

李海生, 杨鹄平, 赵艳民. 聚焦水生态环境突出问题, 持续推进长江生态保护修复[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(2): 336-347.

LI H S, YANG Q P, ZHAO Y M. Focusing on water eco-environment problems and sustainably promoting ecological conservation and restoration of the Yangtze River[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(2): 336-347.

聚焦水生态环境突出问题，持续推进长江生态保护修复

李海生^{1,2}, 杨鹄平^{1,2}, 赵艳民^{1,2}

1. 中国环境科学研究院

2. 国家长江生态环境保护修复联合研究中心

摘要 加强长江生态环境保护, 事关长江流域社会经济发展大局, 不仅是维护长江流域生态环境安全的客观要求, 也是落实中央重大政策的重要内容。依托长江生态环境保护修复联合研究项目(第一期), 对长江流域水生态环境存在的问题进行诊断, 并剖析成因, 提出强化长江流域水生态环境保护修复的政策建议。长江流域水生态环境问题主要表现为资源开发导致河流连通性下降, 湖泊湿地面积萎缩; 污染物排放强度仍然较大, 汛期水质恶化现象普遍; 水生态系统退化, 湖泊水华、长江口赤潮频发, 渔业资源量下降, 珍稀特有水生生物保护任重道远; 水环境风险问题突出, 突发性水污染事故频发。分析其成因主要包括: 城市化、人口集聚进程加快与环境基础设施短板存在矛盾, 生态环境治理协同性仍然不足, 国土空间管控不到位, 气候变化带来新挑战。据此提出如下对策建议: 1) 在流域水平上强化国土空间管控, 落实“三线一单”; 2) 补齐基础设施短板, 深化污染防治; 3) 推进“三水”统筹, 持续开展生态修复; 4) 加强政策协同, 推进多元共治; 5) 强化制度创新, 提升科技支撑能力。为持续打好长江保护修复攻坚战, 推动长江经济带成为我国生态优先绿色发展主战场提供参考。

关键词 长江流域; 长江经济带; 问题诊断; 成因分析; “三水”统筹; 保护对策

中图分类号: X522 文章编号: 1674-991X(2022)02-0336-12 doi: 10.12153/j.issn.1674-991X.20220091

Focusing on water eco-environment problems and sustainably promoting ecological conservation and restoration of the Yangtze River

LI Haisheng^{1,2}, YANG Queping^{1,2}, ZHAO Yanmin^{1,2}

1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences

2. National Joint Research Center for Yangtze River Conservation

Abstract Strengthening the protection of the eco-environment of the Yangtze River is related to the overall situation of socio-economic development in the Yangtze River Basin, which is not only an objective requirement for maintaining the eco-environmental safety of the Yangtze River Basin, but also an important part of implementing major central policies. Relying on the first phase of the joint research project on the eco-environmental conservation and restoration of the Yangtze River, the problems existing in the water eco-environment of the basin were diagnosed, the causes were analyzed, and the policy suggestions for strengthening the conservation and restoration of the water eco-environment were put forward. The main water eco-environmental problems in the Yangtze River Basin included: the decline of the river connectivity and the shrinking of the area of lakes and wetlands caused by the development of resources in the basin; the relatively large intensity of pollutant discharge, and the common deterioration of water quality during the flood season common; the degradation of water ecosystems, the frequent occurrence of lake blooms and red tides in the Yangtze River estuary and the decline in fishery resources, which meant a long way to go with the protection of rare and unique aquatic organisms; the prominent water environmental risk problems, and the frequent occurrence of sudden water pollution accidents. The causes of water eco-environmental problems in the Yangtze River Basin mainly included: the contradiction between the accelerated process of urbanization and population agglomeration and the shortcoming of the environmental infrastructures; the synergy of eco-environmental governance was still insufficient; the control and governance of territorial space was not in place; and the climate change brought new challenges. Accordingly, some countermeasures and suggestions

收稿日期: 2022-01-26

基金项目: 长江生态环境保护修复联合研究项目(第一期)(2019-LHYJ-01)

作者简介: 李海生(1964—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事水污染治理、环境影响评价、能源与环境政策等研究, lihs@craes.org.cn

were proposed, including strengthening territorial space management and control at the watershed level and implementing "Three Lines and One List" policy; making up for the shortcomings of infrastructure and deepening pollution prevention and control; promoting the overall planning of "Three Waters" and continuing to carry out ecological restoration; strengthening policy coordination and promoting diversified co-governance; strengthening institutional innovation and enhancing scientific and technological support capabilities, in order to provide a reference for continuing to fight the battle of protection and restoration of the Yangtze River, and for promoting the Yangtze River Economic Belt to become the main battlefield of China's ecological priority and green development.

Key words Yangtze River Basin; Yangtze River Economic Belt; problem diagnosis; cause analysis; "Three Waters" coordination; conservation countermeasures

长江流域拥有全国 35% 的水资源量, 承载了全国 33% 的人口, 贡献了 35.4% 的国内生产总值 (GDP), 是我国经济重心所在、活力所在, 经济社会地位和生态环境价值突出。经过近 20 年的治理, 长江流域水环境质量显著改善。2020 年, 长江流域符合 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》Ⅰ类~Ⅲ类标准的水质监测断面数量占比为 96.7%, 比全国平均水平高 13.3%, 较 2015 年提高 14.9%; 干流全线达到Ⅱ类水质; 劣Ⅴ类断面数量占比较 2015 年降低 6.1%。然而, 长江流域河湖连通性下降、湿地面积萎缩、湖泊富营养化、岸线开发强度较高等环境问题仍然突出, 难以满足经济高质量发展和人民日益增长的美好生活需要。在生态环境部的领导下, 国家长江生态环境保护修复联合研究中心组织实施了长江生态环境保护修复联合研究项目(第一期)。基于该项目, 分析长江水生态环境主要问题, 剖析问题成因, 提出进一步加强长江生态环境保护的对策建议, 旨在持续打好长江保护修复攻坚战, 进一步推动长江经济带成为我国生态优先绿色发展主战场。

1 长江流域水生态环境问题与挑战

1.1 资源开发利用与水生态环境保护矛盾突出

1.1.1 长江流域河流连通性下降

长江流域多年平均降水量约为 1 100 mm, 多年平均入海径流量为 9 190 亿 m^3 , 多年平均水资源总量为 9 958 亿 m^3 , 约占我国水资源总量的 1/3^[1]; 同时, 长江干流从河源到河口总落差约 5 400 m, 上游雅砻江、岷江、大渡河、嘉陵江、乌江等大的支流河流落差也达到了 2 000~4 000 m^[2], 丰富的径流量和巨大的落差带来丰富的水力资源。自 20 世纪 50 年代开始, 长江流域建成水库 5.16 万座、水电站 1.94 万座, 赤水河之外的 472 条较大支流的干流上全部建有拦河水坝。根据《2020 年长江流域及西南诸河水资源公报》^[3], 2020 年长江流域 1 761 座大中型水库的年末蓄水量达 2 287.21 亿 m^3 , 占长江入海

径流量(大通水文站数据)的 24.48%。各类水库、水电站的建设, 导致长江上游水文情势发生显著改变, 河流自然连通性受阻, 生境碎片化问题突出。

1.1.2 长江中下游湖泊湿地面积萎缩

长江中下游是我国淡水湖群分布最集中的地区之一, 历史上鄱阳湖、洞庭湖、太湖、巢湖等均与长江自然连通, 具有调节水量、削减洪峰、维护长江生态系统完整性的重要作用^[4]。随着长江流域城市化进程加快, 城镇开发面积大幅增加, 挤占江河湖库生态空间, 加之长江水库群建设与工程调水、沿江节制闸建设以及围湖开发等人类活动干扰湖泊水系水文格局, 长江中下游地区湖泊面积不断萎缩, 通江湖泊数量不断减少。2000—2010 年, 长江经济带沼泽湿地面积减少 742.1 km^2 , 湖泊面积减少 220.7 km^2 ^[5], 洞庭湖和鄱阳湖湖泊面积较 20 世纪 50 年代分别减少 39.7% 和 43.6%^[6], 沿江湖泊中大部分失去了与长江的自然联系, 长江生态系统的完整性遭到严重破坏。如历史上的通江湖泊洪湖, 水利工程阻隔了洪湖与长江的自然连通, 使湖水水位下降 3 m 以上^[7], 随后湖区及周围沼泽地被大规模围垦, 最终导致洪湖水质徘徊在Ⅳ类~Ⅴ类, 水生态系统退化, 水生生物多样性降低^[8]。

