

陆海统筹的总氮污染治理研究进展及对策建议

邓嘉辉^{1,2}, 王权明^{1,2}, 谢成磊^{1,2}

(1.国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023; 2.国家环境保护海洋生态环境整治修复重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘要:本文盘点了近年来针对入海总氮管控和治理的实践性、代表性前沿研究成果,旨在提炼出当前陆海总氮污染治理领域值得深耕的研究类别和方向。文献分析结果表明:治理措施的创新与落实以及政策制度保障研究是当下较为前沿和新颖的两个研究方向,具有较强的现实指导意义,亟待扩展和丰富。此外,本文基于文献分析面向陆海统筹的总氮污染治理给出相应的对策建议,具体包括加强陆海总氮治理的统筹规划与落实、推动创新性治理手段的挖掘与应用以及完善政策制度保障。

关键词:入海总氮治理; 陆海统筹; 生态修复; 治理措施实践

中图分类号:X32

文献标识码:A

文章编号:1007-6336(2024)05-0664-08

Research progress and suggestions on total nitrogen pollution control under land-sea coordination

DENG Jiahui^{1,2}, WANG Quanming^{1,2}, XIE Chenglei^{1,2}

(1.National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China; 2.National Key Laboratory of Marine Ecological Environment Improvement and Restoration for Environmental Protection, Dalian 116023, China)

Abstract: This paper reviews the practical and representative cutting-edge research achievements in the control and management of total nitrogen (TN) pollution entering the sea in recent years, aiming to extract the research categories and directions worth deepening in the current field of land-sea total nitrogen pollution control research. The literature analysis results indicate that innovation and implementation of governance measures, as well as research on policy and institutional guarantees, are currently two cutting-edge and novel research directions with strong practical guidance significance, which urgently need to be expanded and enriched. In addition, based on literature analysis, this article provides corresponding countermeasures and suggestions for the land-sea coordination TN pollution control, including strengthening the overall planning and implementation of land-sea TN control, promoting the exploration and application of innovative governance methods, and improving policy and institutional guarantees.

Key words: total nitrogen control into the sea; land-sea coordination; ecological restoration; practice of governance measures

“十四五”以来,随着经济社会的快速发展,我国沿海地区产生的工业、农业、生活总氮排放急剧增加,加之气候变化背景下极端水文现

象频发,含氮污染物随降雨径流入河、入海,导致部分近岸海域水质污染状况相较于“十三五”时期出现反弹态势,形势严峻复杂,不容乐

收稿日期:2024-04-10, 修订日期:2024-08-20

作者简介:邓嘉辉(1993—),男,辽宁大连人,工程师,博士,主要研究方向为流域生态调控, E-mail: djhdut@163.com

通信作者:王权明(1977—),男,辽宁大连人,正高级工程师,博士,主要研究方向为海洋生态环境保护, E-mail: qmwang@nmemc.org.cn

观,其中最主要的水质超标因子为无机氮(DIN)^[1-2]。随着重点海域综合治理攻坚战工作任务的深入开展,陆海统筹的总氮管控已成为我国近岸海域生态环境治理的首要任务之一。

然而,当前针对入海总氮治理的研究多以数据监测统计^[3-4]、污染物输移模拟和溯源分析^[5]、提升对污染现象和规律的认知以及响应机理挖掘为主^[6-7],其多以为入海总氮管控提供技术参考或科学依据为研究目的^[8-9]。例如,王颢等^[9]对闽江入海断面的无机氮浓度变化趋势进行了分析,并对入海通量进行估算,讨论了无机氮浓度和通量变化的主要影响因素,为推进污染物入海总量控制及流域-海域协同治理提供技术参考;在厦门九龙江河口-近海区域,Yu等^[10-11]通过不同水文和潮汐条件下高频次高密度的监测,揭示了河口-近海无机氮通量和循环对洪水和潮汐等水动力条件的响应机制;同样在九龙江河口,Chen^[12]和Lin等^[13-14]则通过多年来对暴雨事件下河口连续体的监测和分析,揭示了河口氮通量、氮循环、氮磷比、涉氮微生物等一系列生物地球化学参数对暴雨的响应;付意成等^[6]基于SWAT模型对浑太流域农业面源污染物的迁移-转化过程进行模拟计算,系统解析流域面源污染物排放量及其分布特征,为实现浑太河流域水体水质达标、充分挖掘区域农业减排增收潜力提供参考;在模型研究方面,还有诸多对基础模型进行适应性整合和改进的尝试^[15-17]。此类研究虽然加深了人们对总氮污染物来源和污染形成机制的认知,但是没有提出能够切实落地或指导落地应用的实践性治理措施或方案,造成了当前很多“认知清晰”却“无从下手”的总氮污染治理困境。2024年1月1日,第二次修订后的《中华人民共和国海洋环境保护法》开始施行,强调了“入海河流流域省、自治区、直辖市人民政府应当按照国家有关规定,加强入海总氮、总磷排放的管控,制定控制方案并组织实施”。由此可见,国家层面已意识到入海总氮污染治理不能停留在对污染机制的认知上,治理方案的落地实践势在必行。因此,为了更好地指导陆海统筹的总氮治理实践,有必要对当前的对策和实践类研究进展进行分析。

