

太湖流域平原农业面源污染模拟与管控的思考

黄佳聪, 张京, 季雨来, 高俊峰

引用本文:

黄佳聪, 张京, 季雨来, 高俊峰. 太湖流域平原农业面源污染模拟与管控的思考[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(11): 2365–2370.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0545>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

“产业治污”模式削减丘陵区农业面源氮排放

刘广龙, 李涛, 薛利红, 樊丹, 戴志刚, 甘晓东, 张凯, 周宇翔, 胡荣桂

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 1963–1970 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0369>

英国农业面源污染防控对我国的启示

刘坤, 任天志, 吴文良, 孟凡乔, JessicaBellarby, LaurenceSmith

农业环境科学学报. 2016, 35(5): 817–823 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.05.001>

汉江流域农业面源污染的源解析

唐肖阳, 唐德善, 鲁佳慧, 常文倩, 唐新玥

农业环境科学学报. 2018, 37(10): 2242–2251 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1751>

分布式水土流失型面源污染模型初探

朱凯航, 陈磊, 王怡雯, 刘国王辰, 颜小曼, 郭晨茜, 张亮, 沈珍瑶

农业环境科学学报. 2022, 41(11): 2382–2394 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0676>

亚热带源头流域梯级池塘氮磷含量的时空变异及其影响因素

申雅莉, 周脚根, 彭佩钦, 吴金水

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2420–2428 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1257>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

黄佳聪, 张京, 季雨来, 等. 太湖流域平原农业面源污染模拟与管控的思考[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(11): 2365–2370.

HUANG J C, ZHANG J, JI Y L, et al. Thoughts on modelling and control of agricultural non-point source pollution in the lowland areas of Lake Taihu basin, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(11): 2365–2370.



开放科学 OSID

太湖流域平原农业面源污染模拟与管控的思考

黄佳聪¹, 张京¹, 季雨来^{1,2}, 高俊峰¹

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所中国科学院流域地理学重点实验室, 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:我国太湖流域平原河网区农业面源污染问题突出, 圩区是该区域广泛分布的人工集水单元, 也是农业面源污染管控的关键且独特地理单元, 具有农业面源污染拦截的优势, 但其作用长期以来被低估或忽略。在此背景下, 本文梳理了平原河网区农业面源氮磷污染的关键问题, 包括农田耕作与池塘养殖存在的面源污染问题, 以及污染溯源面临的挑战; 总结圩区系统水文与氮磷循环过程的独特性及其模型模拟的进展与难点, 探讨利用圩区这一特色单元提升平原河网区面源氮磷拦截能力的可能性; 从管控空间单元、精准治理技术、典型示范等角度, 提出圩区农业面源污染管控与研究的若干建议。

关键词: 氮; 磷; 圩区; 沟塘

中图分类号: X52 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2022)11-2365-06 doi:10.11654/jaes.2022-0545

Thoughts on modelling and control of agricultural non-point source pollution in the lowland areas of Lake Taihu basin, China

HUANG Jiacong¹, ZHANG Jing¹, JI Yulai^{1,2}, GAO Junfeng¹

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

Abstract: Polder is an artificial watershed unit widely distributed in the lowland area of Lake Taihu basin, with the severe problem of agricultural non-point source pollution. It is also a critical and unique geographical unit for agricultural non-point source pollution control, with great potential in reducing agricultural non-point source pollution. However, this potential has under-estimated or even neglected during the past decades. Therefore, this study identified the critical problems of non-point source pollution of nitrogen(N) and phosphorus(P) in lowland areas, including agricultural farmlands and aquaculture ponds, while elucidating the challenge of tracking N & P. The uniqueness of hydrological and N & P cycling in the polder ecosystem was summarized as along with the corresponding model descriptions. The potential of polders in enhancing N & P reduction capacity in lowland areas was also discussed. Furthermore, suggestions regarding the control and mechanism of agricultural non-point source pollution in polder areas were proposed from the perspectives of the control unit, precise treatment technology, and typical demonstration.