1.1.3 岸线开发过度, 影响长江水生态系统

河流岸线被界定为河流两侧水陆边界一定范围内的带状区域^[9], 是河流生态系统的重要载体^[10]。长江岸线作为产业及城镇布局的重要载体, 以及长江生态屏障和污染物入江的最后防线, 对修复和建设长江绿色生态廊道意义重大^[11]。截至 2017 年, 长江经济带干流岸线总长度达 7 897.7 km, 其中生态敏感岸线, 如水生动物、水产种质资源、重要湿地、蓄滞洪区等岸线长度达 3 943.2 km, 占长江干流岸线总长度的 49.9%^[12]。然而, 长江人口密集, 岸线开发利用率很高。截至 2013 年底, 长江干线拥有生产性码头泊位 3 893 个, 码头总延长 3 849 km, 其中万吨级及以上泊位 360 个, 还有大量桥梁、取水闸口、排污口

等跨江和沿江基础设施^[13]。高强度的岸线开发,对长江水生动物和种质资源保护、防洪蓄洪、饮水安全等造成较大威胁。

1.2 水污染形势依然严峻

1.2.1 污染排放强度仍然较大

2016 年,依托长江黄金水道,以长江流域为主体的长江经济带发展战略启动实施,成为中央重点实施的“三大战略”之一。长江经济带覆盖上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川、云南、贵州 11 个省(市),区域人口和 GDP 均超过全国的 40%,同时也是污染物排放最为集中的区域之一。整体上,长江经济带化学需氧量(COD)、氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、总氮(TN)、总磷(TP)排放量已经越过库兹涅茨曲线拐点,排放量进入下行期^[14],但由于长江经济带的巨大体量,以及各省(市)产业结构存在明显差异,长江经济带区域主要污染物排放量在全国占比仍然较高。根据中国统计年鉴^[15],2011—2017 年长江经济带区域废水排放量为 289.47 亿~321.22 亿 t,占全国废水排放量的比例稳定在 43% 左右[图 1(a)];废水 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 排放量分别为 516.55 万~916.38 万、46.45 万~112.98 万、103.54 万~145.96 万、6.91 万~17.96 万 t,分别占全国排放量的 39.39%~49.32%、43.39%~48.22%、30.01%~48.81% 和 29.74%~49.57%[图 1(b)~图 1(e)]。从排放量上看,长江经济带区域 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 等指标均呈下降态势,但由于单位面积污染物排放强度远高于全国平均水平^[16],长江经济带区域污染物排放量在全国总量中的占比仍然呈上升态势。

1.2.2 水质总体好转,但仍有提升空间

2008—2020 年长江流域 I 类~Ⅲ类水质占比为 80.9%~96.7%,最低值出现在 2011 年,最高值出现在 2020 年,总体呈波动上升趋势;劣 V 类水质占比为 0~5.8%,最高值出现在 2008 年,最低值出现在 2020 年,总体呈波动下降趋势。2020 年,长江流域有 510 个国控水质监测断面,其中水质优良断面(I 类~Ⅲ类)占比从 2015 年的 81.8% 提高到 2020 年的 96.7%,比全国平均水平高 13.3%,较 2015 年提高 14.9%[(图 2(a))]

2008—2020 年长江干流水质类别演变见图 2(b)。2008 年以来,长江干流 I 类~Ⅲ类水质断面占比均高于 90%;2016 年,由于监测断面大幅增加, I 类~Ⅲ类水质断面占比有所下降,为 94.9%;2017—2020 年,长江干流 I 类~Ⅲ类水质断面占比稳定保持在 100%,2020 年更是全线达到 II 类水质标准,全面消除劣 V 类水质断面。

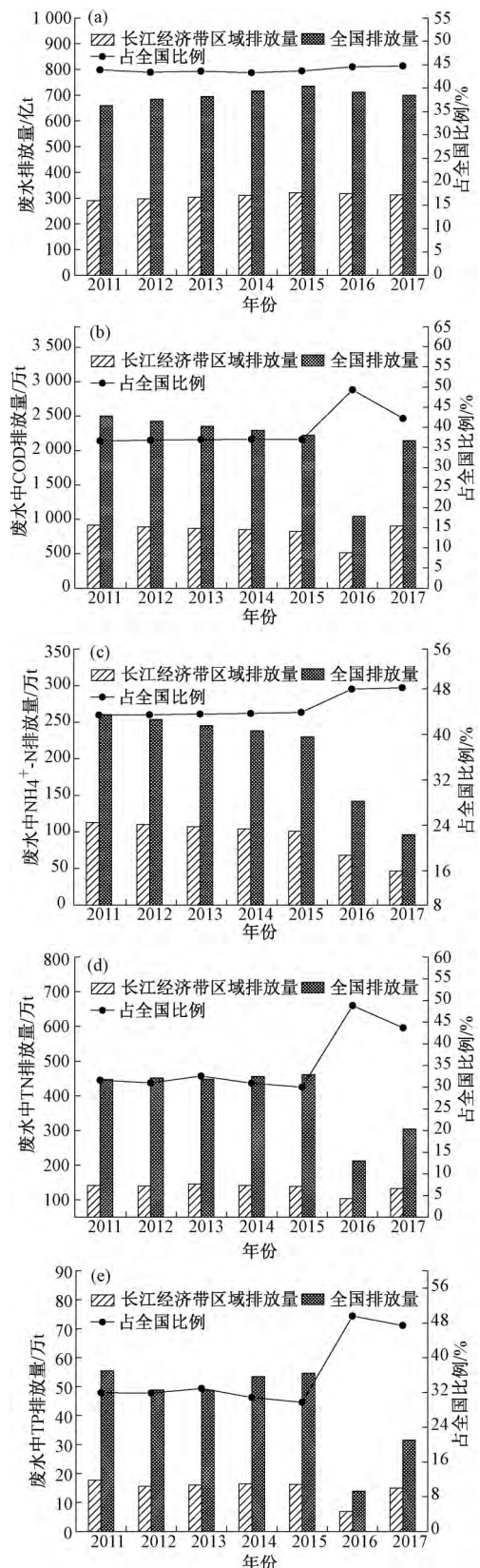


图 1 长江经济带区域废水与主要污染物排放量及其在全国的占比

Fig.1 Discharge of wastewater and main pollutants in the Yangtze River Economic Belt and their proportions in the whole country

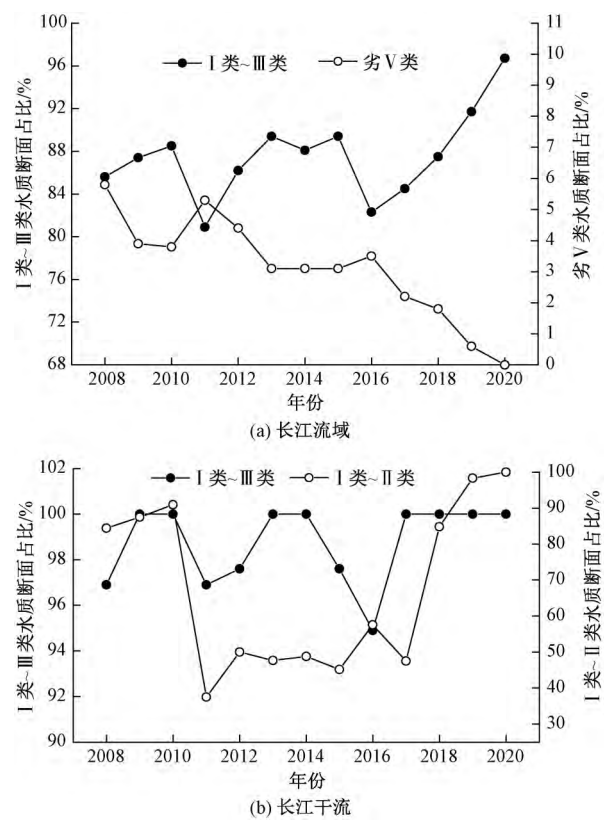


图 2 2008—2020 年长江流域及干流国控监测断面水质类别变化

Fig.2 Changes of water quality categories of national controlled monitoring sections in the mainstream of the Yangtze River in 2008-2020

