

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.12.003

环巢湖某典型圩区营养盐输出特征研究

鲍楠楠^{1,2}, 索改弟^{1,3}, 冯慧云^{1,2}, 蒋锦刚¹, 谢三桃⁴, 孟晶晶^{1,2}

(1. 中国科学院合肥物质科学研究院 智能机械研究所, 安徽 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学研究生院 科学岛分院, 安徽 合肥 230031; 3. 安徽科技学院 资源与环境学院, 安徽 凤阳 233100; 4. 安徽省水利水电勘测设计研究总院股份有限公司, 安徽 合肥 230088)

摘要:以巢湖富营养化治理和生态修复为目标的环湖圩区污染防控应首先进行圩区排放营养盐负荷量和排水量、水质及时空变化特征的全方位观测研究。文章选择环巢湖典型圩区同大圩,对圩内 9 座排灌站自 2020 年 6 月至 2021 年 6 月期间的各次排水进行水量水质监测记录,同时每 7~10 d 对排灌站前池水进行取样检测,共获得 968 个样品,取得水样氮磷质量浓度数据 5 171 个。结果表明:同大圩观测年内向巢湖排水 $1.06 \times 10^8 \text{ m}^3$,排水总氮(total nitrogen, TN)、总磷(total phosphorus, TP)的年均质量浓度分别为 $(3.988 \pm 4.748) \text{ mg/L}$ 、 $(0.236 \pm 0.184) \text{ mg/L}$ 。近一半次数的排水氨氮和 TP 质量浓度同时符合地表Ⅲ类要求,但仍有 16%排水的 TP 质量浓度 0.4 mg/L ,9%排水的氨氮质量浓度、60%以上排水的 TN 质量浓度超过 2.0 mg/L ,其中部分时段氮磷质量浓度极高,对受纳河道感官和水质造成冲击。圩区排水氮磷质量浓度受降水和施肥共同影响,强降水引起的水土流失使排水颗粒态磷增加,而施肥后降水则可能引起显著的氮流失。同大圩一年间排放 TN、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、TP 的排放量分别为 57.39、348.76、173.84、32.46 t,6—10 月雨季 TN、TP 排放量分别占到全年排放量的 66%、90%。排水量是决定排放负荷量的主要因素,圩区污染防控的重点首先是减少排水量,其次是削减排水氮磷质量浓度,据此提出了相应的策略举措建议。

关键词:巢湖;圩区;同大圩;氮;磷;排放负荷

中图分类号:X524

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2024)12-1601-08

Characteristics of nutrient export from a typical polder around Chaohu Lake

BAO Nannan^{1,2}, SUO Gaidi^{1,3}, FENG Huiyun^{1,2}, JIANG Jingang¹, XIE Santao⁴, MENG Jingjing^{1,2}

(1. Institute of Intelligent Machines, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. Science Island Branch, Graduate School of University of Science and Technology of China, Hefei 230031, China; 3. College of Resource and Environment, Anhui Science and Technology University, Fengyang 233100, China; 4. Anhui Survey and Design Institute of Water Resources and Hydropower Co., Ltd., Hefei 230088, China)

Abstract: For the prevention and control of pollution in the polder area around Chaohu Lake with the goal of eutrophication control and ecological restoration of the lake, the discharge, nutrient emissions, water quality and spatiotemporal change characteristics of the polder area should be observed and investigated extensively. The quantity and quality of water from each discharge events of the nine drainage pumping stations in the Tongdawei Polder, a typical polder around Chaohu Lake, were monitored from June 2020 to June 2021. Meanwhile, water samples were taken and tested every 7-10 days from the pond of each station. Altogether 968 water samples and 5 171 nitrogen (N) and phosphorus (P)

收稿日期:2023-04-03;修回日期:2023-04-28

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2023YFD1702103-04);中国科学院 STS 区域重点资助项目(KFJ-ST5-QYZD-173)和水体污染控制与治理科技重大专项资助项目(2017ZX07603-005)

作者简介:鲍楠楠(1997—),女,安徽六安人,中国科学技术大学硕士生;

冯慧云(1977—),女,安徽芜湖人,博士,中国科学院合肥物质科学研究院研究员,博士生导师;

谢三桃(1978—),男,安徽枞阳人,安徽省水利水电勘测设计研究总院股份有限公司正高级工程师,硕士生导师。

concentration data were obtained. The results showed that during the year, $1.06 \times 10^8 \text{ m}^3$ of water was discharged from the polder into Chaohu Lake. The annual mean concentrations of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) were $(3.988 \pm 4.748) \text{ mg/L}$ and $(0.236 \pm 0.184) \text{ mg/L}$, respectively. Concentrations of ammonia nitrogen and TP in nearly 50% of discharge samples were below the limits for Class III surface water quality standards. But still 16% of samples had TP over 0.4 mg/L , 9% of samples had ammonia nitrogen over 2.0 mg/L , and more than 60% of samples had TN over 2.0 mg/L . Part of the discharge events had very high NP concentrations, which caused dark color and negative impact on water quality of the recipient river. NP concentrations of discharges were clearly related to precipitation and fertilization. Soil erosion during heavy rainfall resulted in increment of particulate phosphorus (PP) in discharges, whereas rainfall after fertilization might cause significant N loss. The annual emission loads of ammonia nitrogen, TN, $\text{NO}_3\text{-N}$ and TP of Tongdawei Polder were 57.39 t, 348.76 t, 173.84 t and 32.46 t, respectively, and 66% of TN and 90% of TP were released during June to October, i. e., the rice season. Discharge volume is the main factor affecting NP emission loads. Reducing discharge volume and NP concentrations are the keys to tackle pollutions from the polder. Suggestions on the engineering and management strategies are proposed accordingly.

