

· 专论与综述 ·

太湖流域农村面源污染治理现状与前景研究

姚亦舟^{1,2}, 秦伯强²

(1. 中国科学院大学, 北京 100049; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008)

摘要:分析了太湖流域农村面源污染现状、调查方法、治理技术及过往的环境管理经验,指出近年来的治污工作虽然有效控制了城镇点源污染,但对经济基础相对薄弱的乡村地区面源污染的治理效果仍然不佳。基于太湖流域农村面源污染治理在技术层面已经形成的以分散式污水处理设施净化乡村生活污水、以径流截污工程治理暴雨径流污染、以源头减排和污染截留技术治理农业生产污染的系统化体系,提出了将面源污染治理与农村产业优化、基建升级、高标准农田建设、生态湿地推广等目标相结合,在多要素协同/权衡的思路下加强环境治理技术与政治经济领域融合等研究展望。

关键词:农村面源污染; 治理技术; 环境管理; 太湖流域

中图分类号: X524

文献标志码: A

文章编号: 1006-2009(2024)01-0011-06

Research on Current Situation and Prospect of Rural Non-point Source Pollution Control in Taihu Basin

YAO Yizhou^{1,2}, QIN Boqiang²

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008, China)

Abstract: This paper analyzed the current situation, investigation methods, treatment techniques and past environmental management experience of rural non-point source pollution in Taihu Basin, and pointed out that although the pollution control in recent years had effectively controlled urban point source pollution, the effect on non-point source pollution in rural area with relatively weak economic base was still poor. Based on the systematic system of rural non-point source pollution control in Taihu Basin, that was, to purify rural domestic sewage by decentralized sewage treatment facilities, to treat rainstorm runoff pollution by runoff interception projects, to control agricultural production pollution by source reduction and pollution interception technologies, it proposed to combine non-point source pollution control with rural industry optimization, infrastructure upgrading, high standard farmland construction, ecological wetland promotion and other goals, and strengthen the integration of environmental governance technology and political and economic fields under the idea of multi-factor collaboration/tradeoff.

Key words: Rural non-point source pollution; Treatment technology; Environmental management; Taihu basin

中国经济快速发展的同时也面临着环境破坏和生态退化等问题^[1]。太湖是我国第三大淡水湖,位于长江三角洲,流域人口约6 164万,人均GDP达15.7万元^[2],区域高强度的人类活动造成水体富营养化和蓝藻水华暴发等污染事件频发,给可持续发展带来挑战^[3]。近年来,虽然区域城市污水收集管网和处理厂建设有效控制了点源污染,但乡村地区相对薄弱的经济基础和基建水平影响

了环境治理效率,对贡献流域约一半外源氮磷的农村面源污染控制效果不佳已经成为当前制约太湖富营养化治理的关键问题^[4]。今分析太湖流域农

收稿日期: 2022-11-20; 修订日期: 2023-10-18

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体“湖泊环境变化及其生态系统响应”基金资助项目(41621002)

作者简介: 姚亦舟(1993—),男,江苏镇江人,在读博士研究生,研究方向为乡村面源污染治理与环境管理政策。

村面源污染现状和主要的治理技术及存在的不足,为提高治理效率和改善太湖生态环境提供参考。

1 太湖流域环境治理现状

太湖流域污染来源主要包括由城市居民生活污水和工业废水构成的点源污染,以及由乡村居民生活污水、农业生产排污、雨洪径流冲刷等造成的面源污染。自 2007 年无锡太湖水污染事件发生以来,为改善太湖水环境,从产业结构调整 and 治污工程建设两个方面开展了一系列的治理工作^[5]。经过 10 余年的产业升级和节水减排,太湖流域传统重污染行业产值下降约 10%^[6],万元工业增加值用水量低于全国平均水平(26 m³)^[7],新建污水收集管网约 24 500 km,污水处理设施从 139 处增至 244 处^[4],城市点源污水收集处理率达到 90% 以上且排放浓度达到一级标准限值^[8-9],点源污染控制初见成效。