2016 年之后, TP 成为长江流域的主要污染因子^[17], 其断面超标率在 2016—2019 年位列第一^[18]。空间上, 长江流域 TP 呈现上下游浓度高、中游浓度低的特点, 即上游云南、贵州、四川、重庆与下游的上海、江苏和浙江浓度较高, 而中游的湖南、湖北、江西浓度较低; 时间上, 在“共抓大保护”方针指引下, 长江经济带各省(市)TP 浓度均有所下降, 尤其是上游的云南、贵州、四川和重庆 TP 浓度下降较多, 为 2020 年长江流域全面消除劣 V 类水体做出了贡献(表 1)。但由于各地自然禀赋和经济条件各不相同, 除上海和重庆 2020 年所有国控监测断面均达到 III 类水质标准外, 其余各省(市)水质仍有较大提升空间(表 2)。

1.2.3 面源污染问题严重, 汛期水质恶化现象普遍

随着长江流域污染管理、治理水平的提升, 点源污染问题已得到较有效控制, 但面源污染问题逐渐凸显, 汛期暴雨径流导致的面源污染已经成为长江流域水环境污染的重要原因^[19]。尽管长江源头地区有高山融雪、冰川径流补给, 但其占比较小, 长江径流主要依靠降雨补给, 受季风性气候影响, 年内径流

表 1 长江经济带各省(市)国控监测断面 TP 平均浓度
Table 1 Average TP concentration of national controlled monitoring sites in each province in the Yangtze River

省(市)	Economic Belt				mg/L
	2016年	2017年	2018年	2019年	
上海	0.16	0.14	0.12	0.13	0.11
江苏	0.13	0.12	0.12	0.11	0.10
浙江	0.12	0.11	0.09	0.11	0.10
安徽	0.10	0.10	0.09	0.07	0.07
江西	0.08	0.09	0.09	0.07	0.06
湖北	0.10	0.09	0.08	0.07	0.07
湖南	0.07	0.07	0.07	0.06	0.05
重庆	0.11	0.11	0.09	0.08	0.07
四川	0.14	0.12	0.09	0.09	0.07
贵州	0.13	0.10	0.08	0.07	0.06
云南	0.16	0.16	0.15	0.11	0.10
区域	0.11	0.10	0.09	0.08	0.07

表 2 长江经济带各省(市)国控监测断面 I 类~III类水质断面占比

Table 2 Proportion of national controlled monitoring sites with water quality category I - III in each province in the Yangtze River

省(市)	River Economic Belt				%
	2016年	2017年	2018年	2019年	
上海	75	90	90	90	100
江苏	61	61	61	70	71
浙江	74	93	89	93	96
安徽	72	72	71	81	84
江西	82	77	79	82	89
湖北	82	84	86	85	90
湖南	79	78	79	82	85
重庆	93	88	90	100	100
四川	72	76	89	98	99
贵州	86	81	95	95	97
云南	49	45	55	55	64
区域	76	77	81	84	88

分配不均, 夏季最丰 4 个月径流占全年径流的比例超过 50%^[20]。2020 年汛期(7—9 月), 长江干流 59 个国控监测断面中 I 类~II 类水质占比分别为 62.7%、72.9% 和 69.5%, 远低于其他月份^[21]; 长江部分支流水系汛期于 5 月开始, 导致支流断面水质在 5 月开始恶化, 5 月、6 月、7 月长江 256 条支流的 451 个监测断面中 I 类~III 类(优良)水质的断面占比分别为 89.0%、84.0% 和 86.5%(图 3), 水质下降趋势明显。

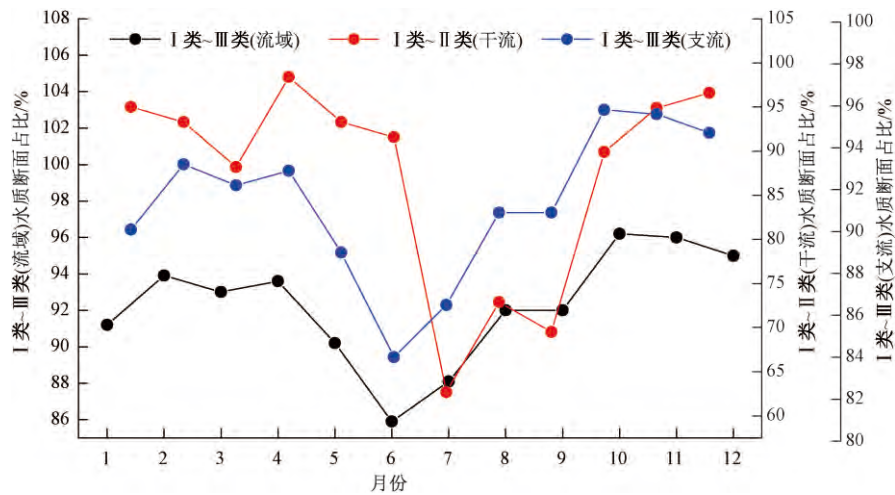


图 3 2020 年长江流域优良水质断面占比

Fig.3 Percentage of excellent and good water quality sections in the Yangtze River Basin in 2020

1.3 水生态系统退化严重

1.3.1 长江流域渔业资源量下降

长江水系干支流纵横交错,大小湖泊星罗棋布,鱼类资源丰富,主要渔业资源包括青、草、鲢、鳙“四大家鱼”,以及铜鱼、长吻鮠、凤鲚、鳊、鳊、螃蟹等,出产的“四大家鱼”、中华绒螯蟹等苗种品质优良,无可替代。历史上,长江天然捕捞量约占全国淡水渔业产量的 60%,最高年产量达到 42.7 万 t^[22];长江干流“四大家鱼”鱼苗最高年产量可达 1 000 亿~1 300 亿尾^[23],长江口天然蟹苗历史最高年产量达 20.05 t^[24]。受水工闸坝阻隔、围湖造田、水域污染以及过度捕捞等因素影响,长江渔业资源呈下降趋势,年天然捕捞量从 20 世纪 50—60 年代的 30 万~40 万 t 降至 2000 年左右的 10 万 t^[25];长江湖北段是长江“四大家鱼”鱼苗的主产区,20 世纪 60 年代年均产苗 83.8 亿尾,20 世纪 80 年代降至 20.7 亿尾,20 世纪 90 年代降至 6.6 亿尾^[22];2003 年长江口蟹苗资源仅为 15 kg,天然蟹苗丧失了商业价值。

1.3.2 湖泊水华问题突出

长江流域上游的滇池,中下游的鄱阳湖、洞庭湖、太湖以及巢湖对于区域经济社会发展具有重要的支撑作用。然而,20 世纪 90 年代之后,长江流域湖泊富营养化加剧,水华频发,直接威胁湖泊生态服务功能的实现,进而影响区域经济社会发展。自“九五”以来,国家将太湖、巢湖和滇池作为重点治理的“三湖”,持续开展富营养化治理;2007 年以来,“三湖”营养状态指数持续下降,但湖泊水华问题依然严峻。以太湖为例,2007 年太湖营养状态指数为 62.4,为中度富营养化;2019 年已经降至 54.2,达到轻度富营养化,降幅明显。然而,与营养状态指数表现不同,太湖湖体叶绿素 a(Chla)浓度、蓝藻密度以及水

华暴发面积则表现为波动上升态势^[26]。

1.3.3 长江口赤潮频发

长江口是流域与海洋交汇区。流域人类活动排放的大量污染物通过长江径流输送到长江口,导致长江口及邻近海域成为我国近岸海域水质污染较为严重的海域^[27]。近 30 年来,长江口区浮游植物群落结构不断演变,种类组成趋向简单,种类个体数量分布不均匀^[28],中肋骨条藻、东海原甲藻等优势物种在适宜环境条件下容易大量增殖,导致赤潮暴发。根据对近 30 年长江口及邻近杭州湾海域赤潮暴发次数的统计,1989—2019 年长江口及邻近海域赤潮发生次数多达 144 次,其中部分赤潮暴发面积超过 3 000 km²(图 4)。

