

气候变化下珠江三角洲水问题及其应对与 治理措施

(工作包五)

目 录

1. 珠江三角洲概况	1
1.1 社会经济	1
1.2 自然地理	2
1.2.1 珠江流域概况	2
1.2.2 珠江三角洲水系	4
1.2.3 水文	8
2. 珠江三角洲面临的问题与挑战	13
2.1 气候变化	13
2.1.1 珠江流域气温变化	14
2.1.2 珠江流域降水变化	15
2.1.3 气候变化对珠江三角洲水资源的影响	16
2.2 海平面上升	18
2.2.1 全球海平面变化	18
2.2.2 珠江三角洲海平面上升的观测事实及预测	20
2.2.3 海平面上升对珠江三角洲的影响	20
2.3 人类活动加剧	26
2.3.1 围垦与涉水工程建设	26
2.3.2 城市化	30
2.3.3 人类活动对珠江三角洲的影响	30
2.4 小结	35
3. 珠江三角洲咸潮上溯及其应对措施	37
3.1 现有成果	37
3.1.1 咸潮上溯规律与机理的基础研究	37
3.1.2 咸潮实时监测与预警预报	52
3.1.3 抑咸措施	54
3.1.4 相关规划与政策、法规	73
3.2 珠江三角洲咸潮问题面临的严峻形势	75
3.2.1 珠江三角洲的咸潮变化正朝不利方向发展	75
3.2.2 珠江三角洲的现有抑咸对策仍然存在不足	76
3.2.3 抑咸水量调度相关管理机制和法律、法规不完善	76
3.3 珠江三角洲咸潮问题未来的应对措施	79
4. 珠江三角洲洪涝灾害的应对与治理措施	83
4.1 珠江三角洲洪涝灾害概况	83
4.2 面临的主要问题	85
4.3 措施及建议	87
5. 珠江三角洲水污染的应对与治理措施	89
5.1 珠江三角洲水污染状况及污染源	89
5.1.1 水污染的现状情况	89
5.1.2 污染源	90
5.2 珠江三角洲水污染问题的治理措施	91

5.2.1 提升科技支撑力度	91
5.2.2 完善管理监控措施	92
5.2.3 加速工程措施建设	93

1. 珠江三角洲概况

1.1 社会经济

珠江三角洲和河口地区涵盖粤、港、澳三地，城镇化率高，是我国人口和产业最为集中的地区，社会、经济和政治地位都十分重要。

广东省地处华南，面朝南海，自古以来就是我国对外贸易的重要通商口岸。近 30 多年来，作为我国改革开放的前沿阵地，经济、社会发展迅猛，在全国经济社会发展和改革开放大局中具有突出的带动作用 and 举足轻重的战略地位。以广州、深圳、佛山、东莞、中山、珠海、惠州、江门、肇庆 9 个城市为代表的珠江三角洲核心地区形成了我国大陆重要的城市圈，其经济总量之大、人口密度之稠密堪称中国之最。据 2011 年统计资料，该地区 9 市 GDP 总和为 43966.15 亿元，占广东省 GDP 的 83.47%，占全国 GDP 的 9.32%，人均 GDP 达 84563 元；全国副省级、地级城市的 GDP 排名中，珠江三角洲的广州（12303.12 亿元）和深圳（11502.06 亿元）分别位列第 3 位和第 4 位。2012 年末，珠江三角洲地区常住人口约为 5616.39 万，占全省的 53.71%，而其土地面积为 24437 平方公里，不到广东省面积的 14%，人口高度集中。

香港（Hong Kong）全称中华人民共和国香港特别行政区，地处珠江河口以东，与广东省深圳市隔深圳河相望，素有“东方之珠”的美誉，是全球闻名遐迩的国际大都市，是仅次于伦敦和纽约的全球第三大金融中心，与美国纽约、英国伦敦并称“纽伦港”。据统计资料，人口约 713 万（2012 年），总面积 1070 平方公里，是全球人口最密集的地区之一；2011 年香港地区生产总值为 18909.39 亿港元，地区人均 GDP 为 34457 美元。

澳门（Macau），全称中华人民共和国澳门特别行政区，北邻广东珠海，西与珠海市的湾仔和横琴对望，东与香港隔海相望，相距 60 公里。澳门人口密度为 1.89 万人/平方公里（2011 年 04 月，全国第六次人口普查数据），在世界国家和地区排名第一；人均 GDP：74228.5 美元（2012 年），排名世界第五位。

1.2 自然地理

1.2.1 珠江流域概况

珠江流域是西江、北江、东江和珠江三角洲诸河四个水系的总称，流域面积 45.37 万 km^2 ，其中我国境内 44.21 万 km^2 ，珠江流域水系分布详见图 1.2-1。

西江，发源于云南省曲靖市的马雄山东麓，自源头至思贤滘全长 2075km，平均坡降 0.58‰，集水面积 35.31 万 km^2 ，占珠江流域面积的 77.83%，其中广东省境内 1.80 万 km^2 。干流各河段自上而下依次有南盘江、红水河、黔江、浔江和西江，沿途接纳的主要支流有北盘江、柳江、郁江、桂江和贺江等。

北江发源于江西省信丰县石碣，上游称浈江，至广东省韶关市与武江汇合后始称北江。干流思贤滘以上河长 468km，平均坡降 0.26‰，集水面积 4.67 万 km^2 ，占珠江流域面积的 10.30%，其中广东省境内 4.29 万 km^2 。较大的支流有武江、潯江、连江、绥江等。

东江发源于江西省寻乌县的桎髻钵，上游称寻乌水，至广东省龙川县汇贝岭水后称东江，沿途接纳的主要支流有贝岭水、新丰江、秋香江、西枝江等。干流石龙以上河道长 520km，平均坡降 0.39‰，集水面积 2.70 万 km^2 ，占珠江流域面积的 5.96%，其中广东省境内 2.35 万 km^2 。

西、北江在广东三水思贤滘处沟通后汇入珠江三角洲，东江在广东东莞石龙汇入珠江三角洲。

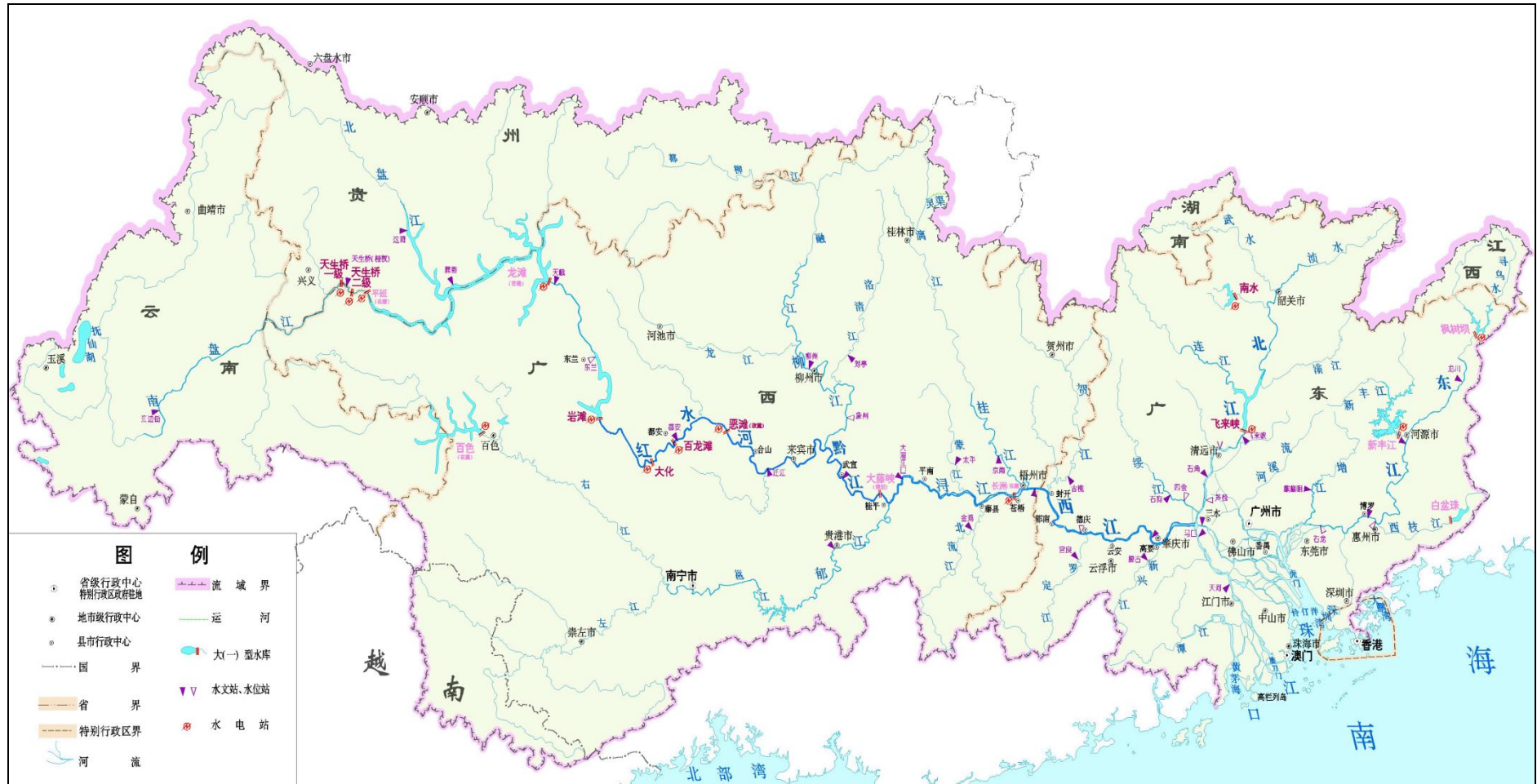


图 1.2- 1 珠江流域水系图

1.2.2 珠江三角洲水系

珠江三角洲是复合三角洲，由西、北江思贤滘以下，东江石龙以下河网水系和入注三角洲诸河组成，集水面积 2.68 万 km^2 ，占珠江流域面积的 5.91%，其中河网区面积 9750 km^2 。此外，入注珠江三角洲的中小河流主要有潭江、流溪河、增江、沙河、高明河、深圳河等。

珠江河口前缘东起九龙半岛九龙城，西到赤溪半岛鹅头颈，大陆岸线长 450 多 km。河口由八大口门组成，东面四口门自东而西是虎门、蕉门、洪奇门和横门，同注入伶仃洋；西四口门自东而西为磨刀门、鸡啼门、虎跳门和崖门，其中磨刀门直接入注南海，鸡啼门注入三灶岛与高栏岛之间的水域，虎跳门和崖门注入黄茅海河口湾。八大口门动力特性不尽相同，泄洪纳潮情况不一，中部的磨刀门为西江的主要泄洪口门，泄洪输沙量最大，而东部虎门的潮汐吞吐量则占首位。两侧的虎门和崖门以潮汐作用为主，其他口门径流动力较强，详见图 1.2-2。

珠江三角洲水系具有“三江汇流、网河密布、八口入海、整体互动”的特点，被认为是世界上水系结构、动力特性、人类活动最复杂的河口水系之一，具有如下特点：

(1) 水系结构复杂、口门形态独特

珠江流域的西江、北江和东江汇入珠江三角洲后，在思贤窖以下形成西北江三角洲，在石龙以下形成东江三角洲。经过长期的历史演变，珠江三角洲河网密布，其中西北江三角洲主要水道近百条，总长约 1600km，河网密度为 0.81 km/km^2 ，东江三角洲主要水道 5 条，总长约 138km，河网密度达到 0.88 km/km^2 。除此之外，河道多级分叉，形成三角洲如织的河网体系，水系结构十分复杂。

珠江经虎门、蕉门、洪奇门、横门、磨刀门、鸡啼门、虎跳门和崖门八大口门汇入南海。珠江三角洲前沿发育了以径流动力作用为主的磨刀门口门，以潮汐动力为主的伶仃洋河口湾和黄茅海河口湾；形成了潮优型河口与河优型河口相互依存、耦合共生、形态独特的复杂型河口。

(2) 河口动力过程复杂

珠江河口动力过程的影响因素众多，其复杂性主要表现在：①动力要素复杂：受上游径流、海外潮流、风、浪、咸淡水混合等因素影响，动力要素十分复杂。

②上游来水来沙变化复杂：受全球气候变化及西、北、东三江上游工程控制及人类活动等影响，上游来水来沙变化复杂。③河网分流分沙复杂：河口河网密布，水流相互贯通、相互影响，呈“牵一发而动全身”之势，河网间分流分沙情况极其复杂。④河口演变过程复杂：八大口门分属不同水系，动力条件差异较大，潮优型河口与河优型河口相互依存、耦合共生，致使河口演变过程复杂。⑤西、北、东三江径流、洪水组合变化复杂：三江汇入三角洲后，径流组合变化多样，洪水相互遭遇复杂。⑥河口洪潮遭遇复杂：河口潮流受天文潮、气象等影响，经常出现天文大潮与上游大洪水“二碰头”，甚至可能出现天文大潮、大洪水与风暴潮“三碰头”现象，致使河口洪潮遭遇更加复杂。⑦近岸海流体系复杂：珠江口外大洋海流、风成漂流、气压梯度流、水层温差流、盐度差引起的密度梯度流、波浪破碎形成的波浪流以及局部地区的补偿流等，使得近岸海流体系复杂。上述珠江河口动力过程的复杂性，使得其伴生的河口泥沙运动、咸潮运动、水环境与水生生态演变过程亦十分复杂。

表 1.2-1 国内外潮汐河口水沙潮及形态比较表

河名	多年平均流量(m ³ /s)	河水年平均含沙量(kg/m ³)	口门平均潮差(m)	河口类型	河口平面形态
湄公河	15060	1.23	3~3.5	“辫”状三角洲	“辫”状
密西西比河	18410	0.538	0.40	有拦门沙的摆动三角洲河口	鸟趾状
泰晤士河	60	0.08	4.2	具有纵向沙坎的喇叭形河口湾	喇叭形
莱茵河	2200	0.04	1.5	三角洲河口湾	少汊型
多瑙河	6430	0.34		扇形三角洲河口	汊型
塞纳河	500	0.08	5.54	具有纵向沙坎的强潮喇叭形河口湾	喇叭形
长江	29600	0.455	2.88	有拦门沙的少汊三角洲河口	少汊型
黄河	1774.5	25.44	1.02	有拦门沙的摆动三角洲河口	单股河道
钱塘江	952	0.176	5.58	具有纵向沙坎的喇叭形河口湾；强潮海相河口	单一河口喇叭形
辽河	201	3.14	2.68	有拦门沙的少汊三角洲河口	顺直型
海河	244	1.06	2.15	有拦门沙的少汊三角洲河口	弯曲线型
闽江	1779	0.1	4.10	有拦门沙的山区过渡型河口	江心洲型
韩江	780	0.29	1.06	有拦门沙的网状三角洲	网状

				河口	
甬江	90.7	0.126	1.77	有拦门沙的弯曲过渡型河口	弯曲型
珠江	8910	0.29	1.05	有拦门沙的网状三角洲河口	网状

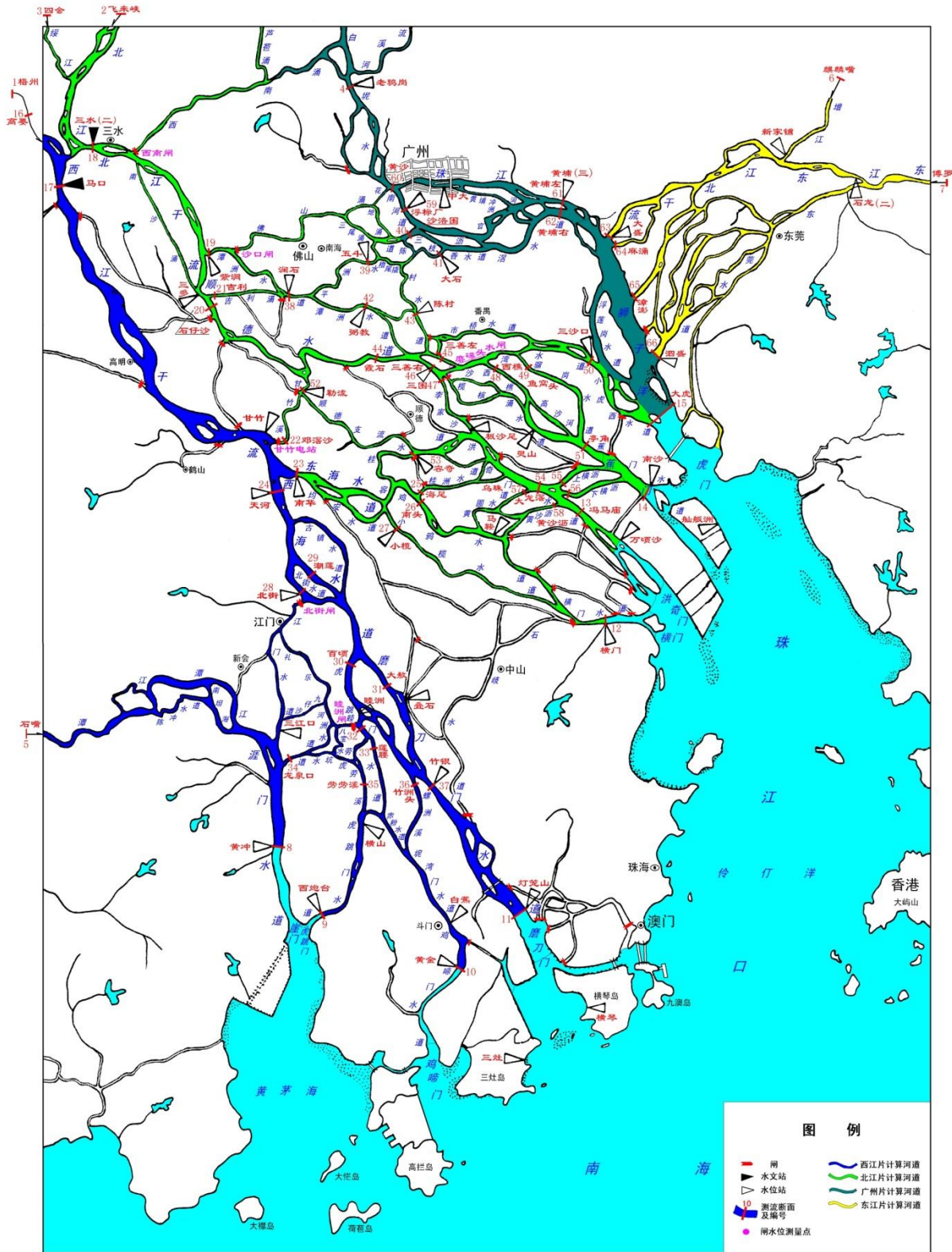


图 1.2-2 珠江河口区水系分布图

1.2.3 水文

(一) 降雨

珠江河口区域气候温和多雨，多年平均降雨量 1771mm，降雨量集中在 3~9 月，汛期的雨量占全年雨量的 70%~80%，且暴雨强度很大。降雨量分布明显呈由东向西逐步减少，降雨年内分配不均，地区分布差异和年际变化大。

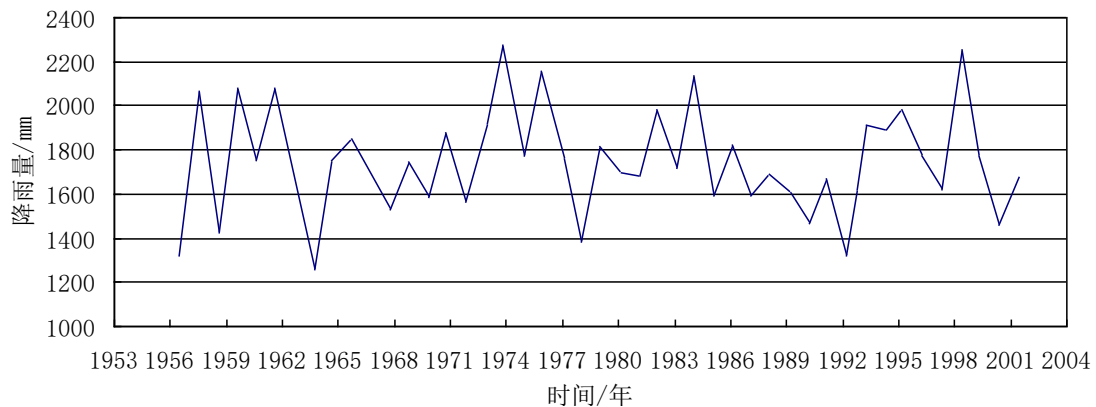


图 1.2-3 珠江河口区 1956 年至 2002 年间的年降雨过程图

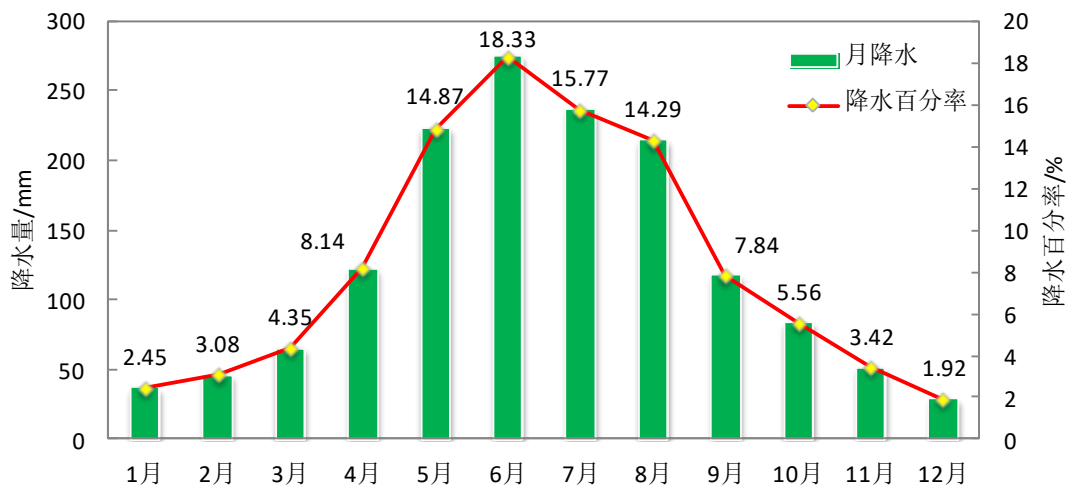


图 1.2-4 珠江流域降水年内分配特征

在河口区范围内，各地各月平均降水量列于表 1.2-1。多年平均年降水量在 1600~2100mm 之间，各地降水量略有差别，一般是滨海地区降水量略大于距滨海较远地区。4~9 月为雨水集中期，亦即汛期，其降水量占全年降水量的 81%~85%，7~9 月为台风暴雨期，并有雷暴。全年降水天数为 145~151d，降水天数约占全年 40%，降水天数较多，其中大于 150mm/d 的暴雨天数为 0.3~0.6d。年

总雨量最大为 2250~2850mm，最小为 1000mm 左右。一次连续最大降雨量为 403.6mm，历时为 44h40min（顺德县站 1965 年 9 月 27~29 日）。24h 最大降雨量的典型为 1979 年 9 月 23~24 日，整个三角洲降雨量在 300mm 左右。

表 1.2-1 各月平均降水量表 (单位: mm)

月份 站名	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	全年 平均	纪录 年代
三水	42.7	65.6	98.0	157.4	263.6	295.8	206.3	225.8	203.3	59.5	41.3	18.3	1677.6 (1687)	57-70 (57-97)
广州	39.1	62.5	91.5	158.5	267.2	299.0	219.6	225.3	204.4	52.0	41.9	19.6	1680.5 (1620)	51-70 (51-97)
番禺	38.5	58.3	74.4	181.3	253.7	249.9	226.8	222.6	180.0	77.1	41.1	27.2	1030.9	60-84
顺德	33.1	56.1	69.4	165.9	241.1	275.1	197.9	295.3	216.2	49.6	42.7	14.9	1657.3	59-70
东莞	31.3	43.6	60.8	189.3	275.4	308.6	236.0	279.7	219.2	86.3	30.1	29.3	1789.9	
深圳	28.4	45.2	57.4	133.2	241.6	337.9	318.5	347.1	262.7	97.6	32.3	25.0	1926.7 (1763)	(56-97)
中山	32.7	57.1	60.2	140.1	247.5	301.7	220.1	241.9	218.8	54.3	42.1	17.3	1633.7 (1785)	55-70 (55-98)
新会	32.1	43.9	59.9	159.4	253.4	300.5	214.3	272.5	261.6	88.1	34.8	21.4	1714.9	
珠海	26.2	49.2	57.9	126.3	191.7	399.7	252.4	298.0	278.1	91.9	27.0	17.0	1825.3 (2042.0)	61.70 (61-99)
上川	26.2	53.7	81.4	152.7	256.4	343.5	257.1	315.2	320.2	176.8	35.1	14.6	2032.8	58-70

(二) 径流

珠江流域每年 4 月进入汛期，降水量集中在 4-10 月份。珠江流域内的西江、北江和东江流域径流年内分布略有差异。西江来水量主要集中在 5-9 月，占西江流域全年的 72.1%；枯季集中在 10 至次年 3 月，占西江流域全年的 23.5%。北江汛期较西江早，石角站来水量主要集中在 4-9 月，占北江流域全年的 76.0%；枯季集中在 10 至次年 3 月，占北江流域全年的 21.2%。东江博罗站来水量也集中在 4-9 月，占东江流域全年的 70.3%；枯季集中在 10 至次年 3 月，占北江流域全年的 25.8%。

北江流域以 4、5、6 月共 3 个月的来水量最为集中，占全年的 47.9%，6 月是全年水量月分配的高峰值，为 18.2%；东江流域和西江流域均以 6、7 和 8 月共 3 个月的来水量最为集中，分别占全年的 40.0% 和 50.9%，东江在 6 月份达全年月分配之峰值达 16%，西江则以 7 月份达全年的峰值为 18.7%。由此可见，汛

期最大来水量的 3 个月以西江的来水最为集中,北江次之,东江的集中程度最低。西北江下游进入三角洲网河区后,汛期来水量在各月分配较西北江干流相对均匀和相对平缓,峰态趋于偏平;西江马口站 4 月份的来水分配值比干流的高要站大,是由于北江较早进入汛期,北江水位较西江水位高,致使北江来水经思贤滘向西江分水的结果。

西江高要、马口站最枯月出现在 1 月份,北江石角则出现在 12 月,而三水站与西江类似出现在 1 月份,与枯水期西江水过思贤滘有关。三水、马口及思贤滘 1961~2005 年共 45 年实测枯季逐日流量数据表明,马口、三水、思贤滘平均枯季流量多年变化均呈现不同程度的递增趋势,三水站增长趋势最明显,马口站增长最不明显,思贤滘则因综合了两者变化。

表 2.1-2 为马口、三水、博罗站多年平均各月流量分配统计表,由表可见,上游径流主要集中于洪水期,4~9 月马口、三水、博罗站的径流量分别约占全年的 77%、85%及 71%。

表 1.2-2 各站径流年内分配表 单位: 分配比 (%)

测站	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	多年平均
马口	2.73	2.88	3.80	7.04	11.98	16.91	16.58	14.37	9.90	6.08	4.64	3.09	100
三水	1.55	1.77	2.83	6.46	12.35	20.46	19.96	15.79	9.62	4.37	3.09	1.76	100
博罗	3.97	4.23	5.29	8.03	11.16	17.73	12.10	12.02	10.43	6.23	4.65	4.16	100

图 1.2-5 是西江马口、北江三水、东江博罗站年径流过程线,根据各年径流资料统计,马口站丰枯比为 2.62,三水站丰枯比为 9.86,博罗站丰枯比为 4.62。

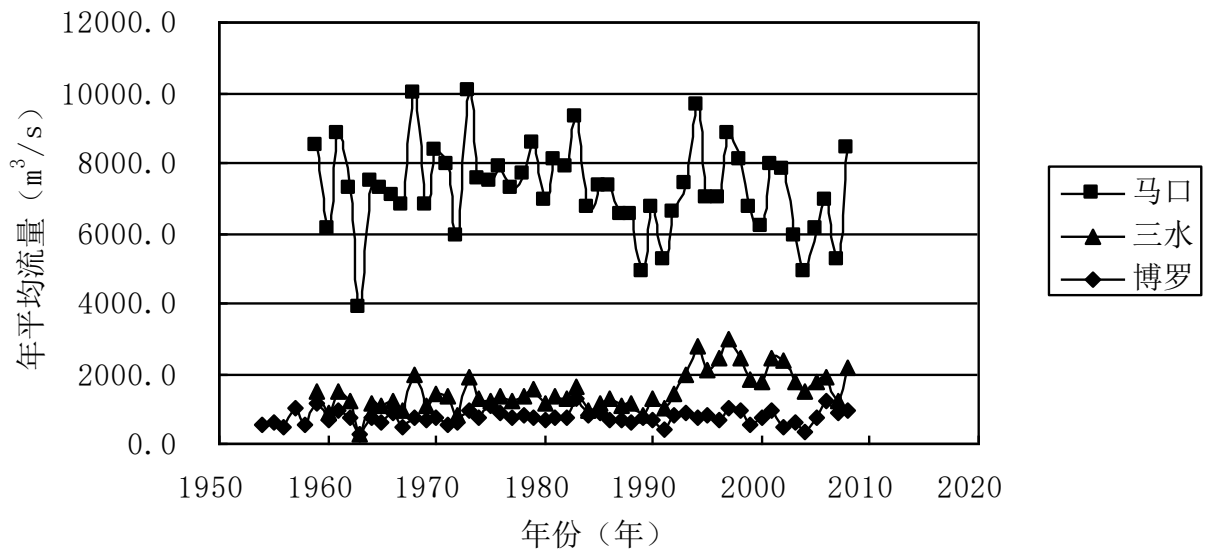


图 1.2-5 马口、三水、博罗站年径流过程线

珠江八大口门多年平均径流量为 3260 亿 m^3 ，各口门的径流量所占的分配比见表 1.2-3 所示。

表 1.2-3 八大口门径流量分配比的变化 单位：径流量（亿 m^3 ）；分配比（%）

口门 年代		东四口门					西四口门				
		虎门	蕉门	洪奇门	横门	小计	磨刀门	鸡啼门	虎跳门	崖门	小计
60~70 年代		16.0	17.1	15.9	12.4	61.4	24.7	4.7	3.6	5.6	38.6
80 年代	径流量	603	565	209	365	1742	923	197	202	196	1518
	分配比	18.5	17.3	6.4	11.2	53.4	28.3	6.1	6.2	6.0	46.6
90 年代		25.1	12.6	11.3	14.5	63.5	24.9	2.8	3.9	4.7	36.5