Key words: Chaohu Lake; polder area; Tongdawei Polder; nitrogen; phosphorus; emission load

0 引 言

巢湖是全国水污染重点防治的“三河三湖”之一。湖水污染主要是总氮(total nitrogen, TN)、总磷(total phosphorus, TP)和氨氮质量浓度超标引起的水体富营养化,目前全湖为轻度富营养状态^[1],蓝藻水华仍有发生。随着城镇生活污水、重污染河流等“点、线源”污染治理取得阶段性成效,以地表径流和农业农村污染为主的面源防控已成为巢湖治理和生态恢复的关键之举^[2]。

圩田是环湖流域典型的农业地理单元,堤坝阻止了圩内外水和物质的自由交换,仅在内部积涝或灌溉需水时通过涵闸泵站进行水力的调配,其独特的水文结构决定了其独特的污染物产排特征。巢湖流域面积大小 $13\,486 \text{ km}^2$ 包含圩垦区 $3\,275 \text{ km}^2$,其中的 $2\,090 \text{ km}^2$ 分布于巢湖周边及巢湖闸下裕溪河、西河和牛屯河两岸^[3]。圩区以粮食作物为主要产业,有少量蔬菜、水果等经济类作物种植和畜禽水产养殖业,具体情况各圩不等。因此,环巢湖圩区的污染物产生量及特征十分复杂,是环巢湖面源防控工作中不可忽视的重要环节,但迄今为止针对该目标的研究数据尚不充分^[4]。文献[5]报道 2009 年巢湖武都圩水稻季向柘皋河排水的 TN、TP 质量浓度分别为 $0.80 \sim 6.50 \text{ mg/L}$ 、 $0.05 \sim 0.60 \text{ mg/L}$,氮磷净输出通量分别为 2.10 、 0.13 kg/hm^2 ,且分析认为较低的输出通量与当年降水偏少、圩区沟渠蓄水和对污染物的滞留作用有关;文献[6]表明 2014—2015 年

巢湖西宋圩水稻季排水 TN、TP 质量浓度分别为 $1.00 \sim 16.15 \text{ mg/L}$ 、 $0.12 \sim 0.59 \text{ mg/L}$,相应净输出通量分别为 0.280 、 0.017 kg/hm^2 ;文献[7]利用 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型,模拟分析得出庐江东部杨柳圩不同水平年氨氮年排放量为 $22.28 \sim 60.74 \text{ t}$,TP 年排放量为 $2.22 \sim 15.74 \text{ t}$,排水质量浓度一年内超标天数分别达到 287、129 d;文献[8]以同大圩内小南河实测 TN、TP 质量浓度和 2013—2017 年间排水量,估算同大圩年均向巢湖排放的 TN、TP 排放量分别为 330.4 、 27.1 t 。这些研究初步展示了环巢湖圩区排水氮磷质量浓度及负荷的部分特征,但对于准确评判圩区排水排污对相邻河道、巢湖水质变化的影响、负荷量的贡献以及圩区污染防控针对性策略和工程举措的制定仍显不足。

本文在前期研究基础上,选择环巢湖典型圩区,从 2020 年 6 月至 2021 年 6 月跟踪每座泵站运行,取排灌站排水,同时每 7~10 d 取排灌站前池水,分析圩区的降雨排水事件和氮磷质量浓度变化,计算氮磷污染输出通量,探析其时空变化特征及影响圩区氮磷输出的主要因子,为环巢湖圩区污染防控策略的制定提供数据和理论依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区为巢湖西南沿岸同大圩,隶属庐江县同大镇,镇域行政区划面积 $7\,441 \text{ hm}^2$ 、实有耕地面积 $7\,222 \text{ hm}^2$,全镇户籍人口 8.9 万人^[9]。同大

圩乃同大镇辖区内除魏荡村以外的全部区域(西北邻杭埠河(河道 A)、东邻白石山河(河道 B),南侧由小南河(河道 C)与石大圩相隔),是环巢湖最大圩口,面积约 7 000 hm²。

同大圩内除最西端同大镇所在地人口较密集,其余片区主要为农田,耕作模式以稻麦轮作为主,少量稻油轮作、单季稻和早稻-再生稻模式。作物肥源主要为尿素、复合肥和氯化钾,多实行一基一追措施。秸秆基本全量还田。除农作物外,区域内约有 20%面积用于蔬菜、葡萄等经济作物种植,水产养殖面积仅 42 hm²,禽类存栏量约 11 万只,无规模化畜类养殖。

圩内沿河道 A、B、C 堤坝内侧分别建设有 3、4、2 座排灌站。圩内灌溉用水可取自沟渠,也可经沿河道 A 建设的多个闸阀自流引水。田间排水通过沟渠系统汇入各排灌站前池,达到排泄水位后开启泵机排入河道。

1.2 降水量、排水量的获取

降水量采用安徽省水信息系统三河水文站 2020 年 6 月至 2021 年 6 月数据,其中,2020 年 8 月汛期三河站被淹,以邻近魏荡站数据替代。排水量取自排灌站每天排量记录表,部分漏缺月份用排灌总站根据各站点每月用电量核算的排水量数据补全。

1.3 水样获取及水质检测

水样取自各排灌站的前池,每次排水开机后 30 min 取样,另定期每 1~2 周无论排水与否均取样 1 次。氨氮质量浓度用氨气敏电极法测定, TN、TP 质量浓度测定分别按标准 HJ 636—

