

我国水生态环境安全保障对策研究

霍守亮^{1,2}, 张含笑^{1,2}, 金小伟³, 曹晓峰⁴, 吴丰昌^{1,2}

(1. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 2. 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 3. 中国环境监测总站, 北京 100012; 4. 清华大学水质与水生态研究中心, 北京 100084)

摘要: 良好的水生态环境是实现中华民族永续发展的内在要求, 是生态文明和“美丽中国”建设的重要基础。当前, 我国水生态环境形势依然严峻, 富营养化、饮用水源地污染、地下水与近海海域污染、新污染物、生态用水短缺等水生态环境问题未得到根本解决。本文系统解析了我国水生态环境总体形势和面临的主要问题, 提出了以流域水生态环境质量改善为核心, 综合考虑水质改善、水生态保护和水环境风险防控的战略思路、基本原则和战略目标, 提出了包括开展重点流域“山水林田湖草沙”协同治理和整体修复科技攻关与示范、开展京津冀协同发展区水环境水生态质量整体提升科技攻关与示范、开展新时期饮用水安全保障科技攻关与示范在内的 3 项重大科技工程建议。为推动我国水生态环境安全保障的顺利实施, 研究建议: 全面系统修订《地表水环境质量标准》, 强化其在水生态文明建设中的引领作用; 科学评估我国湖泊氮磷营养物的时空差异, 实施差异化营养物标准; 科学评估我国水生态现状, 深化推进水生态监测和评估; 构建基于大数据融合的饮用水安全保障智慧化监管平台, 保障饮用水安全。

关键词: 水生态环境; 生态文明; 质量改善; 水生态安全; 饮用水安全

中图分类号: X52; X53 **文献标识码:** A

Countermeasures for Assuring Water Ecological Environment Security in China

Huo Shouliang^{1,2}, Zhang Hanxiao^{1,2}, Jin Xiaowei³, Cao Xiaofeng⁴, Wu Fengchang^{1,2}

(1. Chinese Research Academy of Environment Sciences, Beijing 100012, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Beijing 100012, China; 3. China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012, China; 4. Center for Water and Ecology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A good water ecological environment is crucial for the sustainable development and ecological civilization of China. However, various problems remain for China's water ecological environment, including eutrophication, pollution of drinking water sources, contamination of groundwater and coastal waters, emerging pollutants, and shortage of ecological water. In this study, we analyzed the overall situation of the water ecological environment in China, pinpointed the major challenges, and proposed the strategic thinking and several basic principles. These principles focus on improving the water ecological environment and comprehensively consider water quality improvement, water ecological protection, and water environmental risk prevention and control. Three major scientific and technological projects were proposed pertaining to (1) coordinated governance and overall restoration of mountains, rivers, forests, fields, lakes, grasses, and sand in key basins, (2) overall improvement of water environment

收稿日期: 2022-07-21; **修回日期:** 2022-08-22

通讯作者: 吴丰昌, 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室研究员, 中国工程院院士, 研究方向为环境基准标准与污染防治; E-mail: wufengchang@vip.skleg.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“面向生态文明建设的水安全保障战略研究”(2021-XBZD-05)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

and water ecology in the Beijing–Tianjin–Hebei Collaborative Development Area, and (3) assurance of drinking water safety in the new era. Furthermore, we proposed the following four countermeasures: (1) revising the *Environmental Quality Standards for Surface Water* to strengthen its leading role in the construction of water ecological civilization in China; (2) evaluating the spatial and temporal differences of nitrogen and phosphorus nutrients in China’s lakes and implementing differentiated nutrients standards; (3) assessing the current status of water ecology in China and promoting water ecology monitoring and assessment; and (4) establishing an intelligent supervision platform for drinking water safety based on big data fusion.