2006 年以来，西江枯季径流量交替变化，2006~2007 年枯季西江径流频率为 70%，2007~2008 年枯季为 90%，2008~2009 年枯季西江径流频率为 50%，2009~2010 年枯季为 97%，2009~2010 年枯季为 75%。北江和东江枯季径流也出现类似变化。

（三）潮汐

珠江河口的潮汐为不正规半日混合潮型，一天中有两涨两落，半个月中有大潮汛和小潮汛，历时各三天。在一年中夏潮大于冬潮，最高、最低潮位分别出现在春分和秋分前后，且潮差最大，夏至、冬至潮差最小。因受汛期洪水和风暴潮

的影响，最高潮位一般出现在 6~9 月，最低潮位一般出现在 12~2 月。

珠江八大口门平均潮差在 0.85~1.62m 之间，属于弱潮河口，其中以虎门的潮差最大，黄埔最大涨潮差达到 3.38m。磨刀门、横门、洪奇门、蕉门等径流较强的河道型河口，潮差自口门向上游呈递减趋势，而伶仃洋、黄茅海河口湾，自湾口至湾顶潮差沿程增加，赤湾多年平均涨潮差为 1.38m，到黄埔达到 1.62m。

根据近 20 年资料计算分析，八大口门多年平均山潮比为：虎门 0.38、蕉门 1.79、洪奇门 2.51、横门 3.68、磨刀门 6.22、鸡啼门 1.72、虎跳门 3.43、崖门 0.24。

口门外的赤湾、三灶、荷苞岛站涨、落潮历时几乎相等，潮水过程呈对称型。口门以内，无论洪季还是枯季，落潮历时均大于涨潮历时，越往上游此现象越明显。枯季涨潮历时较洪季长。

2. 珠江三角洲面临的问题与挑战

在全球变化中，气候变暖和海平面上升对人类社会影响最为严重。目前世界上半以上的人口生活在距海 50 公里以内的海岸地区，海岸地区平均人口密度较内陆高出 10 倍。研究表明如果今后一个世纪海平面上升 1m，直接受影响的土地将有 500 万平方公里、人口约 10 亿、耕地约占世界的三分之一。

随着经济、社会的发展，珠江三角洲地区工农业生产和生活用水量进一步增加。1980 年到 2008 年珠江三角洲城镇用水量增长了 10 倍以上，达到 193.59 亿 m^3 /年；据预测，到 2020 年珠江三角洲地区的总用水量将会达到 590 亿 m^3 ，到 2030 年将会达到 960 亿 m^3 。在人类活动影响加剧、全球气候变化和海平面上升的大背景下，珠江河口及三角洲地区淡水资源的供需矛盾日益凸显，防洪、排涝和供水安全正面临严峻挑战。

2.1 气候变化

2013 年 9 月 27 日，在瑞典首都斯德哥尔摩，联合国政府间气候变化专门委员会第一工作组第五次评估报告《Climate Change 2013: The Physical Science Basis》决策者摘要（Summary for Policy makers, SPM）发布，随后于 9 月 30 日公布了报告全文。报告指出，全球气候系统变暖的事实是毋庸置疑的，自 1950 年以来，气候系统观测到的许多变化是过去几十年甚至近千年以来史无前例的。1880~2012 年全球平均温度已升高 $0.85^{\circ}C$ [$0.65\sim 1.06^{\circ}C$]；过去 30 年，每 10 年地表温度的增暖幅度高于 1850 年以来的任何时期。在北半球，1983~2012 年可能是最近 1400 年来气温最高的 30 年。特别是 1971~2010 年间海洋变暖所吸收热量占地球气候系统热能储量的 90% 以上，海洋上层（0~700m）已经变暖。与此同时，1979~2012 年北极海冰面积每 10 年以 3.5%~4.1% 的速度减少；自 20 世纪 80 年代初以来，大多数地区多年冻土层的温度已升高。全球几乎所有地区都经历了升温过程，变暖体现在地球表面气温和海洋温度的上升、海平面的上升、格陵兰和南极冰盖消融和冰川退缩、极端气候事件频率的增加等方面，对水系统的循环过程直接产生影响。根据报告的预估，在 21 世纪，全球水循环响应气候变暖的变化将不是均匀的，有可能出现区域异常情况，但潮湿和干旱地区之间、

雨季与旱季之间的降水对比度会更强烈，极端降水事件将很可能更剧烈并更频繁。

2.1.1 珠江流域气温变化

统计珠江流域范围内 40 个气象站的年平均气温的平均值，将其作为该流域的年平均气温（1954~2008 年），其线性变化趋势如图 2.1-1 所示。由图可见，珠江流域年平均气温 55 年来增长了 0.45℃，增长率为 0.08℃/10a，总体呈增加趋势，这也与全球气候变暖的大背景相一致。

在 $\alpha = 0.5$ （95%的置信区间）下，对珠江流域范围内 40 个气象站及流域年平均气温(1954~2008 年)作 MK 检验分析，年平均气温变化显著性趋势如图 2.1-2 所示。由图可知，40 个气象站中，年平均气温呈上升趋势的站有 37 个，呈下降趋势的有 3 个，流域年平均气温总体呈上升趋势。其中，有 26 个站的年平均气温上升趋势显著，其它站呈现不显著的增加或减少趋势，气温上升趋势显著的区域主要集中在西江下游和北江流域。

另外，根据《华南区域气候变化评估报告决策者摘要及执行摘要》，在地域上，珠江三角洲地区和华南东部沿海是我国华南的主要升温区域，升温速率在 0.3℃/10 年以上；从季节分布来看，冬季平均气温的上升趋势最为明显，升温率达到 0.27℃/10 年。

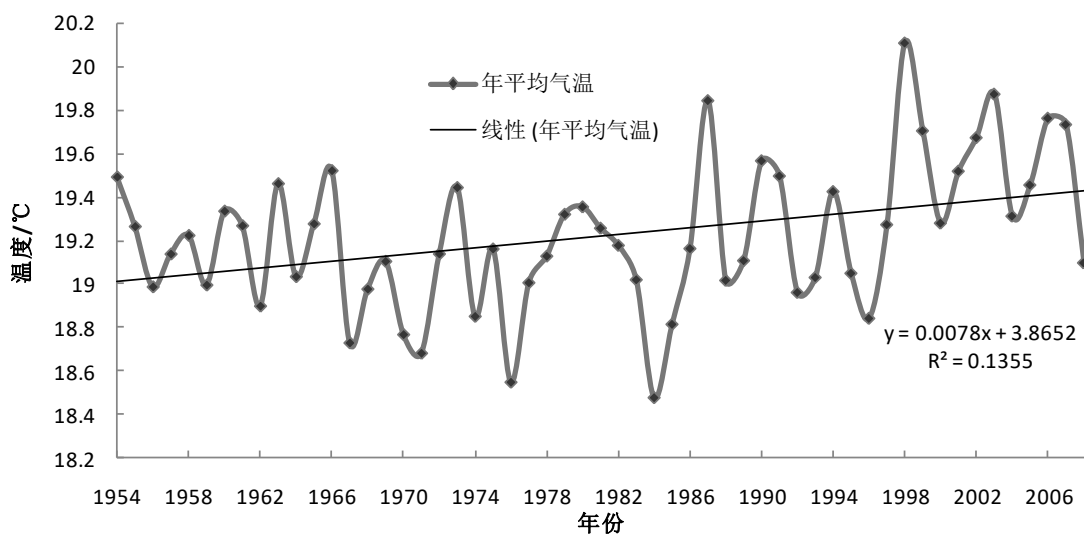


图 2.1-1 珠江流域 1954~2008 年年平均气温线性变化趋势

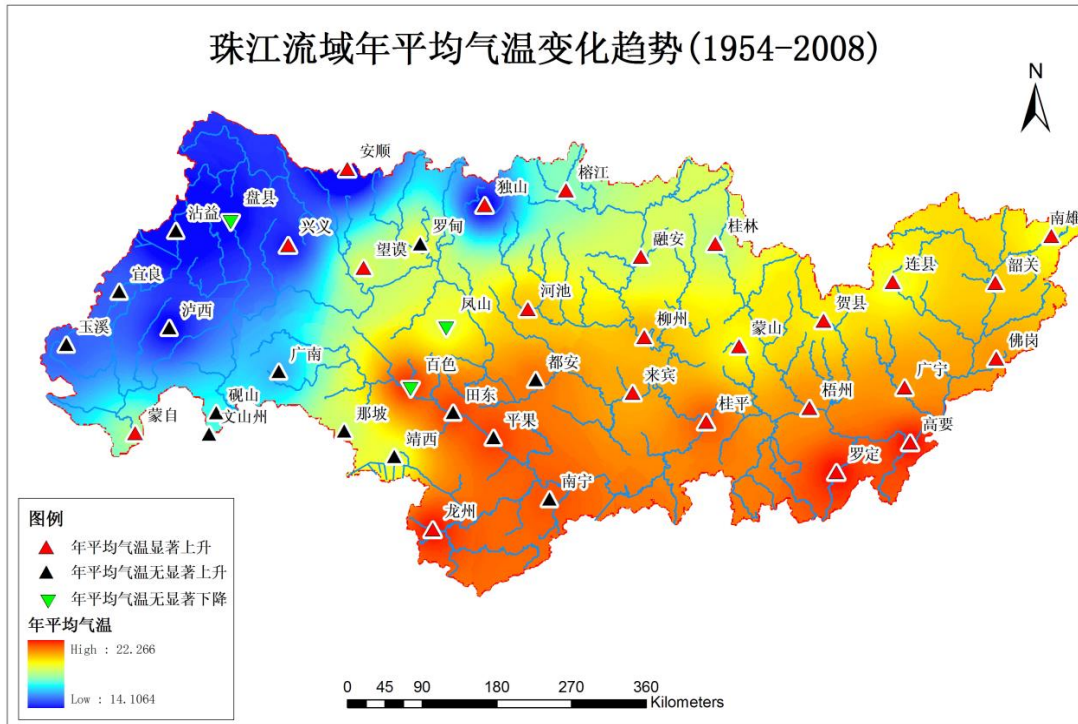


图 2.1-2 珠江流域 1954~2008 年平均气温变化趋势

2.1.2 珠江流域降水变化

取珠江流域范围内 40 个气象站的年降水量的平均值作为该流域的年降水量 (1954~2008 年), 其线性变化趋势如图 2.1-3 所示。由图可见, 珠江流域年降水量线性回归趋势线斜率为 0.52, 表明流域 55 年降雨量呈增加趋势, 增加率为 2.67mm/10a。

在 $\alpha = 0.5$ (95%的置信区间) 下, 对珠江流域范围内 40 个气象站及流域年降水量(1954~2008 年)作 MK 检验分析, 年降水量变化显著性趋势如图 2.1-4 所示。由图可知, 珠江流域年降水主要分布在柳江、郁江、西江下游和北江, 西部降水最少。流域 40 个气象站中, 年降水量呈增加趋势的有 26 个, 呈减少趋势的有 13 个, 无变化的有 1 个, 流域年降水量总体呈增加趋势。其中, 百色站年降水增加趋势显著, 南宁站减少趋势显著, 其它站表现为不显著的增加或减少趋势。

另外, 根据年降水量的周期性分析, 20 世纪 80 年代前期流域降水变幅非常微小, 之后变幅不断加大, 说明流域降雨发生了较大的变化, 丰枯变化频繁, 极端降雨事件发生的概率增加。

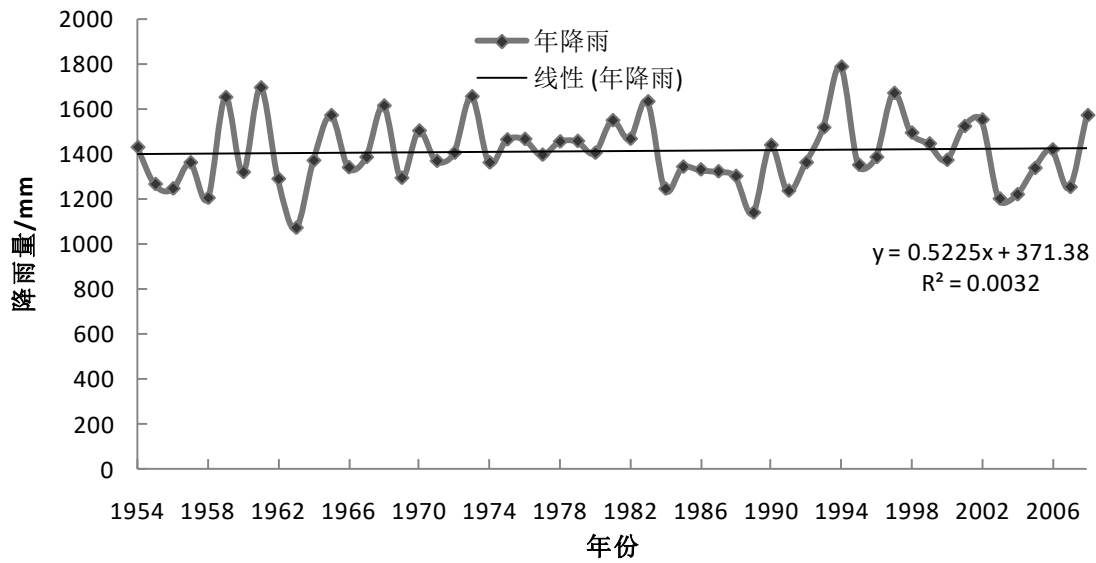


图 2.1-3 珠江流域 1954~2008 年年降水线性变化趋势

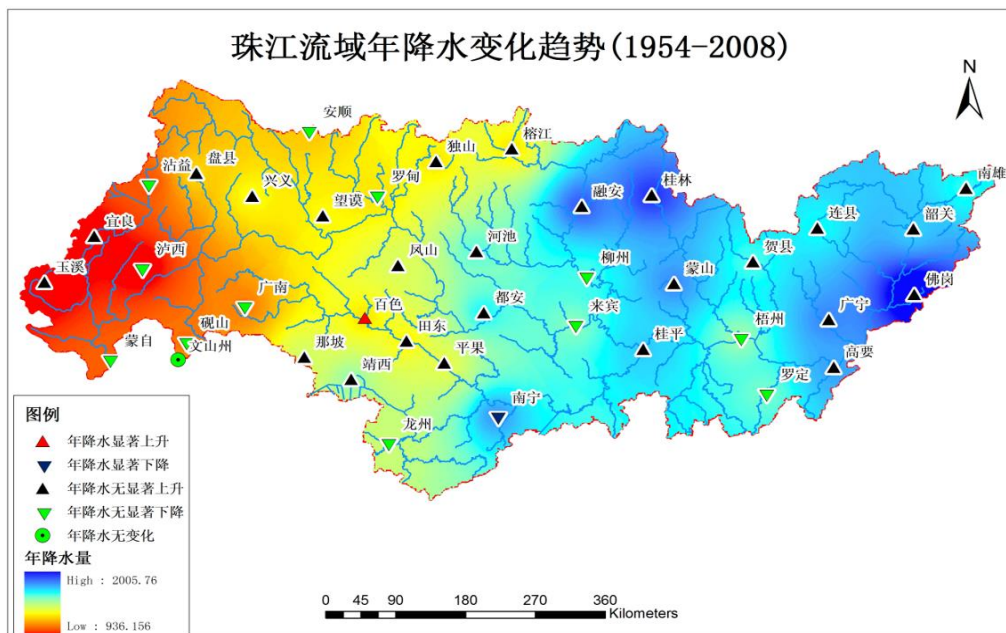


图 2.1-4 珠江流域 1954~2008 年降水变化趋势

2.1.3 气候变化对珠江三角洲水资源的影响

(一) 观测到的气候变化对水资源数量的影响

气候变化对珠江流域的水资源产生了可以辨识的影响。1980 年以来，珠江流域年降水没有明显增加或减少的趋势，水面蒸发和潜在蒸散均显著变小，珠江流域径流总量呈增加态势。自 1990 年年代以来，流域各代表站降雨集中指数呈略

微增大趋势，这说明各区域降雨的年内分配不均匀性逐年增强。

1956~2008年，珠江流域年径流量呈波动变化且略微上升趋势，西江、北江和东江上升速率分别为4.89亿m³/10年、4.43亿m³/10年和2.0亿m³/10年。近53年来，各流域年径流量变化和极值情况见表2.1-1。可以看出：各流域最大年径流量较常年偏多59.7%~71.7%，最小径流量较常年偏少51.8%~73.2%。

表 2.1-1 珠江流域年径流量变化和极值情况

流域	径流变化 (亿 m ³ /a 年)	最大			最小			最大/ 最小
		径流量 (亿 m ³ 年)	与常 年比	出现 年份	径流量 (亿 m ³ 年)	与常 年比	出现 年份	
西江	4.9	238.9	+59.7%	1983	72.1	-51.8%	1963	3.3
北江	4.4	824.8	+71.7%	1973	215.2	-55.2%	1963	3.8
东江	2.0	414.1	+70.0%	1983	65.2	-73.2%	1963	6.3

(二) 观测到的气候变化对水资源质量的影响

珠江口有八大入海口门，每年进潮量很大，在枯季潮水能深入到广州一带，使珠江的部分区域水氯度超过规定的含氯度及灌溉用水氯度，从而出现咸潮。珠江口的咸潮一般于11月出现，至次年4月初结束。据初步统计，珠江口常年受咸水影响的土地棉结为4.6×10⁴ hm²左右。受气候变暖、降水不均、流域干旱等因素的影响，广东沿岸，特别是珠江三角洲地区咸潮活动越来越频繁、持续时间增加、上溯影响范围越来越大、强度趋于严重。

自1989年冬季以来，珠三角地区有9个冬季出现咸潮，咸潮上溯比常年增加10~15km，咸潮出现时间较常年早15~20d。近20年来，珠三角地区曾发生过5次严重咸潮，其中三次发生在2003、2004、2005年。2003年秋，珠江三角洲发生强咸潮入侵，广州市沙湾水厂氯化物含量高达1225 mg/L（饮用水上限为250 mg/L），中山市东、西两大主力水厂同时受到侵袭，氯化物含量达3500 mg/L，不得不采取低压供水措施，中山部分地区供水中断近18个小时。2004年秋，大旱导致海水倒灌，咸潮持续超过5个月。珠海广昌泵站9月中旬即出现咸潮，比常年提早1个多月，氯化物含量达7500 mg/L。中山市有3个自来水管厂的取水口的咸度分别达到3300 mg/L、4100 mg/L 和 4569 mg/L，造成中山市城区曾一度

采取低压供水和两次停水。至 2005 年 3 月底，广昌、挂定角取水点仍受咸潮影响。2005—2006 枯水期，珠江三角洲更是发生了历史罕见的强咸潮入侵，广昌泵站连续 38d 全天超标。咸潮严重影响到广州、珠海、中山、东莞、江门以及香港、澳门等地约 1500 万人的用水安全。而且严重影响早稻插秧，广州市番禺区全区早稻面积计划完成 4.33 千 hm^2 ，同比减少 1.4 千 hm^2 ，近 1/3 的稻田无法下插。2005 年、2006 年初，国家防总两次实施珠江压咸补淡应急调水工程，代价高昂。咸潮的影响已经从农业扩大到工业、城市生活、生态环境等，成为威胁珠三角地区用水安全的“心腹大患”。

2.2 海平面上升

海平面可分为绝对海平面和相对海平面。由于海水的物理过程引起的海平面变化被称为绝对海平面变化，其参考系为地球质心或其他星系；而在探讨海平面变化对海岸带的影响时，由于地表的垂向运动而引起的海平面额外变化，是海平面影响的重要部分，因此必须综合考虑这两者的共同影响，这种相对于地表为参考系的海平面称为相对海平面。相对海平面上升主要由三个因素叠加而成，全球性（绝对）海平面上升、区域地壳下沉和地下水抽取或沉积物密实等引起的地面沉降。

受气候变暖和人类活动的影响，全球海平面已经出现前所未有的急剧变化。

2.2.1 全球海平面变化

气候变暖导致的陆源冰融化和海水热膨胀是海平面上升的主要原因。根据验潮仪资料估计，1961~2003 年期间，全球平均海平面上升的平均速度为 1.8 ± 0.5 毫米/年。这一时期平均热膨胀对海平面上升的贡献为 0.42 ± 0.12 毫米/年，同时冰川、冰帽和冰盖的贡献估计为 0.7 ± 0.5 毫米/年。通过 TOPEX/Poseidon 卫星高度计于 1993 年至 2003 年期间测量得到的全球海平面上升平均速度为 3.1 ± 0.7 毫米/年，其中，热膨胀为 1.6 ± 0.5 毫米/年、陆冰变化为 1.2 ± 0.4 毫米/年，都有明显的加剧趋势（IPCC 2007）。

海平面变化的区域变率有所不同，部分区域的上升速度比全球均值高出几倍，同时也存在一些区域的海平面正在下降。自 1992 年以来最大的海平面上升

发生在太平洋西部和印度洋东部，几乎整个大西洋海平面都呈现上升趋势，而太平洋东部海平面和印度洋西部海平面是在下降。观测资料表明自 1975 年以来极端高潮位有所增加。在许多地区，极端值的长期变化与平均海平面的变化相类似。

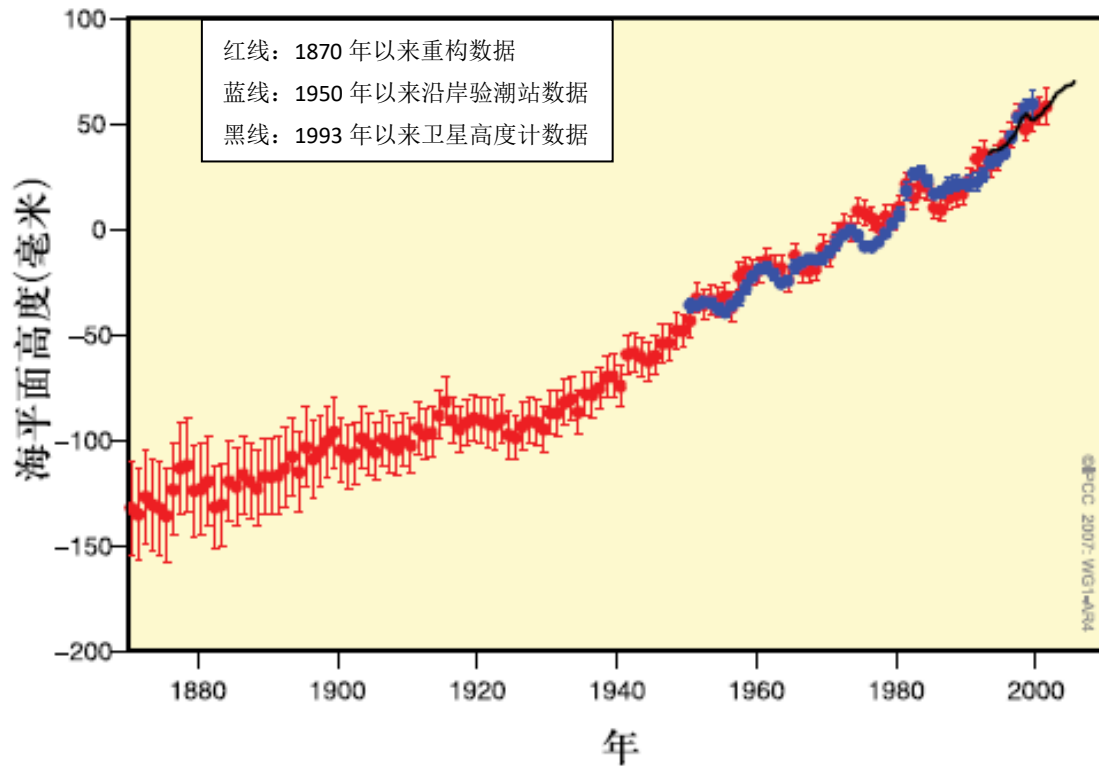


图 2.2-1 全球平均海平面高度变化

IPCC 第四次评估报告根据不同的二氧化碳排放情景对 21 世纪的全球气候变化做出了预估（图 2.2-2）（IPCC 2007）：到 21 世纪末（2090~2099 年）与 1980~1999 年期间相比平均变暖 1.1~6.4 °C，全球平均海平面上升 0.18~0.59m。

情景	温度变化 (与1980-1999相比2090-2099年的情况°C)		海平面上升 (与1980-1999相比2090-2099年的情况m)
	最佳估值	可能性区间	基于模式提供的区间 不包括未来冰流快速动力变化
稳定在2000年的浓度水平 ^b	0.6	0.3-0.9	NA
B1情景	1.8	1.1-2.9	0.18-0.38
A1T情景	2.4	1.4-3.8	0.20-0.45
B2情景	2.4	1.4-3.8	0.20-0.43
A1B情景	2.8	1.7-4.4	0.21-0.48
A2情景	3.4	2.0-5.4	0.23-0.51
A1FI情景	4.0	2.4-6.4	0.26-0.59

注:

^a 这些估值来自于一系列模式的评估, 这些模式包括一个简单气候模式, 几个中等复杂性地球模式 (EMIC) 和多个大气-海洋全球环流模式 (AOGCM)。

^b 稳定在2000年排放水平的值仅从各AOGCM模式反演而来。

图 2.2-2 21 世纪全球气温和海平面变化预估

2.2.2 珠江三角洲海平面上升的观测事实及预测

我国沿海, 尤其是几大三角洲地区, 因人为原因地面沉降严重, 区域性的相对海平面上升速率远大于全球海平面的上升速率。

珠江三角洲的海平面上升是全球海平面上升、地区构造升降和河口水位趋势性抬高等组合的结果。近 30 多年, 珠江三角洲的海平面约上升 80mm (图 2.2-3)。

估计 2030 年、2050 年、2100 年海平面相对于 2000 年分别上升 100~250 mm、200~350 mm 和 300~500mm (中国沿海重点地区海平面上升报告 2009), 由于地质构造升降和水位抬升的不同, 三角洲各个地区海平面上升值也有差异。

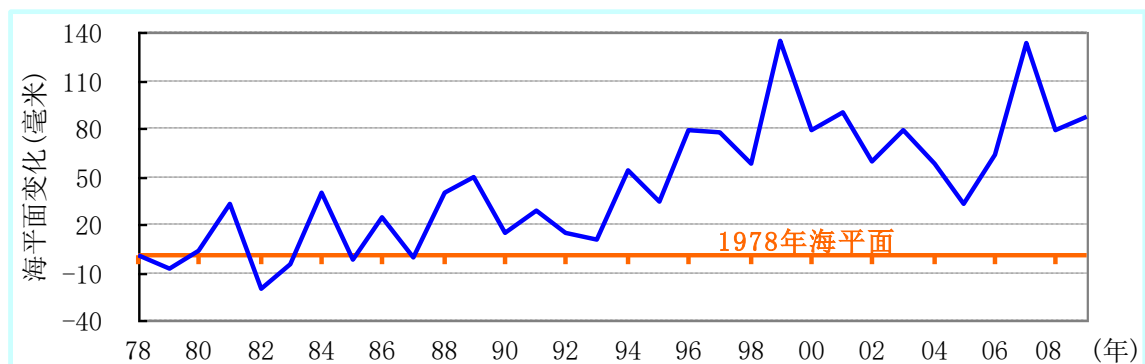


图 2.2-3 珠江三角洲海平面变化

2.2.3 海平面上升对珠江三角洲的影响

海平面上升将会对近海自然环境、生态系统和人类活动产生广泛而深远的影响。

响，未来珠江三角洲受海平面上升的影响主要体现在风暴潮和洪涝灾害风险增大、咸潮上溯加剧、工程设计参数变化、水资源供需矛盾加重、河口生态环境变化等方面。

（一）对风暴潮、洪涝灾害的影响评估

海平面上升对沿岸地区最直接的影响是出现极值高水位时淹没范围扩大。珠江河口毗邻南海，岸线长达 5796.8km，三角洲地区地势低平，根据 1: 10000 地形图测算，珠三角平原高程低于 1.0m（1956 年黄海基准面）的地区为 1470 平方公里，占 23.76%，80%的地区高程在 3.0m 以下，而且地面平均坡降极小，仅为 1 / 5000。在海平面上升的情况下，出现极值水位时将导致陆地大面积受淹，从而增加风暴、洪涝等的致灾风险。

根据相关研究成果，在 2050 年和 2080 年相对海平面上升预测值的假设下，珠江三角洲出现百年一遇极值水位时的可能淹没范围如图 2.2-4 所示。2050 年和 2080 年当出现百年一遇水位时珠江三角洲的可能影响面积分别为 $5.02 \times 10^3 \text{km}^2$ 和 $5.18 \times 10^3 \text{km}^2$ ；2080 年珠江三角洲的可能影响面积比 2050 年多 $0.16 \times 10^3 \text{km}^2$ 。

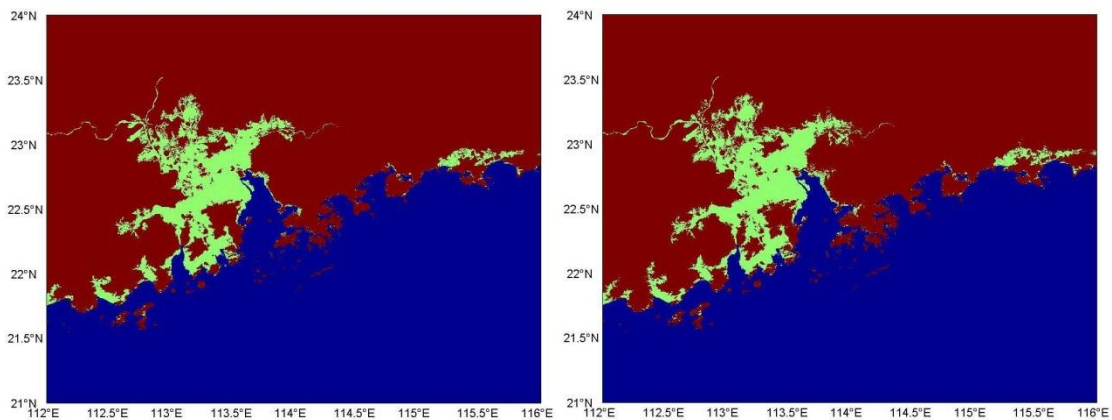


图 2.2-4 珠江三角洲 2050 年（左）和 2080 年（右）出现百年一遇水位时的可能淹没范围

（二）对咸潮上溯的影响评估

珠江三角洲各城镇的供水主要是三角洲江河水源，根据我国现行《生活饮用水水源水质标准》，当河道水体含氯度超过 250mg/L（约相当于 0.5‰含盐度）就不能满足供水水质标准。受各影响因素的综合影响，本世纪以来，珠江三角洲地区有约 1500 多万人的供水安全常受咸潮上溯的威胁，且有愈演愈烈之势，几乎

