

粤港澳大湾区水环境状况分析及治理对策初探

刘畅¹ 林绅辉² 焦学尧² 沈小雪¹ 李瑞利^{1,†}

1. 北京大学深圳研究生院环境与能源学院, 深圳 518055; 2. 中交天航南方交通建设有限公司, 深圳 518000; † 通信作者, E-mail: lirui@pku.edu.cn

摘要 通过梳理粤港澳大湾区河流、水库、近岸海域的水体污染现状, 分析城市内涝、河流及入海口水量变化问题, 发现湾区水体污染主要由大城市密集的人口和工业活动造成, 不完善的污水处理系统和管理体系使水体污染进一步加剧; 对生态用水的过度侵占是水量问题产生的主要原因。通过总结国际先进湾区完善立法、提高标准、控制排放和保护生态的水环境治理经验, 对粤港澳大湾区水环境的进一步治理提出对策: 1) 提升水资源利用效率, 加强污水处理; 2) 加强海绵城市建设; 3) 控制围垦, 加强生态保护; 4) 加快推进社会经济转型。

关键词 粤港澳大湾区; 水环境; 生态问题; 治理措施

Problems and Treatment Countermeasures of Water Environment in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

LIU Chang¹, LIN Shenhui², JIAO Xueyao², SHEN Xiaoxue¹, LI Ruili^{1,†}

1. School of Environment and Energy, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055; 2. CCCC TDC Southern Communications Construction Co. Ltd, Shenzhen 518000; † Corresponding author, E-mail: lirui@pku.edu.cn

Abstract This study identifies the current situation of water pollution in the rivers, reservoirs and coastal waters in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, and analyzes the issues about urban water-logging as well as the changes in water volume in rivers and estuaries. The water pollution in the Bay Area is mainly caused by the intensive population and industrial activities in large cities. The imperfect sewage treatment system and management strategies have exacerbated the pollution. Water quantity problems mainly derived from the excessive encroachment of ecological water. By summarizing the development experience of the international advanced Bay Area, including improving legislation, raising standards, limiting emissions, and protecting the ecological water environment, this study proposes the following countermeasures for further management of water environment in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area: 1) improving water use efficiency and strengthening sewage treatment; 2) promoting the construction of sponge cities; 3) controlling cofferdams and improving ecological protection; 4) accelerating the transformation of social economy.

Key words Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area; water environment; ecological problem; countermeasures

粤港澳大湾区由广东省的广州、深圳、珠海、中山、佛山、东莞、肇庆、惠州和江门9个城市及香港、澳门两个特别行政区组成, 在“一带一路”倡议和国家“十三五”规划中有重要的战略地位^[1]。良好的水环境对于打造蓝色生态湾区至关重要, 是建

设粤港澳大湾区优质生活圈的重要保障。

粤港澳大湾区坐落在河网密布、海河交汇的珠江三角洲, 自然水资源丰富, 人均水资源量远高于全国人均水平^[2]。近年来, 随着湾区经济的快速发展, 落后的基础设施及管理制度无法满足湾区污水

广东省海洋科技攻关项目(广东省典型海湾红树林生态调查与生态保护模式研究)和深圳市科创委科技攻关项目(JSGG20170824110218769)资助

收稿日期: 2018-12-05; 修回日期: 2019-03-13

处理的需求,导致废水不合理排放,湾区水环境遭到破坏。湾区各类水体普遍被污染,污染物类型多样^[3-12],水质性缺水问题逐渐突显^[13-15]。同时,对水资源的过度开发利用,使得河流碎片化;入海口水动力条件改变,原本平衡的水生态环境被打破^[16-17]。回顾世界先进湾区的发展经历,其水环境大多经历先污染后治理的过程,并已恢复至较好的状态^[18-20]。粤港澳大湾区水环境目前亟需整治,总结先进湾区的治理经验,对粤港澳大湾区水环境的治理具有指导意义。

关于粤港澳大湾区每个城市的水环境问题均有研究报道,但由于“大湾区”这个区划概念较新,对湾区水环境的综合研究目前较少。从整体上分析有利于总结各城市水环境问题的共性及差异,进而整合区域资源,加强城市联动,进行综合治理。本研究基于文献调研法,从水质污染和水量变化角度,总结粤港澳大湾区目前存在的水环境问题。同时,系统地梳理并对比国际、国内及粤港澳大湾区的治理措施,借鉴先进湾区经验,提出粤港澳大湾区水环境治理对策。

1 粤港澳大湾区的主要水环境问题

1.1 水环境污染

1.1.1 河流污染

珠江三角洲人口增长迅速,城市常住人口由1980年的1500多万增至2016年的5720多万^[7],城市居民生活污水量增加。随着广东省产业结构转型以及污水处理和回用技术的进步,珠江流域广东省段废污水总排放量近年来逐步减少^[16,21](图1)。然而,城市快速建设发展导致的管网缺失、产业人口密度高以及布局分散等历史遗留问题尚待解决,河流截污手段单一粗放,治理措施急于求成,未能形成系统的治理体系,即使投入大量的人力物力,污水排放量的减速仍然十分缓慢,水质改善效果甚微^[22-23]。总体上,粤港澳大湾区的河流污染并未减轻,大城市周边的河流污染最严重,新型污染引起广泛关注^[3,4,24-25]。

湾区河流有机污染存在明显的人为污染特征,黑臭水体问题在部分地区依然严重。东江流域上游的有机质成分以自然来源的类腐殖质为主,由东江中游至下游,有机质成分中人为活动带来的类蛋白质成分逐渐增加^[3],总体上呈现由上游到下游有机质污染逐渐恶化的趋势。这与上下游经济发展水平