Keywords: water ecological environment; ecological civilization; quality improvement; water ecological security; drinking water safety

一、前言

水生态环境安全是我国实现2035年“生态环境质量根本好转和生态文明建设”国家目标的重要保障，也是长江大保护、黄河流域生态保护、京津冀协同发展等国家战略的重大需求[1,2]。我国不断统筹推进“五位一体”总体布局，将生态环境保护摆在了更加重要的战略位置；自2015年4月国务院发布实施《水污染防治行动计划》以来，以改善水环境质量为核心，出台配套政策措施，加快推进水污染治理，全国水生态环境明显改善，人民群众获得感显著增强[3~7]。

国家科技重大专项、重点研发计划等的实施为我国水环境质量改善、“三河三湖”等重点流域水质由不断恶化转为持续向好、让老百姓喝上放心水提供了强有力的技术支撑。当前，我国水生态环境形势依然严峻，水体富营养化、饮用水源地污染、地下水与近海海域污染、新污染物、生态用水短缺等水生态环境问题未得到根本解决，水资源、水环境和水生态问题仍是区域高质量发展的最大短板，“三水共治”处于压力叠加、负重前行的关键期[8~15]。

本文紧密围绕长江大保护、黄河流域生态保护、京津冀协同发展等重大战略需求，针对我国生态文明建设过程中水生态环境安全保障的突出问题，系统解析我国水生态环境总体形势，提出我国水生态环境安全保障的战略思路和指导原则，形成我国水生态环境安全保障的对策建议以及重大科技工程建议。

二、我国水生态环境总体形势

(一) 七大流域水质常规指标提升明显

目前，全国七大流域化学需氧量和氨氮等常规污染得到了有效遏制，污染治理成效显著，水污染加剧的态势有了明显改善，全国地表水中的优良水

质断面比例不断增加。2021年，在3641个国家地表水考核断面中，水质优良（I~III类）断面比例为84.9%，与2020年相比上升了1.5个百分点；劣V类断面比例为1.2% [5]。“十三五”以来，常规污染物控制效果明显，但总磷、总氮等污染问题开始突出。然而，在《地表水环境质量标准》（GB 3838—2002，以下简称《标准》）中，河流水体没有总氮标准，总氮指标也不是约束性指标，我国河流总氮浓度较高。

(二) 湖库富营养化形势依然严峻

2021年，在我国监测的210个重点湖库中，水质优良（I~III类）的湖库个数占比为72.9%，同比下降0.9个百分点；劣V类水质的湖库个数占比为5.2%，同比持平，主要污染指标为总磷、化学需氧量和高锰酸盐指数。在209个监测营养状态的湖库中，中度富营养的湖库有9个，占比为4.3%；轻度富营养的湖库有48个，占比为23%；其余湖库为中营养或贫营养状态 [5]。全国湖库水质总体进一步改善，但藻类生物量逐年升高；太湖、巢湖以及滇池的氮磷含量逐渐降低，但水华发生频率和范围未明显改善。

(三) 河口、近岸海域水质总体稳中向好，缺氧、赤潮问题严重

2021年，在监测的230个入海河流国家考核断面中，I~III类水质断面占比为71.7%，比2020年上升4.5个百分点；劣V类水质断面占比为0.4%，比2020年下降0.9个百分点。主要超标指标为化学需氧量、高锰酸盐指数、五日生化需氧量、总磷和氨氮 [5]。河口缺氧问题严重，渤海湾、长江入海口和珠江入海口由季节性大面积缺氧逐步发展为长年缺氧。

(四) 饮用水安全问题依然突出

2021年，监测的876个地级及以上城市在用集

中式生活饮用水水源断面点位中,全年均达标的有 825 个,占比为 94.2% [5]。但是,饮用水源地检出的新型污染物不断涌现,区域水生态、人体健康和饮用水安全存在风险,发现饮用水中存在标准外的农药、高氯酸盐、全氟化合物、亚硝胺类、内分泌干扰物、抗生素等新型污染物。农村饮用水水源受农业面源污染、生活污染、垃圾污染等影响,存在突发性安全隐患。我国不少化工、石化等重污染行业布局在江河沿岸,由于一些企业建厂早、设备陈旧、管理落后,水污染事故安全隐患大,对饮用水源地造成潜在威胁。