年年发生，广州、珠海、中山、澳门等地居民的供水安全频频告急，引起国务院和粤、港、澳社会各界的广泛关注。海平面变化是河口咸潮上溯的重要影响因素之一，一旦海平面持续上升，咸潮上溯的频率、范围和距离都将增加，进而对更多人口的供水安全造成更为严重的威胁，对农业灌溉、城镇排水污染，水生生态等影响加重，自然、生态环境将因此受到改变。

根据相关研究成果，珠江河口海平面上升 50cm 后，咸潮入侵的距离将增加 7.4-11.2km，海平面季节变化引起的咸潮入侵距离将增加 3.8km。

（三）对沿海工程设计参数的影响分析

由于近几十年年来广东沿海相对海平面呈上升趋势，因而不少沿海工程已经出现设计基准面偏低而受到海平面上升的威胁。

深圳机场位于珠江口伶仃洋东岸，建有防护堤，堤顶高程为 2.91m（珠基），但是 1991 年 7 月和 1993 年 3 月海水两次漫堤。珠江口大万山岛的一个军用码头，其设计标准为平均海平面以上 1.8m，但是 20 世纪 80 年代有 1/3 的年份，码头在最高潮位时被淹没，大浪把栈桥式码头掀翻。广州市的污水排水口高程标准，20 世纪 50 年代为 1.73m（珠基），80 年代末改为 2.07m，90 年代初提高到 2.50m，近年再提高到 2.75m，但是 90 年代最高水位达 2.96m，而广州市区珠江水位达 1.8m 即成灾。深圳市和珠海市污水处理出水口的高程分别为平均海平面以上 1.20m 和 1.24m，这个高程比当地最高潮位低数十厘米，因而每年约有 12%（深圳）和 11%（珠海）的时间需要用水泵排水，大雨或高潮时则出现涝灾。汕头市排水口的高程仅为 -0.2~0.8m（珠基）。-0.2m 为当地潮水倒灌入市区的高度，当潮位升至这个高度时，便要放下挡潮闸，封闭下水道。湛江市排水口的高程为 0.5~1.4m（珠基），比平均海平面低 1.6~2.5m，也比平均潮位低 0.72~1.52m，而且，湛江市一些地区的地面高程很低，更易积水成涝。

海平面上升后，水深增加，涨潮量和落潮量都相应增大，引起潮汐特征的变化，其中对工程影响最大的是设计高潮位，高潮位的增大值一般大于海平面的上升值。相对海平面上升，已经使高潮位明显抬高。广东沿海大亚湾核电站、黄埔港、澳门机场、惠来电厂等 24 个站，有 23 个站的设计最高潮位已经被实测最高潮位所超越，超越的平均幅度，雷州半岛为 2.55m（3 个站），粤西为 1.33m（4

个站), 珠江口为 0.79m (8 个站), 粤东为 0.40m (5 个站), 韩江口为 2.13m (3 个站)。

以往沿海工程在设计时所推算的设计潮位, 大都未考虑海平面上升的影响。由于海平面上升导致高潮位抬高, 从而使设计潮位的重现期缩短, 例如珠江口的 4 个站, 海平面上升 0.3 米, 设计潮位的重现期将从 100 年一遇降为 23~43 年一遇。广东是我国受台风影响最大的省份, 登陆或影响广东的台风占全国总数的 66%~78%。雷州半岛南渡站历史风暴潮最高潮位(5.94m)和最大增水值(5.90m)皆为全国之冠。未来海平面继续上升, 将使风暴潮的频率增大即风暴潮潮位的重现期缩短。计算表明海平面上升 0.1m、0.2m、0.3m 后, 不同频率风暴潮潮位重现期的变化及设防标准。例如广州黄埔港, 实测风暴潮最高潮位为 2.8m, 它相当于现况海平面条件下 50 年一遇的风暴潮潮位(2.40m)。但是, 海平面上升 0.3 米后, 50 年一遇将降为 15 年一遇、100 年一遇将降为 30 年一遇、200 年一遇将降为 55 年一遇, 因此, 应按 200 年一遇设防。

根据重现期与频率的关系式, 分别计算海平面上升 0.1m、0.2m、0.3m 条件下, 各站风暴潮潮位的重现期。结果得知, 海平面上升 0.2m 对潮位重现期有明显影响, 但是真正使重现期“降级”的是海平面上升 0.3m。分别代表 5 个岸段的 17 个站, 已知各站实测风暴潮最高潮位及其重现期, 计算得出海平面上升 0.3m 后重现期的缩短。由此可以得知, 在海平面上升 0.3m 的条件下, 各岸段应该按多少年一遇的设防标准, 才能抵御海平面上升后的风暴潮最高潮位, 计算结果, 雷州半岛为 200 年一遇、粤西为 100 年一遇、珠江口为大于 200 年一遇、粤东为 100~200 年一遇、韩江口为 200 年一遇。

(四) 对珠江三角洲水资源的影响分析

海平面上升, 对沿海城市的社会、经济发展将产生深刻的影响, 沿海地区的自然、生态环境将因此受到改变, 珠江三角洲地区也不例外。由于经济发展迅速, 而对污染源治理的能力有限, 水质污染制约了水资源的利用, 珠江三角洲城市普遍存在水质性缺水, 水资源供需矛盾突出。除此之外, 海平面上升势必对珠江三角洲水资源状况发生影响。

珠江三角洲多年平均年降水量 1823mm, 年径流深 1027mm, 当地河川径流

量 420 亿 m^3 ，过境水量 2940 亿 m^3 ，河川径流总量多年平均达 3360 亿 m^3 。三角洲网河区属感潮河流，潮汐属不正规混合半日周潮，多年平均涨潮总量 3763 亿 m^3 ，落潮总量 7023 亿 m^3 。

三角洲水资源时空分布极不均匀。在时间分布方面，枯水期（10 月至次年 3 月）水量只占全年水量的 20~30%，枯水期与丰水期相差几倍；地域分布方面，西江出海水道与北江出海水道水量相差十分悬殊，主要原因除上游来水量相差很多外，枯水期北江 70% 以上的水量经思贤滘流往西江，造成水量骤减。沿海东部的深圳、大亚湾地区和西部台山地区由于缺少过境水，水资源相当匮乏。

至 1993 年，珠江三角洲共建成蓄水工程 8381 宗，其中大型水库 7 宗，蓄水工程总库容 73 亿 m^3 ；引水工程 3020 宗，引水流量 306.99 m^3/s ；主要水闸 2854 宗，其中大型水闸 23 宗；调水工程一批，主要有东深工程，年供水能力达到 17.43 亿 m^3 以及对澳供水工程和大亚湾供水工程等。

三角洲城镇供水系统发展迅速，各市（镇）一般独自建设，自成系统。1993 年城市供水设施生产能力 1371 m^3/d ，年供水量 4638 亿 m^3 ，其中生产用水 30.9 亿 m^3 ，占 66%；生活用水 15.9 亿 m^3 ，占 34%，供水普及率约 95%。

农业灌溉：珠江三角洲现有灌溉面积 90 万公顷，其灌溉方式主要为“潮灌”，即利用潮水顶托淡水的机会引水入田。但是，在河口地区，影响灌溉的主要问题是咸潮，特别是处于咸潮控制之下而又无法引淡的堤围区，枯水季节咸潮上涌，影响春耕插秧。按照三角洲地区的经验，水体氯度在 3 以下，不致影响农业生产，但海平面上升，氯度可能超过此数值。同时，海平面上升将造成河口区潮位上升，引起河网区地下水位上升加剧，使土壤返碱，农作物根系大量吸收地下盐分，造成灾害。

城镇排水：珠江三角洲城镇一般海拔不高。广州市，如珠江潮水位升至 2m（珠江基面）即可淹街。根据对 1:10000 地形图的量算，如果 2030 年三角洲海平面上升 70cm，三角洲地区将有约 1500 km^2 的土地受淹。三角洲城镇排水管道高程低，许多城镇还是以明渠（河涌）的形式排水，海平面上升，将使排水不畅，增加市政建设的难度。

水生生态：海平面上升，将改变三角洲水生生态的现状。由于低洼地被淹浸，

湿地扩大,湿生和水生动植物适生范围扩大,从而将引起一系列水生生态的改变。如伶仃洋东岸,从宝安沙井至深圳湾一线,是天然的养蚝基地,但海平面上升,将改变这一优越的自然条件,使其生存环境遭到破坏。此外,水中藻类的种类也将受影响发生演替。由此而产生比较明显的变化是赤潮问题。目前,伶仃洋、香港附近海域、大鹏湾等每年都有赤潮出现。

(五) 对红树林的影响分析

国外对海平面对红树林海岸的影响方面已进行了很详细的研究,我国在这方面的研究资料相对缺乏。海平面上升对我国红树林的影响有直接影响和间接影响两个方面,直接影响是海平面上升导致红树林被浸淹而死亡、红树林分布面积减小等;间接影响指的是导致红树林海岸潮汐特征发生改变,红树林的敌害增多等。海平面上升对红树林的影响决定于相对海平面上升速率与红树林潮滩沉积速率的对比关系。当其小于红树林潮滩沉积速率时,海平面上升不会对红树林产生明显的直接影响;而当其大于红树林潮滩沉积速率时,红树林的变化取决于红树林生长环境和群落对海平面上升的综合反应。有研究认为因首先确定海平面上升是否会导致红树林海岸地貌的变化。对那些海平面上升不会导致地貌发生较大改变的红树林海岸来说,海平面上升仅使地下水位发生改变、高潮带浸淹频率的增加和原先受沙丘等障碍物保护的高潮区被淹没。如果红树林后缘地貌和地层条件适合红树林生长,红树林将大规模向陆地迁移,当红树林后缘质不适合红树林生长,则红树林几乎很少向陆地演化,海平面上升将导致红树林被淹没;另一方面,一些红树林海岸在海平面上升时会改变地貌,如沙丘或沙体的消失、泥滩向陆移动等,这些变化将从根本上改变红树林的生境条件,从而显著改变红树林生态系。在这种情况下对红树林的影响比较难以预测。另外的可能性,原先不适合红树林生长的海岸会变得对红树林生长有利,潮水和海流会把红树林胚胎带到这些地方形成新的红树林。我国大部分红树林潮滩沉积速率基本上都高于当地的海平面上升速率,所以目前海平面上升对我国大部分红树林的存在和分布还不能构成显著影响。

即使相对海平面上升速率相同的同一地区也可能由于红树林生境条件和红树林生长分布状况不同而导致海平面对红树林的影响不同。因此,关于海平面上

升对红树林的影响，应从各地区的相对海平面上升速率、区域地质情况、红树林生长的具体环境和红树林的生长状况来分析。有学者分析了粤西阳江、湛江等沿海地区在海平面上升后潮汐特征的变化，认为海平面上升导致这些海岸高潮位上升、强潮频率增多、高潮时间滞后，复杂的潮汐通道还有潮差加大的现象（陈奇礼和许时耕 1995）。这些现象都可以改变红树林的浸淹程度和浸淹频率，从而影响红树林的生长与群落结构。红树林植物的敌害生物与潮汐、盐度有密切关系，在潮差大、盐度高、水流急的潮滩，红树林上固着动物危害尤为严重（范航清 1993）。海平面上升，潮差增大，强潮频率增多，可能会导致红树林的敌害增多，也会威胁红树林的生长。但对泥沙来源少，红树林潮滩沉积速率较低的地区，会受到严重影响。如东寨港红树林潮滩沉积速率 4.1cm/a，平均潮差较小，仅约 1m 左右，海平面上升对红树林的浸淹频率和强度影响很大。而且我国红树林后缘通常有海堤，不利于红树林的向陆演化，可能导致这些地区红树林在本世纪末因为海平面上升而受到严重影响。

2.3 人类活动加剧

2.3.1 围垦与涉水工程建设

珠江河口地区的城镇化水平高，河口资源开发利用的强度十分突出。河口治理、港航工程建设、滩涂资源的利用、河口水沙资源利用等人类活动，在国内外河口是十分典型的。

20 世纪 50~60 年代，为了提高防洪排涝能力，三角洲地区大范围、大规模的联围筑闸，改变了三角洲网河水系结构，将干支一体的三角洲水系人为分割为围内的内江体系和围外的外江体系。

改革开放以来，特别是 1978~2009 年间，珠江河口开展了大规模的滩涂围垦，包括蕉门、横门、洪奇沥、磨刀门、鸡啼门、崖门、交椅湾、前海湾、深圳湾等围垦造地，珠江河口岸线向海快速推进，口门向海延伸，口门和岸线形态发生了较大的变化。据统计，伶仃洋两岸围垦面积约 250km²，岸线向外伸长度最长可达 12.81km；磨刀门围垦面积约 134.91km²，岸线向外延伸最长达 16km；黄茅海、鸡啼门共围垦面积 154.15km²（见图 2.3-1）。

20 世纪 80 年代以来，珠江西、北、东三江网河区的采砂十分严重，据调查分析，1984-1999 年的 15 年中，西、北、东三江网河区总采砂量约为 12 亿 m^3 ，平均每年约为 0.8 亿 m^3 ，即约相当于 2.12 亿 t。

珠江河口地区经济社会的快速发展促进了该地区海陆空运输业的快速发展。改革开放 30 多年来，已经形成了以广州港、深圳港、珠海港为主要港口，惠州港、虎门港、中山港、江门港为重要港口的分层次港口群发展格局；形成了广州中船龙穴造船基地、中船大岗船用柴油机制造与船舶配套产业基地、中船中山船舶制造基地、深圳孖洲岛友联修船基地等修造船基地。珠江河口沿岸现已建码头泊位数 1477 个，岸线利用达 371km（含工业和城镇岸线利用），占河口现有岸线总长的 38%，优质岸线几乎全部变成人工岸线。截至 2008 年底珠江河口地区已建桥梁达 7900 余座，区中大桥和特大桥近千座，珠江三角洲地区公路通车里程约达 5.3 万 km，其中高速公路 2100km，公路密度 98.34 km/100km²，铁路运营里程约 580km，铁路密度 1.25km/100km²；形成了珠海机场、澳门机场、深圳机场、香港机场等大型空港枢纽。

总之，近 30 多年来，珠江河口人类活动加剧，三角洲地区联围筑闸、河口滩涂围垦、航道整治开挖、港口码头建设、河道采砂、桥梁建设等对珠江河口动力过程影响巨大，极大地改变河网及河口区径、潮动力结构和网河各汉口水沙分配，引发河口径流、潮流、输沙、盐水楔运动等动力及伴生过程特性的调整，客观上使得河口动力研究变得更加复杂和困难。

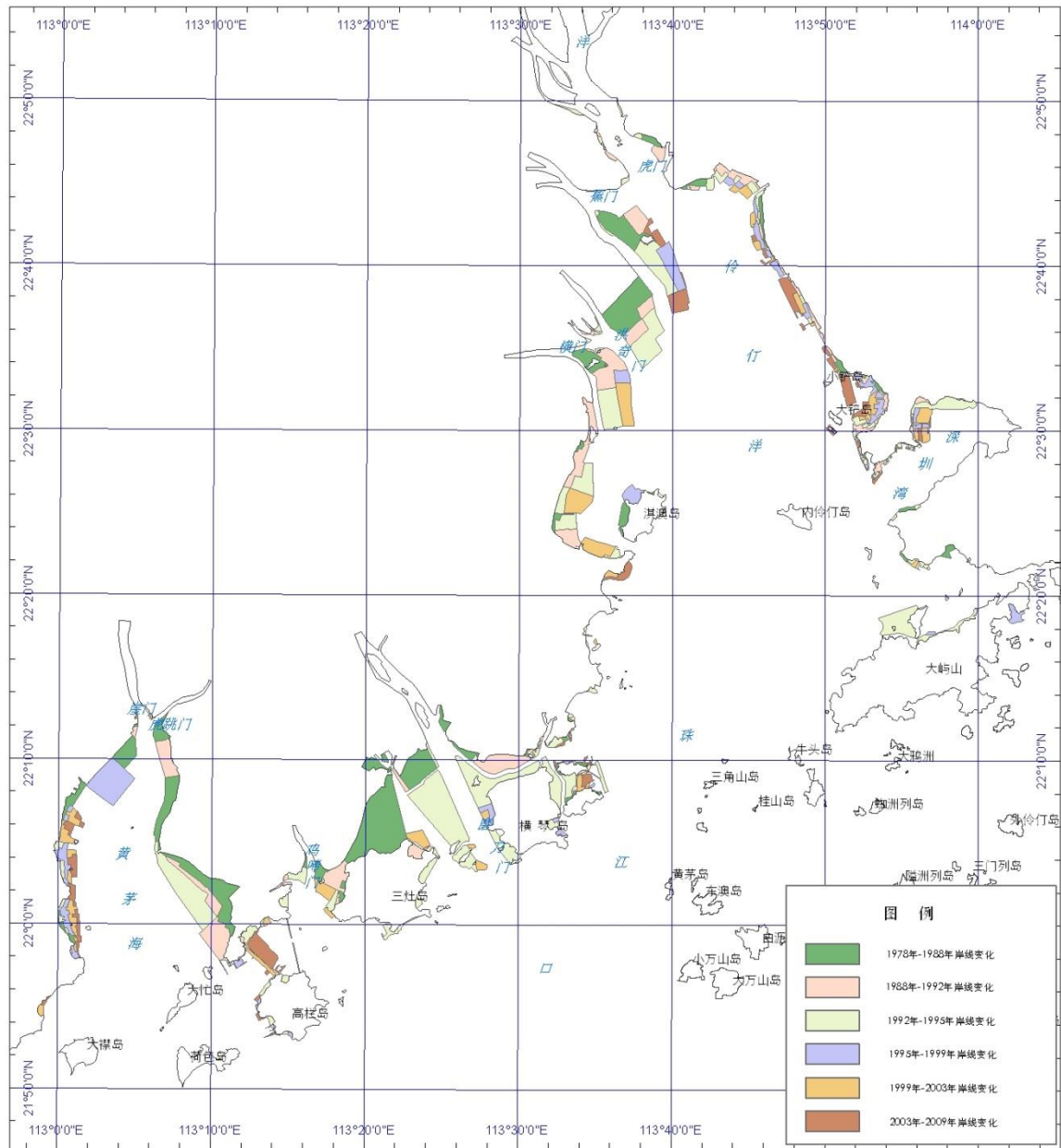


图 2.3-1 珠江河口 1978-2009 年岸线变化示意图

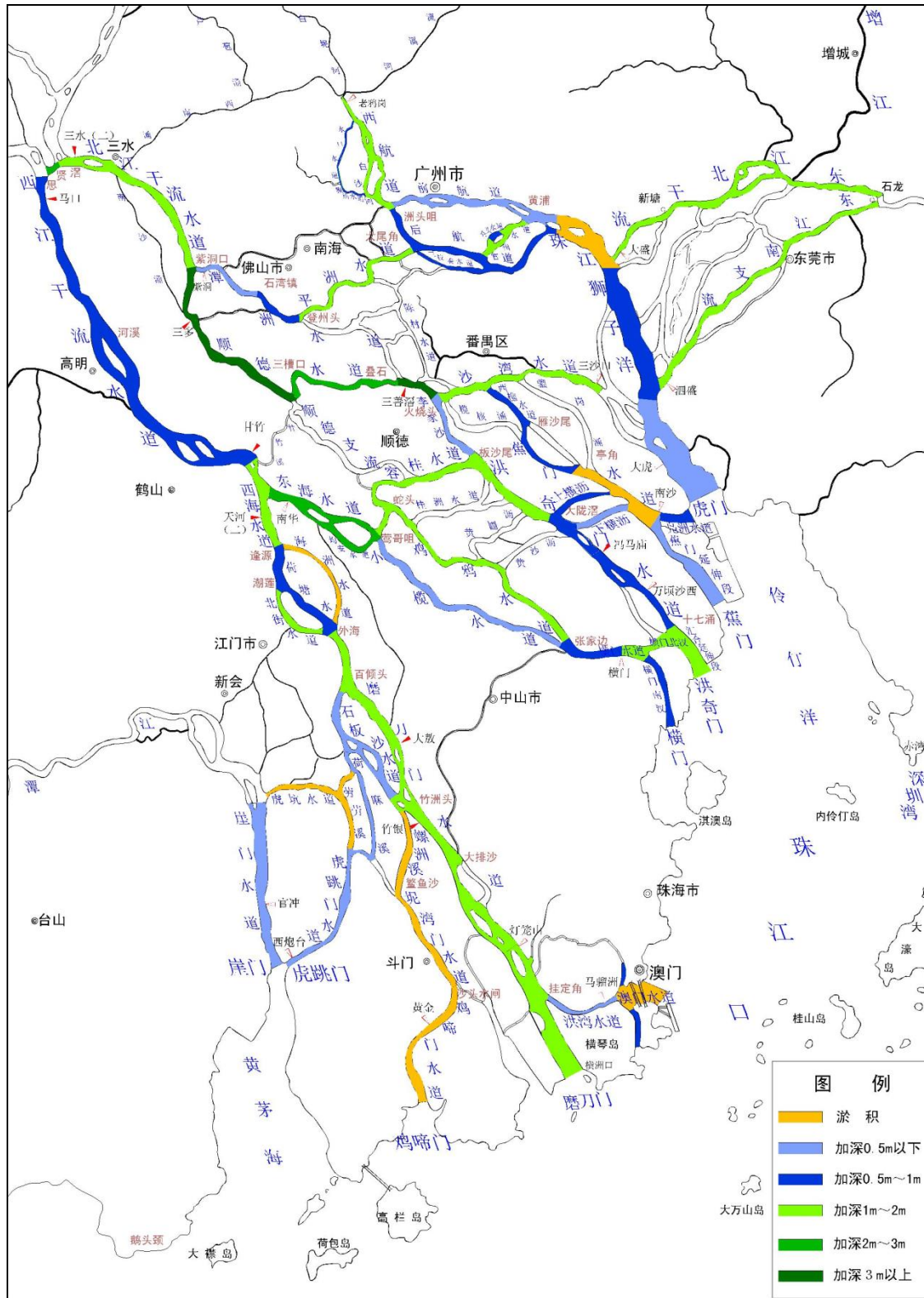


图 2.3-2 珠江三角洲网河区河道水深变化示意图（20 世纪 80 年度与 99 年比较）

2.3.2 城市化

据《广东统计年鉴》显示，土地和人口分别只占全省 23%和 31%的珠三角，GDP 和财政收入占全省的 75%和 87%，其中深圳、广州、东莞、佛山、珠海、中山为珠三角的核心区，土地面积仅占全省的 10.7%，却集聚了全省常住人口的 37%，一般预算收入的 80.4%，产出全省 70.5%的 GDP；而占全省土地 77%、人口 69%的东西两翼和山区五市，仅及珠三角的 24.5%和 16.4%。目前珠江三角洲已经进入工业化的成熟阶段,城市化和国际化程度不断提高，市场经济体制日趋完善，人民生活达到宽裕的小康水平，广大乡村地区达到都市化的成熟阶段，城乡一体化基本实现。已成为一个拥有 3950 余万人口，城市化水平达 70%，正在超越城市群成为向都市圈发展的地区。

2.2.3 人类活动对珠江三角洲的影响

（一）河床下切导致咸潮上溯加剧

通过分析比较珠江河口及三角洲网河区 1985 年地形和 1999 年地形条件下的水体特征盐度，发现西北江三角洲主要水道咸潮上溯加剧，水体盐度普遍升高，取水超标历时增加。

根据数学模型的研究结果，2005 年地形条件下网河区的咸潮界比 1999 年的相应上溯 1~6km，特别是西江干流，其咸潮界上溯最为明显。要消除地形对咸界上溯的影响，2005 年地形条件下相比 1999 年地形条件，上游需增加约 300~400m³/s 压咸流量。

由此可知，河道挖砂、拦门沙开挖等人类活动都将加重珠江河口咸潮。人类活动对珠江河口局部区域的边界重整，使得该区域动力发生新的调整，在调整过程中咸潮活动特征和性质也会发生一定的改变，直至动力调整达到相对平衡。人类活动对咸潮活动的影响，最终还是通过动力调整来实现的，如果动力没有发生根本性的变化，就不会对咸潮演变的方向产生根本性的影响。即使在一段时间内局部区域发生了冲淤特征甚至冲淤性质的改变，也都是暂时的影响和表现。

（二）珠江流域水沙过程变异

人类活动对上游来水来沙影响主要是上游水利枢纽建设对上游泥沙的拦截

及洪枯季水量的调节。人类活动对上游径流的影响相对较小,但对来沙影响较大。2000年以后,西江来沙量比20世纪90年代以前减少约64.5%,北江减少约24.1%,东江20世纪70~90年代来沙量比70年代以前减少约17.8%,90年代以后来沙量比70年代以前减少约47.1%。

(三) 珠江三角洲网河动力变化

20世纪80年代以来,河道采砂及大量桥梁、港口航道工程的建设,使三角洲河道河床不均匀下切及各水道水面比降产出调整,引起网河区节点分流比变化,使网河区的径潮动力分布产生调整。

(1) 马口、三水分流比变化

西江与北江在思贤滘连通后,经过流量调整分配后,分别进入北江三角洲及西江三角洲,三水站及马口站为其入口的代表站,是西北江三角洲分流的一级节点,其分流比的变化,将引起珠江口动力过程的调整及河道的演变等方面的变化。20世纪60~80年代间马口、三水分流比较稳定,三水分流比变化范围为7.2~16.5%;1980年末到2000年,三角洲主要节点分流比受河道地形变化影响较大,1990~1996三水分流比逐年增高,其变化范围为15.6~25.5%,在1996年达到最大,1996年以后逐步减少到22%左右。2000年以后其变化范围为21.5~24%,斜率明显变小,年均流量对分流比的影响减小。

(2) 天河、南华分流比变化

南华是西江径流进入伶仃洋的第二个节点,网河区分流比变化与西、北江来水量有一定关系,而西、北江主干水道河床不均匀下切是影响网河区分流比主要原因。在1990年以前,分流比约在38.1~46%,在1998年以后,分流比增加至44.5~48%,约增加2~6%。1997~1998年与1982年相比,在同级流量下,三水站水位下降了1.9m~2.3m,马口站下降1.0m~1.2m;马口和三水附近河段是西江和北江水位下降幅度最大的河段。

(3) 河网区洪潮水位变化

根据1960~2008年各站潮位资料,统计各年代间潮位变化情况。根据统计结果,1990~2008年,水位下降幅度由西北江三角洲入口马口、三水向出海口门递减,到广州河段、西部河口区水位均表现为抬升。其中,三水、马口水位分

别降低 1.2m、1.6m 以上，三角洲上腹部水位降低 0.4~0.6m，三角洲下腹部水位降低 0~0.2m，近口门段水位抬升 0~0.2m。

(4) 口门径流分配比变化

1990 年以后，随着三角洲网河区河床不均匀下切，西江向东片三角洲分流加大，经其网河区从东四口门进入伶仃洋的径流动力增加。表 2.3-1 为不同时期珠江八大口门径流分配比的变化情况，从表可见，2005 年东四口门的分配比 1980 年增加约 12%。

表 2.3-1 珠江八大口门分流比的变化 单位 (%)

时期	东四口门					西四口门				
	虎门	蕉门	洪奇门	横门	小计	磨刀门	鸡啼门	虎跳门	崖门	小计
80 年代	18.5	17.3	6.4	11.2	53.4	28.3	6.1	6.2	6	46.6
90 年代	23.05	18.79	10.95	11.14	63.94	24.48	3.86	3.85	3.88	36.06
2005 年	27.85	18.49	9.05	10.41	65.79	23.26	3.19	3.31	4.45	34.21

(5) 河口湾动力变化

人类活动引起河口湾动力变化主要有：深水航道建设使河口主槽加深，主槽动力加强；河口围垦使口门浅海区延伸，浅海区纳潮容积减少；河口桥梁工程建设减少了河道行洪纳潮的过水断面；港口建设改变了河口的地形边界等。

河口湾动力变化与人类活动密切相关，结合口门区河道演变，分析珠江河口湾近年动力变化的成因可以得到以下认识：

① 河口主槽加深拓宽使外海涨潮动力加强，涨潮流速加大，河口涨潮量增加；

② 90 年代以后上游来沙减少使河口滩涂淤积速率减慢，滩涂围垦及河口主槽下切，水沙归槽进一步减少河口浅滩淤积速率；

③ 滩涂围垦使口门区河槽过水宽度减少，主槽径流动力加强，河槽产生冲刷，水沙归槽使河口泥沙向下游口门区输送比例增加，而且围垦使其纳潮面积减少，外海涨潮动力减弱，涨落潮流速减少，泥沙在其下游口门区落淤比例提高；

④ 珠江河口港区的建设使其沿岸潮流动力坚强，而港口出海航道建设使其所在深槽余流量及涨落潮量加大，动力加强，有利于河口滩槽格局的稳定；

⑤ 口门区主槽下切使口门潮流动力增强，两翼潮汐通道风暴潮水位抬升；

⑥ 口门区主槽下切，使外海高盐度水体沿主槽上溯，内海区水体含盐度增加，泥沙絮凝对泥沙输移影响加大。

（四）珠江三角洲城市热岛效应加剧

1985 年以前，除深圳有些年份热岛强度较为明显外，珠江三角洲其它城市的热岛强度都较小，说明 1985 年以前珠江三角洲都市群基本上无热岛效应。1983 年以后深圳的气温距平与对照站气温距平的差值均为正值，一致表现为热岛形式；其余地区 1988 年后气温距平差值也有较明显增大且为正值，说明这段时间珠江三角洲地区都市群局部热岛效应陆续形成。1993 年以后，各站与对照站的气温距平差值明显增大，并保持稳定的趋势，说明珠江三角洲都市群 1993 年后整体出现明显的热岛效应，这与广东经济发展的形式比较吻合。珠三角城市群热岛效应强度由 1983 年前的 0.1°C 的低水平上升到 1993 年的 0.5°C 的较高水平，1993~2008 年的年热岛强度在 $0.45\sim 0.77^{\circ}\text{C}$ 之间波动。