2012、GB 11893—89,硝酸盐氮(NO₃-N)质量浓度测定参考 SL 84—1994。但水样前处理采用 0.45 μm 孔径的微孔滤膜过滤,过滤后水样按 TN、TP 质量浓度测定方法测试溶解性总氮(dissolved total nitrogen, DTN)和溶解性总磷(dissolved total phosphorus, DTP)质量浓度。

1.4 数据分析

数据均使用 Excel 2019 软件分析处理,采用 Origin 2021 进行作图。

2 结果与分析

2.1 圩区排水的氮磷质量浓度

2.1.1 总体氮磷质量浓度分布

观测期内共取得圩内 9 座排灌站前池水样 968 个,其中:714 个排水时取得;254 个为定期取样所得,取样时未在排水。水样参数见表 1 所列,以 968 个和 714 个样品分别统计的各参数均值差异很小,说明前池水质可以表征排水水质。

从表 1 可以看出,全部水样氨氮质量浓度均值低于地表Ⅲ类限值 1.0 mg/L, TP 质量浓度均值在Ⅲ、Ⅳ类限值(0.2~0.3 mg/L)之间,但 TN 质量浓度均值接近Ⅴ类限值 2.0 mg/L 的 2 倍。

所有水样 ρ(DTP)/ρ(TP)较低,但 ρ(DTN)/ρ(TN)平均达到 80%,说明排水中颗粒态磷、溶解态氮质量分数占比高。ρ(NO₃-N)、ρ(氨氮)与 ρ(TN)的比例关系显示,NO₃-N 是排水中氮的主要形态。不计亚硝态氮,排水中存在有机氮,比例高低不等。

表 1 观测期内取得排灌站前池水样及排水时水样水质参数

指标	全部排灌站前池水样			排水时取得水样		
	平均值±标准差	最小值	最大值	平均值±标准差	最小值	最大值
ρ(TP)/(mg/L)	0.236±0.184	0.001	1.353	0.251±0.191	0.001	1.084
ρ(DTP)/(mg/L)	0.073±0.055	0.003	0.374	0.076±0.056	0.003	0.373
[ρ(DTP)/ρ(TP)]/%	(38.14±20.82)	4.52	99.16	(37.10±20.52)	1.11	99.16
ρ(TN)/(mg/L)	3.988±4.748	0.354	44.154	4.193±4.995	0.368	44.154
ρ(DTN)/(mg/L)	3.353±3.997	0.272	25.982	3.562±4.110	0.287	25.982
[ρ(DTN)/ρ(TN)]/%	(80.44±17.23)	17.86	99.46	(81.55±17.09)	17.85	99.46
ρ(氨氮)/(mg/L)	0.646±0.914	0.006	5.540	0.635±0.943	0.006	5.239
ρ(NO ₃ -N)/(mg/L)	2.493±4.434	0.001	42.990	2.803±4.758	0.001	42.990
[ρ(氨氮)/ρ(TN)]/%	(17.39±18.08)	0.06	89.37	(16.24±18.39)	0.06	89.37
[ρ(NO ₃ -N)/ρ(TN)]/%	(44.33±28.01)	0.11	98.94	(47.68±28.43)	0.11	98.94
[ρ(无机氮)/ρ(TN)]/%	(54.59±28.73)	0	100.00	(54.50±30.12)	0	100.00

全部水样 6 项氮磷指标的质量浓度分布和区间占比情况如图 1 所示。其中,55.79%样品的

TP、78.27%样品的氨氮均符合地表Ⅲ类要求,且其中的 450 个(占比 46.49%)同时低于 2 个指标

的限值。有一定比例的排水 TP 和氨氮质量浓度较高,其中 16% 的 TP 质量浓度超过 0.4 mg/L、9% 的氨氮质量浓度超过 2.0 mg/L。

仅 33 个水样 $\rho(\text{TN})$ 符合 III 类要求,而 60% 以上的超过 V 类限值。 $\rho(\text{NO}_3\text{-N})$ 集中于低、高两个区别,1/2 样品的 $\rho(\text{NO}_3\text{-N})$ 低于 1.0 mg/L,但有 30% 以上的样品超过 2.0 mg/L。仅 5% 样品

的 DTP 质量浓度超过 III 类限值,但 50% 以上排水的 DTN 质量浓度超过 V 类限值。综上,全圩观测年内各次排水的氮磷质量浓度高低差异明显,氨氮、TP 质量浓度均值达到地表 III、IV 类, TN 质量浓度均值超过 V 类限值;较高比例次数的排水氮磷质量浓度较高,部分时段极高,不可避免会对接纳河道相应水域的水质稳定造成干扰。