然而,城乡二元发展背景导致传统的政府投资主导治污工程建设结合执法监管的环境管理模式在农村地区受到诸多挑战^[10],污染治理效果不佳。农村面源污染贡献了太湖约 68% 的总磷(TP)和 45% 的总氮(TN)外源污染^[11],是导致太湖水体 TN、TP、叶绿素 a 等指标浓度多年未能显著下降的重要原因^[12]。为加快太湖水环境修复,应深入分析农村面源污染的来源和现状、治理技术及相关的政策经验,在此基础上有针对性地开展污染治理工作。

2 太湖流域农村面源污染调查分析

2.1 农村面源污染调查方法

农村面源污染指由农业生产、乡村生活用水、乡村地区雨洪冲刷等来源所产生,分布零散难以监测的一类污染^[13],是导致湖泊富营养化的氮磷污染物的主要来源之一。此类污染物通过河流地表径流、渗入地下径流、挥发到大气中经再沉降过程等途径进入水生生态系统,其输移过程与流域的土壤结构、农作物类型、气候条件、地质地貌等因素密切相关^[14],同时受到降雨径流的随机性影响,时空分布的不确定性很强,治理难度较大。因此,研究者开发了多种调查方法,以适应农村面源污染的复杂性。

在目前的面源污染研究中,污染源调查和普查、同位素受体模型分析、流域水文模型计算 3 类方法的应用较为普遍^[14-16]。污染源调查和普查方

法通过实地调研和历史文献分析,结合土地淋溶实验和水质指标监测,对乡村居民的人均生活污水产生量和污染物浓度,区域耕地种植结构、平均化肥施用量和流失系数,养殖业规模、污染物流失率、日产污系数和平均养殖天数等主要污染来源的产污系数和规模进行调查分析,利用经验公式估算流域的污染负荷^[16]。虽然该方法有很强的地域性且存在系统性误差,但由于其适用范围广,调查成本相对可控,因而成为大流域尺度总体污染背景研究中最常用的方法。同位素受体模型分析是利用不同污染源中¹⁸O、¹⁵N 同位素特征值范围有所差异的原理,通过受体模型分析样品中¹⁸O、¹⁵N 同位素特征值,以判断肥料流失、大气沉降、工业废水、生活污水等污染源各自的占比^[17],半定量地分析面源污染来源。该方法虽然准确度较高,但监测成本高昂,往往难以开展长期、大范围的连续观测,多被用于重点污染区域监测,辅助决策者进行有针对性的污染治理。流域水文模型计算是对氮磷污染物从产生、输移到最终进入水体过程中的一系列物理、化学和生物过程进行模拟^[18],计算入湖的污染负荷,方法精度相对较高,并且能识别区域污染热点,对环境治理有很大帮助。由于模型对输入数据的要求较高,因而该方法在地势复杂且水网密布的大型流域的应用难度较大^[18],多被用于地理元素分异较小、监测背景资料较为完备的小型流域环境预测和治理政策效果模拟。

2.2 太湖流域农村面源污染情况分析

太湖流域农村面源污染情况十分复杂,多年来研究者从不同角度开展了大量调查研究。洪燕婷等^[11]以 2013 年太湖流域水环境综合治理总体方案中所列的污染源普查数据为基础,估算出太湖面源 TP 排放量约占流域污染总量的 68%,面源 TN 排放量约占流域污染总量的 45%。刘庄等^[19]研究发现,太湖面源污染的主要来源包括畜禽养殖业(45.8% TP、45.9% TN),种植业(22.6% TP、25.5% TN),水产养殖业(15.0% TP、7.4% TN),以及乡村居民生活用水(16.6% TP、21.2% TN)等 4 类。贾更华等^[20]以太湖湖西区排污监测数据为基础,估算得出面源 TP 约占流域污染总量 2/3 的结论。Yi 等^[21]开展的同位素监测分析结果表明,太湖湖西区流域面源 TN 的贡献为 40% ~ 50%。