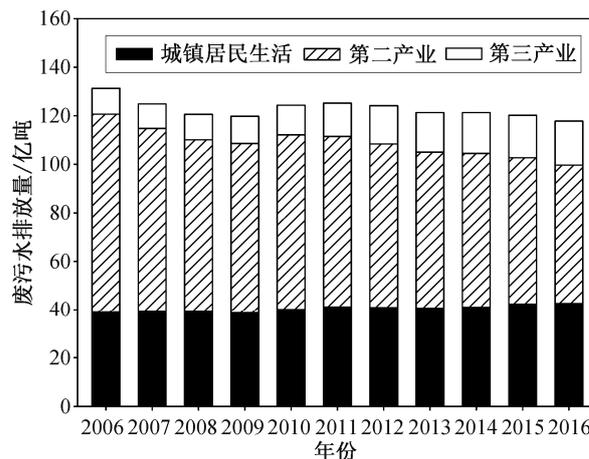
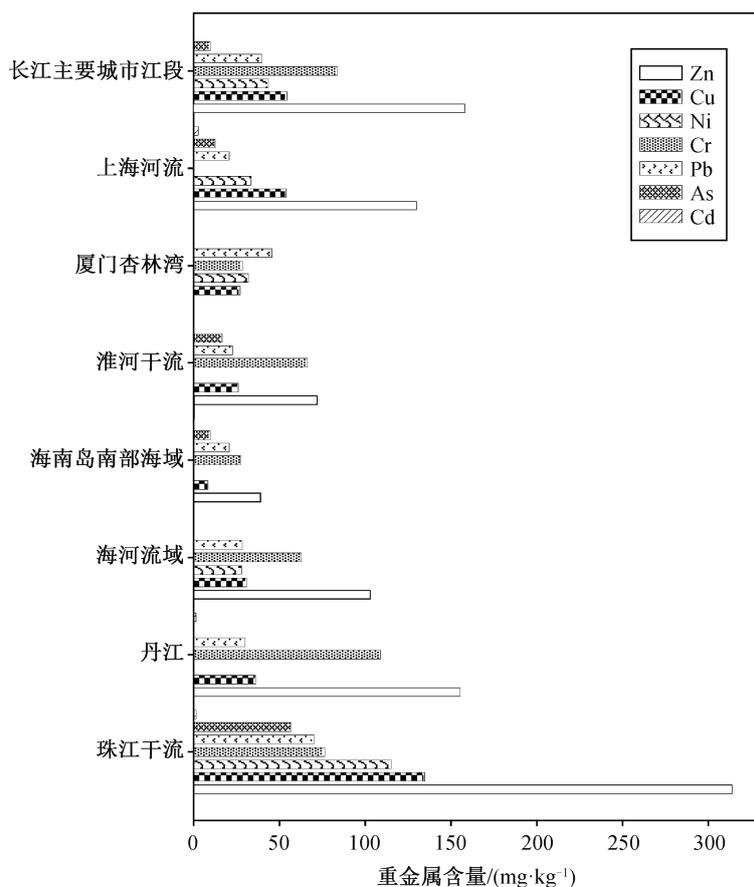


图1 2006—2016年珠江流域广东省段废污水排放量^[16,21]
Fig. 1 Discharge of sewage in the Pearl River basin of Guangdong province from 2006 to 2016^[16,21]

的差异性一致,说明污染物排放、河岸带生境破坏等人类活动是东江流域有机质污染的主要原因。茅洲河是珠三角污染最严重的河流之一,自2005年广东省开始治理以来,污染情况已有所好转。2018年1—4月,部分断面的氨氮、总磷浓度比去年同期下降20%~80%,大部分断面已达到不黑不臭的标准,但是整体上水质仍然劣于地表水V类,底泥淤积严重^[24,26-27]。

河流的重金属污染呈现明显的城市来源特征。珠江干流表层沉积物中的各种重金属浓度明显高于国内其他城市或城市群河段^[25,28-34](图2),将采样点重金属浓度与可能效应浓度的比值作为评价指标,则生态毒性呈现As>Pb>Ni>Zn>Cr>Cu>Cd的规律,且大部分地区各重金属毒性单元总和处于中等毒性水平^[25]。经济发展程度存在差异的不同城市河段重金属污染存在明显差异,经济最发达的广州河段表层沉积物中重金属污染最为严重^[6]。

湾区河流中卤素阻燃剂、内分泌干扰物及抗生素等新型污染物普遍被检出,污染区域集中在工业密集的东莞和广州等城市(表1)。其中,卤素阻燃剂和内分泌干扰物的污染水平较重,抗生素则较轻。珠江流域内分泌干扰物污染从广州市区段至河口三角洲逐渐减弱,且水体和沉积物中的趋势一致^[38]。广州河段和东莞河段的污染较为突出,以酚类雌激素为主^[36];深圳市主要河流中双酚A类雌激素检出率高达96.4%^[37],农药类环境激素15种被检出,以有机氯农药和二硫代农药为主^[39]。卤素阻燃剂的污染则以溴代阻燃剂多溴联苯醚(PBDEs)为

图2 国内主要城市河流表层沉积物重金属平均含量^[25,28-34]Fig. 2 Average content of heavy metals in surface sediments of major cities in China^[25,28-34]

主。以东江部分工业密集河段为例, 水体中PBDEs含量(低溴代阻燃剂(Σ LPBDE)多为196.8~394.5 pg/L, 高溴代阻燃剂(Σ HPBDE)含量高达750.9~3268.9 pg/L)^[5], 与香港邻近海域PBDEs浓度相近^[40], 明显高于旧金山河口水体中的PBDEs总含量^[41]。湾区抗生素污染程度较轻, 东江流域上游的抗生素浓度(nd~69.9 ng/L)相较于其他地区河流处于中等偏低水平, 但是被检测出的抗生素种类, 检出率都较高^[4], 说明抗生素残留的现象十分普遍, 应当引起重视。

1.1.2 水库污染

粤港澳大湾区天然湖泊面积仅13 km², 天然蓄水能力不足, 湾区城市及周围地区的水库是重要的供水来源。湾区11座城市共有11座大型水库和119座中型水库, 这些水库在湾区的灌溉、防洪、供水和娱乐等方面发挥着巨大作用。其中, 香港的18座饮用水水库可为香港提供150日的用水量, 另外一些水库用做供应灌溉水、咸水和供市民娱乐。因此, 湾区水库良好的水质对确保粤港澳大湾区的供水安全、生态保障以及区域经济稳定可持续发展

有重要意义。

水库水体流动性差, 富营养化是其最常见的污染问题, 引发的蓝藻水华危害也是最复杂难以解决的环境问题之一^[42]。富营养化不仅会严重地破坏水库生态系统结构, 减少生物多样性^[43], 所产生的有毒物质还会影响水质, 威胁饮用水安全^[44], 影响供水保障。近年来, 粤港澳大湾区区域水库中富营养化和蓝藻水华事件频发, 成为水库日常管理中的主要问题, 湾区11座大型水库大部分处于中营养水平至富营养水平(表2)。流域范围内氮、磷等营养元素的排放已大大地超过水库的自净能力^[48-49], 按照目前的氮、磷排放模式, 富营养化将持续加剧。如大沙河水库2000年处于中营养水平, 2011年已接近富营养水平^[47]。水库周围农业种植及规模化禽畜养殖造成的肥料、农药流失以及上游河流生活污水排放等人为污染是造成水库富营养化进程加剧的主要原因, 水库水质监测力度不足、管理工作落实情况差等也是重要的因素^[45,50]。

大湾区水库水体还存在重金属污染问题, 周围

表 1 珠江流域河流污染相关研究汇总
Table 1 Summary of river pollution related studies of Pearl River basin

