



鄱阳湖流域典型围垦区电排灌站排水的水量水质时空分布特征

杜必发¹, 黄建榕¹, 朱利英^{2,3,✉}, 李昆¹, 胡大洲^{2,3}, 桂双林⁵, 魏源送^{1,2,3,4}

1. 南昌大学资源与环境学院, 南昌 330031; 2. 中国科学院生态环境中心, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100085; 3. 中国科学院生态环境中心, 水污染控制实验室, 北京 100085; 4. 中国科学院大学, 北京 100049; 5. 江西省科学院能源研究所, 南昌 330096

摘要 以鄱阳湖流域典型围垦区—蒋巷联圩为研究区域, 通过收集降雨、电排灌站排水等历史数据和现场水质调研, 解析电排灌站排水的水量水质时空分布特征, 以为围垦区农业面源污染控制提供科学依据。结果表明: 在时间上, 2023 年排水量 ($2.69 \times 10^7 \text{ m}^3$) 较 2021 年减少了 75.04%, 排水量与降雨量和雨型呈显著正相关 ($P < 0.05$), 暴雨多发生在涨水期, 其排水量占比加大; 2023 年电排灌站排水平均 TN、TP 质量浓度超过地表水 III 类标准 ($1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 其中涨水期浓度最高, 平均超标倍数分别为 3.03、0.31; 排放的氮磷负荷占全年负荷总量的 90% 以上。在空间上, 排水水量依次为蒋巷联圩中段>下段>上段, 排水氮、磷平均质量浓度依次为上段>下段>中段, 其排放的氮磷负荷为中段>下段>上段; 在排水去向, 赣江南支排放方向的水量、氮磷质量浓度和负荷均大于赣江中支。

关键词 电排灌站; 时空分布; 水质分析; 围垦区

经济快速增长背景下, 人们对生产生活的空间需求日益增加, 长江中下游的巢湖、太湖、洞庭湖和鄱阳湖等滨湖区域开展了大规模的围湖造田活动^[1]。围垦区是滨湖低地生态系统的一种主要地理单元, 在荷兰和中国, 围垦区是滨湖区主要农业分布区, XIE 等^[2]调查发现长江中下游围垦导致湖泊面积减少 13.80%, 鄱阳湖滨湖围垦区面积达到 4180 km^2 ^[3]。

围垦区是一个较为封闭的生产生活区域, 通常采用圈圩筑堤的方式建设, 其水文管理需要通过电排灌站调控。围垦区中密集的农业生产活动产生大量的氮磷等营养物质, 通过人工设施 (如涵洞、电排灌站等) 被排放至受纳水体, 导致周边水生态环境质量的改变^[4]。因此, 研究人员认为围垦区的排水量及排水形式对受纳水体的影响值得关注^[5]。YAN 等^[6]模拟了太湖流域低地圩田与泵站的水文过程与排水磷负荷的关系, 发现与自然排水相比, 电排灌站管控下的年均排水量减少了 8.6%。电排灌站排水运行初时会引起沟渠表层沉积物再悬浮, 导致沟渠水中 TP 和浊度骤然上升^[7]。HUANG 等^[8]利用氮动态模型对太湖流域低地圩田和非圩田进行了模拟, 发现圩田排放的氮负荷高于非圩田。汛期电排灌站排水是引起下游国控断面 TP 超标的主要原因^[9], 其已成为受纳水体汛期水质超标的潜在风险源^[10]。此外, 围垦区由于人类活动密集, 过量的营养物质输出导致受纳水体富营养化^[11]。因此, 持续关注低地圩田/围垦区内人为控制电排灌站排水水量水质特征, 有利于精细刻画其对受纳水体的影响并提出相对有效的管控措施。

