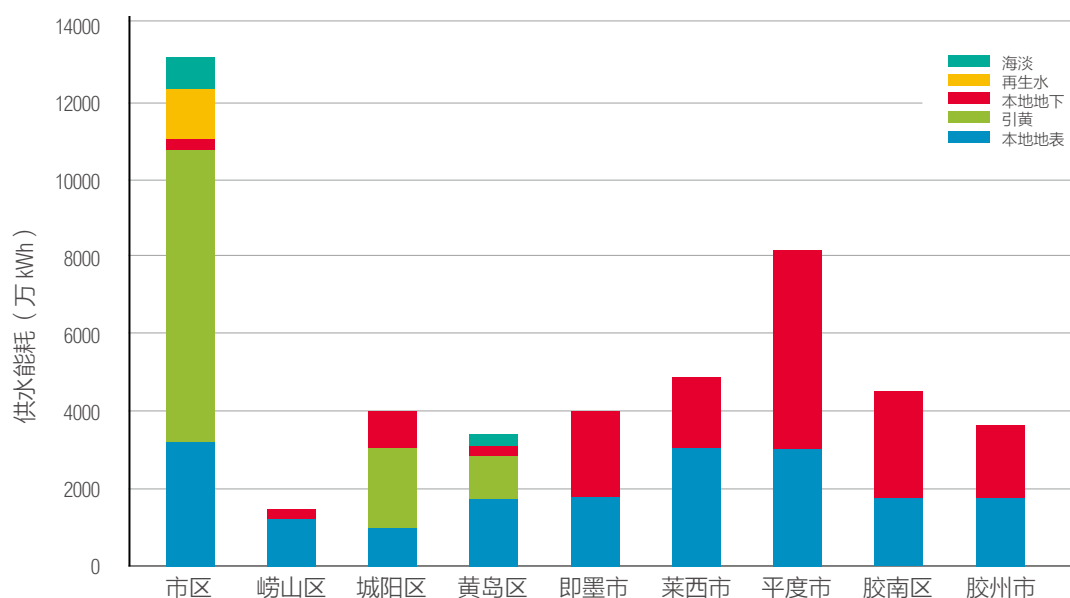
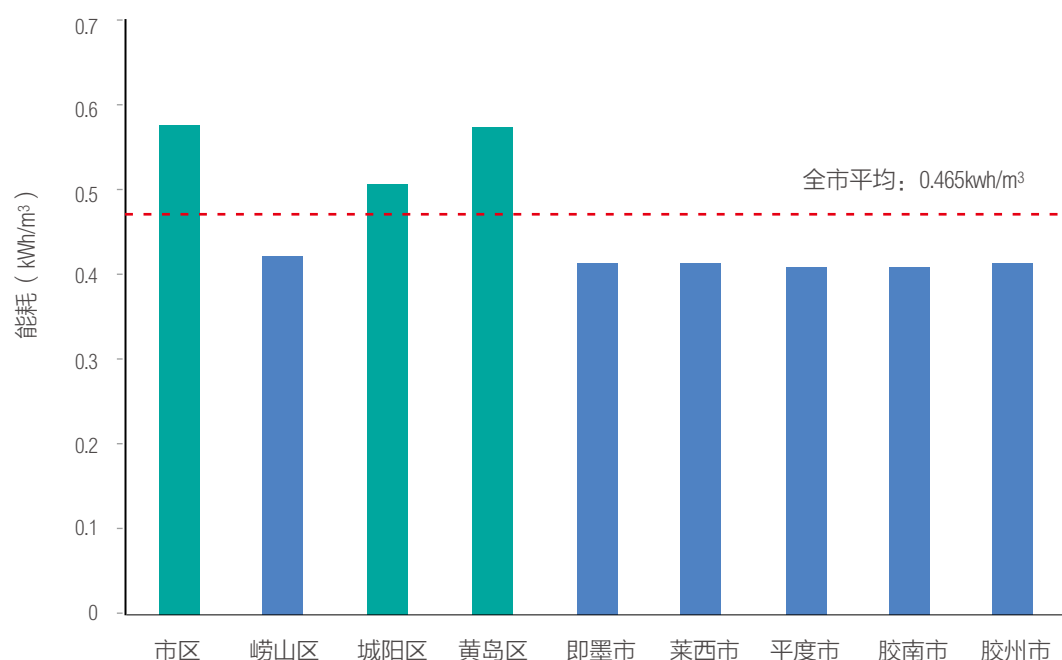


图 5-5 | 青岛市2011年分区单位制水能耗



青岛市2011年制水系统温室气体排放分析

根据《2010年中国区域及省级电网平均二氧化碳排放因子》，青岛属于华北电网，二氧化碳排放因子为0.8845kgCO₂/kWh。由于中国在2020年前仍然将维持以煤电为主的电力结构，我们采用了相同的二氧化碳排放因子来测算2020年供水系统的碳排放。

2011年，青岛市供水系统的二氧化碳排放量为41.5万吨，其中常规水源（本地地表水、地下水 and 外调水）取水过程中的排放约为19万吨，占全系统排放的46%，相关制水过程的排放量为20万吨，占比为48%，而非常规水源（海水淡化和再生水利用）由于水量甚微，其排放占总量的6%左右。

5.2 青岛市2020年水源配置情景设置

根据本报告第3.4节和附录一关于青岛市用水需求的预测，预计2020年全市需水总量将达到14.8亿m³，略高于青岛市2020年的用水红线指标（14.73亿m³），意味着青岛市必须重视非常规水资源的开发利用（注：非常规水资源不计入红线指标）。

在考虑2020年水源配置时，我们遵循以下原则：

- (1) 低于国家下达的用水总量红线（14.73亿m³）；
- (2) 以本地水资源开发为首选水源；
- (3) 考虑调水时，优先使用黄河调水配额。

根据优先开发本地水资源原则，我们以地表水利用率分别达到35%（与青岛2011年本地地表水利用率34%持平）、40%（地表水合理开发上限）和55%（地表水开发利用极限，考虑到青岛处于河道入海口，没有下游城市，不存在超量取水对下游区域的生态影响问题，所以在维持河口生态不受破坏的前提下，青岛可以适当增加对本地地表水的利用）设置了“地表35”、“地表40”和“地表55”等三个基础情景。由于青岛市本地水资源匮乏，必须通过利用外调水或非常规水资源作为补充，所以我们在基础情景之上再分别设置再生水优先、海水淡化优先和调水优先情景。

地表35-基础情景

1. 地表35-海水淡化优先情景

海水优先情景是指在非本地地表水以外的水资源中，优先考虑实现并配置青岛市2020年规划的海水淡化能力，再生水利用（0.37亿m³）和黄河调水（1.1亿m³）保持2011年水平。

假设青岛市按计划于2020年建成40万m³/日淡化海水能力（淡化海水分区规划规模及用途见表5-3，其中62%的新建产能集中在新黄岛区），所有设施产能负荷达80%，则2020年淡化海水可供水1.53亿m³，约为工业用水需求的50%，则引江0.7亿m³即可满足全市用水需求。地表35-海水淡化优先情景的青岛市水源分配和利用桑基图见图5-6。

2. 地表35-再生水优先情景

随着技术的发展和成本的下降，污水的深度处理和

回用在近年来受到了越来越多的关注。根据第4.2节分析，青岛市的再生水利用具有较大潜力，根据2020年城市生活用水预测可以估算出再生水的最大供水潜力为3.74亿m³。再生水具有制水能耗低的优势，不仅在非常规水源中最低，高品质再生水（新生水）制水能耗约为淡化海水的1/4；而且也低于南水北调引江水的制水能耗。低品质再生水（市政杂用）的制水能耗则更低，约为淡化海水的9%。

在地表35-再生水利用优先情景中，我们假设青岛市现有低品质再生水利用保持不变（3700万m³），同时增加高品质再生水（新生水）生产能力，并实现2020年的高品质再生水利用达到最大供水潜力的50%（即1.87亿m³），约为工业用水需求的62%；海水淡化保持2011年水平，即350万m³；黄河调水保持1.1亿m³，则需要从长江调水3270万m³可满足需求。

地表35-再生水优先情景的青岛市2020年水源分配和利用桑基图见图5-7。

表 5-3 | 青岛市规划海水淡化项目一览表

行政区	规划项目	设计能力（万立方米/日）	设计用途
黄岛	黄岛电厂	10	工业+民用
	黄岛南部海淡厂	2	民用
市区	青岛电厂及青岛碱业	8.5	工业
胶南	董家口	10	工业+民用
	灵山卫	1	工业+民用
	琅琊	1	民用
	田横	0.8	民用
城阳		4	民用+工业
即墨		1	民用
崂山	王哥庄	0.8	民用
平度	新河	0.5	民用
海岛		0.4	民用
合计		40	

数据来源：青岛市海水淡化规划，2010

图 5-6 | 地表35-海水淡化优先情景下的青岛市2020年水源分配和利用桑基图

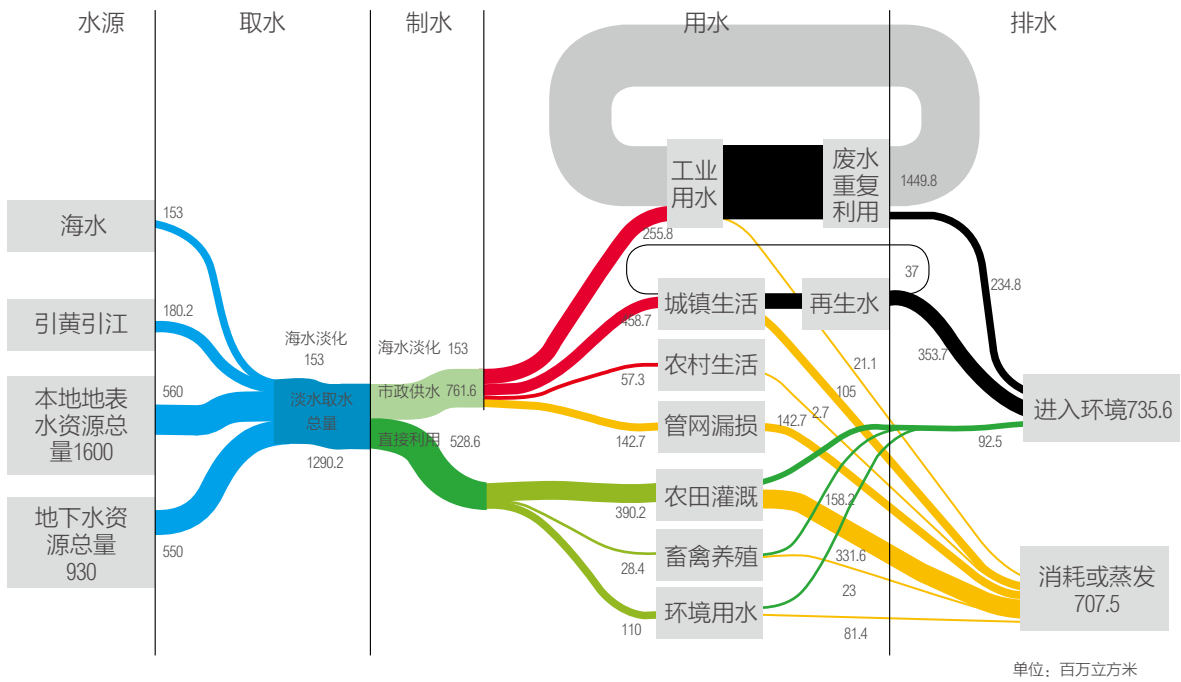
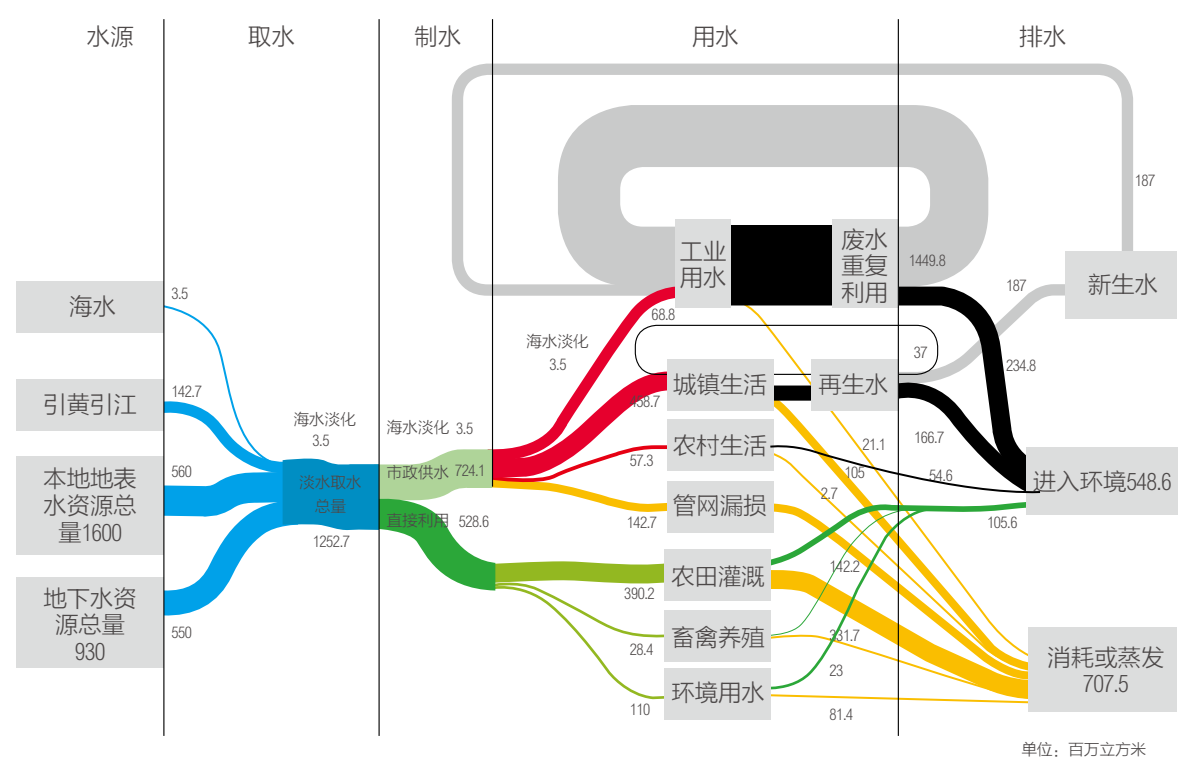


图 5-7 | 地表35-再生水情景下青岛市2020年水系统桑基图



3. 地表35-外调水优先情景

地表35-外调水优先情景下，再生水利用（0.37亿m³）、海水淡化（0.035亿m³）维持2011年水平，黄河调水1.1亿m³，需从长江调水约2.2亿m³。

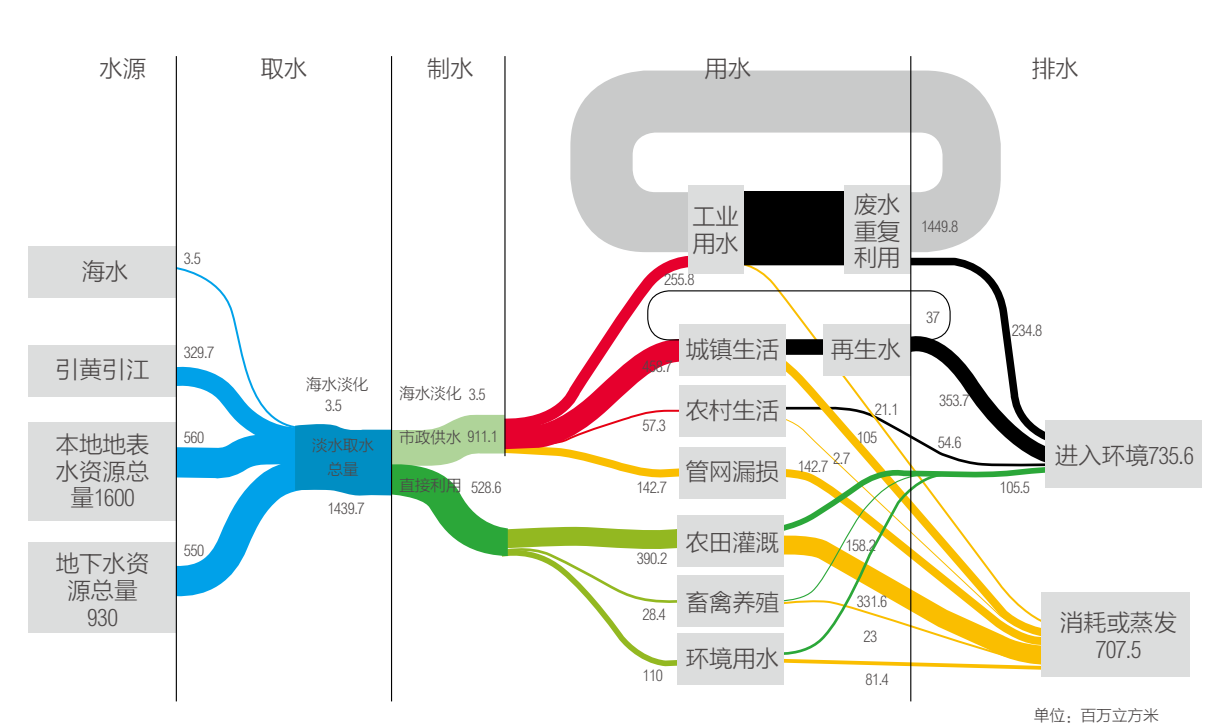
地表35-调水优先情景的青岛市2020年水源分配和利用桑基图见图5-8。

表5-4为地表35不同情景之下的水量分配。根据水量需求预测，2020年青岛市生态需求量为1.1亿m³。

表 5-4 | 地表35不同情景下的水量分配设置

水源类型	海水淡化优先情景 供水量（亿m³）	再生水利用优先情景 供水量（亿m³）	调水优先情景 供水量（亿m³）
本地地表	5.60	5.60	5.60
地下	5.50	5.50	5.50
引黄	1.10	1.10	1.10
引江	0.70	0.33	2.20
海淡	1.53	0.04	0.04
低品质再生水	0.37	0.37	0.37
高品质再生水 （新生水）	0.00	1.87	0.00
合计	14.80	14.80	14.80

图 5-8 | 地表35-调水情景下青岛市2020年水系统桑基图



地表40基础情景和地表55基础情景

地表40基础情景仍然保持地下水开发为5.5亿m³，但地表水资源的开发利用强度上升到40%，即青岛市本地地表水资源利用量达到6.4亿m³。

同样，我们在地表40基础情景和地表55基础情景下也分别设置了海水淡化优先、再生水优先、调水优先

3个亚情景。具体的情景设置条件与地表35基础情景类似，并同时考虑各分区的可用水资源量（见表3-2）和各区分行业用水需求预测（见附录一）。

当青岛市本地地表水开发利用率达到55%的极限时，地表水取水量将达到8.8亿m³/年。地表55基础情景的水量分配见表5-6。

表 5-5 | 地表40不同情景下的水量分配设置

水源类型	海水淡化优先情景 供水量（亿m³）	再生水利用优先情景 供水量（亿m³）	调水优先情景 供水量（亿m³）
本地地表	6.40	6.40	6.40
地下	5.50	5.50	5.50
引黄	1.00	0.63	1.10
引江	0.00	0.00	1.40
海淡	1.53	0.04	0.04
低品质再生水	0.37	0.37	0.37
高品质再生水 （新生水）	0.00	1.87	0.00
合计	14.80	14.80	14.80

表 5-6 | 地表55不同情景下的水量分配设置

水源类型	海水淡化优先情景 供水量（亿m³）	再生水利用优先情景 供水量（亿m³）	调水优先情景 供水量（亿m³）
本地地表	8.80	8.80	8.80
地下	5.50	5.50	5.50
引黄	0.00	0.00	0.10
引江	0.00	0.00	0.00
海淡	0.13	0.04	0.04
低品质再生水	0.37	0.37	0.37
高品质再生水 （新生水）	0.00	0.10	0.00
合计	14.80	14.80	14.80

5.3 地表35基础情景下的青岛市2020年制水能耗分析

地表35基础情景下的制水能耗

1. 海水淡化优先情景

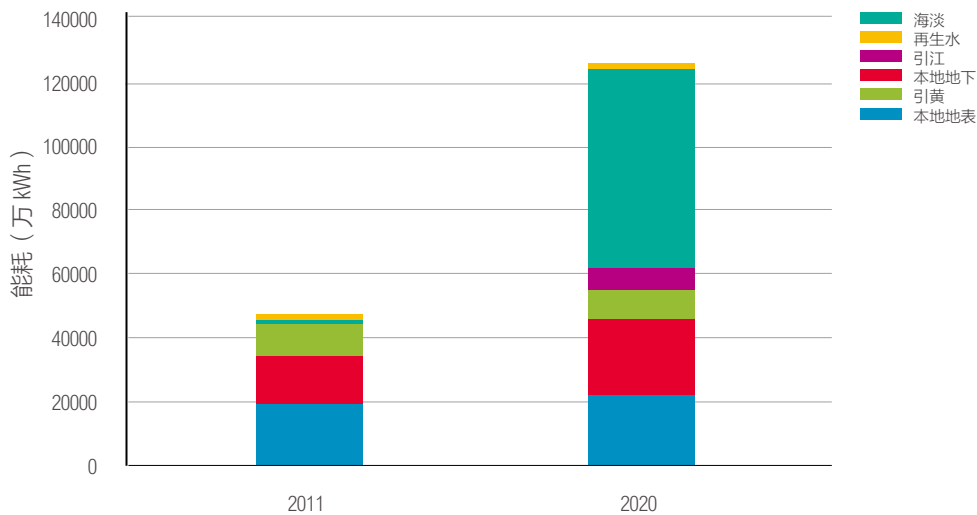
根据第4章不同水源类型的取水制水能耗分析以及第5.2.1节中有关地表35基础情景的水源配置方案分析，估算出地表35-海水淡化优先情景的水源结构和相关制水能耗（见表5-7）。

与2011年相比，如果2020年青岛市地表水开发率保持在35%，以淡化海水为优先水源，则总制水能耗将上升164%，达到12.40亿kWh。这主要是因为海水淡化能耗高，虽然在此情景下海水淡化供应仅占青岛总需水量的10%，但却贡献了制水系统能耗的49%（见图5-9）。

表 5-7 | 地表35-海水淡化情景下的水源结构及能耗（2020年）

水源	水量（亿m³）	能耗（亿kWh）
本地地表	5.60	2.39
本地地下	5.50	2.20
引黄	1.10	0.77
引江	0.70	0.80
海淡	1.53	6.12
低品质再生水	0.37	0.13
合计	14.80	12.40

图 5-9 | 青岛市制水能耗变化比较（地表35-海水淡化情景）



外调的长江水和黄河水均由棘洪滩水库进入青岛市的市政取水系统，与来自尹府水库、产芝水库的本地水混合，经处理后由市政配水系统输送至各服务区的用户。所以，系统并不能追踪黄河水、长江水在各行政区的分配比例。在能耗计算中，我们根据黄河水和长江水的调水比例核算出一个平均的“外调水”能耗值，为0.867 kWh/m³。