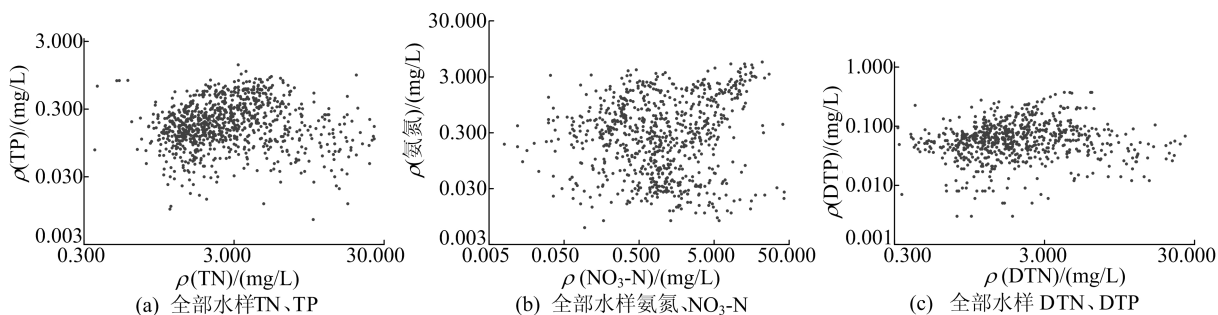


图 1 观测期内取得的全部排灌站前池水样氮磷浓度分布

2.1.2 各入巢河流片区氮磷质量浓度

3 条环圩入巢河流分别接收来自圩内 3、4、2 座排灌站的排水,各取得 331、458、179 个水样,

另定期取得圩外河道 A 内邻近排水出口处 2 个位点的水样 83 个,相关的氮磷质量浓度整体比较情况如图 2 所示。

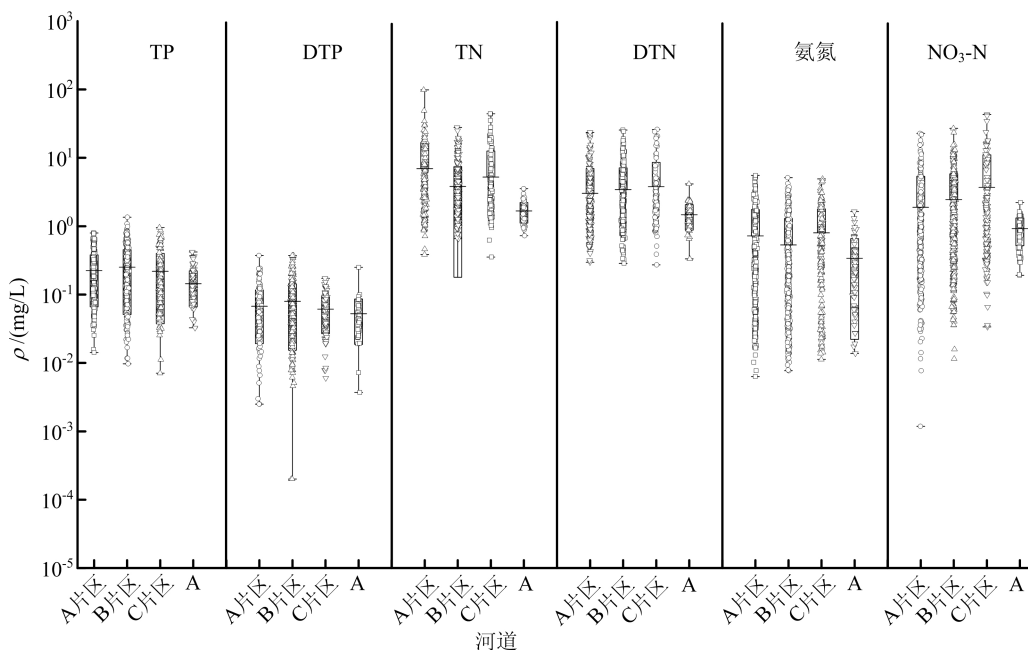


图 2 全部排灌站前池水样氮磷质量浓度按河流片区分类统计分析

从图 2 可以看出,TP、DTP 质量浓度均值在河道 B 片区略高、河道 C 片区最低,而 DTN、氨氮和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 质量浓度均值则均在河道 C 片区最高。分析认为,圩内各片区田块地势高低交错变化,农业种植结构、施肥等耕作模式虽有差异但总体规律较为一致,因此各片区排水的氮磷质量浓

度虽有差异但并不十分显著。

2.1.3 圩区排水氮磷质量浓度随时间变化特征

以时间(起止时间为 2020 年 6 月 10 日至 2021 年 6 月 30 日)为横轴,显示 384 d 的逐日降水量、各排灌站前池水 TP、TN、氨氮和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 质量浓度的日均值和 9 个站点日均、周均及 4 周均

值曲线如图 3 所示。

每个站点有排水的日子可能有 1 个或多个开机时段,每个时段皆取水样,各站日均值指每个站点当日取得的所有水样的质量浓度均值;9 站日

均值则是将 9 个站点的日均值再平均,用于表征整个圩区排水的每日水质变化;9 站周均值、9 站 4 周均值是将每 7 d、每 4 周的各站日均值进行平均,反映圩区排水周和月尺度的水质变化。