鄱阳湖是长江流域最大的“吞吐型”通江湖泊, 入湖面源污染及其控制日益得到关注。已有研究^[12]表明, 赣江、抚河等五河入湖水水质中的 TN 和 TP 是引起鄱阳湖水水质下降的主要因子, 模型模拟估算结果表明农业源和城镇生活源的 TP 入湖负荷贡献率分别为 56.4% 和 30.6%^[13]。本研究以鄱阳湖流域南昌湖区典型围垦区——蒋巷联圩为主要研究区, 该区域地势低洼平坦, 是四面环水的独立岛镇, 全域排灌水均通过联圩内电

收稿日期: 2024-09-30 录用日期: 2025-02-03

基金项目: 长江生态环境保护修复联合研究 (2022-LHYJ-02-0505-01, 2019-LHYJ-01-0.000211-18); 长江汛期总磷时空分异特征及其减排降碳途径研究 (2024A009)

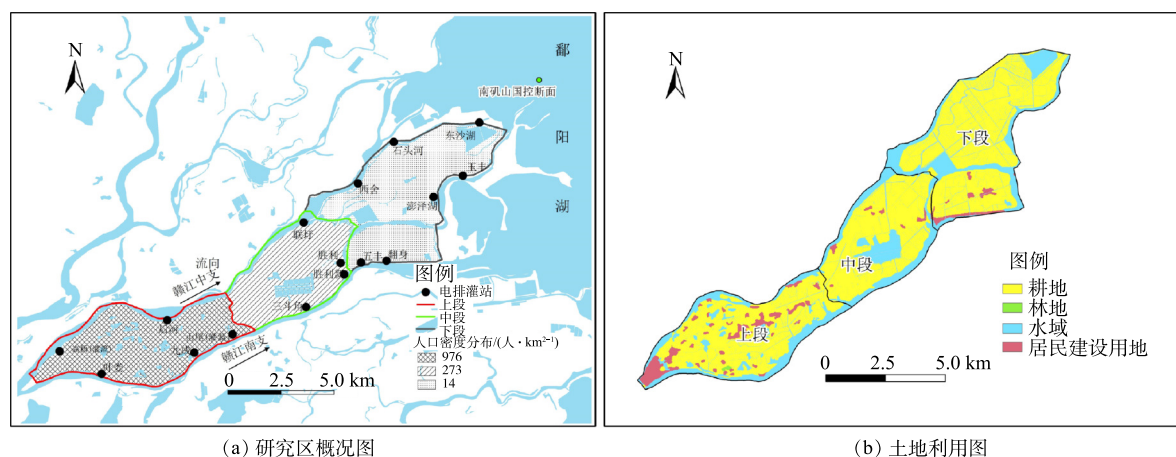
第一作者: 杜必发 (2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为农业面源污染研究及治理, bifa24678@163.com ✉通信作者: 朱利英 (1987—), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向为流域水生态治理与修复, lyzhu@rcees.ac.cn

排灌站调控。收集与整理电排灌站 2021 年、2023 年全年运维数据,并于 2023 年开展现场水质监测调研,明确围垦区电排灌站排水的水量水质时空分布特征,并估算全域排水污染负荷,以期为鄱阳湖围垦区农业面源污染防治提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

蒋巷联圩地处赣江三角洲下游,是赣江南支和中支所夹区域,属于典型赣江-鄱阳湖河湖交错带围垦区^[14](图 1)。全域总面积 241 km²,根据土地利用类型及人口分布,可将全域分为上、中、下 3 段,其中上段面积为 76.71 km²,人口约 7.49×10⁴ 人,农田面积为 23.14 km²;中段面积为 67.33 km²,人口约 1.84×10⁴ 人,农田面积为 24.78 km²;下段为黄湖蓄滞洪区,面积为 96.96 km²,人口约 0.14×10⁴ 人,农田面积为 55.61 km²。蒋巷联圩内共建有 16 座电排灌站,排水去向是赣江南支(9 座)、赣江中支(5 座),其中高梧和山尾仅灌不排。上段共有高梧、叶娄、后河、九成和山尾 5 个电排灌站;中段共有联圩、三斗角、胜利新和胜利 4 个电排灌站;下段共有五丰、翻身、西舍、澎泽湖、玉丰、石头河和东沙湖 7 个电排灌站。



