

我国流域减污降碳协同增效：路径、技术与对策

张亚捷^{1,2}, 霍守亮^{1,2}, 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)

摘要:“十四五”时期,我国生态环境保护进入了减污降碳协同治理的新阶段。流域承载了经济社会发展的巨大负荷,排放和消纳了大量温室气体和污染物,在流域尺度上推进减污降碳协同成为当前备受关注的问题。本文阐述了流域尺度上温室气体和污染物的协同减排机制,将流域划分为人工生态系统和自然生态系统,列举了不同生态系统间减污降碳协同的主要路径和重点技术,并以黄河流域、长江流域为例,分析了在流域尺度上减污降碳协同技术的具体应用情况。在负排放技术、农业面源污染控制技术和水体富营养化修复技术的支撑下,本文提出了细化流域水生态环境保护标准、建立监控预警和风险防控系统,构建污染源和温室气体排放源综合整治体系、健全流域管控机制,加大科技支撑力度、积极开展气候变化国际合作等对策建议,助推我国流域减污降碳协同。

关键词: 减污降碳; 协同; 流域; 温室气体; 污染物; 负排放技术

中图分类号: X32 **文献标识码:** A

Pathway, Technology, and Strategy for Synergizing the Reduction of Pollution and Carbon Emissions in China's Watersheds

Zhang Yajie^{1,2}, Huo Shouliang^{1,2}, Wu Fengchang^{1,2}

(1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Beijing 100012, China)

Abstract: China's eco-environmental protection enters a new stage of synergizing the reduction of pollution and carbon emissions during the 14th Five-Year Plan period. Watershed bears heavy loads from economic and social development and emits a large amount of greenhouse gases and pollutants. Therefore, synergizing the reduction of pollution and carbon emissions on a watershed scale becomes an issue of concern. This study expounds on the synergistic mechanism for the reduction of greenhouse gases and pollutants, categorizes the ecosystem of a watershed into artificial and natural ecosystems, and proposes the main pathways and key technologies for these ecosystems. Using the Yellow River basin and the Yangtze River basin as examples, specific applications of the key technologies are summarized. Negative emissions technology, agricultural non-point source pollution control technology, and water eutrophication remediation technology should be further developed. Furthermore, three countermeasures are proposed: (1) refining the water ecological environment protection standards and establishing a risk prevention and control system; (2) establishing a comprehensive treatment system for pollution and greenhouse gas emission sources to improve the watershed management and control mechanism; and (3) increasing

收稿日期: 2022-07-25; 修回日期: 2022-08-24

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

investment in science and technology and participating in international cooperation on climate change.

Keywords: reduction of pollution and carbon emissions; synergization; watershed; greenhouse gas; pollutant; negative emissions technology

一、前言

在当前全球气候变化的背景下，我国做出了碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和的承诺，并提出在“十四五”时期实现单位国内生产总值能源消耗和CO₂排放分别降低13.5%和18.0%，主要污染物排放总量持续减少，到2035年广泛形成绿色生产生活方式、碳排放达峰后稳中有降、生态环境根本好转、美丽中国建设目标基本实现的宏伟目标 [1]。截至2021年，我国仍有40%左右的地级及以上城市空气质量未达标；黄河、海河、辽河等流域水资源开发利用超出国际公认警戒线。我国生态环境保护结构性、根源性、趋势性压力尚未得到根本缓解，保护与发展长期矛盾仍然存在 [2]。这决定了我国既要减污，实现生态环境质量的根本改善；又要降碳，为“双碳”目标达成打下坚实基础 [3]。

流域是以水为媒介，由“水、土、气、生”等自然要素和人口、社会、经济等人文要素相互关联、相互作用构成的自然-社会-经济复合系统。为便于研究，本文将流域生态系统分为两类，一类是人工生态系统，包括城市和农村生态系统、工业和农业生态系统等；一类是自然生态系统，包括水、森林和草地生态系统等。全球碳计划的相关研究显示，在过去10年里，全球能源和工业、农业和废弃物处理以及包含内陆水体的自然排放源等部门每年向大气排放的CH₄分别约为111 Tg、217 Tg和218 Tg，排放的N₂O分别约为1.6 Tg、6.4 Tg和15.2 Tg [4,5]。2020年发布的《第二次全国污染源普查公报》显示 [6]，2017年我国城镇和农村生活源以及农业源水污染物中化学需氧量、总氮和总磷排放量分别达到了2.05×10⁷ t、2.89×10⁶ t和3.08×10⁵ t。流域内各生态系统产出或消纳大量以CO₂为首的温室气体以及水、大气、土壤污染物，使得流域成为我国应对气候变化、强化生态环境管控、推进生态文明建设的关键区域 [7]。