Keywords: nitrogen; phosphorus; polder; ditch and pond

收稿日期: 2022-05-29 录用日期: 2022-09-26

作者简介: 黄佳聪(1984—), 男, 福建漳州人, 博士, 研究员, 主要从事湖泊-流域氮磷输移与效应模拟研究。E-mail: jchuang@niglas.ac.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1700600); 国家自然科学基金项目(41971138); 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项(BK20220042); 中国科学院青年创新促进会项目(2019313); 江苏省水利科技项目(2020032, 2021036, 2022032)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China(2021YFD1700600); The National Natural Science Foundation of China(41971138); The Science and Technology Innovation Program of Carbon-Emission-Peak and Carbon-Neutrality in Jiangsu, China(BK20220042); Youth Innovation Promotion Association CAS(2019313); Water Resources Science and Technology Program of Jiangsu, China(2020032, 2021036, 2022032)

随着工业废水等点源污染逐步得到控制,农业面源污染已成为我国河湖污染的重要来源,管理部门对农业面源污染的重视程度与治理力度是前所未有的^[1]。而在我国长江中下游的太湖流域平原河网区,农业面源污染管控与治理长期面临独特难题,即复杂水文条件导致污染来源不清,重点管控对象不明确,缺乏理想管控空间单元,因此有必要针对太湖流域平原河网区,剖析区域的独特水文与氮磷迁移转化规律,探索有利于农业面源污染管控的空间单元,因地制宜地发展农业面源污染管控的新途径、新方法,形成易复制、可推广的农业面源污染管控模式^[2-3]。

1 平原河网区农业面源氮磷污染问题

太湖流域平原河网区人类活动强度大,农业发达,化肥农药与鱼虾饵料等农业投入品的过量使用,导致农业面源污染问题突出。其中农田耕作与坑塘养殖尾水排放规模大,并且以小散农户经营为主,空间分布分散,尾水排放时间不定,导致农业面源污染的责任主体不明,管控难度大,制约了区域水环境质量的根本性好转。

(1)农田耕作氮磷流失严重。2020年太湖流域耕地面积高达16 278.9 km²,占流域面积的44.1%^[4],主要农作物为水稻、小麦及少量经济作物(油菜),其中稻麦轮作农田的氮、磷施用量高达33.3、14.6 kg·hm⁻²·a⁻¹^[5],但氮磷肥利用率较低(28%~41%)^[6-7],剩余氮磷则储存或排放到水土气环境中,进而通过降雨淋溶、下渗等途径汇入周边河湖。同时,长期过量氮磷施用造成了农田土壤氮磷遗留量不断累积,成为周边河湖氮磷污染的重要来源^[8]。

(2)池塘养殖污染问题突出。太湖流域养殖池塘总面积高达1 308.6 km²,养殖密度大、饲料肥料投入量大,养殖期间换水与淤泥清理是农业面源污染的重要来源,尤其是太湖东部与南部(苏州、湖州)和洮滬水系(常州)是池塘养殖的密集地区。根据现场调研与模型核算,太湖流域养殖池塘类型主要包括鱼塘与虾蟹塘,氮、磷流失总量分别高达11 014、1 627 t·a⁻¹^[9],其中鱼塘氮、磷污染负荷分别高达115.5、16.5 kg·hm⁻²·a⁻¹,远高于虾蟹塘(21.4、4.4 kg·hm⁻²·a⁻¹)^[10]。为防控池塘养殖污染,国内学者发展了机械过滤、微生物净化、人工湿地拦截等养殖尾水净化与循环利用技术,但受限于成本、场地而尚难以在太湖流域大规模推广应用^[11-12]。