本文将近年来陆海统筹总氮管控和治理方面具有实践指导意义的前沿研究文献分为“治理思路与宏观对策研究”“基于氮污染机制的治理手段和理念创新”“治理方案规划研究”和“治理政策和制度保障研究”四个主题进行分类阐述和分析。最后基于分析结果从科研方向和具体治理措施两个角度分别给出对策和建议,为日后的科研和污染治理提供方向性和实践性指引。

1 治理思路与宏观对策研究

1.1 重点海域治理

我国总氮污染较为严重的近岸海域主要包括渤海湾、辽东湾、莱州湾、长江口-杭州湾、珠江口邻近海域等。近几十年来,国内诸多学者陆续对各海域的总氮污染问题进行了成因与对策分析。例如,刘倩^[18]通过查阅大量文献整理了辽东湾近岸海域污染现状并分析其成因,然后针对污染成因提出控制入海污染源、实施生态恢复工程及加强环境风险和应急响应机制等污染防治措施。王琰等^[19]基于2015—2020年莱州湾海洋环境公开数据,系统地分析了莱州湾海域的污染状况及变化情况,并提出陆海协同治理、污染物减排增容等一系列防治措施。高山等^[20]从厦门海域氮、磷含量水平的年际变化趋势入手,结合无机氮、活性磷的平面分布特征,对厦门海域氮、磷的主要来源进行了分析,并对污染控制技术措施和相应的管理对策进行论述。张宇铭等^[21]梳理了珠江口邻近海域综合治理攻坚战总体思路,介绍了攻坚关键目标的论证过程和任务设计思路,提出上下游协同治理、加强生活源污染治理、跨区域协同治理等推进攻坚战实施的建议。王孝程等^[22]结合长江经济带大保护,系统总结分析了近20年长江口环境质量和生态监控区的监测结果,提出了加强顶层设计,推进落实陆海统筹多项对策建议。

1.2 入海河流治理

针对入海总氮最主要的污染源之一——入海河流,也有诸多学者开展了相应的研究。例如,樊荣^[23]以甬江为例建立了流域本土化HSPF模型,对2018—2021年水文、水质、入海通量进

行模拟,计算了入海总氮各类污染源负荷,并从城镇生活、农村生活和农业面源等角度提出甬江流域入海总氮排放控制路径。罗涛等^[24]以临海市灵江为例,基于总氮污染负荷核算结果,进行了多措施和多情景的削氮效果模拟,结果发现污水处理厂提标改造措施的总氮削减率和成本效益值最高。周泉等^[25]以入海河流水文水质同步监测、陆域污染源调查与核算、入境河流总氮通量分析为技术手段,对东莞市入海河流总氮进行溯源分析,并从源头防控、协同治理、综合治理等视角给出了对策建议。

上述文献多以特定海域和流域的监测和模拟数据分析为基础,以总氮污染溯源核算和趋势分析为手段,结合海域、流域的实际情况剖析其生态环境问题及其主要成因,进而给出总体的治理思路或对策建议,普遍突出了陆海统筹、协同治理的重要性,但是定性分析居多,对策建议也较为宏观。这些研究大多阐明了各自流域、海域的污染状况和症结所在,虽能够在治理方向、路线设计上给决策者以参考,但方案和措施往往并不具体,缺乏实施细节。