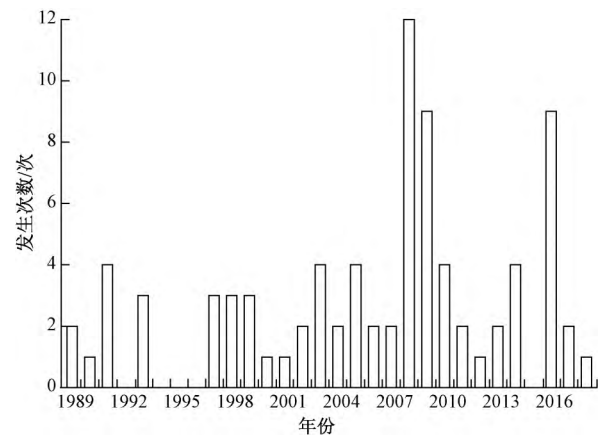


图 4 近 30 年长江口及邻近海域赤潮发生次数

Fig.4 Red tide outbreaks in the Yangtze River estuary and adjacent sea area in recent 30 years

1.3.4 珍稀特有水生生物保护形势严峻

长江是中华鲟、白鲟、江豚、白鱀豚等众多珍稀特有水生动物的栖息地,这些珍稀特有水生动物位于长江水生生物食物链顶端,体型巨大,需要巨大的

活动空间。由于江湖阻隔、饵料减少、捕捞误杀、航运、环境污染等影响,珍稀特有水生动物面临巨大的生存危机。中华鲟是一种大型溯河产卵的洄游性鱼类,其历史产卵场主要分布于长江上游和金沙江下游,1982年到葛洲坝下产卵的中华鲟繁殖群体尚有2 176尾,2017—2019年已经降至20尾左右,自然产卵活动由年际间连续变成偶发^[29]。白鲟已于1993年功能性灭绝,2005—2010年物种灭绝^[30]。国家一级保护动物白鱀豚,在2006年11—12月的长江豚类国际联合考察后,被宣布功能性灭绝^[31]。1984—1991年,长江中下游江豚数量约2 700头^[32],2017年长江江豚种群数量约1 012头,其自然种群数量仍在下降,极度濒危的状况没有改变,保护工作形势依然十分严峻。

1.4 水环境风险问题突出,水污染事件频发

长江流域石化、化工、医药、采选矿等高风险企业众多,据统计,全国40%的造纸、43%的合成氨、80%的磷铵、72%的印染布、40%的烧碱产能聚集在长江经济带区域^[33]。根据长江生态环境保护修复联合研究结果,仅39个驻点城市的风险企业数量就达11 604个,其中化学原料和化学制品制造业、非金属矿物制品业企业数量较大,分别为1 266和1 144个,占比分别达14.3%和12.9%,且主要集中于江苏省、湖北省和四川省。受生产和运输“亲水”属性的影响,这些高风险企业往往在长江干流和主要河湖沿岸分布,由于流域内人口密度大,国家级自然保护区、饮用水水源地保护区等敏感区密布,因此往往存在各类危、重污染以及高风险源与敏感风险受体交错分布的现象,突发性环境风险问题突出。

2006—2019年长江经济带11省(市)累计发生突发性环境污染事件3 583起,其中,较大以上的141起,占比3.9%,主要发生在云南、湖北、湖南;一般事件3 442起,主要发生在上海、浙江和江苏^[34](图5)。据统计,生产安全、企业排污、交通事故和自

然灾害是突发环境事件的主要原因^[35]。

2 长江流域水生态环境问题成因分析

2.1 城镇化进程加快,人口集聚增加生态环境压力

2008—2018年,长江经济带11省(市)的平均城镇化率由47.1%提高到60.4%^[36],形成了包括以长三角城市群、长江中游城市群和成渝城市群为代表的沿江城市群。快速城镇化带来人口的集聚以及土地利用格局的显著改变,截至2018年,长江经济带总人口已达5.99亿,占全国的42.9%,人口密度约为全国平均人口密度的1.8倍;2018年长江经济带建设用地面积较2000年增加了74.3%,旱地和水田面积分别减少了1.7%和7.9%^[37],资源环境限制性约束趋紧、国土空间结构性矛盾日益凸显^[38]。

人类活动显著改变了流域内氮、磷等营养元素的生物地球化学循环^[39]。一方面,城市生产、生活等活动产生的大量污染物集中排放到水体,形成滨岸污染带,造成水生态环境问题^[40];另一方面,为满足人口集聚带来的巨大粮食需求,人口增长和耕地面积减少双重压力促使农业生产走向集约化、规模化,为维持粮食高产而大量施用化肥和农药,引起日益严重的农业面源污染^[41-42]。已有研究表明,长江流域人为氮、磷通量分别为11.8、1.8 t/(km²·a),而成渝、长江中游和长三角城市群对人为氮、磷输入的贡献超过了60%^[37],由此产生显著的伴生生态环境风险问题^[43]。

与此同时,城镇化高速发展带来的新污染物风险也不可忽视,人口密度和城市化率是影响水体微塑料丰度空间异质性的的重要因素^[44],长江流域洞庭湖和下游地区是我国抗生素排放量高值区,2013年排入水体的抗生素分别高达3 440和3 000 t^[45]。

2.2 国土空间管控不到位

目前长江经济带各省(市)已完成生态环境分区管控方案、“三线一单”(生态保护红线、环境质量底线、资源利用上线和生态环境准入清单)编制,为区域生态环境准入和环境管理提供重要依据。但生态空间保护政策法规体系建设相对滞后,尚未统筹协调衔接好国土空间规划及其他部门的保护发展规划,水陆不统一,生态环保责任追究机制、监督机制还难以真正落实到位。目前,长江经济带划定生态保护红线面积54.42万km²,占长江经济带区域面积的25.47%^[1]。区域内有自然保护区1 098个,数量不少,但面积偏小或呈碎片化分布。由于缺乏总体保护规划和科学、系统、规范的自然保护地管理体系,各类生态保护体系的管控与空间范围存在重叠,保护体系不一致,导致生态空间依然存在“保护空

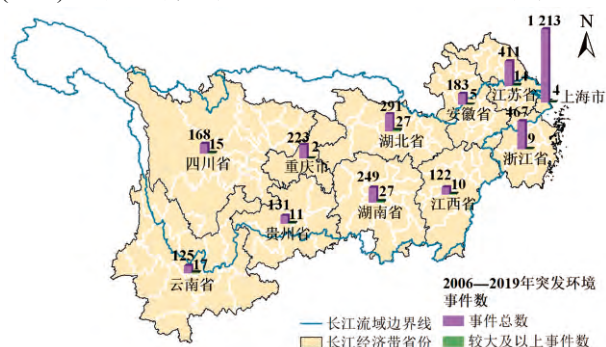


图5 2006—2019年长江经济带突发环境事件数量分布

Fig.5 Number and distribution of environmental emergencies in the Yangtze River Economic Belt in 2006-2019

缺”。更有一些自然保护区被人为割裂,成为“生态孤岛”,破坏和影响了自然保护区整体生态功能和价值。特别是跨省域的丘陵山地、河湖水系以及各类保护地在保护管理与开发程度等方面不统一,生态空间保护修复在短期内难以形成整体“一盘棋”^[46]。

2.3 环境基础设施仍然存在短板

长江流域上中下游区域发展极不平衡,沿江省(市)环境基础设施建设仍然存在短板。2019 年上海人均 GDP 已经超过 15 万元,江苏、浙江两省人均

GDP 也超过 10 万元,远高于全国平均水平。而长江沿岸的安徽、江西、湖南、四川、贵州、云南人均 GDP 均低于全国平均水平,贵州和云南两省人均 GDP 不足 5 万元,仅为全国平均水平的 65.50%~67.63%(图 6)。近年来,安徽、江西等经济不发达省份开始加大环境基础设施建设(图 7),但由于历史欠账多,环境基础设施仍然存在较大差异。以城市污水的处理能力为例,2011—2020 年上海单位面积建成区污水处理能力为 0.66 万~0.82 万 t/km²,若以人