河流	污染物种类	水体中污染物浓度		污染物水体预测 无效应浓度	文献	
		水相	颗粒相			
东江工业密集河段 (广州-东莞段)	卤素阻燃剂	多溴联苯醚(PBDEs)	47.7~98.9 pg/L	196.8~3268.9 pg/L	—	[5]
		四溴双酚 A(TBBPA)	1111.6~2830.4 pg/L	nd~26.1 pg/L	—	
		十溴二苯乙烷(DBDPE)	13.0~37.7 pg/L	384.3~1716.9 pg/L	—	
		德克隆(DP)	1.2~3.3 pg/L	234.5~775.2 pg/L	—	
		六溴环十二烷(HBCDs)	9.5~82.4 pg/L	nd~194.7 pg/L	0.031 µg/L	
东江上游	抗生素	磺胺嘧啶(SDZ)	15.4~27.6 ng/L	—	0.135 µg/L	[4]
		磺胺间甲氧嘧啶(SMM)	18.3~35.4 ng/L	—	1720 µg/L	
		诺氟沙星(NFX)	23.1~63.9 ng/L	—	0.016 µg/L	
		环丙沙星(CFX)	15.8~19.3 ng/L	—	5 µg/L	
		氧氟沙星(OFX)	22.8~51.4 ng/L	—	1.08 µg/L	
		头孢氨苄(LEX)	15.4~31.3 ng/L	—	1 µg/L	
		青霉素 G(PEN G)	16.8~25.7 ng/L	—	0.004 µg/L	
		泰乐菌素(TYL)	15.4~32.3 ng/L	—	0.024 µg/L	
		氧四环素(OTC)	18.9~34.9 ng/L	—	0.11 µg/L	
		四环素(TC)	15.4~71.6 ng/L	—	5 µg/L	
珠江广州河段及 东江东莞河段	多环芳烃	林可霉素(LIN)	15.4~19.5 ng/L	—	0.05 µg/L	[35]
		4-壬基酚(NP)	39~319 ng/L	23.2~108 ng/L	333 ng/L	
		双酚 A(BPA)	13.7~91.2 ng/L	2.3~97.6 ng/L	1500 ng/L	
深圳主要河流	内分泌干扰物	雌酮(E1)	nd~1.2 ng/L	nd~0.32 ng/L	—	[36]
		双酚 A(BPA)	nd~6.042 µg/L	—	—	
		17β-雌二醇(E2)	nd~0.0116 µg/L	—	—	

说明：“—”表示研究中未给出数据, nd 表示未检出。

表 2 粤港澳大湾区水库富营养化状况
Table 2 Eutrophication of reservoir in Guangdong-Hong Kong-Macao Great Bay Area

水库	地址	库容/10 ⁸ m ³	TSI	富营养化水平	参考文献
清林径水库	深圳市	1.86	—	—	
流溪河水库	广州市	3.87	32.5	中营养水平	[48]
显岗	惠州市	1.38	53.0	富营养水平	[50]
白盆珠		12.20	30.5	中营养水平	[48]
天堂山		2.43	—	—	
大沙河	江门市	2.58	49.9	中营养水平	[47]
镇海		1.10	54.6	富营养水平	
锦江		4.18	34.6	中营养水平	
大隆洞		2.99	36.9	中营养水平	
万宜水库	香港	2.81	—	—	
船湾淡水湖		2.30	—	—	

说明：“—”表示部分数据无近期报道, TSI 表示富营养化指数, TSI<30 表示贫营养, 30<TSI<50 表示中营养, TSI>50 表示富营养。

土地利用方式是重要影响因素。在广东省的44个大型水库底泥中,重金属Cr, Cu, Zn, Pb和Cd的浓度均明显高于土壤背景值,表现出明显的富集特征,潜在生态风险较低^[12],但仍需引起重视。许多大中型水库周边存在不同程度的开矿、挖路、种植和养殖等活动,是向水库水体输入重金属,带来重金属潜在生态风险的主要原因^[12]。

1.1.3 近岸海域污染

近岸海域是具有较高生产力的生态系统,对地区的经济发展和生态保护十分重要。粤港澳大湾区近岸海域水质较差,基本上劣于第四类海水水质标准。湾区营养盐污染严重,2017年发生赤潮5次,累计面积达91.2 km²,其中,深圳和惠州都是赤潮多发区^[51]。无机氮污染程度高于无机磷和活性磷酸盐,富营养化水平处于磷限制潜在性富营养水平^[52-53]。大亚湾、大鹏湾和川山群岛等人口密度较低的海域水质较好,符合I类或II类海水水质标准^[54]。湾区近岸海域的污染主要为陆源输入,2017年珠江携带入海的污染物总量为325.2万吨,比2016年增加122.5万吨,主要体现在化学需氧量的增加(表3)。广州和东莞等城市经虎门排放的污染物是主要的陆源污染源,珠海、澳门和香港管辖海域带来的污染物则较少^[8]。超标排放问题依然存在,2017年珠三角地区沿岸的32个入海排污口中,有5个排污口存在排放超标现象,超标指标为化学需氧量、氨氮和总磷等^[51]。

湾区近岸海域水体中重金属污染主要受人为因素和季节因素的影响^[55]。由于污染源不同,不同入海口重金属污染状况存在较大的差异,如崖门主要受Pb, Co和Zn的污染,鸡啼门Cd污染比较严重,而磨刀门各种重金属含量都比较低。从季节来看,珠江口水体中重金属的浓度在秋冬季枯水期显著高

于春夏季丰水期。湾区近岸海域的表层沉积物同样受到明显的陆源人为污染^[56],其中Cr, Cd, Cu, Pb和Zn等重金属的平均含量均高于国家(GB 18668—2002)I类沉积物质量标准限值^[9],含量较高的区域分布于虎门、磨刀门和鸡啼门附近。

电子信息、垃圾拆解等特殊产业的蓬勃发展,使得粤港澳大湾区的新型污染问题备受关注。卤素阻燃剂、全氟化合物、多环芳烃及微塑料等污染均有报道,且都呈现明显的陆源污染特征。珠江入海支流中PBDEs的同系物组成成分呈现与入海口一致的特征^[57];紧邻珠江的香港西岸海域沉积物中微塑料的含量显著高于东岸^[58],水体中却没有明显差异^[59],均表明珠江是主要污染源。从污染程度来看,粤港澳大湾区的PBDEs污染程度显著高于国际及国内的其他湾区,珠江支流PBDEs浓度为0.34~68 ng/L^[57],香港海域水体中为31.1~118.7 pg/L,悬浮颗粒物中为25.7~32.5 pg/L^[60-61],澳门虽污染源较少,但由于洋流等作用,成为PBDEs的“汇”^[62]。瑞典沿海水体中PBDEs浓度小于1 pg/L^[63],荷兰部分海域水体中PBDEs最大含量仅5.6 pg/L^[64]。湾区沿海沉积物中PBDEs污染亦明显严重于渤海湾和长江三角洲地区^[65]。全氟化合物^[66]和多环芳烃^[67]等持久性有机污染物在深圳近岸海域也有检出,与其他海域相比,污染程度较轻,生态风险小,但仍需引起重视。

1.2 城市内涝

粤港澳大湾区的城市内涝程度和分布范围持续增长。2010—2014年,粤港澳大湾区发生的较大城市内涝灾害共107次,5年间频率和规模均逐渐增加。其中,广州、深圳和东莞城市内涝问题最为严重,多达66次^[68]。造成城市内涝的原因,一方面是全球气候变化、极端天气次数增多以及湾区城

表3 2012—2017年珠江携带入海污染物量^[54]
Table 3 Amount of pollutants carried by the Pearl River into the sea from 2012 to 2017^[54]