2 基于氮污染机制的治理手段和理念创新

除了直接针对海域和河流的综合治理研究,国内外还有诸多文献通过对总氮污染现象与行业的新认知,提炼出具有针对性的治理方向或对策。由于农业面源污染是陆源总氮最主要的污染源,因此诸多学者将目光锁定农业氮污染及相关现象的研究。例如, Ren 等^[26]从更为宏观的视角横向挖掘了农田氮利用率和社会经济因素之间的关系。具体而言,该研究发现氮利用效率(NUE)与本国农场规模和人均 GDP 间存在显著的相关关系,得到了农业大规模集约化经营可提高 NUE 的结论; Strokhal 等^[27]研究了氮磷负荷入河量受中国农业转型以及种植业与畜牧业间粪肥再利用的影响,发现中国的畜牧业规模化所产生的粪便还田比例严重偏低,呼吁中国应加大畜禽养殖的粪肥还田。这些研究在加深人们对农业(农村)氮循环和污染认知的同时,从提高氮利用率的角度给出了缓解流域氮污染现状的宏观对策。此外, Basu 等^[28]还发现污染物从农田传

播至河流、海湾等水体的时间不等,有的长达几十年,这个过程中大量的氮污染物在土壤、地下水、湖泊、水库等景观中积累、释放,因此水质等环境效益很难在保护措施实施后立刻显现出来,具有明显的时间滞后性。这些认知填补了与景观氮素遗留相关的知识空白。随后 Basu 等针对氮素在各类景观中滞留的特性提出了相应的污染物管控理念和水质改善措施,包括调整水污染治理成效的预期、遗留氮素资源化、治理措施的空间明确化、多样化细致化的监测等一系列统筹措施,重构了总氮污染防治体系。本文将该研究提出的统筹治理措施凝练为三类统筹,即治理措施的时空统筹(可参考后文的削氮量空间分配^[29])、治理措施的规模统筹(可参考后文的面源化肥削减的规模化措施和污水处理厂扩建的精准措施相结合^[30])以及长短期效益统筹(如考虑氮素滞留效应的污染治理)。这些理念和措施尊重自然界中氮素循环的客观事实,使污染治理更加科学高效,同时也为陆海统筹的治理措施规划提供了方向性的指引。

与前面的研究文献相比,以上研究文献同样是以数据分析为基础,但是视角独特,通过跨维度、跨行业、跨区域等数据间的对比分析,挖掘出了以往未被发现的污染成因和影响机制,进而提出对应的治理思路和方法,但对策措施仍然较为笼统,有待细化落实。

此外,还有针对特定景观和环境问题的生态修复工程措施的实验研究,例如, Richard 等^[31]评估了 2016 年 9 月安装在英国温苏姆河支流砂石道路边的 3 个人工湿地在该支流泥沙拦截方面的有效性。土壤独特的物化性质能够起到滞留水、泥沙和营养物质的功能,但是由于人工砂石道路基层的巨大空隙,使得泥沙挟带着营养物质可以高效地穿过道路并进入河流。因此,道路边人工湿地的建设可以对泥沙和营养物质进行沉淀、拦截和降解,减缓了其入河、入海的速度,有效缓解河流污染。

3 治理方案规划研究

3.1 陆海统筹的流域削氮量分配研究

由于近岸海域总氮污染主要来源于陆地,陆

域总氮的减排是最直接的入海总氮管控手段,但是由于陆域的属性、功能、排放状况、河流水质污染状况等的时空异质性,如何合理制定减排方案一直是困扰入海总氮管控任务实施的重要问题。为此, Yang 等^[29]在考虑到海洋生态环境治理正向陆海统筹、协同治理转变的基础上,通过总氮排放的超载率(超额排放量占分配排放容量的比值)计算了渤海湾沿岸陆域各行政区对总氮污染的贡献占比,并在此基础上进行削氮方案分配。这里的削氮方案分配即通过优化得到各行政辖区的目标总氮排放负荷上限,并要求各超额排放的行政辖区严格按照此上限值削减氮排放。研究将削氮方案分为各行政辖区等比例削减、仅考虑海域水质约束的按贡献率削减以及考虑河-海双重水质约束的按贡献率削减,充分考虑减排的公平性和河、海水质在治理过程中可能存在竞争协同关系。结果发现相同削氮量下,按贡献率的削氮方案下海域优良水质面积要显著优于等比例削氮方案,且河-海双重水质约束下,河流考核断面的总氮浓度改善也要显著优于仅以海域水质为约束。

