

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.06.014

王晓杰, 张京, 高俊峰, 等. 太湖上游圩区氮磷管理的减污效益分析. 土壤, 2023, 55(6): 1272–1278.

## 太湖上游圩区氮磷管理的减污效益分析<sup>①</sup>

王晓杰<sup>1</sup>, 张京<sup>2,3</sup>, 高俊峰<sup>2\*</sup>, 洪昕<sup>4</sup>, 黄佳聪<sup>2</sup>, 李骏<sup>1</sup>

(1 江苏省水文水资源勘测局常州分局, 江苏常州 213022; 2 中国科学院流域地理学重点实验室(中国科学院南京地理与湖泊研究所), 南京 210008; 3 中国科学院大学, 北京 100049; 4 常州市河道湖泊管理处, 江苏常州 213016)

**摘要:** 本研究以太湖上游平原圩区为研究对象, 采用氮动态模型(Nitrogen dynamic model for lowland polder systems, NDP)和磷动态模型(Phosphorus dynamic model for lowland polder systems, PDP)模拟圩区氮磷流失的动态过程, 并基于圩区氮磷流失机制进行管理情景定量模拟与氮磷减污效益分析。结果表明: ①圩区氮磷的年平均流失强度分别为 40 和 1.75 kg/(hm<sup>2</sup>·a), 高于太湖流域的平均氮磷流失水平; ②当圩区外部水质控制为IV类时, 氮磷流失强度分别为 37.54 和 1.58 kg/(hm<sup>2</sup>·a), 圩区截流氮磷量分别增加 4.9% 和 9.9%, 高氮磷流失级别的圩区数量分别减少 26.2% 和 63.8%; ③如将圩区内 5% 的水田转化为水体, 氮磷流失强度分别为 36.73 和 1.72 kg/(hm<sup>2</sup>·a), 圩区截流氮磷量分别增加 6.6% 和 1.7%, 高氮磷流失级别的圩区数量分别减少 46.2% 和 22.5%; ④圩区氮磷的流失机制具有明显不同, 圩外水质目标对于圩内磷的流失影响较大, 圩内的水体和坑塘等对于氮滞留和净化更加有优势。

**关键词:** 平原圩区; 太湖流域上游; 氮磷流失; 管控策略

中图分类号: S714 文献标志码: A

## Pollution Reduction Benefit Analysis of Nitrogen and Phosphorus Management in Polders in Upper Reaches of Taihu Lake

WANG Xiaojie<sup>1</sup>, ZHANG Jing<sup>2,3</sup>, GAO Junfeng<sup>2\*</sup>, HONG Xin<sup>4</sup>, HUANG Jiacong<sup>2</sup>, LI Jun<sup>1</sup>

(1 Changzhou Substation of Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Changzhou, Jiangsu 213022, China; 2 Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4 Changzhou River and Lake Management Office, Changzhou, Jiangsu 213016, China)

**Abstract:** In this study, the polders in the upper reaches of Taihu Lake were taken as the study area, and the dynamic process of N and P loss in polders were simulated using Nitrogen Dynamic model for lowland Polder systems (NDP) and Phosphorus Dynamic model for lowland Polder systems (PDP). Based on the mechanism of N and P loss in polders, the management scenarios were quantitatively simulated and the benefits of N and P pollution reduction were analyzed. The results showed that: 1)The annual average loss intensities of N and P in the polders were 40 and 1.75 kg/(hm<sup>2</sup>·a), respectively, which were higher than the average loss level of Taihu Lake Basin; 2)When the water quality in the external rivers of polders was controlled as Grade IV, the loss intensities of N and P were 37.54 and 1.58 kg/(hm<sup>2</sup>·a) respectively, the amount of N and P intercepted in the polder increased by 4.9% and 9.9% respectively, and the number of polders with strong loss level decreased by 26.2% and 63.8% respectively; 3)If 5% of paddy fields in polders were converted into water bodies, the loss intensities of N and P were 36.73 and 1.72 kg/(hm<sup>2</sup>·a) respectively, the amount of N and P intercepted in polders increased by 6.6% and 1.7% respectively, and the number of polders with strong loss level decreased by 46.2% and 22.5% respectively; 4)The loss mechanisms of N and P in the polders were obviously different. The water quality in the external rivers of polders had a strong influence on the loss of P in the polders, and the water bodies and ponds in the polders had a greater advantage for N retention and purification.