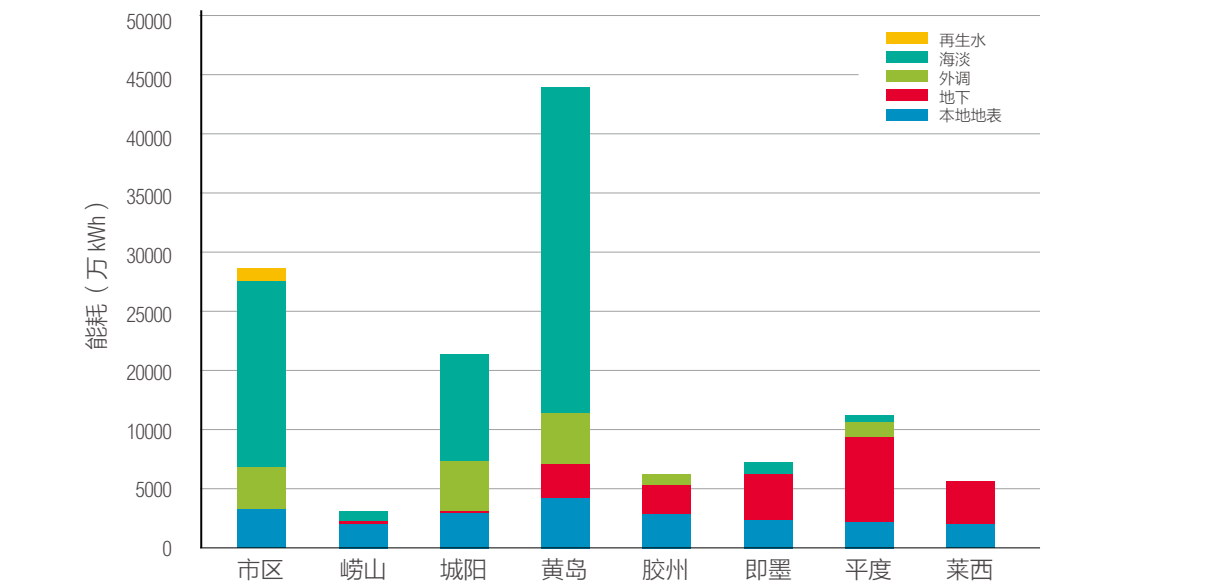
分解到各行政区的供水相关能耗见表5-8：

到2020年，黄岛区（由原黄岛区和胶南市合并）将取代市区，成为青岛需水量最大、制水能耗最高的地区，其次是市区和城阳区。这和各区的海水淡化能力是成正比的。海水淡化是拉高青岛制水能耗的主要因素（图5-10）。

表 5-8 | 地表35-海水淡化情景分区制水能耗（2020年，万kWh）

能耗	市区	崂山	城阳	黄岛	胶州	即墨	平度	莱西	小计
本地地表	3609	2245	3140	4489	3040	2639	2533	2160	23856
地下	0	40	120	3280	2840	4000	7800	3920	22000
外调	3913	0	4771	4771	786	0	1388	0	15627
海淡	17428	980	10112	30844	0	1224	612	0	61200
再生水	1314	0	0	0	0	0	0	0	1314

图 5-10 | 地表35-海水淡化优先情景下各区制水能耗（2020年）



与2011年比较，能耗增长最快的是城阳和黄岛，主要原因也是海水淡化设施运行带来的高能耗（图5-11）。

根据测算，2020年青岛的制水能耗将达到 $0.84\text{kWh}/\text{m}^3$ ，较2011年基准（ $0.465\text{kWh}/\text{m}^3$ ）上升80%。其中，黄岛区的供水能耗将达到 $1.36\text{kWh}/\text{m}^3$ ，市区、城阳区也会分别达到 1.25 、 $1.16\text{kWh}/\text{m}^3$ 。而主要依靠本地地表水和地下水的胶州、即墨、平度和莱西能耗基本维持在 0.41 - $0.48\text{kWh}/\text{m}^3$ 之间，与2011年相比变化不大（图5-12）。

2. 地表35-再生水优先情景下的能耗

同样估算地表35-再生水情景下的水源结构和相关能耗（见表5-9）。在此情景下，青岛市2020年供水的总能耗为7.53亿kWh，比海水淡化情景要低近40%。

与2011年相比，青岛市2020年的供水总量上升47%，总制水能耗将增加60%（图5-13）。能耗的主要增长点来自于高品质再生水利用。新生水提供了12%的高质量水源（主要用于工业），占青岛供水系统总能耗的20%。

分解到各行政区的制水能耗见表5-10。

图 5-11 | 地表35-海水淡化情景各区制水能耗变化趋势

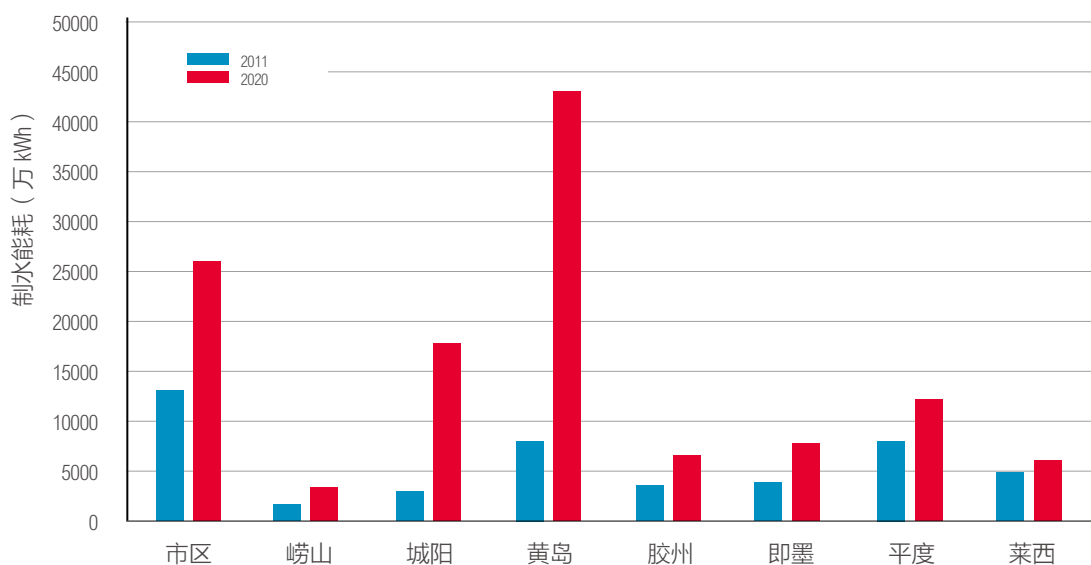


图 5-12 | 地表40-海水淡化情景下各区单位制水能耗（2020年）

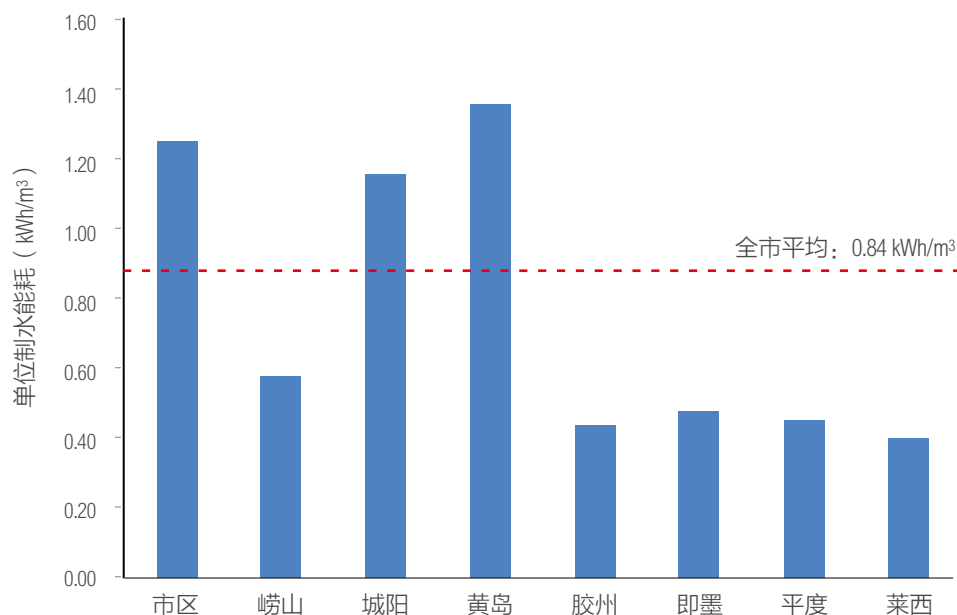


表 5-9 | 地表35-再生水利用情景下的水源结构及能耗（2020年）

水源	水量（亿m³）	能耗（亿kWh）
本地地表	5.60	2.39
本地地下	5.50	2.20
引黄	1.10	0.77
引江	0.33	0.37
海淡	0.04	0.14
高品质再生水（新生水）	1.87	1.53
低品质再生水	0.37	0.13
合计	14.80	7.53

图 5-13 | 地表35-再生水利用情景下的水源结构及能耗（2020年）

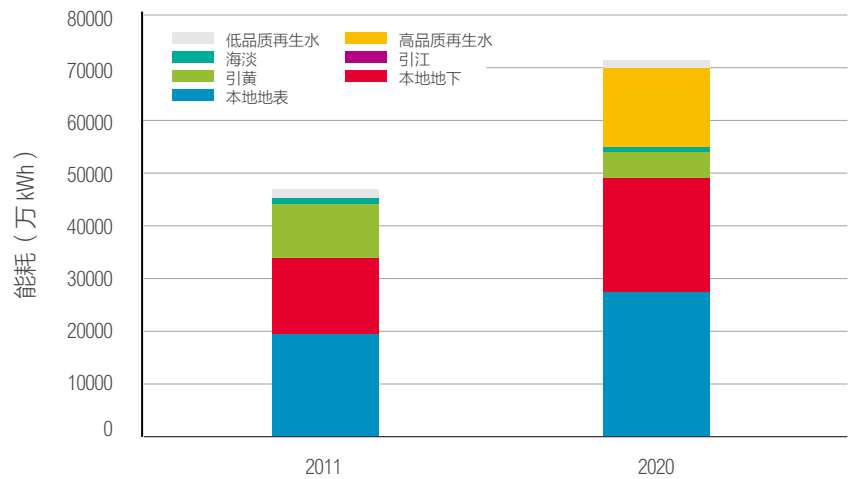


表 5-10 | 地表35-再生水情景分区制水能耗（2020年，万kWh）

	市区	崂山	城阳	黄岛	胶州	即墨	平度	莱西	合计
本地地表	3042	2264	4572	6645	2574	1917	1533	1308	75271
地下	0	46	141	3160	2840	3800	7800	4213	
外调	7968	0	1328	797	0	0	1275	0	
海淡	800	0	0	600	0	0	0	0	
再生水	1314	0	0	0	0	0	0	0	
新生水	0	164	2460	5740	1640	1640	2050	1640	

在再生水利用情景下，制水能耗绝对量最大的是黄岛区，其次是市区（图5-14）。一方面是因为新黄岛区需水量将居全市第一，另一方面是因为非常规水源的能耗要高于本地水资源。

由图5-15可见，除了主城区、城阳和黄岛，各行政区的制水能耗均低于全市平均水平，且差别不大，在0.44-0.48kWh/m³之间；而主城区因为集中了全市现有海水淡化设施的生产，单位制水能耗高达0.65kWh/m³，高于0.51kWh/m³的全市平均水平。

3. 地表35-调水优先情景下的能耗

调水情景下的水源结构和相关能耗见表5-11。

在地表35-调水情景之下，青岛在2020年需要将外调水量增加到接近3.3亿m³/年，考虑到黄河流域的用水压力和供水保证率，将黄河水量控制在1.1亿m³，而引江水达到2.2亿m³。由此测算，青岛市2020年供水系统的能耗将达到每年8.12亿kWh，比海水淡化情景低34.5%，但比再生水情景高8%。

与2011年相比，青岛市在地表35-调水情景下的2020年总制水能耗上升了73%，能耗的主要增长点来自于引江。引江工程提供了15%的水源，占青岛制水总能耗的31%（图5-16）。

分解到各行政区的制水能耗见下表：

图 5-14 | 地表35-再生水情景下各区制水能耗（2020年）

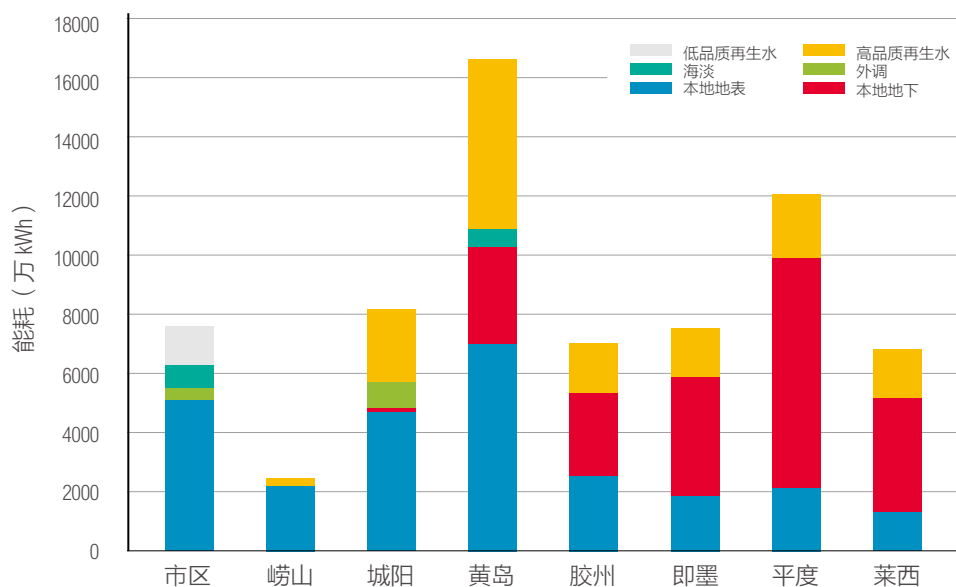


图 5-15 | 地表35-再生水情景下各区单位制水能耗（2020年）

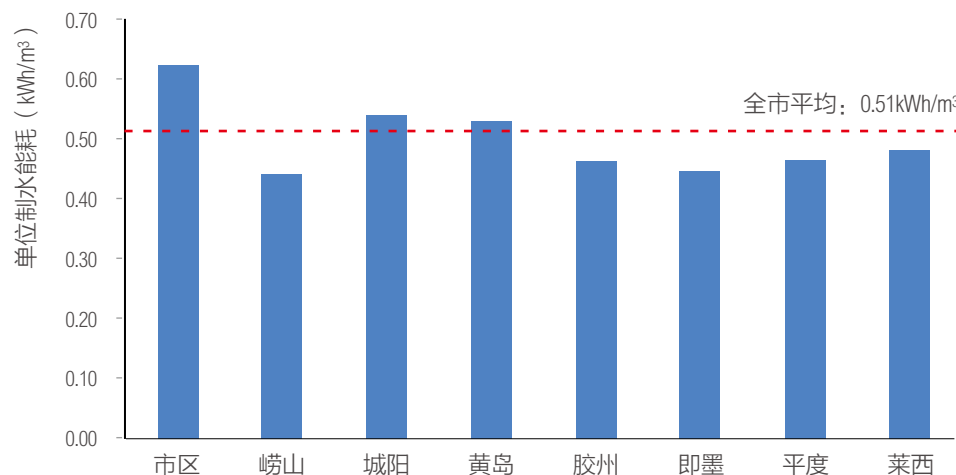


表 5-11 | 地表35-调水情景下的水源结构及能耗（2020年）

水源	水量（亿m ³ ）	能耗（亿kWh）
本地地表	5.60	2.39
本地地下	5.50	2.20
引黄	1.10	0.77
引江	2.20	2.50
海淡	0.04	0.14
低品质再生水	0.37	0.13
合计	14.80	8.12

图 5-16 | 青岛市制水能耗比较（地表35-调水情景）

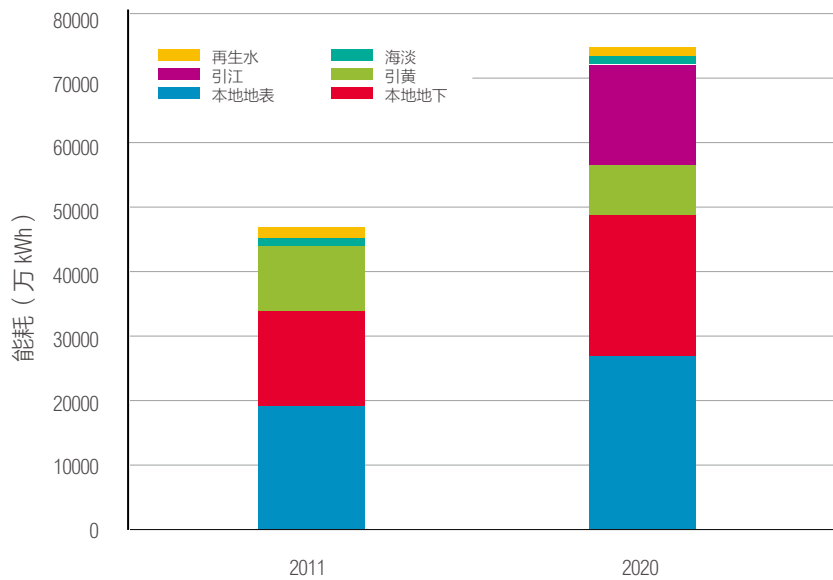


表 5-12 | 地表35-调水情景分区制水能耗（2020年，万kWh）

水源	市区	崂山	城阳	黄岛	胶州	即墨	平度	莱西	合计
本地地表	3042	2350	2300	5793	2844	2769	2598	2160	81180
地下	0	40	120	3280	2840	4000	7800	3920	
外调	9892	0	9892	9892	1352	0	1583	0	
海淡	800	0	0	600	0	0	0	0	
再生水	1314	0	0	0	0	0	0	0	
小计	15047	2390	12312	19565	7036	6769	11981	6080	

图 5-17 | 地表35-调水情景下各区制水能耗（2020年）

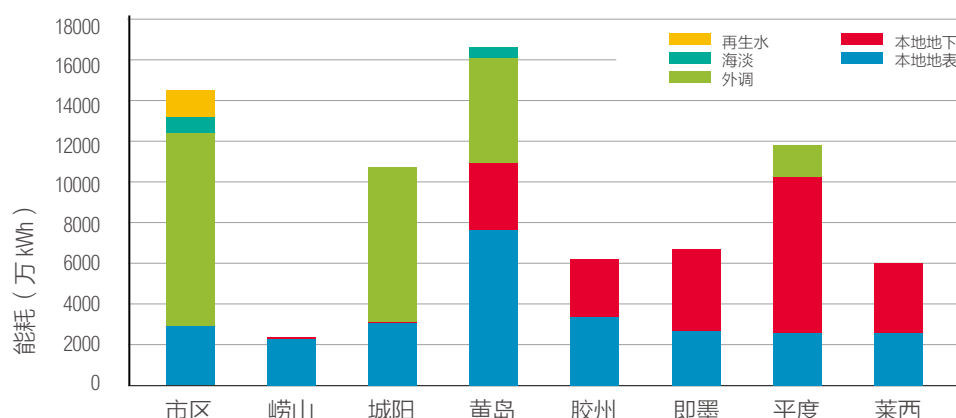
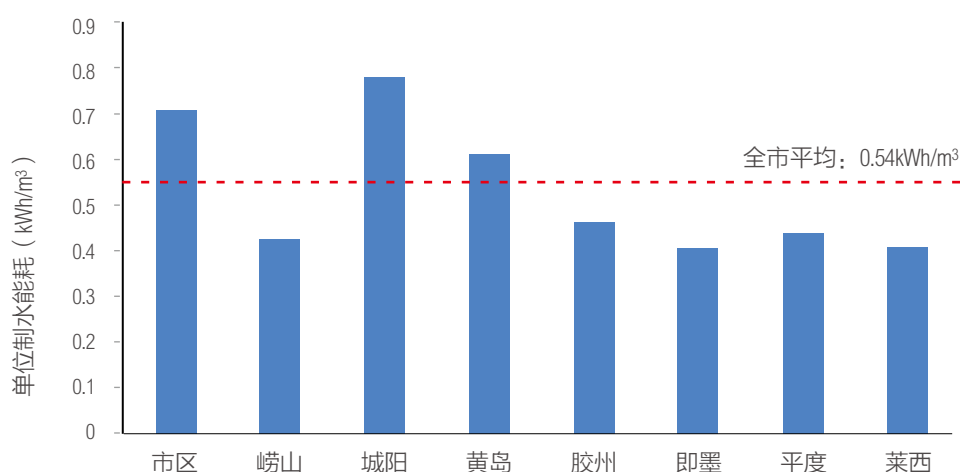


图 5-18 | 地表35-调水情景下各区单位制水能耗（2020年）



由于引江水的能耗较高，达到了 $1.136\text{kWh}/\text{m}^3$ ，甚至高于新生水的能耗（ $0.82\text{kWh}/\text{m}^3$ ），所以大量使用长江水会增加局部地区的单位制水能耗。由于市区、黄岛和城阳将是长江引水的主要用户，其供水总能耗和单位能耗都位于全市的前三位（图5-17，图5-18）。

地表35基础情景下的制水能耗比较

由于供水水量的增加，在三个情景之下青岛市2020年的供水总能耗都将显著上升，上升程度为再生水利用情景<调水情景<海水淡化情景（图5-19）。

分行政区的制水能耗见图5-20。

在所有的亚情景中，需水量最大（占全市总需水量的46%）的市区、城阳和黄岛三个地区的制水能耗也最大，在再生水利用、调水和海水淡化3个亚情景之下分

别占到全市制水总能耗的51%、58%和71%。

市区、城阳和黄岛三个地区本地水资源有限，未来将进一步增大对外调水或非常规水资源的依赖，所以对其制水能耗变化更为敏感。而其他地区主要依靠本地地表水和地下水资源，制水能耗主要取决于水量，对外调水、再生水利用和海水淡化的情景设置响应不敏感。

与总能耗类似，不同情景下的单位制水电耗也呈现出类似趋势：再生水利用情景<调水情景<海水淡化情景。2011年，青岛市的用水来源还是以本地地表水和地下水为主，能耗相对较低；到2020年，由于本地水资源已经不能满足城市发展需求，非常规水资源（再生水利用、海水淡化）及调水都将增加城市制水能耗。