注:人口数据来自《南昌县2022年统计年鉴》;土地利用数据来自2020年中国科学院资源环境数据中心多时期土地利用监测数据库(CNLUCC)。

图 1 蒋巷联圩电排灌站位置分布图

Fig. 1 Map of electric drainage and irrigation stations in Jiangxiang Lianwei

1.2 数据来源

电排灌站排水量数据来源于 2021 年和 2023 年完整的电排灌站的运维资料,2022 年因特大干旱,记录不完整。根据式 (1) 核算该电排灌站的年度总排放量。

$$Q = \sum_{i=1}^m Q_i = \sum_{i=1}^m (ntq) \quad (1)$$

式中: Q 为年度总排放量, m³; t 运行时间, h; n 该电排灌站开泵台数; q 结合泵站流量, m³·h⁻¹。

降雨量数据来源于中国气象科学数据共享服务网(气象数据共享网(mlogcn.com))南昌气象站 2020—2023 年逐日数据,并按照《降雨量等级(GB/T 28592—2012)》划分为小雨(0.1~9.9 mm)、中雨(10~24.9 mm)、大雨(25~49.9 mm)和暴雨(>50 mm)4 种类型。前期研究发现,退水期、枯水期是鄱阳湖水水质超标的主要时期,其中典型国控断面——南矶山断面在枯水期 TP 超标达 2.28 倍^[15]。蒋巷联圩围垦区是南矶山断面的主要汇水区域,电排灌站排水水质直接影响南矶山断面水环境质量,因此,本研究电排灌站排水水量及水质分析将按照鄱阳湖水期进行划分,即涨水期(4—6 月)、洪水期(7—9 月)、退水期(10—11 月)和枯水期(12—翌年 3 月)。

1.3 样品采集与水质指标分析

基于运维记录整理和分析发现,蒋巷联圩电排灌站排水发生在 4—9 月份,即涨水期和洪水期。为明确

降雨和人类活动强度对电排灌站排水水量和水质的影响,根据2021年总排水量分析,分别在蒋巷联圩上、中、下段选择排水量最大、排水去向分别为赣江南支、中支的2个电排灌站进行排水水质样品采集,其中上段为九成和后河;中段选择三斗角和联圩;下段选择玉丰和西舍(图1)。采样时间为2023年4—9月,每月采集1次排水水样,采用干净的聚乙烯塑料瓶(1 L)于电排灌站排口处各采集1瓶,共采集36个样品。采集现场使用便携式浊度计(WZB-175,中国)测定浊度后,样品当天带回实验室且于4℃保存,并在7 d内完成相关指标测定。水质测定指标包括化学需氧量(COD)、总氮(TN)、氨氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、总磷(TP)、溶解性总磷(DTP)和颗粒态磷(PP);有机氮由总氮减去硝态氮、氨氮和亚硝酸盐氮得到,其中亚硝酸盐氮含量低且不稳,易转化为其他形态的氮,故忽略不计^[16];PP由TP减去DTP得到。COD采用分光光度法(DR2800,美国HACH)测定,其余指标均采用国标法进行测定^[17];溶解态水质指标测定前需将水样经0.45 μm滤膜(Millipore, USA)过滤后测定。以超纯水为空白,每个采样点取3个平行样品进行分析,测得结果进行平均值计算,误差限在5%以内。

采用SPSS 23.0(IBM, USA)进行数据统计分析,Origin 2023(OriginLab, USA)和ArcMap10.8(ESRI, USA)进行可视化表达。

1.4 污染物排放负荷估算

经调研发现,围垦区地表径流主要通过电排灌站进行内外水力交换,且排放时间集中在涨水期和洪水期。基于区域独特的水文特性及文献调研^[18-19],围垦区污染负荷排放主要受排水的排放量及污染物质量浓度影响。故本研究的电排灌站排放污染负荷根据式(2)估算。

$$W = \sum QC_i \times 10^{-6} \quad (2)$$

式中: W 为围垦区电排灌站灌排的污染物负荷量, $t \cdot a^{-1}$; Q 为排水量, $m^3 \cdot a^{-1}$; C_i 为第*i*种污染物质量浓度, $mg \cdot L^{-1}$ 。