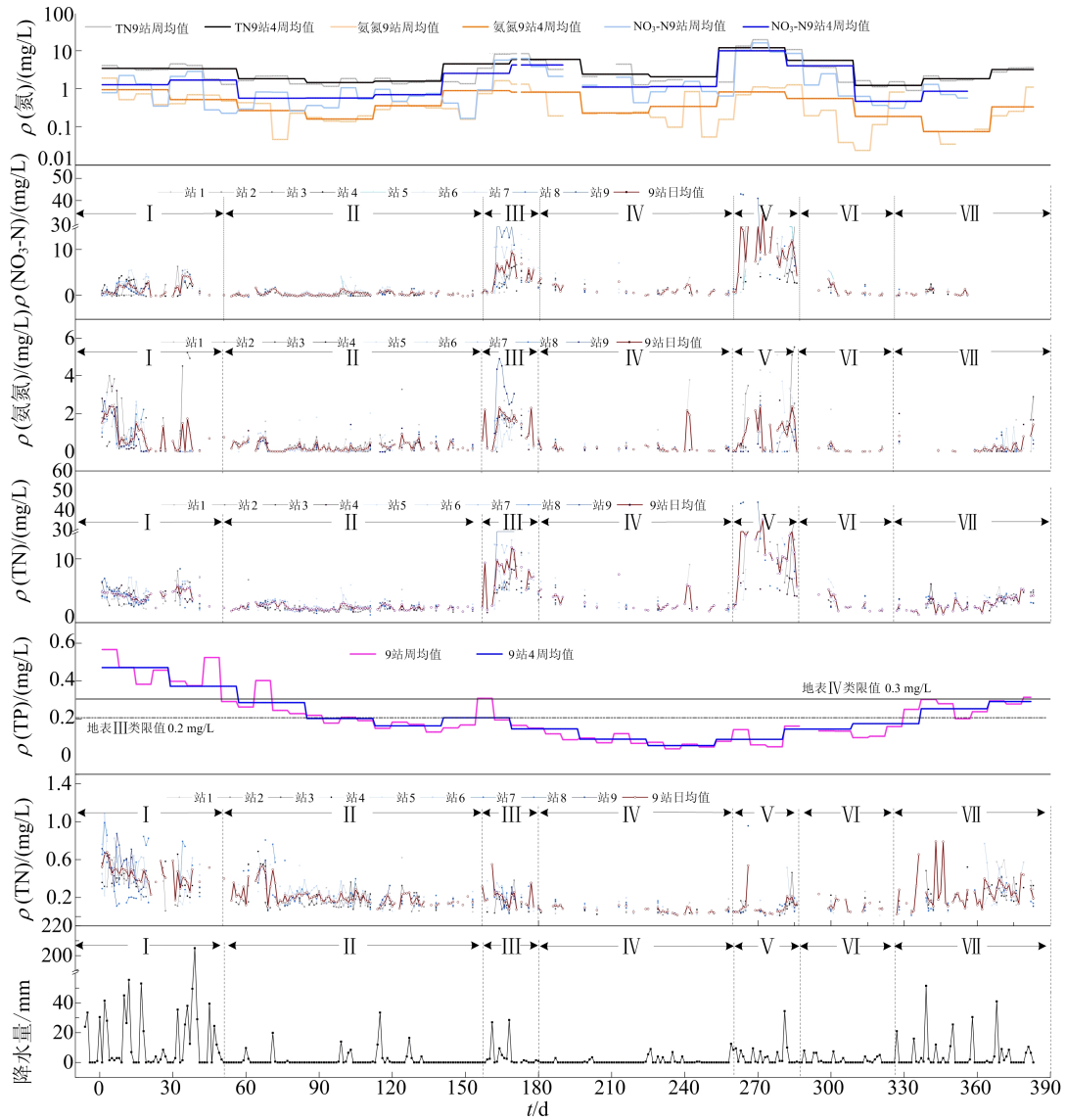


图 3 排灌站前池水氮磷浓度随时间变化过程

图 3 中将降水量标记为 7 个时段,雨量从大到小的时段依次为 I、VII、II、V、III、VI、IV。从农时来看, I、II 和 VII 的 6 月份为稻季, III~VII 前段为旱作季。由图 3 可知,站前池水 $\rho(\text{TP})$ 与降水量之间变化一致。整体降水最弱的冬季和早春(IV)水中 $\rho(\text{TP})$ 最低;春末夏季(VII、I)降水时间长、雨量大,秋季部分时段(III)雨量中等但密集,相应排水多且 $\rho(\text{TP})$ 高;盛夏初秋(II)和冬末春初(V),降水频次和雨量比 IV、VI 高,表现在排水 $\rho(\text{TP})$ 也有较明显的增加。2020 年 8 月(II 时段

前期)降雨已经减弱,但排水仍密集且质量浓度高,这是由于 7 月汛期的大量积水在 8 月才得以排出。从农时来看,稻季排水频次高、 $\rho(\text{TP})$ 高,旱作季若遇中等降雨则排水 $\rho(\text{TP})$ 相应增加。这些结果说明圩区排水 $\rho(\text{TP})$ 受降水的影响十分明显,部分时段不能达到地表 IV 类要求。排灌站汇聚经沟渠输送而来的田间排水。强降雨时土壤冲刷强烈,且排水流速高、水中颗粒物沿途沉降少,进入站前池后又需及时排出因而停留时间短,因此强降雨期排水中颗粒物增加,磷易附着于颗粒

物上,表现为水中 $\rho(\text{TP})$ 升高。

整体看,排水中氨氮质量浓度均值低于Ⅲ类限值,但 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 TN 质量浓度均值时常超过 2.0 mg/L ,具体随时间而变化,3种形态氮各有特点。降水较弱的Ⅱ、Ⅳ、Ⅵ时段 $\rho(\text{TN})$ 维持低位,而降水最多的Ⅰ、Ⅶ时段 $\rho(\text{TN})$ 虽比Ⅱ、Ⅳ、Ⅵ时段有所升高,但幅度并不如 $\rho(\text{TP})$ 显著,相反雨量中等的Ⅲ、Ⅴ时段(分别对应小麦播种和拔节孕穗) $\rho(\text{TN})$ 明显最高,说明圩区排水 $\rho(\text{TN})$ 虽也与降水有关,但与农时的关系可能更为密切。