(3)面源污染来源与贡献比例不清。太湖流域平

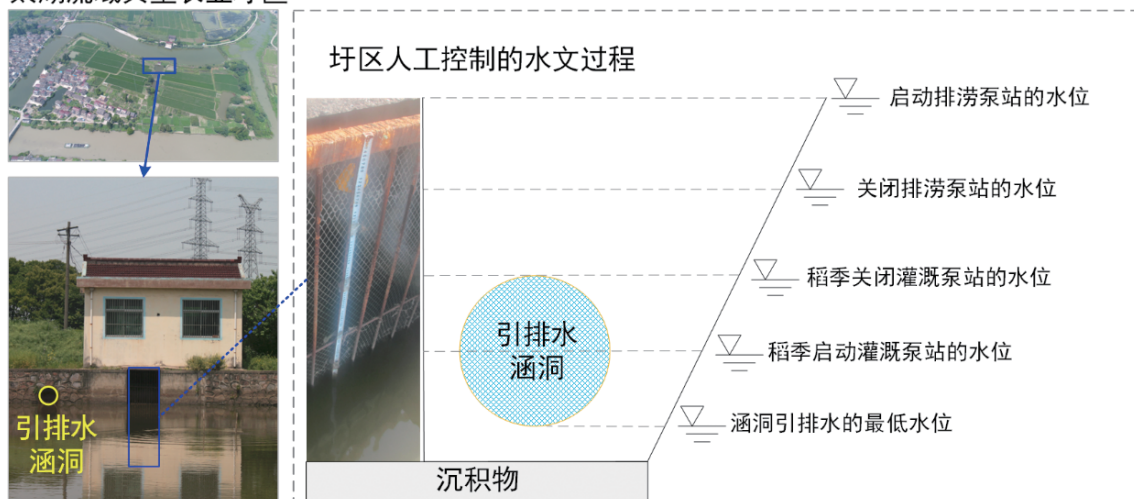
原河网区农业面源污染类型多样(种植业与养殖业等)、空间分布范围广、产生具有一定随机性,导致面源污染来源十分复杂;与此同时,河网沟塘交错复杂,地势平坦,水流缓慢,往复流现象明显,地表水、地下水、土壤水之间存在频繁的相互补给,农田、池塘、生活污水等不同类型污染源排放并汇合于周边河网、沟渠与坑塘,造成面源污染迁移转化途径错综复杂。面源污染来源多样、排放随机与迁移转化复杂导致监测与追踪难度大,污染来源与贡献比例难以精准解析,治理重点对象与目标无法明确。

2 平原圩区系统独特性及其对农业面源污染模拟与管控的启示

圩区是流域下游平原易涝区筑堤围垦形成的相对封闭的人工集水单元,即平原河网区的破碎化流域,其广泛分布于长江、湄公河、莱茵河、多瑙河、密西西比河等全球大江大河的沿江滨海地区,其中太湖流域平原河网区分布尤为广泛(2 539个,10 627 km²)^[13-14],占平原区面积的近60%(附图1,扫描文章首页OSID码浏览),主要包括城市圩、城镇圩、农业圩等类型,氮、磷流失总量分别高达16 296^[13]、1 916 t·a⁻¹^[15]。其中平原农村地区圩区基本以农业圩形式存在,其是农田耕作与池塘养殖等农业活动的密集区,是平原河网区农业面源污染管控的关键地理单元^[16]。与此同时,圩区水文与氮磷循环过程受自然条件和人工控制的双重影响,具有与山丘区不同的农业面源污染产排过程,是平原河网区农业面源污染管控的独特地理单元,制约了国际自然地理学关于平原区水文与氮磷循环的研究^[16-17]。

(1)圩区具有独特的水文与氮磷输移过程。与自然集水单元(山丘区)相比,圩区相对封闭,具有独特的水文与氮磷输移过程,体现在:①氮磷输移过程的不连续性。圩区水文过程被堤坝和泵站所分割,其氮磷输移受自然条件和人工闸泵(灌溉抽水、洪涝排水、涵洞引排水)的双重影响,形成“陡涨陡降”的氮磷输移过程;稻季期间,通过泵站抽水/涵洞引水满足稻田灌溉需求,是圩外河流氮磷输入的重要途径,圩内河流、沟渠、坑塘的水文也有不同程度上升,人为改变了氮磷输移过程;麦季期间,圩内农田需水较少,圩区降雨径流可通过涵洞外排;强降雨期间,外围河流水位普遍高于圩内地面高程,圩内积水无法通过涵洞自流外排,排涝泵站排水成为圩区氮磷外排的重要途径(图1)^[17-19]。②氮磷输移路径的不确定性。圩区地势