随后, Yang 等^[32]考虑到控制入海总氮的主要目的是防止近岸海域由于富营养化而导致的赤潮等灾害的发生,故陆地污染物负荷分配也应面向近岸海域的富营养化控制,然而当前的陆源污染负荷削控研究大多只局限于总量控制,没有考虑各类污染物负荷最大分配容量及其组合和富营养化程度之间的定量响应。因此,以我国渤海为例开发了一种考虑多营养物质负荷协调的最大分配负荷控制方法,该方法将多营养物的负荷压力与富营养化状态联系起来。基于二级复合富营养化指数(CEI_{II}),分别计算了总溶解氮、总溶解磷和化学需氧量的最大分配负荷及各污染物的削减率。该方法更高效地实现了陆海统筹污染治理,也使近岸海域的各污染物比例情势更加稳定,为改善沿海生态系统的健康状况提供了科学和技术支持。

上述研究将流域总氮等污染物的负荷削减任务定量化、最优化、细致化、差异化。在考虑不同陆-海水质约束以及海域富营养化控制的基础上统筹规划,将负荷削减任务明确地分配至各

个行政区,强化了渤海海域综合治理中入海总氮管控的抓手角色,具有较强的现实指导意义和实际应用价值。

3.2 基于费效优化的治理措施规划研究

流域和海域环境治理中各类措施的实施均需一定的资金投入,不同措施的成本和效益在不同海域、流域、区域也各不相同。为实现流域、海域总氮污染的高效治理,治理方案的费效分析研究成为近年来较为成熟的研究方向,可为总氮治理政策的制定和实施提供重要参考。

在流域尺度上,徐晓晨等^[30]以小清河流域的源区计量单元为研究对象,在分析每个源区计量单元的类型及超压情况的基础上,以费用最小化为目标函数、水质达标为约束条件,基于 SWAT 模型和环境成本计算模型(ECM)建立水污染治理措施费效优化模型,并应用于小清河流域,优化得到削减非点源氮肥 2900 吨、扩建污水处理厂 6300 万立方米/年的最优减排方案,所需费用仅为 15 亿元,较原计划(仅完善污水处理设施)的 19 亿元节约 20% 以上,最终实现小清河流域陆源 TN 污染物治理措施优化,既达到水质目标又兼顾公平、效率原则。此外,在更大的全球尺度上^[33]以及更小城镇尺度上^[34-35],国内外均有类似的研究。费效优化中所采取的治理措施也会根据地区属性和环境问题的不同而变化,包括人工湿地、生态沟渠、污水处理厂建设以及强制使用特种化肥等,具有广阔的研究前景。费效优化研究的关键在于准确量化各类治理措施的成本和效益。由于生态环境改善带来的并不是直接的经济效益,生态产品的经济价值评价和实现也亟待研究和推广,而且治理措施的成本中同样存在不容易量化的隐性成本,例如,城市里的人工湿地除了建设费用外,还有对当地居民生活、交通、景观、国土规划造成的影响成本,当前研究对此类成本和效益的考量都有待完善。

4 治理政策和制度保障研究

针对陆海统筹的总氮治理政策研究方面,纽约大学的 Kanter 等^[36]整理了全球第一个由国家和地区立法机构、政府机构制定的氮政策数据库。该研究整理了 186 个国家的 2726 项涉氮环

境政策、法规,这些政策均来自 ECOLLEX 数据库。该研究将每一项政策按照汇(如空气、水和土壤等)、经济部门(包括农业、废水和工业等)、政策种类(法律、框架、商务文件、数据和方法等)和大洲(亚洲、美洲、欧洲等)四大类属性进行划分,并对这四类属性中每一项属性和每一组属性组合的政策数量进行统计分析。研究发现以汇为中心的政策主要侧重于水,占到政策总数的近 50%。然而跨汇的政策(如陆海统筹)整合非常匮乏,不到 3%,这使得以一种形式的氮污染取代另一种形式的氮污染的风险大大增加。因此,在未来全世界的氮污染治理政策的制定方面,需要加强对环境汇的整合,出台更多的统筹政策。例如,在“欧盟循环经济一揽子计划”中,没有采取鼓励冬季储存粪肥的政策(因为这会导致 NH_3 向大气的排放增加以换取径流中 NO_3^- 的减少),而通过为回收粪肥建立一个健全的交易市场来增加粪肥还田比例和氮素利用率,从根本上减少了氮排放。此外,该研究中经济部门属性里农业政策数量占政策总数的比例最高,达到 67%,而其中大部分政策都是以鼓励农业生产和加强农业贸易为主,表明粮食生产的地位还是高于环境问题。因此,未来的政策中还应改变农业领域仍然以鼓励和规范施肥、加强农业贸易政策为主的现状。