排水中 $\rho(\text{NO}_3\text{-N})$ 随时间变化与 $\rho(\text{TN})$ 基本

一致,不同的是氨氮质量浓度在Ⅰ、Ⅶ后期与Ⅱ、Ⅳ、Ⅵ时段差异明显不同于 TN、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的质量浓度差异。Ⅰ、Ⅶ时段正值稻季淹水期且施复合肥或尿素,水中氨氮质量浓度高,这是由于遇强降水被快速排出使其在沟渠的转化效率也低。

2.2 圩区排放氮磷负荷

排灌站前池水 TP、DTP 和 TN 质量浓度月均值变化,及区域月降水量、各站月排水量和排放氮磷负荷量变化如图 4 所示,其中 2020 年 6 月仅包括中、下旬数据。DTN、氨氮和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 月均质量浓度变化规律与 TN 一致,不再赘述。

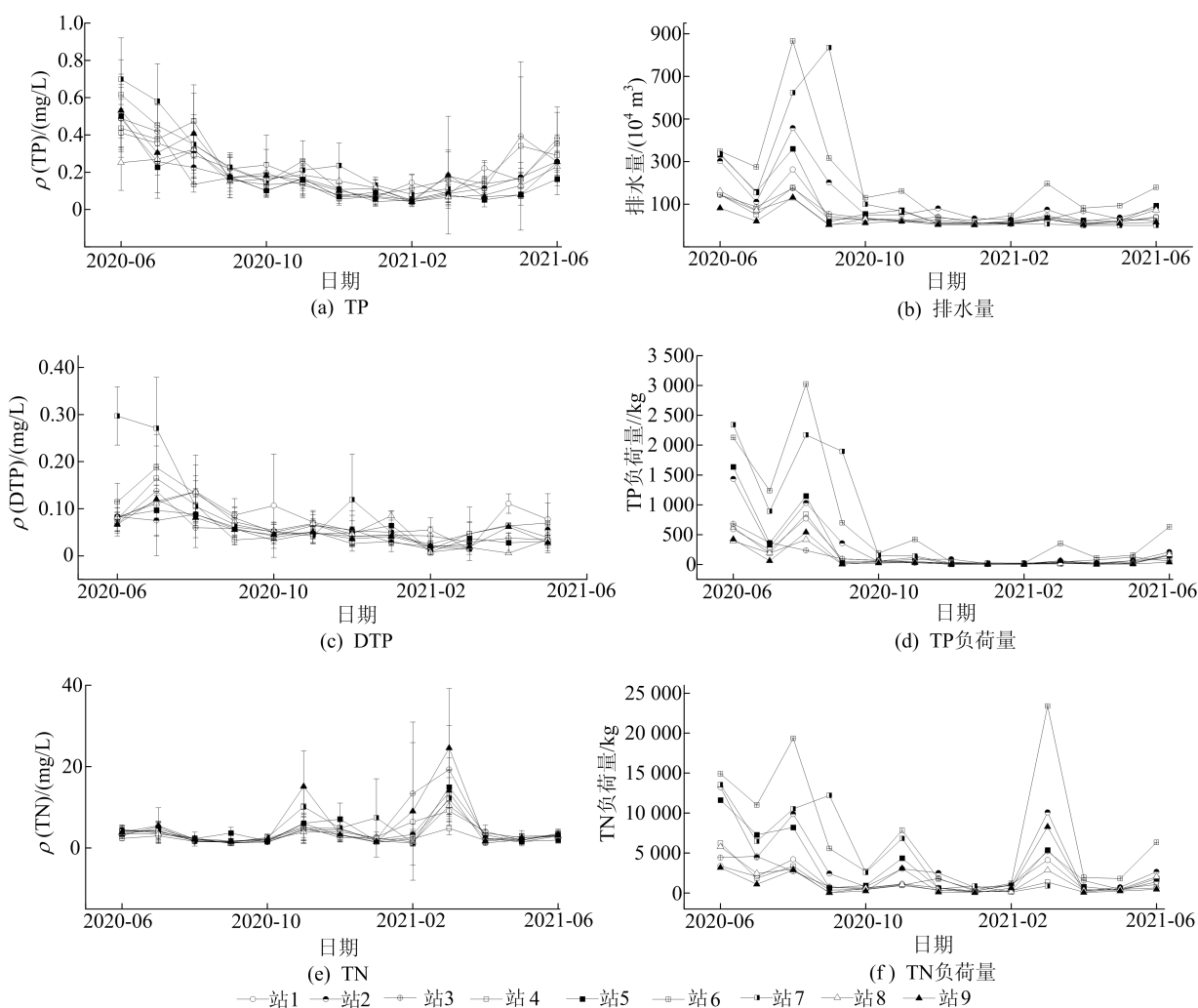


图 4 观测期内圩区降水量、各站排水量、排水氮磷质量浓度及排放负荷量月度变化

由图 4 可知,站前池水 $\rho(\text{TP})$ 月均值两头高、中间低, $\rho(\text{TN})$ 在 2020 年 11 月和 2021 年 3 月明显升高,这与图 3 逐日变化一致。排水量与月降水量并非严格同步,这与季节、作物生长需水和排水滞后性有关。每月 TP、TN 排放负荷量变化与排水量变化一致,但 TN 在 2021 年 3 月因质量浓

度高又出现排放量高峰,说明对于 TP,排水量是排放负荷量的主要决定因子,而 TN 排放量则受排水量和质量浓度的双重影响。观测期内 9 个站总排水量为 $10\ 603.24 \times 10^4 \text{ m}^3$,氨氮、TN、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、TP 排放量分别为 57.39、348.76、173.84、32.46 t。以圩面积 $7\ 000 \text{ hm}^2$ 计,相应排放负荷强度大小分别