但综合各区可以看出，发展再生水利用所带来的系统能耗增长相对较小（图5-21）。

图 5-19 | 地表35各情景能耗比较（2020年）

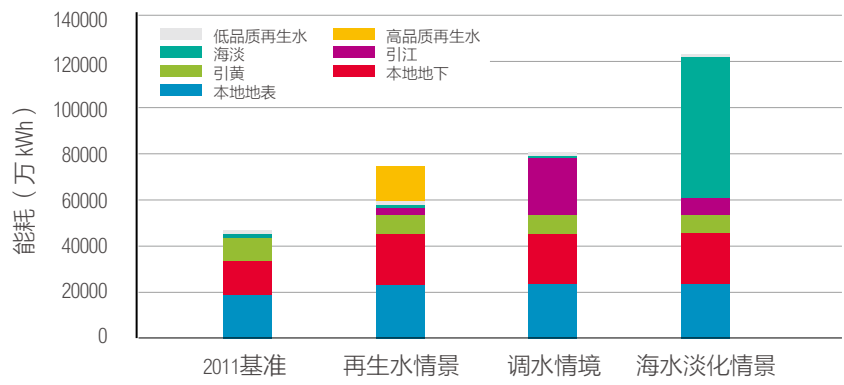


图 5-20 | 地表35各情景的分区分水能耗比较（2020年）

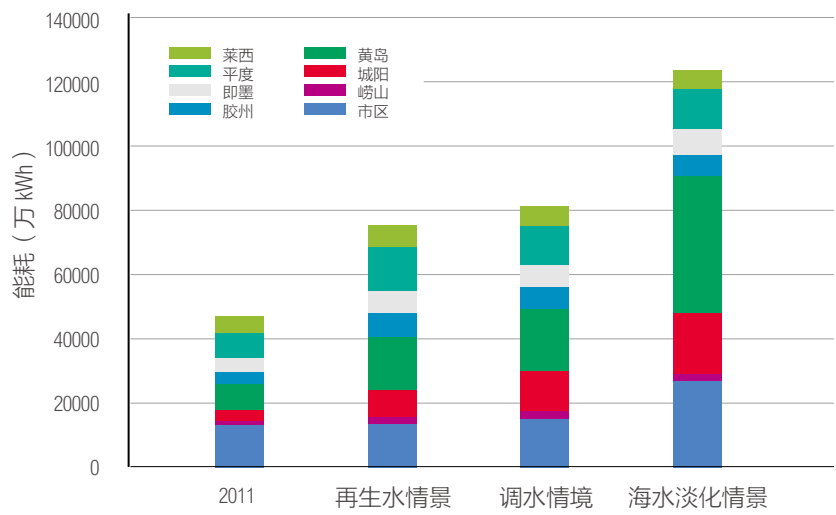
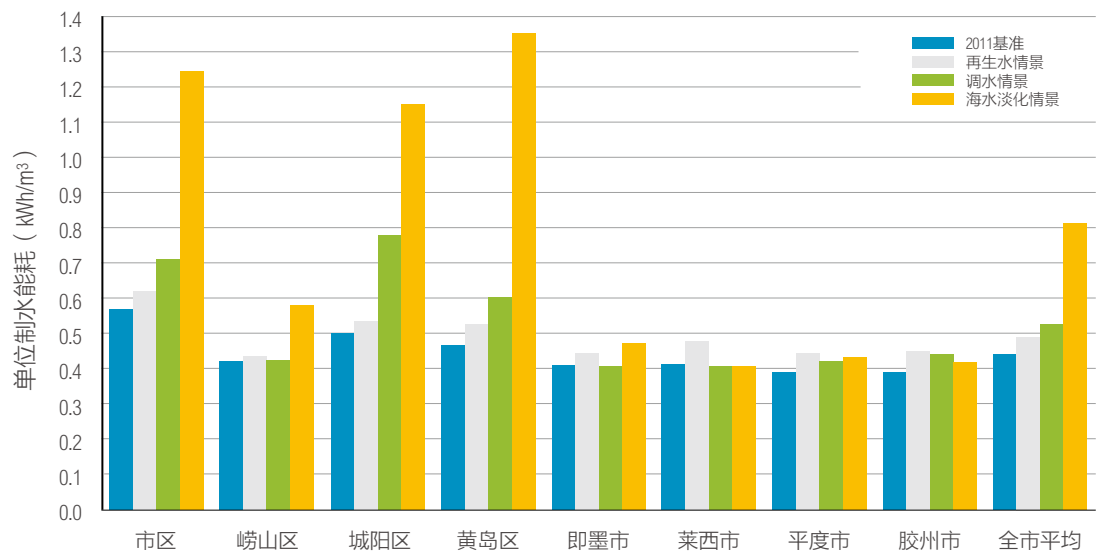


图 5-21 | 地表35不同情景下分区单位制水能耗比较



地表35基础情景下的碳排放预测

地表35情景下各亚情景（海水淡化、再生水利用和调水）温室气体排放与2011年基准值的比较见图5-22。

在海水淡化优先情景下，2020年青島制水过程的二氧化碳排放量为109.68万吨，是2011年的2.64倍。其中，常规水源取水过程中的排放为29.77万吨，占全系统排放的27%，相关制水过程为22.62万吨，占22%。海水淡化的碳排放达到54.13万吨，占49%。

在再生水优先情景下，2020年青島制水的二氧化碳排放量为66.58万吨，比2011增加60%。其中，常规水源取水过程中的排放为27.25万吨，占全系统排放的41%，相关制水过程为23.37万吨，占35%。高品质再生水利用（新生水）的排放量为13.56万吨，占20%。

在调水优先情景下，2020年青島制水的二氧化碳排放量为71.8万吨，比2011年上升73%。其中，常规水源取水过程中的排放为39.82万吨，占全系统排放的55%，相关制水过程为29.59万吨，占41%。

三种情景较2011年的温室气体排放量都有上升，这在很大程度上是由于供水量上升造成的。其中，上升幅度最大的是海水淡化情景，其次是调水情景。而再生水利用情景的温室气体排放量最小。

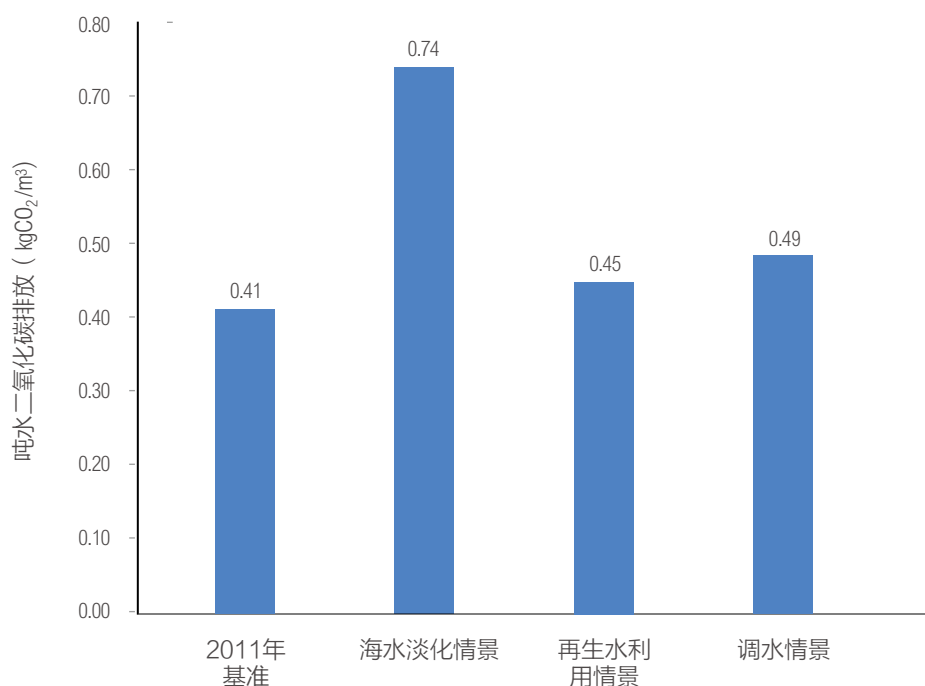
再生水优先情景下，青島水系统的温室气体排放量比调水情景低8%，比海水淡化情景低40%。

同时对单位制水碳排放的分析表明，再生水情景（高品质）下青島制水系统的吨水碳排放为0.45kgCO₂/m³，相对其他配水结构碳足迹最低，发展再生水利用将有利于降低水系统的碳排放（图5-23）。

图 5-22 | 青島2011年及地表35情景下2020年制水过程的温室气体排放



图 5-23 | 地表35情景下的单位制水碳排放（2020年）



5.4 地表40基础情景下的青岛市2020年制水能耗分析

地表40基础情景下的制水能耗

与地表35基础情景的分析方法相同，地表40基础情景中的海水淡化优先、再生水利用优先和调水优先情景的各行政区制水能耗如图5-24。由于各区的水资源禀赋不一，可选择的水资源类型也有所不同，在不同供水情景下的能耗也有所不同。但是基本趋势还是比较明显的：市区、城阳、黄岛依旧是调水和非常规水资源的主要受益区，能耗较高且不同情景之间的差别较大；而其他四市以本地水资源为主，因而制水能耗也较低且相对稳定。

在三种情景之下，新黄岛区的制水能耗都是最高的，特别是在海水淡化情景下，因为黄岛集中了全市近60%的新增海水淡化能力，是全市制水能耗上升的主要贡献者。

各亚情景下青岛市各行政区的制水单耗如图5-25。三种情景之下，主城区、黄岛和城阳的制水单耗都高于全市平均水平。各行政区的制水单耗与其外调水和非常

规水源利用量成正比。在海水淡化情景下，黄岛区制水单耗为全市最高；再生水情景下，黄岛和城阳高于其他地区；调水情景下，调水比重最大的主城区制水单耗也最高。

总体来看，青岛全市的平均制水单耗表现为：海水淡化情景>调水情景>再生水情景。再生水情景的制水单耗要比海水淡化情景低40%。

各亚情景下青岛市各行政区的制水单耗如图5-25。三种情景之下，主城区、黄岛和城阳的制水单耗都高于全市平均水平。各行政区的制水单耗与其外调水和非常规水源利用量成正比。在海水淡化情景下，黄岛区制水单耗为全市最高；再生水情景下，黄岛和城阳高于其他地区；调水情景下，调水比重最大的主城区制水单耗也最高。

总体来看，青岛全市的平均制水单耗表现为：海水淡化情景>调水情景>再生水情景。再生水情景的制水单耗要比海水淡化情景低40%。

图 5-24 | 地表40不同情景下分区制水能耗分析（2020年）

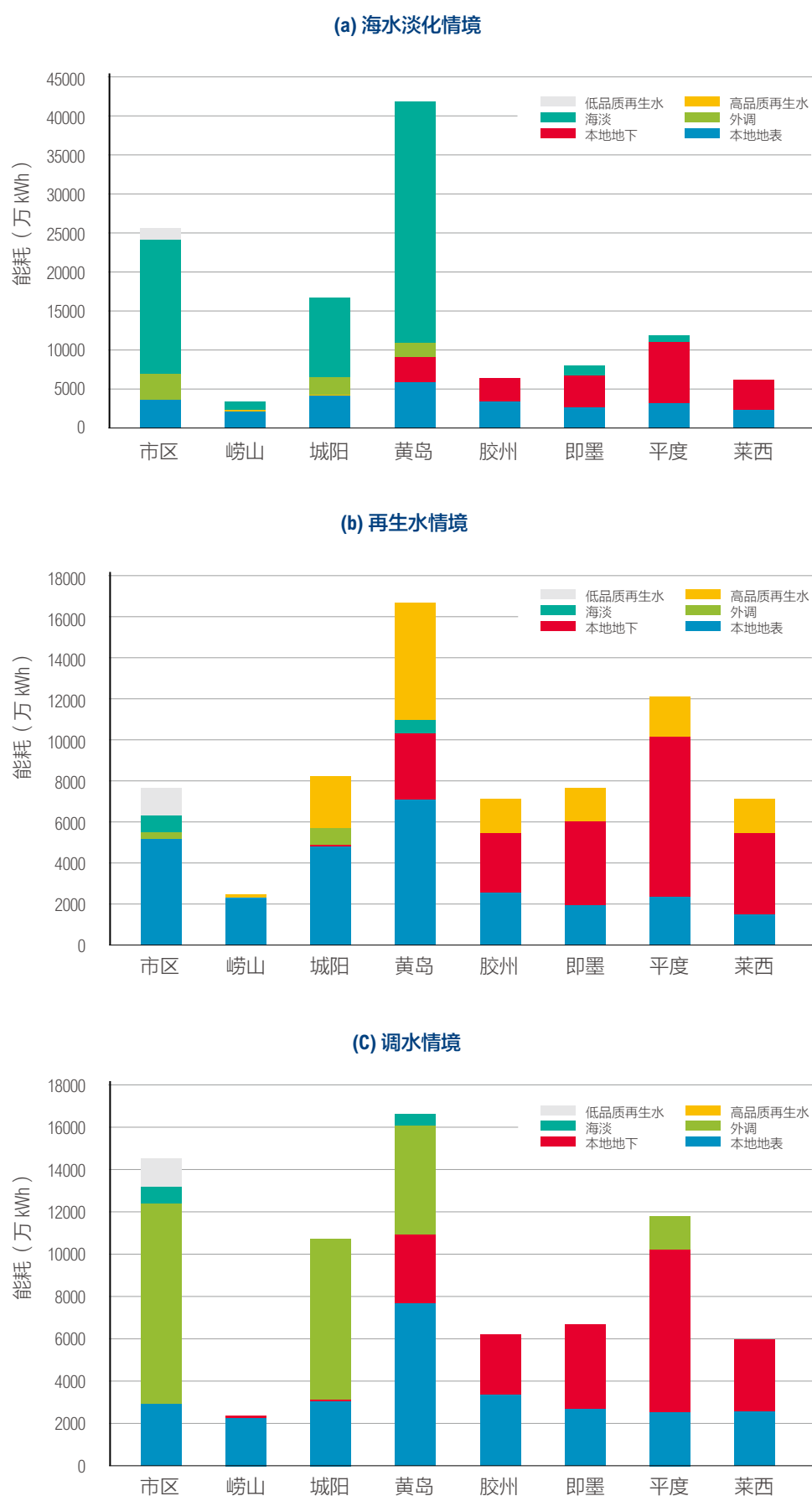
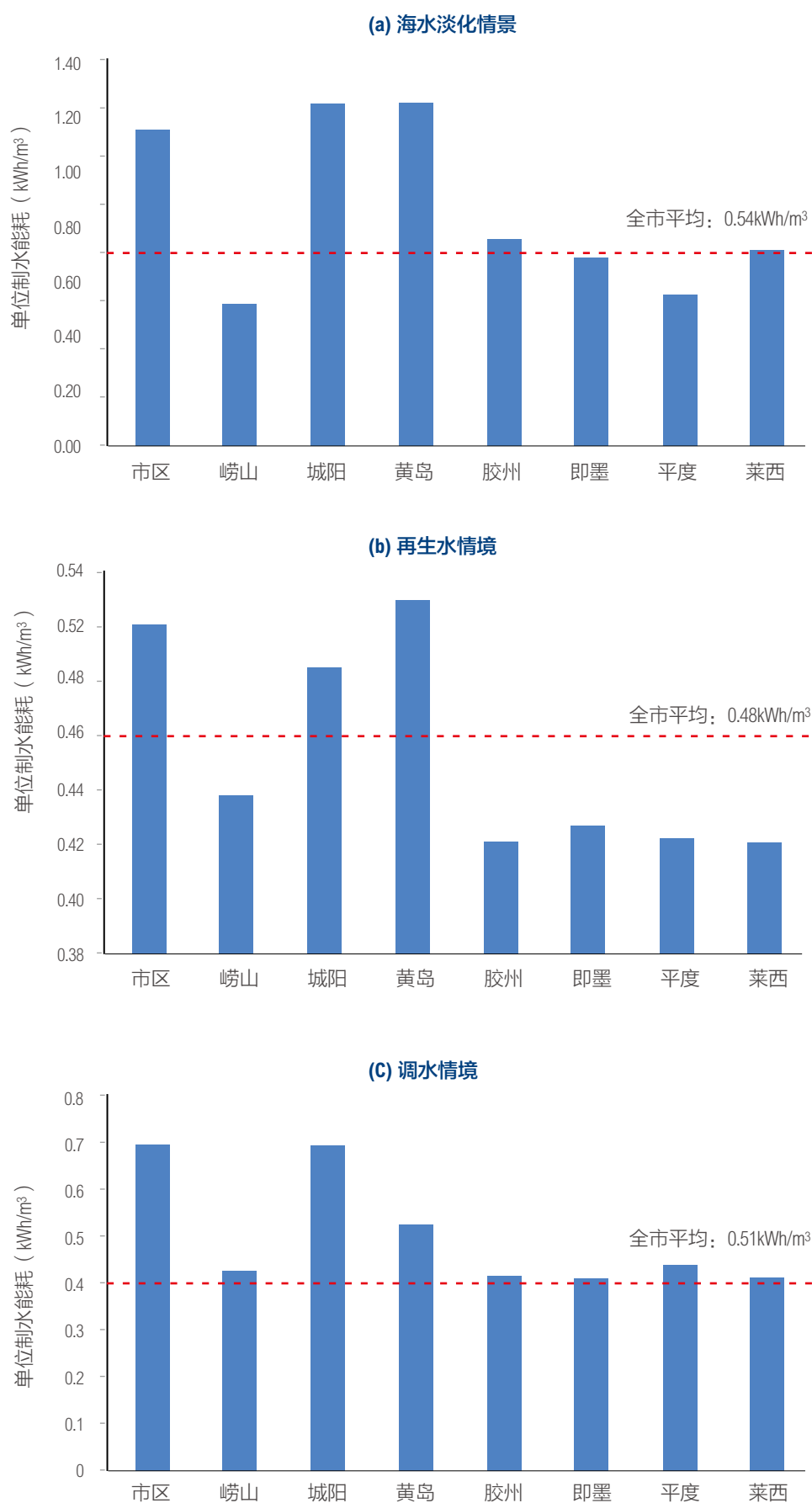


图 5-25 | 地表40不同情景下分区单位制水能耗分析（2020年）



地表40基础情景下的制水能耗比较

对三个情景的对比分析发现，当青岛市供水需求在2020年增加到14.8亿m³时（较2011年增加47%），再生水利用情景的能耗最低，较2011年基准增加53%；其次是调水情景，同比增长61%；海水淡化情景能耗最高，约为2011年制水能耗的2.53倍（图5-26）。

由图5-27可以看出，不管是使用外调水还是利用非常规水资源，青岛市2020年的制水能耗都会出现不同程度的上升。其中，海水淡化对制水过程能耗的影响最大。在海水淡化情景下，全市平均制水能耗将比2011年

上升72.5%；而再生水利用和调水情景对能耗的影响较小，分别比2011年增加4.1%和9.7%。

由图5-27还可以发现，海水淡化的使用将大幅度提高局部地区的单位制水能耗。以黄岛区、城阳区为例，若按照规划发展海水淡化产业，其2020年的制水能耗相当于再生水利用或调水的2-2.5倍。

调水和再生水利用对系统的能耗影响相对较小。除了能提供与海水淡化相当的出水质量，高品质再生水还有成本上的优势。挖掘本地水和发展再生水利用，将是青岛保障水源供给、控制制水能耗最理想的途径。

图 5-26 | 地表40不同情景下青岛市制水能耗分析比较

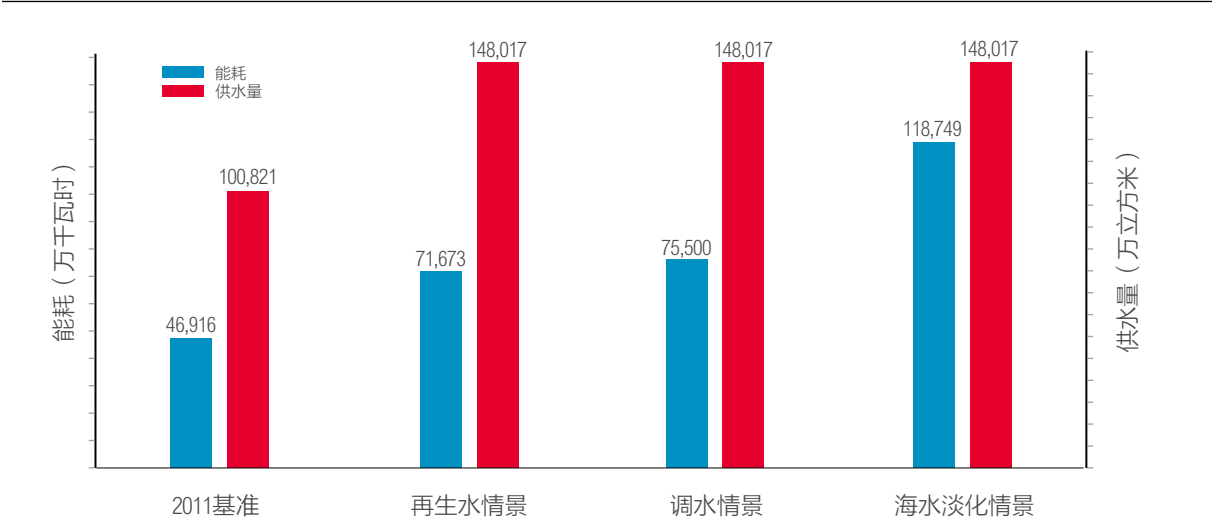
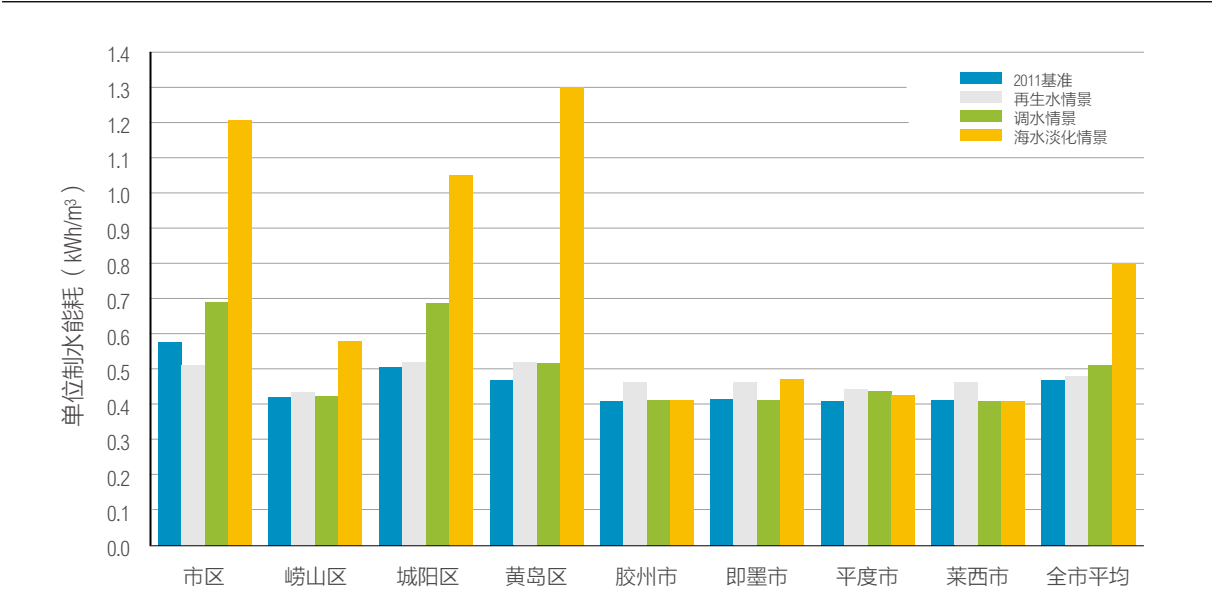