(五) 流域水资源过度开发,部分流域生态用水短缺严重

我国水资源可利用量约为 $8.14 \times 10^{11} \text{ m}^3$, 2020 年国内用水总量约为 $6.7 \times 10^{11} \text{ m}^3$, 约占水资源可开发利用量的 82%。水资源的过度开发以及全球气候变化影响致使生态用水被挤占、河流干枯、湿地退化、滩涂消失、流域生态功能严重失调等水资源问题。水资源时空分布不均,供需矛盾突出;地下水超采严重,地下水超采引发地面沉降;具有重要生态屏障作用的干旱半干旱地区湖泊由于生态用水短缺,萎缩严重。

三、我国水生态环境安全保障面临的问题

(一) 流域关键水环境指标未纳入污染物总量控制

当前,流域水生态环境监管的约束性指标为化学需氧量和氨氮,总氮、总磷等关键水生态环境指标未纳入约束性指标。而氮磷是地表水体藻类生产力的基本营养元素,是导致湖泊、水库、河口和近岸海域富营养化的关键因素。流域关键水环境指标中氮磷总量控制指标、分区营养物标准体系的缺失,无法从根本上控制不同类型水体的氮磷污染负荷,不能有效指导流域从源头、过程和末端削减氮磷量和入水体量,导致湖泊、水库、河口和近岸海域设定的富营养化控制目标不科学,未能有效控制水体富营养化。

(二) 现行地表水质量标准难以适应新时期水生态环境安全保障

《标准》依据水域环境功能和保护目标将水体

划分为五类。《标准》中的项目共计 109 项,包括基本项目 24 项、集中式生活饮用水地表水源地补充项目 5 项以及特定项目 80 项。当前,《标准》已实施 20 年,对于新时代水生态环保提出的新目标要求,已设定的污染物指标数量和标准限值与现实需要存在诸多不适应的问题,如标准限值的水质基准研究支撑不足、各功能水体与水质要求对应性不强、功能指标重污染防治而轻生态保护、部分污染物项目和限值缺失或陈旧、标准值未体现空间差异性等。此外,《标准》缺乏对河流中总氮的标准限值,缺乏对河湖之间总磷标准值的有效衔接。

(三) 流域水陆统筹的管理体制和长效运行机制不健全

水生态环境安全保障是集技术、法律、行政、经济等于一体的系统工程。我国现行的水生态环境管理体系是以污染排放控制和水环境质量为核心,尚未形成“水生态健康-水环境质量-污染排放控制-流域水土综合调控”相衔接的技术体系;现阶段流域管理仍然以行政区划范围内的行政管理为主,由于区域间的发展需求和管理要求不同,形成了在同一流域不同地区管理上的差异化,流域管理缺乏协同性和整体性。当前,水生态环境安全管理的环境目标多为重污染控制、轻水生态健康保护;水功能区划则主要是从水体使用功能角度出发,对水生态区域差异及其功能保护考虑不足。我国现行水环境质量评估的重点是关注水化学指标,水生态系统健康评价方法尚未得到应用,在水风险、生态流量、水生态方面管理薄弱。

(四) 水生态环境安全保障科技支撑仍需加强

当前,保障水生态环境安全的科技支撑尚需加强,需要系统开展理念创新,统筹“山水林田湖草沙”自然生态的各个要素,按照生态系统的整体性、系统性及其内在规律,统筹考虑自然生态各要素、山上山下、地上地下、陆地海洋以及流域上下游,进行整体性保护、系统性修复、综合性治理,增强生态系统的循环能力,维护生态平衡。统筹开展治水与治山、治水与治林、治水与治田,进行宏观管控和综合治理;统筹流域和行政区域的关系,统筹上下游、干支流,统筹城市和乡村,统筹水域和陆地系统,推进河湖治理与保护,形成“预防-