**Key words:** Lowland polders; Upper reaches of Taihu Basin; Nitrogen and phosphorus loss; Control strategy

①基金项目: 江苏省水利科技项目(2022032, 2021036)资助。

\* 通讯作者(gaojunf@niglas.ac.cn)

作者简介: 王晓杰(1974—), 女, 江西临川人, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为水文水资源分析、土壤及水环境监测评价、河湖生态状况评价。E-mail: 397554813@qq.com

人类活动造成的氮磷营养物进入湖泊、水库和河流,导致的富营养化在全球淡水生态系统中呈现上升的趋势,引起一系列水环境问题包括地表与地下受纳水体恶化、河湖氮磷富营养化等,已成为全球水环境面临的共同挑战<sup>[1-3]</sup>。对全水体调查发现,受氮磷污染影响,63.1%的水体和30.5%的表面积富营养化<sup>[4]</sup>。在中国,近50%的湖泊和水库部分时间甚至长期无法达到饮用水标准<sup>[5]</sup>。太湖流域作为中国经济最发达的地区,在过去经历了多次氮磷污染导致的富营养化和蓝藻水华问题<sup>[6-8]</sup>。

圩区是太湖流域平原区主要的地理单元<sup>[9-10]</sup>,也是氮磷管控的重要单元,主要通过灌溉抽水、涵洞引排水、排涝排水与下渗同周围河道建立径流与氮磷的交换。复杂的汇水过程给平原区氮磷量化与过程解析带来极大阻碍,其精准治理对流域氮磷污染管理措施抉择起着决定性作用<sup>[10]</sup>。在太湖流域,上游入湖区尤其以湖西区为代表,每年向太湖流域贡献负荷比例高达60%的总氮和总磷<sup>[10-11]</sup>。圩区作为上游平原区的重要组成部分,具有与山丘区不同的氮磷产排过程。以往的研究中山丘区流域已经得到较好的量化与氮磷动态解析,但是平原河网区域氮磷污染负荷未能精准核算,制约了氮磷的有效管理<sup>[11-12]</sup>。因此,太湖流域上游圩区的氮磷管控直接关乎整个太湖流域的水质改善。

已有研究证明水体与坑塘对氮磷有显著的拦截作用<sup>[13-14]</sup>,考虑到圩区氮磷的来源机制,本研究制定了两种圩区氮磷管控方案:一种是将圩区内5%的水田转化为水体;另一种控制圩外河道水体为IV类水质。选取太湖上游典型入湖区域圩区为研究对象,采用专为圩区开发的圩区氮磷动态模型(NDP, Nitrogen dynamic model for lowland polder systems; PDP, Phosphorus dynamic model for lowland polder systems)<sup>[15-16]</sup>来模拟圩区的氮磷流动态过程,并针对圩区的氮磷流失特征进行管理情景模拟与氮磷减污效益分析,包括水田向坑塘的转化以及圩外河道水质优化。本研究量化了圩区氮磷流失,解析了氮磷污染的时空分布特征,探究了不同管理措施氮磷减污效益,为圩区水污染治理提供关键技术支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

本研究以太湖平原上游典型圩区为研究对象(图1)。该圩区主要位于湖西区,面积613 km<sup>2</sup>,占平原区面积的62%,其中水田、池塘、建设用地、旱地各占58.0%、17.0%、13.5%和11.5%。流域多年平均气温为16.1℃,多年平均降水量为1139.9 mm。由于人口密度大,农业密集,使得区域每年的氮磷流失问题严峻,圩区氮磷的合理管控直接关乎整个太湖流域的水质改善。

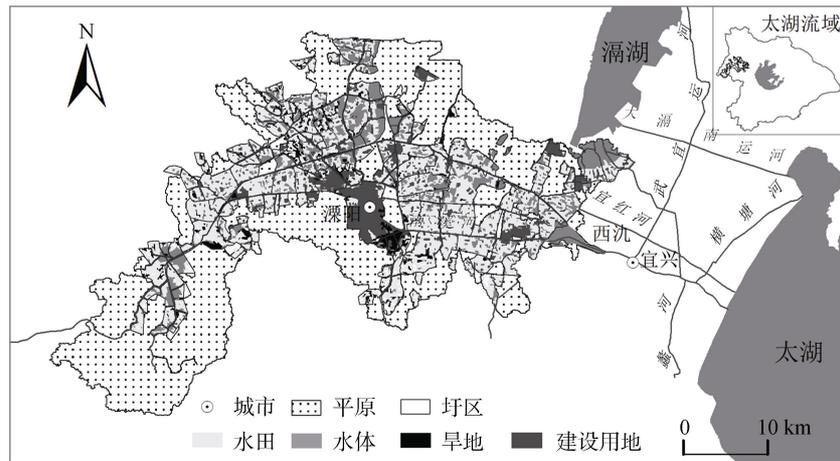


图 1 太湖上游典型圩区及其土地利用分布图

Fig. 1 Location and land use types of topical polders in upper reaches of Taihu Lake