在流域分区管理基本方略的指导下、在“双碳”目标的指引下，本文将以流域为控制单元，明

确流域内人工生态系统和自然生态系统的减污降碳协同路径和重点技术，制定温室气体和污染物排放的协同控制措施，为水生态环境改善和温室气体减排提供基础参考。

二、我国流域温室气体和污染物协同减排机制

根据全球大气研究排放数据库（EDGAR）所提供的数据分析可知，2000年以来，我国CO₂排放主要集中在东部流域，其中，长江流域的CO₂排放总量最高，占全国排放总量的29.4%；淮河流域、黄河流域的CO₂排放总量分别位列第2位、第3位，占全国排放总量的12.9%、12.5%；松辽河流域在当地重工业衰退、产业结构不断调整以及生态环境修复持续推进的背景下，目前的CO₂排放总量排在第4位，占比为11.2% [8]。西部流域（西南诸河和内陆河）的CO₂排放总量仅占全国排放总量的3.8%，但在西部大开发战略和建设丝绸之路经济带的影响下，未来CO₂排放总量占比预期将会提高 [8]。2018年，工业、制造业燃烧和交通等部门造成的CO₂排放在各流域的CO₂排放中均占主要地位（见图1）。

进入21世纪，我国以原煤和原油为主的能源结构并未发生实质性的改变，即我国经济发展仍基于

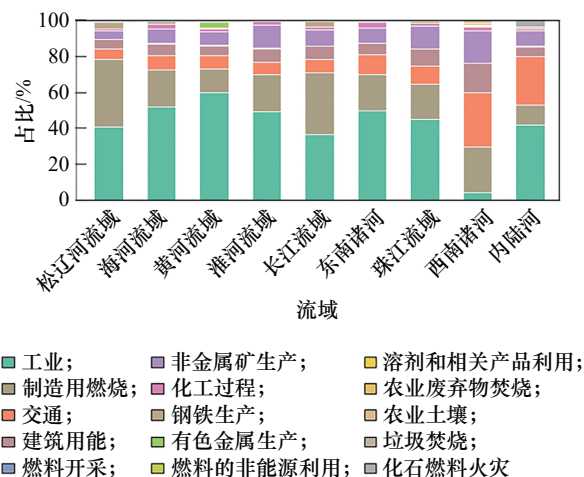


图1 2018年我国流域不同部门的CO₂排放量占比

原煤和原油等化石能源的粗放型开发与利用 [9]。高碳的能源结构、高能耗的产业结构以及以公路货运为主的运输结构决定了减污降碳协同效应可在我国流域人工生态系统内有效发挥,即控制住各行业温室气体或污染物中一方的排放能同时减少另一方的排放 [10,11]。对于流域自然生态系统,在人类活动作用下,土地利用方式的改变会影响碳汇强度,如自然湿地转为其他土地利用方式均会导致土地 CO₂ 的净吸收量减少 [12];其中建设用地和农田面积的增加还会对水体氮、磷负荷产生影响,加剧水体污染尤其是富营养化 [13]。富营养化的实质是在人类活动/自然因素的影响下,水体氮、磷等营养盐(主要为总磷)浓度过高导致藻类过度生长、水体生产力水平提高的现象 [14]。较高的营养水平会增加水体的 CH₄ 和 N₂O 排放,使水体成为潜在的温室气体排放源 [15]。可见,温室气体与环境污染物的排放具有同根、同源、同过程特点和排放时空一致性等特征。当前研究表明,我国整体减污降碳的协同效应逐年提高 [16];减污和降碳政策具有显著的协同效应 [17]。减污降碳协同增效的有效推进能够推动环境治理从注重末端治理向更加注重源头预防和源头治理转变 [10]。

三、我国流域减污降碳协同的主要路径

(一) 人工生态系统减污降碳协同的主要路径

一是调整能源结构。贯彻能源消费总量和强度双控制度,提高能源利用效率。推动化石能源的清洁高效开发与利用,鼓励洁净煤技术的研发和推广,实行煤电联营或煤电运一体化经营。大力发展风电和太阳能发电,因地制宜发展水电,有效利用生物质能发电,在确保安全的前提下有序发展核电,逐步降低对化石能源的需求和消费 [18]。落实可再生能源产业发展的扶持政策,创造持续稳定增长的可再生能源市场,提高可再生能源的消纳水平,推动可再生能源技术进步 [18]。