太湖流域典型农业圩区

图1 太湖流域典型农业圩区及其人工控制水文过程^[19]Figure 1 Typical agricultural polders at Lake Taihu basin and their artificially controlled hydrological processes^[19]

平坦、地下水埋深较浅,在灌溉抽水、洪涝排水、涵洞引排水等人工控制水文过程的作用下,沟塘地表水、地下水、土壤水之间存在频繁的水体交换,这是圩区氮磷输移的重要路径,因此与自然集水单元不同,圩区氮磷输移路径主要受上述3个水位变化驱动,存在显著的动态变化特征^[18]。

(2)圩区水文与氮磷输移过程模拟方法有待改进。现有的SWAT、HSPF等流域模型适用于山丘区,但无法模拟平原圩区的独特水文与氮磷输移过程。在此背景下,国内学者主要通过以下两种途径实现圩区水文与氮磷输移过程的模拟:一种是直接采用与改进现有流域模型,提升模型对圩区水文与氮磷流失模拟的适用性与精度,但受限于现有模型模拟框架的可拓展性,尚难以充分刻画圩区的独特水文与氮磷输移规律^[20-22]。另一种途径是自主研发适用于圩区系统的水文与氮磷输移过程模型,其中中国科学院南京地理与湖泊研究所选择太湖流域典型农业圩区(常州尖圩),开展了连续10 a(2013—2022年)的气象、水文与面源氮磷流失过程监测与控制实验,构建了一套水位驱动的圩区污染物输移模式,研发了具有自主知识产权的圩区水文与面源氮磷污染模型(NDP、PDP)(图2)^[18-19];量化核算了太湖流域所有圩区氮磷污染负荷的空间分布与季节变化,解析了氮磷的来源组成与迁移转化的关键路径,明确了全流域圩区氮磷流失总量(氮 $19\,965\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 、磷 $1\,916\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$)及其对太湖外源污染负荷的贡献^[13,15];通过模拟情景的设计与模拟,识别了农业圩区氮磷污染的主控因子及其时空变化规律,

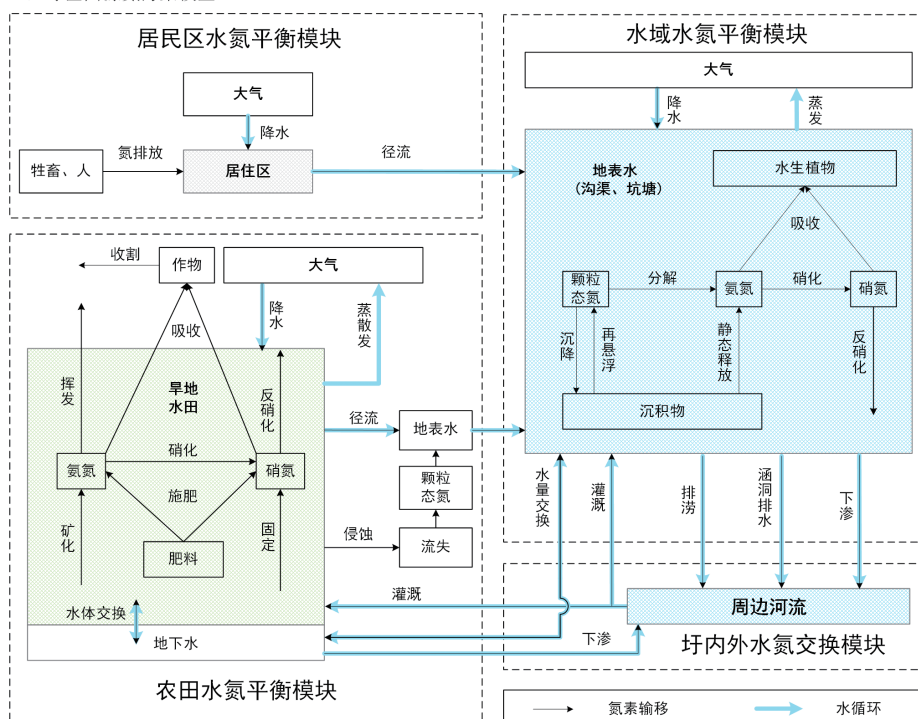
发现了沟塘水生植物群落与盖度是氮磷拦截的关键要素,提出了以圩内沟塘等小微湿地为核心的面源氮磷削减模式,预测了不同削减模式的氮磷污染管控效果,优选出最佳的氮磷削减模式^[23-24]。但上述模型与案例研究重点关注的是圩区水文驱动下的氮磷输移过程,但对土壤水文与氮磷生物地球化学循环等缺乏三维立体的精细化刻画。