### 1.2 数据来源

研究数据包括2020年的气象数据、土地利用数据和水质数据(表1)。日尺度的气象数据来源于实测站点数据,包括降水量(mm)、气温(℃,最高、最低

和平均)、平均湿度(%)、平均风速(m/s)、日照时数(h)等。土地利用数据来源于地理空间数据云30 m分辨率的地面类型数据。水质数据为圩区外部河道监测断面逐月氮磷浓度监测数据。

表 1 NDP 和 PDP 模型输入数据  
Table 1 Required data for NDP and PDP models

数据类型	指标	年份	分辨率	来源
土地利用	土地利用类型	2020	30 m	地理空间数据云 <a href="https://www.gscloud.cn/">https://www.gscloud.cn/</a>
气象数据	降水 (mm), 平均湿度 (%), 日最高、最低、平均气温 (°C), 日照时数 (h), 平均风速 (m/s)	2020	day	中国气象数据网 <a href="http://data.cma.cn/">http://data.cma.cn/</a>
水质数据	总氮、总磷浓度 (mg/L)	2020	mon	监测数据

### 1.3 圩区氮磷动态模型

圩区模型采用的是磷动态模型(PDP)和氮动态模型(NDP)(图 2)。PDP 和 NDP 模型刻画了圩区生态系统中水和养分循环的关键过程,以及圩区与其周围河道之间的径流与营养物的交换过程。该模型更适合描述圩区的养分动态,其优点是:①模型描述了灌溉、洪水和涵洞排水等几种人工排水过程,这些过程显著地影响了圩区与周围河流之间的水和养分交换;②模型计算了土壤水、地表水和地下水之间的水分交换,水交换过程对圩区内氮、磷的生物地球化学循环有显著影响。已有研究应用 PDP 和 NDP 模型在研究区的圩区(尖圩)进行氮磷的模拟与校准,其性能是可接受的,相应的决定系数( $R^2$ )值分别为 0.55 和 0.59<sup>[15-16]</sup>。由于尖圩是研究区内典型的农业圩,与区域内多数圩区性质相似,因此,将尖圩的水文、水质率定后的参数用于研究区的所有圩区的参数设置。

通过收集气象、土地利用和水质数据作为输入数据构建 PDP 和 NDP 模型来模拟圩区氮磷的动态变化,解析氮磷流失的时空分布特征。通过设置与模拟不同氮磷削减措施,包括水田向水体的转化以及圩外河道水质优化,进行减污效益分析,确定圩区的氮磷削减设置方向。

## 2 结果

### 2.1 圩区氮磷流失的时间特征

分析圩区 2020 年氮磷流失强度变化(图 3),可知氮磷流失强度在时间上受季节影响显著,雨季流失强度大。这是由于在降雨期间,圩区内水域能够接纳雨水中的大量氮磷。在雨季(6—10 月份),氮磷的流失量分别占年总流失量的 65.6% 和 57.6%。圩区氮磷的输移主要包括涵洞引排水、洪涝排水、灌溉抽水和下渗 4 个过程,氮磷排放的计算方式则为:涵洞引水+洪涝排水+下渗-灌溉抽水。2020 年春夏秋冬四季氮、磷月平均流失强度分别为 1.55、0.16、6.61、2.07

kg/hm<sup>2</sup> 和 0.09、0.02、0.22 和 0.11 kg/hm<sup>2</sup>。6—8 月是氮磷流失的高强度期,一方面此时期处于农业施肥的集中期;另一方面,强降水增加圩区氮磷的冲刷与淋溶,使得圩区内的氮磷流失强度增加。而在夏季稻田期,水田需水量大,需要从圩区外河道抽取大量水进行灌溉。圩区外河道氮磷浓度较高,圩区通过灌溉吸收了外界大量氮磷,而灌溉抽水过程输送的氮磷作为圩区氮磷输移核算中的被减项,因此,每年的灌溉抽水季(5 月)氮磷流失会出现一次大幅度低值,甚至流失强度为负值。