年份	化学需氧量 COD _{cr}	氨氮 (以氮计)	硝酸盐氮 (以氮计)	亚硝酸盐氮 (以氮计)	总磷 (以磷计)	石油类	重金属	砷	合计
2012	46.46		18.45			0.98	0.37	0.07	66.33
2013	53.62	1.51	31.89	2.57	2.01	1.13	0.29	0.05	93.06
2014	116.28	2.28	51.41	2.43	2.48	1.22	0.48	0.06	176.64
2015	191.33	3.84	42.33	2.67	1.88	1.27	0.29	0.06	243.68
2016	152.11	2.82	41.20	2.74	2.40	1.16	0.27	0.06	202.76
2017	267.24	2.74	47.97	2.32	4.35	0.31	0.29	0.05	325.27

说明:2012年珠江携带入海污染物量中仅给出营养盐总量18.45万吨;重金属包括铜、铅、锌、镉和汞。

市天然排水条件不理想等自然因素,另一方面是城市开发导致的城市下垫面硬质化、排水系统初期建设容量不足以及扩建不及时等人为因素。暴雨内涝灾害造成的经济损失严重,如 2014 年 5 月 23 日广州市的暴雨灾害直接造成经济损失 7 亿多元^[69]。近年来,随着香港主要排水道工程和乡村防洪计划相继完成,香港的内涝黑点已由 1995 年的 90 个减少至 2018 年的 6 个,虽然新界北部仍时有内涝发生,但是程度大大减弱,雨势减弱后几小时,内涝便可退却。由于沿河岸防洪工程建设程度不足,且常有风暴潮、天文大潮和强降雨等天气,澳门滨海区域常有内涝发生,浸水深度达 0.6~1.0 m^[70]。目前,湾区各个城市都投入大量的人力物力,针对内涝进行整治,并取得一定的进展。如广州市 2014 年建立中心城区城市内涝监测、风险评估和预警系统,风险评估准确率达 70% 以上,对城市易涝点风险等级评估准确率达到 72% 以上^[71]。但是,城市扩建带来新内涝点的速度远超城市内涝整治^[68]。

1.3 水文特征的改变

在人类活动不十分剧烈的情况下,河道来水来沙与河床的冲淤维持着一种自然的动态平衡关系。近年来,联围筑闸^[72]、无序采砂和航道整治等人为活动加剧,珠江三角洲来水来沙急剧下降,河流河床形态发生很大变化^[73],水利建设工作变得困难重重。1999 年以来,西江干流河道及北江干流河道一改过去淤积为主的河道状态,由淤转冲,河道下切严重。支流河道也普遍呈下切状态,程度不均^[74]。河道的改变进一步导致珠江三角洲网河区水动力条件和潮汐特征的变化^[75]。各河流河道纳潮能力增加,径流动力相对减弱,潮位下降,涨潮历时增加,潮区界和潮流界明显上移^[76]。海湾水文条件明显受大规模围填海的影响,容量和纳潮量有所减少,海水自净能力降低,使得近岸海域水体污染加剧^[77]。

2 国内外典型湾区的治理措施及启示

2.1 国际先进湾区水环境治理历程

2.1.1 纽约湾

纽约湾区由美国纽约州、康涅狄格州和新泽西州的 31 个郡县组成,为世界第一大经济中心。20 世纪 60 年代以前,该区域最重要的河流之一——哈德逊河污染严重^[78]。河水因大量未处理废水的排入而厌氧发臭,鱼类死亡,有毒化合物在食物链中大量富集。1965 年,纽约州开始进行废水处理。

1972 年《清洁水法案》出台,随后哈德逊河国家河口研究保护区建立。1987 年,成立哈德逊河河口项目,引入社会各方机构合作治理。2009 年,美国环保署开始清理哈德逊河被多氯联二苯(PCB)污染的底泥。2013 年 5 月,纽约州污水排放知情权法案颁布,规定生活污水溢流现象必须在两小时内通知纽约州环保部,4 小时内通知公众。2014 年,纽约州环保部和纽约市政府拟通过 10 个水体专项长期整治计划和一个城市计划,在未来每年减少 8.4 亿加仑的合流溢流污水。同年,纽约州环保部通过哈德逊河河口生境恢复计划,拟实施 5 项行动计划来提高河口生态系统的健康状况。目前,哈德逊河的水质基本满足每毫升菌落数小于 60 的游泳标准,58% 的海岸线呈天然植被状态,为野生鱼类及鸟类提供 1285 hm² 的潮间带沼泽地和 1879 hm² 的潜水栖息地,成为大西洋沿岸最清洁、生态环境最好的河口之一^[79]。

2.1.2 旧金山湾

旧金山湾位于美国西海岸加利福尼亚州北部,是加州供水系统的核心,20 世纪 60 年代以前水环境污染严重,汇集上游淡水流域带来的大量污染物,被称为散发恶臭的垃圾堆^[80]。1961 年,公民组织“拯救湾区”活动,反对在旧金山湾区进行填海造陆,由此开始对旧金山湾的保护。20 世纪 60 年代起,美国联邦政府及州政府通过并实行《清洁水法案》、《史蒂文斯渔业养护与管理法案》以及《加利福尼亚亚特科隆水质控制法案》等一系列法案。目前,社会各方力量都开始关注旧金山湾水环境的治理,如美国环保署与美国陆军工兵部队共同推进《清洁水法案》湿地管理项目、旧金山湾长期管理战略和三角洲长期管理战略,并与美国鱼类及野生动物局和国家海洋渔业局共同保护旧金山湾的濒危物种,同时将美国地质调查局的水质和栖息地研究应用于湾区的保护。经过综合治理,旧金山湾区的水环境摆脱了严重污染的状况^[19]。

当前,旧金山湾区水环境中多氯联苯(PCB)和重金属等污染物依然存在^[81-82],许多新型污染物也被发现。旧金山湾的 8 个污水处理厂每天排放约 700 万个微塑料,其表层水中微塑料含量达 70±60 万个/km²,远高于世界及美国其他地区^[83]。湾区鸬鹚和海豹体内的全氟辛烷磺酸(PFOS)含量在全世界处于最高水平,沉积物和水体中 PFOS 前体化合物的浓度高于 PFOS^[84]。针对目前旧金山湾存在的

水环境问题,美国环保署拟定计划,从加强河口栖息地保护和区域水质监测、通过控制最大日负荷总量推进水质恢复以及阻止农药污染等方面,进一步推进湾区水环境的改善。

此外,在供水保障方面,由于对非本地水源的依赖,气候波动对用水的影响越来越大,旧金山湾区生活用水的保证也变得越来越困难且价格昂贵,2012—2015年美国加利福尼亚州的干旱天气曾使得旧金山湾市政用水十分紧缺^[85]。2016年以来,在实施强制性节水政策的基础上,旧金山湾积极开展废水循环再生技术和海水淡化技术,加上厄尔尼诺现象带来一定的雨水,供水问题得到有效的缓解。