改善—修复—保护—水生态文明”的全过程区域的水环境科技系统化解决方案。

四、水生态环境安全保障的思路与原则

(一) 总体思路

在“十四五”时期及中长期发展阶段，水质改善仍然是水生态环境保护的当务之急，要推进“三水统筹”，以流域水生态环境质量改善为核心，综合考虑水质改善、水生态保护和水环境风险防控，按照“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”原则，坚持“山水林田湖草沙”是一个生命共同体的理念，统筹水资源利用、水生态保护和水环境治理，强化源头控制、综合施策，着力构建现代化的水生态环境治理体系，突出解决重点流域和区域问题，加强气候变化对水生态环境的影响研究，强化适应气候变化的能力，逐步推进“美丽中国”水生态环境保护目标的实现。

(二) 战略目标

以习近平生态文明思想为指导，面向国家2035年生态环境根本好转、“美丽中国”基本实现的战略目标，构建水生态系统良性循环和水环境风险有效防控为重点的水生态安全体系，构建以水生态环境质量持续好转为核心的现代化水生态环境管理体系。面向2035年保障水生态环境安全，按照“协同治理、整体修复和系统保护”三步走战略，2025年实现全国水环境质量总体改善；2035年实现全国水生态功能基本恢复；2050年实现全国水生态系统良性循环。

(三) 基本原则

改善生态、优化经济。正确处理水生态环境安全保障与经济社会优化发展的关系，将单纯地解决水生态环境问题转为发展与水生态环境安全保障相协调，保护和修复水生态环境，发展循环经济和低碳技术，不断改善水环境质量和生态系统健康，推动经济社会发展与水生态环境安全协同发展。

空间管控、严守红线。从战略性、系统性角度出发，设定并严守流域水资源利用上限、水环境质量底线、水生态保护红线；立足区域差异性，提出具有差别化、有针对性、可操作性的分类管控要

求，指导和落实水生态环境安全保障方案；重视流域水生态环境污染的空间管控，开展综合管理与控制，统筹好流域上下游之间的协调关系。

水陆统筹、综合防治。从流域的整体性、系统性出发，重视水陆统筹、陆海统筹的流域水生态环境污染的预防、生态建设和系统管理，统筹流域水陆之间的协调关系，兼顾流域生态系统健康、环境功能保障和流域经济社会的可持续发展，采用技术、经济、行政、法律等综合手段进行流域全过程污染防治。

分区控制、分类指导。针对不同区域的水生态环境问题和污染特征，并结合区域经济发展和技术水平，提出科学、合理的水生态环境管理目标和任务，采用基于区域差异的分区控制策略。按照水生态环境污染和退化特征及其对经济社会的支撑功能，对水生态环境安全保障进行分类指导。

生态优先、风险控制。开展水生态环境的系统修复，将生态修复与污染治理相结合，改善水体生态系统的结构和功能；改善河流水质、水文条件，维持河流生态需水量；恢复水生生物群落，保护濒危、珍稀、特有生物物种。加强流域水生态风险防范，注重采用水生态风险管理与防范的方式来解决有毒污染物的环境管理问题。

五、重大工程建议

(一) 开展重点流域“山水林田湖草沙”协同治理和整体修复科技攻关与示范

加强对长江、黄河等重点流域“山水林田湖草沙”协同治理和整体修复的科学规律认识和理念创新，形成新时代“山水林田湖草沙”协同治理和水生态整体修复的理论体系。统筹水循环、水环境和水生态，建立保障长江、黄河等流域河流以及湖泊、水库生态健康的水质水生态基准标准和排放限值，突破重点区域水环境协同治理和水生态整体修复的关键技术瓶颈；建立基于区域水生态安全的梯级水库群生态风险控制与生态调度技术体系。构建生物、高端装备制造、新能源、新材料等新兴行业水污染风险防控技术体系，发展大型工业聚集园区生产链的废水全过程控制技术，研发整装成套化的应急污染处理处置新工艺、新材料与成套设备，提出长江、黄河等流域区域水环境治理和水生态系统