总氮削控措施的选择和政策制定固然重要,但是要让它被政府、社会广泛接受和践行还需要一定的制度设计作为保障,而经济金融手段就是其中备受关注的一类。Gu 等^[37]为了解决全球农业氮污染问题,提出了一个可在世界不同地区实施的氮信用体系(NCS)框架构想,其目标是找到一个基于激励手段的氮减排通用制度。NCS 的基本思想是对采取了氮减排措施的农民进行高于减排成本的经济补贴,而补贴资金主要通过向社会上的氮减排受益群体征税来实现。该制度认为食品全产业链上的消费者、农民、供应商、食品加工商、零售商和政府存在总氮削控过程中都存在局限性并应负有相应的责任。生态环境治理由于其本身的公益属性,面向治理措施融资或利益主体奖惩的金融、经济手段是解决此类社会问题的重要方法,而此类研究恰恰容易

被环境、化学、地学类等理工背景的科研工作者忽视。

类似前述 NCS 的这种农业环境激励计划旨在补偿农民为保护生态环境所做的改变,但农民参与者的参与意愿和参与比例是另一个问题。为此,Chapman 等^[38]利用关系价值视角来审视这一问题,这是一个参考农民-土地、农民-社区和农民-景观之间三种关键关系而开发的框架。然后,应用这个框架来充分了解美国西北部河岸缓冲区激励计划的参与情况。此项研究从根本上在于强调环境治理政策中需要考虑的隐形价值,如农民对土地、景观的看法、感情,以及政策带来的生活和家庭的变故等这些不容易被量化的效益和成本,且对于同一地区的农民,每家每户所看重的成本和效益也有所不同,政策制定者应尽力避免“一刀切”的政策和管理办法,政策制定也应因地、因时、因人制宜。我国是农业大国,幅员辽阔,风土人情多样,农业面源污染也是陆海总氮治理中最难管而又不能不管的一项,政策的制定不仅需要丰富的数据和严谨的理论做支撑,更应有田间地头的实际调研和灵活应变。

此外,大多数致力于减少农业氮污染的政策侧重于改变农民的行为。然而,农场层面的政策很难实施,而且农民只是粮食产业链中的诸多参与者之一。其他参与者的活动,从肥料制造商到废水处理公司,也会影响农场及其他层面的氮素流通和损失。因此,政策制定者在解决从农田到餐桌的氮污染问题上,有相较于传统范畴更广泛的政策选择。受全产业链氮利用效率概念的启发,Kanter 等^[39]从氮的角度介绍了粮食产业链中常见的主要参与者,确定了针对他们的氮政策,并提出了多个新的标准,以指导不同政策干预措施的可行性和预设计分析,旨在提高粮食全产业链中每一个环节的氮利用率来减少氮污染。

环境污染治理具有较强的公益属性,因此政策工具是保障生态环境治理生产力的重要手段,具有强制性、影响范围广、涉及利益主体众多等特点,而我国在治理政策研究方面相较于国外较为滞后。政策研究相较于治理措施研究更为复杂。治理措施研究普遍和数据、模型打交道,而政策研究更多的是要和人与社会打交道,需考虑

社会接受度及多方利益的权衡等。未来的政策研究可以重点从跨环境汇整合(或机构改革的可能性)、人文和地域特殊性以及粮食产业链的角度入手。

5 展望与建议

本文对当前涉及入海总氮管控与治理的实践性研究方向及其代表性文献进行了整理和分析。当前此类研究已从基本的现象规律的挖掘认知逐渐转向总氮削控技术和手段研究,未来随着人们对总氮污染在陆海两相中的产生和扩散机制的认知越来越清晰,如何细化治理措施并确保其能长期稳定实施运行是亟待解决的问题。相关研究也建议从以下两点着手:一是治理措施的创新和落实,是指通过对总氮污染机理的新认知和新颖的技术手段,提出总氮削控的创新性解决方案,主要包括工程手段、政策手段和经济手段等,并立足于现有的认知和研究基础细化落实研究方案,使其具有较强的实践应用性;二是政策制度保障,是指从政府等政策制定者的角度,研究如何合理地制定总氮污染管控政策,确保在公平、公正的情况下吸引足够多的利益主体参与到生态环境治理行动中。