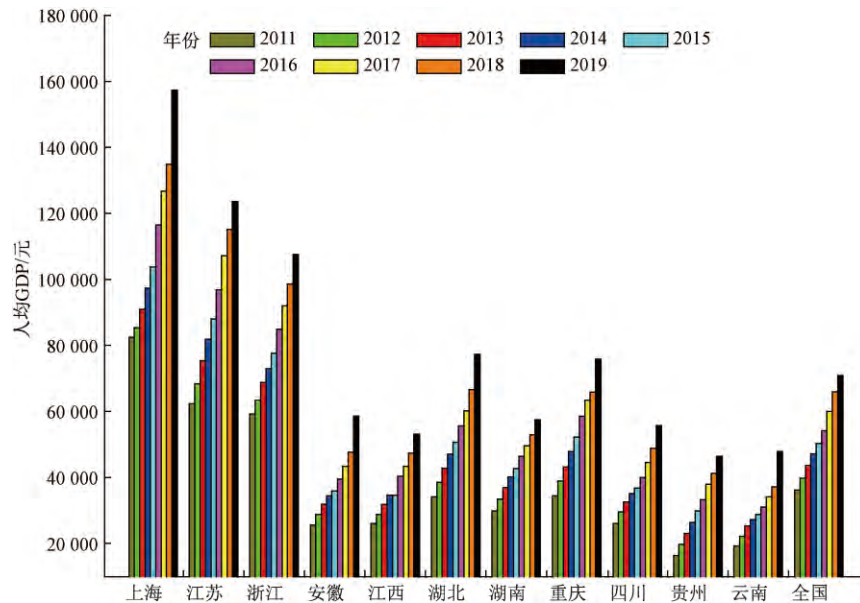


图 6 2011—2019 年长江经济带各省(市)及全国人均 GDP

Fig.6 Per capita GDP of the provinces in the Yangtze River Economic Belt and the whole country during 2011-2019

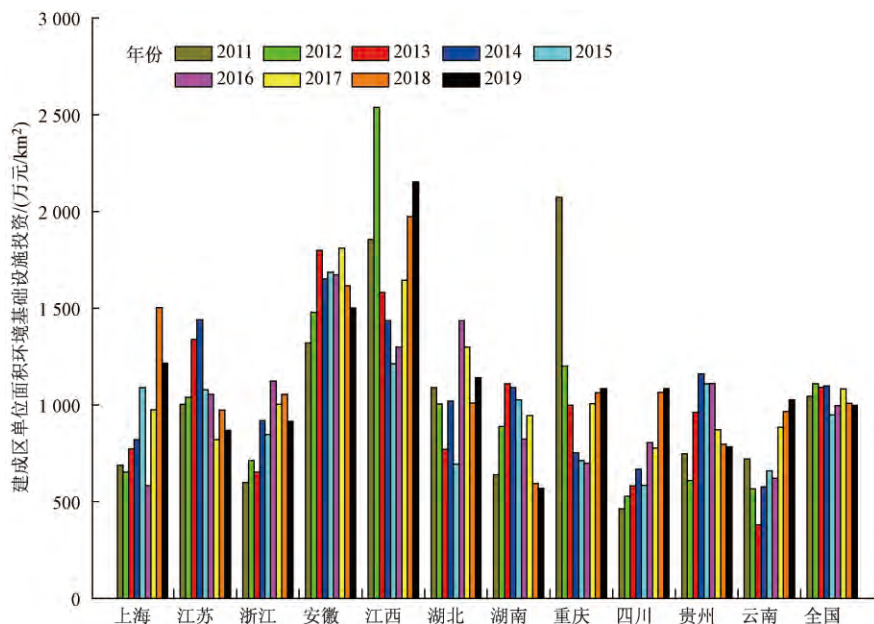


图 7 2011—2019 年长江经济带各省(市)及全国单位建成区面积环境基础设施投资

Fig.7 Environmental infrastructure investments per square kilometers of built-up area in the provinces of the Yangtze River Economic Belt and the whole country in 2011-2019

口统计, 处于 0.29 万~0.36 万 t/万人, 均远高于全国平均水平, 江苏和浙江也达到较高水平, 但沿江的江

西、贵州、云南等经济不发达省份城市污水处理能力均低于全国平均水平(图 8)。

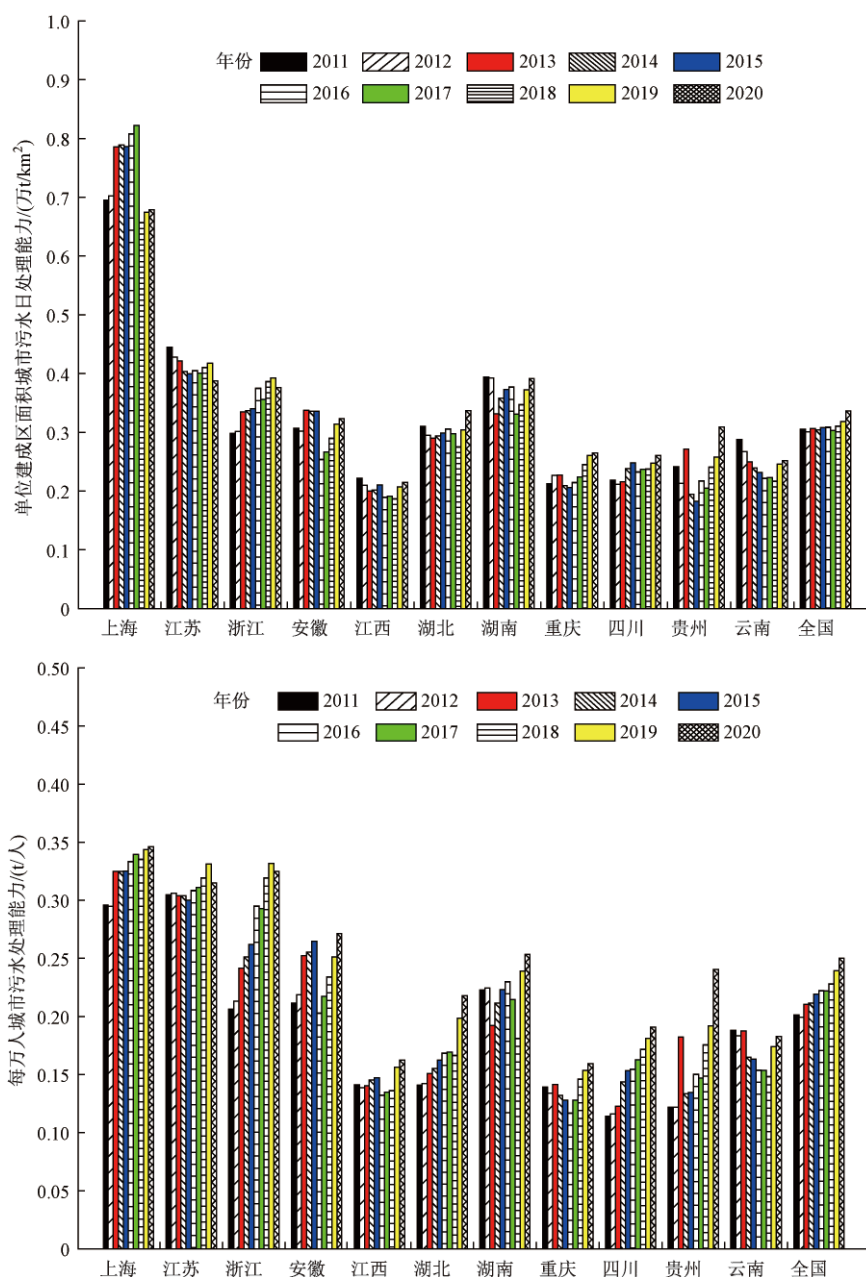


图 8 2011—2020 年长江经济带各省(市)及全国城市污水处理能力

Fig.8 Urban sewage treatment capacity of the provinces in the Yangtze River Economic Belt and the whole country in 2011-2020

2.4 生态环境治理协调性仍然较差

2018 年 3 月 17 日, 十三届全国人大一次会议审议通过《国务院机构改革方案》, 对原环境保护部的全部职责和水利部、原农业部等其他 6 部委涉及环境治污领域的职责进行整合, 组建生态环境部, 初步统一了分散在各部委的污染防治和生态保护职责。然而, 生态环境的系统性、整体性和关联要素的多元性, 决定了生态环境治理必然涉及多区域、多部门、多主体统筹协调^[47]。长江流域生态环境保护修复是