保护的整体科技解决方案。

（二）开展京津冀协同发展区水环境水生态质量整体提升科技攻关与示范

针对京津冀协同发展区水生态文明建设的战略需求，研究构建“区域循环、多元循环、生态循环、梯级利用”的新模式、新系统和技术体系，构建区域“趋零取水、趋零排水”系统，发展“域内循环、自给自足”的新型供排水体系的构建技术和管理体系。针对面向未来的城市水环境治理技术需求，开展污水资源回收与回用技术、水处理超净排放技术、污泥中能源和资源高效回收利用技术研究。研发集成近岸海域保护-陆地污染控制-产业结构调整协同治理技术，建立陆海统筹的近岸海域环境保护科学理论、方法与技术体系。研发先进地下水污染治理设备、先进材料和工艺技术，构建实用、有效的源头控制-过程阻断-末端治理的地下水污染防控技术体系，突破高效可持续地下水修复的关键技术，推进原位修复、协同修复、绿色修复技术的工程化应用，构建基于风险管控的污染监管与决策支持技术体系。从提标扩容、流域综合治理目标要求和急需的管理政策出发，研究适用于新阶段经济社会发展特点的水环境战略决策平台、水环境管理体制和环境政策体系。

（三）开展新时期饮用水安全保障科技攻关与示范

开展饮用水水质持续提升和智慧化运行监管方面的科技创新，强化饮用水安全保障能力。开展水中新污染物的识别和风险评价，建立标准-效应协同的水源和饮用水新标准；研发水源保护与改善的生态化技术，研发全球气候变化条件下的水源水质调控技术，研发以无药剂（少药剂）为核心的低能耗、短流程的水处理新技术与新工艺、以微量污染物控制及有害副产物阻断为目标的膜工艺和高级氧化技术，研发水厂与管网协同的输配过程水质维持技术，构建饮用水安全保障全过程的绿色技术体系，持续提升饮用水水质；利用互联网、物联网、大数据、云计算等信息化手段，研发水源水质演变模拟和可视化监控技术、水处理工艺单元实时模拟优化技术、管网智能感知和漏损控制技术，构建从水源到龙头全过程的集感知-诊断-决策-控制为一体的智能保障技术体系；创新供水模式、管理体

制与机制，建立现代化的饮用水科技与管理平台。通过全国示范应用和行业业务化运行，带动产业发展，实现饮用水技术体系现代化。

六、对策建议

（一）全面系统修订《地表水环境质量标准》，强化其在水生态文明建设中的引领作用

建立基于生态系统地带性差异的水质分区管控原则、水体用途管控原则及水质反降级原则，建立《标准》中有关项目、标准限值和检测技术的动态调整机制，形成河湖氮磷标准的有效衔接机制。按水体指定用途补齐现行《标准》中的缺项，突出重点，更新陈旧或者冲突的项目、限值和标准。针对保护人体健康和水生生物安全分别设置污染物项目与标准限值，污染物项目突出重金属、有机化合物、激素等项目的标准设定；标准限值增加反映水生态环境健康状况的生态学指标，依据水体使用目的、水生生物及其生境保护用途体现水质标准的差异化。针对抗生素等水生环境风险较大的物质列出优先污染物和优先危害物质清单，制定相应的水环境质量标准，使保护对象更加明确、保护目标更加清晰，满足水生态环境系统综合治理和精细化管理的需求。