此外,通过对研究方向和文献的归纳总结,为了更好地服务于我国陆海统筹的生态环境治理战略,本文在陆海总氮污染治理方面给出如下对策建议:

(1) 加强重点海域、流域总氮治理统筹规划和落实

在重点海域综合治理攻坚战的基础上,对渤海、珠江口、长江口-杭州湾等总氮污染严重的海域及其所属流域做好基于河-海双重水质约束的削氮负荷分配方案落实,压实各行政区责任,协调好治理方案规划和治理方案实施之间的关系。从流域削氮任务的角度,重视治理措施的费效优化研究和落实,力争采用最小的成本获取最大的效益,在此过程中决策者也应根据研究成果向地方提供方向性和技术性指导。

(2) 挖掘并推动应用创新性治理手段

创新性治理手段的提出来源于对总氮污染机制的创新性认知,故首先应鼓励科学界对总氮

污染机制认知的探索研究(如土壤氮素遗留、NUE的影响因素等),并推动成熟治理手段的标准化、产业化落地实践,如农业集约化经营、重点污染负荷入河段的人工湿地和沟渠建设、农村化粪池建设、城镇雨污分流改造等。

(3) 完善陆海统筹总氮治理的政策和制度保障

整合陆海环境治理资源,加快形成协同一体、区域联动的陆海统筹治理格局。以“水”这一环境汇为例,当前在统筹政策方面,我国地表水、地下水、海水的水质考核目标和标准不尽相同,负责每一种水质的部门往往只关注自己的考核目标,环境汇之间缺乏一体化政策,难免顾此失彼。因此,应尝试集中调整生态环境、水利、自然资源、农业农村等部门的相应职权和力量,建立地表水、地下水、海水统筹的总氮污染管控政策和机制,实现机构职能的系统性、整体性重构,提高总氮污染的治理能力和效率。此外,在对总氮污染机理的新认知、新理念基础上,将上述的创新性治理措施纳入政策制定中。应利用金融、经济、法律等手段建立总氮治理措施的保障制度,组织农户、污染排放企业、科研机构人员开展氮减排专业知识技能培训,加深社会对氮污染问题严重性的认知,引导鼓励环保科技企业构建生态价值向经济价值转化循环的体制机制,推动治理措施的落地实践。推动面向社会的NCS农业氮信用系统的建立和应用,建议于2030年前完成农业氮信用系统相关机构和法律制度的建立,完善氮减排最佳管理措施(BMP)和氮信用积分的审核机制,随后选择总氮污染问题突出的部分市、区县(县级市)进行NCS的试点,争取在2035年前开始在农村地区大规模推广。

参考文献:

- [1] 王旭涛,陈亮鸿,赵婷,等.珠江口邻近海域无机氮浓度时空变化分析[J].环境保护,2023,51(19): 16-20.
- [2] 李双营.辽东湾入海河流污染物通量特征及来源分析[D].大连:大连理工大学,2022.
- [3] 黄海宁,林彩,暨卫东,等.九龙江河口区营养盐分布特征及其影响因素分析[J].海洋通报,2012,31(3): 290-296.
- [4] 陈宝红,林辉,张春华,等.厦门海域水体无机氮和活性磷