一项典型的系统工程, 涉及的自然要素包括山、河流、湖泊、森林、湿地、矿产等, 也包括农田、城市、乡村等社会经济组成要素。目前, 尽管不同地区在生态环境治理方面均付出一系列努力^[48], 但跨部门、跨区域联动协调仍然存在机制失灵或效率低下的问题^[49], 生态环境、水利、农业农村、交通、能源、安监、海事等多个部门均涉及长江的管理, 不同部门基于工作目标和职能定位的差异, 出现“各管一段”、多头治理的困境^[50], 沿江省市在水资源开发利用、生

态补偿等方面矛盾突出。

此外,多元共治、公众参与的生态环境治理体系尚未建立,传统的政府“包打天下”的模式未有根本改变。生态环境是最普惠的民生福祉,加强长江流域生态环境保护修复固然是政府公共管理的重要内容,但也是全社会的责任^[51]。长江流域发展不平衡、水生态系统退化问题突出,历史欠账多,生态保护修复任务艰巨、涉及领域多,亟需动员全社会力量共同参与。然而现有治理体系中,党委、政府、企业、公众职责定位尚未完全厘清,环境产权、生态环境价值、生态补偿机制等制度建设尚不健全,科研供给与实际需求存在脱节,科技成果转化路径单一等问题,也是制约长江流域生态环境保护修复的短板问题。

2.5 气候变化带来新挑战

近百年来随着温室气体排放量的显著增加,全球呈现变暖趋势^[52-53]。受其影响,长江流域的气温明显升高,20世纪90年代气温相比1961—1990年平均升高0.33℃,而2001—2005年的气温平均升高0.71℃。气候模型模拟预计,未来50年,长江流域地面气温将升高1.5~2.0℃^[54],对长江流域生态环境保护修复带来新挑战。

首先,气温升高会导致长江源区冰川的退化以及冻土的消融,降低三江源的生态屏障作用^[55]。青藏高原独有的热力和动力作用,对气候变化极为敏感;气温的升高,伴随着降水和蒸散发强度的改变,高原湖泊和湿地的水源补给减少。这些变化对三江源区的气象条件、水文循环和生态过程产生显著影响^[56]。源区气候、生态环境和水资源状况的变化不但影响西部的生态环境,也深刻影响整个流域的水资源安全、生态环境和经济社会发展^[57]。其次,气候变暖导致强降水事件和干旱事件呈现频率提高和强度增加的趋势^[58],导致森林^[59]、草地^[60]和湿地^[61]等重要生态系统发生退化,进而限制其水源涵养、防风固沙、生物多样性维系等生态功能。

3 长江流域水生态环境保护对策

3.1 强化国土空间管控,落实“三线一单”

长江流域生态环境问题,归根结底是资源过度开发、开发不当和粗放利用导致生态系统功能下降的问题。因此,要从根本上解决问题,必须按照资源、环境承载力合理配置国土开发空间格局,建设生态保护的空间支撑,形成节约资源和保护环境的空间格局、产业结构、生产方式、生活方式。一是编制统一的流域尺度国土空间规划,构建差别化自然生态空间用途管制规则,根据不同区域资源、环境承载

力的差异制定相应的发展政策与生态环境管控措施,构建高效、协调、可持续的国土空间开发格局,以主体功能区为基础,衔接国民经济和社会发展规划,统筹土地利用、城市建、产业发展等各类空间规划,推进“多规合一”实现生产、生活、生态空间合理布局;二是严格落实“三线一单”,确保重要生态功能区、生态敏感区、生态脆弱区、禁止开发区等基本生态保护红线,科学划定城镇开发边界,明确人口集聚、产业发展、区域开发、岸线利用等方面管控要求,确保规模不超过资源环境承载能力;三是统筹考虑区域地形地貌、水文结构、植被覆盖、气象等因素,合理确定城市群、城市之间的生态安全距离,合理优化城镇生态功能布局,拓展森林、湖泊、湿地等绿色空间。

3.2 补齐基础设施短板,深化污染防治

生态环境基础设施为生产生活提供重要的基础支撑和服务。补齐基础设施短板,不仅是解决长江流域水生态环境突出问题的关键手段,也是夯实城市绿色发展的硬件基础,推进可持续发展的重要举措。长江经济带由于人口集聚、经济发展速度快,许多城市的环境基础设施建设标准和预留前瞻性不足,导致污水收集管网、污水处理设施、垃圾收集处理设施等环境基础设施存在短板。为保障长江流域生态环境安全,首先建议对长江流域尤其是沿江省(市)城镇水污染治理设施运行状况进行全面摸底排查,开展污水管网系统收集和污水处理厂处理效果评估,建立水环境治理设施问题清单;其次,根据环境基础设施问题清单,结合长江流域水环境容量,系统谋划,制定环境基础设施升级改造计划;第三,多渠道争取资金,逐步补齐环境基础设施短板。

3.3 推进“三水”统筹,持续开展生态修复

以长江流域河湖为统领,以山水林田湖草沙冰为有机整体,统筹水资源、水环境、水生态(“三水”),干支流、左右岸、上中下游,持续推进长江流域生态环境保护修复,提升长江流域生态系统稳定性,恢复生态系统功能。其中源头区,以预防保护、自然恢复为主,通过退耕还林、退牧还草等措施,逐步恢复长江流域源头区的水源涵养、水土保持功能;上游地区,通过加强水库生态调度,开展水库生境重建,减少筑坝拦河对河流生态系统的影响;中游地区,以保护恢复为主,通过加强洞庭湖、鄱阳湖与汉江上中游地区水土流失治理与生态恢复,协调江湖联通关系,保护水生生态系统,维护生物多样性;下游地区,以污染防控和治理修复为主,通过推进生活污水深度处理、加强岸线生态修复、恢复缓冲带等

措施,“污染控源、生态扩容”两手发力,协同推长江流域生态环境保护修复。

3.4 加强政策协同, 推进多元共治

政府、市场、社会多方协同推进,是实现长江流域生态环境彻底好转关键所在和必然路径。首先,需要深入贯彻《长江保护法》,建立国家级的长江流域协调机制,统一指导、统筹协调长江保护工作,制定跨地区、跨部门的统一规划,建立科学合理的绩效评估考核制度,将长江生态环境保护修复纳入地方政府考核,用机制统筹、约束、激励全流域不同区域联合开展长江生态环境保护修复^[62]。其次,正视长江流域不同区域的现实差异,在“共同但有区别”的原则下,采用差异化区域环境治理目标管理,同时建立跨省的生态补偿机制,循序渐进地降低区域间环境协同治理差异。此外,需要建立政府主导、社会和公众参与、市场运作的长江流域生态环境协同保护修复治理体系,鼓励社会资本参与长江生态环境保护修复工作,建立生态产品价值实现机制,畅通社会多元资本参与和获益渠道。

3.5 加强制度创新, 提升科技支撑能力

科技创新是深入打好污染防治攻坚战,实现长江流域绿色发展的基本动力。由于长江流域生态环境保护修复是一项典型的多目标、多要素、跨区域、多介质的系统性工作,必须遵循客观规律,依靠科技创新,切实提高生态环境保护修复的系统性、整体性和科学性,精准解决突出生态环境问题,确保长江生态环境保护修复取得实效。首先,需要完善“1+X”科研组织实施机制,继续探索和实践新型举国体制,聚焦长江流域重大突出生态环境问题,统筹协调科技创新资源,推进联合攻关,为长江流域生态环境管理、污染防治、监督执法、保护修复等提供精准、科学的支撑;其次,持续深化科技体制改革,推进科研管理“放管服”,扩大科技人员自主权,营造良好研究氛围,激发创新活力;第三,建立生态环境数据开放共享机制,通过整合科研院所、高校以及生态环境领域国家重点实验室、国家野外观测台站等优质科技资源,建立开放、共享的科技资源共享服务大平台,推动协同创新。此外,需要围绕长江生态环境保护修复的迫切需求,进一步完善科技帮扶机制,推动科学普及,加快推动科技成果转化。

参考文献

- [1] 陈进, 刘志明. 近20年长江水资源利用现状分析[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(1): 1-4.
CHEN J, LIU Z M. Analysis of water resources utilization in the

Changjiang River Basin in recent two decades[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(1): 1-4.