### 2.2 圩区氮磷流失的空间特征

研究期间,圩区的氮磷流失强度较大。总氮和总磷多年平均流失量强度分别为 40 和 1.75 kg/(hm<sup>2</sup>·a),总氮的流失强度远高于太湖流域的平均流失水平(15.33 kg/(hm<sup>2</sup>·a)),磷与流域平均水平持平(1.75 kg/(hm<sup>2</sup>·a))。根据图 4 可以看出高氮磷流失的圩区整体在区域内呈现不规则的零星分布,中部相对集中。区域内的氮磷流失强度高于 40 和 1.75 kg/(hm<sup>2</sup>·a) 的圩区数量占总数量的比例高达 50%,氮磷流失整体处于较高的水平。其中,中部地区作为氮磷流失高强度集中区,人口集中,农业强度大,农业圩田的比例高达 82%。该区域中,水稻和小麦轮作氮磷肥施用量高达 33.3 和 14.6 kg/(hm<sup>2</sup>·a)<sup>[11]</sup>。另外,中部地区养殖塘的氮磷流失强度较高,其中,鱼塘氮磷流失强度为 115.5 和 16.5 kg/(hm<sup>2</sup>·a),虾蟹塘氮磷流失强度为 21.4 和 4.4 kg/(hm<sup>2</sup>·a)<sup>[11]</sup>。因此,中部区域有较高的氮磷流失强度,也是氮磷管控的重点区域。

### 2.3 圩区氮磷管理的削减效应

**2.3.1 流失强度对比** 当圩区外部水质控制为 IV 类水时,氮磷流失强度分别为 37.54 和 1.58 kg/(hm<sup>2</sup>·a),年流失量分别削减了 4.9% 和 9.9%(图 5);将圩区内 5% 的水田转化为水体后,氮磷流失强度分别为 36.73 和 1.72 kg/(hm<sup>2</sup>·a),年流失量分别削减了 6.6% 和 1.7%。由此可以得知:圩外水质对于圩

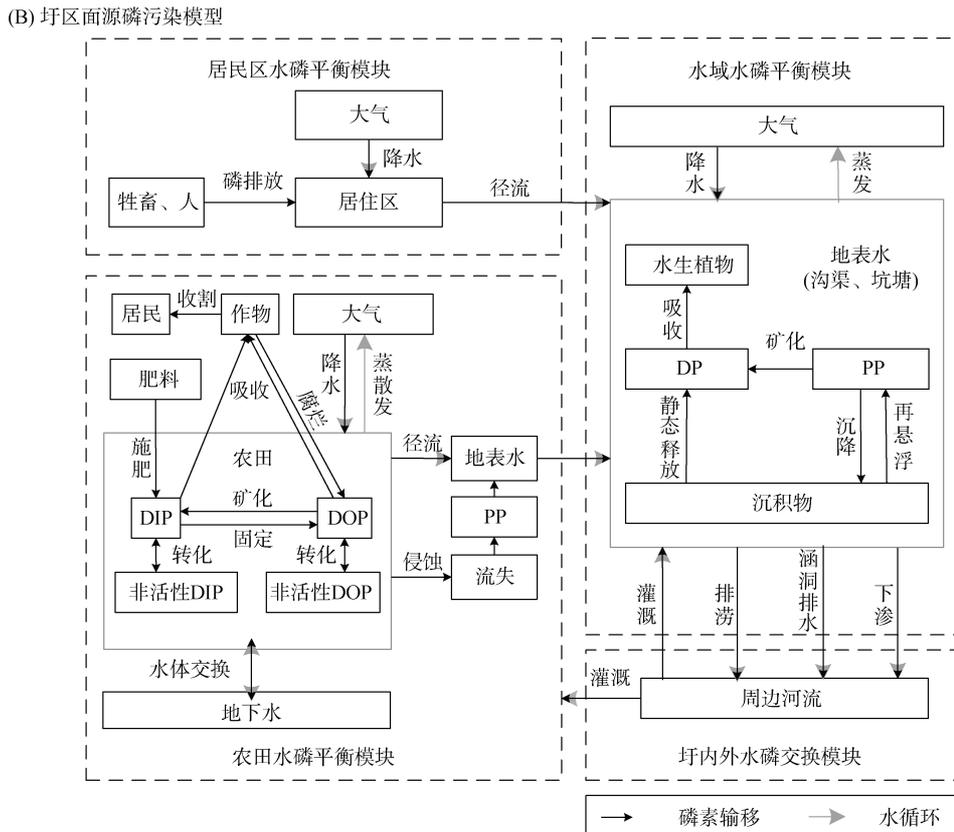
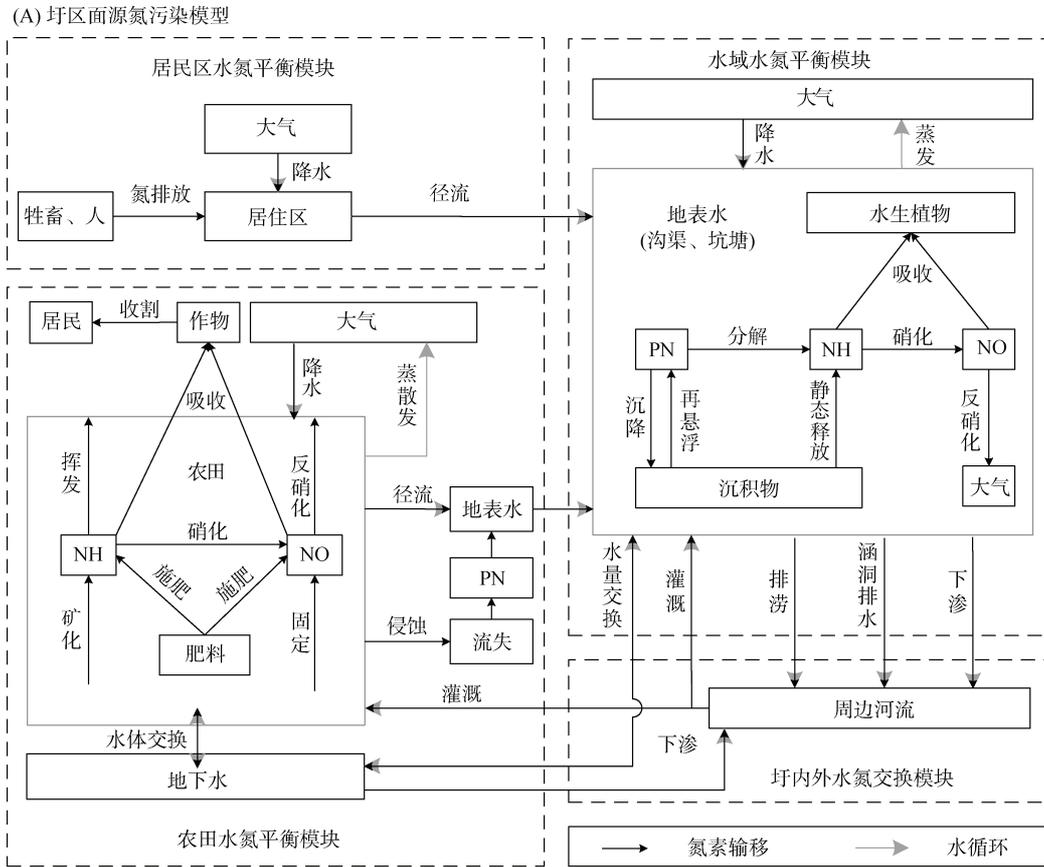