珠江三角洲城市群热岛强度呈明显的马鞍形分布，中间强，周围弱，深圳、番禺、中山、东莞这些处于珠江两岸经济发达的地区，其年平均热岛强度最大，为 $0.58\sim 0.70^{\circ}\text{C}$ ，而花都、增城、博罗、高鹤、新会、斗门等处于外围且经济相对落后的地区，其热岛强度较弱，为 $0.20\sim 0.30^{\circ}\text{C}$ 。珠三角城市群热岛强度的分布特征表明，热岛效应与当地的经济活动密切相关，热岛强度大的地区均为广东经济活动最活跃的区域，经济的繁荣已在环境方面付出了代价，深圳是一个典型的例子。

（五）珠江三角洲城市群内涝加剧

相对于同一纬度的邻近区域而言，珠江三角洲城市群所处的区域是一个多雨中心，多雨中心点约位于广州市的东北面。珠江三角洲城市群位于地形相对平坦的区域，该多雨中心的出现，有理由相信它与城市化的气候效应有关。

据相关资料，珠江三角洲城市群的降水增幅效应随着季节的不同是有很大差别的，在下半年尤其是前汛期（4~6 月）珠江三角洲城市群所处的区域降水明显多于其周边的区域。在整个前汛期，珠江三角洲城市群所处的区域及其下风方向为明显的多雨区，在一定程度上表明珠江三角洲城市群对降水的增强效应可能

在前汛期较强。

珠江三角洲城市群所处的位置降水时次比周围区域少，降水时次小值中心位于佛山地区，平均每年探测到有降水的时次在 180 次以下。这在一定程度上表明了城市化可能会导致与城市群关联的区域降水时次明显地减少，但是从上述平均降水量的情况来看，城市群所处的区域是一个多雨中心，因此，城市化会导致降水强度的增强。

国内外的研究表明，由于城市发展而引起的“热岛效应”会引起城市区域短时强降雨的发生，这一特征在广州特别明显。每年的夏天，人们会观察到这样一种现象，刚刚还是晴空万里的天气，突然就会变成“黑夜”，随之发生的是一场短时强降雨，这样的降雨极易诱发城市内涝，这种情况在广州有增加的趋势。研究发现，进入 21 世纪后，广州大雨、暴雨和大暴雨等年强降水日数相比 1960~1979 年分别增加了 6%、11% 和 23%。另外，全球气候变暖也会引起极端降雨事件的增多，强降水事件在美国、中国、澳大利亚、加拿大、挪威和墨西哥、波兰和前苏联均有所增加。研究表明，进入 20 世纪 90 年代全国降水量呈增加趋势，同时暴雨频率及强度全国也为上升趋势，即日数增多、强度增大，其中以华南、江南明显。这一影响使广州暴雨发生的强度和烈度均呈上升趋势，增加了广州城市内涝的发生的机率。

（六）珠江三角洲水污染加剧

河口区河道多为感潮河段，上受内陆径流支配，下受潮汐顶托，水体流动呈复杂的周期性非恒定往复流，污染物容易在河口区域积聚，导致水生态环境恶化、生态功能退化，在这一动态过程中，河口水体的许多重要理化和生物特征都具有特殊性，形成了一个结构复杂、影响因素众多和功能独特的生态系统。

珠江河口是典型的大尺度多汊河口系统，其水系具有“三江汇流，河网如织，八口入海”的特征，被认为是世界上最为复杂的河口之一，在自然环境、动力特征、物质输移、生态环境等方面具有自身的特殊性和复杂性。同时，珠江三角洲及其河口地区是我国改革开放的前沿阵地，涉及粤、港、澳地区，经济发达，城镇化率高，人口和产业高度集中，经济地位和社会影响举足轻重。伴随着经济的快速发展和人口的急剧增长，大量的各类污染物通过河道及沿岸排入珠江河口水

域，长期累积致使其水环境污染问题日益突出，主要体现为水体长期呈富营养化状态、赤潮灾害时有发生、底层水体季节性低氧等，已经引起社会各界的高度关注。根据 1999~2006 年数据统计，珠江河口八大口门监测站水质呈下降趋势，各测站的高锰酸盐指数、氨氮、五日生化需氧量和氯化物 4 个分析项目（共 32 项次）中，表现上升趋势的有 20 项次，约占 62.5%；根据《2012 年广东省海洋环境状况公报》，水质劣于《海水水质标准》第四类标准的水域面积比例为 6.5%，较上年略升 1.1%，珠江口和局部港湾水域仍是劣四类水质的主要集中区域。由于水系和问题本身的多样性和复杂性，加之实测资料的匮乏，在珠江河口水环境问题的认识与水污染的治理过程中，许多基础的科学问题还需开展进一步的深化研究。

2.4 小结

根据上述对珠江三角洲气候变化、海平面变化和人类活动的现状、发展趋势和不利影响的分析，珠江三角洲面临的问题和挑战主要有：

（1）咸潮引发的供水安全问题。气候变化、海平面上升和人类活动都会对珠江河口的咸潮带来明显的不利影响，而且这些不利影响正逐渐显现，具体表现在咸潮上溯的强度、范围、发生频率和持续时间不断加剧。现有抑咸措施存在不足，主要表现为科技支撑力度不够，使得抑咸水量调度的淡水资源利用率不高，抑咸效果的可控性和预见性较差；咸潮动态监测和预报能力不足，调水抑咸多为应激性的；抑咸对策较为单一，对抑咸具有关键作用的相关工程措施建设进展缓慢。另外，抑咸水量调度相关管理机制和法律、法规不完善，导致调度难度和成本加大。

（2）随着经济高速发展和城市化进程的加速，珠江三角洲资源的开发、利用几乎达到了史无前例的程度。随着排污量的增加和新的、持续性的化学物质注入，河口实际上已经成为了现代社会工业、生活污水和农业废水的承泄区，致使部分河口地区在水环境、生态方面已经达到或甚至超出了其现有承受能力，是水污染问题突出的典型区域。如何协调发展与排放之间的矛盾，改善珠江三角洲的水环境和水生态是珠江三角洲面临的巨大挑战。

(3) 气候变化导致台风、暴雨等水文极端事件频发，加上热岛效应和海平面上升的不利影响，珠江三角洲城市群洪涝灾害的风险概率明显增大，极易造成严重的生命和财产损失。及时、有效的提高珠江三角洲地区洪、潮、涝灾害的防御能力，是珠江三角洲面临的又一巨大挑战。

3. 珠江三角洲咸潮上溯及其应对措施

气候变化、海平面上升和人类活动加剧都对珠江三角洲的咸潮上溯形成了明显的不利影响，珠江三角洲咸潮上溯有愈演愈烈之势，上溯强度、距离不断增大，发生频次越来越高，致使广州、珠海、中山、澳门、香港等地上千万居民的供水安全频频告急，引起国务院和粤、港、澳社会各界的广泛关注。2004 年秋末~2005 年春初，珠江三角洲沿岸部分水厂取水口含氯度超过饮用水水质标准 29 倍，连续一个月不能取水，广州、珠海、中山、澳门等地 1500 万人的供水安全受到严重威胁，被迫实施了我国第一次为抑咸启动的全流域应急调水（简称“调水抑咸”，俗称“调水压咸”）。通过对上游不同省份 7 个水利枢纽的联合调度，加大下泄径流量，经过 1300 多公里的调水线路到达珠江三角洲，以缓解灾情。此后，为了应对“咸情不断增强，水资源严重紧缺”的严峻形势，相关部门又连续多年针对咸潮上溯实施了全流域的水资源综合调度，调水抑咸逐渐成为常态。2009 年，珠海平岗泵站于 9 月 15 日含氯度开始超标，提早将近 2 个月，咸界较往年上移约 10 公里；2011 年，珠江河口咸潮更是提前到来，7 月 28 日珠澳供水系统的广昌泵站首次出现咸潮，是有记录以来咸潮到来最早的一次。可见，咸潮上溯逐渐成为珠江河口地区供水安全的最主要威胁之一，且有逐年加剧的趋势，咸潮上溯造成的供水安全问题成为目前和未来一定时期内珠江三角洲最为典型和突出的水资源供需矛盾。

3.1 现有成果

珠江流域管理机构和各级政府与水利部门，加大经费和科研力量的投入，针对咸潮上溯的不利影响开展了大量的工作，积累了很好的基础和经验，在咸潮上溯规律与机理研究、咸潮预警预报、抑咸措施研究等方面都取得了一定成果，这为保障过去 10 多年里珠江三角洲的供水安全提供了强有力的科技支撑。

3.1.1 咸潮上溯规律与机理的基础研究

咸潮上溯规律与机理研究是制定和实施抑咸措施的科学依据。近年来，各级政府、科研院所和高校投入大量的经费和科研力量，设立了一系列的科研课题，对珠江三角的咸潮上溯规律和机理进行了深入的研究。目前，一部分科研课题已

经顺利结题，取得的成果主要体现在以下几个方面：

（一）开展了有针对性的原型观测

现场观测资料是咸潮上溯规律的最真实体现，是研究咸潮上溯机理的第一手资料。珠江三角洲咸潮活动非常复杂，具有明显的三维密度分层流的特点，其上溯过程具有日、半月和季节性的周期变化，2009 年以前的原型观测资料受同步性不足、时间序列过短、垂向分层系数不够等方面的限制，无法完整的解析盐淡水混合状态的动态转换、垂向环流等河口咸潮上溯过程中的关键动力机制，限制了咸潮上溯规律和机理的研究。

为此，2009 年 12 月，珠江水利科学研究院在珠江三角洲的磨刀门水道开展了一次规模较大的咸潮原型观测，观测时段为 12 月 10 日 15:00~12 月 25 日 15:00，共布设了 8 条测量垂线，观测内容包括盐度、流速、流向、风速和风向，其中流速、流向和盐度的垂向测量密度为每隔 1m 测量一个数据，垂向分层数为 8-12 层，获得了为期半个月的逐时资料。本次观测主要针对磨刀门水道咸潮上溯问题，具有以下几个特点：（1）观测时间长，达到了 15 天的半月潮周期；（2）观测频率高，每隔 1 小时测录一次数据；（3）测点位置布置合理，兼顾了磨刀门水道和洪湾水道，覆盖了磨刀门水道咸潮活动的主要范围；（4）垂向分层数较多，达到 8~12 层。因此，本次测量数据具有非常好的代表性，既能反映磨刀门水道咸潮上溯的日周期和半月潮周期变化规律，又能体现密度分层流垂向动力结构特征，这为珠江三角洲的咸潮上溯规律和机理研究提供了很好的数据支撑。

为了建立珠江河口盐度遥感定量反演模型，分别于 2010 年 1 月和 2011 年 12 月，在伶仃洋、磨刀门以及黄茅海进行了与卫星同步的大范围采样观测，包括水体表面光谱、盐度、黄色物质吸收系数等参数。

通过对上述资料的深入分析，对磨刀门水道咸潮上溯的影响因素、日和半月周期变化规律、动力过程有了更为深入的理解。同时，这些宝贵的资料也为咸潮的物理模型试验研究、遥感盐度反演和数值模式的建立提供了良好的数据基础，对于推进相关研究进展起着至关重要的作用。

（二）构建了多学科交叉的咸潮研究关键技术体系

通过一系列的科研项目研究，针对珠江三角洲的复杂水系，初步构建了以

物理模型试验、遥感盐度反演和数值模拟研究相结合的咸潮研究技术体系。

① 物理模型试验

先后建成了国内首个风、浪、流、咸耦合试验水槽和珠江河口磨刀门咸潮物理模型，并形成了一套先进的盐、潮、风、浪、流多因子耦合同步测控系统。



图 3.1-1a 珠江河口磨刀门咸潮物理模型



图 3.1-1b 风、浪、流、咸耦合试验水槽

② 数值模拟

珠江河口是典型的多汊河口，且各口门动力特性不尽一致，上游河网密布，河道纵横贯通；河口及其近岸水域，岛屿众多，岸线曲折，水下地形复杂，具有明显的密度分层流的特征。为了准确模拟珠江河口咸潮上溯的动力过程，基于高性能并行算法和无结构三角形计算网格，构建了珠江河口大范围高分辨率三维斜压数学模型，实现了河口区及河道内三维密度分层流动力过程的数值模拟。

模型计算网格如图 3.1-2 所示，范围覆盖了整个珠江三角洲主要河道、河口湾及近海水域，模型上游河流边界分别为石咀、马口、三水、老鸦岗、西塘、泗盛水文站，外海开边界取至约 300m 等深线附近，整个计算范围东-西方向长约 400km，南-北方向宽约 340km。根据水下地形变化趋势和岸线走势，对磨刀门水道、航道、港池等水域的网格进行了局部加密与优化，网格由疏到密均匀过渡，体现了无结构三角形网格布置灵活的优点。整个计算网格的节点数为 166279 个，单元数为 299439 个，其中，最小单元边长约为 40m，最大单元边长约为 20km，垂向分层为等距的 11 层。

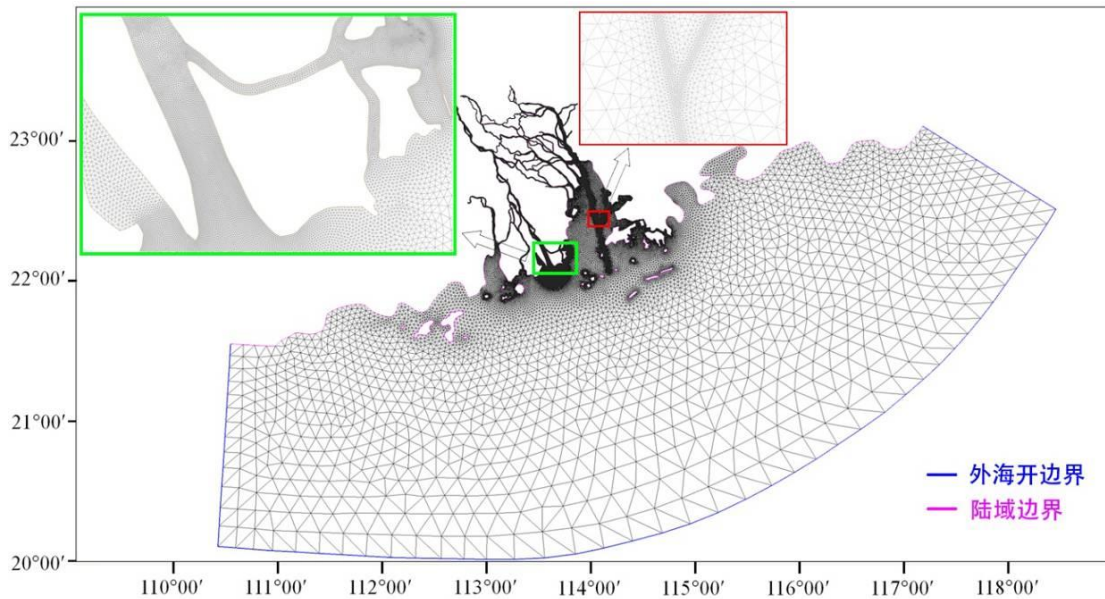


图 3.1-2 模型计算网格

模型上游河流边界条件给定为实测的逐时流量资料；外海潮汐边界条件由潮汐调和常数计算所得，包括 M2、S2、N2、K2、K1、P1、O1、Q1 八个主要分潮。由于外海开边界位置距离河口足够远处，基本不受冲淡水的影响，盐度的边界条件给为定值。此外，为了考虑了风的影响，模型输入还包括日平均风场。

模型水动力模块初始条件采用“冷启动”，即水位初始值为平均水位，流速初始值为零。盐度初始场对盐淡水分布计算影响较大，且其为垂向分层的三维结构，准确给出盐度初始场较为困难。近年来，珠江水利科学研究院利用盐度与黄色物质呈负相关的关系，构建了表层盐度遥感定量反演模型，实践应用证实由此提取得到的珠江河口区表层盐度值具有较好的精度。因此，利用卫星遥感资料反演得到的表层盐度值，结合垂线实测资料和珠江河口各层盐度分布的经验规律，进行盐度的垂向插值，从而得到计算所需的盐度初始场。这样给出的盐度初始场已经基本接近实际值，盐度可以在较短的模型计算时间内达到平衡。为保险起见，在本文的实际计算中，模型先提前运行两个月，取稳定后的计算结果进行分析。

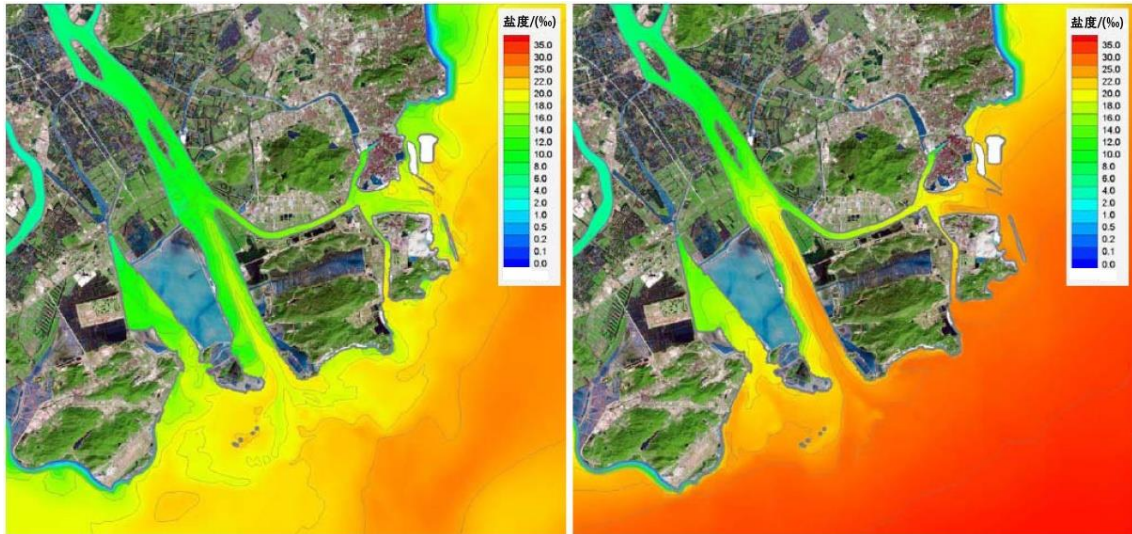


图 3.1-3a 涨憩时刻盐度平面分布图（左：表层，右：底层，模型计算结果）

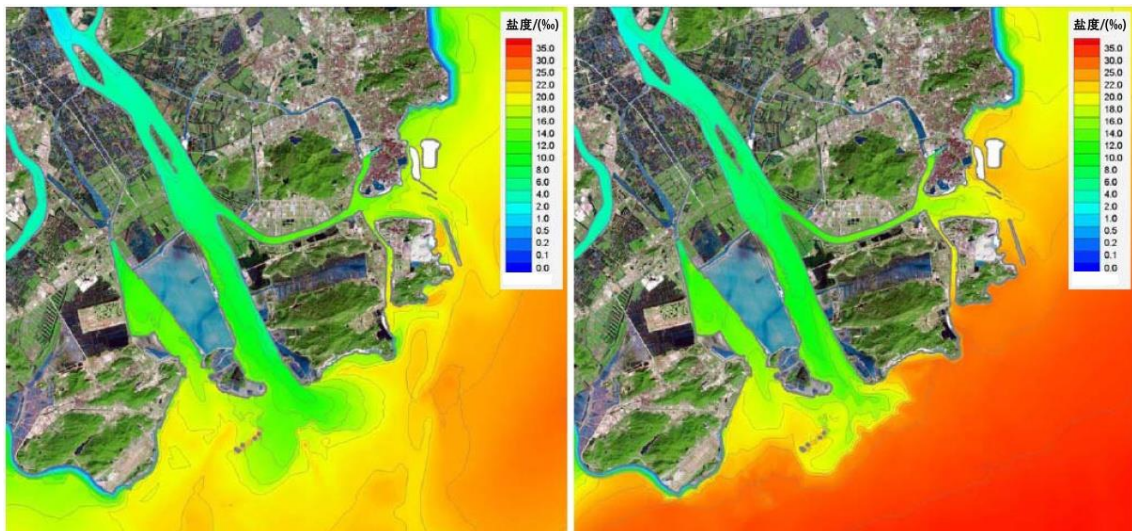


图 3.1-3b 落憩时刻盐度平面分布图（左：表层，右：底层，模型计算结果）

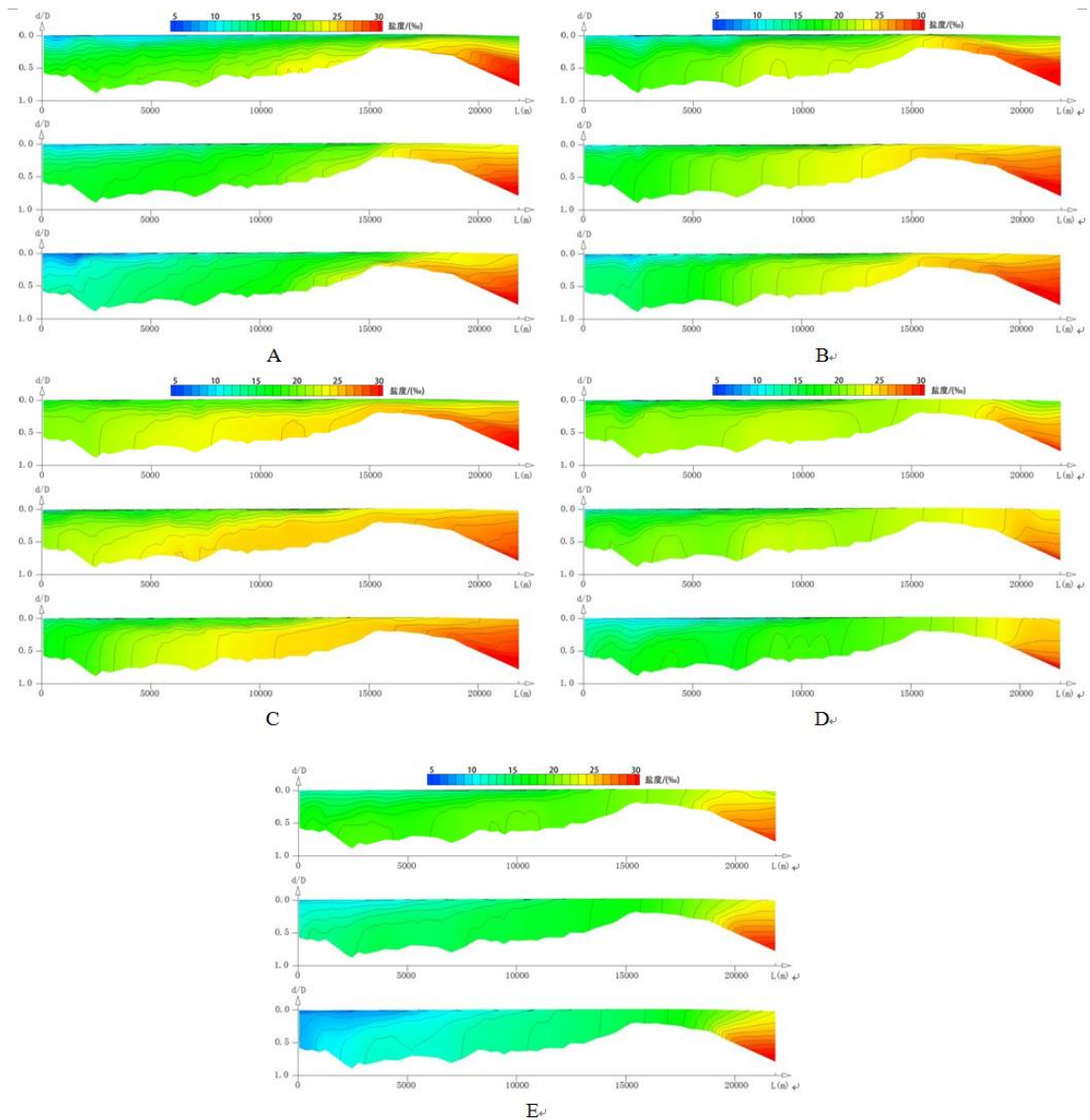


图 3.1-4 断面垂向盐度分布（自上而下：小潮，中潮，大潮）

③ 遥感盐度反演

原型观测结果均为单点资料，无法获得珠江河口大范围的平面盐度分布特征，一定程度上限制了河口整体的咸潮活动及动力特性研究的开展。为此，在现有研究成果的基础上，利用盐度与黄色物质呈线性负相关的关系，构建了表层盐度遥感定量反演模型。

根据遥感技术可有效反演的水质参数（黄色物质、盐度）构建表层盐度遥感定量反演技术路线，如图 3.1-5 所示。总体的技术思路为：把珠江河口卫星表面

盐度同步观测与水体光谱观测、以及珠江重要口门和重要河段特征时段的咸潮连续垂线观测、固定测站固定位置的常规观测等结合起来，获取珠江河口表层盐度遥感定量反演以及咸潮机理分析基础数据，建立珠江河口较高含沙水体表层盐度反演模型。

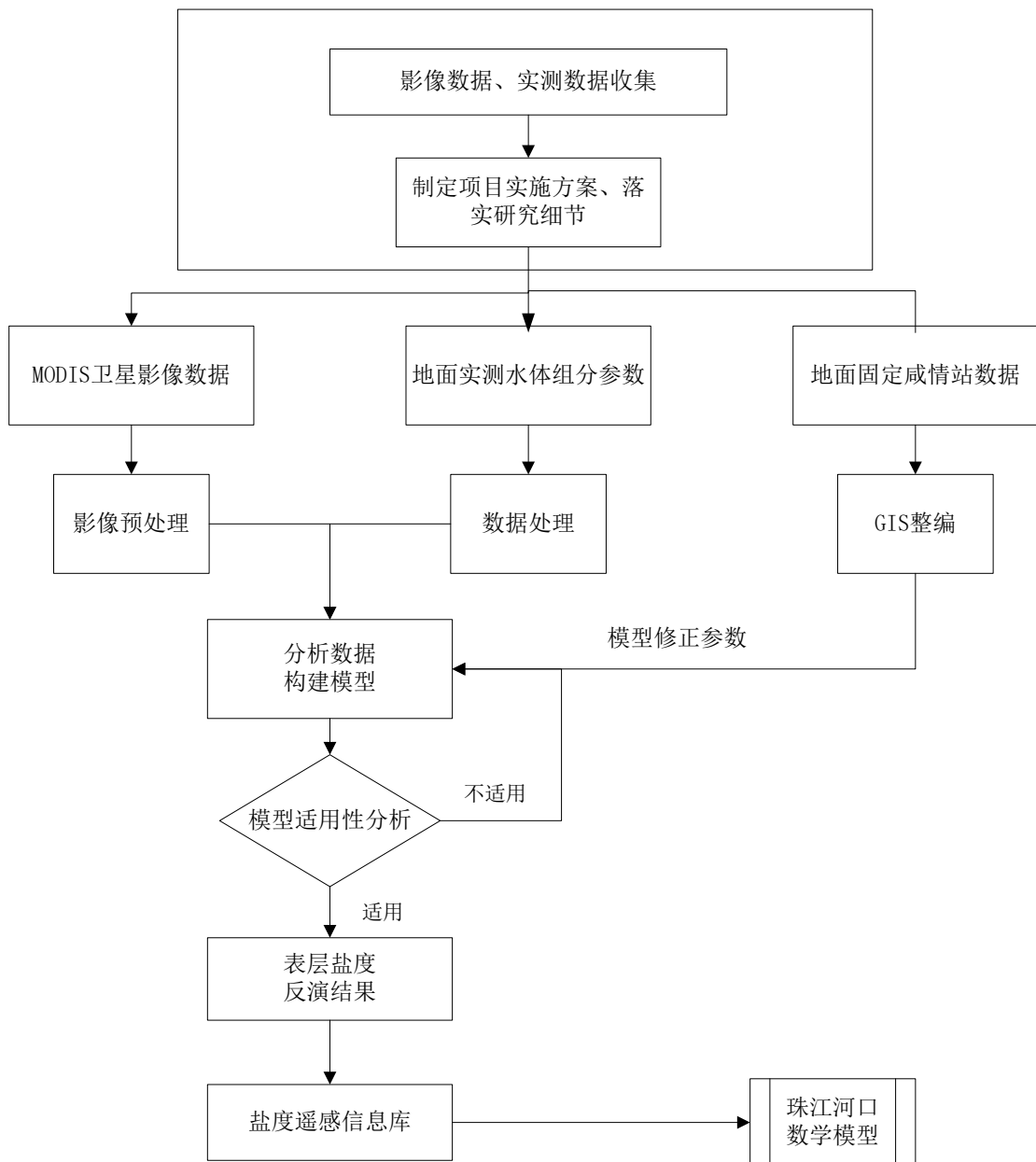


图 3.1-5 咸潮遥感定量模型研究技术流程

具体的技术流程如下：

a.数据源：采用 MODIS 数据、地面采集的水体组分浓度数据、固定站点咸

情观测数据。

b.数据处理：由于水体本身为弱反射体，其信息更容易受到大气、平台姿态以及仪器设备稳定等方面的影响，所以在使用遥感影像前要对数据进行处理。处理的过程包括辐射校正和几何校正。

c.表层盐度遥感定量模型构建：使用获取的各类数据，通过分析水体光谱特性、水体黄色物质与盐度的相关性、黄色物质与反射率关系，确定估算水质参数的最佳波段或波段组合，建立基于黄色物质的遥感数据与盐度参数间的定量关系，从而反演水体中的盐度信息。

d.河口区表层盐度遥感定量反演：采用构建的盐度遥感定量反演模型，通过遥感数据反演珠江河口水体盐度信息，获取长时间系列珠江河口表层盐度变化信息。

e.成果输出：两种形式，一种是成果整理入库，即通过 GIS 平台建立盐度遥感信息库；另一种成果是整饰成图，通过遥感软件、图像处理软件将盐度信息以盐度分布状态图形式呈现。