为 8.20、49.82、24.83、4.64 kg/hm²。

分片区依次排入三河道的水量大小分别为 2 984.65×10⁴、6 694.54×10⁴、924.05×10⁴ m³，这是由于该圩地势整体西南高、东北低，积水主要通过东北角的 4 座排灌站排入河道 B。因各片区排水质量浓度相近，排水量高的 B 片区总的氮磷排放量也最高，因此对于该圩，B 片区是排污防控的重点区域。

3 讨 论

由于农业面源的分散性、复杂性，通常利用排放系数、入河系数等进行污染物产排估算。文献[10]根据土地利用类型，估算环巢湖 14 个小流域含农村生活、畜禽养殖、种植业和水产业在内的农业面源入河量分别为化学需氧量 13 633.8 t/a、氨氮 814.4 t/a、总氮 2 286 t/a、总磷 174 t/a，其中白石天河小流域的入河量分别为 1 788、154、281、21 t/a。对比可知，本文测得仅同大圩排放氮磷入河量已高于估算所得白石天河小流域入河量。据本文数据估算环湖 6×10⁴ hm² 圩区年总氮、总磷量排放分别接近 3 000、280 t。

事实上，圩区的相对封闭性使其被视作包含若干排口的一个独立单元。讨论圩区污染对巢湖的影响，应从排水水量、频次、水质和负荷量等不同层次来分析。对于每个圩口，在其内部差异性、复杂性尚未准确核定的情况下，可分别测定各圩排水量、水质，进而得出排污负荷量，分析排污的时空特征。本文利用同大圩开展该项工作，整体上揭示了典型圩区排水水质水量和氮磷负荷量的时空特点。结果表明，圩区向巢湖排放氮磷的载体是大量排水，排水的氮磷质量浓度受施肥及雨量雨强的综合影响在不同时点差异极大，其中磷浓度在强降雨期明显升高。同大圩排放氮磷负荷量变化与排水量一致，观测一年内 66% 的氮、90% 的磷集中于 6—10 月同时是降雨集中期排出，且以 NO₃-N 和颗粒态磷为主要形式。此前研究^[11-12]表明，降水的冲刷效应是林地、耕地颗粒态磷输出较高的主要原因。

观测年份正值巢湖流域特大洪灾，同大圩记录排水量与 2014 年相当，低于 2016 年洪水期，但比 2013、2015、2017 年高出 4 000 多万立方米^[8]。结合本文结果推测降水少的年份由于排水量减少，水土流失引起的磷排放可能相应减少，但氮负荷量则不一定，因降水少排水氮质量浓度会增加，具体情况受降雨场次、施肥降水的间隔期、沟渠池塘对氮

的转化削减等多重因素影响难以准确估算^[13-15]。鉴于巢湖流域洪水频次较高^[16]及未来气候变化引起极端气象事件频发的预期，本文研究对评估环湖圩区的氮磷输出量具有一定的参考意义。

由于各田块地势不均及作物生长需求，圩区从外部河道引水灌溉，势必产生尾水外排。实际观测年降水总量 1.60 m、圩区排水深度 1.51 m，6—9 月降水量 0.95 m、排水量 1.10 m，该区域多年平均蒸发量 0.95 m^[17]，可见由于降水量与作物需水量的不匹配，即使是特大丰水年也存在从圩外引水的情形，而 2013、2015、2017 年排水深度也接近 1 m。圩外河道水质整体优于圩内水，引水灌溉相当于用干净水透析田土和肥料，既浪费资源也不利于污染防控。

根据本文结果，以巢湖污染防控为目标的圩区治理，难点在于切实有效减少圩区排水量，其次是降低排水氮磷质量浓度，应在遵循总体原则的基础上“一圩一策”开展监测和研究，制定工程和管理举措，并有效加以贯彻落实。总的原则及思路包括但不限于：① 建设圩内水系监测能力，提升排灌站水量水质监测设施和能力，持续取得全面有效的排水量质数据；② 明晰圩内各水位线的田块和沟渠坑塘面积，核算蓄水容量，必要时进行水系结构改造，提升库容，改进循环路径；③ 高处田块推行节水灌溉，减轻下级田块涝渍，低洼田块推广耐淹高秆品种，加强不同地势田块间的灌溉调度和圩内“营养水”提灌循环利用，尽量做到少引水、不排水、排水不外排；④ 合理施肥施药，加强施肥指导及降水预测预报，尤其要避免强降雨前施肥、施肥后很快排水，最大程度减少肥料养分流失；⑤ 加强田块及沟渠护坡护岸，减少降水引起的水土流失和磷流失；⑥ 加强秸秆处置管理，杜绝秸秆直接进入沟渠坑塘水系；⑦ 做好养殖业环境管理和粪污处置，减少养殖污染入水量；⑧ 完善农村居民生活污水集中收集处理，减少高质量浓度污染入水量；⑨ 加强环境整治，杜绝生产生活固废入水；⑩ 排水前进行末端治理，利用过滤系统拦截泥沙颗粒物，利用植物系统削减氮质量浓度。

4 结 论

本文通过一年内的高频次野外调查观测和室内分析，探究环巢湖典型圩区排放氮磷的主要规律，得到结论如下。

(下转第 1647 页)