2 结果与讨论

2.1 电排灌站的排水量时空分布特征

1) 降雨量变化特征。土壤N、P流失特征与降雨量显著相关,较大降雨量条件下对土壤的冲刷力度加大,易携带较多N、P^[20]。平原圩区水网密布,水系联通,降雨是影响电排灌站排水量和水质的因子^[21]。由图2(a)可知,2020—2023年的年降雨量分别为2 096.2、1 856.7、1 559.0和1 658.4 mm,其中2022年降雨量最低,长江中下游区域遭遇罕见的大旱,鄱阳湖流域出现了1949年以来最严重的干旱^[22]。由图2(b)可知,小雨频次最高,年降雨量的平均贡献为13.98%;而暴雨频次最低,但年降雨量的平均贡献占33.65%,其中2022年暴雨贡献占比最低(24.21%),2023年最高(41.84%)。在各个水期中,小雨虽然发生频次最高,但其对各个水期的降雨量影响不显著($P>0.05$)。暴雨是各水期降雨量增加的主要降雨类型,尤其在涨水期和洪水期,例如,2020年洪水期暴雨发生5次,降雨量占比为51.10%;2021年涨水期暴雨发生

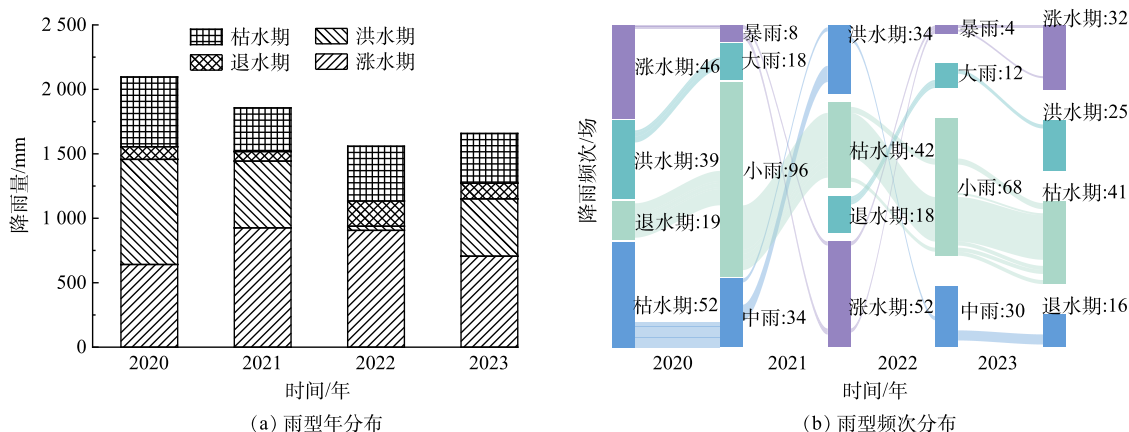


图2 不同水期下南昌市2020—2023年降雨量变化

Fig. 2 Changes in rainfall of Nanchang City from 2020 to 2023 under different water periods of Poyang Lake

了 6 次, 占该水期降雨量的 54.58%; 2022 年涨水期暴雨发生了 4 次, 降雨量占比为 41.67%; 2023 年涨水期暴雨发生了 5 次, 降雨量占比为 48.92%