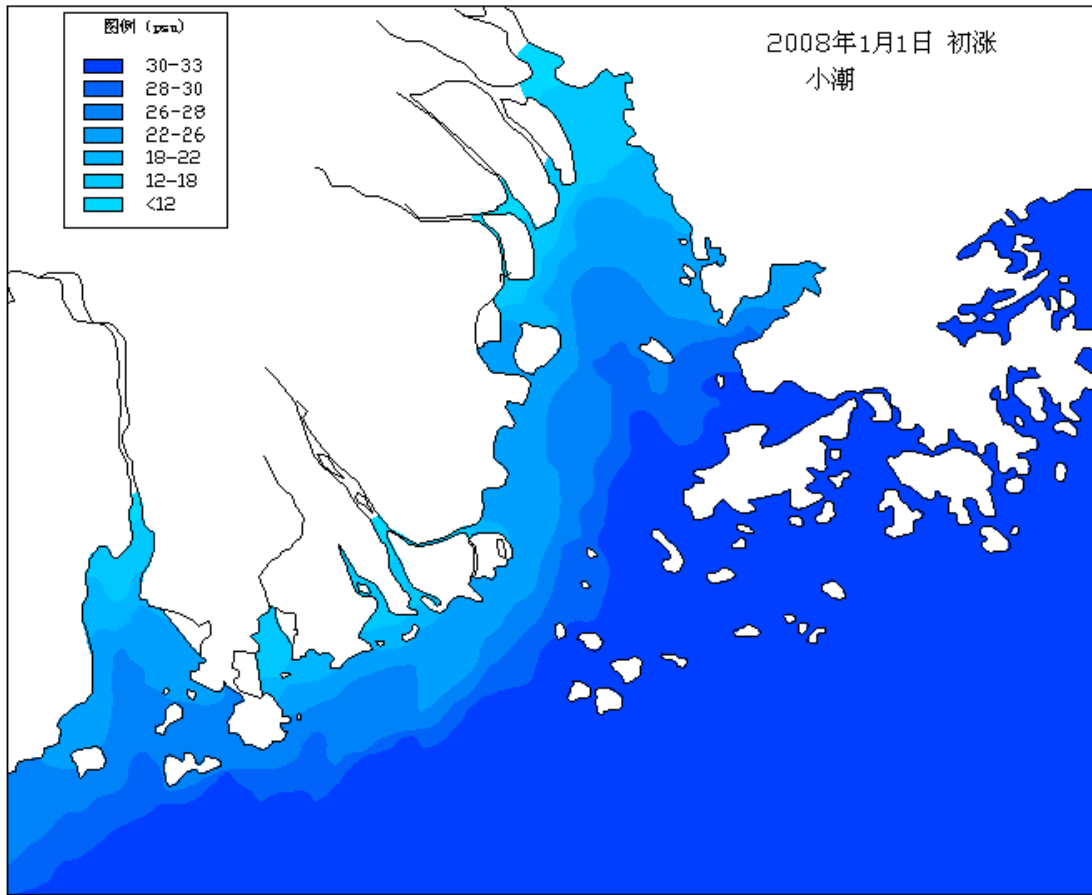


图 3.1-6a 珠江河口小潮期初涨阶段表层盐度分布图

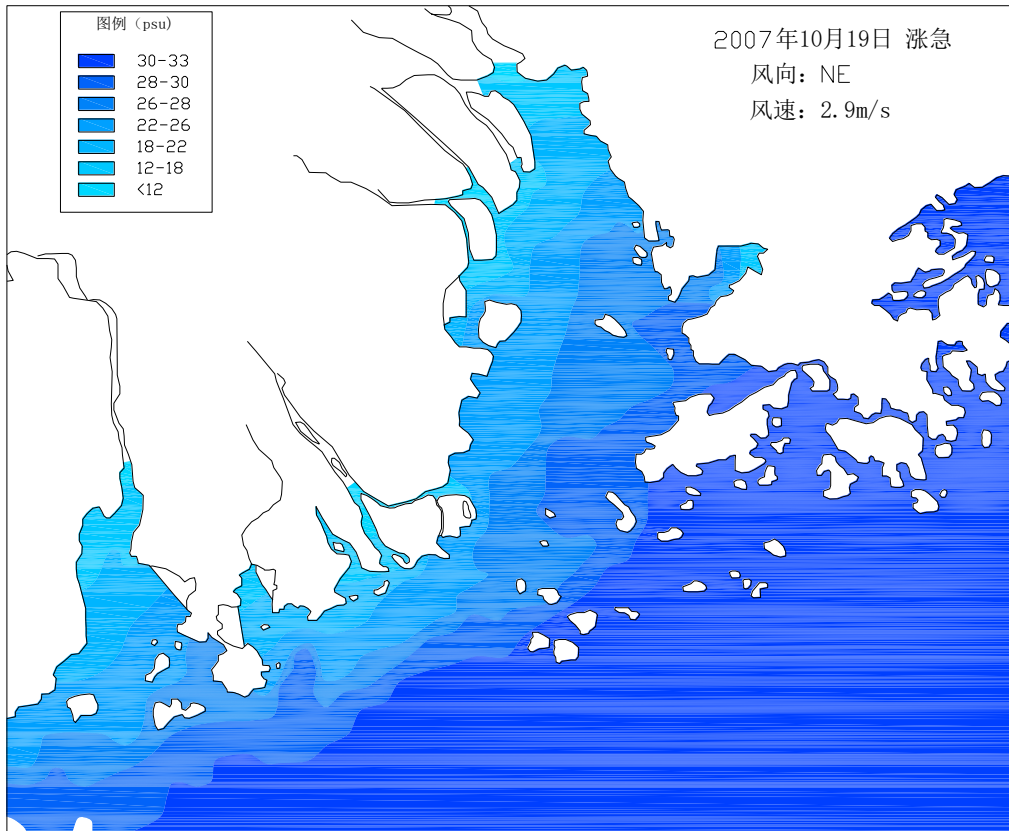


图 3.1-6b 珠江河口小潮期初涨阶段表层盐度分布图

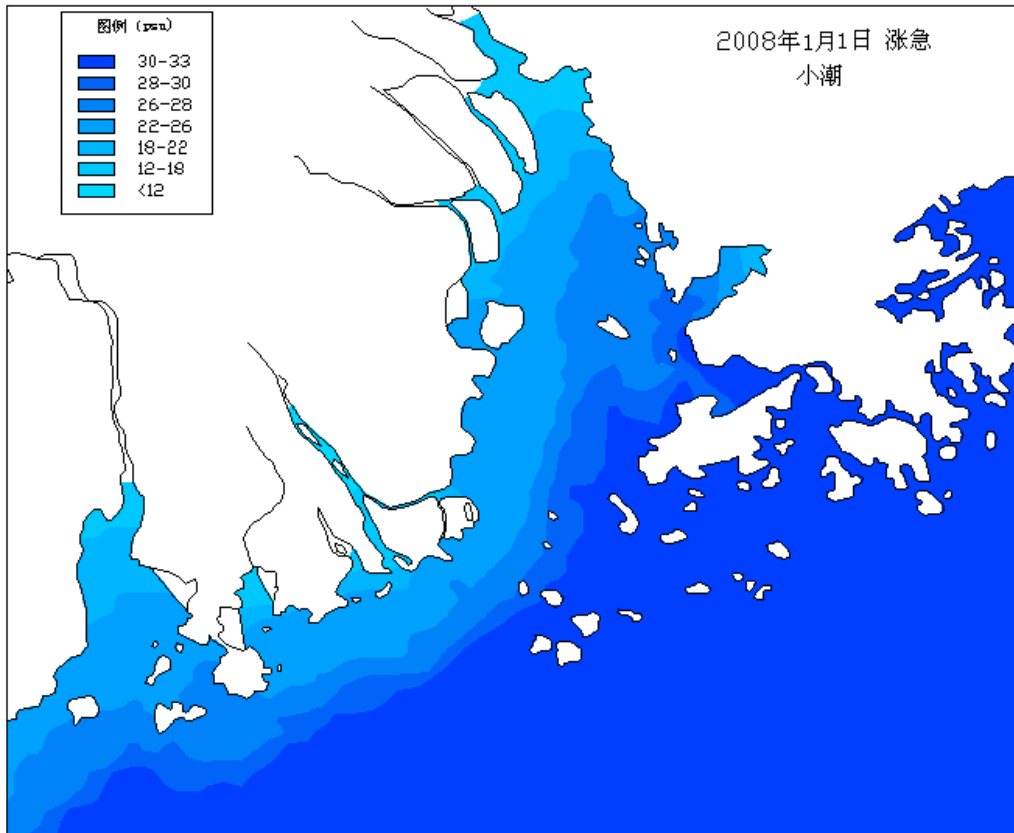


图 3.1-6c 珠江河口小潮期涨急阶段表层盐度分布图

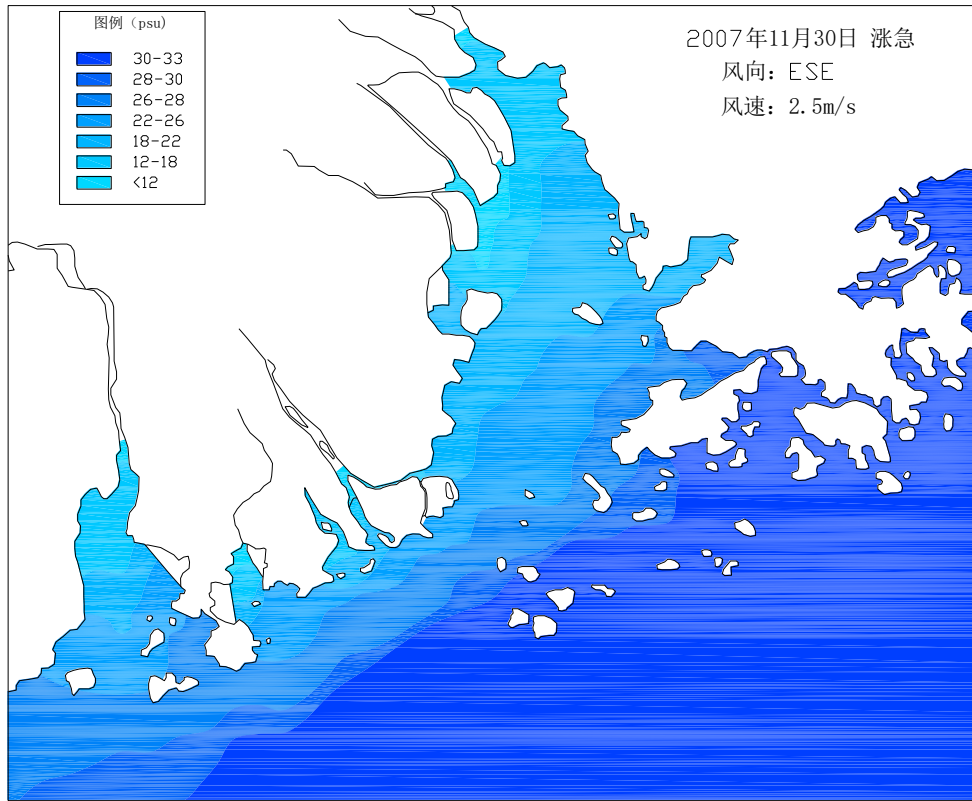


图 3.1-6d 珠江河口中潮期涨急阶段表层盐度分布图

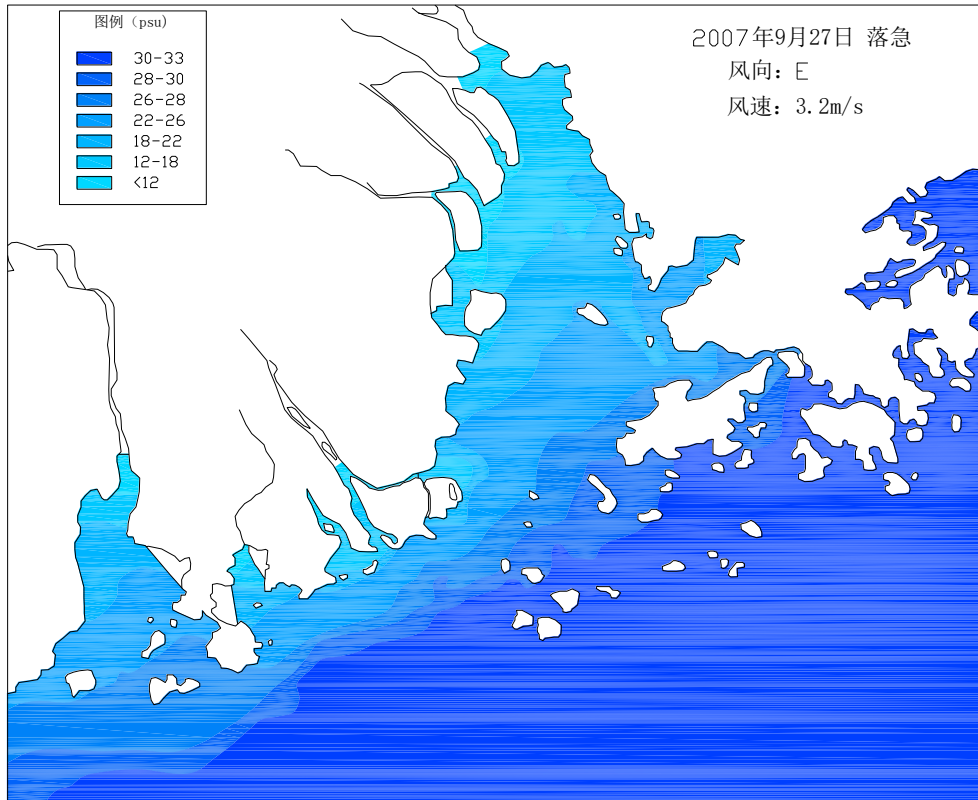


图 3.1-6e 珠江河口大潮期初落阶段表层盐度分布图

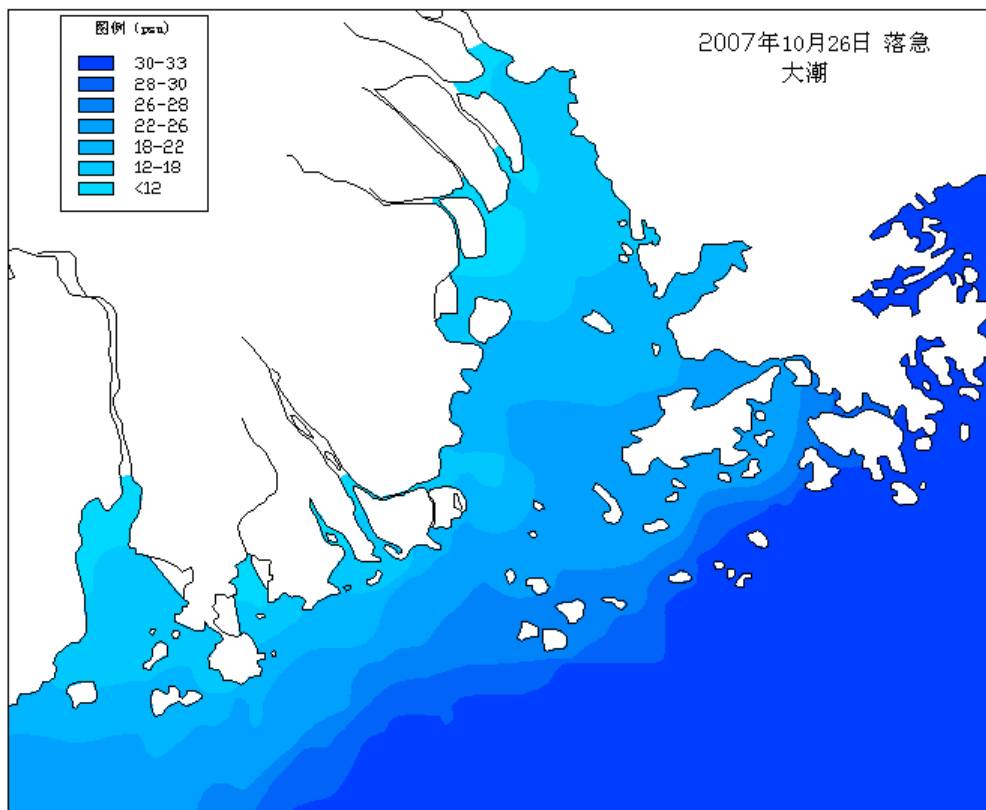


图 3.1-6f 珠江河口大潮期落急阶段表层盐度分布图

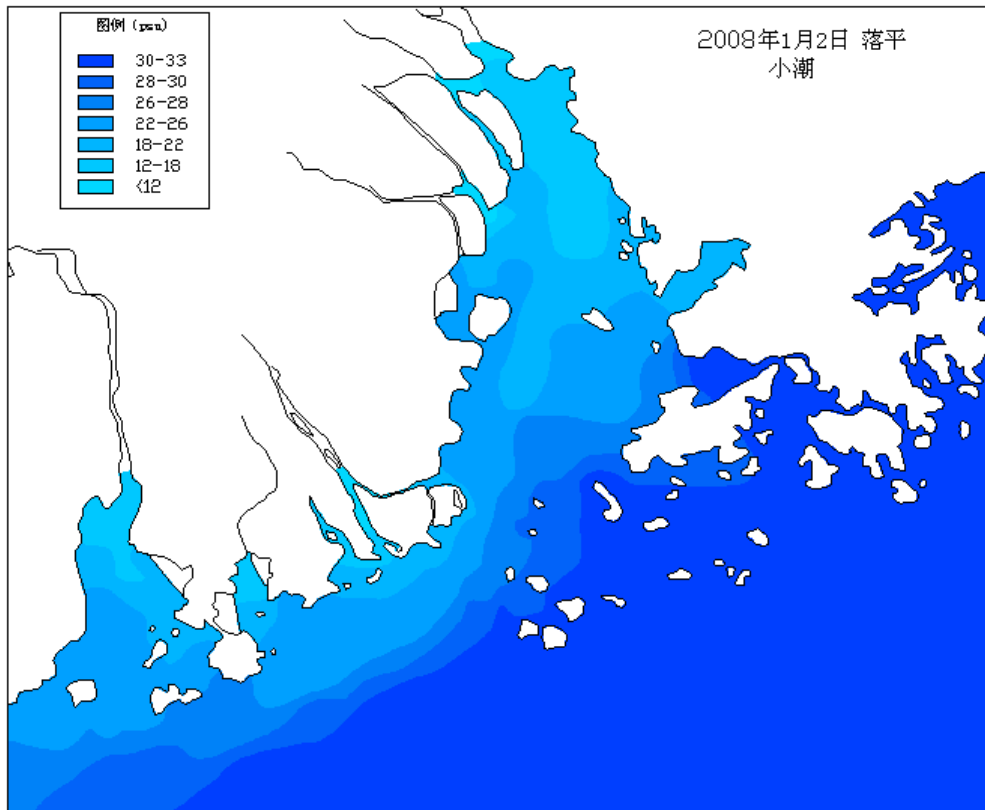


图 3.1-6g 珠江河口小潮期落平阶段表层盐度分布图

(三) 开展了多元动力耦合作用下咸潮上溯规律与机理研究

采用多方法、新技术相结合的方法，对风、浪、流、潮汐等多元动力耦合作用下盐淡水混合、输移机制和咸潮运动机理进行研究，取得突破，推进了河口动力学密度分层流的研究进展。

在咸潮活动多因子响应研究的基础上，构建了盐度输移扩散的理论模式，推导了水槽恒定流盐水楔的长度公式，提出了咸水入侵距离最短“潮差临界值”的概念；发现了珠江三角洲不同于我国其它河口的咸潮上溯现象，揭示了磨刀门水道半月潮周期咸潮上溯峰值出现在中潮期、上游断面盐度峰值先于下游断面出现等现象的动力学机制；首次采用咸潮物理模型对缓混合河口进行试验研究，分析了径流影响下河道盐度变化特点和咸界变化特点，提出了抑咸流量与咸潮入侵强度的对应关系。

在咸潮上溯的运动机理上，通过对实测资料和数值模拟结果分析，对磨刀门

水道及其支流洪湾水道的咸潮上溯规律和动力机制进行了探讨。结果表明，洪湾水道咸潮上溯的日和半月周期变化规律均与潮汐具有很好的对应关系；磨刀门水道咸潮上溯的日周期变化规律同样与潮汐具有很好的对应关系，但其半月周期变化规律则表现出一个特殊现象：咸潮上溯最强和最弱时刻分别出现于小潮和大潮后的中潮期。磨刀门水道咸潮上溯半月周期变化规律的动力机制较为复杂，是径流、潮汐和地形的综合作用与影响下不同盐淡水混合状态交替转换的动态过程，不同的混合状态产生不同的盐份物质输移形式：小潮期，底层累积盐通量明显大于表层，净输移方向为陆向；大潮期，表层累积盐通量明显大于底层，净输移方向为海向；而平衡点一般出现于中潮期，这就是磨刀门水道咸潮上溯最强和最弱时刻分别出现于小潮和大潮后的中潮期的原因所在。

这些研究成果逐渐成为制定和实施珠江三角洲抑咸对策的科学依据。

3.1.2 咸潮实时监测与预警预报

采用不同的方式控制咸潮上溯，首先要对咸潮上溯的可能情况进行预测，从而选择最经济和最合理的应对方案。因此，咸潮控制技术合理利用的前提是咸潮预警预报的准确性，而预测预报的准确性依赖于咸潮观测数据的密度和精度。系统、全面、准确、及时的现场监测资料和分析成果，有助于认识和解析河口动力的细部结构，可以为科研试验和工程建设提供最直接的原始资料。近年来，针对珠江三角洲的咸潮实时监测与预警预报主要开展了以下几个方面的工作：

（一）建成咸潮信息移动采集平台

河口咸潮观测可采用固定测站监测、移动监测、多平台遥感动态监测相结合的方式，形成多角度的立体监测网络。其中，固定监测站在珠江三角洲河口区各水厂都有布设，但目前珠江三角洲地区已建成的咸潮或水质监测站点，是由不同部门或机构投资建设，其定位都是为特定区域或特定目的服务的，缺乏全局性的规划设计，难以满足整个珠江三角洲地区咸潮监测与研究工作的需要。咸潮信息移动采集平台采用全球定位技术（GPS）、无线传输数据（GPRS）、数码摄像技术（DC）、单片机及嵌入式操作系统技术以及后台地理信息系统（GIS）技术，利用无线通信和计算机互联网，将各种分布式的信息直接写入本平台，如咸潮数据，现场的图片信息等，实现了咸潮信息的移动监测和数据的无线传输。

（二）构建和完善了河口遥感盐度反演和动态监测技术

无论是固定测站，还是移动测站，其获取的咸潮数据都是采样点上的值，无法获取咸潮的平面分布信息，水体盐度定量遥感方法则可获取咸潮分布的平面特征。

基于同步测量的水样数据、光谱数据以及卫星影像，通过对盐度、黄色物质、光谱变量等信息进行分析，推导了珠江河口区盐度与黄色物质关系式，建立了适用于珠江河口表层盐度定量反演模型，解决了河口遥感盐度监测的技术难题。另外，通过对模型业务化的改进，形成了一套河口咸潮遥感动态监测的标准化业务流程，实现了珠江河口盐度的遥感日常监测。

（三）构建了咸潮预警预报平台

历经十余年的科研积累和实践，构建了咸潮预测报平台，主要包括咸潮多源数据管理分析平台、外海潮汐预报组件、中上游水文预报组件、河口二维咸潮预报系统、河口三维高分辨率数值模拟平台等，其结构关系如图 3.1-7。在此基础上，在珠江水利委员会珠江水利科学研究院建立了咸潮动态监测与预测预报示范基地，针对磨刀门水道开展了示范应用，实现咸潮快速预测预报，根据统计结果，1 日、3 日、5 日和 15 日预报时效内的平均预报误差分别为 10.04%、16.43%、20.71%和 36.56%，为珠江三角洲的抑咸措施的制定和实施提供了强有力的技术支撑。

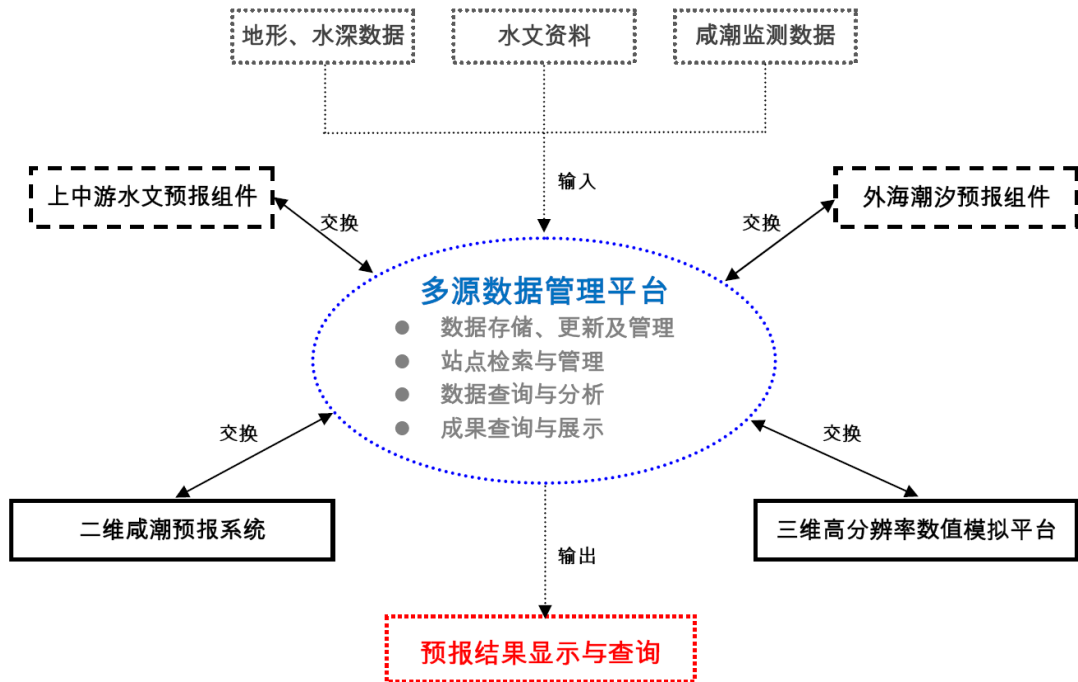


图 3.1-7 珠江三角洲咸潮预警预报平台结构关系图

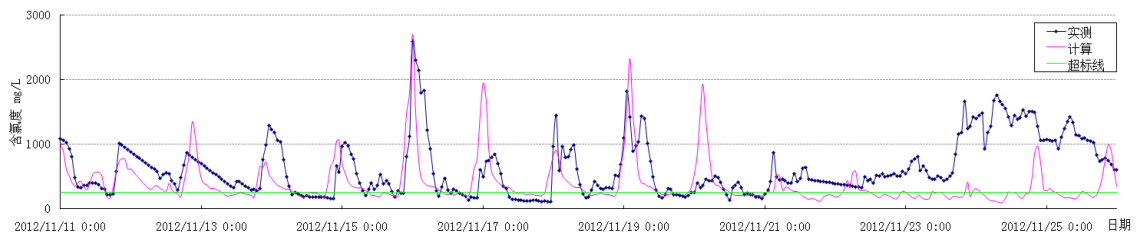


图 3.1-8a 挂定角站预报与监测盐度过程对比

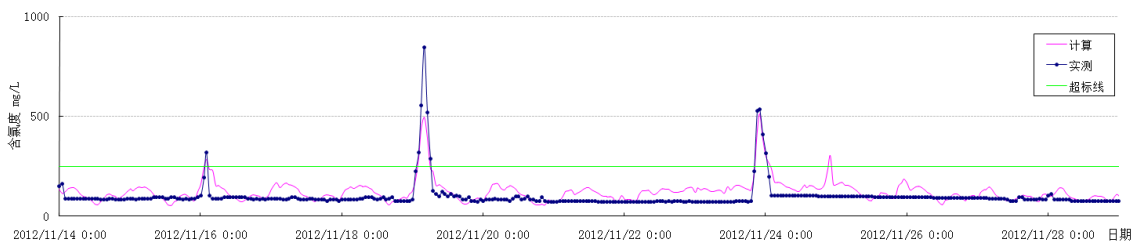


图 3.1-8b 联石湾站预报与监测盐度过程对比

3.1.3 抑咸措施

目前，抑咸措施主要有工程和非工程措施两类。

2004 年秋末~2005 年春初，珠江三角洲沿岸部分水厂取水口含氯度超过饮

用水水质标准 29 倍，连续一个月不能取水，广州、珠海、中山、澳门等地的供水安全受到严重威胁，被迫实施了我国第一次为抑咸启动的全流域应急调水（简称“调水抑咸”，俗称“调水压咸”）。通过对上游不同省份 7 个水利枢纽的联合调度，加大下泄径流量，经过 1300 多公里的调水线路到达珠江三角洲，以缓解灾情。此后，为了应对“咸情不断增强，水资源严重紧缺”的严峻形势，相关部门又连续多年针对咸潮上溯实施了全流域的水资源综合调度，调水抑咸逐渐成为常态。另外，基于提高淡水资源利用率和提高珠江三角洲供水安全保障率，还在区域层面，开展了水库-闸泵群联合抑咸调度的前期研究和实践工作。

在抑咸工程措施方面，《保障澳门、珠海供水安全专项规划报告》规划建设鹤洲南平原水库、竹银水库和一批提引水工程；另外，大藤峡枢纽工程正在开展前期工作，建成后将成为珠江三角洲抑咸调度的主力水库。

（一）珠江压咸补淡和枯水期水量调度实践

从 2005 年到 2011 年，珠江压咸补淡经历了从无到有，从被动应急到主动调控，再到探索综合长效机制的不断完善的过程。九次调水，各具特色，情况和困难纷呈各异。

① 2004-2005 年压咸补淡应急调水

面对日益严峻的咸潮问题，珠江水利委员会（以下简称“珠委”）在认真调查研究的基础上，组织开展了珠江三角洲咸潮和供水形势分析及预警工作，于 2004 年 11 月提出了《今冬明春（2004~2005）珠江三角洲咸潮和供水形势分析及预警报告》，并及时上报国家防总和水利部，提出实施上游水库调水压咸补淡的应急措施，得到国家防总和水利部有关领导高度重视。在多次与流域内有关省（区）、电力行业沟通协调的基础上，组织编制了《珠江压咸补淡应急调水预案》。2004 年 12 月 1 日和 12 月 26 日，分别在广州召开了珠江压咸补淡应急调水工作协调讨论会和专家技术咨询会议，同时，广泛征求各地区、各行业、各部门对预案及实施珠江压咸补淡应急调水的意见。根据专家咨询意见和各单位反馈的意见和建议，珠委进一步修改完善《珠江压咸补淡应急调水预案》，于 2005 年 1 月 6 日，正式向国家防总和水利部提出启动珠江压咸补淡应急调水的请示。

在干旱和咸潮威胁面前，广东省委、省政府高度重视，积极应对，并及时启

动应急供水预案，采取限制用水等各种有效措施，尽最大努力做好抗旱、抗咸自救工作。但是，由于地处珠江河口，受地形条件的限制，珠江三角洲地区本地蓄水有限，在咸潮肆虐的冬春季节仅靠自身的条件根本无法维持正常的生产生活用水。根据张德江书记、黄华华省长的批示，广东省人民政府在紧急召开多部门的协调会议后，于2005年1月6日，向水利部提出了尽快实施珠江压咸补淡应急调水预案的请求。