图 5-27 | 地表40不同情景下青岛市分区供水单耗分析比较



地表40基础情景下的碳排放

地表40情景下各亚情景（海水淡化、再生水利用和调水）温室气体排放与2011年基准值的比较见图5-28。

在地表40-海水淡化情景下，2020年青岛制水过程的二氧化碳排放量为105万吨，是2011年的2.53倍。其中，常规水源取水过程中的排放为25.12万吨，占全系统排放的24%，相关制水过程为24.62万吨，占23%。海水淡化的碳排放达到54.13万吨，占52%。

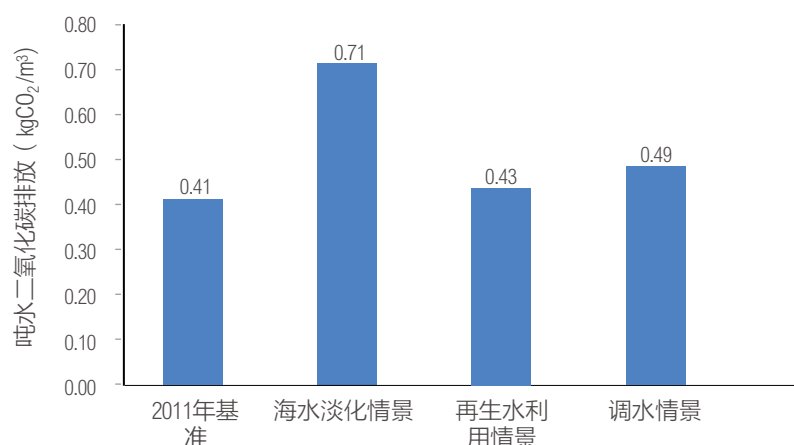
在地表40-再生水利用情景下，2020年青岛制水过程的二氧化碳排放量为63.4万吨，比2011年高53%。其中，常规水源取水过程中的排放为24.06万吨，占全系统排放的38%，相关制水过程为23.37万吨，占37%。再生水利用（新生水）的排放量为13.56万吨，占21%。

在地表40-调水情景下，2020年青岛制水过程的二氧化碳排放量为66.78万吨，比2011年增加61%。其中，常规水源取水过程中的排放为34.8万吨，占全系统排放的52%，相关制水过程为29.59万吨，占44%。

图 5-28 | 青岛2011年及2020地表40情景下制水过程的温室气体排放



图 5-29 | 地表40情景下的单位制水碳排放



综上所述，当青岛市2020年地表水资源利用率达到40%时，再生水利用方案所带来的碳排放最小，比海水淡化情景的排放量要低40%；调水方案的碳排放略高于再生水利用（高5%）；碳排放上升幅度最大的是海水淡化情景。

单位制水碳排放的分析与地表35情景类似：海水淡化情景最高，再生水和调水情景较低（图5-29）。

5.5 地表55基础情景下的青岛市2020年制水能耗分析

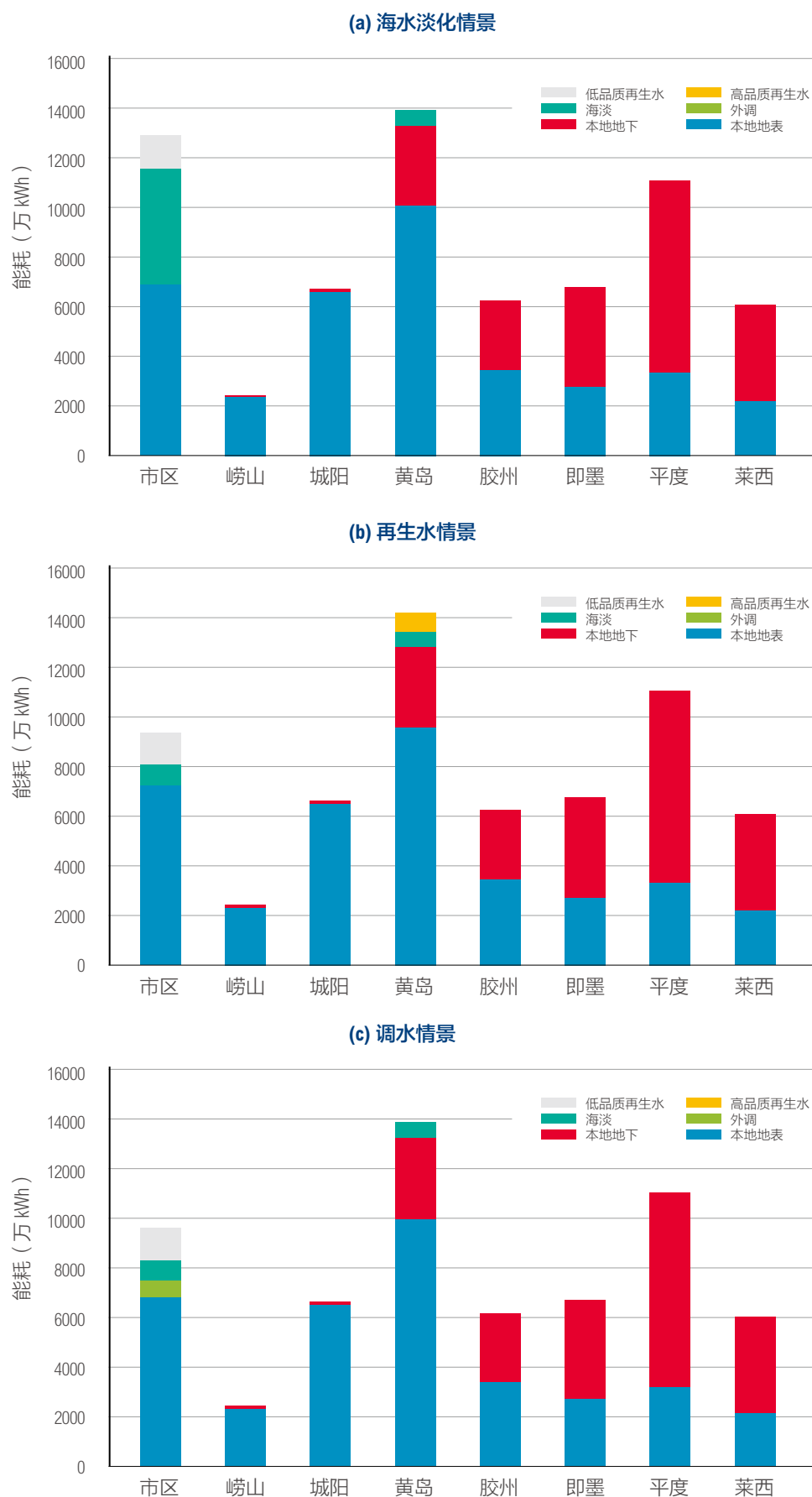
地表55基础情景下的制水能耗

基于2020年的需水量，如果青岛能将本地地表水资源的利用率提高到55%，本地地表水和地下水的供水总量将达到14.3亿，与14.8亿m³的需水量相比只有5000万m³的缺口。发展海水淡化和再生水利用的亚情景将完全不需要从异地调水，而调水亚情景也只需从黄河调水970万m³。由于在青岛可以利用的各类水资源中，本地地表水的制水能耗最低，所以在地表55情景下，各地的制水能耗较之前两个情景出现了一定的下降。

地表55情景下各行政区制水能耗如图5-30。因为全市近96%的用水将来自本地地表水和地下水，调水和非常规水资源对系统的影响很小，制水能耗基本上与供水量成正比。在三个亚情景下，总能耗最大的区域都是黄岛。在海水淡化亚情景下，由于主城区海水淡化的利用量较大，制水能耗仅次于黄岛，高于平度等需水量大但以本地水资源为主的地区；而在再生水利用和调水亚情景下，平度市制水能耗都高于主城区，位于全市第二。



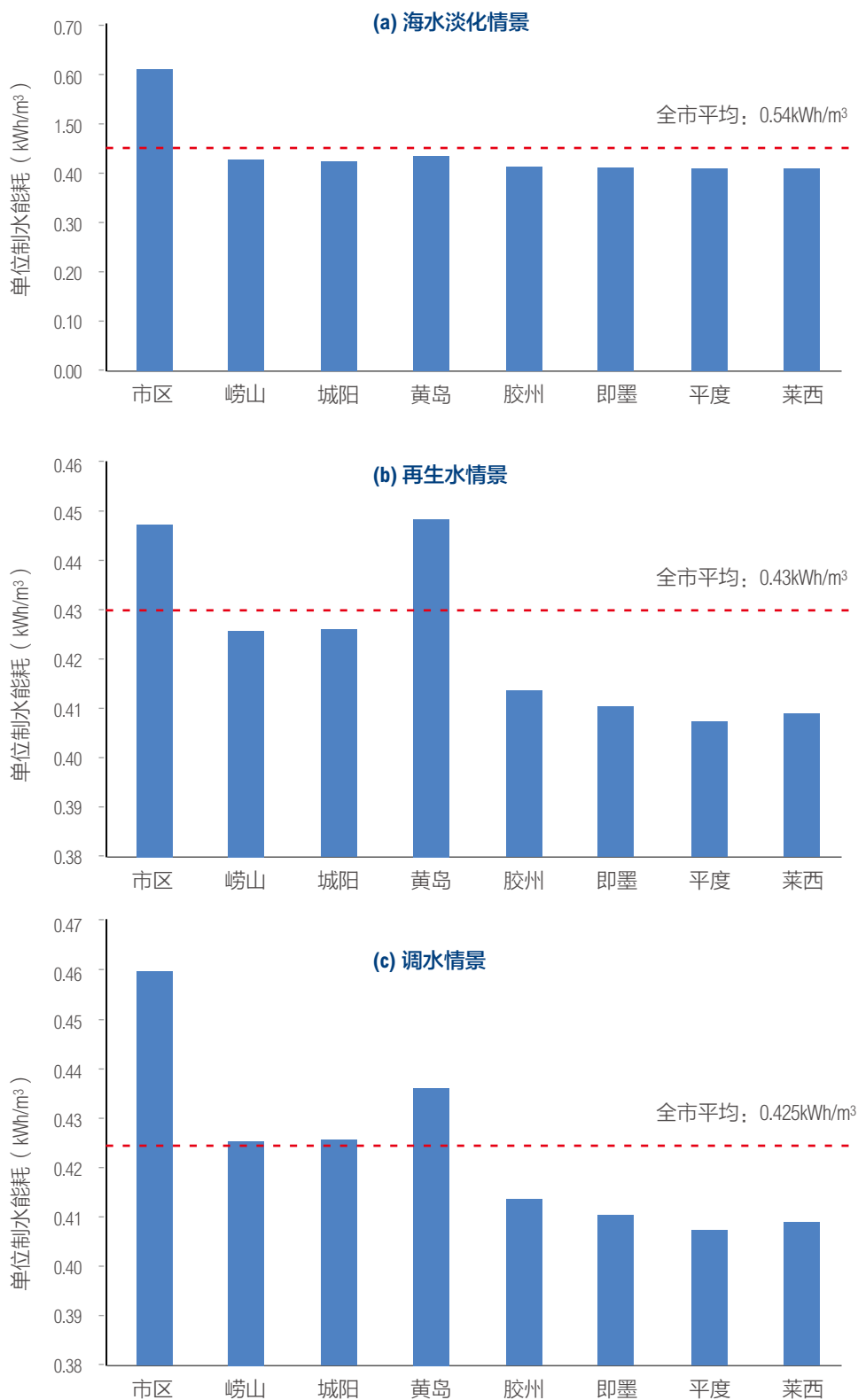
图 5-30 | 地表55不同情景下分区制水能耗分析



在海水淡化、再生水和调水情景之下青岛全市及各行政区的供水单耗如下图（图5-31）。全市的平均制水单耗表现为：海水淡化亚情景>再生水亚情景>调水情景，分别比2011年基准值下降4%、8%和9%。表明使用本地地表水有利于降低青岛制水系统的能耗。

在三个亚情景下，市区和黄岛的单位制水能耗都要高于全市平均水平，这是因为全市对非常规水源（海水淡化和再生水）的利用主要集中在以上两地。

图 5-31 | 地表55不同情景下分区单位制水能耗分析



地表55基础情景下的制水能耗比较

对比分析发现，在开发本地地表水供水潜力的情况下，三个亚情景的制水能耗差距不大。调水利用情景的能耗最低，较2011年基准增加34%；其次是再生水情景，比2011年制水能耗高34.3%；海水淡化情景能耗最高，总能耗比2011年基准水平增加41%（图5-32）。

由分区的制水单位能耗均可以看出，仅在市区表现为明显的海水淡化亚情景>调水亚情景>再生水亚情景，其他地区各亚情景的制水单位能耗差距不大（图5-33）。

总体看来，挖掘本地水供水潜力有利于减少制水能耗，但是在实际情况下，青岛的本地水资源在干旱年份无法支撑55%的利用率，必须要将调水、海水淡化和再生水利用作为后备水源。

图 5-32 | 地表55不同情景下青岛市制水能耗分析比较

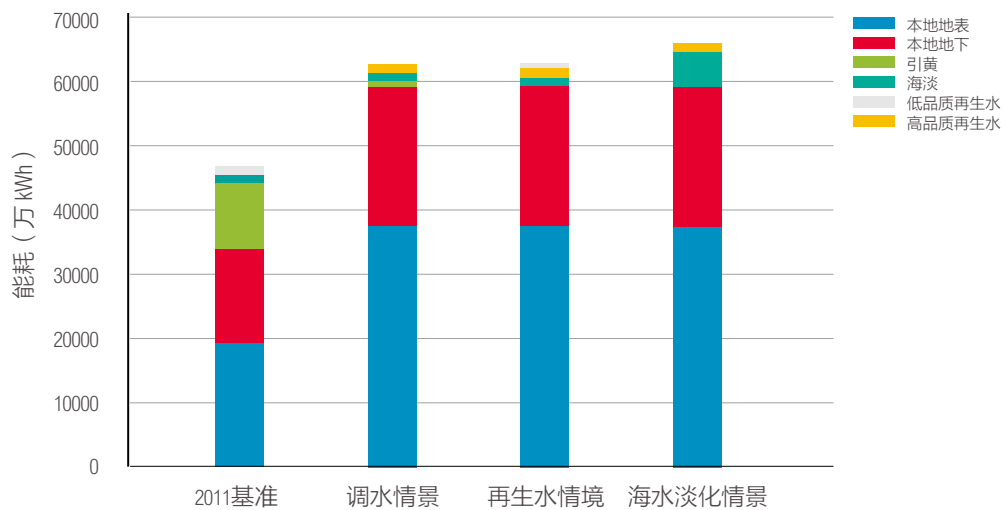


图 5-33 | 地表55不同情景下青岛市分区供水单耗分析比较

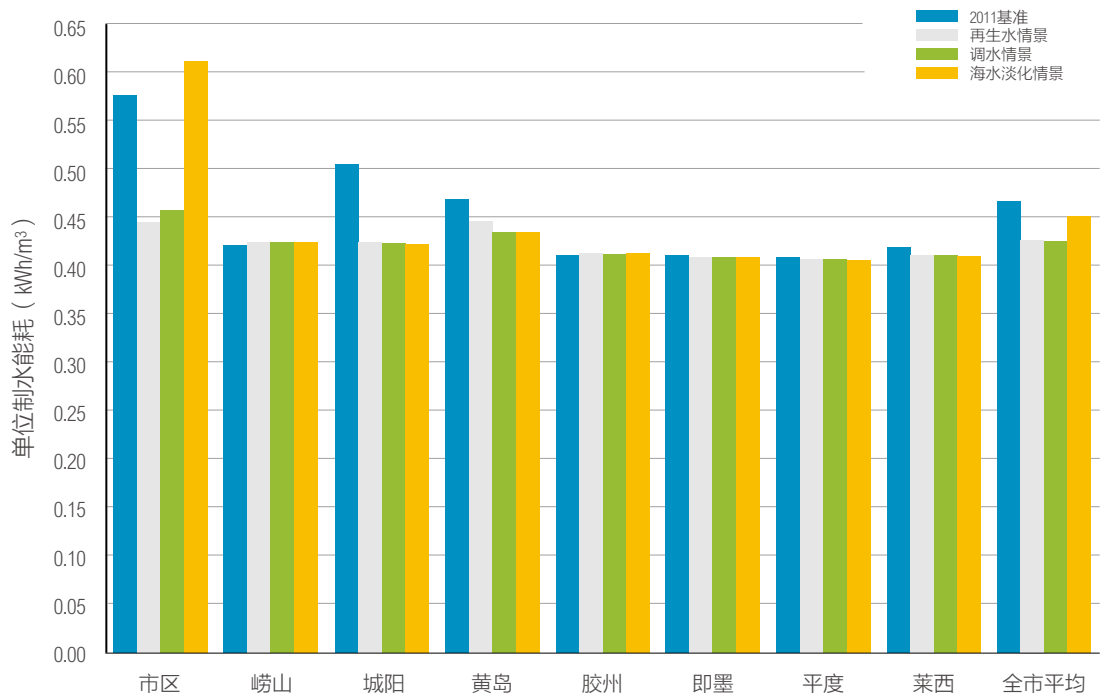


图 5-34 | 地表55情景下的单位制水碳排放

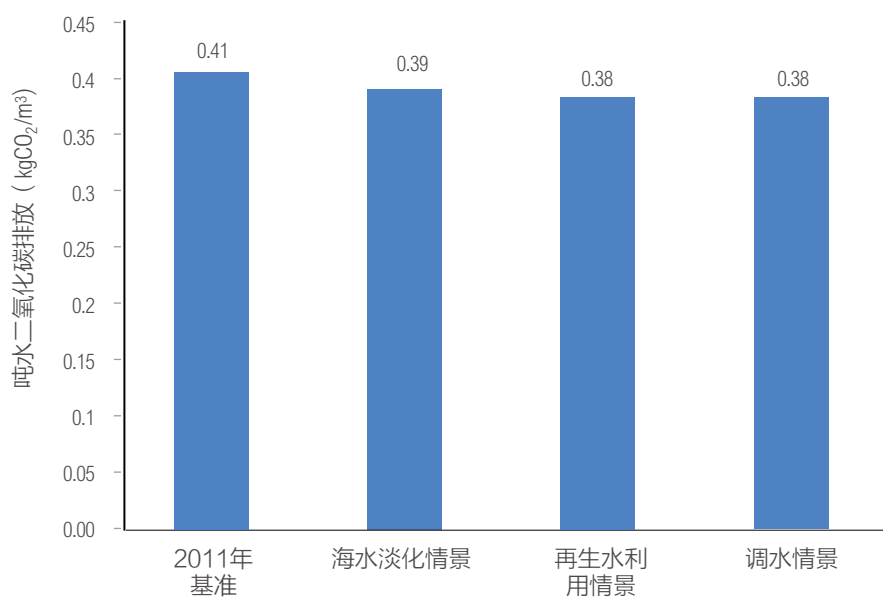


图 5-35 | 青岛2011年及2020地表55情景下制水过程的温室气体排放



地表55基础情景下的碳排放

地表55情景下各亚情景（海水淡化、再生水利用和调水）温室气体排放与2011年基准值的比较见图5-34和图5-35。

在地表55-海水淡化情景下，2020年青岛制水过程的二氧化碳排放量为58.44万吨，比2011年高41%。其中，常规水源取水过程中的排放为23.35万吨，占全系统排放的40%，相关制水过程排放29.27万吨，占50%。海水淡化的碳排放达到4.66万吨，占8%。

在地表55-再生水利用情景下，2020年青岛制水过程的二氧化碳排放量为55.61万吨，比2011年高34%。其中，常规水源取水过程中的排放为23.62万吨，占全系统排放的42%，相关制水过程为29.59万吨，占53%。再生

水利用（新生水）的排放量为1.24万吨，占2%。

在地表55-调水情景下，2020年青岛制水过程的二氧化碳排放量与再生水情景类似，也为55.61万吨，比2011年高34%。其中，常规水源取水过程中的排放为23.62万吨，占全系统排放的42%，相关制水过程为29.59吨，占53%。

所以在地表55情景下，采用海水淡化仍然是碳排放最高的方案，比调水情景和再生水方案的排放量要高5%。

单位制水碳排放为：海水淡化情景最高，调水情景和再生水情景稍低，但都低于2011年的基准值（图5-34）。挖掘本地水资源潜力，减少对外调水的依赖，有利于降低青岛市供水系统能耗。

5.6 不同基础情景下的制水能耗比较

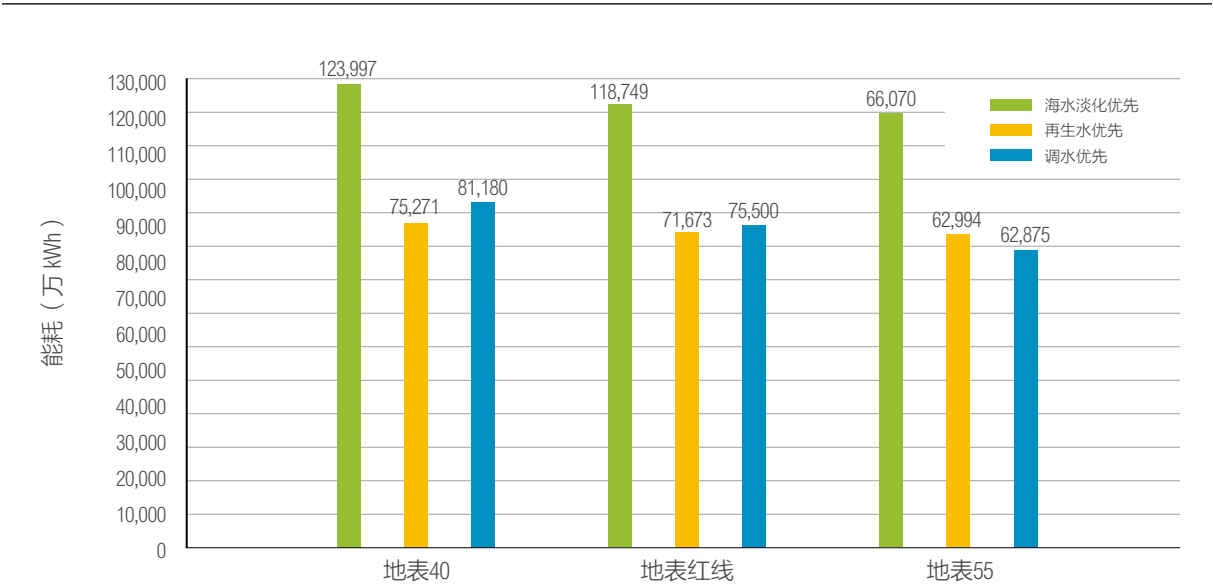
图5-36比较了地表35、地表40和地表55情景下，青岛市采用海水淡化、再生水和调水优先方案的系统能耗。不同情景下，青岛2020年制水系统能耗将比2011年上升34%-164%；相同亚情景的能耗表现为：地表35>地表40>地表55，即对本地地表水的利用率越高，整个供水系统的能耗就越低；发展再生水的情景能耗普遍低于调水和海水淡化情景。