2.1.3 东京湾

东京湾位于日本本州岛中东部,由于土地稀缺,曾经进行大范围的填海造陆,建成京滨和京叶两大临海工业基地。工厂大量排污,海湾的营养盐负荷过高且海水自净作用减弱,使得富营养化成为严重的环境问题,水质污染日益严重。20世纪60年代,日本开始重视环境保护问题,颁布《公共水域水质保护法》、《工厂排水控制法》、《防止公害基本对策法》、《水污染防治法》、《公用水面环境标准》和《废水排放标准》等一系列法律和标准。20世纪70年代开始,东京、川崎、横滨、千叶和木更津的港口部门及国土、公共管理、交通和旅游部门开始对自然及人为产生的海上垃圾进行打捞。现在的东京湾建立了完善的水质实时监测系统,日本全国有9000个公共水域监测点,监测数据在线开放,接受公众监督,东京湾封闭海域则实行总污染物负荷控制系统来保障水质。

回顾世界先进湾区的治理历程,有如下共同点(表4):1)各湾区水环境治理经历了法律和规章制度的颁布和改革过程;2)公众参与及地区间合作在治理过程中有重要作用;3)生态的同步保护是治理措施长久有效的保障。目前,世界三大湾区仍存在亟需解决的水环境问题,如旧金山湾的新型污染问题及水资源短缺、东京湾的围填海等,值得粤港澳大湾区从中吸取教训。

2.2 国内主要湾区水环境治理历程

我国主要湾区均处于发展阶段,对水环境的治理和保护普遍落后于经济的发展,但总结和归纳其水环境问题及治理措施,对解决粤港澳大湾区水环境问题有重要的借鉴意义。

表4 国际先进湾区与国内湾区水污染治理措施对比
Table 4 Comparison of international advanced bay area and domestic bay area water pollution control measures

湾区	治理措施	文献
纽约湾	1. 颁布《清洁水法案》	[20]
	2. 建立哈德逊国家河口研究等保护区	
	3. 扩建污水处理系统	
	4. 创建哈德逊河口项目,与社会各方机构合作	
	5. 颁布《纽约州污水排放知情权法案》	
	6. 控制合流溢流污水	
	7. 哈德逊河口生境恢复计划	
旧金山湾	1. 颁布《清洁水法案》等法律	[86]
	2. 与社会各方机构合作	
	3. 保护濒危物种和湿地	
东京湾	1. 颁布《公共水域水质保护法》等法律	[87]
	2. 打捞海上垃圾	
	3. 兴修污水处理厂、化粪池等设施	
	4. 建立污水实时监测系统	
国内湾区	1. 建成区黑臭水体整治	[88, 89]
	2. 污水处理设施扩建及升级	

2.2.1 渤海湾

渤海湾位于渤海西部,为陆地环抱的浅海盆,周围分布北京、天津和秦皇岛等城市。经济快速发展时期,渤海湾城市污染物排放量逐年增加,使得湾区水环境污染严重,近海海域赤潮灾害频繁发生,渔业资源衰退。目前,渤海湾区的工业格局已由高耗能、高耗水的重工业逐步向轻工业转移,对环境的破坏和资源的消耗都在减轻,但渤海湾近岸海域的污染状况仍十分严峻。入海河口、北塘排污口和大沽排污口是渤海湾水体污染物的主要来源。污染物以COD为主,其次是无机氮、无机磷、石油类以及重金属汞、镉、铅、砷、锌和氰化物^[90]。

2008年以来,天津市已完成“水环境专项整治”、“清水工程”和“清水河道行动”项目,累计投资400亿元。2016年起,开展第4轮水环境综合治理,主要解决劣V类水体、建成区黑臭水体和近海海域水质保护等问题^[88]。目前,已经初步完成总长117 km的25条黑臭水体的河道治理工作。2016和2017年分别对55座和53座污水处理厂进行提升改造,极大地提高了天津市废污水处理能力,有效地改善了出水水质。

2.2.2 胶州湾

胶州湾位于山东半岛南岸,黄海西部,是典型的半封闭型海湾,沿岸城区分布着青岛市工业基地。该区域排水系统落后,污水集中治理设施薄弱,大量的生活污水和工业废水直接排放,带来的陆源

化学污染物占胶州湾污染物总量的 95%以上^[91], 导致湾区水质恶化和富营养化等问题日趋严峻。针对胶州湾严重的水质污染问题, 有研究提出, 应对青岛市老工业区落后的排水系统进行改造升级, 扩建及新建污水处理厂; 应取缔重污染工业企业, 加强排放源的管理管控^[92-93]。2017年, 青岛市完成建成区 14 处黑臭水体的改善与 87 个水污染防治工程, 对全市 420 家重点涉水企业和 13 个省级及以上工业聚集区进行污水处理设施的建设及改造, 对部分城市污水处理厂和水务公司进行升级。青岛市正逐步实现污水集中处理和在线监控, 消除城区污水直排。

2.2.3 环杭州湾

杭州湾位于浙江省东北部, 是浙江省的经济核心区。2010年, 杭州湾排污入海的污水处理厂共 24 座, 海洋环境管理存在明显的缺陷^[94]。随着杭州湾入海污染物总量持续增长, 湾区海域常年以劣Ⅳ类海水为主, 水质状况极差。威胁最大的污染物为无机氮, 其次为活性磷酸盐^[94]。上海市位于杭州湾东北部, 处于入海口位置, 是杭州湾重要的经济中心, 也是水污染的主要来源。2006—2008年, 上海市全面实施“万河整治”工程, 累计完成 23245 条段, 共计 17067 km 中小河道的整治, 疏浚土方 16863 万 m³, 使得上海市周围乡村水环境显著提升。2017年, 上海市针对中小河道进行水质整治, 基本消除中小河道的水体黑臭现象, 水域面积也有所增加。2018年, 上海市提出到 2020 年要全面消除劣Ⅴ类水体, 并及时启动劣Ⅴ类水体治理计划, 水环境整治工作稳步进行。

国内湾区的水环境治理目前集中在城市黑臭水体的治理和废污水处理能力的提升方面, 重点改善湾区大城市的河流水质, 与国际先进湾区水环境治理早期阶段的治理措施相似。对法律完善、公众参与、源头控制、水质监测和生态保护等方面重视还不够, 对近岸海域水环境的治理也不足。粤港澳大湾区也存在同样问题, 应该总结经验, 认识到水环境治理的多元性, 从管理、监测和生态保护等多方面共同推进湾区水环境治理, 实现蓝色生态湾区的建设目标。

3 粤港澳大湾区水环境治理对策

水体污染是粤港澳大湾区重要的生态环境问题之一, 水环境的治理也一直是湾区各城市环境治理的重中之重。2017年, 深圳市累积投资 197.9 亿元,

启动 468 个治水提质项目, 160 个已完成, 新建污水管网 2009 km, 完成小区正本清源改造项目 1464 个, 综合整治 106 条河流, 消除 59 个城市内涝点。广州市在 2018 年新建污水管网 3430 公里, 新建成污水处理厂 3 座, 全面推行河长制和湖长制, 实现农村生活污水治理行政村全覆盖, 35 条黑臭河涌基本消除黑臭。惠州市 2018 年建成 5 座污水处理厂, 新增截污管网 310 km, 建成 104 个自然村污水处理设施, 并完成沙河全流域禁养区划定。香港环保署目前正制定执行《水污染管制条例》、污水收集整体计划及净化海港计划, 从针对污染源、铺设污水渠和收集处理污水 3 个方面进一步改善水污染问题, 通过《后海湾(深圳湾)水污染控制联合实施方案》和《大鹏湾水质区域控制策略》等计划, 与深圳市合作保护湾区水环境^[95]。澳门环保署通过截污工程建设来改善黑沙环沿岸及鸭涌河的水质, 初步改善后, 拟通过生态修复, 进一步解决重污染淤泥与景观美化问题^[96]。