- 酸盐含量的变化趋势[J]. 台湾海峡, 2010, 29(3): 314-319.
- [5] 李卫卫, 孙昭晨, 梁书秀. 辽河口区径流对污染物漂移扩散的影响[J]. 海洋环境科学, 2019, 38(2): 294-302.
- [6] 付意成, 臧文斌, 董飞, 等. 基于 SWAT 模型的浑太河流域农业面源污染物产生量估算[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8): 1-8.
- [7] 田晶. 气候变化下浑太流域污染负荷的响应特征研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- [8] 杨青云, 李敏华, 相景昌, 等. 珠江口深圳海域总氮陆源入海污染负荷与水环境容量分析[J]. 环境生态学, 2023, 5(3): 91-98.
- [9] 王颢, 陈克亮, 吴烨飞, 等. 闽江入海断面溶解无机氮长时间序列分析及入海通量估算[J]. 中国环境监测, 2023, 39(6): 98-109.
- [10] YU D, CHEN N W, CHENG P, et al. Hydrodynamic impacts on tidal-scale dissolved inorganic nitrogen cycling and export across the estuarine turbidity maxima to coast[J]. Biogeochemistry, 2020, 151(1): 81-98.
- [11] YU D, CHEN N W, KROM M D, et al. Understanding how estuarine hydrology controls ammonium and other inorganic nitrogen concentrations and fluxes through the subtropical Jiulong River Estuary, S. E. China under baseflow and flood-affected conditions[J]. Biogeochemistry, 2019, 142(3): 443-466.
- [12] CHEN N W, KROM M D, WU Y Q, et al. Storm induced estuarine turbidity maxima and controls on nutrient fluxes across river-estuary-coast continuum[J]. Science of the Total Environment, 2018, 628-629: 1108-1120.
- [13] LIN J J, HU A Y, WANG F F, et al. Impacts of a subtropical storm on nitrogen functional microbes and associated cycling processes in a river-estuary continuum[J]. Science of the Total Environment, 2023, 861: 160698.
- [14] LIN J J, KROM M D, WANG F F, et al. Simultaneous observations revealed the non-steady state effects of a tropical storm on the export of particles and inorganic nitrogen through a river-estuary continuum[J]. Journal of Hydrology, 2022, 606: 127438.
- [15] HAN F, TIAN Q, CHEN N W, et al. Assessing ammonium pollution and mitigation measures through a modified watershed non-point source model[J]. Water Research, 2024, 254: 121372.
- [16] ILAMPOORANAN I, VAN METER K J, BASU N B. A race against time: modeling time lags in watershed response[J]. Water Resources Research, 2019, 55(5): 3941-3959.
- [17] 李少斌, 余丹, 孔俊, 等. 海岸带陆海气氮磷污染协同治理: 监测、模拟与决策[J]. 环境工程, 2022, 40(6): 12-21.
- [18] 刘倩. 辽东湾近岸海域污染成因分析及对策研究[J]. 环境保护与循环经济, 2023, 43(2): 74-76.
- [19] 王琰, 牟秀娟, 徐承芬. 莱州湾海洋生态环境状况与污染防治策略初探[J]. 海洋环境科学, 2021, 40(6): 823-831, 837.
- [20] 高山, 陈伟琪, 陈祖峰. 厦门海域氮、磷的主要来源分析及其控制措施[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2006, 45(增刊1): 286-291.
- [21] 张宇铭, 谢静, 颜士博, 等. 珠江口邻近海域综合治理攻坚战总体思路及建议[J]. 环境保护, 2023, 51(19): 13-15.
- [22] 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.
- [23] 樊荣. 基于 HSPF 模型甬江入海总氮排放控制路径研究[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2022.
- [24] 罗涛, 常舰, 李欲如. 典型入海河流总氮污染控制对策研究——以临海市灵江为例[J]. 环境科学与管理, 2023, 48(6): 43-48.
- [25] 周泉, 王文静, 任秀文, 等. 入海河流总氮污染溯源与综合管控对策研究——以东莞市为例[J]. 环境保护, 2023, 51(19): 43-47.
- [26] REN C C, ZHANG X M, REIS S, et al. Socioeconomic barriers of nitrogen management for agricultural and environmental sustainability[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2022, 333: 107950.
- [27] STOKAL M, MA L, BAI Z H, et al. Alarming nutrient pollution of Chinese rivers as a result of agricultural transitions[J]. Environmental Research Letters, 2016, 11(2): 024014.
- [28] BASU N B, VAN METER K J, BYRNES D K, et al. Managing nitrogen legacies to accelerate water quality improvement[J]. Nature Geoscience, 2022, 15(2): 97-105.
- [29] YANG Y Q, LIANG S K, LI K Q, et al. Integrated water-quality management indicators from river to sea: a case study of the Bohai Sea, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2022, 185: 114320.
- [30] 徐晓晨, 苏莹, 李克强, 等. 基于费效优化模型的小清河流域入海总氮污染物治理措施初步研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2019, 49(4): 97-105.
- [31] COOPER R J, BATTAMS Z M, PEARL S H, et al. Mitigating river sediment enrichment through the construction of roadside wetlands[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 231: 146-154.
- [32] YANG Y Q, LI K Q, LIANG S K, et al. A simulation-optimization approach based on the compound eutrophication index to identify multi-nutrient allocated load[J]. Science of the Total Environment, 2024, 906: 167626.
- [33] GU B J, ZHANG X M, LAM S K, et al. Cost-effective mitigation of nitrogen pollution from global croplands[J]. Nature, 2023, 613(7942): 77-84.
- [34] POLYAKOV M, WHITE B. What is the least cost policy mix for nitrogen and phosphorous abatement in a rapidly urbaniz-