在地表35和地表40情景下，能耗最低的均是发展再生水的亚情景；而在地表55情景中，调水和再生水亚情景的能耗最低，且差异不大。这主要是因为地表55情

景以本地水资源的利用为主（本地水资源占总需水量的96%），且再生水和外调水（引黄）的制水能耗差距不大，对系统能耗的影响不明显。

地表55是一个地表水开发极限的情况，由于青岛水资源具有年际变化大的特征，很难常年保持55%的本地地表水资源利用率，所以，无论本地地表水资源的开发利用达到什么水平，发展再生水，利用非常规水资源补充本地水资源的不足，将是青岛保障水源安全，建设低碳城市的最佳选择。

图 5-36 | 对3个情景的系统能耗比较



5.7 不同类型水源的制水成本分析

项目组在重点分析各类水源能耗表现的同时，也对其制水成本进行了分析。表5-13列出了将各类水源制备为达到饮用水标准时所需的成本。

需要说明的是，以上数据仅为制水工艺的运行成本，不包括前期的基础设施投入。例如，本地地表水制水成本中并没有考虑水库及相关输水管网建设的费用，而青岛本地地表水资源的利用主要依赖于水利工程施工。根据青岛市的测算，新建官路水库的制水成本将达到3.8元/立方米。

海水淡化成本并没有采用《青岛市海水淡化产业发展规划》中给出的6.7元/m³，而是根据黄岛电厂淡化设

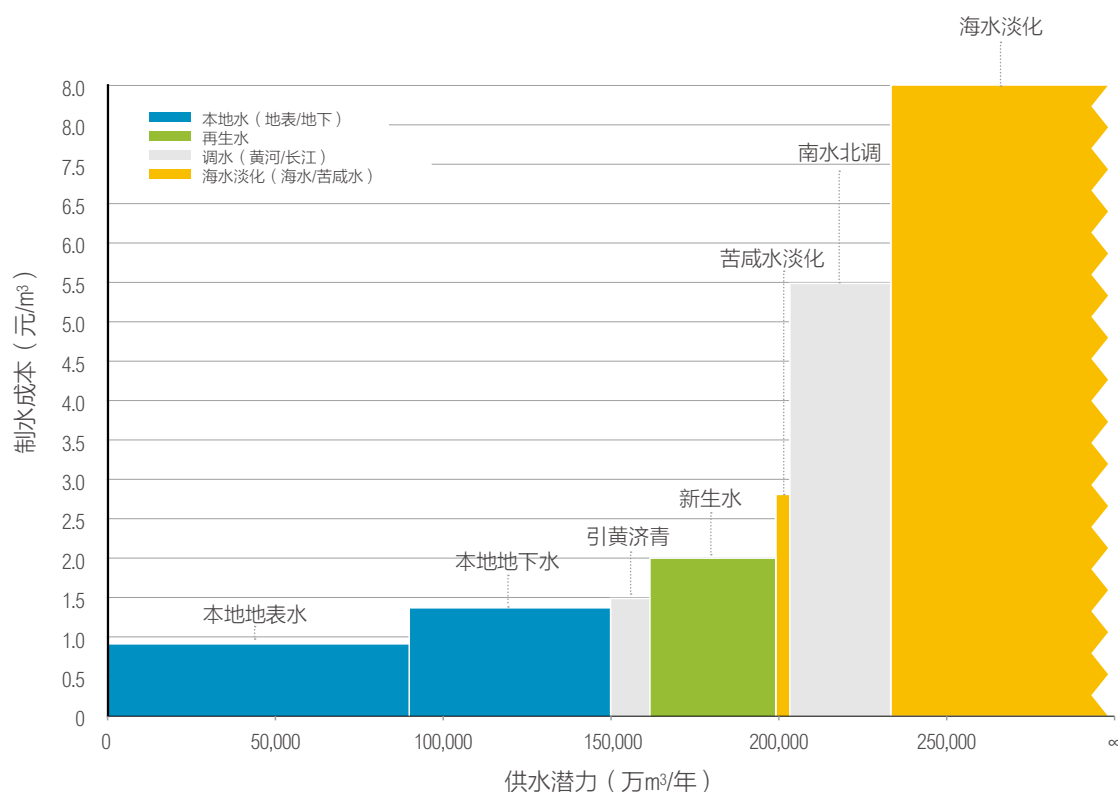
施的成本进行了适当调整。黄岛电厂淡化水设备（1.3万 m³/日）的制水电耗为5kWh/m³，制水成本为8元/m³，但若采用商业电价核算，制水成本将达到10元/m³。在不考虑政府补贴的情况下，青岛市的商业海水淡化厂的制水成本（能耗按4kWh/m³计）应该在8元/m³。

由于海水淡化、苦咸水淡化和新生水的核心工艺和主要耗能环节都是反渗透，且能耗是反渗透机组运行成本的主要来源，项目组根据能耗对苦咸水淡化和新生水的成本也进行了估算。根据国际文献，苦咸淡化的能耗为0.3-1.4 kWh/m³，是海水淡化的35%；另据新加坡新生水厂的数据，新生水的能耗为海水淡化的1/4。测算成本分别为2.8元/m³和2元/m³。

表 5-13 | 青岛市各类水源成本信息一览表

水源	制水成本 (元/立方米)	数据来源
本地地表水	0.94	地表水水资源费为0.35元/立方米（青岛市水资源费征收使用管理办法），制水成本0.59元/立方米（仙家寨自来水厂）
本地地下水	1.39	地下水水资源费为0.8元/立方米（青岛市水资源费征收使用管理办法），制水成本0.59元/立方米（仙家寨自来水厂）
引黄济青	1.5	青岛市海水淡化产业发展规划
新生水	2	按照海水淡化成本的1/4测算（根据与新加坡PUB的访谈）
苦咸水淡化	2.8	按照海水淡化成本的35%测算
南水北调	5.5	青岛市海水淡化产业发展规划（参考北京原水价6元/立方米测算）
海水淡化	8	青岛市海水淡化产业发展规划，与青岛市黄岛电厂淡化水公司的访谈

图 5-37 | 青岛市各类水源制水成本曲线



青岛市各类水源的供水潜力和单位制水成本如图 5-37 所示。可见在目前的技术水平下，各类水源的制水成本为：本地地表水 < 地下水 < 引黄济青 < 新生水 < 苦咸水淡化 < 南水北调 < 海水淡化。在非常规水资源中，新生水的成本优势最明显，仅为海水淡化的 1/4，甚至低于南水北调的成本。

从制水成本的角度考虑，青岛市应该优先利用本地水资源，其次是外调的黄河水和来自于城市污水的新生水；南水北调和海水淡化的成本都比较高，在增加制水过程碳排放的同时，也会造成供水成本的增加。

由于青岛市已经建成了 13.3 万 m³/日的海水淡化能力，从成本因素考虑，我们建议将海水淡化用于工业用水。虽然在目前的技术条件下，海水淡化与其他水资源相比并没有成本优势，但由于淡化水不受时空和气候影响，供应稳定，水质好，特别适合于需要纯水的工业企业，比如说电力、化工、钢铁和芯片制造。

以黄岛电厂为例，利用自来水软化处理生产纯水的综合成本为 14 元/m³，而使用反渗透海水淡化成本为 8 元/m³，软化水处理费用为 5 元/m³，综合成本为 13 元/m³。海水淡化在工业用途上已经具备了一定的成本优势，不仅具有良好的经济效益，而且具有良好的环保效益。

与此类似，新生水做工业用途的成本优势更加明显，相比自来水制纯水可以节约一半的成本。



结论与建议

1. 青岛市用水需求和水资源供给缺口将随着社会发展持续上升，城镇生活用水增速及占比居首，各区增速和驱动因素不一

通过不同水量测算方法分析比较，预计青岛市2020年需求量将达到14.8亿立方米，较2011年增长47%。其中，工业需水量、农业需水量、城镇生活需水量（含城镇公共用水）增长幅度分别为58%、7%和89%；城镇生活用水将持续成为最主要的用水类型，占全社会用水的40%，工业用水占比将保持稳定，农业用水占比预计从2011年的45%下降到33%。

同时，研究发现青岛市各区用水需求的变化趋势以及驱动因素存在差异。东岸城区（市南、市北和李沧）由于人口相对饱和，而且经济结构正向三产转移，将带来需水量的下降（较2011年减少8%）；其他行政区的需水量都会出现不同程度的增长。其中，北岸城区的发展势必带来城阳区城镇人口的激增以及用水需求的大幅增长，预计2020年城阳区用水需求比2011年增加154%；黄岛区（包括原黄岛区和胶南市）的用水需求增幅略低于城阳区，主要增长原因为东岸城区工业转移，预计黄岛区用水需求较2011年上升85%（原黄岛同比增加152%，原胶南同比增加48%）；其余地区的用水需求增长受工业、农业用水影响较大，增幅在25%到70%之间。

2. 开发非常规水资源（包括外调水、污水再生利用、海水淡化）是解决青岛用水需求的必然选择，水源之间的配置直接影响城市水系统的能耗与碳排放

根据研究测算，青岛市2020年全社会需水量为多年水资源总量的67%，远远超过水资源安全开发利用的上限值（40%），加上青岛市本地淡水资源基本上依赖于天然降水，保证率较低，因此开发非常规水资源，包括外调水、海水淡化、污水再生利用等是解决青岛市未来用水需求的必然选择。

不同类型水源的制水能耗有较大差异，以达到饮用水水质标准为基础，青岛市可用水源类型的吨水制水能耗（含取水）为0.426-4kWh，能耗从低到高依次为本地地表水、引黄济青、地下水、再生水、南水北调、苦咸水淡化、海水淡化，其中，能耗最高的海水淡化是能耗最低的本地地表水的10倍之多。因而未来青岛市的水源选择以及不同类型水源之间的配置都将直接影响到青岛市城市水系统的能耗和碳排放，形成潜在的碳排放压力。

3. 青岛市城市水系统不可避免面临能耗强度和碳排放的增长趋势，在水源规划中纳入碳核算和能源管理，降低城市水系统碳足迹是低碳可持续发展的必然选择

研究以青岛市不同地表水资源开发程度为基础，分别针对海水淡化优先、再生水优先、外调水优先情景对青岛市制水能耗（含取水）以及碳排放进行预测，发现制水能耗强度和碳排放都呈现必然的增长趋势。在地表水资源开发程度分别达到35%（35情景）、40%（40情景）和55%（55情景）的情况下，青岛2020年制水系统能耗将比2011年上升34%-164%；海水淡化优先情景的能耗强度增长最大，在不同基础情景下其平均吨水制水能耗将分别达到0.84kWh、0.80kWh和0.45kWh；再生水情景的能耗强度增长最低，分别为0.51kWh、0.48kWh和0.43kWh；外调水情景的能耗强度增长居中，分别为0.55kWh、0.51kWh和0.42kWh。

2011年，仅制水能耗（含取水，以用电量计）就占到青岛市全社会用电量的1%。到2020年，在地表水开发程度为35%的海水淡化优先情景下，制水能耗就将达到2011年的2.6倍，达到12.40亿kWh，加上相应的配水能耗，这意味着整个城市水系统的能耗将在全社会用电量中的占比出现增长。

欧美国家已经开始关注因为城市水源结构调整以及水质要求提高带来的城市水系统能耗强度和碳

排放的增加，因而已经针对城市水规划制定碳核算制度，要求选择更为低碳的水源配置方案。随着青岛市经济的未来发展，城市水系统的能耗以及碳排放也将成为新的挑战，尤其是在低碳发展和碳减排的压力之下，因此建议青岛市尽早在城市水源规划中纳入碳核算和能源管理机制，发展低碳可持续的城市水系统。

4.再生水在非常规水资源中最具碳排放和成本优势

在非常规水源中，高品质再生水（新生水）不仅具有较高的保证率，同时还具备比其他非常规水资源制水碳强度低和成本低的优势。根据测算，高品质再生水的单位吨水制水能耗为0.82kWh，低于南水北调和海水淡化；而且制水成本仅为海水淡化的四分之一，且低于南水北调的成本。

从能耗角度考虑，在有条件的地方可以优先开发苦咸水资源，如平度。苦咸水淡化的能耗在1.4 kWh/m³以内，约为海水淡化的1/4，这对水资源匮乏但苦咸水资源丰富的平度市是一个相对低碳的应对方案。此外，在外调水的选择中，青岛应优先利用黄河水，其能耗仅是引江能耗的60%左右。

从成本角度考虑，在目前的技术水平下，青岛市不同水源的制水成本为：本地地表水<地下水<引黄济青<新生水<苦咸水淡化<南水北调<海水淡化。青岛市应该优先利用本地水资源，其次是外调的黄河水和来自于城市污水的新生水；南水北调和海水淡化的成本都比较高，在增加制水过程碳排放的同时，也会造成供水成本的增加。

我们建议青岛市应当升级现有再生水厂，制定高品质再生水发展规划以及具有激励性的水价政策，提高再生水在城市水源配置中的占比。根据研究分析，青岛市2020年高品质再生水的供水潜力可以达到3.74亿立方米，约为总需水量的24%。

5.不同类型水源的配置不仅要考虑成本和保证率等因素，还应充分考虑用水类型、制水能耗与碳排放、环境生态健康风险等因素

城市在选择水源时需要考虑多方面的因素，除了水源水质、保障率和经济成本以外，在环境保护和气候变化的背景之下，不同类型水源的能源消耗、生态环境影响及应对气候变化风险的能力等风险也应纳入到城市水源选择的考虑因素当中。

青岛的本地地表水主要依靠水库，其优点是水质较好、能耗低，缺点在于土地占用、工程移民和资金投入很

大，应对气候变化风险的能力也较弱；地下水资源现主要为农用，优点是土地占用和资金投入小，缺点是过度开发不易恢复，不利于水资源保护，应对气候变化风险的能力较弱。建议本地水资源优先用于城镇生活用水。

青岛市可以大力发展再生水，不仅包括市政杂用的初级再生水，还应当大力发展高质量的再生新生水，替代工业用新鲜水。再生水的优势在于保证率高、应对气候变化风险能力强，缺点是高质量的再生新生水能耗、成本相对较高。

淡化海水因为高成本、高能耗，以及不确定的健康风险应作为城市战略后备水源，并以工业用户为主。同时，应考虑将海水淡化与可再生能源利用结合起来，或者与发电厂进行“水电联产”，尽可能地降低温室气体排放；从资源综合利用的角度，还应该考虑浓盐水的综合利用，通过“海水淡化—盐化工”等途径降低环境影响。

作为海滨城市，青岛还应该鼓励海水直接利用。将海水直接用于工业冷却等领域，可以进一步降低对淡水的需求。

外调水（包括引黄和引江）的优点在于促进本地水资源的保育，缺点是土地占用和资金投入大，能耗和成本相对较高，而且沿途水质受污染的风险较大。此外，外调水由于涉及与其他行政区和上级部门的协商，过于依赖外调水会增加保证率风险，因此建议青岛市系统评估外调水的风险，避免过于依赖外调水。

6.建立分用户、分水源的精细化城市水资源管理

青岛市应该根据各区的水资源禀赋和用水特点，合理地配置水资源（见表6-1）。对于东岸城区，由于大量耗水企业的外迁，未来用水将以居民生活和服务业为主。我们建议将本地地表水资源（大沽河、尹府水库、产芝水库等）和外调水作为生活饮用水，同时发展（低品质）再生水用于市政绿化、居民冲厕等非接触、非饮用用途。在面临城市人口快速增长的工业发展的西岸城区，我们建议将（高品质）再生水作为工业用水的主要来源，而把外调水和本地水资源作为居民生活用水。在平度市，我们建议优先开发本地丰富的苦咸水资源，将苦咸水淡化作为平度工业园区的主要生产用水，而把宝贵的本地淡水资源留给居民生活用。

在市政规划中，尤其是卫星城的设计中，尽可能实现分质供水，推广采用综合管廊技术，分别敷设优质饮用水、工业用水、生活杂用水等专用供水管道，力争做到优水优用、优水优价，从总体上提高城市的用水效率，以水资源的可持续利用，促进城市的可持续发展。

表 6-1 | 青岛市分区水源选择优先性建议

	工业		居民生活及市政公用			农业
			饮用水		非饮用水	
	主	辅	主	辅		
市区	（高品质）再生水		外调水	本地地表水	（低品质）再生水	
崂山	（高品质）再生水		本地地表水		（低品质）再生水	本地地下水
城阳	（高品质）再生水		外调水	本地地表水	（低品质）再生水	本地地下水
黄岛	（高品质）再生水	海水淡化	外调水	本地地表水	（低品质）再生水	本地地下水
胶南	（高品质）再生水	海水淡化	本地地表水	外调水	（低品质）再生水	本地地下水
胶州	（高品质）再生水		本地地表水		（低品质）再生水	本地地下水
即墨	（高品质）再生水		本地地表水		（低品质）再生水	本地地下水
平度	（高品质）再生水	苦咸水淡化	本地地表水	外调水	（低品质）再生水	本地地下水
莱西	（高品质）再生水		本地地表水		（低品质）再生水	本地地下水

7.深化水价改革，继续强化节水管理

青岛的水价依然偏低，不得不依靠政府的大量财政补贴。考虑到青岛居民的收入水平相对较高，应适当提高水价，力争做到成本回收；同时，推进阶梯水价的实施，兼顾社会公平，保障低收入家庭的基本用水需求。

面对多水源的格局，特别重要的是统筹各类水源的价格制定和管理，从可持续发展角度，以价格手段，鼓励使用再生水、淡化海水等，适当加大对水循环利用的财政补贴，包括优惠价格的补贴。

同时，政府要加大投入，通过多种形式，开展节水宣传教育，增强全社会尤其是公众的节水意识。青岛的工业节水效果很好，居全国领先水平，但是生活用水消耗较大，每日人均生活用水约180升，高于全国大部分城市（比如省会城市济南）。建议青岛市修订相关标准，加强需求管理，真正符合国家节水型城市的要求。采取合理的激励和补助措施，支持节水器具和设施的更新改造。



2020年青州市需水量测算

根据《青岛市社会与国民经济发展第十二个五年规划纲要》、《青岛市城市总体规划（2006-2020）》，本研究以2011年为基准线，在对人口与产业结构进行分析的基础上，分别对2020年工业用水、农业用水、市政生活用水进行预测；由于数据所限，生态用水量采用《青岛市水利现代化规划（2012）》的预测值。

I 工业用水需水量测算

截至2011年，工业用水占青岛市总用水量的18.9%，比2005年下降了3.4个百分点⁶⁶。随着产业结构调整及工业用水效率的提升，青岛的万元工业增加值用水量将进一步下降，但是由于经济总量的快速发展，工业用水需求总量仍将逐步增加。

工业用水需求测算方法比较

目前，用于工业用水预测的主要方法有用水定额法、增长比率法、年递减率模型预测法、指数模型预测法和回归分析法，各种分析方法的优缺点比较见附表I-1。其中，用水定额法和回归分析法比较适合中长期预测且对数据要求相对较低。综合考虑数据可获得性及各种分析方法的优缺点，本研究采用用水定额法。

附表 I-1 | 各种工业用水预测方法的比较

方法	定额法 ^a	增长比率法 ^a	指数模型 预测法 ^b	年递减率模型 预测法 ^c	回归分析法 ^{acd}
优点	直观、易行，便于考虑各种因素的变化及政策性调整。	适用于中期规划，预测结果较为可靠，可为城市水厂的改扩建工程提供参考。	充分考虑了影响工业用水量的多个因素，适用于长期规划，可用于确定新建水厂的规模。	方法简单。	原理成熟、程序简单且容易理解，适用于短期规划，可在已形成管网的建成区为城市管网改造提供参考。
缺点	可能出现对未来的经济社会情况预测而导致的偏差。	参数的确定主观性大。	参数的确定及允许误差的选择主观性较大。	可靠性不高，且年下降率一般不会为恒定值。	只考虑时间增长对用水量的影响，没有考虑其他因素。

数据来源：
a.黄正荣，张振林，贾剑峰等.2009 b.佟长福，史海滨，李和平等.2009 c.卢正波，李文义.2012 d.王忠.2003

2020年工业增加值及产业结构预测

2011年，青岛市实现工业增加值2794.56亿元。其中，原黄岛区的贡献率最大，为22.6%，其次是城阳区（14.8%），即墨、莱西、平度、胶州和原胶南等5市合计为48.7% ⁶⁷。

同年青岛的工业用水总量为1.91亿立方米。用水量最多的并不是工业增加值最高的地区，而是老企业相对集中的主城区。主城区工业增加值占全市总量的8%，但是其工业用水量占到全市的28%。由青岛各行政区工业用水效率可见附表I-2。

2005到2011年的统计数据表明，主城区、黄岛区、崂山区和城阳区的工业增加值在全市总量中的比例

逐年下降，而胶州、即墨、平度、胶南和莱西等地的工业化则处于明显的上升趋势。青岛将在五市建设胶南董家口重化工业、平度新河生态化工、胶州洋河装备制造工业、莱西姜山轻工业、即墨龙泉汽车及零部件工业、即墨女岛船舶工业等6个重点工业功能区，作为今后工业布局和产业调整的重点区域。由于化工行业属高耗水行业，原胶南市和平度市将可能出现工业用水需求的显著增长。

根据《青岛市“十二五”制造业发展规划》，到2020年青岛工业增加值将达到7000亿元。其中，高新技术产值占全市工业产值的比重从2010年的45%提升到65%，且五市制造业产值占全市制造业总产值的比重提高到65%。据此，青岛市分区的工业增加值比例及2020年预测值见附表I-3。

附表 I-2 | 青岛市分区万元工业增加值用水量（2011年）

指标	市区	崂山	城阳	黄岛	胶南	胶州	即墨	平度	莱西
工业增加值（亿元）	249.84	180.59	460.07	700.13	344.32	336.96	335	289.14	205.95
工业用水量 （万立方米）	5,423	1,086	2,859	3,270	1,278	1,576	1,716	1,357	533
万元工业增加值用水量 （立方米）*	21.71	6.01	6.21	4.67	3.71	4.68	5.12	4.69	2.59

数据来源：2012年青岛市统计年鉴，2011年青岛市水资源公报
* WRI测算



附表 I-3 | 青岛市分区工业增加值测算表

地区	各地工业增加值占比 (%)				2020年工业增加值 (亿元)
	2005	2010	2011	2020	
市南	1.79	1.29	1.13	0.64	45
市北	3.32	1.13	1.02	0.56	39
四方	3.14	2.32	2.13	1.16	81
李沧	6.53	3.88	3.78	1.94	136
崂山	8.03	5.97	5.82	2.99	209
黄岛	16.52	22.8	22.57	17.1	1197
城阳	13.21	15.05	14.83	10.69	748
胶州	10.93	10.7	10.86	13.9	973
即墨	10.2	10.5	10.8	13.65	956
平度	9.31	9	9.32	12.6	882
胶南	11.38	10.9	11.1	16.35	1145
莱西	5.64	6.46	6.64	8.4	588
合计	100	100	100	100	7000

工业用水定额确定方法

根据《全国水资源综合规划技术大纲》，本研究采用工业用水重复利用率来预测万元增加值用水定额^{68,69}，其计算公式为：

$$M_n = M_o \times (1-\alpha)^{n-o} \times (1-\mu_n) / (1-\mu_o)$$

M = 万元工业增加值用水量 (立方米)