图 2 圩区氮磷动态模型<sup>[15-16]</sup>

Fig. 2 Nitrogen and phosphorus dynamic models for lowland polders

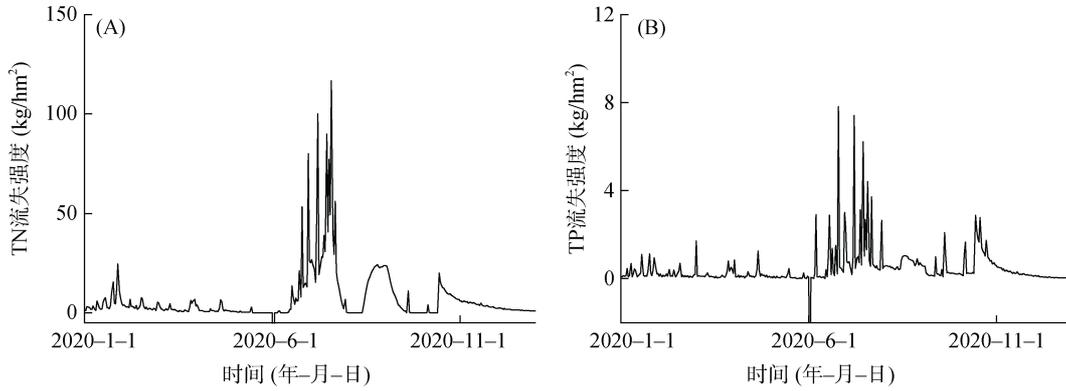


图 3 2020 年圩区氮磷日流失过程  
Fig. 3 Daily losses of nitrogen and phosphorus of polders in 2020