二是加快产业结构转型。坚决遏制高耗能、高排放的“两高”项目盲目发展,新建、扩建“两高”项目需严格落实产能等量或减量置换,同时制定相应产能控制政策,持续化解过剩产能问题 [18]。大力推动服务业和以信息技术、生物技术、新能源、新材料、新能源汽车、航空、航天、

海洋装备等为主的战略性新兴产业及绿色低碳产业的发展。

三是提升绿色交通发展水平。以涉及大宗货物和中长距离货物运输的“公转铁、公转水”为主攻方向,加快构建“铁-水”“公-铁”“公-水”“空-陆”等多式联运系统,提高综合交通运输体系组合效率 [18]。提高轨道交通等公共交通方式在整个交通体系中的地位,加大新能源机动车船、共享单车和电单车的推广应用力度,推进充电加气配套设施的体系建设。

四是扩大农村清洁供暖覆盖面。坚持“因地制宜、多能互补、综合利用、注重实效”原则,科学规划、合理布局,持续推行“煤改气、煤改电”政策,推动农村地区对太阳能、生物质能等清洁能源的使用以及洁净煤的供给和利用,推动农村能源供给侧结构性改革 [19]。

五是提高农田土壤固碳潜力。推广和应用以农作物秸秆覆盖还田、覆盖作物种植以及免耕、少耕、轮耕、休耕等为主要内容的保护性耕作措施。在水稻种植方面,推广干湿交替灌溉和浸润灌溉等更具固碳潜力的农艺措施。开展有机肥替代化肥行动,将有机废物固碳于土。基于以上措施,逐步建立起农田土壤碳汇技术支撑体系。

(二) 自然生态系统减污降碳协同的主要路径

一是提高湿地固碳潜力。增加集水区并建立水利缓冲区,维持湿地水位稳定;引种和应用秸秆覆盖,恢复被破坏的湿地植被层;控制人为干扰,防止湿地破碎化程度加深;加强重点保护区建设,进行自然封育和适当的退耕还湖 [20]。

二是协同农业面源污染控制。注重源头治理,推进农业投入品(化肥、农药和杀虫剂等)的减量增效,实施测土配方施肥;倡导种养平衡,以种定养、以养促种;建立和完善秸秆“五化”利用模式,改进畜禽养殖废弃物处理和利用方式,提升农业废弃物资源化利用率 [18]。因地制宜建设沼气工程,有效结合现代有机农业、生态循环农业与沼气工程中沼渣、沼液的循环利用 [18]。开展农业面源污染治理与监督指导工作,综合分析面源污染的主导因素,开发农业面源污染本地化评估模型和源解析技术 [21,22]。

三是控制水体富营养化。采用工程措施、生态

措施和农业垦耕相结合的方法，增加江河水源头区和上游地区植被覆盖度，控制中下游地区营养物质（氮、磷）的输入负荷。采用消除与封闭底泥等水域综合整治措施，增加水体连贯性和流通性，提升流域营养物质的有效截留能力。

四、我国流域减污降碳协同的重点技术

（一）人工生态系统减污降碳协同的重点技术

负排放技术（NETs）是流域人工生态系统减污降碳协同的重点技术，可从大气中去除和封存CO₂，以实现温控目标和碳减排，包括多种方案，具体如下（见图2）[23,24]。

生物能与碳捕获和储存技术是当前被广泛使用的NETs方案，可通过植物将空气中的CO₂吸收，生产生物质用于生产电能、液体燃料或热能，再将此过程中产生的CO₂捕获并泵入地下。

直接空气捕获是通过吸附剂捕集大气中的CO₂并将其浓缩和储存在地下旧油气储层或咸水含水层中。直接空气捕获技术是通过改变热量、压力或温度进行吸附剂再生并持续用于CO₂捕集的一系列工程化技术。尽管成本较高，但直接空气捕获的CO₂移除潜力较大并最具扩展性，未来可被应用于不同领域[23,24]。

土壤碳固定技术是最具效益的NETs方案，主要通过调整农业生产方式（如采用免耕或轮作等措施）来增加土壤中的碳含量。

造林和再造林技术是最具经济效益的NETs方

案，通过种植树木将大气中的碳固定于生物和土壤中，并保持水土、减少土壤中营养物质向水中流失。该技术每移除1 t CO₂的成本不到几十美元[24]。

整体来看，不同NETs方案的应用需综合考虑成本、有效性、可用性、安全性和时效性，如粮食生产和生物多样性保护等对土地的竞争都会限制造林和再造林等技术的使用[23]。随着技术的不断成熟，更多的NETs方案将被广泛应用于流域减污降碳领域。