- ing catchment?[J]. *Water Resources and Economics*, 2022, 39: 100208.
- [35] ZENG Y, CAI Y P, TAN Q, et al. An integrated modeling approach for identifying cost-effective strategies in controlling water pollution of urban watersheds[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 581: 124373.
- [36] KANTER D R, CHODOS O, NORDLAND O, et al. Gaps and opportunities in nitrogen pollution policies around the world[J]. *Nature Sustainability*, 2020, 3(11): 956-963.
- [37] GU B J, VAN GRINSVEN H J M, LAM S K, et al. A credit system to solve agricultural nitrogen pollution[J]. *The Innovation*, 2021, 2(1): 100079.
- [38] CHAPMAN M, SATTERFIELD T, CHAN K M A. When value conflicts are barriers: can relational values help explain farmer participation in conservation incentive programs?[J]. *Land Use Policy*, 2019, 82: 464-475.
- [39] KANTER D R, BARTOLINI F, KUGELBERG S, et al. Nitrogen pollution policy beyond the farm[J]. *Nature Food*, 2020, 1(1): 27-32.
- (本文编辑: 胡莹莹)

(上接第 663 页)

4.4 加强船源性海洋生态环境损害赔偿制度研究

近四十年来,我国沿海发生船舶溢油事故约 3000 起,平均 4~5 天发生一起污染事故。船舶在全球范围内流动,我国船舶油污损害赔偿机制必须与我国参加的国际条约相协调,因此需要在遵循侵权法和环境法发展规律的基础上,研究化解船源性海洋生态环境损害赔偿法律规范冲突的途径,解决生态利益与传统民事权益的兼容问题。一方面按照国家自主性与国际统一性相结合的原则,通过国内法与国际条约相互转化、修改海商法等途径优化现行法律规范的协调性。另一方面,衔接现行船舶污染事故应急机制,形成责任主体明确、工作链条完整的船舶污染事故应急、调查、赔偿协作机制,加强以区域生态功能恢复为目标的海洋生态环境修复措施与技术研究,规范船舶污染事故后海洋生态环境修复的责任承担方式及执行。

参考文献:

- [1] 联合国.《联合国海洋法公约》四十载:成就与未来展望[Z].

纽约:联合国,2023.

- [2] 梅 宏. 海洋生态环境损害赔偿制度建设的方向[J]. *环境保护*, 2022, 50(13): 42-45.
- [3] 王秀卫. 海洋生态环境损害赔偿制度立法进路研究——以《海洋环境保护法》修改为背景[J]. *华东政法大学学报*, 2021, 24(01): 76-86.
- [4] 王秀卫, 杨 忱. 论海洋生态环境损害赔偿请求权[J]. *河北法学*, 2024, 42(2): 35-54.
- [5] 司法部公共法律服务管理局. 环境损害司法鉴定白皮书(2024 年)[R]. 北京: 中国司法部公共法律服务管理局, 2024.
- [6] 中华人民共和国司法部. 司法部确定 141 家不预先收费的环境损害司法鉴定机构[EB/OL]. (2024-02-07)[2024-07-05]. https://www.moj.gov.cn/pub/sfbgw/gwxw/xwyw/szywbnyw/202402/t20240207_494575.html.
- [7] 孙 悦. 船源性海洋生态环境损害赔偿法律规范的冲突与协调[D]. 上海: 上海海事大学, 2022.
- [8] 廖兵兵, 叶楹平. 生态文明视域下海洋生态环境损害赔偿范围研究[J]. *中国海商法研究*, 2022, 33(4): 3-14.
- [9] 王永涛. “桑吉”轮油污损害赔偿法律适用问题探析[J]. *中国海事*, 2021(03): 29-32.

(本文编辑: 胡莹莹)