目前湾区城市均大量采用单一粗放的“箱涵截污”方式净化河流水质, 使得清污、雨污不分, 截污效果大打折扣。同时, 各个城市的管网缺口仍然巨大, 如深圳市仍有 2353 km 尚未补齐。另一方面, 各个城市治水管理方面问题突出, 生态环保部对城市黑臭水体治理督察结果表明, 广州市有 102 条黑臭水体未上报, 其次是深圳市(80 个)。与其他城市相比, 香港的水环境治理开始较早, 在加强污水管网铺设和污水回收的同时, 整治工作逐步转向针对污染源和雨污分流的发展方向。

粤港澳大湾区已投入大量的人力物力进行水环境的治理, 但水环境问题依然存在。结合国际先进湾区成功治理水环境的经验及目前国内其他湾区面临的水环境问题和采取的措施, 本文对粤港澳大湾区水环境的治理提出如下对策。

1) 提升水资源利用率, 控制污染, 加强水环境的综合治理。广东省 2017 年单位 GDP 用水量为 67 m³/万元, 比 1997 年下降 87.8%, 但仍远高于国际先进湾区(东京: 2.16 m³/万元; 纽约: 3.54 m³/万元; 旧金山: 4.31 m³/万元)。粤港澳大湾区应合理分配各地区水资源量, 避免不必要的浪费和区域性水资源不足, 在保障各地区供水需求的同时, 提升水资源利用效率。东京、纽约和旧金山的污水管网密度分别为 15.19, 15.30 和 11.94 km/km², 污水收集处理率基本上达到 100%。粤港澳大湾区应进一步加强城

市污水管网和污水处理厂建设,提高水质标准,逐步从粗放截流向雨污分流和废污水100%处理的方向迈进。此外,须认识到水环境治理的多元性,从立法、管理、监测、监督和生态建设等多方面共同推进,实现蓝色生态湾区的建设目标。

2) 加强海绵城市建设。为解决湾区城市内涝问题,应继续扩改建老城区容量不足的排水系统,增加渗水路面、绿色屋顶、植草沟和生物滞留池等绿色设施。在新城区的建设规划中,应合理地预期排水系统容量,重视城市绿色设施的建设,从而增加粤港澳大湾区城市的蓄排水能力,减少暴雨内涝的出现,打造绿色海绵湾区。

3) 控制围垦,加强生态保护。填海造地不仅缩减海域面积,影响海湾水文循环,而且会改变海湾的水生态环境。粤港澳大湾区在开发利用海岸线时,要遵循地质环境规律,科学地规划围海造地、建造港口码头等工程。此外,应重点保护湾区林地、水域和红树林湿地等生态系统,加强森林公园、湿地公园和自然保护区的建设,合理地开发利用生态资源。应重视生态用水需求,避免对河流水的过量截取,缓解河道下切等问题。

4) 加强地区间合作,推进经济社会转型。国际先进湾区通过流域内城市合作开展水环境治理,达到较好的效果。在香港和深圳两市的共同治理下,深圳湾水质已逐渐好转。然而,湾区其他跨行政区水库、河流的水质大多由于缺乏合作治理而无法得到有效的改善。可见,各行政区之间加强合作,对湾区水环境保护和治理至关重要。国际先进湾区产业结构转型带来的劳动密集型和资源密集型产业比重降低,对区域水环境的治理和生态环境的恢复起到重要作用。粤港澳大湾区要在避免先污染后治理的同时,加快推进经济社会转型,从而更好地保护生态环境。

参考文献

- [1] 覃成林,刘丽玲,覃文昊. 粤港澳大湾区城市群发展战略思考. 区域经济评论, 2017(5): 113-118
- [2] 童娟. 珠江流域概况及水文特性分析. 水利科技与经济, 2007, 13(1): 31-33
- [3] 刘琦,江源,丁佼,等. 东江流域主要支流溶解性有机质污染特征初探. 自然资源学报, 2016, 31(7): 1231-1240
- [4] 赵腾辉,陈奕涵,韩巍,等. 东江上游典型抗生素污染特征及生态风险评价. 生态环境学报, 2016, 25(10): 1707-1713
- [5] 何明靖,李琦,赵佳渊,等. 卤系阻燃剂在东江工业水体中的质量浓度及其分配特征. 环境科学, 2016, 37(7): 2539-2546
- [6] 龚剑,李桦,黄静文,等. 珠江广州-东莞河段重金属污染状况及分布特征. 广州大学学报(自然科学版), 2017, 16(4): 78-82
- [7] 何桂芳,袁国明,李凤岐. 珠江口沿岸城市经济发展对珠江口水质的影响. 海洋环境科学, 2004, 23(4): 50-52
- [8] 谢群,施玉珍,张际标,等. 珠江口海域春季富营养化现状与影响分析. 应用海洋学学报, 2017, 36(3): 356-364
- [9] 刘解答,郭亮,柯志新,等. 珠江口表层沉积物中重金属污染及生态风险评价. 水生态学杂志, 2017, 38(1): 46-53
- [10] 陈伟涛. 大沙河水库富营养化及蓝藻水华特点分析. 广东水利水电, 2015(6): 33-35
- [11] 温美丽,杨龙,方国祥,等. 新丰江水库上游氮磷污染的时空变化. 热带地理, 2015, 35(1): 103-110
- [12] 宁建凤,邹献中,杨少海,等. 广东大中型水库底泥重金属含量特征及潜在生态风险评价. 2009, 29(11): 6059-6067
- [13] 徐林春. 人类活动影响下的珠江三角洲水安全研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014
- [14] 叶永权. 深圳水资源安全现状及安全保障策略研讨. 技术与市场, 2015, 22(1): 146-147
- [15] 周瑛,刘洁,吴仁海,等. 珠江三角洲水环境问题及其原因分析. 云南地理环境研究, 2003, 15(4): 47-53
- [16] 王旭涛,谢昭,刘威,等. 珠江重要河流底栖动物水质生物学评价. 水资源保护, 2016, 32(3): 94-98
- [17] 陈艳,黄晓霞,王琇瑜,等. 珠江流域河流生境破碎化对鱼类物种多样性的影响. 云南地理环境研究, 2017, 29(3): 62-68
- [18] Furukawa K, Okada T. Tokyo Bay: its environmental status — past, present, and future // The Environment in Asia Pacific Harbours. Dordrecht: Springer, 2006: 15-34
- [19] Briggs J C. San Francisco Bay: restoration progress. Regional Studies in Marine Science, 2015, 3: 101-106
- [20] Bloomberg M R, Holloway C. New York harbor survey program celebrating 100 years [EB/OL]. (1999-2009) [2019-02-18]. <http://www.nyc.gov/html/dep/pdf/>