(3)圩区具有农业面源污染管控的优势。圩区内部广泛分布的用于输水与储水的沟塘(沟渠与坑塘)已被广泛证明具有显著的氮磷拦截效应。全国31个沟塘氮磷拦截方面的研究案例显示,沟塘氮、磷拦截率均值分别高达47.9%与45.1%^[26-29](附表1,扫描文章首页OSID码浏览),氮磷拦截率较高的点位主要分布在长江中下游平原河网区(图3),其中圩区沟塘的氮磷拦截效应更加明显,主要原因包括:①圩区沟塘向外围河流排水集中于强降雨期间,在中小雨期间,圩内农业尾水排放后滞留于圩内沟塘,不直接排放到圩外河流,有利于氮磷拦截^[24]。②圩区地势平坦,沟塘水流缓慢,有利于颗粒态氮磷自然沉降;同时,沟塘中广泛分布的大型水生植物可吸收水体氮磷,提供碳源,促进反硝化,提升氮磷拦截能力^[23,30]。

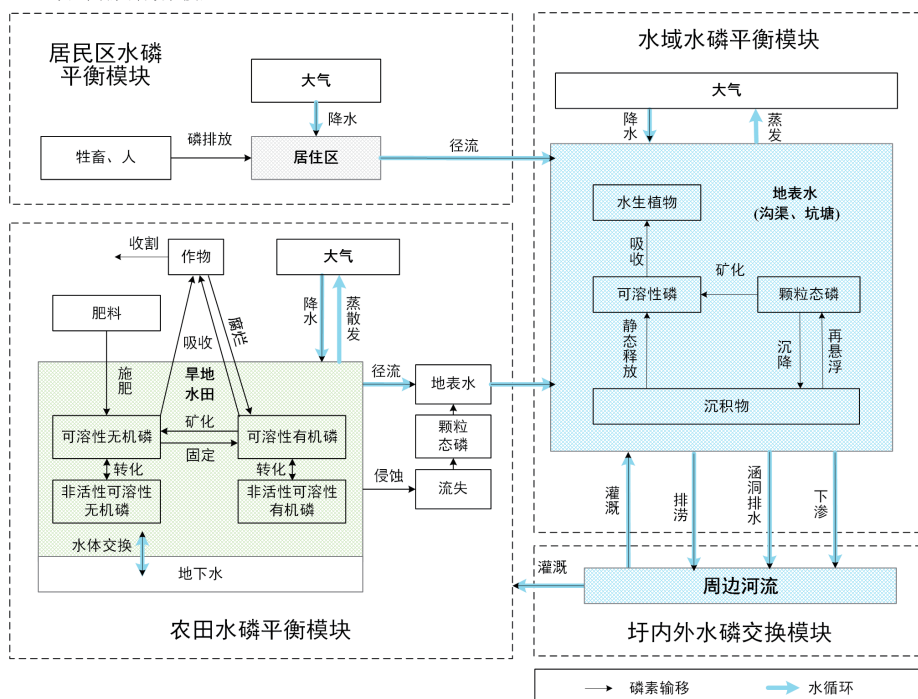
3 平原圩区农业面源污染管控与研究建议

过去几十年,我国圩区管理与利用侧重发挥其防洪与灌溉功能^[14,21];而圩区具有空间边界清晰、水量可调控、沟塘广泛分布等适合农业面源污染管控的优势,因此有必要据此优势,探索农业面源污染最大化

(a) 圩区面源氮污染模型



(b) 圩区面源磷污染模型

图2 圩区面源氮、磷污染模型^[18,25]Figure 2 Non-point source pollution model for nitrogen and phosphorus in lowland polders^[18,25]