为《标准》的修订配套修改相关政策法规。配套修改《水污染防治行动计划》、重点流域水污染防治规划和重点行业工业水污染物排放标准中涉及以《标准》为依据制定的水生态环保目标、污染物排放总量控制目标、污染物特别排放限值、水污染物排放许可、水质监测与评估、水生态环境质量考核排名等方面内容；系统研究并预测新标准实施后可能带来的经济、社会、技术等问题和冲突，提出解决办法，充分做好衔接过渡工作。

（二）科学评估我国湖泊氮磷营养物的时空差异，实施差异化营养物标准

尽快制定湖泊分区营养物基准标准，发布分区湖泊营养物基准技术文件和湖泊营养状态评价标准，并纳入《标准》的修订中。基于湖库营养状态评价标准，建立具有重要功能的湖泊流域氮磷总量控制制度；选择不同区域的典型湖泊开展流域氮磷容量总量控制试点，依据氮磷总量控制示范成果，分期逐步在全国实施重点湖泊流域氮磷总量控制。

制定太湖、巢湖、洱海等重点湖泊氮磷营养物分级标准,实施氮磷营养物分期控制计划。近年来,太湖、巢湖、洱海等重点湖泊蓝藻水华发生频率和面积居高不下,根源是湖体氮磷浓度远远高于营养物标准值,建议尽快制定太湖、巢湖等重点流域氮磷营养物分级标准,实施基于分级标准的氮磷分期控制计划,优先采用控磷为主、兼顾控氮的措施,明晰分期削减湖体磷浓度的具体目标,实现重点湖泊蓝藻水华的逐步控制。

定期开展湖泊生态安全评估,编制全国湖泊富营养化控制规划。建议定期组织开展湖泊生态安全评估,编制国家层面的湖泊富营养化控制规划,科学确定全国湖泊富营养化控制的分阶段目标,明确国家和地方在湖泊富营养化控制的责任和义务,对湖泊进行分区管理、分类控制、分期达标,为国家 and 地方科学进行湖泊富营养化控制提供指导。

(三) 科学评估我国水生态现状, 深化推进水生态监测和评估

① 在保护目标方面,承接“水十条”的工作思路,建议制定“2035年水生态安全保护规划”,参考具体的、可测量的、可实现的、相关的和定时的(SMART)保护思路和目标,建立与之相适应的法律法规和标准规范制度体系,保障其实施。② 在管理模式方面,建议由生态环境部门牵头加强顶层设计,打破条块分割的管理模式,结合“自下而上”的地方驱动和“自上而下”的政府主导方式,由各地地方政府制定具体的推进实施与协调计划,在国家统一的水生态管理策略下,努力提升地方水生态保护的积极性和能动性。③ 在监测体系方面,坚持“一河一策”“一湖一策”的原则,着力以最简单的指标反映水生态的变化,建议生态环境、水利、自然资源、农业农村等管理部门联合开展研究,建立具有流域特色的监测评价指标和标准。加强新技术方法的适用性及标准化研究,如自动化、高通量的新方法,以应对当前生物评估多要素、流域大尺度的挑战。④ 在监测网络方面,建议由生态环境部门牵头,整合环境、水利、国土、农业等各级监测网络,秉承数据公开、共享,形成健全统一的标准规范体系,完善水生态环境监测质控体系,实现数据可比,全国一盘棋。⑤ 在公众参与方面,加强科普,加大宣传力度,多渠道推广和普及水生态安全

理念和实践,让水生态安全深入人心。

(四) 构建基于大数据融合的饮用水安全保障智慧化监管平台,保障饮用水安全

全面加强湖库型水源源头、水处理、供给过程到水龙头的水质监控,协调水利、生态环境、卫生、住房和城乡建设等不同管理部门,构建基于大数据融合的“从源头到龙头”全过程水质实时一体化、智慧化监测、评估、预警、决策平台。同时,加强水华突发、极端气候事件下应急备用水源与管网建设,形成有效的水源地应急预案与应急演练制度,做到科学调度、稳定供水,提高饮用水安全应急保障能力。