应广东省人民政府的请求，国家防总和水利部审时度势，经紧急会商后，果断决策，国家防总常务副总指挥、水利部部长汪恕诚于1月7日签发了《关于批准实施珠江压咸补淡应急调水的通知》。

国家防总正式批准实施珠江压咸补淡应急调水方案后，珠江委进行了全面的动员和部署，制定了总体实施方案，并成立了领导小组，下设办公室和预警预报、督查、测验、分析评价、宣传报道组等五个工作小组；及时与流域内有关省区水利、交通、海事等部门，中国电力监督委员会南方监管局、中国南方电网有限责任公司、广西电网公司、广东省广电集团、相关水电站等单位进行沟通协调，得到各方面的理解与支持；珠江流域各省（自治区）迅速行动，各级防汛抗旱、水行政、水文、电力等部门积极组织广大干部职工研究落实具体实施方案；珠江委水文局、贵州、广西、广东等省（区）水文局联合组织了七百多人同步水文及咸潮测验队伍。所有这些，为正式实施珠江压咸补淡应急调水打下了坚实的基础。

1月17日，应急调水正式启动。沿线各水库按照珠江委下达的调度指令有序的实施水库调度，珠江委派出督查工作组在调水沿线严格督查各水库的调度运行，沿线测验工作有序开展，各省区及时按照要求报送相关的资料，并落实安全保障措施；应急调水指挥中心根据每日进行的水情预报，为达到延长压咸补淡时间、合理利用水资源的目的，不断优化各水库的调度方案，适时调整调度指令。至2月4日，各水库按调度指令调水工作已全部结束，恢复正常发电调度。应急调水期间，共增调上游水库水量8.43亿 m^3 ，其中天生桥一级4.65亿 m^3 ，岩滩2.2亿 m^3 ，飞来峡1.58亿 m^3 ，从1月26日开始，根据调水演进的实际进程，珠委提出1月29~2月6日，将调水工作重心转到指导下游抢淡补淡，并派出4个抢淡补淡工作组到三角洲各地市主要取水点指导抢淡补淡工作，争取最大限度

地利用上游调来的清洁水资源，确保应急调水的压咸补淡效果。

实时监控和监测数据显示，整个调水过程基本按照预测的过程演进，珠江三角洲压咸补淡效果比预期的更好。通过优化调度，1月28日，调水前锋已达思贤滘，马口+三水流量29日已达 $2760\text{m}^3/\text{s}$ ，最大流量出现在1月31日，达 $3380\text{m}^3/\text{s}$ ，流量超过 $2500\text{m}^3/\text{s}$ 的时间为1月29日~2月5日，历时8天，超过预案5天的目标。主要水道咸界显著下移，1月29日~2月5日间，磨刀门水道咸界基本控制在澳门、珠海供水系统的主要引水闸——马角水闸~联石湾水闸附近，沙湾水道咸界基本控制在广州番禺主力水厂——东涌水厂以下，横门水道基本控制在小隐水闸以下，虎跳门基本控制在南门泵站附近，绝大部分水厂均可正常取水。据统计，下游直接从河道取水抢淡量达到5411万 m^3 ，引入河道河涌供日后继续抽取供水的水量近4500万 m^3 。其中珠海、澳门及中山的蓄淡水库增加达标淡水蓄量1272万 m^3 ，基本可保证珠海、澳门、中山正常供水到3月中旬。同时，三角洲顶点思贤滘最大日平均流量达 $3300\text{m}^3/\text{s}$ 以上，有效增强径流动力，三角洲主要出海河道和围内河涌水质明显好转，主要出海河道水体质量均达到II~III类，三角洲各内河涌通过合理控制水闸运用，共置换了2.3亿 m^3 的清洁淡水用于改善水环境和农业用水，沿江云浮、肇庆、佛山、江门、清远等市的供水水质也得到较大改善。在国家防总和水利部的科学决策和正确指导下，首次珠江压咸补淡应急调水至此已取得圆满成功。

此次应急调水是贯彻落实科学发展观、坚持以人为本，维护人民生命健康、促进经济发展和社会稳定的一项重要举措，是“立党为公、执政为民”的具体体现，是落实水利部党组治水新思路，把饮水安全作为水利工作第一任务的一次大胆实践，也是流域各省区团结协作、同舟共济、科学治水的典范。千里调水，远水解近渴，引起社会各界的积极关注和强烈反响，包括港澳在内的各地新闻媒体盛赞党和政府的科学决策，盛赞中央政府“以人为本”、“执政为民”的执政理念，盛赞水利人的奉献精神。

收获之余，也有一些反思。此次千里调水，只能解一时之渴，是救命水，确实是不得已而为之的应急之举。珠江上游现有工程设施的蓄水能力不可能全面解决珠江三角洲咸潮上溯的问题。分析表明，解决去冬今春珠江三角洲由于咸潮上

溯而带来的供水安全，需上游水库调水 90 亿 m^3 以上，而目前水库总蓄水量仅 40 亿 m^3 ，即使不顾电网安全运行和企业利益，亦不可能完全解除三角洲的咸潮威胁。

要真正解决珠江三角洲地区面临的水资源问题，必须立足于整个流域水资源的统一管理和合理配置。首先要大力倡导节水，加快建设节水防污型社会；其次要加强流域水资源的统一管理和统一调度，充分发挥流域机构的作用；第三要加快大藤峡水库等流域控制性枢纽工程建设，为有效配置水资源提供手段；第四，加强政策法规研究和流域机构自身能力建设。

珠江首次压咸补淡应急调水的成功实施是流域水资源统一管理的一个新的起点。以流域为单元实行水资源统一管理，是实现水资源全面节约、有效保护、合理开发、高效利用和科学管理的有效途径。此次应急调水取得圆满成功，不仅缓解了珠江三角洲供水安全威胁，而且还增强了全社会对丰水地区水资源问题的认识 and 关注，提高了节水意识，意义十分重大，影响极其深远，我们将以此为契机，在珠江流域进一步落实科学发展观，把握可持续发展水利的内涵，将流域水资源统一管理提高到一个新的台阶。

② 2005-2006 年压咸补淡应急调水

2005 年入秋以来，珠江流域广西、广东旱情严重，尤其是 11 月下旬以来西江、北江流量普遍偏低，珠江三角洲地区咸潮肆虐，直接威胁到澳门、珠海等地人民群众的生产生活用水。

在干旱和咸潮威胁面前，广东省委、省政府高度重视、积极应对，及时启动应急供水预案，采取节水、控制用水、降低供水标准、多闸联调等各种有效措施，尽最大努力做好抗旱、抗咸自救工作。但由于珠海市本地蓄淡水量有限，仅靠自身的条件根本无法维持澳门、珠海冬春季节的生产生活用水。根据张德江书记、黄华华省长的批示，广东省三防总指挥部在紧急召开多部门的协调会议后，于 2006 年 1 月 7 日，向国家防总提出了协调西江上游水电站加大发电流量、实施珠江压咸补淡应急调水的请求。

应广东省三防总指挥部请求，国家防总和水利部审时度势，启动应急处理程序，果断决策，国家防总常务副总指挥、水利部部长汪恕诚于 1 月 9 日签发了《关

于批准实施珠江压咸补淡应急调水的通知》。

国家防总正式批准实施珠江压咸补淡应急调水方案后，珠江委进行了全面的动员和部署；广东省、广西壮族自治区迅速行动，各级防汛抗旱、水行政、水文、电力等部门积极组织研究落实具体实施方案；珠江委水文局、广东等省（区）水文局联合组织了三百多人同步水文及咸潮测验队伍。所有这些，为正式实施珠江压咸补淡应急调水打下了坚实的基础。

1月10日，应急调水正式启动。沿线各水库按照珠江委下达的调度指令有序的実施水库调度，珠江委派出督查工作组在调水沿线严格督查各水库的调度运行；各省区及时按照要求报送相关的资料，并落实安全保障措施；应急调水指挥中心根据每日进行的水情预报，为达到延长压咸补淡时间、合理利用水资源的目的，不断优化水库的调度方案，适时调整调度指令。至1月17日，各水库按调度指令调水工作已全部结束，恢复正常发电调度。

根据调水演进的实际进程，珠委在1月14~22日及时将调水工作重心转到指导下游抢淡补淡，与广东省一道派出抢淡补淡工作组到三角洲珠海、中山、广州等市主要取水点指导抢淡补淡工作，争取最大限度地利用上游调来的清洁水资源，确保应急调水的压咸补淡效果。实时监控和监测数据显示，整个调水过程基本按照预测的过程演进，珠江三角洲压咸补淡效果比预期的更好，远远超过了广东防总向国家提出的调度目标，本次应急调水获得了成功。

虽然本次压咸补淡应急调水工作取得了成功，压制咸潮，增加蓄水，缓解了供水紧张形势，但也暴露出一些问题：1) 上游来水偏枯、缺乏流域控制性工程保证枯期流量。近三年冬春季节珠江流域降水量严重偏少，上游来水基本为10到20年一遇的枯水年，由于珠江流域综合规划确定的大藤峡水利枢纽等控制性工程尚未建成，流域水资源调配能力弱，无法满足枯水期河口压咸流量要求。2) 珠海、澳门水资源配置体系不完善、易受咸潮侵袭，珠海、澳门的用水增长较快，而珠澳供水系统的取水口分布在磨刀门水道联石湾以下河段和前山河。枯水期上游流量减小，咸潮上溯覆盖各沿江取水点。近20年来珠三角地区曾发生过5年严重的咸潮，而最近三年冬春季节连续发生了三次严重咸潮，且影响越来越严重。去冬今春的咸潮影响大涌口140天、最长连续82天全天超标，马角112天、最

长连续 30 天全天超标。珠澳的饮用水源地前山河、洪湾涌受水污染影响，无法取水补库。珠澳供水格局形成于上世纪八十年代，近 17 年来两地用水量增长了 2.7 倍，当地水库的调咸能力日显不足。3) 水污染事件对保障供水安全威胁大，如 2005 年 12 月中北江突发性水污染事件，既影响北江下游的供水安全，也使得北江飞来峡水库基本无法参与本次应急调水，增加了本次应急调水的难度；2006 年 1 月 14 日中珠联围坦洲有一企业发生一吨重油泄漏污染事故，使得珠海、中山的抢淡受到影响，中珠联围的水闸多为 70 年代建设的排水闸，启闭困难，漏水严重，影响抢淡蓄淡效果。4) 流域尚未建立有效的流域水资源统一调度和协商机制，由于对于珠江流域上游骨干水库在枯水期的水资源统一调度和有效的流域协商机制尚未建立，对于应对 2005 年~2006 年冬春季节珠江河口咸潮上溯影响澳门、珠海供水安全，时间急迫，地区之间、流域机构与有关地方政府，水利与电力部门不能实现紧急协商，应急调水对电力部门的安全运行带来较大的影响，因此有关方面顾全大局、克服困难、服从国家防总的调度，但对未经充分协商颇有意见。5) 流域水情监测、信息采集和传输手段落后，特别是对于中小型水电站的运行情况不明，对于调度方案的制定和实施都有一定的影响。6) 基础工作和基础研究薄弱，由于三角洲水文和咸潮以及河道与河口水下地形的常规监测，对于河口咸潮活动规律的变化分析缺少必要的基础资料，珠江三角洲咸潮上溯也未能得到各级政府支持开展系统的研究，对于制定应对咸潮、保障供水的技术方案难度大，这与社会各界对于压咸补淡应急调水却寄予非常高的期望形成很大的反差。

③ 2006-2007 年压咸补淡应急调水

根据预测，2006 年珠江流域来水仍属偏枯年份，珠江三角洲地区咸潮上溯仍将严重，且西江上游龙滩水电站按计划将于 11 月以后下闸蓄水，将会在较长一段时间内减少枯水期干流河道下泄流量，进一步加剧珠江三角洲地区咸潮上溯，澳门、珠海的供水形势可能比往年更加严峻。

根据国务院领导的批示精神，珠江水利委员会按照国家防总和水利部的总体部署，由被动应急变为主动应对，寻求解决措施，2006 年 2 月份就开始主动协调有关省（自治区）和有关部门，开展保障澳门、珠海供水安全专项规划和龙滩

水电站下闸蓄水及珠江骨干水库调度方案的编制工作，远近结合，统筹规划，努力推进流域水资源统一调度与管理。

2006年9月，国家防总批准实施珠江骨干水库调度方案。珠江防总根据批复的调度方案，采用“月计划、旬调度、周调整、日跟踪”的方式，不断滚动细化优化实施方案，积极与有关单位、部门沟通协调，多次派出工作组到现场，强化落实各项措施，精心组织、全面部署，合理确定龙滩水电站下闸蓄水时机，并通过水库群联合调度，多次实施集中补水，保障了澳门、珠海及珠江三角洲地区的供水安全。

本次珠江骨干水库调度虽然取得了圆满成功，但在调度中也暴露出了一些问题。主要表现在：一是协调难度大。去冬今春珠江骨干水库调度主要是依赖行政命令来实施，流域干支流已建、在建和拟建的各类水库，分属不同地区和行业，开发目标单一，水调与电调矛盾突出，牵涉部门多，责任不明确，受利益驱动，违反调度纪律情况时有发生。二是管理难度大。由于受现行部门管理体制的制约，水资源管理呈现“多龙管水”的局面，流域内涉水部门之间职能交叉、缺失，尚未形成规范化、法制化的水事管理和有效的协调机制，如长洲水利枢纽对珠江骨干水库调度的重要性认识不够，且航运部门在管理截流事宜时未与珠江防总沟通协调，以致在调度关键期违规截流事件的发生，对保障澳门、珠海供水安全工作带来较大影响。三是水资源调度控制性工程体系不完善。由于西江控制性工程大藤峡水利枢纽尚未开工建设，流域水资源配置能力和手段不足，区间预报困难，调度技术风险大，难以长期确保澳门、珠海及三角洲地区供水安全。

为确保澳门、珠海及三角洲地区供水安全，保障西江中下游及三角洲防洪安全和生态安全，建议尽快解决以下两个的问题：一是要尽快完善骨干水库调度的法律依据，加强法规建设，建立长效机制，协调各方利益，实现流域水资源统一调度；二是尽快开工建设西江控制性工程大藤峡水利枢纽，提高珠江流域的水资源配置能力，以保障珠江中下游地区供水安全。

④ 2007-2008年压咸补淡应急调水

珠江水利委员会通过不断总结前几次成功调度经验，未雨绸缪，积极采取多种办法，长远措施和近期措施相结合，力求找到一种长效机制，确保澳门及珠江

三角洲地区的供水安全。一方面是积极推进《珠江水量调度管理条例》的立法进程，加快促进流域水资源的统一调度、统一管理；另一方面大力推进大藤峡水利枢纽前期立项工作，尽快形成流域较为完善的防洪抗旱减灾和水资源配置体系。

根据珠江流域后汛期的形势分析，2007 年枯水期珠江流域出现了几点不利供水安全的新情况：一是据气象、水文部门预测，今年流域降水偏少，来水属于偏枯年份，预报来水保证率为 85%；二是流域光照、长洲等大型水利水电工程在枯水期下闸蓄水和龙滩水电站处于初期蓄水阶段，拦蓄水量 52 亿立方米，蓄水导致断流、减流对下游的供水将产生严重影响；三是随着旅游业的快速发展，澳门的用水量较去年增长 20% 以上；四是平岗泵站投入使用后，枯水期珠海自身的供水形势得到一定缓解，但由于对澳供水量增加和供水管道建设滞后等因素的影响，澳门供水安全的保障能力大为降低。因此，如不采取有效解决措施，2007 年冬至 2008 年春澳门等地将面临非常严峻的供水形势。

针对上述情况，珠江水利委员会在 2007 年 6 月份开始，就组织人员编制了珠江枯水期水量调度预案，制订了相应的应急响应机制；随着形势的发展，珠江委在进一步分析研究光照、龙滩、长洲等工程下闸、蓄水时机和运行方式、珠澳供水工程现状的基础上，面对水文气象部门预测流域枯水期将严重偏枯的严峻形势，及时组织编制了 2007-2008 年枯水期珠江水量调度方案，并在征求有关单位和部门意见的基础上，对方案进行了修改和完善，同时根据流域水雨咸情的发展变化，不断对方案进行优化调整。9 月初，在中联办的联系安排下，澳门特区政府和珠江委进行了沟通，并希望能尽早组织实施流域水量统一调度。

2007 年 10 月 9 日，经国务院同意、国家防总正式批准实施珠江水量统一调度。珠江防总根据批复的调度方案，在国家防总的领导下，在流域相关省（自治区）的大力支持和积极配合下，采用“前蓄后补”的总体调度方案，密切关注并分析流域水雨咸情和工情，按照“月计划、旬调度、周调整、日跟踪”的具体调度方式，总结提出了“压退不压涨”的压咸补淡思路，精心组织，全面部署，科学调度，灵活控制，不断滚动细化优化实施方案，及时派出工作组强化落实各项调度措施，适时发出水库调度指令，多次实施集中补水，积极开展抢淡工作，珠海平岗等主力泵站累计抽取淡水 1.04 亿立方米，有效确保了澳门等珠江三角洲

地区的供水安全，澳门的供水咸度基本维持在 100 度以下（国家标准为小于 250 度），同时也大大改善了西北江中下游的水环境，取得了良好的社会、经济和生态效益。

在实施 2007-2008 年枯季珠江水量调度过程中，遭遇重重困难呵不利形势，一是西江、北江来水严重偏枯，特别是 2007 年 10 月和 11 月，分别是 1956 年以来历史最枯和第二枯；二是 2008 年 1 月底至 2 月初南方发生冰冻雪灾，流域内电力供应短缺，电调和水调的矛盾更加突出，有限的水量显得更加紧张；三是 2008 年 2 月初西江梧州航段出现滞航现象，水调中需时刻充分考虑航运的需求，协调难度增大；四是极端天气影响，不利气象条件频发，咸潮持续增强，导致压咸抢淡压力陡增。面对诸多困难，珠江防总通过技术攻关，不断优化调度，最后得以一一化解，取得了水量调度的最终胜利，进一步锻炼了队伍，提高了技术水平，亮点频出，主要表现在：一是枯季多库联合调度水平得到进一步提高。本次调度涉及水库电站多，特别在建电站多，调度线路长，大范围多水库的联合调度难度很大，调度技术十分复杂，通过技术人员精细科学地调度，使规定的流量在规定的时间内到达珠江河口，达到了良好的压咸效果；二是预测预报水平有了大幅度提高，短期预报更加及时，中长期预报更加准确；三是咸情分析更加深入，有效应对了各种不利气象条件的影响，确保了下游的抢淡蓄淡效果。

通过 2005 年、2006 年年初的两次应急调水，以及 2006-2007 年珠江骨干水库调度和 2007-2008 年珠江枯季水量调度，我们深刻体会到在实施流域水量统一调度过程中还存在一些问题。主要表现在：一是水资源调度控制性工程体系不完善。由于西江控制性工程大藤峡水利枢纽尚未开工建设，流域水资源配置能力和手段不足，区间预报困难，调度技术风险大，难以长期有效确保澳门、珠海及三角洲地区供水安全。二是协调难度大。近年来的水量调度主要是依赖行政命令来实施，流域干支流已建、在建和拟建的各类水库，分属不同地区和行业，开发目标单一，水调与电调矛盾突出，牵涉部门多，责任不明确，受利益驱动，违反调度纪律情况时有发生。三是管理难度大。由于受现行部门管理体制的制约，水资源管理呈现“多龙管水”的局面，流域内涉水部门之间职能交叉、缺失，尚未形成规范化、法制化的水事管理和有效的协调机制。

针对目前珠江流域水资源特点及管理状况，要从根本上解决珠江水资源问题，确保澳门、珠海及三角洲地区供水安全，保障西江中下游及三角洲防洪安全和生态安全，必须尽快建立长效机制。从“软件”（立法体系）建设上，急需尽快制订《珠江水量调度管理条例》，从“硬件”（工程体系）建设上，应尽快上马兴建大藤峡水利枢纽。

⑤ 2008-2009 年枯水期珠江水量调度

2008 年 11 月下旬至 2009 年 2 月实施珠江枯季水量调度期间，珠江流域面平均降雨量 36 毫米，比多年同期偏少 7 成，为 1956 年以来历史最枯。2008 年 11 月下旬开始，咸潮影响显现，2009 年 1 月下旬至 2 月上旬出现最严重咸情。据统计，2008 年 11 月 24 日以来，联石湾水闸共有 74 天出现含氯度超标，超标时数达 1164 小时，最大连续超标天数 28 天；平岗泵站共有 35 天出现含氯度超标，超标时数达 236 小时。预计 3 月份流域降雨量基本正常，西江梧州站来水将与多年同期基本相当，而北江石角站来水较多年同期明显偏少，可能会出现 1954 年以来历史第四枯流量（2003、1976、1954 年），与此同时咸潮影响将明显减弱。

自 2008 年 11 月实施珠江枯季水量调度工作以来，珠江防总和珠江委切实发挥流域机构统一协调指挥作用，通过高效组织，科学调度，使调水工作取得了显著的成效，进一步推进流域水资源的统一调度和统一管理。一是保证梧州站流量不低于 1800 立方米每秒。调度实施期间，广西梧州断面平均流量达 3000 立方米每秒，日平均流量都在 1900 立方米每秒以上，高于调度方案确定的不低于 1800 立方米每秒调度目标。二是澳门、珠海供水量足质优。据统计，调度期间珠海主要取水泵站直接从江河累计抽水量 7806 万立方米，日平均抽水量约 78.1 万立方米；供澳原水累计 2093 万立方米，日均供澳原水约 20.9 万立方米，供水含氯度都在 100 毫克每升以下；珠海主城区供水总量 4430 万立方米，日均供水量 44.3 万立方米，供水含氯度都在 100 毫克每升以下。三是再次实现了供水、发电、施工、航运、生态等多方共赢。调度以来，骨干水库发电效益增加，电网运行安全，骨干水库运行和建设安全；西江航运畅通，北江飞来峡水利枢纽结合供水多次冲船缓解塞船带来的交通和社会问题；大大改善珠江三角洲主要分流河道及沿江水环境容量。调度结束后（3 月 1 日）重点骨干水库天一、龙滩、岩滩、百色、

长洲、飞来峡等水库、水电站库水位都维持比较高的水位。

据了解，这是珠江委自 2005 年实施第一次“压咸补淡应急调水”以来，第五次进行枯季水量统一调度工作。近年来，每逢春节前后，咸潮上溯严重，澳门、珠海等珠江三角洲民众的饮水安全受到严重威胁。去冬今春，水量调度形势仍然严峻。2008 年 11 月下旬至 2009 年 2 月实施珠江枯季水量调度期间，珠江流域面平均降雨量 36 毫米，比多年同期偏少 7 成，为 1956 年以来历史最枯。此外，受全球金融危机影响，南方电网、广西电网电力负荷急剧减少，春节期间更是下降到年度最低值，再加上大批火电的投产，也造成了电网内部火电和水电的矛盾，形成了流域内水库有水放不下来的尴尬局面。珠江防总在国家防总的正确领导下，坚持贯彻落实科学发展观，深入总结以往的调度经验，未雨绸缪、主动应对，科学预测，适时实施精细调度，经多方努力，圆满完成调度任务。

一是超前部署、精心组织。早在 2008 年初，国务院有关领导就对保障澳门饮水安全多次做出批示，根据国家防总和水利部的部署，珠江防总高度重视，于 2008 年 7 月份组织有关单位开展珠江流域长期雨水情预测、咸情分析预测和骨干水库的前期蓄水工作，认真分析面临的形势，经过多方案甄别和优选，科学编制了枯季水量调度方案。10 月底，珠江防总正式向国家防总上报调度方案，同时成立了工作协调小组，全面协调各单位、部门工作，层层落实，做好调度前各项准备工作。国家防总批复实施调度方案之后，珠江防总及时向相关单位、部门转发了调度通知和调度要求。

二是强化沟通、统一协调。珠江防总办不断健全沟通协调机制，互通信息，沟通协调的深度和频度明显加强。方案编制过程中遵循“统筹兼顾、保障供水”的原则，适时派工作组赴电网公司、骨干水库、供水公司等调研、沟通协调，使调度方案更为科学合理，符合实际。调度实施过程中，珠江防总及时与有关单位沟通、协调，并以简报和通报形式发布调度信息，通报调度情况。为了积极应对春节假期和金融危机带来电网负荷大幅下降的影响，协调解决水调和电调的矛盾，保障春节前后供水安全，珠江防总及时派出工作组，与电网、有关水电站和珠海市深入交换意见，沟通、指导、落实有关调度和抢淡蓄淡工作。

三是优化方案，精细调度。去冬今春水量调度珠江防总深入总结以往的调度

经验，科学预测、跟踪演算，评估优化调度方案，适时实施精细调度，为圆满完成调度任务提供了坚实的技术保障。调度方案编制采用“前蓄后补”的方式进行水量分配，2008北京奥运会结束后，珠江防总科学决策，“抓住”了汛末和汛后两次洪水资源，增加骨干水库蓄水量约67亿立方米，其中龙滩水电站约49亿立方米，天生桥一级水电站约11亿立方米，百色水利枢纽约7亿立方米；珠江骨干水库汛末蓄水量比2007年同期多约100亿立方米，实现洪水资源化，大大增加了骨干水库可调水量。调度实施过程中，珠江防总坚持“月计划、旬调度、周调整、日跟踪”的调度方式，大部分骨干水库按照月平均流量进行总体调控，重点水库按日平均流量进行调控。珠江防总办密切监视和分析预测主要江河雨水情、咸潮，不断跟踪演算，评估优化调度方案；及时组织会商，研究、部署水量调度工作。

有关专家表示，连续五年成功实施的珠江水量调度实践证明，实行珠江水量调度是实施珠江水资源统一配置、统一管理的基础，对流域水资源的统一管理有着重要的现实意义。珠江水量调度通过加强流域骨干水库的调度管理，提高水资源的调控能力，增强流域公共管理效能，提高水资源的利用效率和效益，保障流域的防洪安全、饮水安全和水生态安全，实现水资源的可持续利用。当前，尽快出台流域水量统一调度管理条例，不仅是流域经济社会发展的客观需要，也是国家依法行政、依法调度，依法管理的需要。据了解，《珠江水量调度条例》的立法工作已被列入水利部明确要求抓紧完成的工作之一，珠江委有关部门单位正继续加快工作进程，争取条例早日出台，为强化全流域水资源的统一配置和管理提供保障，确保珠江一方安澜。

⑥ 2009-2010年枯水期珠江水量调度

2009~2010年枯水期，是珠江防总、珠江委自2005年连续6年实施水量调度以来面临供水形势最为严峻的一年。2009年7月下旬以后珠江流域旱情迅速蔓延发展，汛期江河来水出现枯水到特枯年景；调度骨干水库蓄水严重不足，受降雨补给偏少影响，龙滩、天生桥一级水库蓄水量持续减少；咸潮一反常态，呈现出早、强度大、不间断的态势，同时在水资源严重紧缺的形势下，水调、电调和航运矛盾十分尖锐，沟通协调难度大，珠江水量调度工作经受了6年调度以来

最为严峻的考验。

面对严峻的供水形势，根据国务院领导的批示精神，在国家防总和水利部的部署和指导下，珠江防总以保障澳门等地供水安全为己任，超前部署开展水情咸情预测工作，准确判断面临的形势，在充分征求有关行业 and 部门意见的基础上，编制完成了 2009~2010 年枯水期珠江水量调度方案，并上报国家防总。国家防总批复调度方案后，珠江防总遵照批复的调度方案，始终坚持“确保供水，兼顾其他”的调度原则，按照“前蓄后补”的总体思路进行水量分配，采用“月计划、旬调度、周调整、日跟踪”的调度方式，灵活运用“避涨压退”、“动态控制”、“精细调度”、“打头压尾”等调度技术，做到了总揽全局、精心组织、强化沟通、科学调度。并适时派出工作组强化落实各项调度措施，全力指导开展抢淡蓄淡工作。相关省（自治区）以及电力、航运等有关部门顾全大局、团结协作，严格执行珠江防总水量调度指令，确保了压咸流量。

去冬今春珠江水量调度，珠江防总克服了“降雨稀少、来水特枯、蓄水不足、咸潮加剧、矛盾尖锐”等诸多不利因素，有效地开展了前期水库蓄水工作，成功实施了 10 次集中补水调度。据统计：珠海主要泵站从江河直接取淡 18300 万方，累计供澳门原水约 3600 万方，日均供水量约 21.5 万方，珠海主城区日均供水量约 45.3 万方，调度结束后，珠海水源水库有效蓄水量 1324 万方，不仅保障了澳门、珠海等地区供水安全，特别是澳门回归祖国十周年庆典前后供水量足质优，统筹兼顾了发电、航运、生态等多方需求，圆满完成了 2009~2010 年枯水期珠江水量调度任务，同时为保障澳门、珠海等地 3 月份及后期供水安全奠定了良好的基础。

近几年珠江枯水期水量调度，有效保障澳门、珠海等珠江三角洲地区的供水安全，社会反响强烈，也积累了不少成功的经验，但枯水期水量调度面临的一些难点问题依然存在，每次实施枯水期水量调度都是对珠江防总一次新的考验，这些难点问题突出表现在：

- a. 水资源配置工程体系不完备，调水里程长，调度对象多，技术难度大。

珠江枯水期水量调度上至西江上游天生桥一级水库，下至珠江口，长达 1300 多公里，流程约 7~10 天；涉及的主要水库、水电站有天生桥一级、龙滩、岩滩、

百色、飞来峡等，其中有一定调蓄能力的天生桥一级、龙滩、百色等都位于西江干支流上游，无控区间面积达 22.7 万平方公里。由于调度里程长，无控面积大，如何合理配置水库和区间水资源，保证珠江三角洲指定时间、指定大小的压咸流量，技术难度非常大、风险高。而且影响来水、咸潮的因素多且错综复杂，有些机理在学术领域尚未解决，加上受全球气候变暖，极端气候频发，突发事件时有发生，来水和咸潮预测难度大，大大增加了调度的难度和不确定性。

b. 调度涉及的部门多，缺乏配套的法规或制度，协调难度大。

珠江枯水期水量调度涉及澳门特区和云南、贵州、广西、广东等省（自治区），以及水利、电网、发电企业、交通运输等众多部门。由于没有建立配套法规或制度，各部门间责任不明确，利益和矛盾突出，调度工作往往需要花费大力气开展沟通协调。近年来的水量调度主要是在党中央、国务院高度重视下，在国家防总、水利部的正确领导下，依靠行政命令来实施，即便如此，在实际调度过程中，受部门利益驱动，违反调度纪律情况时有发生，协调管理难度非常大。