拦截的管控措施,充分发挥圩区这一具有历史智慧、文化价值的古老水土资源管理模式。

(1)以圩区为基本单元,管控农业面源污染。现

有农业面源污染管控主要以行政区为基本单元,无法科学诊断其产生根源与输移规律;而圩区是几千年形成的、完全人工控制的物理单元,具有清晰边界与水

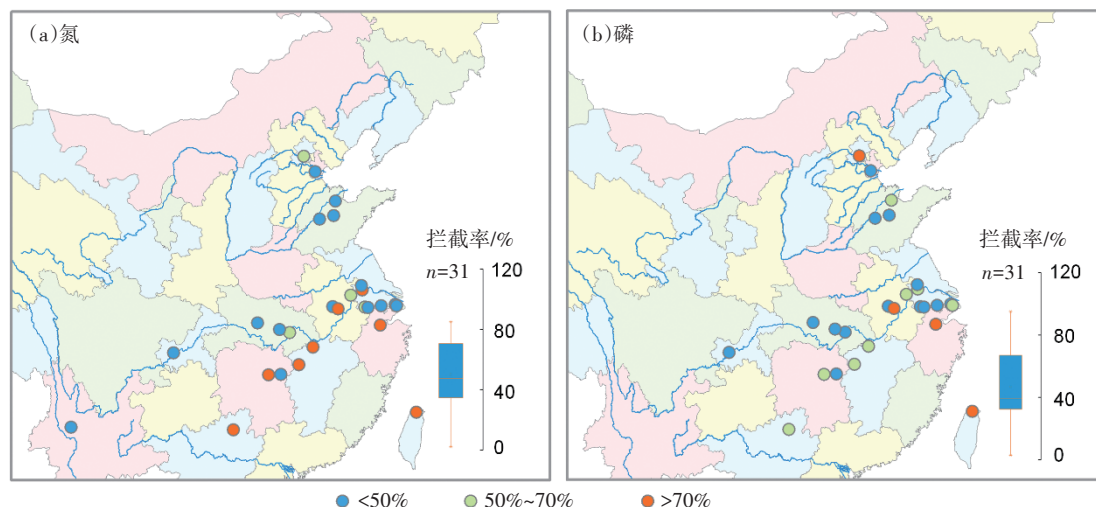


图3 我国沟塘氮、磷拦截率(文献调研方法获取)

Figure 3 Retention rate of nitrogen and phosphorus at ditches and ponds in China (obtained from previous publications)

量人工调控的独特性,有利于水量与污染物来源与转移过程的追踪,可作为农业面源污染控制的理想单元。建议从圩区系统的整体角度出发,分类型梳理圩区面源污染在源头排放-沟渠输送-坑塘截留等环节的特征,优化整合农田、沟渠、坑塘等单元面源污染的针对性治理技术,形成专项技术组合的最大合力,实现面源污染拦截“1+1>2”的叠加效应,突破太湖流域平原区农业面源污染管控的创新模式。

(2)研发圩区农业面源污染精准治理的关键技术。以圩区为农业面源污染的基本管控单元,综合运用数值模型与同位素等污染溯源技术,精准解析农业面源污染的关键源区及其贡献比例,模拟面源污染的沿程消纳过程,辨别导致农业面源污染的主控因子及其季节变化;针对圩区水文的闸泵人工控制、水体滞留时间长等特点,探索圩区水体与氮磷的减排控排模式,形成农业面源污染的相关管控方案,预测不同组合方案作用下的农业面源污染强度,整合形成一套具备污染溯源、主控因子辨识、管控方案优选功能的精准治理技术,实现圩区农业面源污染的“科学诊断”与“对症下药”,综合解决圩区的防洪灌溉和农业面源污染问题。

(3)开展圩区农业面源污染治理的典型示范。近几十年来,太湖流域农业面源污染备受重视,我国学者针对圩区或圩内地块,围绕面源氮磷污染问题,开展了系列跟踪监测与野外实验,积累了长期的历史观测数据,发展了稻田、沟渠、坑塘等单元面源污染减排与拦截的专项技术,从不同空间尺度,研发了适用于太湖流域的面源污染模型,预测了不同管控方案作用