（二）自然生态系统减污降碳协同的重点技术

一是农业面源污染控制技术。主要包括：氮和磷等面源污染物削减的前端控制技术，如合理调节肥料和畜禽饲料中的养分比、更换新型肥料等；污染物拦截的中端控制技术，如建造植草沟、植被缓冲带和植物篱等；污染物消除的末端控制技术，如建造人工湿地、景观绿地、重力沉沙过滤池和人工湿地-稳定塘等技术[25]。

二是水体富营养化修复技术。主要有底泥疏浚、物理除藻、人工曝气和引清调度等物理修复技术，化学除藻和化学固定等化学修复技术，植物修复、动物修复和微生物修复等生物修复技术类型[26]。其中，生物修复技术是近年来备受关注、成本较低且对生态环境危害最小的修复技术，可通过利用植物、动物、微生物等对水体污染物进行吸附、降解和转化，从而达到降低水体污染物浓度的目的。当前复合生物修复技术应用较多，如结合生态浮床和人工湿地的微生物联合植物修复技术可以

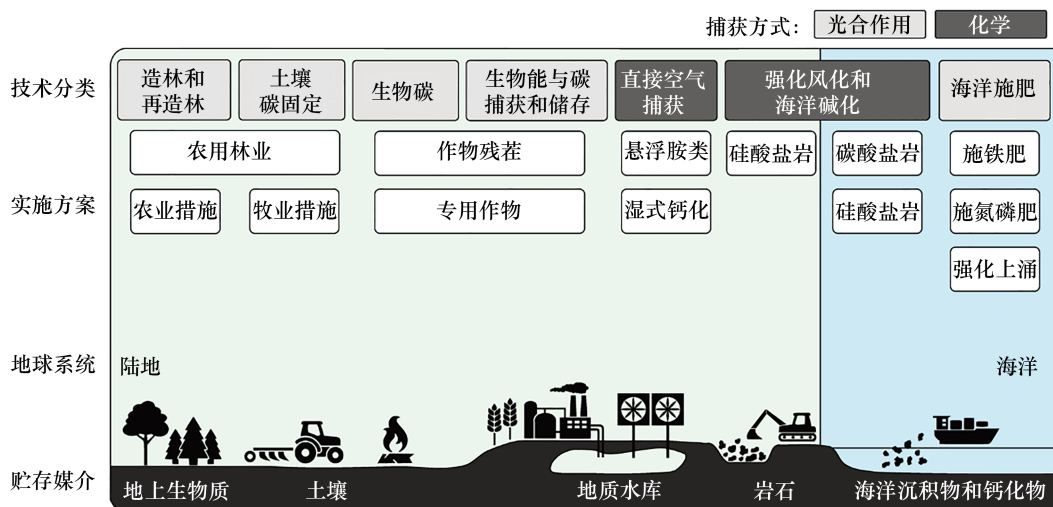


图2 流域减污降碳协同重点技术：负排放技术的分类系统 [24]

同时清除水体和沉积物中的多种有毒污染物，并增加水体的生物多样性 [26]。

(三) 减污降碳协同技术在流域中的应用案例

当前，在黄河、长江等重要流域已开展了诸多减污降碳协同技术的研究，分析采用碳捕获与储存、造林等负排放技术产生的效果，或基于环境库兹涅茨曲线模型等方法估算 CO₂ 排放并分析主要驱动因子，为我国流域减污降碳协同提供数值参考或发展建议。相关内容见表 1。

五、对策建议

(一) 细化流域水生态环境保护标准、建立监控预警和风险防控系统

深入研究不同类型水体各界面（水-陆、水-气，以及沉积物-上覆水界面等）温室气体产生与消耗的关键微生物过程及控制机制，提高温室气体排放的监测水平和数据编制方法的标准化水平 [38]。完善环境影响评价法律法规及相关配套制度，将水体温室气体排放逐步纳入流域项目环境影响评价体