基于以上研究,政府部门在太湖流域以畜禽养殖业为重点开展了一系列治理工作。截至 2018

年,流域畜禽养殖规模较 10 年前减小约 65%,且规模化养殖业全部接入收集处理系统,有效遏制了畜禽粪污污染,同期围网养殖规模也大幅减小^[6]。由于耕地承担着粮食安全的重任,因而不能简单清退,而且以小农户为主体的种植业生产方式导致耕地分布零散,监管难度较大。因此,近年来太湖流域的种植业规模并没有明显减小^[22],且化肥施用过量的现象仍然普遍存在,种植业在面源污染中的占比逐渐增加到 50% 左右^[23],在时空分布上呈现出农田密集的湖西区、南部沿岸区污染较严重且季节变化较明显的特征^[24],通常在径流量较大的丰

水期面源污染加剧。如何因地、因时制宜,结合气象条件变化及时调整农业管理模式,针对其污染特征采用适当的治理技术,将成为解决面源污染问题的关键。

3 太湖流域面源污染治理技术

面源污染不仅来源多样,而且污染物浓度、分布特征、输移模式不同,不能简单地采用单一的治理策略。乡村生活、农业生产活动、降雨径流冲刷等不同污染源有着各自的特点,目前主要的治理技术见表 1^[25]。

表 1 主要的面源污染治理技术

Table 1 Main non-point source pollution control technologies

污染来源	治理技术	工程手段	方法原理
乡村生活	集中式生物处理	厌氧、好氧反应塘,生物滤池、人工湿地等	利用生物处理技术降低污水养分含量,集中收集处理效率较高
	分散式生物处理	厌氧发酵、土壤处理等	利用生物反应降低污染物浓度,分散式处理成本较低
农业生产活动	优化施肥和改善土壤肥力	测土配方施肥、侧条施肥、秸秆还田、绿肥还田、轮作休耕等	减少过量肥料使用,改善土壤肥力,在降低污染的同时保证农作物产量
	污染截留和生物处理	生态沟渠、人工湿地、天然湿地等	在田地和排水沟渠建设生物处理设施,截留农田径流污染物
	沼气工程	建设沼气池收集处理畜禽粪污,回收其中的氮磷	利用厌氧微生物发酵,以粪污为原料回收沼气、沼液
城市降水径流分流	延缓产流	绿化促渗、透水路面、木质素促渗技术等	增强城市路面的渗透能力,利用土壤蓄水减少暴雨径流
	汇流截留	双井式雨水收集、中水回用技术等	通过蓄水管道和贮水池建设,拦截初期的雨洪径流污染物
乡村降水径流	汇流截留	贮水池、湿地、前置库、河岸带生态修复工程等	通过水库和生物植被工程建设,截留初期雨洪径流污染

由表 1 可见,乡村生活污水流量较小且分布范围广,多采用分散式处理设施进行治理。在居民密度较高、地势较为平坦的区域也考虑采用集中式收集处理方法,对氮磷污染物的处理率一般可达 80% 以上^[26],而由于缺少强制性的技术标准,以及污染者付费的社会认可度较低^[27],该方法普及速度较慢。在暴雨冲刷导致的面源污染高峰期,城市层面主要通过渗水路面等工程手段增强路面的渗透能力,延缓产流过程^[28],或通过蓄水管道和贮水池建设阻碍汇流过程,降低暴雨径流的冲刷强度^[29];在乡村地区通过修建贮水池、湿地、前置库、河岸带等方法截留暴雨径流以缓解污染^[30-31],其截留能力一般可达 60% ~ 80%,目前存在的主要问题是缺少历史规划基础,相关设施普及不足。

对于农业生产活动产生的污染,主要有源头控

制和污染截留两种治理思路^[26,32]。源头控制方法中潜力较大的技术包括畜禽养殖业规模化改造和沼气工程建设,其能回收畜禽粪污中 90% 以上的氮磷,并实现废弃物的资源化利用^[27],应用前景广阔。此外,还可以对种植业的施肥方法进行优化,如在太湖流域耕地年均氮肥施用量(550 kg/hm² ~ 600 kg/hm²)严重过剩的情况下^[33],推广测土配方施肥和绿肥还田等技术,减少氮肥施用量,改善土壤有机质,提升作物单产^[34],实现环境治理和农村经济的双赢。然而,由于相关技术的额外劳动力需求,在乡村人口老龄化且农业生产排污缺少强制性规定的背景下,其推广阻力较大^[26]。