参考文献

- [1] 习近平. 推动我国生态文明建设迈上新台阶 [J]. 资源与环境, 2019 (3): 6-9.
Xi J P. Promoting the construction of ecological civilization to a new level in China [J]. Resources and Habitant Environment, 2019 (3): 6-9.
- [2] 习近平. 共同构建人与自然生命共同体 [J]. 环境, 2022 (3): 10-11.
Xi J P. Jointly build a community of human and natural life [J]. Environment, 2022 (3): 10-11.
- [3] 黄润秋. 深入贯彻落实党的十九届五中全会精神 协同推进生态环境高水平保护和高质量发展 [J]. 环境保护, 2021, 49 (Z1): 13-21.
Huang R Q. Thoroughly implement the spirit of the Fifth Plenary Session of the 19th CPC Central Committee, coordinate to promote high-level protection of ecological environment and high-quality economic development [J]. Environmental Protection, 2021, 49(Z1): 13-21.
- [4] 孙金龙. 深入打好污染防治攻坚战 持续改善环境质量 [J]. 环境保护, 2021, 49(1): 8-10.
Sun J L. Endeavor to fight the battle of pollution prevention and control and make continuous improvements to the environment [J]. Environmental Protection, 2021, 49(1): 8-10.
- [5] 中华人民共和国生态环境部. 2021年全国生态环境状况公报 [EB/OL]. (2022-05-26)[2022-08-18]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/>.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. 2021 national ecological environment bulletin [EB/OL]. (2022-05-26)[2022-08-18]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/>.
- [6] 中化人民共和国水利部. 2020年中国水资源公报 [EB/OL]. (2021-07-09)[2022-08-12]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/202107/t20210709_1528208.html.
Ministry of Water Resources of the PRC. 2020 China water resources bulletin [EB/OL]. (2021-07-09) [2022-08-12]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/202107/t20210709_1528208.html.
- [7] Palmer M, Ruhi A. Linkages between flow regime, biota, and eco-

- system processes: Implications for river restoration [J]. *Science*, 2019, 365(6459): 1264.
- [8] Jenny J P, Francus P, Normandeau A, et al. Global spread of hypoxia in freshwater ecosystems during the last three centuries is caused by rising local human pressure [J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(4): 1481–1489.
- [9] 符志友, 张衍桑, 冯承莲, 等. 我国水环境风险管理进展、挑战与战略对策研究 [J]. *环境科学研究*, 2021, 34(7): 1532–1541.
Fu Z Y, Zhang Y S, Feng C L, et al. Progress, challenge and strategic countermeasures of Chinese pollution risk management of water environment [J]. *Research of Environment Sciences*, 2021, 34(7): 1532–1541.
- [10] Tao S L, Fang J Y, Ma S H, et al. Changes in China's lakes: Climate and human impacts [J]. *National Science Review*, 2020, 7(1): 132–140.
- [11] Cooley S W, Ryan J C, Smith L C. Human alteration of global surface water storage variability [J]. *Nature*, 2021, 591: 78–81.
- [12] Feng S L, Liu S G, Huang Z H, et al. Inland water bodies in China: Features discovered in the long-term satellite data [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116(51): 25491–25496.
- [13] Yu C Q, Huang X, Chen H, et al. Managing nitrogen to restore water quality in China [J]. *Nature*, 2019, 567: 516–520.
- [14] Wang X X, Xiao X M, Zou Z H, et al. Gainers and losers of surface and terrestrial water resources in China during 1989–2016 [J]. *Nature Communication*, 2020, 11: 3471.
- [15] Jaiswal D, Pandey U, Mishra V, et al. Integrating resilience with functional ecosystem measures: A novel paradigm for management decisions under multiple-stressor interplay in freshwater ecosystems [J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(16): 3677–3717.