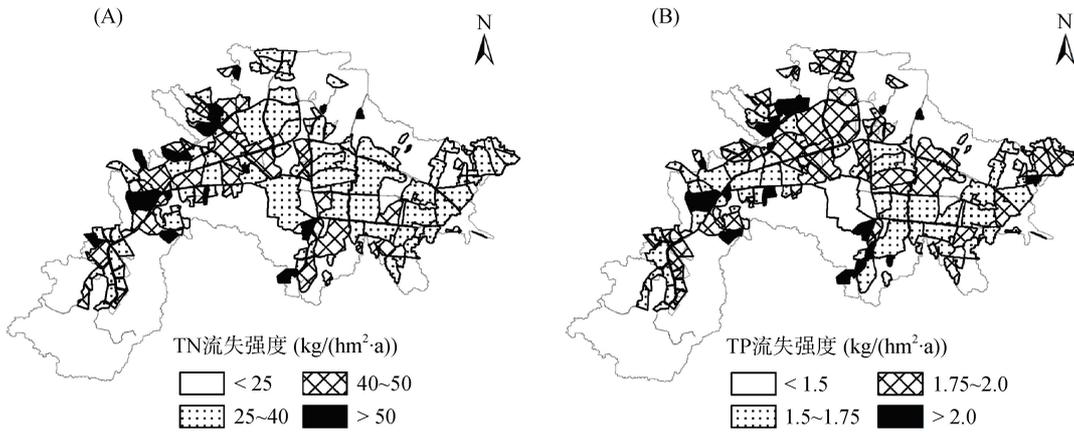


图 4 圩区氮磷流失强度空间分布  
Fig. 4 Spatial distribution of nitrogen and phosphorus loss intensities in polders

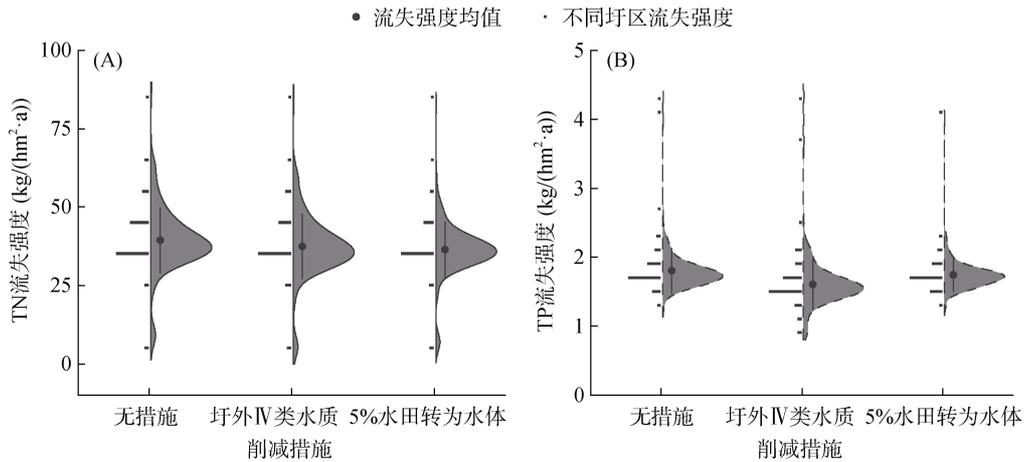


图 5 不同削减措施下氮磷流失强度对比  
Fig. 5 Comparison of nitrogen and phosphorus loss intensities under different reduction measures

内磷的影响较大,而圩区内的水体和坑塘等对于氮的停滞和净化更加有优势。

2.3.2 氮磷流失等级对比 根据自然裂点分级法<sup>[17]</sup>将总氮和总磷的流失强度划分为 5 个等级,依次为:较低、低、中、高、较高,分级标准见表 2。

未施加措施时,研究区内的氮磷高流失级以上的

圩区分别有 65 和 80 个,占圩区总数量的 40% 和 49%。当圩区外部水质控制为 IV 类水时,氮磷高流失级以上的圩区分别有 48 和 29 个,占圩区总数量的 30% 和 18%;将圩区内的土地利用 5% 的水田转化为水体后,氮磷高流失级以上的圩区分别有 35 和 62 个,占圩区总数量的 22% 和 39%(图 6)。

表 2 氮磷流失等级分级  
Table 2 Nitrogen and phosphorus loss grades

等级	较低	低	中	高	较高
TN (kg/(hm <sup>2</sup> ·a))	<20.0	20.0 ~ 30.0	30.1 ~ 40.0	40.1 ~ 50.0	>50.0
TP (kg/(hm <sup>2</sup> ·a))	<1.45	1.45 ~ 1.60	1.61 ~ 1.75	1.76 ~ 2.0	>2.0