污染截留方法以生态沟渠和湿地处理为代表,在径流过程中通过吸附沉降和生物处理等手段,减少最终进入湖体的污染物总量。研究表明,稻田控

排水技术和生态拦截型沟渠对农田径流中氮磷污染物的去除率能达到30%以上,而1年以上的人工湿地系统则能去除50%~70%的氮磷污染物,具有很大的减污潜力^[35]。然而,此类技术受到高昂的建设和维护成本及土地条件限制,主要依赖财政支持,目前仅在一些示范区得到应用,推广难度较大。

4 流域面源污染治理经验

4.1 国内外面源污染治理技术和管理经验

目前国内的面源污染治理研究虽然在技术层面成果丰富,但受限于社会和经济条件,相较于发达国家仍然缺少将流域作为一个整体进行综合管理的能力,国外一些先进的环境管理理念仍有借鉴价值。如美国1972年在《清洁水法案》中提出的最大日负荷(TMDL)计划,在估算流域可接受的污染物最大日负荷基础上,通过模型模拟安全阈值和季节性变化的影响,将污染负荷统筹分配到各污染源,从而高效地应用治污措施促使水质达标。又如发达国家普遍采用的由针对性选择工程和非工程措施构成的最佳管理措施(BMP),在法规政策支持下,通过修建雨水收集、滞留池等设施,拦截污染最严重的雨洪初期污染物^[29],结合土地利用规划和地面垃圾清扫等手段强化控制面源污染。

国际上已有相关的流域面源污染控制案例。如在美国伊利湖上游Maumee & Sandusky流域采用包含营养管理规划、轮作休耕、河岸缓冲带建设等在内的一系列BMP措施,综合评估治理方案的建设成本、维持成本、就业影响、减污能力及对农业产值的影响等,实现农业面源污染控制^[36]。同时,结合相关法律法规,采用TMDL计划,最终在可接受的成本范围内最大限度地降低流域的磷污染负荷。上述精细化农业管理方法综合考虑了区域经济活动、社会文化、科学技术与环境保护等诸多方面,可以为太湖流域面源污染治理提供一定参考。

4.2 太湖流域面源污染治理技术和政策分析

国内的环境治理工作在机制上表现为自上而下推动^[37],通常由全国人大、国务院等中央国家机构制定法律、法规、环境规划的范围和目标,再将任务分配给省级政府部门,由省级和地方政府因地制宜地制定工作计划,最后通过环境监管和政策倾斜,鼓励企业、农户等利益相关方采取有利于环境保护的行为。乡村地区的控源截污工作受限于基层管理能力,在实践中往往因政策支持不到位而导

致治污技术难以顺利推行^[4-5]。

以国家水环境相关政策文件为主线,太湖流域环境治理经历了几个不同的阶段。1996年《中华人民共和国水污染防治法》的修正及《中华人民共和国国民经济和社会发展“九五”计划和2010年远景目标纲要》的发布是第一个重要节点,自此水环境保护法律法规逐步完善,包括调整产业结构、建设污水处理厂、控制工业污染源、推广清洁生产、科学使用化肥和农药、规范畜禽养殖业、实施清淤工程、建设防护林带等在内的一系列治污措施被系统性地提出。《太湖水污染防治2002年度工作计划》中明确了各有关部门的职责分工,并启动“引江济太”工程,开始推进大规模的污水处理厂建设。

2007年无锡太湖水污染事件是第二个重要节点,事件发生后,政府投入大量资源加快推进太湖环境治理。2008年,国务院批复实施《太湖流域水环境综合治理总体方案》(以下简称《总体方案》),投入专项资金1100多亿元用于太湖污染治理和生态修复。2011年《太湖流域管理条例》的发布和2013年《总体方案》的修编在政策层面将控源截污、产业结构调整 and 生态修复列为工作核心,并用行政手段大力推进,一些大规模的治污工程同时得到推动,“引江济太”工程年均引水入湖达7.10亿m³,湖区每年打捞蓝藻约170万t~190万t^[20]。然而,此阶段的环境治理主要在城市开展,由于基层监管力量不足、行政管理边界不明确、基建条件较差等问题的存在,导致尽管在畜禽养殖业整顿、围网养殖清退、测土配方施肥技术覆盖率提升等方面取得了一些成效,但仍难以在整体上遏制农村面源污染。