表 1 我国流域减污降碳协同技术应用及未来发展建议（以黄河流域和长江流域为例）

流域	概述	技术应用	未来发展建议
黄河流域	总面积约为 7.95×10 ⁵ km ² ，横跨 9 个省区，人口与地区生产总值分别约占全国的 30% 和 25%。2021 年，黄河流域第一产业占比为 8.8%，第二产业占比为 41.4%，第三产业占比为 49.8%，产业结构“倚能倚重”特征明显	当耕地或其他土地利用类型转化为林地和草地时，土壤有机碳含量显著增加。增加土层深度可有效减少土壤有机碳损失 [27]；流域内 236 个燃煤发电厂若采用结合强化水回收技术的 CO ₂ 捕获和储存技术，每年最大可捕获 7.39×10 ⁸ t CO ₂ ，并可在退役前提供约 1.31×10 ¹⁰ t 淡水 [28]	产业结构、能源强度以及能源结构是推动流域内各省区碳减排的重要因素，应重视工业领域的绿色低碳转型。例如，流域上游的清洁能源发展优势明显，通过“西气东输”“西电东运”等政策规划，带动整个流域能源结构的优化 [29]；流域内碳减排与大气污染物控制的协同效益逐年增加，应不断升级产业结构，重点发展现代服务业和高新技术产业，严格执行产业环境准入制度 [30]；应根据不同省区的发展现状设计不同的碳控制路径：山东和河南应重点增加对绿色技术尤其是全氧燃烧技术的投资，甘肃、宁夏和青海可通过土地利用变化和林业活动抵消部分碳排放，四川和内蒙古应提高能源利用效率，陕西和山西可利用绿色金融实现地方产业升级 [31]；为实现流域农业面源污染高效治理，应注重陕西、河南和山东等省份瓜果蔬菜化肥减量，以及西部地区牛羊养殖和中东部地区生猪养殖污染治理 [32]
长江流域	总面积约为 2.052×10 ⁶ km ² ，覆盖 11 个省市，人口与地区生产总值均超过全国的 40%。2021 年，长江流域第一产业占比为 7.6%，第二产业占比为 38.3%，第三产业占比为 54.1%，产业以劳动和资本密集型为主	长江防护林工程对长江经济带碳储量和碳汇量的贡献率（81%~83%）高于其他重点生态工程 [33]；在植树造林过程中，较之于土壤碳固定，更多的碳固定来自于生物质的积累；优化植树造林措施可增加碳固定潜力 [34]；人工湿地系统可实现对农田排水的生态拦截，其对水体总氮、总磷的去除率均可达到 60% [35]	流域内第二产业贡献了近 80% 的 CO ₂ 排放。在工业和能源消费部门中，热电生产和供应以及非金属矿产品工业排放了最多的 CO ₂ ，应大力发展清洁能源，形成有助于优化以煤炭为主的能源消费结构 [36]；为促进产业升级和转移，东部省份应加大自主创新力度，提高产能，促进低碳工业化；中部省份应依靠技术创新减少经济发展对资源的依赖；西部省区要加大科技投入，在发达地区进行产业转移。同时，区域间应加强科技产业的交流与合作，使经济实力强、技术人才水平高的区域带动其他区域高质量发展 [37]

注：黄河流域、长江流域的概述数据来源于 2021 年各省区市的统计公报。

系和污染排放许可范围之内。制定各水生态分区水体水化学、富营养化和生物监测标准，开展营养物质和污染物负荷的计算和管理以及流域生态系统完整性评价 [39]。通过流域环境风险识别、风险监测、风险预警和风险评价等，在重点支流区乃至整个流域构建多尺度、多信息源的流域监控预警和风险防控系统，防范流域突发性水污染事件的发生，提高水污染事件的应急处理能力。

(二) 构建污染源和温室气体排放源综合整治体系，健全流域管控机制

在减污降碳“一体谋划、一体部署、一体推进、一体考核”的机制下，通过流域系统性开展生态保护补偿机制建设、产业布局谋划等工作，增强流域上中下游、江河湖库、左右岸和干支流温室气体和污染物排放的协同治理效能 [39~41]。推进“三线一单”落地应用，划定流域内水域、湿地、水源涵养生态功能区、自然保护区和河湖生态缓冲带等重要水生生态空间，整治破坏水生态环境的生产生活活动。严格控制缺水地区、严重水污染地区和敏感区域的高耗水、高污染行业发展，鼓励重点流域开展减污降碳协同制度体系的试点示范 [40,41]。

(三) 加大科技支撑力度，积极开展气候变化国际合作

提升产业园区和产业集群循环化水平，推动公共设施共建共享、能源梯级利用、资源循环利用和污染物集中安全处置等 [40,42]。推广节能、节水、综合利用资源的先进技术设备，对重点行业进行全面清洁生产改造 [40,42]。加强碳捕集、利用与封存，可再生能源制氢，先进储能材料研发等“碳中和”关键技术的创新发展、集成示范和部署应用，加大相关技术的成果转化力度。通过“一带一路”倡议和“南南合作”等平台，加强绿色低碳技术的交流、合作与转移，推动全球气候治理。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: July 25, 2022; **Revised date:** August 24, 2022