- hwqs_centennial.pdf
- [21] 珠江水利委员会. 2007—2017年珠江片水资源公报 [EB/OL]. (2008—2018)[2019-02-18]. http://www.pearlwater.gov.cn/xxcx/szygg/2007szgb/200812/t20081216_27946.htm
- [22] 游静玉. 深圳市水污染治理的实施思路及建议. 现代物业(中旬刊), 2013, 12(8): 114-115
- [23] 陈文思, 陈仲策. 关于广东省中小河流治理几个问题的探讨. 广东水利水电, 2011(增刊 1): 20-21
- [24] 蔡国飞. 深圳茅洲河水环境治理简介. 能源与环境, 2017(2): 59-59
- [25] 刘宝林, 张鸿, 谢刘伟, 等. 珠江干流表层沉积物重金属污染特征及潜在生态风险. 东北师大学报(自然科学版), 2015, 47(2): 141-147
- [26] 杜弘禹. 225.8 亿元治理珠三角污染最重河流 深圳副市长: “治水就是治城市”[EB/OL]. (2018-06-21) [2019-02-18]. http://epaper.21jingji.com/html/2018-06/21/content_88504.htm
- [27] Qiu Wenhui, Sun Jing, Fang Meijuan, et al. Occurrence of antibiotics in the main rivers of Shenzhen, China: association with antibiotic resistance genes and microbial community. Science of The Total Environment, 2019, 653: 334-341
- [28] 朱圣清, 臧小平. 长江主要城市江段重金属污染状况及特征. 人民长江, 2001, 32(7): 23-25
- [29] 贾英, 方明, 吴友军, 等. 上海河流沉积物重金属的污染特征与潜在生态风险. 中国环境科学, 2013, 33(1): 147-153
- [30] 马丽, 李吉鹏, 陆志强, 等. 厦门杏林湾表层沉积物重金属污染特征及潜在生态风险评价. 生态科学, 2013, 32(2): 212-217
- [31] 郑中华, 刘凯传, 张萍, 等. 淮河干流沉积物中重金属污染及其潜在生态风险评价. 生态与农村环境学报, 2017, 33(10): 935-942
- [32] 罗昆, 李亮, 龙根元, 等. 海南岛南部海域沉积物重金属污染及潜在生态风险评价. 上海海洋大学学报, 2017, 26(1): 85-93
- [33] 王瑞霖, 程先, 孙然好. 海河流域中南部河流沉积物的重金属生态风险评价. 环境科学, 2014, 1(10): 3740-3747
- [34] 李丽, 赵培, 周楠. 丹江沉积物重金属的污染特征和潜在生态风险评价. 江西农业学报, 2018, 30(9): 108-111
- [35] 李海燕, 段丹丹, 黄文, 等. 珠江三角洲表层水中多环芳烃的季节分布、来源和原位分配. 环境科学学报, 2014, 34(12): 2963-2972
- [36] 龚剑, 黄文, 杨娟, 等. 珠江河流胶体中的典型内分泌干扰物. 中国环境科学, 2015, 35(2): 617-623
- [37] 梁栋, 宗栋良. 深圳主要河流中雌激素污染调查. 环境监测管理与技术, 2013, 25(2): 29-32
- [38] 刘畅伶, 张文强, 单保庆. 珠江口典型河段内分泌干扰物的空间分布及风险评价. 环境科学学报, 2018, 38(1): 115-124
- [39] 宗栋良, 常爱敏, 张光明, 等. 深圳主要河流中农药类环境激素污染调查. 环境监测管理与技术, 2009, 21(6): 39-43
- [40] Wurl O, Lam P K S, Obbard J P. Occurrence and distribution of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in the dissolved and suspended phases of the sea-surface microlayer and seawater in Hong Kong, China. Chemosphere, 2006, 65(9): 1660-1666
- [41] Oros D R, Hoover D, Rodigari F, et al. Levels and distribution of polybrominated diphenyl ethers in water, surface sediments, and bivalves from the San Francisco Estuary. Environmental Science & Technology, 2005, 39(1): 33-41
- [42] Smith V H, Schindler D W. Eutrophication science: where do we go from here?. Trends in Ecology & Evolution, 2009, 24(4): 201-207
- [43] Anderson D M, Glibert P M, Burkholder J M. Harmful algal blooms and eutrophication: nutrient sources, composition, and consequences. Estuaries, 2002, 25(4): 704-726
- [44] Codd G A, Morrison L F, Metcalf J S. Cyanobacterial toxins: risk management for health protection. Toxicology and Applied Pharmacology, 2005, 203(3): 264-272
- [45] 储雪丹, 唐鹤辉, 彭亮. 广东省大型水库富营养化现状与水质管理对策. 人民珠江, 2016, 37(8): 77-81
- [46] 张文志. 显岗水库水生态状况评价及蓝藻发生风险等级评估. 人民珠江, 2013, 34(2): 45-47
- [47] 陈伟涛. 江门市 4 宗大型水库富营养化评价与分析. 广东水利水电, 2011(8): 52-54
- [48] 秦伯强. 我国湖泊富营养化及其水环境安全. 科学对社会的影响, 2007(3): 17-23
- [49] 刘毅. 中国磷代谢与水体富营养化控制政策研究 [D]. 北京: 清华大学, 2004
- [50] 孙秀峰, 黄翠, 张鹏. 广东省小型水库运行管理存在问题及对策分析. 广东水利水电, 2017(1): 18-20
- [51] 广东省海洋与渔业局. 2017 年广东省海洋环境状况公报[EB/OL]. (2018)[2019-02-18]. <http://www.gdofa.gov.cn/attachment/0/0/37/101901.pdf>
- [52] 张伟, 孙健, 聂红涛, 等. 珠江口及毗邻海域营养盐对浮游植物生长的影响. 生态学报, 2015, 35(12):