2015年发布的《水污染防治行动计划》及2016年发布的《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》提出了生态文明和流域综合治理的概念,污染治理不再局限于末端处理和监测,而是在生态-经济-社会的综合框架下提出新的要求。2021年发布的《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》中强调,面源污染治理应当与乡村发展相结合,以改善乡村居民生活质量为前提。在此背景下,近年来推行的长江经济带一体化和湖长制政策进一步明确了各级政府部门之间的责任关系,从区域整体角度规划环境治理工作。苏浙两省和

上海市建立了太湖淀山湖湖长协作机制,在环境治理中突破行政边界的制约,改善了相关湖区和河道的整治效果^[38]。然而,目前乡村环境治理工程建设和维护仍过于依赖财政支持,例如仅宜兴市乡村分散式生活污水治理工程预期投入即高达 11.79 亿元^[27],而江苏省在污染治理上的投资占 GDP 的比例已经从 2013 年的 1.50% 降至 2018 年的 1.11%^[39],政府的高额环境投资逐渐呈现减弱趋势。如何改善环境管理模式,提升地方环境政策效率,控制环境治理成本,将成为未来环境治理工作的关键所在。

5 改善农村面源污染治理模式的探索与展望

目前太湖流域面源污染治理的主要问题在于如何有效地加强乡村地区环境管理。农业生产在社会、经济、环境 3 个维度均会产生不同的影响^[23],虽然在环境维度体现出环境污染、生态破坏等负面效应,但在经济和社会维度具有供应粮食、带动关联产业、保障农户收入和就业等正面效应,使得农业生产活动各要素之间的权衡与协同关系十分复杂。仅从单一的环境视角出发制定面源治理政策,而忽视农业活动在乡村地区经济和社会发展方面的贡献,可能导致政策的影响偏离预期,增加管理成本^[40]。在近年来太湖流域人口增长、城市化、产业升级、农业集约化的背景下,如何处理环境友好型农业生产模式与粮食安全和农民收入之间的关系,调和农村人口劳动力短缺与精细化农业管理模式额外劳动力需求之间的矛盾,通过针对性投资在缩小城乡经济差距的同时减少污染,并在环境承载力的限度内调整产业结构、改善乡村居民生活质量等问题,都是在治理面源污染时无法回避的挑战。

在过往的面源污染治理实践中,往往重视技术层面的推广和评估,对如何在水资源-粮食生产-生态环境-经济发展多要素相互协同与权衡作用框架下^[41]提升政策效率的研究相对薄弱。相关研究多局限于在宏观层面基于统计模型方法预测经济发展对环境的影响^[9,23],或在农户层面通过生物-经济模型等方法模拟不同政策情景下农业生产的变化并评估其影响,无法满足在大流域尺度统筹多种环境项目组合,评估其直接与间接的环境、经济、社会影响,提高管理效率的目标要求。

在乡村振兴背景下,需要将面源污染治理与农

村产业优化、基建升级、高标准农田建设、生态湿地推广等目标结合起来,在多要素协同/权衡的思路下加强环境治理技术与政治经济领域的融合。这也要求政府针对经济增长与污染物排放、环境友好型技术推广与污染物减排、经济增长与乡村脱贫、污染物减少与生态系统修复等问题进行综合性的分析和评估,需要研究者开发相应的量化模型与精细化、智能化的农业管理工具,辅助决策者提高政策效率,统筹规划太湖流域的面源污染治理与乡村振兴工程。