Corresponding author: Wu Fengchang is a research fellow from the State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environment Sciences, and member of Chinese Academy of Engineering. His major research field is

environmental criteria and pollution control. E-mail: wufengchang@vip.skleg.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on Water Security Assurance Strategy for Ecological Civilization Construction” (2021-XBDZ-05)

参考文献

- [1] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要 [EB/OL]. (2021-03-13)[2022-07-10]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm. Outline of the 14th Five-Year Plan (2021—2025) for national economic and social development and vision 2035 of the People's Republic of China [EB/OL]. (2021-03-13)[2022-07-10]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.
- [2] 中华人民共和国生态环境部. 协同推进减污降碳 助力实现美丽中国建设和“双碳”目标 [J]. 中国水泥, 2022 (7): 16–19. Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Synergizing the reduction of pollution and carbon emissions to help achieve the goal of building a beautiful China and “double carbon” [J]. China Cement, 2022 (7): 16–19.
- [3] 孙金龙. 深入打好污染防治攻坚战 持续改善环境质量 [J]. 旗帜, 2020 (11): 9–11. Sun J L. Continue to fight the tough battle against pollution and to improve environmental quality [J]. Qizhi, 2020 (11): 9–11.
- [4] Saunio M, Stavert A, Poulter B, et al. The global methane budget 2000–2017 [J]. Earth System Science Data, 2020, 12(3): 1561–1623.
- [5] Tian H, Xu R, Canadell J, et al. A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks [J]. Nature, 2020, 586 (7828): 248–256.
- [6] 中华人民共和国生态环境部, 国家统计局, 中华人民共和国农业农村部. 第二次全国污染源普查公报 [EB/OL]. (2020-06-09) [2022-07-10]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk01/202006/t20200610_783547.html. Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, National Bureau of Statistics of the People's Republic of China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Second census on the sources of pollution [EB/OL]. (2020-06-09)[2022-07-10]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk01/202006/t20200610_783547.html.
- [7] 中华人民共和国生态环境部, 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 中华人民共和国工业和信息化部, 等. 减污降碳协同增效实施方案 [EB/OL]. (2022-06-13)[2022-07-18]. <https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk03/202206/W020220617499318621177.pdf>. Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, National Development and Reform Commission of the People's Republic of China, Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China, et al. Implementation plan for synergizing the reduction of pollution and carbon emissions [EB/OL]. (2022-06-13)[2022-07-18]. <https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk03/202206/W020220617499318621177.pdf>.
- [8] Crippa M, Solazzo E, Huang G, et al. High resolution temporal profiles in the emissions database for global atmospheric research [J]. Scientific Data, 2020, 7: 121.