α = 产业技术进步系数

μ = 工业用水重复利用率

o = 基准年

n = 预测年

产业技术进步系数用于表征区域工业先进程度和用水效率，一般取值在0.02-0.05区间。经济比较发达、用水水平比较先进的地区由于进步空间有限，一般取低限值；而对于经济相对落后、用水效率差的地区，可以结合节水政策及规划，按照高限进行调整⁷⁰。青岛目前的工业用水效率已经处于全国领先水平，计算时取低限0.02。根据《青岛市水利现代化规划》，目前青岛市工业用水重复利用率为84%，预计2020年将达到88%。

工业需水量预测

结合2004-2011年青岛市水资源公报数据，本研究利用全市平均值（万元工业增加值用水量和工业用水重复利用率）来计算2020年全市工业用水总需求量，再按照各地区工业增加值在全市的占比，将工业用水需求分解到各地。由于各地区用水效率不同，这种方法有可能会造成分区用水需求的较大误差。

(1) 确定2020年全市工业用水定额

首先，根据历史数据对前述万元增加值用水定额模型进行校核（附表I-4）。

检验结果表明，2006、2008和2010年的模拟值与实际值的相对误差较大（>15%），其余年份模拟效果较好。可见，万元工业增加值用水量呈逐年下降趋势，模拟值和实际值曲线的走向基本一致，可以使用模型来进行2020年定额的预测（附图I-1）。

附表 I-4 | 模型检验值表

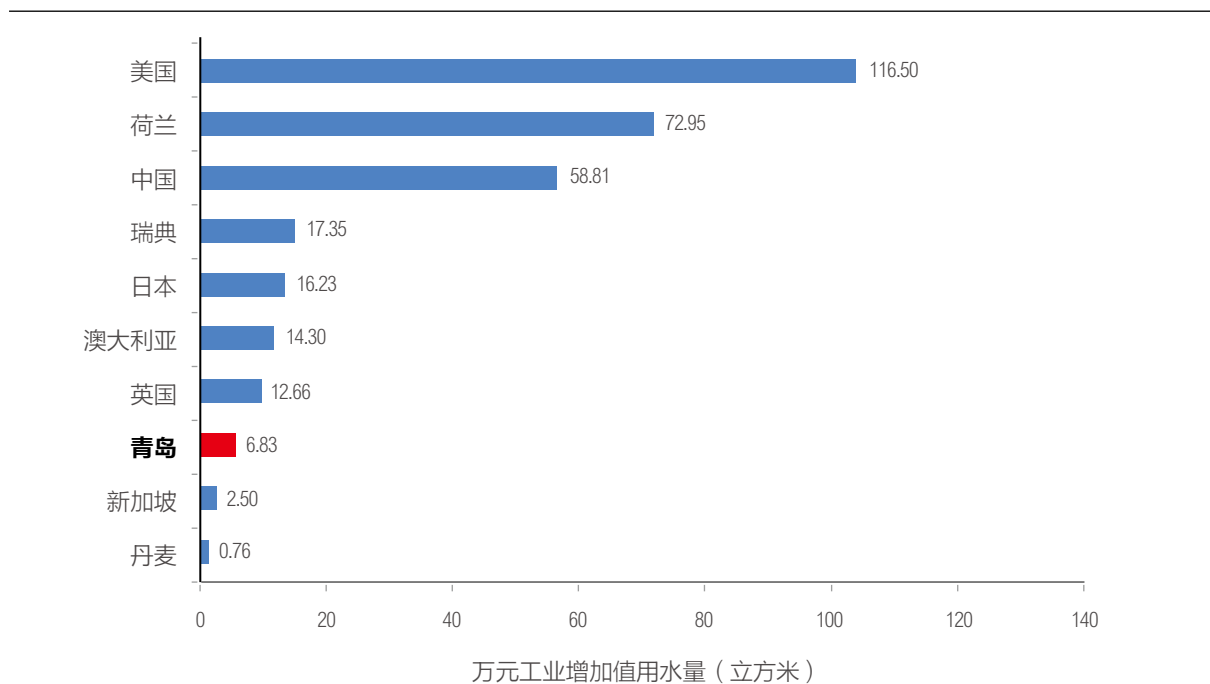
年份	工业用水 (亿方)	工业增加值 (亿元)	单位工业增加值 用水 (立方米)	模拟值 (立方米)	相对误差 (%)
2005	2.31	1,259.06	18.35	20.96	14
2006	2.17	1,517.28	14.30	17.43	22
2007	2.22	1,766.28	12.57	13.59	8
2008	2.05	2,034.25	10.08	11.94	18
2009	2.05	2,174.43	9.43	9.88	5
2010	1.73	2,454.19	7.05	8.96	27
2011	1.91	2,794.56	6.83	6.98	2

附图 I-1 | 工业用水效率实际值与拟合值的对比



数据来源：青岛市水资源公报2004-2011，青岛市统计年鉴2005-2012

附图 I-2 | 青岛及其他国家的万元工业增加值用水量比较（2011年）



附表 I-5 | 青岛市2020年分区工业用水需求量（万立方米）

原行政区划	市区	崂山	城阳	黄岛	胶南	胶州	即墨	平度	莱西	小计
工业用水	1,297	899	3,217	5,146	4,922	4,185	4,109	3,793	2,532	
新行政区划	市区	崂山	城阳	黄岛	胶州	即墨	平度	莱西	30,100	
工业用水	1,297	899	3,217	10,068	4,185	4,109	3,793	2,532		

根据模型计算，2020年青岛的万元工业增加值用水量将达到4.3立方米，比2011年（6.83立方米）下降约37%。这与“十一五”期间下降62%的速度相对放缓，这是因为最具潜力的工业节水项目已经陆续实施，未来的节水措施将更加依赖于产业结构调整。

但是，青岛的工业用水效率已经处于全国，甚至世界的先进水平（附图I-2）。

2011年数据表明，青岛的万元工业增加值用水量仅为中国的1/10，低于日本、欧洲等发达国家水平，进一步提高用水效率的空间有限。根据山东省政府为青岛市下达的“三条红线”，全市在2020年万元工业增加值用水量（以2000年不变价计，下同）降低到10.1立方米以下。由于规划值相对保守，结合青岛市实际情况和发展趋势，仍将2020年万元工业增加值用水量确定为4.3立方米。

(1) 测算2020年全市及分区工业用水需求

根据测算所得的工业用水效率和7000亿工业增加值目标，确定2020年工业需水总量为30100万立方米。

根据对各地工业增加值的预测，分解得到各区工业用水需求（附表I-5）⁷¹。

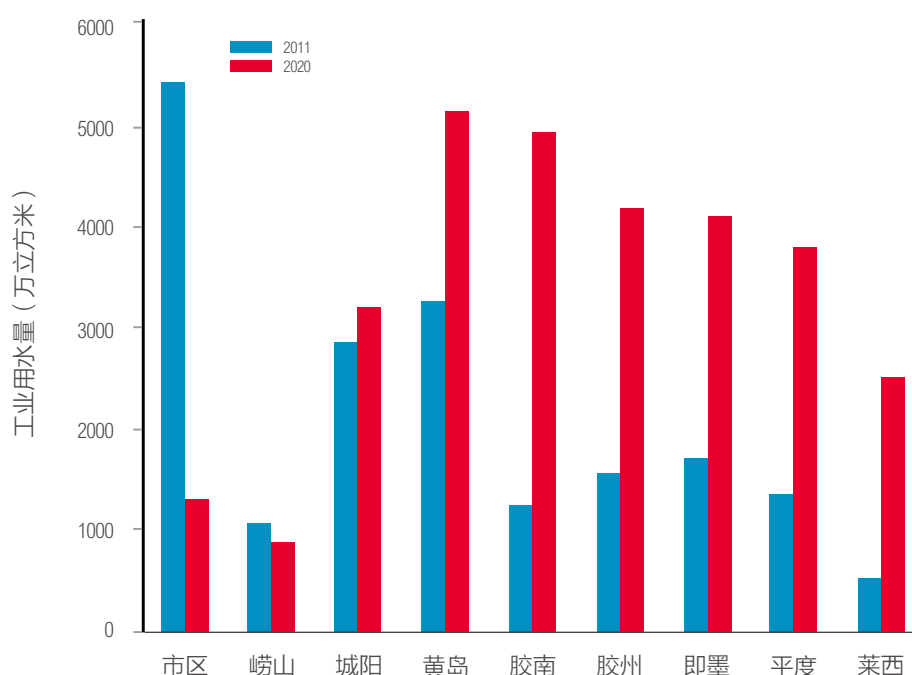
由附图I-3可见，未来青岛市工业用水需求主要来自新黄岛区（黄岛和胶南）、胶州、即墨、平度和莱西，其中，新黄岛区由于集中了重化工产业，工业用水需求可能占到全市工业用水总量的三分之一；城阳、崂山的工业用水量基本维持不变，而主城区则可能出现较大幅度的下降。

测算值与现有规划值及相关研究的比较

根据预测结果，2020年青岛工业用水需求为3.01亿立方米。

来源	2020年工业需水量 (亿立方米)	备注
青岛市“十一五”水资源综合利用发展建设规划（2007）	3.23	用水定额法
青岛市水利现代化规划（2012）	2.67	
青岛市工业需水量预测（卢正波，南水北调与水利科技，2012）	3.87	回归分析法
WRI测算（全市测算）	3.01	用水定额法

附图 I-3 | 青岛各区2020年工业用水与2011年基准值的比较



II 城市居民及市政用水需求测算

随着青岛的快速城市化，城市居民及市政公共用水增长迅速，在全市用水总量中的比重越来越大。2011年，全市城镇生活用水较2004年上升了80%。作为胶东半岛经济增长的核心，青岛的居民生活水平将继续提高，城市居民绝对数量也将持续增长，到2020年将出现城市供水的大幅度增加。

按照《城市建设统计年鉴》的统计口径，居民生活用水包括了居民家庭用水和公共服务用水；同时根据《青岛市水资源公报》，公共服务用水包括了建筑业用水和第三产业用水。所以，本研究中的居民生活用水预测包括居民家庭用水、公共服务用水、建筑业用水和第三产业用水。

城镇生活用水需求预测方法比较

目前，用于城镇生活用水预测的主要方法有：用水定额法，增长比率法，年递减率模型预测法，指数模型预测法和回归分析法。对各种分析方法优劣的比较见附表I-6：

本研究采用用水定额法测算2020年青岛全市对城市生活及市政用水的需求。

$W = P_n \times Q$ (W为用水需求，P为人口数量，Q为用水定额，n为预测年)

城市人口预测

按照《青岛市社会与国民经济发展第十二个五年规划》、《青岛市城市总体规划》，确定青岛市2020年总人口为1100万人，城镇化率为79%，城市人口将达到869万人（附表I-7）。

主城区的人口容量目前基本饱和（人口密度为1884人/平方公里，2011）并出现一定程度的下降趋势，城市人口增长将主要出现在黄岛、城阳及远郊区。

附表 I-6 | 各种城镇生活用水预测方法的比较

	优点	缺点
人均综合用水量指标法 ^{a,b}	比较直观、易行，需水量预测结果的准确性较高，对近、中、远期规划都有较好的适应性。	使用时需区分适用期限（即不同规划期限）以及与城市用水人口统计口径相一致。
分类用水指标法 ^a	用水用途及各用水组成较为清晰。	数据可获得性较差，且消防用水量由于总量小而忽略不计。
年均增长率法 ^a	适用于长期预测。	对未来经济、社会形势的预测偏差会导致增长率的选择误差。
灰色预测法 ^a	可以直接利用原始数据，所需要的数据不太多，可以有效地用于缺乏资料的地区并且适于中长期预测。	预测模型建立、结果计算以及计算精度检验过程繁琐。
时间序列分析法 ^a	自回归法	计算简便且较容易理解。 可能会因考虑的因素较少，预测误差较大。
	指数平滑法	一次指数平滑法适用于短期预测。 当实际值发生异常变动时，预测值无法对此做出响应，可能在存在异常值时产生较大的误差。
	生长曲线法	该方法引入了预测用水量的上限，所以考虑了人为性因素，以及政策的制定和变化。适用于长期预测。 用此方法进行预测，在用水量上限相同的情况下，预测值的变化趋势不太明显。
解释性预测法 ^b	包括多元线性回归法、多元非线性回归法和人工神经网络法。此类方法可对系统变化可进行参数修正，适合长期预测。 因果关系较难确定。	
用水定额预测法 ^a	紧扣城市发展的实际需要、各部门的用水特点以及决策者的意图制定用水定额。结果比较科学,符合实际用水的变化情况。 各类用水的预测函数及参数较难确定。	

来源：a.孙增峰，孔彦鸿，姜立晖等.2011 b.李琳，左其亭.2005

用水定额

根据建设部《城市给水工程规划规范(GB50282-98)》，青岛主城区属于二区特大城市（山东省，城市人口超过100万人），人均日综合生活用水量指标为230-400升；远郊区为二区中等城市，人均日综合生活用水量指标为190-360升。

青岛属于严重缺水地区，且近年来随着节水工作的推进，城市居民生活用水量得到了比较好的控制。2010

年，青岛市区人均日综合生活用水量为178升，五市均在140-160升/日之间，低于国家下达的用水定额。

对青岛及下辖地区近10年人均日综合生活用水量的分析表明，人均生活用水与人均GDP之间存在以下关系：在人均GDP低于8万元人民币之前，生活用水呈现出下降的趋势，而一旦跨过8万元又会逐步上升，且年增长率大概在1%左右（附图I-4）。

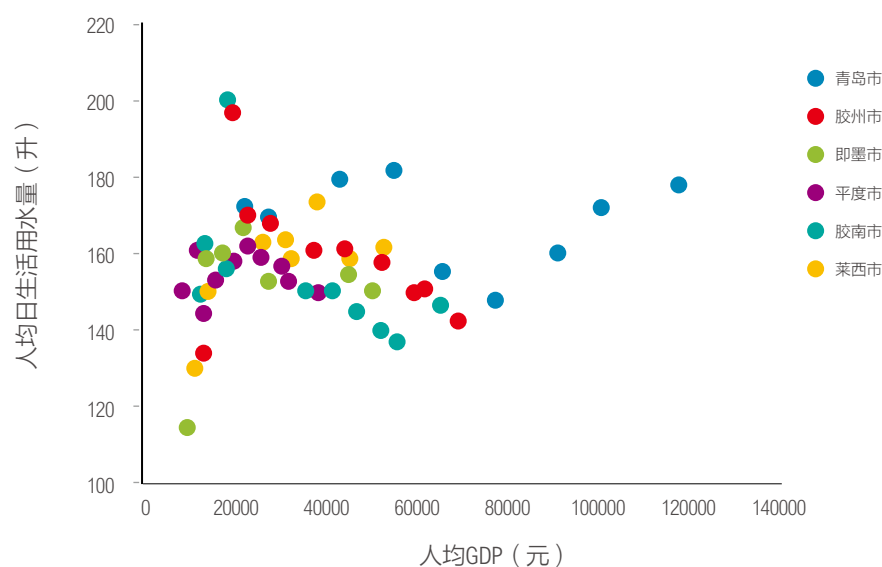
2020年青岛市各行政区城市居民人均用水指标值测算见附表I-8。

附表 I-7 | 青岛市各行政区2020年城市人口预测表（万人）

市南	市北	四方	李沧	崂山	黄岛	城阳	即墨	莱西	平度	胶南	胶州	合计
58	59	49	54	40	130	160	90*	50	50	65	64	869

包括即墨市区人口60万和蓝色硅谷30万。

附图 I-4 | 青岛各行政区人均生活用水量与人均GDP的关系



来源：中国城市建设统计年鉴2010

附表 I-8 | 青岛市各区居民生活用水指标

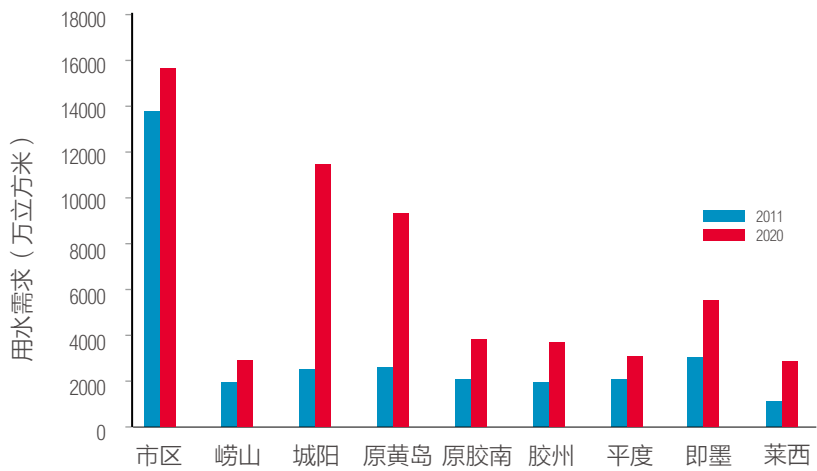
行政区	青岛	即墨	平度	胶南	胶州	莱西
2010年人均日生活用水量（升）	178	151	151	147	142	162
2020年人均日生活用水量（升）	197	167	166	162	157	153

数据来源：中国城市建设统计年鉴2010

附表 I-9 | 青岛市2020年生活及市政公共用水需求（万立方米）

原行政区划	用水需求	新行政区划	用水需求
市区	15,782	市区	15,782
崂山	2,882	崂山	2,882
城阳	11,486	城阳	11,486
黄岛	9,332	黄岛	13,185
胶南	3,852		
胶州	3,677	胶州	3,677
平度	3,035	平度	3,035
即墨	5,483	即墨	5,483
莱西	2,785	莱西	2,785
合计		58,314	

附图 I-5 | 青岛2020年城市生活及市政公共用水与2020年基准值比较



城市生活需水量预测

根据城市人口发展和用水定额确定，2020年青岛市城市生活及市政公共用水需求为58314万立方米，分区用水需求见附表I-9。

与2011年相比，由于两地城市人口已经基本饱和，主城区和崂山的生活用水量将出现小幅度上升，用水需求上升主要是由经济增长、生活水平提高造成的。城阳区和新黄岛区由于城市扩张、新区建设，将出现大幅度的生活及市政公共用水需求增长（见附图I-5）。

测算值与现有规划值及相关研究的比较

与目前青岛市的相关水资源规划比较，我们的预测值介于2007年的“十一五”水资源综合利用发展建设规划和2012年的水利现代化规划之间。

来源	2020年城镇生活及市政用水量（亿立方米）	备注
青岛市“十一五”水资源综合利用发展建设规划(2007)	4.43	用水定额法
青岛市水利现代化规划（2012）	6.1	
WRI测算	5.83	用水定额法

III 农村居民生活用水需求测算

近年来，按照“农村供水城市化、城乡供水一体化”的发展思路，青岛市加大了城市供水管网对乡镇的延伸和辐射力度，大力推进村镇集中供水，增强了农村供水的保障力度。另一方面，随着城镇化进程的提速，越来越多的农民进城务工，并在城市定居，农村居民生活用水需求在“十一五”期间出现了明显的下降趋势。2011年全市农村生活用水7162万立方米，比2005年（8302万立方米）下降了近14%。这种下降趋势将在未来十年间得到延续。

与城镇生活用水类似，农村居民生活用水采用用水定额法进行预测。

农村人口预测

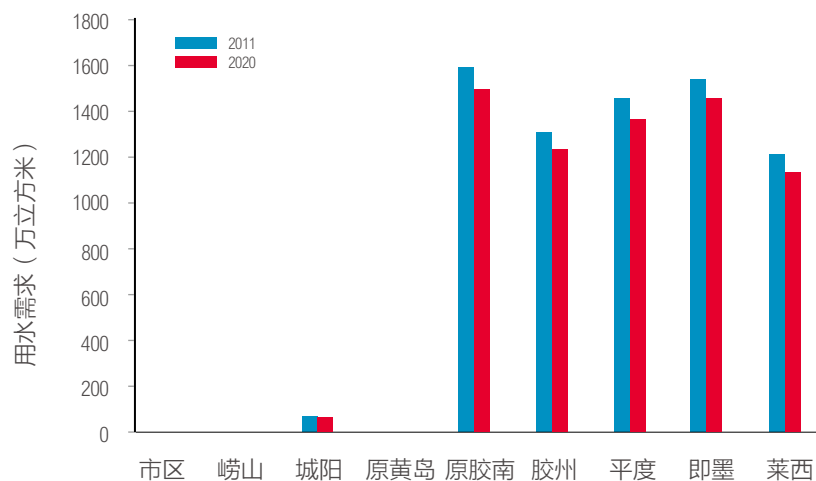
按照《青岛市社会与国民经济第十二个五年规划》、《青岛市城市总体规划》，确定青岛市2020年总人口为1100万人，城镇化率为79%，农村人口约为231万人（见附表I-10）。

附表 I-10 | 青岛市2020年农村人口预测表（万人）*

市区	崂山	原黄岛	城阳	即墨	莱西	平度	原胶南	胶州	合计
0	0	0	2	50	39	47	51	42	231

* 崂山、原黄岛和城阳区的农村生活用水纳入城乡一体供水。

附图 I-6 | 青岛2020年农村生活用水与2010年基准值的比较



附表 I-11 | 青岛市2020年农村生活用水需求（万立方米）

市区	崂山	原黄岛	城阳	即墨	莱西	平度	原胶南	胶州	合计
0	0	0	2	50	39	47	51	42	231

* 崂山、原黄岛和城阳区的农村生活用水纳入城乡一体供水。

用水定额

根据《青岛市水资源公报》测算，2011年青岛市农村居民生活用水量为66升/人•天。

根据水利部发布的《村镇供水工程技术规范（SL310-2004）》，结合青岛市农村规模化供水规划，预计到2020年青岛可执行三区全日供水标准（山东省，全日供水），人均日综合生活用水量指标为70-90升。考虑随着节水器具等节水工程措施的强化使用，结合青岛缺水的实际情况，确定 2020年青岛农村居民生活用水定额为80升/人•天。

农村生活用水预测

根据农村人口和用水定额确定，2020年青岛市

农村生活用水需求为6745万立方米，较2011年下降约5.8%。分区用水需求见下表（附表I-11）。

由附图I-6可见，大多数地区的农村生活用水量将出现下降，新黄岛区则会出现较大的增量。这是因为行政区划调整后，新黄岛区包括了原胶南市的农村人口，亦存在相应的用水需求。

测算值与现有规划值及相关研究的比较

根据WRI的测算，青岛市2020年的农村居民生活用水为0.67亿立方米。

来源	2020年年农村居民需水量 (亿立方米)	备注
青岛市“十五”水资源综合利用发展建设规划（2007）	0.56	用水定额法
青岛市水利现代化规划（2012）	0.75	
WRI测算	0.67	用水定额法