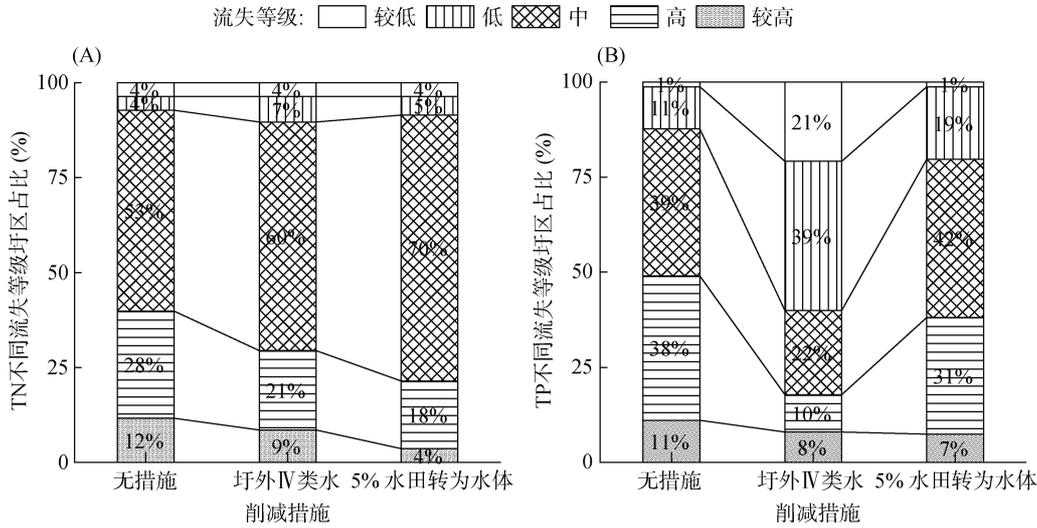


图 6 不同削减措施下不同氮磷流失等级的圩区数量对比

Fig. 6 Comparison of polder numbers with different nitrogen and phosphorus loss levels under different reduction measures

### 3 讨论

平原圩区相对于非圩区氮磷流失强度更高。圩区分布在平原的低地地区，其土壤肥沃，但这也意味着会造成圩区周围水体严重的富营养化问题。本案例内，圩区的氮磷流失水平高于太湖流域的平均水平。一方面受城市带来的高密度人口影响，另一方面农田作为圩区的主要土地利用类型，长期过量氮磷肥使用造成了农田土壤氮磷遗留量不断累积，增加了农业带来的氮磷污染源<sup>[18]</sup>。农业圩区内大部分农民为了获得高产而过度施肥，这一做法使化肥利用率降低到 25%<sup>[19]</sup>，导致大量施用的化肥流入周围的淡水，从而对下游的水生健康造成巨大压力。因此，合理的施肥措施，尤其避免过度施肥和在强降雨事件前施肥极为关键。最近的一项研究认为，夏稻氮肥施用量减少 15% ~ 25% 并不会显著降低平均粮食产量<sup>[20-21]</sup>。

圩区的氮磷流失机制与山丘区存在差异。以往山丘区研究中，认为地表径流是流域氮磷流失的主要途径，污染流失主要集中在暴雨期间，一场暴雨对氮磷流失的贡献量甚至能达到 90%<sup>[22]</sup>。而氮磷流失在圩区的年分布中，雨季(5—9月)占 60%。这是因为圩区氮磷输移主要通过灌溉抽水、洪涝排水、涵洞引排水

和下渗等共同作用完成。以往研究在流域尺度上量化了山区氮磷污染特征，但缺乏对低地圩区周边河流养分贡献的精准定量评价，传统的基于高程实现河道划分的流域模型并不适用于平原圩区。因此，圩区氮磷的科学量化是精准治污的重要步骤，只有探究适合圩区的高效益的氮磷削减策略才能提高流域整体的管控效率。

通过圩区管理措施优化进行氮磷拦截对平原区污染治理是十分重要的，要依据平原圩区与山丘区差异因地制宜采取管控措施。湖西区作为太湖重要的入湖区，有 61.2%和 70.7% 的总氮和总磷来自流域西北部<sup>[23-24]</sup>。圩区作为平原区氮磷的重要输出单元，高效的管控是治污的关键。在本研究中，当圩区外部水质控制为IV类水时，氮磷年流失强度分别降低了 4.9% 和 9.9%，高氮磷流失级的圩区数量分别减少了 26.2% 和 63.8%；将圩区内的土地利用中 5% 的水田转化为水体后，氮磷流失强度分别降低了 6.6% 和 1.7%，高氮磷流失级的圩区数量分别减少了 46.2% 和 22.5%。由此可见，圩外水质对于圩内磷的影响较大，而圩区内的水体和坑塘等更加利于氮的停滞和净化。针对不同氮磷流失强度圩区，要分别进行管控，同时利用圩区坑塘最大化实现圩区的氮磷拦截。