6 结语

近年来,随着产业结构调整 and 治污能力建设的推进,太湖流域点源污染输入得到有效控制,面源污染成为治理太湖富营养化的关键。太湖流域农村面源污染治理在技术层面已经形成以分散式污水处理设施净化乡村生活污水、以径流截污工程治理暴雨径流污染、以源头减排和污染截留技术治理农业生产污染的系统化体系。然而,早期的环境治理工作过于依赖治污工程建设和行政监管,在基础设施水平和经济基础相对薄弱的乡村地区效果不佳,尤其是在种植业污染和乡村生活污水治理方面,由于缺少农业产污排放规范和污染者付费的社会认同基础,监管成本较高,投资相对不足,导致成效不明显。因此,需要针对农村面源污染的特点,制定相应的强制性法规,结合教育宣传手段,提高污染者付费原则的社会认可度,持续推动优化施肥、生态湿地、乡村生活污水处理等治理技术的应用,结合“十四五”规划目标综合考虑农村面源污染问题,进一步提高治理效率。

[参考文献]

- [1] LIU J G, ZANG C F, TIAN S Y, et al. Water conservancy projects in China: Achievements, challenges and way forward[J]. *Global Environmental Change*, 2013, 23(3): 633-643.
- [2] 水利部太湖流域管理局. 2019 年度太湖流域及东南诸河水资源公报[EB/OL]. (2020-08-07) [2022-11-12]. <http://www.tba.gov.cn/slbthlyglj/szygb/content/54f58495-8964-4140-a01c-387b5d81fbac.html>.
- [3] HAN D M, CURRELL M J, CAO G L. Deep challenges for China's war on water pollution[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 218: 1222-1233.
- [4] QIN B Q, PAERL H W, BROOKES J D, et al. Why Lake Taihu continues to be plagued with cyanobacterial blooms through 10 years(2007-2017) efforts[J]. *Science Bulletin*, 2019, 64(6):