- [2] 柳林云, 丁毅. 长江流域水力资源与水电规划[J]. 人民长江, 2013, 44(10): 69-71.
LIU L Y, DING Y. Analysis on hydropower resources in Yangtze River Basin and hydropower generation planning[J]. Yangtze River, 2013, 44(10): 69-71.
- [3] 长江. 长江委发布2001年《长江流域及西南诸河水资源公报》[J]. 人民长江, 2003, 34(1): 21.
- [4] 谢平, 陈进, 于秀波, 等. 三峡工程对长江中下游湿地生态系统的影响评估[M]. 武汉: 长江出版社, 2018.
- [5] 吴舜泽, 王东, 姚瑞华. 统筹推进长江水资源水环境水生态保护治理[J]. 环境保护, 2016, 44(15): 16-20.
WU S Z, WANG D, YAO R H. Overall planning to promote the Yangtze River protection of water environment[J]. Environmental Protection, 2016, 44(15): 16-20.
- [6] 张慧, 高吉喜, 乔亚军. 长江经济带生态环境形势和问题及建议[J]. 环境与可持续发展, 2019, 44(5): 28-32.
ZHANG H, GAO J X, QIAO Y J. Current situation, problems and suggestions on ecology and environment in the Yangtze River Economic Belt[J]. Environment and Sustainable Development, 2019, 44(5): 28-32.
- [7] 张莹莹, 蔡晓斌, 杨超, 等. 1974—2017年洪湖湿地自然保护区景观格局演变及驱动力分析[J]. 湖泊科学, 2019, 31(1): 171-182.
ZHANG Y Y, CAI X B, YANG C, et al. Driving force analysis of landscape pattern changes in Honghu Wetland Nature Reserve in recent 40 years[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(1): 171-182.
- [8] 秦茜, 王继全, 易程程, 等. 新形势下洪湖水生态环境现状及修复对策研究[J]. 长江技术经济, 2020, 4(4): 41-44.
QIN Q, WANG J Q, YI C C, et al. Research on the status quo of Honghu Lake water ecological environment and remediation countermeasures under new situation[J]. Technology and Economy of Changjiang, 2020, 4(4): 41-44.
- [9] 段亮, 宋永会, 张临绒, 等. 辽河保护区河岸带生态恢复技术研究[J]. 环境工程技术学报, 2014, 4(1): 8-12.
DUAN L, SONG Y H, ZHANG L R, et al. The ecological restoration technologies of riparian area in Liaohe Conservation Area[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2014, 4(1): 8-12.
- [10] 陈雷. 落实绿色发展理念 全面推行河长制河湖管理模式[J]. 河北水利, 2017(3): 6-7.
- [11] 殷守敬, 吴传庆, 乐松, 等. 长江干流岸线类型遥感监测分析[J]. 人民长江, 2020, 51(11): 16-21.
YIN S J, WU C Q, LE S, et al. Remote sensing monitoring and analysis of shoreline types of Yangtze River[J]. Yangtze River, 2020, 51(11): 16-21.
- [12] 段学军, 邹辉, 王晓龙. 长江经济带岸线资源保护与科学利用[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(8): 970-976.
DUAN X J, ZOU H, WANG X L. Protection and scientific utilization of waterfront resources in the Yangtze River Economic Belt[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(8): 970-976.
- [13] 陈进. 长江流域生态红线及保护对象辨识[J]. 长江技术经济, 2018, 2(1): 30-36.
- [14] 刘录三, 黄国鲜, 王璠, 等. 长江流域水生态环境安全主要问

- 题、形势与对策[J]. 环境科学研究, 2020, 33(5): 1081-1090.
- LIU L S, HUANG G X, WANG F, et al. Main problems, situation and countermeasures of water eco-environment security in the Yangtze River Basin[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(5): 1081-1090.
- [15] 国家统计局. 中国统计年鉴(2012—2020年)[M/OL]. 北京: 中国统计出版社. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/>.
- [16] 李曼, 敬红, 贾曼, 等. 2016—2019年长江经济带总磷污染及治理特征分析[J]. 中国环境监测, 2021, 37(5): 94-102.
- LI M, JING H, JIA M, et al. Analysis of total phosphorus pollution and treatment characteristics in the Yangtze River Economic Belt during 2016-2019[J]. Environmental Monitoring in China, 2021, 37(5): 94-102.
- [17] 秦延文, 马迎群, 王丽娟, 等. 长江流域总磷污染: 分布特征: 来源解析-控制对策[J]. 环境科学研究, 2018, 31(1): 9-14.
- QIN Y W, MA Y Q, WANG L J, et al. Pollution of the total phosphorus in the Yangtze River Basin: distribution characteristics, source and control strategy[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(1): 9-14.
- [18] 陈善荣, 何立环, 张凤英, 等. 2016—2019年长江流域水质时空分布特征[J]. 环境科学研究, 2020, 33(5): 1100-1108.
- CHEN S R, HE L H, ZHANG F Y, et al. Spatiotemporal characteristics of surface water quality of the Yangtze River Basin during 2016-2019[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(5): 1100-1108.
- [19] 邱凉, 罗小勇, 程红光. 长江流域大尺度空间非点源污染负荷研究[J]. 人民长江, 2011, 42(18): 81-84.
- QIU L, LUO X Y, CHENG H G. Research on large-scaled spatial non-point source pollution load of the Yangtze River Basin[J]. Yangtze River, 2011, 42(18): 81-84.
- [20] 戴明龙, 张明波. 长江流域径流时空分布及变化规律研究[J]. 人民长江, 2013, 44(10): 88-91.
- DAI M L, ZHANG M B. Research on temporal and spatial distribution law of runoff in Yangtze River Basin[J]. Yangtze River, 2013, 44(10): 88-91.
- [21] 生态环境部. 2020全国地表水水质月报(1月至12月)[A/OL]. [2021-12-10]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/shj/dbsszyb/>.
- [22] 陈大庆, 段辛斌, 刘绍平, 等. 长江渔业资源变动和管理对策[J]. 水生生物学报, 2002, 26(6): 685-690.
- CHEN D Q, DUAN X B, LIU S P, et al. On the dynamics of fishery resources of the Yangtze River and its management[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2002, 26(6): 685-690.
- [23] 易伯鲁 余志堂 梁秩炎 等著. 葛洲坝水利枢纽与长江四大家鱼[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1988.
- [24] 王海华, 冯广朋, 吴斌, 等. 长江水系中华绒螯蟹资源保护与可持续利用管理对策研究[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(5): 93-100.
- WANG H H, FENG G P, WU B, et al. Research on management and countermeasures of sustainable utilization of eriocheir sinensis of Yangtze population[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2019, 40(5): 93-100.
- [25] 陈大庆. 长江渔业资源现状与增殖保护对策[J]. 中国水产, 2003(3): 17-19.
- [26] 水利部太湖流域管理局. 太湖健康状况报告(2008—2018年)[R]. 上海: 水利部太湖流域管理局.
- [27] 王孝程, 解鹏飞, 李晴, 等. 长江口海域生态环境状况及保护对策[J]. 环境科学研究, 2020, 33(5): 1197-1205.
- WANG X C, XIE P F, LI Q, et al. Ecological environment of the Yangtze Estuary and protection countermeasures[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(5): 1197-1205.
- [28] 杨颖, 徐韧. 近30 a来长江口海域生态环境状况变化趋势分析[J]. 海洋科学, 2015, 39(10): 101-107.
- YANG Y, XU R. The environment variation trend in the Changjiang River Estuary in the past 30 a[J]. Marine Sciences, 2015, 39(10): 101-107.
- [29] 吴金明, 王成友, 张书环, 等. 从连续到偶发: 中华鲟在葛洲坝下发生小规模自然繁殖[J]. 中国水产科学, 2017, 24(3): 425-431.
- WU J M, WANG C Y, ZHANG S H, et al. From continuous to occasional: small-scale natural reproduction of Chinese sturgeon occurred in the Gezhouba spawning ground, Yichang, China[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2017, 24(3): 425-431.
- [30] ZHANG H, JARIĆ I, ROBERTS D L, et al. Extinction of one of the world's largest freshwater fishes: lessons for conserving the endangered Yangtze fauna[J]. Science of the Total Environment, 2020, 710: 136242.
- [31] 王丁, 郝玉江. 白鱀豚“功能性灭绝”背后的思考[J]. 生命世界, 2007(11): 44-47.
- [32] 赵修江, 王丁, BARLOW J, 等. 长江中下游长江江豚种群数量研究[C]//野生动物生态与资源保护第四届全国学术研讨会论文集. 北京: 中国动物学会兽类学分会, 2007.
- [33] 曹国志, 於方, 王金南, 等. 长江经济带突发环境事件风险防控现状、问题与对策[J]. 中国环境管理, 2018, 10(1): 81-85.
- CAO G Z, YU F, WANG J N, et al. Situation, problems and countermeasures of risk prevention and control of environmental emergencies in the Yangtze River Economic Belt[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2018, 10(1): 81-85.
- [34] 国家统计局. 中国统计年鉴(2006—2020年)[M/OL]. 北京: 中国统计出版社. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/>.
- [35] 周夏飞, 曹国志, 於方, 等. 长江经济带突发水污染风险分区研究[J]. 环境科学学报, 2020, 40(1): 334-342.
- ZHOU X F, CAO G Z, YU F, et al. Risk zoning of acute water pollution in the Yangtze River Economic Belt[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(1): 334-342.
- [36] 杨荣金, 孙美莹, 傅伯杰, 等. 长江流域生态系统可持续管理策略[J]. 环境科学研究, 2020, 33(5): 1091-1099.
- YANG R J, SUN M Y, FU B J, et al. Sustainable management strategy of ecosystems in the Yangtze River Basin[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(5): 1091-1099.
- [37] 金声甜, 肖文海, 杨胜苏, 等. 长江经济带土地利用变化及其生态系统响应[J]. 经济地理, 2020, 40(7): 166-173.
- JIN S T, XIAO W H, YANG S S, et al. Land use change and its ecosystem response in the Yangtze River Economic Belt[J]. Economic Geography, 2020, 40(7): 166-173.
- [38] 祁帆, 贾克敬, 王葳. 长江经济带国土空间开发利用问题与对策研究[J]. 环境工程技术学报, 2016, 6(6): 621-628.
- QI F, JIA K J, WANG W. Study on problems and countermeasures of land space development and utilization in the Yangtze River Economic Belt[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2016, 6(6): 621-628.
- [39] CUI M, GUO Q J, WEI R F, et al. Anthropogenic nitrogen and phosphorus inputs in a new perspective: environmental loads from the mega economic zone and city clusters[J]. Journal of