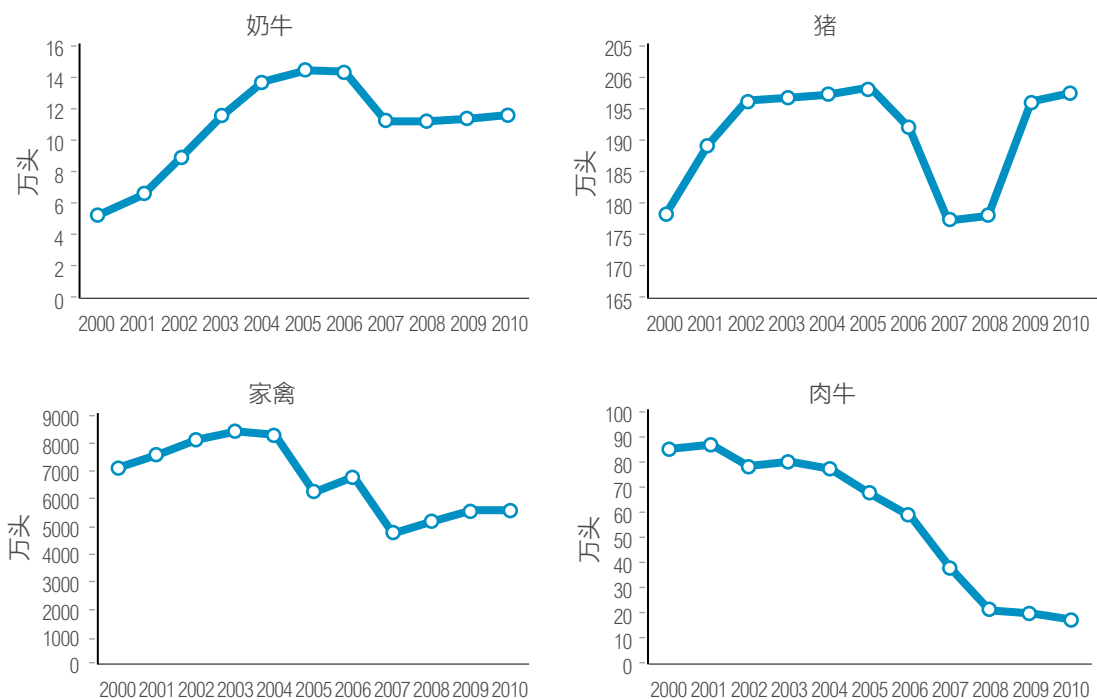
IV 牲畜养殖用水需求测算

随着青岛工业化、城镇化进程加快，新增城市居民对畜产品的消费需求也将出现快速增长的趋势，未来对畜产品的总体需求量仍呈刚性增加。同时，农业部门将进一步调整养殖结构和产业布局，加快建设标准化规模养殖基地，促进畜牧业由数量型向质量效益型、粗放型向集约型、资源消耗型向循环利用型转变⁷²，畜禽养殖用水效率有望进一步提高。

主要畜禽产量预测

2000年以来，青岛的主要畜禽饲养量年际波动较大。其中，奶牛和生猪饲养总体呈现略有上升的趋势，而肉牛和家禽为逐步下降（附图I-7）。

附图 I-7 | 青岛主要畜禽养殖数量变化情况



数据来源：青岛市统计年鉴2001-2011

附表 I-12 | 青岛市2020年主要畜禽饲养量预测表

年份	生猪出栏 (百万头)	奶牛存栏 (百万头)	肉牛出栏 (百万头)	肉鸡出栏 (百万头)	蛋鸡存栏 (百万头)	肉鸭出栏 (百万头)	肉兔出栏 (百万头)
2010	3.3	0.115	0.077	160	20	13	4
2020	4	0.143	0.1	250	20	15	13

根据《青岛市畜牧业发展第十二个五年规划》，未来将重点发展生猪、奶牛、肉鸡、蛋鸡、肉牛、肉兔和肉鸭七大产业，畜禽饲养量及主要产区见附表I-12和附表I-13。

畜禽养殖用水预测

根据畜禽饲养量和用水定额测算，2020年青岛市畜禽养殖用水需求为2842万立方米。其中，用水量最大的是生猪养殖业和禽类饲养，二者合计约占全部养殖用水的84%；养殖用水最多的行政区是莱西市，约占全部养殖用水的三分之一。分区及分畜禽种类用水需求见下表（附表I-15）。

附表 I-13 | 青岛市主要畜禽产区

畜禽	目前主产区	规划主产区
猪	五市	五市
奶牛	莱西占60%	莱西、胶州、即墨
肉牛	平度、莱西	平度、莱西
肉鸡	莱西、即墨、平度	莱西、即墨、平度、胶南
蛋鸡	胶州、即墨、平度	胶州、即墨、平度
肉鸭	平度占93%	平度、胶州
肉兔	胶南90%	胶南、胶州

数据来源：青岛市畜牧业发展第十二个五年规划

附表 I-14 | 青岛市2020年主要畜禽用水定额（升/头·日）

猪	奶牛	肉牛	肉鸡	蛋鸡	肉鸭	兔
20	50	50	0.5	0.5	0.5	0.3

附表 I-15 | 青岛市2020年养殖用水需求（万立方米）

畜禽种类	奶牛	肉牛	禽类	猪	兔
崂山	0.45	0	9.89	7.6	0
城阳	13.57	0	45.17	29.67	0
黄岛	0.23	0.1	1.92	6.26	0
胶南	2.94	24.84	74.81	214.98	35.1
胶州	11.08	33.47	95.3	192.48	3.9
即墨	33.02	13.1	203.41	144.88	0
平度	11.76	65.58	310.14	352.32	0
莱西	187.93	45.42	419.37	251.82	0
合计			2,842.48		

测算值与现有规划值及相关研究的比较

根据WRI的测算，青岛市2020年的畜禽养殖用水为0.28亿立方米。

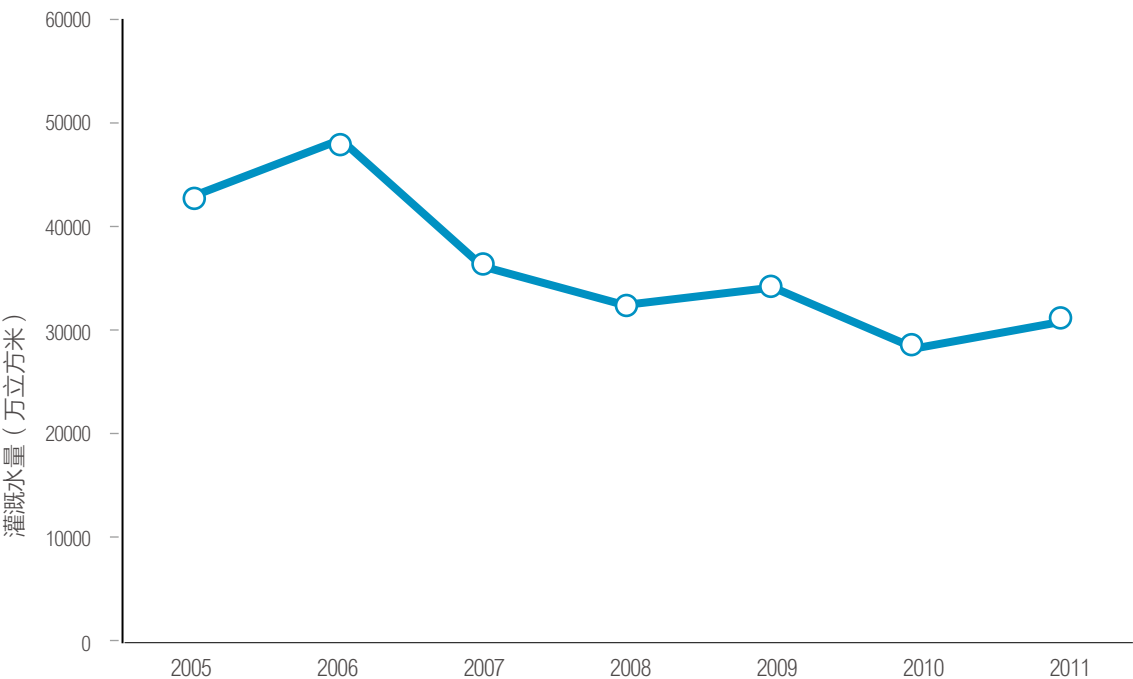
来源	2020年灌溉需水量 (亿立方米)	备注
青岛市“十一 五”水资源综合 利用发展建设规 划（2007）	0.26	用水定额法
青岛市水利现代 化规划（2012）	0.25	
WRI测算	0.28	用水定额法

V 灌溉用水测算

随着节水灌溉的推广及用水效率的提高，青岛的灌溉用水量总体呈现出下降趋势，2011年全市灌溉用水量比2005年下降了28%（附表I-8）。其中，2006年到2008年的下行趋势尤为明显，进入2010年之后又出现了一定反弹。这是因为灌溉用水量受降水量、蒸发量、气温、相对湿度、灌溉管理水平、灌区作物种类及种植面积、灌溉制度、水源的情况以及灌溉成本等因素的影响，因而表现出一定的不确定性，其年际年内变化都比较大。

目前，用于灌溉用水预测的方法有：彭曼法、自回归滑动平均法、回归分析法、用水定额法、灰色预测法和人工神经网络模型法。对各种分析方法优劣的比较如下（附表I-16）。经比较，用水定额法对数据量要求较小，比较适合长期预测。据此，本研究采用定额法对青岛的农业灌溉用水进行预测。

附图 I-8 | 青岛市2005-2011年灌溉用水量变化情况



数据来源：青岛市水资源公报2005-2011

用水定额的确定

灌溉用水定额是指在作物生育期内，单位灌溉面积上要求水源供给的总灌溉水量。灌溉用水定额受地区、农作物种类、水源类型、灌溉方式与效率影响。例如，玉米的需水量小于小麦，而小麦的需水量又远远低于棉花⁷³。青岛地区普遍采用的井灌，其输水损失要低于引黄灌区⁷⁴。灌溉的有效利用系数越高，定额就越低⁷⁵。

根据青岛市“十二五”节水灌溉规划，到2015年灌溉用水有效利用系数达到0.66的情况下，全市农村种植业综合用水定额为105m³/亩。

由于灌溉用水定额与灌溉效率息息相关，我们根据2020年灌溉用水有效利用系数规划值对当年的用水定额进行了修正，预计2020年青岛市的种植业综合用水定额为102 m³/亩。

灌溉面积

根据《青岛市农业发展“十二五”规划》，预计到2015年，全市有效灌溉面积将由目前的498万亩略微上调

至510万亩。但是，随着城市化进程的不断推进，青岛市的耕地面积将在“总量动态平衡”的方针下保持稳定，且根据青岛市“十二五”节水灌溉规划的分析，“由于成本较高，调水是不可能用于农业灌溉的，只能用来满足城镇用水”，我们预测青岛市进一步扩大灌溉面积的潜力有限，2020年有效灌溉面积将维持在2015年的水平。

指标校核

传统的定额法是基于完全灌溉的测算值，没有考虑自然降水对作物需水量的补给，预测结果偏大的情况也较明显。根据对本地降雨量的分析，青岛具备一定的雨水补给农田的条件，不可能完全依赖人工降雨，所以有必要对预测结果进行校核修正。

根据近年来《青岛市水资源公报》统计，农业灌溉用水则受气候和实际灌溉面积的影响呈上下波动、总体为缓降趋势。与通过用水定额的理论值比较发现，除了遭受严重旱灾的2006年，实际灌溉用水量均低于定额值。2005-2011年间，青岛市实际灌溉量与额定量的比值在0.55-1之间，平均为0.75（即75%）。

附表 I-16 | 各种灌溉用水预测方法的比较

	优点	缺点
彭曼法（Penman）a	综合考虑作物蒸腾量、降雨量、田间渗漏量因素计算灌溉用水量	数据要求高：需要气象数据、种植结构、土壤物理性质数据
自回归滑动平均（ARMA）a	通过时间序列数据预测，数据要求量较低，适用于短期预测	模型数据单一，受异常值干扰大，长期误差较大
回归分析法a	适用于长期预测	变量过多影响预测准确性，不适用于短期预测
用水定额法 ^a	通过作物实际需求制定用水定额，预测相对准确且数据要求较小	受实际灌溉面积及灌溉水平影响大
灰色预测法a,b	所需数据量小，适用于原始数据无明显规律的案例	通过指数模型来模拟时间序列的动态变化，而需水量并不是简单的指数关系
人工神经网络模型a,b	黑箱模型，适用于短期预测	不适用于长期预测

数据来源：a黄修桥，康邵忠，王景雷. 灌溉用水需求预测方法初步研究. 灌溉排水学报. 2004年8月, 第23卷, 第4期；
b.刘迪，胡彩虹，吴泽宁. 基于定额定量分析的农业用水需求预测研究. 灌溉排水学报. 2008年12月, 第27卷, 第6期

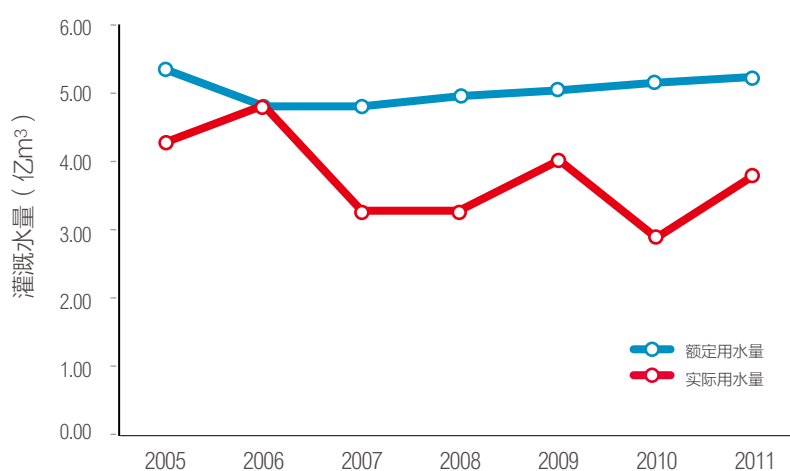
附表 I-17 | 青岛市2020年种植业灌溉定额

	灌溉用水有效利用系数	灌溉用水定额（m ³ /亩）
2015	0.66	105
2020	0.68	102

附表 I-18 | 青岛市各行政区有效灌溉面积预测（单位：万亩）

	2010	2020
崂山	1.08	1.08
黄岛	2.15	2.15
城阳	2.97	2.97
胶州	58.5	62.08
即墨	83.45	87.32
平度	193.37	197.04
胶南	64.79	67.16
莱西	86.82	90.2
合计	493.11	510

附图 I-9 | 青岛市近年实际灌溉用水与额定测算值的差距



附表 I-19 | 青岛市各行政区2020年灌溉用水需求

	耕地面积（万亩）	用水定额（万立方米）	灌溉用水修正值（万立方米）
崂山	1.08	110	83
黄岛	2.15	219	164
城阳	2.97	303	227
胶州	62.08	6,332	4,749
即墨	87.32	8,907	6,680
平度	197.04	20,098	15,074
胶南	67.16	6,850	5,138
莱西	90.2	9,200	6,900
合计	510	52,020	39,015

假设到2020年，青岛市的雨水条件维持2005到2011年间的水平，实际灌溉量的修正系数为0.75，即实际灌溉用水量为定额测算值的75%。

用水定额法测算结果

在2020年种植业用水定额为102m³/亩的情况下，按用水定额法测算全市需水量为5.2亿立方米；考虑到雨水补给，经校核后全市的灌溉用水量预计为3.9亿立方米（附表I-19）。

测算值与现有规划值及相关研究的比较

根据专家咨询意见，在供水总量增加有限的条件下，人口的增加，工业化和城市化的发展，农业用水在社会总用水量中的比重将会下降。新增的供水量主要用于满足工业、城市发展和改善人民生活的需求，青岛市农业干旱缺水的现象将长期存在，因此，农业灌溉用水量不可能出现较大的增长。项目组建议采纳修正后的用水定额进行计算，即2020年农业灌溉需水量为3.9亿立方米。

来源	2020年灌溉需水量 (亿立方米)	备注
青岛市“十五”水资源综合利用发展建设规划（2007）	4.68	用水定额法（50%保证率，水利有效系数80%）
青岛市水利现代化规划（2012）	5.50	
WRI测算：用水定额法	5.2	用水定额法（50%保证率，水利有效系数0.66）
WRI测算：用水定额法修正值	3.9	用水定额法（50%保证率，水利有效系数0.66，修正系数0.75）

VI 青岛市2020年用水需求汇总

随综上所述，青岛市2020年总需水量将达到14.8亿立方米，各行政区不同用水类型需求预测详见附表I-20。

附表 I-20 | 青岛市2020年总需水量（单位：万立方米）

	工业	城镇居民及市政公用	农村居民	畜禽养殖	灌溉	生态	合计
市区	1,297	15,782	0			3,961	
崂山	899	2,882	0	18	83	1,733	
城阳	3,217	11,486	59	88	227	621	
黄岛	5,146	9,332	0	9	164	808	
胶南	4,922	3,852	1498	353	5,138	727	148,017
胶州	4,185	3,677	1,233	336	4,749	963	
即墨	4,109	3,035	1,366	394	6,680	916	
平度	3,793	5,483	1,454	740	15,074	655	
莱西	2,532	2,785	1,135	905	6,900	615	

注：生态环境用水预测值引用自《青岛市水利现代化规划》

附录二：不同类型水源的特点与风险比较

	本地地表水 (水库)	本地地下水	外调水	海水淡化	再生水利用	雨水利用
水源保证率	储水量可人工调整，有一定保障，但若遇到长期干旱和高温天气水库水量下降，可能干涸	水量相对稳定，保证率较高，然而随着过度开采，可能出现枯竭现象，保证率在未来会逐渐降低	冬季冰冻和断流限制了不间断的水源保障，跨越距离越长，所面临的不可确定性也就越大	海水来源有长期保证，但封闭海水港湾排放高盐度尾液可能导致区域内海水盐度上升	只要城市用水得到保证，再生水就有稳定的来源	收获几乎全部来自于降雨，储藏量有限，受天气以及气候因素制约较大
季节变化率	受随季节变化的降雨量影响，有长区间的波动	由于地下水的储藏作用相比地上水来说水量较为稳定，但仍受季节及降水总量变化影响	受随季节变化的降雨量影响，涉及范围较广，影响变量较多	海水资源充足，过滤处理稳定，不易受其他气候季节因素干扰	考虑到城市水资源基本上得到保障，再生水资源充足，问题在于如何高效利用	不同季节降雨量有较大幅度波动，可供雨水利用的水资源总量有限
土地占用	蓄水淹没的上游面积大	地下水采用井占用面积小，配套设施要求较低	需占用大量土地资源用于河道开发	海水淡化基地占用土地面积较小	再生水利用设施只占有较小面积的城市用地	可按户进行改造，利用屋顶屋檐未开发面积收集水资源
资金投入	资金密集型，建造工程难度大，需反复勘测研究	资金投入相对较小，无需大规模工程，可按地下水资源分布分散建造	开凿输水运河所需投入大，涉及范围广	技术复杂，投入成本大，在沿海水资源紧缺地区优势明显	一次性投入较大，回用系统需要专门的管理团队和运行费用，投入必须得到保障	投资少，技术含量较低，成本与投入有限，但以现有水价水平，投入回本困难
能源消耗	建成后利用地势差异，能耗较小	随着地下水资源过度开采，原先挖的水井可能干枯，需要开挖新井或加深深度，汲取水资源的成本也因此提高	部分长距离调水需克服重力差，全部依靠高耗能的水泵引水	目前的技术条件下能耗较高	通过生物或自然处理，消耗能源少	几乎没有能源消耗，完全依靠重力蓄水，无需耗能设施
生态影响	阻碍鱼类迁徙，改变下游水成分、水质、温度，减少下游流量，威胁下游物种的生存环境，同时上游物种也容易受侵略性物种的威胁。由于饮用水水库拦截河流在上端形成湖泊，蒸发面积骤然增大，导致水库上端气候发生剧烈变化，增加的降雨可能导致泥石流和山体滑坡	地下水被抽取后地表发生沉降，地下水库附近连通的河道断流，湖泊消失，加剧开采后恢复时间极长，附近海水入侵，侵蚀腐化管道，进一步破坏海水与淡水的隔离设备	调入区影响：改善输水通过区气候环境、地下水水质状况，缓解调入水地区的生态危机 调出区影响：导致调水流量减少，咸水倒灌，引起调出水区用水不足，河道过流条件恶化，水质恶化，大量破坏地貌，输水渠道渗水，引起土壤盐渍化	为防止器械管道氧化，在处理过程中排除了海水中的氧气，排出水体不但盐度高，而且缺氧严重。处理前杀菌过程中用的氯导致排出的水中氯离子含量过高。在处理过程中需要将海水加热，排出的尾水温度明显高于环境温度，这多个因素可以杀死水体中的生物。另外由于尾水中硼比重比海水大，容易下沉至海底，破坏生态环境	促进水资源的高效利用	一般适用于城市，并无污染，对自然生态环境隔离，几乎没有直接影响

	本地地表水 (水库)	本地地下水	外调水	海水淡化	再生水利用	雨水利用
环境 污染	在最初的植物被水库淹没，原有的森林被腐化分解，内部含有的大量二氧化碳等温室气体被排放到空气中，造成轻度的环境污染	开采过程中的污染较小，不涉及各区域水源交叉污染和排污问题	全流域性污染风险更大，一旦上游发生污染，污染可能跨区域，造成生态灾难	排放的废水中可能有高浓度的硼，也可能存在重金属及酸碱污染	几乎没有环境污染，改善城市生态环境，减少资源对环境造成的压力	清洁无污染
工程 移民	上游蓄水区淹没地带所囊括的居民必须重新安置	建设范围有限，占地面积较小，无需过多协商	河道穿越区域的居民需要搬迁，占用的农田需要用其他方式进行补偿	基本上建设在沿海地区，几乎不存在工程移民问题	影响很小	与居民区和谐共生，可由各种建筑物进行改造
民众接 受度	安置搬迁过程中政府的强硬手段易引发各类群体性事件	历史较长，民众较容易接受	在谈判购置蓄水地时需满足当地居民需要，搬迁后有些居民的生活会有较大改变	缺水地区（如中东及美国加州）的居民支持海水淡化设施的建设	民众对再生水直接使用存有疑虑，但正在逐渐接受	民众接受度普遍较高