⑦ 2010-2011 年枯水期珠江水量调度

2010-2011 年枯季，保障澳门、珠海等珠江三角洲地区供水安全形势仍十分严峻：一是由于《保障澳门珠海供水安全专项规划》近期工程竹银水源工程未能如期在 2010 年底完工，引淡蓄淡重要工程-中珠联围联石湾水闸重建工程亦未完成，下游取淡保供水能力明显不足；二是预测西江枯季天然来水将出现枯水年份（ $P=80\%$ 左右），梧州水文站将出现连续 3 个月月均流量低于 1800 立方米每秒；三是第 16 届广州亚运会在 11 月份召开；四是由“十一五”节能减排等因素导致的水资源配置矛盾依然存在。

针对上述不利因素，为保障供水安全，珠江防汛抗旱总指挥部在认真调研分析珠澳水源工程建设情况、珠澳供水工程现状、广州亚运会用水需求、西江骨干水库工程枯季运行计划以及电网电力负荷等情况的基础上，组织编制了 2010-2011 年枯季珠江水量调度方案，同时，澳门特别行政区政府和广东省防指分别向国务院港澳办和国家防总提出请求，为应对咸潮希望能尽早组织实施流域水量统一调度。

2010 年 12 月 4 日，经国务院同意、国家防总正式批准实施珠江枯季水量统

一调度。珠江防总根据批复的调度方案，在国家防总的指导下，流域相关省（自治区）的支持和配合下，以“保障澳门等地供水安全”为首要任务，按照“前蓄后补、节点控制；上下联动、总量调度”的调度方式，全面部署、科学调度，克服西北江降雨偏少、下游取淡保供水能力不足、水资源配置矛盾突出等不利因素，强化协调和监督，及时派出工作组，适时发出水库调度指令，取得了水量调度的最终胜利，不但圆满完成 2010 年广州亚运会水环境保障任务，而且实现了澳门、珠海等珠江三角洲地区供水量足质优的目标。截至 2 月 28 日，调度期内珠海当地取水系统从河道直接抽取淡水 1.188 亿立方米，向澳门提供原水 2480 万立方米，澳门供水含氯度小于 50mg/L。

⑧ 2011-2012 年枯水期珠江水量调度

虽然珠海当地供水系统建设取得了实质性进展，但 2011-2012 年枯水期澳门、珠海及珠江三角洲地区供水保障形势依然异常严峻：一是西江来水特枯，依据水情部门预测，2011 年 11 月~2012 年 2 月西江梧州水文站天然来水极有可能连续 4 个月月平均流量小于 1800m³/s；二是骨干水库蓄水严重不足，截止 2011 年 10 月 1 日，天生桥一级、龙滩水电站有效蓄水量 12.07 亿 m³，有效蓄水率仅为 7%，与历年同期相比严重不足；三是咸潮出现早且预测咸潮强度大，2011 年珠江河口磨刀门水道挂定角和广昌泵站 7 月底开始出现咸情，比近年来最早出现咸潮活动时间提早了一个月。

针对上述不利形势，根据《珠江枯水期水量调度预案》，珠江防总办公室（珠江委）在认真调研分析珠澳水源工程建设情况、珠澳供水工程现状、龙滩、天生桥一级等水库工程枯水期运行方式以及电网枯水期负荷需求等情况的基础上，组织编制上报了《2011~2012 年枯水期珠江水量调度实施方案》，同时积极督促珠海当地开展竹银等供水水库的前期蓄水工作。

根据《2011~2012 年枯水期珠江水量调度实施方案》，珠江防总办从 2011 年 9 月 15 日起，按照“立足当地、重在前蓄；统筹兼顾、确保供水”的总体工作思路，强化监督和协调，重点做好珠海当地水库的前期蓄水和供水库群的调度工作，并在遭遇不利水雨咸情的 12 月中下旬实施一次集中补水调度，不但保障澳门、珠海等地供水安全，而且有效疏导西江航道长洲水利枢纽滞航船只，使有限水资

源的综合效益最大化。截至 2 月 29 日，调度期内珠海当地取水系统从河道直接抽取淡水 2.24 亿立方米，向澳门提供原水 3676 万立方米。

2011~2012 年枯水期珠江水量调度，再次保障了澳门、珠海等地供水安全，续写了民生水利、公益水利、资源水利的篇章。但在历次调度中，由于流域降雨空间分布不均，调度骨干水库均处于流域上游，面对不同的来水组合，调度手段常显不足，从流域水资源配置而言，地处西江中下游的大藤峡水利枢纽是应对不利情况的控制性工程，西江水资源的重要调配节点。因此，大藤峡水利枢纽建设愈显必要和紧迫。

⑨ 2012-2013 年枯水期珠江水量调度

在各项保障体系尚不完善条件下，为增强珠江流域应对干旱、咸潮及突发事件引发的供水危机的能力，特别是保障澳门、珠海等珠江三角洲地区的供水安全，2011 年 6 月，国家防总批复了《珠江枯水期水量调度预案》（以下简称《预案》）。

2012 年汛期珠江流域来水正常略少，但上游水库蓄水情况良好，珠海广昌取水口首次咸潮较前年晚约一个半月，保障澳门等地供水安全总体形势较为乐观。但据气象水文部门预报，去冬今春西江天然来水出现偏枯的可能性较大，且受极端天气不确定性和电网水电出力受阻等因素共同影响，不排除西、北江来水出现极端情况的可能。珠江防总办根据《珠江枯水期水量调度预案》要求，转变调度方式、拓展流域水资源配置思路，充分考虑澳门及珠海供水系统抢淡蓄淡能力的提高，认真调研分析龙滩、天生桥一级等水库枯水期运行方式以及电网枯水期负荷需求等情况的基础上，组织编制上报了《2012~2013 年枯水期珠江水量调度实施方案》。

根据《2012~2013 年枯水期珠江水量调度实施方案》，珠江防总办于去冬今春，按照“重在当地前蓄，确保供水安全”的水量分配思路，强化监督和协调，重点做好珠海当地水库的前期蓄水和供水库群的调度工作；要求珠江上游骨干水库 2012 年 10 月~12 月期间保障下游所需最低要求，由电网自行调度，2013 年 1 月~2013 年 2 月期间服从珠江防总调度，适时启动动态控制梧州、石角流量补水调度。

调度期内，西江降雨、来水基本符合方案预测，配合上游各水电站按要求调

度的出库流量，确保了澳门、珠海等地去冬今春的供水安全无忧。截至 3 月 26 日，调度期内珠海当地取水系统从河道直接抽取淡水约 1.75 亿立方米，向澳门提供原水约 4000 万立方米。

2005~2013 年，珠江流域开展了九次水量统一调度，经历了特枯、枯、平水等年型枯水期，调度方式也在不断转变，但是一些长期悬而未决的问题却依然存在，主要表现在：

a. 流域中下游控制性工程尚未建设

从近年实施的枯水期水量调度实践看，珠江防总办在流域水资源配置的技术和理念上已经积累了丰富经验，但是抓手不足。西江中下游控制性工程大藤峡水利枢纽尚未建成，流域水资源配置能力和手段不足，无控区间大，预测预报难度大，调度风险大，珠江流域开展流域水资源安全利用配置还面临巨大工程体系缺陷，更难以长期有效确保澳门、珠海及三角洲地区供水安全。

b. 水资源统一管理法制体系尚不完善

从目前支撑珠江流域水资源统一管理的法律法规体系看，虽然《水法》、《防洪法》等对水资源管理有一些界定，但针对珠江流域的特点仍然需要通过相关法律进一步明确流域机构对流域水资源管理的职责；另外国家防总批复的《珠江枯水期水量调度预案》仅是从预案、方案层面对相关法律的补充。因此，为保障流域供水安全，迫切需要加快《珠江水量调度条例》立法进程，进一步加强珠江水量调度管理措施制度化、法制化，使水量调度工作更加有序、有效实施。

（二）水库-闸泵群联合抑咸调度

珠江流域的多次调水大大缓解和基本抑制了近年来的咸潮危害，但目前水资源调度模式与多数水库以防洪、发电为主要功能的调度运行方式不相适应，流域现有的工程措施以及骨干水库的建设在工程的功能设计和运行调度规则中并未考虑抑咸调度的需求，不能充分满足咸潮上溯期抑咸调度的需要。针对咸潮活动情况，利用河口地区现有的水闸、泵站等设施抑制咸潮上溯是保障感潮河口地区饮用水安全和改善内河涌水环境的另一个重要的非工程措施。河口地区的三角洲内河涌众多，水网密布，其容积相当可观。通过对三角洲内河涌闸、泵群的科学调度运用，可进一步发挥河涌的蓄淡能力。为此，在国家水体污染控制与治理科

技重大专项项目“珠江下游地区引用水安全保障技术集成和综合示范”的支撑下，启动了珠江河口的水库-闸泵群联合抑咸调度研究，开启了区域层面的抑咸调度措施的大门，并实施了相应的示范应用，取得了一定的成效，与珠江流域层面的压咸补淡形成互补。

目前，在该领域取得的成果主要体现在以下两个方面：（1）开创性地提出了多汊河口水库—闸泵群联合调度抑咸技术体系理念，从流域和区域两个层面实现水资源调配，经多年的调度实践，证明有效；集成了流域分布式水文模型、枯季河道水流演进模型、流域骨干水库群优化调度模型、河口一二维潮流模型和多汊河口联围闸泵群联合调度模型，构建了多汊河口水库—闸泵群抑咸联合调度模型系统。（2）构建了量质同控的多汊河口闸泵群联合抑咸调度模型，优化确定了联围内河涌引水冲污、开闸蓄淡、释淡抑咸等抑咸关键调度时机，实现了抑咸时长最大、工作量最省、可操作性最强、抑咸效果最好的最优闸泵群联合调控。

（三）竹银水库工程

竹银水源工程是贯彻落实国务院批准的《保障澳门、珠海供水安全专项规划报告》，解决澳门、珠海咸期供水安全的关键工程。工程建成后，可为澳门、珠海东区供水系统增加 4011 万 m^3 调节库容，比现状 6190 万 m^3 增加 65%，澳门和珠海东区供水系统调节库容增加一倍多。工程建成后，可提高珠澳供水系统调咸蓄淡能力、供水保证率和改善供水水质、也可提高应对突发水污染事件的应急处理能力。

竹银水库于 2011 年 4 月竣工，当年即发挥重要作用。2011 年对澳门供水遭遇了前所未有的挑战：西南地区大旱，西江上游无水可调，2005 年以来枯水期一直依赖西江调水压咸、解决澳门供水的条件已不存在；咸潮对珠澳供水影响的时间又提早至 7 月，比往年提前 2 个月，咸潮的强度在最强时段超过 10000 度（饮水咸度在 250 度以下）；而广东降雨又严重偏少。尽管面对这三个不利因素的夹击，但建成的珠海竹银水库“大显身手”，为珠澳供水系统增加 4000 多万 m^3 的调节库容，使澳门和珠海东区供水系统调节库容增加了一倍多。通过省水利厅、珠江防总、省防总和珠海水务部门的科学调度，有效的保障了 2011 年冬和 2012 年春的对澳供水安全。这是 2005 年以来在枯水期第一次没有珠江调水压咸的情

况下，能确保对澳供水安全，竹银水库在关键时刻发挥了关键作用。

（四）大藤峡水利枢纽工程

大藤峡水利枢纽工程坝址位于珠江流域黔江河段桂平市区上游 12km 处的大藤峡峡谷出口，工程开发主要有防洪、航运、水资源配置、发电、灌溉、生态保护等综合利用功能。大藤峡水利枢纽控制西江流域面积 56.4%、西江防洪控制占梧州洪量的 65%，水资源量大，可将枯水期最小流量由 1120 立方米每秒提高到 2250m³/s，增加河道基本水量，将最小压咸流量的保证率提高到 95%，可抵御咸潮，保障澳门和珠江三角洲等地区 1000 多万居民饮水安全；在浔江、西江发生突发性水污染事件时，大藤峡水利枢纽可承担应急调度任务，对保证直接从浔江、西江取水的桂平、平南、藤县、苍梧、梧州等城镇 100 多万居民以及西江下游广东与澳门沿江 2400 万居民饮水安全具有重要作用。

目前，该工程尚处于前期工作阶段。

3.1.4 相关规划与政策、法规

（一）珠江河口综合治理规划

为加强珠江河口综合整治开发和保护，维护珠江河口的泄洪纳潮功能，统筹协调流域和区域防洪、防潮、供水、岸线及滩涂保护与利用、航运、采砂、水生态和环境保护等各方面的关系，支撑珠江河口地区经济社会的可持续发展，依据《中华人民共和国防洪法》，水利部组织编制了《珠江河口综合治理规划》(以下简称《规划》)。2010 年，《规划》得到国务院批准。《规划》对主要水道的采砂进行了控制性规划，提出了可采区和禁采区。按照保障泄洪安全、维护河道稳定、利于河口有序发育的原则，划分了可采河道和禁采河道，规划禁采河道 1147.1km，可采河道 293km。

《规划》指出“咸潮上溯影响加剧，严重威胁供水安全”是河口治理面临的新形势；同时，《规划》提出开展“咸害治理专题研究”的工作需求，拟加强水情和咸情测报能力建设，建立咸潮预报系统，切实加强有关咸潮活动的基础研究，以掌握上游径流、河口地形、潮汐、河口外海区盐度场、风场、近海区沿岸流等多种因素共同作用下的珠江河口咸潮活动规律

（二）保障澳门、珠海供水安全专项规划规划

为从根本上解决咸潮上溯给澳门、珠海等三角洲地区供水带来的问题，保障这一地区长期的繁荣和稳定，珠江水利委员会于 2006 年 2 月开始组织编制《保障澳门、珠海供水安全专项规划规划》(以下简称《规划》)，《规划》于 2008 年通过国务院批复。

《规划》从流域水资源配置的高度，全面审视澳门及珠江三角洲存在的水资源问题，研究流域层面保障澳门、珠海及等三角洲地区供水安全、水生态安全的措施，是全面解决澳门、珠海供水安全问题的根本方案。

《规划》分析指出，影响澳门、珠海供水的主要因素有两方面：一是当地供水工程存在缺陷；二是上游来水偏枯致使咸潮加剧。前者需要通过完善当地工程布局解决，后者是一个受径流量、地形、潮汐等多种因素影响的变量。

《规划》认为，全面解决澳门、珠海供水问题需要采取流域水资源合理配置、完善当地供水工程布局以及加强流域水资源统一管理等措施。但在近 10 年内，影响澳门、珠海供水的磨刀门水道咸潮难以得到有效遏制。

因此，为保障澳门、珠海及三角洲地区近期和远期的供水安全，《规划》拟定了近、远期目标，分期实施。至 2010 年，在全面节水、防污治污、完善当地供水系统等基础上，通过流域水资源统一调度，基本解决澳门、珠海供水安全问题；远期至 2020 年，通过完善以大藤峡等水库为主题的流域水资源配置工程体系和水资源调度管理机制等措施，全面解决澳门、珠海供水安全问题。

目前珠江水利委员会正分三步推进《规划》的落实。第一步是完善流域水资源保障体系，做好流域水资源统一调度管理和水量调度，同时，加强节水防污型社会建设，沿江各省和地区加大节约用水力度，提高枯水期河道基流。第二步完善当地供水系统，兴建水库、泵站，提高蓄淡调咸能力；同时，依法加强水珠江河口的水行政管理，规范各类水事活动，遏制河道下切、咸潮上溯增强的势头。第三步是积极促进大藤峡水利枢纽建设，提高流域水资源调控能力。

（三）珠江水量调度条例

珠江流域连续多年的水量统一调度，有效地应对了咸潮上溯带来的不利影响，缓解了珠江三角洲地区的供水紧张局面，取得了良好的经济、社会、政治和生态效益，积累了丰富的水量调度管理经验。但水量调度管理过程暴露出权责不

清等矛盾，迫切要求立法加强流域水资源统一管理。从 2007 年起，按照水利部部署，珠江水利委员会开展了《珠江水量调度条例》（以下简称《条例》）的立法调研、论证和组织起草研究工作。经多次调研修改、完善，2009 年 4 月，完成了《珠江水量调度条例（送审稿）》及《立法必要性与重要性、可行性报告》等五个技术专题报告的最终稿。目前，相关论证和条文修改完善工作正在有条不紊地开展。

《条例》的出台是为了加强珠江水资源的统一调度，保障城乡供水和水生态安全，实现水资源的优化配置和可持续利用，促进珠江流域国民经济和社会发展。该《条例》明确了立法的宗旨，确立了水量调度的方针原则和适用范围，建立水量调度组织管理体系，明确各有关部门的职责，建立了符合珠江水资源特点的水量调度预案管理机制，以及一套科学合理的调度实施程序和罚则制度。据悉，《条例》还广泛征求了与珠江水量调度管理工作有关的云南、贵州、广西、广东省区人民政府有关部门和南方电网、广西电网等单位意见，进行修改完善。

3.2 珠江三角洲咸潮问题面临的严峻形势

3.2.1 珠江三角洲的咸潮变化正朝不利方向发展

近年来，流域的水文情势发生了明显变化，珠江河口咸潮正朝着不利的方向发展，其上溯强度、影响范围、发生频率和持续时间有不断加剧的趋势，主要表现为：

（1）自然条件下，上游枯季来水总量偏少，关键节点径流量分配比降低，下游河道的径流量减少导致咸潮的提早到来和咸界的整体上移；

（2）珠江三角洲网河区内河床下切，河口区航道疏浚频繁，相关研究显示，河床下切、河槽容积增大将增强咸潮的上溯动力，被认为是珠江河口咸潮上溯加剧的主要因素之一；

（3）同等流量条件下，咸潮上溯时间延长、程度加剧。

2009 年，珠海平岗泵站于 9 月 15 日含氯度开始超标，提早将近 2 个月，咸界较往年上移约 10 公里。2011 年，首次咸潮发生于 7 月 28 日，是有记录以来最早的一次；8 月 27 日，珠澳供水系统的广昌泵站含氯度出现 24 小时连续超标，

较近年来咸潮影响最严重的 2009 年提早一个月；12 月份连续 22 天含氯度 24 小时超标，与往年相同径流条件下相比，取淡几率由 25% 减少为 0%。随着咸潮的持续发生与不断加剧，近十多年来，国内学者对珠江河口咸潮问题开展了大量的研究，但由于水系和咸潮问题本身的复杂性，诸多问题仍未得到解决，例如拦门沙、风对咸潮上溯的作用机理，咸潮上溯对上游关键节点分流比变化、河床下切、海平面上升等影响因素的定量响应关系等，因而无法对咸情变化的主控因素、贡献率、发展趋势等做出科学的判定，难以为流域枯水期水量统一调度提供准确的决策依据。加上区域内用水量增加等因素的综合影响，咸潮上溯仍然是粤、港、澳地区供水安全的主要威胁。

3.2.2 珠江三角洲的现有抑咸对策仍然存在不足

目前，在应对咸潮威胁、保障珠江三角洲及澳门供水安全方面面临的主要问题包括：

（1）由于同等流量条件下咸潮上溯时间延长、程度加剧，抑咸调度难度增大，所需的抑咸流量逐年增加，抑咸效果的可控性和预见性较差；

（2）流域水资源配置能力和手段不足，抑咸对策方式较为单一，在上游骨干水库蓄水不足的年份，现有抑咸调控措施就会显得捉襟见肘；

（3）取水口进一步优化布置的余地较小，以珠海为例，竹洲头泵站已经位于其境内河道的上游边界，继续上移将会带来成本过高等一系列问题；

（4）现有咸潮研究成果主要集中于磨刀门水道，北江、东江下游三角洲咸潮问题研究较为缺乏。

3.2.3 抑咸水量调度相关管理机制和法律、法规不完善

（一）珠江水量调度管理过程中暴露的诸多矛盾

（1）水量调度管理涉及面广、协调难度大。连续多年的水量调度主要是依靠行政手段来实施，但由于珠江中上游各类水库水电站分属不同地区和行业，牵涉部门多，协调难度大，受利益驱动，违反调度纪律，不执行调令的情况时有发生；另外是管理难度大，流域内涉水部门之间职能交叉、缺失，没有形成规范化、法制化的协调机制，单靠行政手段协调各方面的关系难度非常大。例如，在水量调度过程中，就出现过电网企业以行政级别高为由，拒绝派高层领导进行协商，

甚至派一般的调度员参加需要高层决策的调度会商会议的情况；2006年9月在建的龙滩水库违抗调度指令，不按珠江防汛抗旱总指挥部的要求如期下闸蓄水，给调度工作增加了难度；2007年2月初，长洲水利枢纽拒不执行国家防汛抗旱总指挥部和珠江防汛抗旱总指挥部指令，擅自组织围堰，致使梧州流量在2月6日跌至 $1800\text{ m}^3/\text{s}$ 以下，严重影响调度计划。

(2) 临时性应急措施启动手续繁琐，成本高，行政效率低。从连续五年的珠江水量调度实践和效果看，尽管达到了调度目的，但是存在诸多问题：一是临时性调度措施成本较高。一方面，临时性的应急措施会加重电网的调度难度和电厂生产效益，另一方面，因为没有一套预案措施，启动时间与条件无法相互保证，当临时性应急措施启后，存在着上游水库无水可调或可控制的水量不多的情况；二是启动手续繁琐，行政效率低。例如采取行政手段调度每次启动都经国家总理或副总理批示，存在着实施条件和批准程序复杂等诸多因素。因此，要从根本上解决水调与电调的矛盾，达到多方共赢的局面，就应该从管理体制上做到有法可依，强化流域管理机构以及电网调度中心在水电联调中的主导地位，实现“早预报、早部署”，节省方案启动时间，进而减少调度成本，提高行政效率。

(3) 水量调度涉及水库水电站主体利益，需要从构建和谐社会的角度立法加以规范。一方面，《珠江流域水资源规划》对珠江上中游的骨干水库水电站大多没有赋予水资源配置的功能，调度工作涉及政府与企业、公民等利益主体之间的利益关系，采取的措施涉及其利益，因此需要立法予以规范；另一方面，相关法律也没有明确赋予国家防汛抗旱总指挥部在常态下调度水资源的职权，应急调度仅是一种临时性的行政措施，过多地采用，会造成单纯地追求公共利益、公共秩序和公共管理效率，割断了其与保障私人利益、实现社会公平之间的内在联系，割断了程序正义与实体正义之间的内在联系，从而影响行政机关的公信力。

(二) 流域水资源统一管理法规体系不完善以及调度手段薄弱

(1) 目前的水事法规对流域水资源配置及实行统一调度管理的规定并不明确，只能依靠行政命令进行调度。目前的水事法规对以流域为单元的水资源管理和调度作出了规定，但这些规定只是确立一些基本制度和原则。例如，流域管理与区域管理相结合各自的职责权限问题、年度水量分配方案及调度计划的地位和

效力问题、水量调度权限和责任问题不够明确，等等，相关法律没有作出明确规定，因此，需要通过制定行政法规对上述相关制度和具体执行措施作出具体规定。

(2) 新出台的《抗旱条例》未能解决流域机构实施流域水资源统一配置和统一调度问题。2009年2月份新出台的《抗旱条例》建立了一系列重要的抗旱制度，包括规范水量调度应对干旱，保障生活、生产、生态用水，所以立法宗旨与《珠江水量调度条例》基本相同。调水是抗旱的一项重要措施，但《抗旱条例》并不能代替《珠江水量调度条例》：首先，《抗旱条例》调整的对象是因干旱灾害引起的用水短缺问题，而这几年实施珠江水量调度的原因并不是因旱情引起，而是在枯水季节受咸潮上溯影响，加之上游水库电站调度不统一造成的，所以正如《抗旱条例》不能涵盖黄河断流问题一样，《抗旱条例》同样也不能涵盖珠江的咸情问题；第二，《抗旱条例》对抗旱工作主要是实行区域行政首长负责制，流域防汛抗旱指挥机构在抗旱工作中的职责只是负责“协调”，对于跨省区的流域水量调度，没有明确予以规范，没有真正赋予流域机构水量调度职权。因此，根据《抗旱条例》的规定，流域机构无法实现流域水资源统一配置和统一调度。

(3) 珠江水量调度组织机构和职责不清，影响调度工作的正常开展。《水法》虽然确立了流域管理与行政区域管理相结合的水资源管理体制，但流域管理与区域管理之间的关系不顺，职责不清，由于历史的原因，流域机构难于很好地履行维护河流健康、当好河流代言人的职责。另外，目前流域机构实施水资源统一调度的法律地位和职责尚不够明确，对于水库水电站汛期限制水位以下的常态水量调度权，相关法律没有明确国家防汛抗旱总指挥部有权决定。因此通过法律手段，以弥补技术层面和管理中存在的流域水资源配置能力与手段不足问题，调动已建分属不同地区和行业的水库群联调效应，发挥现有工程最大综合效益，使流域水资源优化配置走上法制化轨道。

(4) 调度管理保障机制不健全，执行措施不得力，影响调度的效果。目前对于水资源调度管理的行为规范、行政干预和落实监督检查措施尚缺乏相应制度保障。水法、防洪法对水量调度中责任制规定不明确，相应的违反调度指令的责任追究制度以及监督检查权力、职责规定也不具体，影响了调度效果。例如在珠江水量调度实施过程中，在建的长洲水利枢纽在调度关键期违规截流，下游河道

水位水量急剧下降，调度计划和调水成果受到考验。虽经紧急采取补救措施才扭转被动局面，但根据现行的水法规，对此类违规事件没有行政处罚措施，只能根据行政监察法，由其上级单位给予内部行政处分，这也是目前水行政法规存在的软肋。因此通过立法，设定严厉的行政强制和处罚措施，做到有法可依，为珠江水资源统一调度提供法律保障。

3.3 珠江三角洲咸潮问题未来的应对措施

气候变化、海平面上升和人类活动加剧对咸潮上溯的不利影响是一个长期而缓慢的过程，在这些不利因素的影响下，珠江三角洲咸潮上溯还将继续向不利的方向发展，仍然是粤、港、澳地区供水安全的主要威胁。面对水文情势变化、咸潮加剧和抑咸难度增大的严峻形势，迫切需要对咸潮上溯机理、演化趋势及抑咸对策开展前瞻性的系统研究，为提高流域水资源统一调度与管理水平、保障珠江三角洲及澳门供水安全提供技术支撑。

（一）提升科技支撑力度

咸潮上溯规律、动力机制等基础研究是制定和实施抑咸措施的前提和依据。在过去的十多年里，为了有效的应对咸潮上溯的不利影响，各方对珠江河口咸潮上溯问题开展了大量的研究，但由于珠江三角洲水系和咸潮问题本身的复杂性，诸多相关的科学问题仍然未能得到很好的解决。建议继续开展以下几个方面的基础研究工作：

（1）加强有针对性的原型观测

珠江三角洲及河口水道纵横交错，水情、咸情复杂，并受人类活动和河口与河道的自然演变多种因素的影响，需要及时掌握咸情、研究咸潮上溯活动规律及变化趋势，为御咸、避咸和加强取水管理以及合理安排取水口、保障供水安全服务提供科学依据。建议：一是加强水情和咸情测报能力建设，建立咸潮测报系统；二是每隔 5~8 年安排一次三角洲及河口水下地形测量、3~5 年安排一次枯水期同步水文测验等基础工作。

（2）加强咸潮上溯的宏观规律和微观机理研究

河口咸潮活动规律极其复杂，受到河口动力、自身边界以及人类活动的影响，

包括径流、潮汐与潮流、风、波浪、风暴潮、河道地形、余流、近岸海流等。开展多元动力耦合作用下珠江河口咸潮上溯宏观现象和微观机理的系统研究，明确风、波浪、拦门沙对咸潮上溯过程的影响机制研究。珠江河口民间素有“北风刮，咸水到”的说法，近年的监测资料和研究成果也显示风对珠江河口的咸潮上溯起到了很重要的影响作用，且各口门对风的响应关系不尽相同，但相关研究较少，其具体的作用机理尚不明确；拦门沙是河口特有的地形，对咸潮上溯的影响具有两面性，其综合效应有待进一步研究；波浪是影响河口盐、淡水混合的主要动力因素之一，波-流耦合作用下的盐淡水输移机制是目前的研究热点和难点。

（3）加强珠江三角洲咸情演变趋势研究

开展咸潮与影响因素间的相互作用与反馈机制研究，分解和辨析上游水文情势变化、人类活动（如水库、港口、桥梁等涉水工程建设、航道疏浚、河道挖沙）、海平面季节短周期变化、气候变化影响下的海平面长周期上升和口外环流对珠江河口咸潮上溯的影响机制；结合水文情势变化情况，研究珠江河口咸情变化的特点、主控因素、动力学机制及其发展趋势。在此基础上，对珠江三角洲中长期咸情演变趋势进行有效的评估，为中长期抑咸措施的制定提供技术支持。

（4）加强珠江三角洲咸潮上溯的整体研究

磨刀门水道沿岸分布有众多取水口，是珠海、中山和澳门的主要水源地，其咸潮上溯为题相对较为严重，更具代表性。因而，在以往的研究中，大部分研究成果都针对于磨刀门水道的咸潮上溯，珠江河口其它水域的研究成果相对较少，事实上，珠江河口其它水域也经常受到咸潮上溯的影响。另外，珠江河口各口门动力特性不尽相同，现有研究成果不能简单的移植到其它口门。因此，非常有必要对珠江河口和三角洲的咸潮上溯问题开展整体、系统性的研究，加强其它水域的研究力度。

（5）加强咸潮的动态监测和预警预报技术研究

动态监测与预测预报是科学实施珠江流域枯水期水资源统一调度的数据基础、方法基础、决策基础。在现有基础上，进一步加强咸潮的动态监测和预警预报技术研究，提高咸潮动态监测和预报的精度，延长预警预报的提前时效，从而为更准确、更有针对性的制定抑咸措施提供技术支持。

（二）完善抑咸非工程措施

（1）加强流域抑咸水量调度的科技支持

多年的实践证明，珠江流域的水量统一调度是抑咸的有效措施之一，但多年的实践也暴露出一些问题。在咸情演变趋势不利的情况下，同等流量条件下咸潮上溯时间延长、程度加剧，抑咸调度难度增大，所需的抑咸流量逐年增加；在上游骨干水库蓄水不足的年份，会出现调水量不足，甚至无水可调的局面。在以往的抑咸调度实践中，由于三角洲水系的复杂性和缺少充足的科技支撑，无法明确咸潮上溯强度对调水压咸“洪峰”的定量响应关系，因而所调的淡水资源无法有的放矢，其有效压咸流量和压咸效果具有很大的不确定性，宝贵的淡水资源无法得到高效利用，如何确定最佳的“调水时机”和“调水量”一直都是决策部门倍感困惑的难题，导致调水抑咸效果的可控性和预见性较差。通过加强流域抑咸水量调度的科技支持，可以有效的优化调度方案，从而减少同等压咸效果下所需的调水总量，提高宝贵淡水资源的利益率，缓解淡水资源的供需矛盾。