- 354-356.
- [5] BRYAN B A, GAO L, YE Y Q, et al. China's response to a national land-system sustainability emergency [J]. *Nature*, 2018, 559(7713):193-204.
- [6] 童克难. “十年治太”成效与流域氮磷污染变化特征解析 [N]. *中国环境报*, 2020-07-09(004).
- [7] 水利部太湖流域管理局. 太湖健康状况报告(2018) [EB/OL]. (2019-12-05) [2022-11-12]. http://www.tba.gov.cn/slbthylgj/thjzkzkg/content/slth1_09f7d6b21629439f9891c7fd70ad49d8.html.
- [8] ZHOU Y Q, MA J R, ZHANG Y L, et al. Improving water quality in China: Environmental investment pays dividends [J]. *Water Research*, 2017, 118(1):152-159.
- [9] 翟淑华. 长江经济带发展中太湖流域治理实践分析 [J]. *长江技术经济*, 2020, 4(4):31-34.
- [10] LIU J G, VIÑA A, YANG W, et al. China's environment on a metacoupled planet [J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2018, 43(1):1-34.
- [11] 洪燕婷, 仇蕾. 太湖流域农业面源污染防治措施研究分析 [J]. *环境科技*, 2015, 28(3):17-21.
- [12] QIN B Q, ZHANG Y L, DENG J M, et al. Polluted lake restoration to promote sustainability in the Yangtze River Basin, China [J]. *National Science Review*, 2022, 9(1):207-218.
- [13] CARPENTER S R, CARACO N F, CORRELL D L, et al. Non-point pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen [J]. *Ecological Applications*, 1998, 8(3):559-568.
- [14] NING J C, GAO Z Q, LU Q S. Runoff simulation using a modified SWAT model with spatially continuous HRUs [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(7):5895-5905.
- [15] 杨善莲, 郑梦蕾, 刘纯宇, 等. 农业面源污染模型研究进展 [J]. *环境监测管理与技术*, 2020, 32(3):8-13.
- [16] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策: I. 21世纪初期中国农业面源污染的形势估计 [J]. *中国农业科学*, 2004, 37(7):1008-1017.
- [17] KAUSHAL S S, GROFFMAN P M, BAND L E, et al. Tracking nonpoint source nitrogen pollution in human-impacted watersheds [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(19):8225-8232.
- [18] 陈海涛, 王晓燕, 南哲, 等. 输入数据精度与准确性对 SWAT 模型模拟的影响 [J]. *中国环境科学*, 2021, 41(5):2151-2160.
- [19] 刘庄, 李维新, 张毅敏, 等. 太湖流域非点源污染负荷估算 [J]. *生态与农村环境学报*, 2010, 26(S1):45-48.
- [20] 贾更华, 戴晶晶, 吴亚男, 等. 新发展阶段太湖治理与保护关键问题探讨 [J]. *中国水利*, 2021(5):24-27.
- [21] YI Q T, CHEN Q W, HU L M, et al. Tracking nitrogen sources, transformation, and transport at a basin scale with complex plain river networks [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(10):5396-5403.
- [22] 闵炬, 纪荣婷, 王霞, 等. 太湖地区种植结构及农田氮磷流失负荷变化 [J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(8):1230-1238.
- [23] 罗小娟. 太湖流域环境友好型技术影响评价与政策模拟 [D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
- [24] 祝鹏, 祝飞. $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 在太湖污染源解析中的应用 [J]. *长江科学院院报*, 2016, 33(2):19-23.
- [25] 杨林章, 施卫明, 薛利红, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践: 总体思路与“4R”治理技术 [J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(1):1-8.
- [26] 杨林章, 冯彦房, 施卫明, 等. 我国农业面源污染治理技术研究进展 [J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(1):96-101.
- [27] 姜海, 杨杉杉, 冯淑怡, 等. 基于广义收益-成本分析的农村面源污染治理策略 [J]. *中国环境科学*, 2013, 33(4):762-767.
- [28] 吴丹洁, 詹圣泽, 李友华, 等. 中国特色海绵城市的新兴趋势与实践研究 [J]. *中国软科学*, 2016(1):79-97.
- [29] 廖朝轩, 高爱国, 黄恩浩. 国外雨水管理对我国海绵城市建设的启示 [J]. *水资源保护*, 2016, 32(1):42-45.
- [30] 张明睿, 郑俊, 徐力刚, 等. 城市小流域面源污染输出特征及污染负荷分类核算研究 [J]. *环境监测管理与技术*, 2021, 33(4):25-29.
- [31] 张毅敏, 张永春, 左玉辉. 前置库技术在太湖流域面源污染控制中的应用探讨 [J]. *环境污染与防治*, 2003, 25(6):342-344.
- [32] LI L F, LI Y H, BISWAS D K, et al. Potential of constructed wetlands in treating the eutrophic water: Evidence from Taihu Lake of China [J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(6):1656-1663.
- [33] JU X T, XING G X, CHEN X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems [J]. *PNAS*, 2009, 106(9):3041-3046.
- [34] 葛继红, 周曙东, 朱红根, 等. 农户采用环境友好型技术行为研究——以配方施肥技术为例 [J]. *农业技术经济*, 2010(9):57-63.
- [35] 俞双恩, 李德, 高世凯, 等. 水稻控制灌排模式的节水高产减排控污效果 [J]. *农业工程学报*, 2018, 34(7):128-136.
- [36] SOHNGEN B, KING K W, HOWARD G, et al. Nutrient prices and concentrations in Midwestern agricultural watersheds [J]. *Ecological Economics*, 2015, 112:141-149.
- [37] LIU J G, LI S X, OUYANG Z Y, et al. Ecological and socioeconomic effects of China's policies for ecosystem services [J]. *PNAS*, 2008, 105(28):9477-9482.
- [38] 尤珍, 吴亚男, 吴浩云. 太湖局 砥砺前行进治水路 共治联保谱华章 [J]. *中国水利*, 2021(13):80-85.
- [39] 祖国峰. 苏州推动环太湖区域环境污染协同治理对策研究 [J]. *环境保护与循环经济*, 2021, 41(6):67-71.
- [40] LIU J G. Integration across a meta coupled world [J]. *Ecology and Society*, 2017, 22(4):29.
- [41] LIU J G, HULL V, GODFRAY H C J, et al. Nexus approaches to global sustainable development [J]. *Nature Sustainability*, 2018, 1(9):466-476.