下的农业面源污染改善效果。依托上述长期观测、模型模拟与机制分析等研究基础,可选择太湖流域典型农业圩区,开展面源污染治理技术的示范应用,跟踪评估典型示范区的水质改善效果,打造平原河网区农业面源污染的治理样板。

参考文献:

- [1] 邱捷, 余冬立, 夏永秋. 国家尺度种植业面源污染负荷估算方法研究[J]. 农业现代化研究, 2021, 42(2): 198-205. QIU J, SHE D L, XIA Y Q. Research on estimation method of national non-point source pollution loading from planting system[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2021, 42(2): 198-205.
- [2] 农业面源污染治理与监督指导实施方案(试行)[J]. 资源节约与环保, 2021(4): 8-9. Implementation plan of agricultural non-point source pollution control, supervision and guidance (Trial)[J]. *Resources Economization & Environmental*, 2021(4): 8-9.
- [3] XIA Y Q, YAN X Y. How variations in constructed wetlands geography affect nutrient discharge[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2020, 125(2): e2019JG005610.
- [4] 禹康康, 王延华, 孙恬, 等. 太湖流域土地利用碳排放变化及其预测[J]. 土壤, 2022, 54(2): 406-414. YU K K, WANG Y H, SUN T, et al. Changes and prediction of carbon emission from different land use types in Taihu Lake basin[J]. *Soils*, 2022, 54(2): 406-414.
- [5] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259-273. ZHU Z L, JIN J Y. Fertilizer use and food security in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(2): 259-273.
- [6] 于飞, 施卫明. 近10年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1311-1324. YU F, SHI W M. Nitrogen use efficiencies of major grain crops in China in recent 10 years[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(6): 1311-1324.
- [7] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与