（2）开展区域抑咸调度的

珠江三角洲网河区河道纵横，除主干河道三江汇流、八口入海、纵横交织、枝杈发育、形成复杂和互动网络之外，在主干堤防联围内部，同样也是河道纵横，内河水流与外江水体之间由闸门“隔离”和“沟通”。在同一个联围内，一般都有几十条内河及几十个与外江水体“联络”的闸门，从而形成了闸群联合调度的基础。此外，在一个联围内部的几十条河道中，一般均有一到二条河道为骨干，骨干河道的宽度约有 100m 左右，容量视长度和水深不同，一般可达 1 千到几千万 m^3 。整个三角洲地区的内河河槽容积十分巨大，如若能够科学利用和合理调度，其对缓解咸潮上溯危害的作用和效果也相当巨大。

实施区域调度抑制咸潮的主要科技问题包括：区域闸群调度技术与二元水资源配置模型的嵌接；区域闸群调度模拟技术；基于线性规划的区域优化调度技术；基于神经网络的区域闸群优化调度技术；区域闸群调度系统集成及优化等。

（3）完善抑咸调度的相关法律、法规

实行最严格的水资源管理制度，关键是要不断完善并全面贯彻水资源管理法律法规，不折不扣地落实各项水资源管理制度，划定水资源管理的“三道红线”

并严格执法监督。对于水资源相对丰富，但时空分布不均的珠江流域，如何贯彻落实这一水资源管理战略，需要因地制宜，实行有针对性的方法与措施。针对珠江流域的枯水期的水资源供需矛盾存在的问题，必须尽快制定《珠江水量调度条例》，加强水资源配置和调度管理，优化各项调度方案，完善调度管理制度，健全调度机制和手段，提高供水能力保障，更好地贯彻落实最严格的水资源管理制度，保障珠江流域城乡生活、生产和生态用水需求，实现水资源的优化配置和可持续利用。

制定《珠江水量调度条例》，有利于强化流域水资源统一调度管理，建立权威、协调、高效的流域水资源统一调度、统一管理的新模式；有利于充分发挥上游分属不同地区和行业的已建工程的最大综合效益，有利于协调各部门和各行业以及上下游之间的利益和矛盾，确保流域的防洪安全和供水安全，推进流域经济社会可持续发展。

（三）加快抑咸工程的建设

建立合理高效的水资源配置和供水安全保障体系，重点推进广州西江引水、珠海竹银水源等水资源调蓄工程建设。

大藤峡水利枢纽可控制西江径流，可与在建的西江长洲水电站联合运用，调度水量 1 天流程到达珠江三角洲，具备灵活的径流补偿调节能力，可以满足西江中下游生态环境流量和珠江河口压咸流量的要求，对保障西江下游、澳门及西北江的供水安全具有重要作用。建议有关各方共同努力，加快大藤峡水利枢纽工程建设工作。

4. 珠江三角洲洪涝灾害的应对与治理措施

在气候变化、海平面上升和人类活动加剧的大背景下，珠江三角洲城市群洪涝灾害的风险概率明显增大，极易造成严重的生命和财产损失。为了保障经济、社会的和谐稳定发展，需及时出台相应的应对措施。

4.1 珠江三角洲洪涝灾害概况

珠江三角洲地处典型的南海季风区，年降水丰沛，但由于时空分配不均，致使洪涝灾害十分频繁，尤以中下游和三角洲地区最为严重。同时，该区域是我国受热带气旋影响最为频繁的地区之一，经常受到台风的正面袭击，且通常伴有狂风、暴雨、暴潮、洪、涝等极端水文气象事件的发生，极易造成严重的自然灾害，并导致严重的生命、财产损失。因此，洪潮灾害历来是珠江三角洲的心腹大患。

（一）洪水灾害

珠江流域暴雨频繁，洪水灾害是流域内发生频率最好、危害最大的自然灾害，尤以中下游和三角洲地区为甚。1915年7月，西江和北江同时发生200年一遇洪水，两江下游及三角洲地区的堤围几乎全部溃决，广州市受淹7天，珠江三角洲灾民378万人，受灾耕地648万亩，死伤10余万人。1915~1949年的35年间，流域内发生受灾耕地面积超过100万亩的洪水22次，其中1947年大水和1949年大水的受灾人口均超过400万人，受灾耕地均超过600万亩；新中国成立后的1959年东江大洪水，1968年和1994年的西、北江大洪水，1982年的北江大洪水，1996年柳江大洪水，1998年的西江大洪水等，受灾人口均超过100万人，受灾农田超过100万亩，其中，1994年6月大水，广东、广西受灾人口近1800万，直接经济损失高达280多亿元。

（二）热带气旋及风暴潮灾害

华南沿海是我国受热带气旋侵袭最为频繁的地区之一，珠江口的风暴潮主要由热带气旋引起。热带气旋灾害主要表现为强大风力直接造成灾害、台风暴雨形成的洪涝灾害以及因强风、低气压所导致的风暴潮灾害。

建国以来，珠江河口地区几乎年年都会受到热带气旋及台风（风力8级以上的热带气旋）的袭击，最大阵风达50~60m/s以上的强台风也不少见，70%~80%

的台风登陆时会带来暴雨和特大暴雨。由于台风灾害突发性强，往往在几个小时内就酿成巨大灾害。据统计，在广东省登陆的台风平均每年达 3.6 个，广东省平均每年台风造成直接经济损失达 46.89 亿元。历史上的 1862 年珠江口风暴潮直接造成 8 万余人死亡；“8309”号台风风暴潮，致使珠江三角洲受灾人口达 120 万人，死亡 45 人，受灾农田 344 万亩；“9316”号台风，致使广东省 11 市 37 县（市）受灾，受灾人口 569 万人，死亡 25 人，受灾农田 306 万亩；2006 年，台风“碧利斯”和“珍珠”给广东带来的严重洪涝灾害，受灾人口超过 740 万，死亡 366 人，直接经济损失 405 亿元；2008 年强台风“黑格比”在粤西登陆后，给广东造成直接经济总损失近 118.25 亿元。

（三）城市内涝

在全球气候变暖的大背景下，世界各地的极端天气灾害明显增多，在我国经济高速发展和城市化进程加快的现状条件下，城市内涝逐渐成为我国的主要自然灾害之一。珠江三角洲属于南亚热带地区季风气候，今后这种极端的区域性的强降水仍会不断发生，甚至可能会更加频繁。以广州为例，改革开放以来，随着广州城区面积的不断扩大，短期的城市内涝呈现出密集多发的态势。特别是进入新世纪以来，广州几乎每年都有城市内涝现象发生，只不过严重程度有所不同而已。2010 年 5 月，广州市在一个月内连续出现 5 次强降水过程，导致市区大面积涝。5 月 7 日凌晨，广州各区普降大暴雨，城市交通随即陷入瘫痪，市中心区域十处严重内涝，有些道路水深竟达 3m，200 多辆快速公交车抛锚，白云机场 138 个航班延误，35 个小区地下停车场遭遇“灭顶之灾”，被泡车辆高达 18000 辆。5 月 14 日，从化、花都、白云等区和市区先后出现强雷雨，99 处发生内涝，50 多条道路出现水浸或积水较深现象，21 条主干道瘫痪，连环城高速路也出现水浸，部分车辆 6h 后还堵在路上。快速公交线路多处被淹，地铁 2 号线因渗水暂停服，广州火车站成为水中车站，天河客运站滞留六七百旅客，白云机场 57 个航班延，上千旅客滞留。2014 年 5 月 11 日，早上 6 时开始，到 16 时全市平均降雨 177.7mm，龙华最大降雨 363.8mm，最大 1 小时降雨量 89.3mm。13 时深圳气象部门发布全市暴雨红色预警，深圳市三防指挥部将防汛 IV 级应急响应提升为 III 级，全市处于暴雨紧急防御状态。大雨之下，深圳市内一片泽国。约 150 处道路积水，宝安

107 国道、龙华新区福荣路、火车北站隧道、南山桃园路等积水超 1m。约 20 处片区发生内涝，其中南山区一甲村、坂田岗头村东新巷、龙华新区工业东路田安大厦、油福新村等内涝严重，深圳大学等多个地方都可以“看海”。城市交通大受影响。截至 21 时，暴雨导致深圳机场已取消航班 130 余架次，延误超过 4 小时的出港航班 70 余班，大面积航班延误红色预警。自 14 时后，广深线动车全线停开，共计 40 对列车停运。因暴雨影响，全市共有近 400 余条线路 5458 辆公交车辆，受场站积水、道路积水无法正常运行，其中，新能源车辆 2693 辆停运；2765 辆常规动力公交车辆根据道路、场站积水等实际情况，部分时段部分路段不能正常运行。约 2000 辆汽车被淹，部分受困车辆人员已得到及时转移。

4.2 面临的主要问题

（一）主流域洪水情势发生变化，口门泄洪任务加剧

珠江流域洪水情势主要发生了两大变化，一是因西江中下游两岸堤防加高培厚，导致洪水归槽现象显著，近年来发生的“9406”、“9407”、“9806”、“0506”大洪水反映出，在上游洪水量级相近的情况下，西江梧州控制站洪水量级不断加大，注入三角洲的洪水量级也随之加大，如三角洲控制站马口断面“0506”洪水洪峰流量达到 $53200\text{m}^3/\text{s}$ ，逼近 1915 年洪水；二是三角洲水道的河床发生了剧烈变化，北江三角洲河床下切严重，北江干流水道及东海水道河段河床平均下切了 2m 以上，顺德水道最深下切达 5m，网河区河道下切的不均匀性导致了两大重要分流节点洪水分流比的改变，西、北江洪水向东四口门分泄比例增加，50 年一遇洪水时三水站洪水分配比增加了 2%，从而加重了北江三角洲部分河道的防洪压力和东西口门的泄洪任务。

（二）台风暴潮影响程度加大，防潮形势严峻

珠江河口面向南海，是台风暴潮灾害多发区，防潮形势严峻。近十多年来，珠江河口台风暴潮影响程度加大，口门暴潮水位多次超历史最高水位，如“9316”号台风，横门水文站潮水位达 2.62m，磨刀门灯笼山水文站潮水位达 2.65m，都超过了历史实测最高潮位；2001 年“尤特”台风来袭，广州浮标厂暴潮水位达 2.62m，超历史最高潮位 0.18m。

另外，台风通常伴有暴雨，在暴潮、洪水和天文大潮同时遭遇的情况下，极易出现稀遇概率洪潮水位，从而造成严重的灾害损失。

（三）城市化引发的内涝加剧，短期内难以改善

在全球气候变化的大背景下，珠江三角洲降水时空分布的不均匀性在逐渐增强，暴雨降雨强度增大且更为集中，极易形成内涝。同时，随着城市化进程的加快，土地利用方式发生了结构性的改变，原来的郊区变为了城区，不透水面积迅速增加，蓄、滞、渗水能力很快减退，增大了地下排水渠道的排涝压力；城市发展长期重地上轻地下，排水管网设施缺乏长远规划，设计标准偏低，目前各主要城市高楼林立，地下排水管网改造的难度非常大。深圳虽然是中国最年轻的城市，但上世纪 80 年代，深圳建市初期也是采用了苏联的城市建设理念，由于苏联降雨较少，排水管道标准较低，这导致深圳排水管道的建设没有充分考虑未来城市发展。因此虽然在 30 多年的时间里，深圳市陆续修建了 13700 多公里的下水道，但遇到特大暴雨，这些管道由于不能及时将雨水排出，经常导致城市多个地区被淹。据介绍，深圳大部分的排水管道是按照 1 年 1 遇来建设的。一年一遇的标准相当于每小时降雨强度约为 50mm，当然无法应对巨大的降雨量。一些地区雨水来不及排走，当然只能汪洋一片。

（四）主流西江缺乏控制性防洪工程调控洪水

西江水系集雨面积 35.31km²，占西、北江流域面积的 88.3%。珠江的洪水威胁主要来自西江，但是，西江中下游无天然湖泊调蓄洪水，《珠江流域综合利用规划报告》所确定的控制性防洪水库，除干流的龙滩水电站、支流郁江上游的白色水利枢纽外，其它均未兴建，沿江防洪只能依靠单一的堤防工程，缺乏调控大洪水的有效手段，中下游及三角洲地区的防洪压力极大。

（五）堤线长、隐患多、标准低、风险大

珠江的堤防总长 1.2 万多 km，普遍提高不够、堤身单薄，不同程度的存在渗水、冒沙及穿堤建筑物老化失修等隐患（包括北江大堤等重点堤防），许多堤段的防洪能力长期处于 10~20 年一遇的水平，还有相当一部分堤防仅能防御 10 年一遇以下的洪水。近年来，随着上游地区堤防建设步伐的加快，洪水归槽现象日趋明显，加大了中下游地区的防洪压力，加之堤线长、防守难，防洪风险不断

增加，防洪形式十分严峻。

（六）河道设障，河口泄洪不畅

侵占河滩地、无序围垦、违章建设涉水建筑物及滥采河砂、向河中倾倒废弃杂物、砂石的现象时有发生，影响了河道泄洪功能的正常发挥及洪水的畅泄入海，加重了局部地区的防洪压力。此外，珠江三角洲河网区及出海口门区的人类活动对防洪造成的影响也较为突出。

4.3 措施及建议

（一）加快西江大藤峡水利枢纽建设

抓紧开展大藤峡水利枢纽的前期勘测设计工作，调整思路，进一步优化枢纽的防洪调度方案，深入论证枢纽的防洪库容规模，研究减少枢纽正常淹没、消除或尽量减少洪水调度期超蓄影响的措施，促进西江防洪工程体系建设。

（二）加强流域洪水调度与管理

成立珠江防汛抗旱总指挥部，加强流域防洪管理的法规体系建设，加大洪水管理力度；开展西江、北江、东江干流和柳江、郁江等西江主要支流控制性水库联合调度运用方案的研究；积极开展珠江三角洲洪水出路安排研究，由被动防御洪水转为主动防御洪水；加快珠江防汛指挥系统的研发工作，继续完善信息采集系统、包括气象产品应用在内的决策支持系统的建设，重点完成洪水调度系统、洪水预报系统和灾情评估系统的建设。

（三）加强基础与专题研究工作

珠江流域经济社会发展较快，水情、工情变化较大，应加强基本资料积累工作，有计划地对重点工程、重点河段、珠江三角洲及河口开展水下地形测量；开展水文同步测验，及时掌握洪水变化情况；开展大洪水调查，掌握洪水特点及洪涝灾害特征。

根据流域洪水的特点和防洪工程总体布局，结合经济社会发展情况，开展防洪区洪水风险分析，研究洪水风险分析方法和评估指标，编制洪水风险图。专题研究西江、北江、东江干流及其支流水利、水电工程调度方案对中下游防洪影响，编制主要江河防洪调度预案。

继续开展人类活动对洪水的影响分析。洪水归槽是珠江近期出现的新情况，应重点加以研究，并分析洪水归槽对下游地区的影响；城市化将直接导致径流洪水的产、汇流条件发生变化，应研究其水文效应对区域防洪、排涝带来的影响；随着全球气候变暖的趋势，极端气候现象有增多的趋势，要加强与气象部门的协作，研究气候变化、海平面上升和海岸侵蚀对水土流失治理、山洪灾害防治和流域防洪的影响问题。

（四）制定城市防涝规划和标准

城市内涝治理不仅是城市排水管网建设问题，而且是事关城市可持续发展、城市生态以及城市运行安全的一个系统工程，治理内涝必须在城市规划、城市建设和城市管理等层面加以综合考虑。只有坚持科学发展观，用科学、长远的眼光来规划、设计、建设和管理城市，才能从根本上消除内涝隐患。

任何城市的排水措施，都只能在一定经济、技术保障下防御一定程度的内涝。无论怎样制定防御标准，理论上都有可能出现超出防御标准的情况。标准得过高，不但不经济，而且也不可能完全实施；反之，假如设计标准越低，城市被淹的可能性就越大，生命财产遭受巨大损失的概率也就越高。因此，如何在高标准和投资效益之间找到一个合理的平衡点，直接影响着能否制定一个科学、合理的防御标准。需开展相应的专题研究进行探讨。

（五）加强灾害预警预报和应急措施能力建设

灾害预警、预报和应急体系的非工程措施建设是城市防灾体系的重要组成部分，也是防御洪涝灾害的重要环节，应当给予足够的重视。

5. 珠江三角洲水污染的应对与治理措施

珠江三角洲是全国经济发展最迅速的地区之一，随着经济的快速发展，该地区的社会发展呈现出农村工业化程度高、城乡一体化进程快等特点。由于工业化进程的加快，社会发展及人口的增加，地区水资源分布与经济发展不协调、水质污染及水生态环境恶化、供排水混杂，造成水源地水质下降。

5.1 珠江三角洲水污染状况及污染源

5.1.1 水污染的现状情况

根据广东省 2001~2010 年水资源公报，珠江三角洲的西江干流水道（肇庆以上）、北江干流水道（芦苞以上）、潭州水道、容桂水道、东海水道、陈村水道、小榄水道、鸡鸦水道、北街水道、磨刀门水道上游、流溪河太平场以上、增江荔城以上等河段水质优良，为Ⅱ~Ⅲ类。西南涌、白坭河、广州西航道、广州前航道、广州后航道、番禺水道，顺德水道、黄埔水道、平洲水道、市桥水道、汾江河、佛山水道、焦门水道上游、崖门水道上游、东莞水道以及东江三角洲网河等河段污染严重，水质长年超标，以Ⅴ类和劣Ⅴ类为主。珠江八大口门，除虎门为Ⅲ类，其余均为低于Ⅲ类水质，主要污染因子为粪大肠菌群。

西江水系在 2006 年以前一直保持在Ⅱ类水，2007-2010 年上半年，水质在Ⅱ类至劣Ⅴ类之间变化，马口、高明断面多次出现Ⅴ类及劣Ⅴ类水质。

北江水系 2008 年底以前一直保持在Ⅱ类水，自 2009 年初以来芦苞断面水质仍维持在Ⅱ类水，三水断面水质在Ⅱ类至劣Ⅴ类之间变化；作为取水比较集中的顺德水道水质 2005 年以前水质维持在Ⅱ类至Ⅲ类，2005 年以后在Ⅲ类至劣Ⅴ类之间变化，顺德水道羊额水厂及南洲水厂取水口段截至 2010 年 3 月水质已达劣Ⅴ类。

珠江前后航道水质近 10 年来一直为劣Ⅴ类，只有个别时段出现过Ⅳ类水；东江自进入广州及东莞后水质变差，在 2003 年以前水质在Ⅲ类至Ⅳ类，在 2003 年以后水质多在Ⅲ类至劣Ⅴ类之间，且多数时间位置在劣Ⅴ类左右。流溪河太平场以上水质较好，太平场以下水质较差，多在Ⅳ类水以下，在进入广州市区后变为劣Ⅴ类；白坭河近十年来水质一直为劣Ⅴ类。

潭江源头段水质为Ⅱ类，从开平至新会河段水质基本是Ⅳ类或劣于Ⅳ类，近

海口官冲河段为Ⅱ类至Ⅲ类，江门河水质为Ⅲ类，天沙河水质较差，在汛期、非汛期和全年期水质均为劣Ⅴ类。

珠江三角洲地区整体水质差，尤其以广州市区、东莞、佛山最为严重、其次是广州增城、广州番禺、广州花都、佛山顺德、深圳，再次是珠海、中山、江门；广州从化、肇庆、惠州截至 2010 年 3 月水质稍好。在整个珠江流域中以珠江三角洲区域水质污染最为严重。日趋严重的水污染所导致的水质性缺水，已成为制约珠三角，尤其是广州市可持续发展的一个重要因素。珠江三角洲城市污水处理设施建设相对迟缓，处理能力远滞后于目前工业、生活污水排放量的增加速度，同时由于历史原因，老城区污水系统没有实施雨污分流，市区 19 条主要河涌充当纳污和输送通道，成为珠三角的有机污染源。据初步统计，该区域工业污染企业约有 1.8 万多家，量大、面广，每年排入珠江的污染物大大超过珠江的自净能力，以致水体无机磷、氨氮含量增加，重金属和有机污染加重。以 GB3838-2002《地表水环境质量标准》标准值为限值，珠三角的主要污染指标按污染程度从重到轻依次为氨氮、COD、石油类、总磷。珠三角诸河中氨氮、亚硝酸盐氮、石油类物质污染较严重。从主要污染因子判定珠江三角洲主要受氨氮、亚硝酸盐氮、COD、石油类等污染，为典型的有机污染。

5.1.2 污染源

珠江三角洲的主要污染源有城市生活污水、垃圾和粪便、工厂的废水废渣、郊区农田含农药和化肥成分的灌溉污水、水陆交通运输的含油废水等。由于各种污染源的影响，珠江三角洲水体主要受氨氮、亚硝酸盐氮、有机物、石油类、挥发酚、汞、砷、氰化物 and 六价铬等污染物污染，其中氨氮、亚硝酸盐氮、有机物石油类等污染较严重，这对居民的饮用水安全、工农业用水质量等无疑是很大的威胁。

（一）工业和生活污染源

珠江三角洲河涌接纳了整个三角洲及其上游的工业废水和生活污水。纺织、印染、制革、铝型材、造纸、食品、五金、电镀和采矿业等高污染企业对珠江水质造成了相当严重的污染。由于珠三角濒临南海，水上交通发达，大量船舶漏油和清洗以及少量来自工业废水及生活污水的油类污染严重。油类污染物具有毒

性，并且在降解中会消耗溶解氧，使水质因缺氧恶化。大部分污水未经处理就直接排放，加重了三角洲部分地区水体的污染，尤其是含汞、铬等有毒元素的废水不仅污染河流水体而且污染河床底泥，给人体健康带来极大隐患。近年，广州市和广州周边地区加大了环境治理和保护力度，工业污染基本得到了控制，在工业总产值逐年增加的同时，工业废水排放量及主要污染物排放量呈下降趋势。

随着珠三角人口的增加和人民生活水平的提高，生活污水排放量呈增长趋势。跨入 21 世纪后，珠江的水质污染已从过去的工业污染转向以生活有机物污染为主。2003 年珠江三角洲废水排放量占珠江流域污水排放总量的 49.7%，且近年来该区域污水排放量又有所增长。同时，珠江流域的 COD 排放也居全国七大河流前列，严重威胁着河流的水质。据统计，每年进出广州港的船舶有十几万艘（次），船舶每天倾倒入广州河段的垃圾达 270 t 之多，每年超过 10 万 t，这也加重了流域的 COD 排放。

（二）农业面源污染

农业面源污染主要包括化肥污染、农药污染和集约化养殖废水污染。随着珠三角人口和经济的快速增长，农业污染源对水环境的影响日益明显。由于该地区大力发展无公害蔬菜和推广使用高效低毒、低残留量有机磷农药，近年来珠三角农药的施用量呈下降趋势，但高产农业的发展却离不开化肥的施用，化肥的施用量呈上升趋势。根据该区自然条件和化肥的施用方式，农业化肥施用量的 21% 左右进入了环境水体，是珠江河段氮、磷污染源之一。

5.2 珠江三角洲水污染问题的治理措施

5.2.1 提升科技支撑力度

珠江河口区河道多为感潮河段，上受内陆径流支配，下受潮汐顶托，水体流动呈复杂的周期性非恒定往复流，污染物容易在珠江河口区域积聚，导致水生态环境恶化、生态功能退化，在这一动态过程中，珠江河口水体的许多重要理化和生物特征都具有特殊性，形成了一个结构复杂、影响因素众多和功能独特的生态系统。因此，复杂河口水动力条件下的污染物迁移转化规律及其对水环境演化的影响机制是河口水环境和生态研究的热点和难点。开展相应的研究，为建立流域

水环境监测系统、科学的制定水质目标管理措施和充分、安全的利用水域的水环境容量提供有力的技术支撑。

5.2.2 完善管理监控措施

（一）加强环保宣传提高公民环保意识

水资源保护是关系整个社会发展与进步的事业，涉及到千家万户，各地区应该联手大力呼唤社会保护水环境，加强行政区域间的互相监督、公共媒体舆论监督、群众监督，确保珠三角水资源保护工作的持续进行。同时进一步提高全民环保意识，使那些在环境问题上不作为的企业损失社会形象，降低其无形资产价值。因此，通过对民众普及环境健康知识，大力提高流域内广大公民的环保意识，发挥公众的监督力，促使工业企业公开环境信息，改变企业和公众对企业环境行为的信息不对称格局，确保公众的知情权和参与权，从而促使企业为树立良好的形象而主动改善其环境行为。

（二）健全法规建设、加大执法力度

《水法》、《环境保护法》、《水污染防治法》等法规条例在以往的水资源保护工作中发挥了基本作用，但这是远远不够的，中央和地方应与时俱进，不断健全相关法律法规。同时还要加大执法力度，强化环境监督管理，严厉打击违法排污企业。建立长效的监督处理机制，包括日常的水质监查、污染物排放监控以及污染及时查究制度，突发污染事件的责任追究制，以及政府官员行政问责制等，对流域实行统一管理。在适宜的地区落实分质供水和水资源收费改革措施。

（三）完善排水管网系统 提高污水处理能力

逐步完善污水处理厂上游工程—污水收集系统，通过完善的污水收集系统减少排入周边河涌的污染物总量，使经济发展与人口、资源、环境协调发展。实行政首首长责任追究制，一手抓治污，将治污落到实处；一手抓城镇污水处理厂建设和运营，尽快建立生活污水处理企业化、市场化和投资运营的市场机制。

（四）加强污染源头控制

污染源头控制是控制污染最根本的措施。源头控制主要是实行清洁生产，比如使用低毒、无害的原材料，改进生产设备和技术，建设循环用水设备，减少污水排放量等。控制农业面源污染合理使用化肥，减少农药使用，同时抓好规模化

畜禽养殖场的污水处理。

（五）提高流域整合管理

流域整合管理活动经常被限制在行政区划界限内，人们很少考虑边界以外的水环境状况。但水体污染等都发生在流域的自然边界内，而不仅仅局限于行政边界。流域是河流的集水区域，它体现了水资源分布及开发利用的地域性特征，水的流动性决定了水是以流域为单元进行汇集、排泄的载体。流域是整体性极强、关联度很高的区域，流域内上游的人类活动最终都会对下游产生影响。因此，对于河流来说，流域才是合乎逻辑的管理单元，而不是行政区域。

对于珠三角的水污染综合治理，应该加强区域（包括流域上的不同省份、城市、城镇）之间的合作，包括与临区、邻省和港澳之间的合作和协作，以防止跨区域的污染问题和纠纷的发生。从整个流域的整体利益出发，统筹安排，这样珠江流域水环境的综合整治才能取得成效。珠江水利委员会可以对整个流域进行全局性的考虑和治理，避免各个行政区域各自为政、互不协调，避免内耗，提高效率，还应避免地方保护行为。

5.2.3 加速工程措施建设

（一）加快环境水利工程建设

环境水利工程包括引水冲污工程、疏浚清淤工程和其它工程。引水冲污工程可调节河道水流量，增加冲污水量，提高水体的自净能力。由于珠江三角洲部分河段底泥已受到重金属和有机物的严重污染，单靠控制排污和增加清水流量难以从根本上改善水质。因此，还必须采取疏浚清淤工程措施，将河床中常年累积的污泥清除，又可清除重金属和有机污染严重的底泥，避免水质遭受二次污染。清淤工程一定要环保可行，避免扰动底泥将其中常年积累的重金属转化至水体中，引起意外事故的发生。

（二）加快生物修复工程建设

由于珠江流域的人口压力不断增加，人、地关系紧张，对流域的过度开发导致湖泊、湿地不断缩小，森林覆盖率逐渐降低，生态环境日趋恶化，严重制约了流域经济的发展。因此，必须建设珠江流域的生态保护屏障，增加河流上游的森林植被覆盖率，加强综合治理，防止水土流失。

修建植物隔离带是减少污染物向地表水体运移的一种方式。植物隔离带有较好的环境效益及经济效益，这是因为植物隔离带不仅防止了水土流失，增加了地表径流的入渗，通过对营养元素的截留利用，减少了排向地表水体的污染物，而且改善了生物栖息地，使得各种岸边生物得以繁殖生长。美国国家自然保护协会建议在岸边分成 3 个植物群带，可取得很好的修复效果，建议用河滩地来建植物隔离带，在污染物排向河流之前起到截留缓冲的作用。

构建人工湿地也是一种净化河水的有效方式。人工湿地的建设，对珠江水质的改善起到“人工肾”的作用，绿地的建设起到了“人工肺”的作用，这对改善珠三角地区气候及大气环境都是十分重要的。污水从湿地系统表面流过，氧通过水面扩散补给，水中所含的溶解性和颗粒性污染物与系统介质和植物根系接触，常用的植物有香蒲芦苇、慈姑、莎草等。人工湿地对 BOD、COD、SS、重金属等污染物的去除效果好，且很少有恶臭和孳生蚊蝇现象。建议在污染河段建设原位、异位和不同布水方式的湿地系统，对河水进行净化。同时，对被污染的水体投入一些可分解有机物的微生物，或者在被污染河道种植可富集某些重金属的植物，它们可以与人工湿地系统联合应用，进一步改善水质。

此外，还可以建设缓冲林带，以缓滞径流沉降泥沙、强化过滤和增强吸附等降低水体污染物浓度。浮岛式和沉箱式生物与生态联合处理系统、生物浮床、增加河道湖塘和海岸湿地面积及生态系统服务功能等都是有效改善河道水环境的技术手段。

（三）加快市政工程建设

为减少城市入河污水排放量，必须加快城市污水收集处理系统的建设步伐，完善与污水处理厂相配套的污水管网，提高城市管网覆盖率。老市区沿河涌布设截污管拦截污水，新城区实行雨污分流；注重市政节水设施和构筑物的推广使用。此外，由于污水处理厂排放出的尾水和污泥中氮磷的浓度高，可能含有微量危险污染物，给水厂排放的排泥水和污泥也含有大量对水环境不利的物质，因此，还必须加强对给水厂和污水处理厂尾水和污泥的处理。