- [9] 韩松. 中国能源结构与产业结构发展现状及灰色关联关系研究 [J]. 工程建设标准化, 2020 (7): 69–79.
Han S. The grey correlation analysis of China's energy structure and industrial structure [J]. Standardization of Engineering Construction, 2020 (7): 69–79.
- [10] 郑逸璇, 宋晓晖, 周佳, 等. 减污降碳协同增效的关键路径与政策研究 [J]. 中国环境管理, 2021, 13(5): 45–51.
Zheng Y X, Song X H, Zhou J, et al. Synergetic control of environmental pollution and carbon emissions: Pathway and policy [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2021, 13(5): 45–51.
- [11] Melamed M, Schmale J, von Schneidmesser E. Sustainable policy—Key considerations for air quality and climate change [J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2016, 23: 85–91.
- [12] Tan L, Ge Z, Zhou X, et al. Conversion of coastal wetlands, riparian wetlands, and peatlands increases greenhouse gas emissions: A global meta-analysis [J]. Global Change Biology, 2020, 26(3): 1638–1653.
- [13] Li Y, Shang J, Zhang C, et al. The role of freshwater eutrophication in greenhouse gas emissions: A review [J]. Science of the Total Environment, 2021, 768: 144582.
- [14] 王洪铸, 王海军, 李艳, 等. 湖泊富营养化治理: 集中控磷, 或氮磷皆控? [J]. 水生生物学报, 2020, 44(5): 938–960.
Wang H Z, Wang H J, Li Y, et al. The control of lake eutrophication: Focusing on phosphorus abatement, or reducing both phosphorus and nitrogen? [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2020, 44(5): 938–960.
- [15] DelSontro T, Beaulieu J, Downing J. Greenhouse gas emissions from lakes and impoundments: Upscaling in the face of global change [J]. Limnology and Oceanography Letters, 2018, 3(3): 64–75.
- [16] 唐湘博, 张野, 曹利珍, 等. 中国减污降碳协同效应的时空特征及其影响机制分析 [J/OL]. 环境科学研究: 1–15(2022-08-30) [2022-09-08]. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2022.08.10>.
Tang X B, Zhang Y, Cao L Z, et al. Spatio-temporal characteristics and influencing mechanism of synergistic effect of pollution and carbon emission reduction in China [J/OL]. Research of Environmental Sciences: 1–15(2022-08-30) [2022-09-08]. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2022.08.10>.
- [17] 张瑜, 孙倩, 薛进军, 等. 减污降碳的协同效应分析及其路径探究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(5): 1–13.
Zhang Y, Sun Q, Xue J J, et al. Synergistic effects of pollution control and carbon reduction and their pathways [J]. China Population, Resources and Environment, 2022, 32(5): 1–13.
- [18] 中华人民共和国生态环境部. 中国落实国家自主贡献成效和新目标新举措 [EB/OL]. (2021-10-28) [2022-09-08]. http://us.china-embassy.gov.cn/zt_1/ydqhbh/202111/P020211106160885316810.pdf.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. China's implementation of national independent contribution achievements and new goals and measures [EB/OL]. (2021-10-28) [2022-09-18]. http://us.china-embassy.gov.cn/zt_1/ydqhbh/202111/P020211106160885316810.pdf.
- [19] 姚华, 黄云, 徐敬英, 等. 我国北方地区清洁供暖技术现状与问题探讨 [J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(9): 1177–1188.
Yao H, Huang Y, Xu J Y, et al. Technology status and discussion on challenges of clean heating in Northern China [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(9): 1177–1188.
- [20] 段晓男, 王效科, 尹弢, 等. 湿地生态系统固碳潜力研究进展 [J]. 生态环境, 2006, 15(5): 1091–1095.
Duan X N, Wang X K, Yin T, et al. Advance in the studies on carbon sequestration potential of wetland ecosystem [J]. Ecology and Environment, 2006, 15(5): 1091–1095.
- [21] 李裕元, 李希, 孟岑, 等. 我国农村水体面源污染问题解析与综合防控技术及实施路径 [J]. 农业现代化研究, 2021, 42(2): 185–197.
Li Y Y, Li X, Meng C, et al. Analysis of agricultural non-point source pollution issue in waters and technical strategy of comprehensive prevention and control in rural area of China [J]. Research of Agricultural Modernization, 2021, 42(2): 185–197.
- [22] 吴丰昌. 加强农业面源污染防治 推动水环境质量改善 [N]. 中国环境报, 2021-04-02(03).
Wu F C. Strengthen the prevention and control of agricultural non-point source pollution to improve water environmental quality [N]. China Environment News, 2021-04-02(03).
- [23] Palmer C. Mitigating climate change will depend on negative emissions technologies [J]. Engineering, 2019, 5(6): 982–984.
- [24] Minx J, Lamb W, Callaghan M, et al. Negative emissions—Part 1: Research landscape and synthesis [J]. Environmental Research Letters, 2018, 13(6): 063001.
- [25] 王一格, 王海燕, 郑永林, 等. 农业面源污染研究方法与控制技术研究进展 [J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(1): 25–33.
Wang Y G, Wang H Y, Zheng Y L, et al. Advances in research methods and control technologies of agricultural non-point source pollution: A review [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021, 42(1): 25–33.
- [26] 郭楠楠, 齐延凯, 孟顺龙, 等. 富营养化湖泊修复技术研究进展 [J]. 中国农学通报, 2019, 35(36): 72–79.
Guo N N, Qi Y K, Meng S L, et al. Research progress of eutrophic lake restoration technology [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(36): 72–79.
- [27] Tong J, Hu J, Lu Z, et al. The impact of land use and cover change on soil organic carbon and total nitrogen storage in the Heihe River Basin: A meta-analysis [J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(9): 1578–1594.
- [28] Xu M, Zhang X, Shen S, et al. Assessment of potential, cost, and environmental benefits of CCS-EWR technology for coal-fired power plants in Yellow River Basin of China [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 292: 112717.
- [29] 赵忠秀, 闫云凤, 刘技文. 黄河流域九省区“双碳”目标的实现路径研究 [J/OL]. 西安交通大学学报(社会科学版): 1–15(2022-07-28) [2022-08-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1329.c.20220727.1852.008.html>.
Zhao Z X, Yan Y F, Liu J W. The approach to achieve the “Double Carbon” goal in nine provinces and regions in the Yellow River Basin [J/OL]. Journal of Xi'an Jiaotong University(Social Sciences): 1–15(2022-07-28) [2022-08-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1329.c.20220727.1852.008.html>.
- [30] Cai Z, Yang X, Lin H, et al. Study on the co-benefits of air pollution control and carbon reduction in the Yellow River Basin: An