- 提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924. ZHANG F S, WANG J Q, ZHANG W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915-924.
- [8] 姚梦雅, 胡敏鹏, 陈丁江. 1980—2015年长江流域净人为氮输入与河流氮输出动态特征[J]. 环境科学, 2021, 42(12): 5777-5785. YAO M Y, HU M P, CHEN D J. Dynamic of net anthropogenic nitrogen inputs and riverine nitrogen export in the Yangtze River basin in 1980—2015[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(12): 5777-5785.
- [9] WANG J J, BEUSEN A H, LIU X C, et al. Aquaculture production is a large, spatially concentrated source of nutrients in Chinese freshwater and coastal seas[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 54(3): 1464-1474.
- [10] 徐责茗, 崔楨, 高俊峰, 等. 太湖流域养殖池塘的氮磷污染负荷估算[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(1): 148-155. XU Z M, CUI Z, GAO J F, et al. Quantifying nitrogen and phosphorus loading from aquaculture ponds in Lake Taihu basin[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(1): 148-155.
- [11] 李倩, 胡廷尖, 王雨辰, 等. 淡水养殖尾水处理研究现状及进展[J]. 中国水产, 2011(7): 43-45. LI Q, HU T J, WANG Y C, et al. Research status and progress of freshwater aquaculture tail water treatment[J]. *China Fisheries*, 2011(7): 43-45.
- [12] 周新伟, 沈明星, 金梅娟, 等. 多级串联表面流人工湿地对河蟹养殖尾水的净化效果研究[J]. 湿地科学, 2017, 15(6): 774-780. ZHOU X W, SHEN M X, JIN M J, et al. Purification effect on aquaculture wastewater by multi-series surface flow constructed wetland[J]. *Wetland Science*, 2017, 15(6): 774-780.
- [13] HUANG J C, CUI Z, TIAN F, et al. Modeling nitrogen export from 2539 lowland artificial watersheds in Lake Taihu basin, China: Insights from process-based modeling[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 581: 124428.
- [14] 高俊峰, 毛锐. 太湖平原圩区分类及圩区洪涝分析——以湖西区为例[J]. 湖泊科学, 1993, 5(4): 307-315. GAO J F, MAO R. Classification of polders and analysis of flood-waterlogging in Taihu Lake basin: The case of west Taihu Lake[J]. *Journal of Lake Science*, 1993, 5(4): 307-315.
- [15] HUANG J C, GAO J F, JIANG Y, et al. Sources, distribution and export coefficient of phosphorus in lowland polders of Lake Taihu basin, China[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 231: 1274-1283.
- [16] 王鹏, 徐爱兰. 太湖流域典型圩区农田氮素地表径流迁移特征[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1335-1339. WANG P, XU A L. Nitrogen losses with surface runoff from farm lands in polder area around Taihu basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4): 1335-1339.
- [17] 黄佳聪, 高俊峰. 平原圩区磷素流失过程模拟[J]. 湖泊科学, 2015, 27(2): 216-226. HUANG J C, GAO J F. Phosphorus loss simulation of lowland polder system[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, 27(2): 216-226.
- [18] HUANG J C, ARHONDITSIS G B, GAO J F, et al. Towards the development of a modeling framework to track nitrogen export from lowland artificial watersheds (polders) [J]. *Water Research*, 2018, 133: 319-337.
- [19] HUANG J C, GAO J F, YAN R H. A phosphorus dynamic model for lowland polder systems (PDP)[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 88: 242-255.
- [20] 曾远, 张永春, 张龙江, 等. GIS支持下AGNPS模型在太湖流域典型圩区的应用[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(3): 761-765. ZENG Y, ZHANG Y C, ZHANG L J, et al. Application of GIS-based AGNPS model in the typical drainage area of Taihu Lake watershed [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(3): 761-765.
- [21] 罗运祥, 苏保林, 张倩, 等. 基于SWAT的平原圩区受控水文过程识别和模拟[J]. 资源科学, 2013, 35(3): 594-600. LUO Y X, SU B L, ZHANG Q, et al. Identifying and modeling confined hydrological processes in plain polders[J]. *Resources Science*, 2013, 35(3): 594-600.
- [22] LAI Z Q, LI S, DENG Y, et al. Development of a polder module in the SWAT model: SWATpld for simulating polder areas in south-eastern China[J]. *Hydrological Processes*, 2018, 32(8): 1050-1062.
- [23] CUI Z, HUANG J C, GAO J F, et al. Characterizing the impacts of macrophyte-dominated ponds on nitrogen sources and sinks by coupling multiscale models[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 811: 152208.
- [24] HUANG J C, CHEN Q W, PENG J, et al. Quantifying the cost-effectiveness of nutrient-removal strategies for a lowland rural watershed: Insights from process-based modeling[J]. *Ecological Modelling*, 2020, 431: 109123.
- [25] HUANG J C, GAO J F, YAN R H. How can we reduce phosphorus export from lowland polders? Implications from a sensitivity analysis of a coupled model[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 562: 946-952.
- [26] 牟军, 崔远来, 赵树君, 等. 塘堰湿地对农田排水氮磷净化效果的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(8): 27-31. MOU J, CUI Y L, ZHAO S J, et al. Effects of pond wetland on removing TN & TP from farmland drainage[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34(8): 27-31.
- [27] 王晓玲, 李建生, 李松敏, 等. 生态塘对稻田降雨径流中氮磷的拦截效应研究[J]. 水利学报, 2017, 48(3): 291-298. WANG X L, LI J S, LI S M, et al. Study on the interception effects of ecological pond on nitrogen and phosphorus in the rainfall runoff of rice field[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(3): 291-298.
- [28] LI S S, LIU H B, ZHANG L, et al. Potential nutrient removal function of naturally existed ditches and ponds in paddy regions: Prospect of enhancing water quality by irrigation and drainage management[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 718: 137418.
- [29] FENG J F, LI F B, ZHOU X Y, et al. Nutrient removal ability and economical benefit of a rice-fish co-culture system in aquaculture pond [J]. *Ecological Engineering*, 2016, 94: 315-319.
- [30] SUN C, CHEN L, LIU H B, et al. New modeling framework for describing the pollutant transport and removal of ditch-pond system in an agricultural catchment[J]. *Water Resources Research*, 2021: e2021WR031077.

(责任编辑:李丹)