- in diamond[J]. Nature Communications, 2015, 6: 6631.
- [7] LI R, KONG F, ZHAO P, et al. Nanoscale electrometry based on a magnetic-field-resistant spin sensor[J]. Physical Review Letters, 2020, 124(24): 247701.
- [8] BIAN K, ZHENG W, ZENG X, et al. Nanoscale electric-field imaging based on a quantum sensor and its charge-state control under ambient condition[J]. Nature Communications, 2021, 12: 2457.
- [9] CHOI J, ZHOU H, LANDIG R, et al. Probing and manipulating embryogenesis via nanoscale thermometry and temperature control[J]. Proceeding of the National Academy of Sciences, 2020, 117(26): 14636-14641.
- [10] XU N, JIANG F, TIAN Y, et al. Wavelet-based fast time-resolved magnetic sensing with electronic spins in diamond[J]. Physical Review B, 2016, 93(16): 161117.
- [11] 邢腾腾,周雪莹,翟云鹏,等.用于固态自旋量子调控实验的共面波导辐射结构的镀铜工艺实现[J].量子光学学报, 2020, 26(2): 187-193.
- [12] 王宏睿,祝金国.光刻工艺中的曝光技术比较[J].现代制造工程, 2008(12): 131-135.
- [13] JIA W, SHI Z, QIN X, et al. Ultra-broadband coplanar waveguide for optically detected magnetic resonance of nitrogen-vacancy centers in diamond[J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(6): 064705.
- [14] 周飞飞,邢腾腾,陈冰,等.用于金刚石 NV 色心实验的辐射结构的设计与实现[J].量子光学学报, 2019, 25(2): 197-204.

(责任编辑 张 镛)

(上接第 1607 页)

1) 2020 年 6 月至 2021 年 6 月同大圩向巢湖排水 $1.06 \times 10^8 \text{ m}^3$, 水中 TN、TP 的年平均质量浓度分别为 $(3.988 \pm 4.748) \text{ mg/L}$ 、 $(0.236 \pm 0.184) \text{ mg/L}$ 。较高比例次数的排水氮磷质量浓度高,少数时极高,对受纳河道感官和水质造成冲击。排水中颗粒态磷、溶解态氮占比高, $\text{NO}_3\text{-N}$ 是氮的主要形态。

2) 同大圩一年间氨氮、TN、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、TP 的排放量分别为 57.39、348.76、173.84、32.46 t, 相应负荷强度大小分别为 8.20、49.82、24.83、4.64 kg/hm^2 。

3) 圩区排水氮磷质量浓度受降水和施肥共同影响,强降水引起的水土流失使排水颗粒态磷增加,而施肥后降水则可能引起显著的氮流失。排水量是决定排放负荷量的主要因素,6—10 月稻季 TN、TP 排放量分别占全年排放量的 66%、90%。

4) 圩区污染防治的重点首先是减少排水量,其次是削减排水氮磷质量浓度。据此提出了相应的策略举措建议。

[参 考 文 献]

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 2020 年中国生态环境状况公报[EB/OL]. [2021-05-24]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/>.
- [2] 高斌友,仰礼信,宋超.巢湖治理与保护总体策略和创新实践[J].生物学杂志, 2016, 33(2): 1-7.
- [3] 王永昌.巢湖流域防洪规划简介[J].人民长江, 2000, 31(1): 34-36.
- [4] 左琳琳,胡海棠,李存军,等.基于文献计量的巢湖农业面源污染概况分析[J].中国农学通报, 2019, 35(11): 133-141.
- [5] 储茵,汪丽婷,马友华,等.巢湖沿岸典型圩区夏季水稻生长期营养盐输出特征研究[J].水土保持学报, 2010, 24(5): 135-140.
- [6] 张笑宇,储茵,马友华,等.巢湖沿岸圩区稻季营养盐的输出特征研究[J].中国农学通报, 2015, 31(12): 242-246.
- [7] 王岩,刘圆,高珍,等.环巢湖流域典型圩区水环境模拟与污染控制研究[J].水电能源科学, 2022, 40(9): 71-73, 70.
- [8] 魏东霞,李璇,赵禹恒,等.合肥科学岛大气氮磷沉降及对巢湖影响的分析[J].合肥工业大学学报(自然科学版), 2018, 41(9): 1259-1266.
- [9] 庐江县统计局.庐江县统计年鉴:2021[M].合肥:时代出版传媒股份有限公司, 2021.
- [10] 谭茜.环巢湖支流污染结构及治理方向[J].安徽农业科学, 2016, 44(17): 77-82.
- [11] 王赵飞,林晨,许金朵,等.巢湖流域非点源颗粒态磷负荷的空间差异及关键影响因子研究[J].农业环境科学学报, 2019, 38(3): 659-670.
- [12] 陈育超,李阳,于海明,等.太湖地区何家浜流域初期雨水对水稻田污染物的冲刷效应[J].环境工程学报, 2016, 10(2): 573-580.
- [13] 沈青云.平原河网区圩区的非点源污染产排特征分析[D].南京:南京师范大学, 2018.
- [14] 李玖颖,卫琦,王海渝,等.典型降雨稻田排水过程中氮素流失规律[J].灌溉排水学报, 2020, 39(12): 97-102.
- [15] 马凡凡,邢素林,甘曼琴,等.农田排水沟渠中氮磷迁移转化及净化措施研究[J].安徽农业科学, 2019, 47(10): 10-13, 17.
- [16] 万能胜,齐鹏云.巢湖流域 2020 年特大洪涝灾害应对实践与思考[J].中国防洪抗旱, 2021, 31(4): 37-41.
- [17] 操勤,陶唯意,马祖云,等.巢湖流域蒸发量特征及变化趋势研究[J].资源开发与市场, 2007(9): 811-814.

(责任编辑 吴 亮)