数据来源：

1. http://www.watercorporation.com.au/~media/Files/Residential/Water%20supply%20and%20services/Desalination/SSDP/SSDP_social_impact_management_plan.pdf
2. http://wapolicyforum.org.au/files/papers/WAPF_discussion_paper_on_Seawater_Desalination.pdf
3. <http://zh.scribd.com/doc/132409671/Comparison-of-alternative-community-water-supply-technologies-in-developing-countries>
4. <http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/16/2685/2012/hess-16-2685-2012.pdf>
5. <http://www.sandia.gov/energy-water/docs/121-RptToCongress-EWwEIAComments-FINAL.pdf>
6. http://www.groundwateruk.org/Groundwater_resources_climate_change.aspx
7. <http://pubs.usgs.gov/sir/2013/5079/SIR2013-5079.pdf>
8. <http://www.worldwatch.org/node/481>
9. <https://sites.google.com/site/ocklawahaman/evapo-transpiration-water-losses-of-rodman-reservoir>
10. http://www.amtaorg.com/wp-content/uploads/7_MembraneDesalinationPowerUsagePutInPerspective.pdf
11. <http://online.liebertpub.com/doi/abs/10.1089/ees.2005.0126?journalCode=ees>
12. <http://ses.library.usyd.edu.au/bitstream/2123/1897/1/Desalination%20Plants.pdf>
13. <http://www.ifh.uni-karlsruhe.de/science/envflu/research/brinedis/muenk-diplomathesis.pdf>
14. <http://www.ifh.uni-karlsruhe.de/science/envflu/research/brinedis/muenk-diplomathesis.pdf>
15. http://r4rd.org/wp-content/uploads/2009/07/Cost_of_Seawater_Desalination_Final_3-18-09.pdf
16. <http://www.sidem-desalination.com/en/Process/FAQ/>
17. <http://www.twdb.state.tx.us/innovativewater/desal/faqbrackish.asp>
18. <http://www.kexuemag.com/Article/showinfo.asp?infoid=1708>
19. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20350744>
20. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16312963>
21. <http://greywateraction.org/sites/default/files/laura/Sep09/AZstudyonGreywater.pdf>
22. <http://applications.emro.who.int/dsa/dsa1203.pdf>
23. <http://water.epa.gov/polwaste/nps/upload/rainharvesting.pdf>
24. http://www.epa.gov/acidrain/effects/surface_water.html
25. <http://www.refworld.org/docid/3ae6a7d310.html>
26. http://coeh.berkeley.edu/docs/student_award/Mackie_abbrevfinal.pdf
27. <http://www1.american.edu/ted/ICE/china-dam-impact.html>

名词解释

淡水资源：淡水资源是由江河及湖泊中的水、高山积雪、冰川以及地下水等组成的。能被人类所利用的水资源主要包括湖泊、河流、土壤湿气和埋藏相对较浅的地下水盆地，约占淡水总量的1%。狭义的淡水资源则是能为人类直接利用的淡水。

低温多效海水淡化技术：是指盐水的最高蒸发温度低于70-的蒸馏淡化技术，其特征是将一系列的水平管喷淋降膜蒸发器串联起来，用一定量的蒸汽输入首效，后面一效的蒸发温度均低于前面一效，然后通过多次的蒸发和冷凝，从而得到多倍于蒸汽量的蒸馏水的淡化过程。

地表水：是指存在于地壳表面，暴露于大气的水，是河流、冰川、湖泊、沼泽四种水体的总称，亦称“陆地水”。它是人类生活用水的重要来源之一。

地下水：泛指埋藏和运动于地表以下不同深度的土层和岩石空隙中的水，狭义上的地下水是地下1000m范围内的水。按照埋藏条件可分为包气带水、潜水和承压水，按照埋藏介质可分为孔隙水、裂隙水和岩溶水。

多级闪蒸海水淡化技术：是将经过加热的海水，依次在多个压力逐渐降低的闪蒸室中进行蒸发，将蒸汽冷凝而得到淡水。多级闪蒸技术主要与火电站联合建设，适合于大型和超大型淡化装置，主要在海湾国家采用。

反渗透膜海水淡化技术：该技术利用只允许溶剂透过、不允许溶质透过的半透膜，将海水与淡水分隔开。其原理是在膜的原水一侧施加比溶液渗透压高的外界压力，原水透过半透膜时，只允许水透过，其他物质不能透过而被截留在膜表面的过程。

非常规水资源：指常规地表水、地下水之外的水资源。主要有雨水、再生水（经过再生处理的污水和废水）、海水、空中水、矿井水、苦咸水等，这些水源的特点是经过处理后可以再生利用。非常规水源的开发利用方式主要有再生水利用、雨水利用、海水淡化和海水直接利用、人工增雨、矿井水利用、苦咸水利用等。

工业用水：指工业生产中直接和间接使用的水。

海水淡化：除去海水中的盐分以获得淡水的工艺过程叫海水淡化，亦称海水脱盐。海水淡化技术主要分为蒸馏法(热法)和膜法两大类，其中低多效蒸馏法、多级闪蒸法和反渗透膜法是目前应用较多的主流技术。

客水：指从本地区以外的来水。例如由过境河流流入的或由外地引进的水，以及由区外高地因降雨产生的滚坡水。在当地水源缺乏时，客水是可资利用的水量。

农业用水：指用于灌溉和农村牲畜的用水。农业灌溉用水量受用水水平、气候、土壤、作物、耕作方法、灌溉技术以及渠系利用系数等因素的影响，存在明显的地域差异。由于各地水源条件、作物品种、耕植面积不同，用水量也不同。

三条红线：2011年中央一号文件提出实行最严格的水资源管理制度，建立用水总量控制、用水效率控制和水功能区限制纳污“三项制度”，相应地划定用水总量、用水效率和水功能区限制纳污“三条红线”。

生活用水：生活用水包括城镇生活用水和农村生活用水。其中，城镇生活用水由居民用水和公共用水（含服务业、餐饮业、货运邮电业及建筑业等用水）组成。生态用水：指为维护生态环境不再恶化并逐渐改善所需要消耗的水资源总量。狭义的生态环境用水主要包括“保护和恢复内陆河流下游的天然植被及生态环境；水土保持及水保范围之外的林草植被建设；维持河流水沙平衡及湿地、水域等生态环境的基流；回补超采地下水”等方面。

水电联产：主要是指海水淡化水和电力联产联供。由于海水淡化成本在很大程度上取决于消耗电力和蒸汽的成本，水电联产可以利用电厂的蒸汽和电力为海水淡化装置提供动力，从而实现能源高效利用和降低海水淡化成本。这是当前大型海水淡化工程的主要建设模式。

外调水：又称跨流域调水，是通过大规模的人工方法从余水的流域向缺水流域大量调水，以便促进缺水区域的经济发展和缓解流域人畜用水的矛盾。

新生水：是由新加坡推广的高品质再生水。新生水的处理利用了微过滤和反渗透两项先进技术，将已溶解的盐分、药物、化学物质和病毒等较小杂质过滤出来，最后再经过紫外线消毒，就得到了可循环利用的新生水。新生水的质量符合世界卫生组织的饮用水标准。

用水总量指标：是指在一定区域和期限内可以开发利用的地表水、地下水以及区域外调入水量的总和。利用污水处理再生水、淡化海水的，则不受规划期用水控制指标和年度用水控制指标限制。

再生水：是指污水经适当处理后，达到一定的水质指标，满足某种使用要求，可以进行有益使用的水。

注释

- ¹ United Nations, United Nations Human Settlements Programme (2008). State of the World's Cities 2008/2009: Harmonious Cities.
- ² United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2012). World Urbanization Prospects: The 2011 Revision. CD-ROM Edition - Data in digital form (POP/DB/WUP/Rev.2011).
- ³ UNDESA (WUP): US' and Great Britain's urban growth rates: Buckley, R. and A. Kallergis (2011).
- ⁴ United Nations, United Nations Human Settlements Programme (2008). State of the World's Cities 2008/2009: Harmonious Cities.
- ⁵ International Food Policy Research Institute (2002). Global Water Outlook to 2025: Averaging an Impending Crisis.
- ⁶ McKinsey & Company (2009). Chartering Our Water Future.
- ⁷ 中国社会科学院 (2012). 中国城市发展报告2012.
- ⁸ 中国网. 国家发改委能源局副局长吴贵辉讲话摘要.2007
- ⁹ EIA.International Energy Outlook 2013
- ¹⁰ 胡四一: 中国三分之二城市缺水, 人多水少是基本水情 (2012).
- ¹¹ 中国日报: 中国近90%沿海城市水资源短缺 (2012).
- ¹² Rachel Cleetus, Massive Power Outage in India Highlights Energy, Water, and Climate Vulnerabilities. 2012.
- ¹³ Water in the West (2013).Water and Energy Nexus:A Literature Review.
- ¹⁴ Robert C. Wilkinson, Energy intensity of major water supply options in southern California
- ¹⁵ Dennen, A., D. Larson, C. Lee, J. Lee, and S. Tellinghuisen, 2007. California's Energy-Water Nexus: Water Use in Electricity Generation.
- ¹⁶ 信息来源于加州市政公用委员会网站.
- ¹⁷ 以美国为例, 城市水系统的总能耗约占全国能耗的3%-4%, 见: <http://water.epa.gov/infrastructure/sustain/waterefficiency.cfm>
- ¹⁸ 青岛市政府网站.www.qingdao.gov.cn/
- ¹⁹ 《国务院关于同意山东省调整青岛市部分行政区划的批复》(国函〔2012〕153号)
- ²⁰ 青岛市统计局. 青岛统计年鉴2011. 2011
- ²¹ 因崂山区定位为风景区, 本研究中将其单列分析。如非特别说明, “东岸城区”指市北区(原市北和原四方)、市南区和李沧区。
- ²² 青岛市统计局. 青岛统计年鉴2011. 2011
- ²³ 青岛市水利局.青岛市水利现代化规划. 2012
- ²⁴ 青岛市水利局. 青岛市“十一五”水资源综合利用发展建设规划. 2007
- ²⁵ <http://www.qingdao.gov.cn/n172/n25685095/n25685320/n25685925/n25687747/26510588.html>.
- ²⁶ 陈志梅. 2006. 青岛近百年的旱涝变化特征分析. 海洋预报. 23 (2): 76
- ²⁷ 吴洁晶. 1999. 青岛市降水百年变化规律的初步探讨. 黄渤海海洋. 17 (1): 16-22
- ²⁸ 《积极实施最严格水资源管理制度保障经济社会可持续发展》, 青岛市水利局.
- ²⁹ 工程水源费按“两部制”方式划分为基本水价和计量水价两部分, 基本水价用于运行管理费用和工程基本维护费、工程建设投资还贷等, 不管用不用水都需要付费; 而计量水价则包括抽水电费、材料费等其他成本, 计量水价按实际使用缴纳。
- ³⁰ 国家发展改革委. 关于南水北调东线一期主体工程运行初期供水价格政策的通知(发改价格[2014]30号). 2014
- ³¹ 人民网. 南水北调东线遇难题: 江苏不管用不用水每年或交10多亿. 2014
- ³² 《青岛市“十二五”循环经济发展规划》

- 33 “发展再生水源热泵：解决城市再生水利用和供热难题”，张国辉，青岛市供水管理处，《中国建设报》2011.11.30
- 34 《青岛市水资源管理有关情况》
- 35 《青岛气候决定十年九旱今年并非史上最重》
- 36 《青岛市水资源管理有关情况》
- 37 根据《青岛市统计年鉴》、《青岛市水资源公报》测算
- 38 《节水型社会建设“十一五”规划》（发改环资[2007]236号），发改委、水利部、建设部，2007.02
- 39 《青岛市水资源公报》
- 40 《中国城市建设统计年鉴2010》，其中“东部地区”按照年鉴中所规定的地理位置划分，包括：北京、天津、河北、辽宁、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东、广西和海南12个省市。
- 41 江勇. 提高泵站管理水平. 山东水利. 1999年第1期
- 42 污水利用的水质和能耗取决于用水用途和处理方法。例如，市政杂用水的水质低于饮用水标准，能耗较低；但由超滤、反渗透工艺处理的新生水能耗相对较高，但水质超过世界卫生组织所推荐的饮用水标准。
- 43 青岛市水利局.2011年青岛市水资源公报.
- 44 The Environment Agency.The greenhouse gas implications of future water resources options.
- 45 数据由青岛市中法水务白沙河水厂提供.
- 46 目前抽水灌溉一亩地的成本是7元左右，一度电（含管理费）1.2元，灌溉一亩地大概需要6度电。每亩的灌溉量为15m³，计算得出单位耗电量为0.4 kWh/m³。
- 47 国家发展计划委员会、水利部. 南水北调工程总体规划. 2002
- 48 黄红虎. 南水北调东线工程简介. 能源研究与利用. 2004 (4): 3-7
- 49 孟建川. 南水北调东线工程供水成本核算. 战略规划. 2005(1):21-22
- 50 IDA. Desalination Yearbook 2012-2013.
- 51 Gary Amy. Water Desalination: Present Practices, Future Trend and Research Needs
- 52 Texas Water Development Board.Brackish FAQ
- 53 Cohen et al. (2004), reprinted with permission from the National Resources Defense Council.
- 54 王琦. 膜生物反应器在污水处理与回用中的能耗分析. 膜科学与技术. 2012. 32 (3)
- 55 石柳青. 超滤在饮用水净化和城市污水深度处理中的应用研究. 清华大学硕士论文. 2011
- 56 http://www.pecc.org/resources/doc_view/1091-public-health-and-recycling
- 57 <http://www.pub.gov.sg/water/newater/Pages/default.aspx>
- 58 我国资源能源严重短缺.2011.12.10.
- 59 水资源专家咨询。也有观点认为，由于我国北方地区水资源短缺，地表水资源开发利用可以维持在60%-70%范围之内（钱正英、张光斗，2001）。
- 60 考虑到青岛降水季节性分配的严重不均衡，以及近年来旱季对水库蓄水的严重影响，本报告建议将青岛市地表水资源的开发利用上限确定为多年平均地表水资源的0.55，低于《青岛市“十一五”水资源综合利用发展规划》中提出的9.05亿m³（开发利用率高达0.57）。
- 61 青岛市水利现代化规划，2012年。
- 62 I. Bodik. Energy and Sustainability of Operation of A Wastewater Treatment Plant. Environment Protection Engineering, 2013, 39 (2)
- 63 青岛市发展和改革委员会. 青岛市海水淡化产业发展规划. 2005
- 64 http://www.watereuse.org/sites/default/files/u3/Reza%20Sobhani_0.pdf
- 65 来源于与黄岛电厂海水淡化厂工作人员的访谈。
- 66 青岛市水利局.青岛市水资源公报. 2005-2011
- 67 青岛市统计局.青岛市统计年鉴.2011

⁶⁸ 和刚, 吴泽宁, 胡彩虹.基于定额定量分析的工业需水预测模型.水资源与水工程学报.2008, 19(2): 60-63, 67

⁶⁹ 水利部. 全国水资源综合规划技术大纲. 2002

⁷⁰ 佟长福等. 鄂尔多斯市工业用水变化趋势和需水量预测研究. 干旱区资源与环境. 2011, 25(1): 148-150

⁷¹ 2012年底, 国务院批复了青岛市关于调整行政区划的申请, 撤销市北区、四方区, 设立新的青岛市市北区, 以原市北区、四方区的行政区域为新的市北区的行政区域; 撤销青岛市黄岛区、县级胶南市, 设立新的青岛市黄岛区, 以原青岛市黄岛区、县级胶南市的行政区域为新的黄岛区的行政区域。

⁷² 青岛市畜牧局. 青岛市畜牧业发展第十二个五年规划.

⁷³ 2011 Mekonnen, M.M. and Hoekstra, A.Y. (2010) The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products, Value of Water Research Report Series No. 47, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands.

⁷⁴ 山东省质量技术监督局. 山东省主要农作物灌溉定额. 2010

⁷⁵ 灌溉用水有效利用系数指灌入田间可被作物利用的水量与灌溉系统取用的灌溉总水量的比值, 其与灌区自然条件、工程状况、用水管理、灌水技术等因素有关, 是评价灌溉用水效率的重要指标。

参考文献

- Dennen, A., D. Larson, C. Lee, J. Lee, and S. Tellinghuisen, 2007. California's Energy-Water Nexus: Water Use in Electricity Generation.
- Economist Intelligence Unit. Asian Green City Index. 2011
- Economist Intelligence Unit. European Green City Index. 2011
- Economist Intelligence Unit. Latin American Green City Index. 2011
- Economist Intelligence Unit. US and Canada Green City Index. 2007
- Gary Amy. Water Desalination: Present Practices, Future Trend and Research Needs
- IDA. Desalination Yearbook 2012-2013.
- International Food Policy Research Institute. 2002. Global Water Outlook to 2025: Averaging an Impending Crisis.
- McKinsey & Company. 2009. Chartering Our Water Future.
- Robert C. Wilkinson-Energy intensity of major water supply options in southern California
- Singaporean Public Utility Bureau. Newwater Overview.
- Sobhani, R. Energy Analysis of Brackish Groundwater. Treatment with Zero Liquid Discharge in Inland Arid and Semi-Arid Areas.
- Tan, W.L. Public Health and Recycling. Hyflux. Singapore.
- Texas Water Development Board. Brackish FAQs
- The Environment Agency. The greenhouse gas implications of future water resources options.
- UNDESA (WUP): US' and Great Britain's urban growth rates: Buckley, R. and A. Kallergis (2011)
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2012). World Urbanization Prospects: The 2011 Revision. CD-ROM Edition - Data in digital form (POP/DB/WUP/Rev.2011)
- United Nations, United Nations Human Settlements Programme (2008). State of the World's Cities 2008/2009: Harmonious Cities.
- Water in the West (2013). Water and Energy Nexus: A Literature Review.
- 半岛都市报, 2013, 南水北调东线9月底正式通水.
- 陈志梅. 2006. 青岛近百年的旱涝变化特征分析. 海洋预报. 23 (2): 76
- 发改委、水利部、建设部, 2007, 节水型社会建设“十一五”规划
- 发改委、水利部、建设部, 2011, 节水型社会建设“十二五”规划
- 国家发展计划委员会, 水利部. 2002. 南水北调工程总体规划.
- 国家经济贸易委员会, 2000, 火力发电厂设计技术规程 (DL5000-2000)
- 淮河水利委员会. 2010. 淮河片水资源公报 (2010年度)
- 黄红虎. 2004. 南水北调东线工程简介. 能源研究与利用. 2004 (4): 3-7
- 加州市政公用委员会
- 江勇. 1999. 提高泵站管理水平. 山东水利. 1999年第1期
- 胶东调水局. 引黄济青工程简介
- 孟建川. 2005. 南水北调东线工程供水成本核算. 战略规划. 2005(1):21-22
- 青岛日报, 2011, 青岛气候决定十年九旱今年并非史上最重
- 青岛市发改委, 2011, 青岛市“十二五”能源建设发展规划
- 青岛市发展和改革委员会. 2005. 青岛市海水淡化产业发展规划.
- 青岛市环保局, 2011, 青岛市“十二五”环境保护规划
- 青岛市节约用水办公室, 2010, 青岛:多管齐下创新节水管理, 《建设科技》2010年第11期
- 青岛市水利局, 2004-2011, 青岛市水资源公报

青岛市水利局，2007，青岛市“十一五”水资源综合利用发展建设规划.

青岛市水利局，2012，《积极实施最严格水资源管理制度保障经济社会可持续发展》

青岛市水利局，2012，青岛市水利现代化规划

青岛市水利局，青岛市水资源管理有关情况

青岛市统计局. 青岛统计年鉴2000-2011

青岛市政府，2011，青岛市“十二五”循环经济发展规划

青岛市政府. 2013. 关于实行最严格水资源管理制度的实施意见.

青岛市政府网站.青岛介绍.

山东省水利厅，2010，山东省“十一五”节水型社会建设工作总结.

水利部，2010，2010年中国水资源公报.

水利部，2011，2011年中国水资源公报.

吴洁晶. 1999. 青岛市降水百年变化规律的初步探讨. 黄渤海海洋. 17 (1): 16-22.

新疆塔里木河流域管理局. 水资源开发利用率.

张国辉.2011.发展再生水源热泵：解决城市再生水利用和供热难题，中国建设报.

张相忠，刘建华，邱淑霞.2006.城市雨水利用规划研究.《规划师》2006年第B12期，P31-P33

中国电力企业联合会，2011，十二五期间全国电力供应与需求.

中国日报，2012，胡四一: 中国三分之二城市缺水, 人多水少是基本水情.

中国日报，2012，中国近90%沿海城市水资源短缺.

中国社会科学院，2012，中国城市发展报告。

中国水网，2010，水利部副部长解读《全国水资源综合规划》

中国网，2007，国家发改委能源局副局长吴贵辉讲话摘要

住建部，2004-2011，城市供水统计年鉴

住建部，2010，中国城市建设统计年鉴2010

作者介绍

温华 世界资源研究所中国水项目研究员。主要从事有关城市水资源管理、水资源与能源的关联分析和湖库富营养化控制政策等研究工作。邮件：hwen@wri.org

钟丽锦 博士，世界资源研究所中国水项目主任和高级研究员，负责领导实施中国水安全评估、水资源和能源的关联分析、水质管理等研究。邮件：lzhong@wri.org

付晓天 世界资源研究所中国水项目研究分析员，主要从事有关中国水资源可持续管理政策、水资源和能源的政策与关联分析等研究工作。此外，她在环境（水、固废）、能源与交通行业有多年的研究经历。邮件：xfu@wri.org

司马博文(Simon Spooner) 英国阿特金斯公司 (Atkins Global) 水与环境项目主任。司马先生在英国和中国从事水资源管理、流域规划和城市给排水及环境政策研究工作，他为本研究提供了城市水务能源管理方面的国际经验。邮件：Simon.Spooner@atkinsglobal.com

项目合作方介绍

青岛市工程咨询院成立于1988年，是隶属青岛市发展和改革委员会管理的副局级事业单位，具有独立法人资格和甲级综合咨询资质，是青岛市最具实力的综合性工程咨询机构。主要职能包括：开展宏观政策动态研究，投资增长态势跟踪分析研究，编制区域和产业发展规划，为政府决策提供对策建议；研究各类设施需求和布局，建立投资项目储备库，分析研究建设时序，承担重大建议、重点项目咨询工作；承担投资项目的建议书、可行性研究报告、项目核准及资金申请报告的编制和评估，承担建设过程的初步设计、概算调整评估和竣工项目评价；参与产业投资、项目融资和招商引资的策划论证；具备工程项目招投标代理、安全评价、节能评估和工程监理等咨询服务能力；为政府和社会各界投资者提供建设投资领域其他工程咨询技术服务。



关于世界资源研究所

WRI关注环境与社会经济发展的相互关系。我们不只是研究，而且把想法转化为行动，与全世界的政府、企业和民间组织合作，制定改革性的解决方案，保护地球，改善人民生活。

对于紧急的可持续性挑战的解决方案

WRI采用改革性的思路，保护地球，促进发展，推进社会平等，因为只有实现可持续性，才能满足人类当今的需要，达成人类未来的理想。

实用的变革战略

WRI采用实用的变革战略和有效的变革工具，促进变革进程。我们衡量成功与否的方式是，是否制定了新政策，采用了新产品，采取了新措施，改变了政府的工作方式、企业的运营方式和人们的行为方式。

全球行动

我们的活动遍及全球，因为当今的问题没有边界。我们渴望交流，因为世界各地的人们均需要思想的激发，知识的启迪，通过相互了解，积极做出改变。我们通过准确的、公平的、独立的工作，为地球可持续发展提供了创新性的路径。

出资方



Foreign &
Commonwealth
Office

世界资源研究所（WRI）出版物，皆为针对公众关注问题而开展的适时性学术性研究。
世界资源研究所承担筛选研究课题的责任，并负责保证作者及相关人员的研究自由，同时积极征求和回应咨询团队及评审专家的指导意见。若无特别声明，出版物中陈述观点的解释权及研究成果均由其作者专属所有。



世界资源研究所
WORLD RESOURCES INSTITUTE

中国办公室
北京市东城区东中街9号
东环广场写字楼A座7层K-M室
邮编：100027
电话：+86 10 6416 5697
传真：+86 10 6416 7567
WWW.WRI.ORG.CN