- 4034–4044
- [53] 蔡阳扬, 岑竞仪, 欧林坚, 等. 夏秋季珠江口水域 COD、DO、营养盐分布特征及其富营养化评价. 暨南大学学报(自然科学与医学版), 2014, 35(3): 221–227
- [54] 广东省海洋与渔业局. 2012年—2017年广东省海洋环境状况公报[EB/OL]. (2013–2018)[2019–02–18]. <http://www.gdofa.gov.cn/attachment/0/0/37/101901.pdf>
- [55] 宋美英. 珠江河口水体和沉积物中重金属的分布特征及风险评估[D]. 广州: 暨南大学, 2014
- [56] 倪志鑫, 张霞, 蔡伟叙, 等. 珠江口沉积物中重金属分布、形态特征及风险分析. 海洋环境科学, 2016, 35(3): 321–328
- [57] Guan Yufeng, Wang Jizhong, Ni Honggang, et al. Riverine inputs of polybrominated diphenyl ethers from the Pearl River Delta (China) to the coastal ocean. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(17): 6007–6013
- [58] Fok L, Cheung P K. Hong Kong at the Pearl River Estuary: a hotspot of microplastic pollution. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 99(1/2): 112–118
- [59] Cheung P K, Fok L, Hung P L, et al. Spatio-temporal comparison of neustonic microplastic density in Hong Kong waters under the influence of the Pearl River Estuary. *Science of The Total Environment*, 2018, 628: 731–739
- [60] Liu Ying, Zheng G J, Yu Hongxia, et al. Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in sediments and mussel tissues from Hong Kong marine waters. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, 50(11): 1173–1184
- [61] Wurl O, Lam P K S, Obbard J P. Occurrence and distribution of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in the dissolved and suspended phases of the sea-surface microlayer and seawater in Hong Kong, China. *Chemosphere*, 2006, 65(9): 1660–1666
- [62] 陈社军, 麦碧娴, 曾永平, 等. 珠江三角洲及南海北部海域表层沉积物中多溴联苯醚的分布特征. 环境科学学报, 2005, 25(9): 1265–1271
- [63] 黄加乐, 朱军山, 洪在地, 等. 电子电气设备中塑料阻燃剂 PBDE 使用的危害性. 家电科技, 2005(7): 41–43
- [64] Moon H B, Choi H G, Kim S S, et al. Levels of Some polybrominated diphenylethers (PBDEs) flame retardants in sediments and organisms from the Coastal Areas of Korea. *한국환경분석학회지*, 2001, 4(3): 177–186
- [65] Guan Yufeng, Sojinu O S S, Li Shaomeng, et al. Fate of polybrominated diphenyl ethers in the environment of the Pearl River Estuary, South China. *Environmental Pollution*, 2009, 157(7): 2166–2172
- [66] 刘宝林, 张鸿, 谢刘伟, 等. 深圳近岸海域全氟化化合物的污染特征. 环境科学, 2015, 36(6): 2028–2037
- [67] 唐俊逸, 刘晓东, 周连宁, 等. 深圳近岸海域表层沉积物中多环芳烃(PAHs)的风险评估研究. 海洋环境科学, 2017, 36(6): 838–843
- [68] 黄铁兰, 陈君浩, 黄枫杰, 等. 基于 GIS 的珠江三角洲地区城市内涝特征研究. 广东工业大学学报, 2017, 34(1): 24–30
- [69] 张维, 欧阳里程. 广州城市内涝成因及防治对策. 广东气象, 2011, 33(3): 49–50
- [70] 刘阳, 费迎庆. 滨水城市内涝对策研究——以澳门内港为例. 福建建筑, 2016(5): 106–110
- [71] 广州城市内涝风险评估预警值得推广. 领导决策信息, 2014(28): 15
- [72] 黎子浩. 珠江三角洲联围筑闸对水流及河床演变的影响. 热带地理, 1985, 5(2): 99–107
- [73] 罗宪林. 珠江三角洲网河河床演变. 广州: 中山大学出版社, 2002
- [74] 袁菲, 何用, 吴门伍, 等. 近 60 年来珠江三角洲河床演变分析. 泥沙研究, 2018, 43(2): 40–46
- [75] 倪培桐, 闻平, 刘剑宇. 珠江三角洲水沙年际变化趋势分析. 人民珠江, 2016, 37(1): 19–24
- [76] 申其国, 谢凌峰, 王亚妮. 近年珠江三角洲潮流特征变化分析. 人民珠江, 2017, 38(7): 13–17
- [77] 刘春杉, 张彤辉, 陈玮哲. 珠江口海域围填海演进过程与问题分析研究. 海洋开发与管理, 2017, 34(3): 33–37
- [78] USGS. USGS water data for the nation [EB/OL]. (2017) [2019–02–18]. <https://waterdata.usgs.gov/nwis>
- [79] Andrew M C. The state of the Hudson-2015 [EB/OL]. (2015) [2019–02–18]. <http://www.dec.ny.gov/lands/4920.html>
- [80] Okamoto A R, Wong K M. Natural history of San Francisco Bay. California: Univ of California Press, 2011
- [81] Thompson B, Adelsbach T, Brown C, et al. Biological effects of anthropogenic contaminants in the San Francisco Estuary. *Environmental Research*, 2007, 105(1): 156–174
- [82] Davis J A, May M D, Greenfield B K, et al. Contaminant concentrations in sport fish from San Francisco Bay, 1997. *Marine Pollution Bulletin*, 2002, 44(10): 1117–1129

- [83] Sutton R, Mason S A, Stanek S K, et al. Microplastic contamination in the San Francisco Bay, California, USA. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 109(1): 230–235
- [84] Sedlak M D, Benskin J P, Wong A, et al. Per-and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs) in San Francisco Bay wildlife: temporal trends, exposure pathways, and notable presence of precursor compounds. *Chemosphere*, 2017, 185: 1217–1226
- [85] Good S P, Kennedy C D, Stalker J C, et al. Patterns of local and nonlocal water resource use across the western US determined via stable isotope intercomparisons. *Water Resources Research*, 2014, 50(10): 8034–8049
- [86] United States Environmental Protection Agency. Water quality challenges in the San Francisco Bay/Sacramento-San Joaquin Delta Estuary: EPA's action plan [EB/OL]. (2012) [2019-02-18]. <https://www.epa.gov/sites/production/files/documents/actionplan.pdf>
- [87] Ministry of the Environment Government of Japan. Water environment management in Japan [EB/OL]. (2012) [2019-02-18]. <https://www.env.go.jp/en/focus/docs/files/20120301-52.pdf>
- [88] 天津提出2020年底全面完成黑臭水体整治. *给水排水*, 2018, 54(10): 140
- [89] 陈光华, 倪志凡, 汤琳. 上海市黑臭水体治理实践与长效管理对策. *安徽农学通报*, 2018, 24(17): 125–128
- [90] 朱琳. 渤海湾的生态环境压力与管理对策研究[D]. 天津: 天津大学, 2007
- [91] 王修林. 胶州湾主要化学污染物海洋环境容量. 北京: 科学出版社, 2006
- [92] 李莉, 梁生康, 石晓勇, 等. 2007年环胶州湾入海河流污染状况和污染物入海通量分析. *环境科学与管理*, 2009, 34(6): 23–28
- [93] 江源澄. 胶州湾入海污染物排放及总量控制研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2009
- [94] 虞锡君, 贺婷. 杭州湾水污染特征, 原因及防治对策. *嘉兴学院学报*, 2013, 25(4): 47–52
- [95] 香港特别行政区政府环境保护署. 香港的水质及水污染管制工作概览 [EB/OL]. (2018-08-23)[2019-02-18]. https://www.epd.gov.hk/epd/sc_chi/environmenti nhk/water/hkwqrc/overview/index.html
- [96] 澳门特别行政区政府环境保护署. 水环境治理概览 [EB/OL]. (2018-06-29) [2019-02-18]. http://www.dsqa.gov.mo/hot_topic.aspx