- assessment based on a spatial econometric model [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(8): 4537.
- [31] Li J, Li M. Research of carbon emission reduction potentials in the Yellow River Basin, based on cluster analysis and the Logarithmic Mean Divisia Index (LMDI) method [J]. *Sustainability*, 2022, 14(9): 5284.
- [32] 陶园, 徐静, 任贺靖, 等. 黄河流域农业面源污染时空变化及因素分析 [J]. *农业工程学报*, 2021, 37(4): 257–264.
Tao Y, Xu J, Ren H J, et al. Spatiotemporal evolution of agricultural non-point source pollution and its influencing factors in the Yellow River Basin [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(4): 257–264.
- [33] 侯瑞萍, 夏朝宗, 陈健, 等. 长江经济带林地和其他生物质碳储量及碳汇量研究 [J/OL]. *生态学报*, 2022, 42(23): 1–16(2022-07-27)[2022-09-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2031.Q.20220726.1541.070.html>.
Hou R P, Xia C Z, Chen J, et al. Carbon storage and carbon sink of forest land and other biomass in the Yangtze River Economic Belt [J/OL]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(23): 1–16(2022-07-27)[2022-09-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2031.Q.20220726.1541.070.html>.
- [34] Wang J Y, Delang C, Hou G L, et al. Carbon sequestration in biomass and soil following reforestation: A case study of the Yangtze River Basin [J]. *Journal of Forest Research*, 2022, 33: 1663–1690.
- [35] 朱金格, 张晓姣, 刘鑫, 等. 生态沟——湿地系统对农田排水氮磷的去除效应 [J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(2): 405–411.
Zhu J G, Zhang X J, Liu X, et al. Removal of nitrogen and phosphorus from farmland drainage by ecological ditch-wetland system [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(2): 405–411.
- [36] Chen L, Li X, Yang Y, et al. Analyzing the features of energy consumption and carbon emissions in the Upper Yangtze River Economic Zone [J]. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 2021, 11(3): 573–589.
- [37] Tang D, Zhang Y, Bethel B. A comprehensive evaluation of carbon emission reduction capability in the Yangtze River Economic Belt [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(2): 545.
- [38] 刘婷婷, 王晓锋, 袁兴中, 等. 湖、库水体 N₂O 排放研究进展 [J]. *湖泊科学*, 2019, 31(2): 319–335.
Liu T T, Wang X F, Yuan X Z, et al. Review on N₂O emission from lakes and reservoirs [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(2): 319–335.
- [39] 孙丹妮, 郑军, 张泽怡. 流域环境管理, 如何更协调?——借鉴国际经验完善我国“十四五”流域环境管理体制机制的思考 [J]. *中国生态文明*, 2021 (3): 54–58.
Sun D N, Zheng J, Zhang Z Y. How to make the environmental management of river basins more coordinated? — Draws on international experience to improve the environmental management system and mechanism during the 14th Five-Year Plan [J]. *China Ecological Civilization*, 2021 (3): 54–58.
- [40] 中华人民共和国生态环境部. 重点流域水生态环境保护规划(2021—2025年) [EB/OL]. (2021-10-15)[2022-07-10]. <https://www.mee.gov.cn/jyxc2021/202109/P020210924351900441108.pdf>.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Water ecological environment protection planning of key river basins (2021—2025) [EB/OL]. (2021-10-15)[2022-07-10]. <https://www.mee.gov.cn/jyxc2021/202109/P020210924351900441108.pdf>.
- [41] 姜华, 阳平坚, 高健. 贯彻落实习近平总书记“四个一”部署要求构建减污降碳协同的制度体系 [J]. *环境保护*, 2021, 49(Z2): 57–60.
Jiang H, Yang P J, Gao J. Implementing general secretary Xi Jinping's "Four ones" deployment requirements to build a synergistic system to reduce pollutant and carbon emissions [J]. *Environmental Protection*, 2021, 49(Z2): 57–60.
- [42] 费伟良, 李奕杰, 杨铭, 等. 碳达峰和碳中和目标下工业园区减污降碳路径探析 [J]. *环境保护*, 2021, 49(8): 61–63.
Fei W L, Li Y J, Yang M, et al. Analysis of the synergistic path to reduce pollution and carbon in industrial parks under carbon peak and carbon neutrality targets [J]. *Environmental Protection*, 2021, 49(8): 61–63.