- Cleaner Production, 2021, 283: 124589.
- [40] GU B J, JU X T, CHANG J, et al. Integrated reactive nitrogen budgets and future trends in China[J]. PNAS, 2015, 112(28): 8792-8797.
- [41] LIN T, WANG J, BAI X M, et al. Quantifying and managing food-sourced nutrient metabolism in Chinese cities[J]. Environment International, 2016, 94: 388-395.
- [42] CUI S H, SHI Y L, MALIK A, et al. A hybrid method for quantifying China's nitrogen footprint during urbanisation from 1990 to 2009[J]. Environment International, 2016, 97: 137-145.
- [43] DENG C N, LIU L S, PENG D Z, et al. Net anthropogenic nitrogen and phosphorus inputs in the Yangtze River Economic Belt: spatiotemporal dynamics, attribution analysis, and diversity management[J]. Journal of Hydrology, 2021, 597: 126221.
- [44] ZHANG Z Q, DENG C N, DONG L, et al. Microplastic pollution in the Yangtze River Basin: heterogeneity of abundances and characteristics in different environments[J]. Environmental Pollution, 2021, 287: 117580.
- [45] ZHANG Q Q, YING G G, PAN C G, et al. Comprehensive evaluation of antibiotics emission and fate in the river basins of China: source analysis, multimedia modeling, and linkage to bacterial resistance[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(11): 6772-6782.
- [46] 刘冬, 徐梦佳, 林乃峰, 等. 加强长江三角洲区域生态空间一体化管治[J]. 中华环境, 2020(12): 25-27.
- [47] 廖小明. 协同治理视域下民族地区生态治理的路径选择[J]. 学术探索, 2020(9): 50-56.
- LIAO X M. The path choice of ecological governance in ethnic areas from the perspective of collaborative governance[J]. Academic Exploration, 2020(9): 50-56.
- [48] 燕波, 孙启宏, 李小敏, 等. 差异化标准下长江经济带省际环境绩效比较研究[J]. 环境工程技术学报, 2020, 10(3): 504-511.
- YAN B, SUN Q H, LI X M, et al. Comparative study of environmental performance in Yangtze River Economic Belt under different standards[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2020, 10(3): 504-511.
- [49] 夏光. 长江大保护: 难在“共”字, 突破在“统”字[J]. 中华环境, 2017(增刊1): 70-71.
- [50] 郜志云, 姚瑞华, 续衍雪, 等. 长江经济带生态环境保护修复的总体思考与谋划[J]. 环境保护, 2018, 46(9): 13-17.
- GAO Z Y, YAO R H, XU Y X, et al. General thinking and planning of promoting the ecological environmental protection and restoration in the Yangtze River Economic Belt[J]. Environmental Protection, 2018, 46(9): 13-17.
- [51] 巢哲雄. 关于促进国家生态环境治理现代化的思考[J]. 环境保护, 2014, 42(16): 44-46.
- CHAO Z X. Thoughts on promoting the national ecological environment governance modernization[J]. Environmental Protection, 2014, 42(16): 44-46.
- [52] FORZIERI G, ALKAMA R, MIRALLES D G, et al. Satellites reveal contrasting responses of regional climate to the widespread greening of Earth[J]. Science, 2017, 356(6343): 1180-1184.
- [53] DIFFENBAUGH N S, BURKE M. Global warming has increased global economic inequality[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(20): 9808-9813.
- [54] 徐明. 长江流域气候变化脆弱性与适应性研究[M]. 北京: 水利水电出版社, 2009.
- [55] 李付杰, 孙倩莹, 王世曦, 等. 2000—2015年三江源区生态系统服务评估[J]. 环境工程技术学报, 2020, 10(5): 786-797.
- LI F J, SUN Q Y, WANG S X, et al. Valuation of ecosystem services in Three-River Headwaters Region from 2000 to 2015[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2020, 10(5): 786-797.
- [56] ZHENG Y T, HAN J C, HUANG Y F, et al. Vegetation response to climate conditions based on NDVI simulations using stepwise cluster analysis for the Three-River Headwaters region of China[J]. Ecological Indicators, 2018, 92: 18-29.
- [57] 郑裕彤, 黄跃飞, 王可映. 三江源地区植被对水分胁迫条件的响应特征[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(2): 249-262.
- ZHENG Y T, HUANG Y F, WANG K Y. Response of vegetation to water stress in the Three-River Headwaters Region of China[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2018, 26(2): 249-262.
- [58] SU B, HUANG J, FISCHER T, et al. Drought losses in China might double between the 1.5°C and 2.0°C warming[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(42): 10600-10605.
- [59] 孔令桥, 张路, 郑华, 等. 长江流域生态系统格局演变及驱动力[J]. 生态学报, 2018, 38(3): 741-749.
- KONG L Q, ZHANG L, ZHENG H, et al. Driving forces behind ecosystem spatial changes in the Yangtze River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(3): 741-749.
- [60] 张文娟, 叶丽珠, 马秉云, 等. 三江源草地总生物量对未来气候变化的响应[J]. 草业科学, 2021, 38(5): 835-847.
- ZHANG W J, YE L Z, MA B Y, et al. The response of total grassland biomass in Sanjiangyuan to future climate change scenarios[J]. Pratacultural Science, 2021, 38(5): 835-847.
- [61] 陈有明, 刘同庆, 黄燕, 等. 长江流域湿地现状与变化遥感研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(6): 801-808.
- CHEN Y M, LIU T Q, HUANG Y, et al. Remote sensing research of wetland current status and change in the Yangtze River Basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze River Basin, 2014, 23(6): 801-808.
- [62] 李海生, 王丽婧, 张泽乾, 等. 长江生态环境协同治理的理论思考与实践[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(3): 409-417.
- LI H S, WANG L J, ZHANG Z Q, et al. Theoretical thought and practice of eco-environment synergistic management in the Yangtze River[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(3): 409-417. ◇