## 4 结论

圩区氮磷的流失机制具有明显不同,圩外水质目标对于圩内磷的流失影响较大,圩内的水体和坑塘等对于氮滞留和净化更加有优势。当圩区外部水质控制为IV类时,圩区截流氮磷量分别增加 4.9% 和 9.9%,高氮磷流失级别的圩区数量分别减少 26.2% 和 63.8%。将圩区内 5% 的水田转化为水体,圩区截流氮磷量分别增加 6.6% 和 1.7%,高氮磷流失级的圩区数量分别减少 46.2% 和 22.5%。本研究可为平原圩区的氮磷治理提供重要的技术支撑。

## 参考文献:

- [1] 严磊, 吴田乡, 赵素雅, 等. 雨强及播栽方式对太湖地区麦田径流氮磷流失的影响[J]. 土壤, 2022, 54(2): 358-364.
- [2] 黄雪娇, 李振轮, 冯密, 等. 高效复合处理剂的微观结构及其去除景观水体氮磷的机制[J]. 土壤学报, 2020, 57(1): 100-107.
- [3] 李红颖, 王思楚, 高孟宁, 等. 渗漏是三峡库区砂质土橘园氮磷流失的主要途径[J]. 土壤学报, 2022, 59(4): 1078-1088.
- [4] Wang S L, Li J S, Zhang B, et al. Trophic state assessment of global inland waters using a MODIS-derived Forel-Ule index[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 217: 444-460.
- [5] Huang J C, Zhang Y J, Huang Q, et al. When and where to reduce nutrient for controlling harmful algal blooms in large eutrophic Lake Chaohu, China?[J]. Ecological Indicators, 2018, 89: 808-817.
- [6] 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.
- [7] Paerl H W, Xu H, McCarthy M J, et al. Controlling harmful cyanobacterial blooms in a hyper-eutrophic lake (Lake Taihu, China): The need for a dual nutrient (N & P) management strategy[J]. Water Research, 2011, 45(5): 1973-1983.
- [8] Guo L. Ecology. Doing battle with the green monster of Taihu Lake[J]. Science, 2007, 317(5842): 1166.
- [9] 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.
- [10] Yan R H, Gao J F, Huang J C. Modelling the hydrological processes of a Chinese lowland polder and identifying the key factors using an improved PHPS model[J]. Journal of Hydrology, 2019, 578: 124083.
- [11] 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.
- [12] Zhang J, Gao J F, Zhu Q, et al. Coupling Mountain and lowland watershed models to characterize nutrient loading: An eight-year investigation in Lake Chaohu Basin[J]. Journal of Hydrology, 2022, 612: 128258.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 李乃强, 徐贵阳. 基于自然间断点分级法的土地利用数据网格化分析[J]. 测绘通报, 2020(4): 106-110, 156.
- [18] 侯坤, 荣湘民, 韩永亮, 等. 施肥深度对潮砂土氮磷损失及土壤氮磷含量的影响[J]. 土壤, 2021, 53(4): 707-714.
- [19] Yan R H, Gao J F. Key factors affecting discharge, soil erosion, nitrogen and phosphorus exports from agricultural polder[J]. Ecological Modelling, 2021, 452: 109586.
- [20] Blann K L, Anderson J L, Sands G R, et al. Effects of agricultural drainage on aquatic ecosystems: A review[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2009, 39(11): 909-1001.
- [21] Hofmeier M, Roelcke M, Han Y, et al. Nitrogen management in a rice-wheat system in the Taihu Region: Recommendations based on field experiments and surveys[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2015, 209: 60-73.
- [22] 李慧赟, 王裕成, 单亮, 等. 暴雨径流对新安江入库总磷负荷量的影响[J]. 环境科学研究, 2022, 35(4): 887-895.
- [23] Yan C Z, Che F F, Zeng L Q, et al. Spatial and seasonal changes of arsenic species in Lake Taihu in relation to eutrophication[J]. Science of the Total Environment, 2016, 563/564: 496-505.
- [24] Yuan H Z, Shen J, Liu E F, et al. Assessment of nutrients and heavy metals enrichment in surface sediments from Taihu Lake, a eutrophic shallow lake in China[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2011, 33(1): 67-81.