2) 排水量时空分布特征。由图 3(a) 可知, 2021 和 2023 年蒋巷联圩电排灌站总排水量分别为 $1.08 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $2.69 \times 10^7 \text{ m}^3$, 其中 2023 年排水量降低了 75.04%, 这可能与 2022 年极端干旱天气影响下, 地下水储量下降有关^[23]。曹思佳等^[24] 研究发现 2022 年鄱阳湖极端干旱导致地下水迅速外泄, 是正常年份地下水排泄量的 14.5 倍。2023 年总降雨量虽与 2021 年相差不大, 但基于 2022 年的极端干旱, 2023 年降雨在较大程度上用于地下水补给, 导致 2023 年电排灌站排水量大幅下降。由图 3(b) 可知, 涨水期电排灌站排水量大于洪水期, 占总排水量的 63.36%(2021 年) 和 89.08%(2023 年)。鄱阳湖汛期气候变化对径流深度变化的影响相较于非汛期显著增加^[25], 同时长江中下游地区洪涝集中在 5—7 月, 受涝次数占全年的 80%^[26], 因此, 受汛期降雨影响, 涨水期电排灌站排水量占比增加。

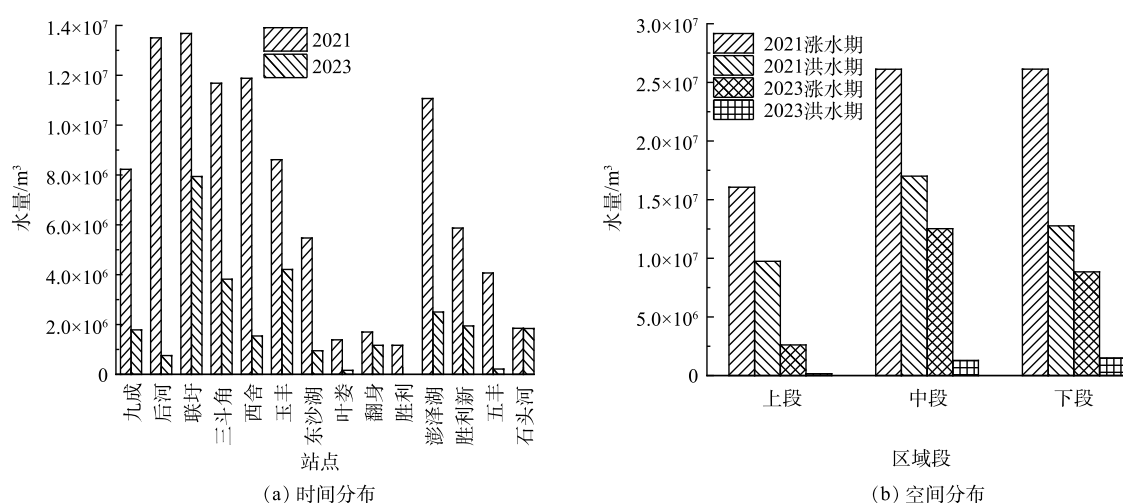


图 3 电排灌站排水量时空分布

Fig. 3 Spatiotemporal distribution of drainage water from electric drainage and irrigation stations

在排水方向上, 由于赣江南支的电排灌站布设数量大于赣江中支, 因此赣江南支排水方向的排水量大于赣江中支, 其中南支排水量占总排水量的 54.82%(2021 年) 和 53.81%(2023 年)。在排水区域分布上, 电排灌站排水量为中段>下段>上段。这与实际调研发现蒋巷联圩中段地势最低且分布有大面积水域有关 (图 1)。Pearson 分析结果表明, 电排灌站的排水量与降雨量和降雨类型呈显著正相关 ($P < 0.05$), 暴雨雨型下电排灌站日均排水量最大, 为 $6.33 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。有研究^[27] 表明, 在下垫面类型不变的条件下, 降雨强度越大, 则地表径流形成时间越短, 径流强度越大。本研究结果表明暴雨后的 7 d 内, 围垦区内电排灌站排水总量占年总排水量的 61.99%。

2.2 电排灌站排水水质的时空分布特征

1) 排水水质的时间分布特征。如图 4 所示, 2023 年电排灌站排水的 TN、TP 质量浓度均值和 COD 值分别为 (3.22 ± 2.73) 、 (0.22 ± 0.13) 和 $(16.92 \pm 8.98) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 超过地表水环境质量标准 (GB 3838-2002) III 类限值, 超标倍数均值分别为 2.23、0.29 和 0.12。HUANG 等^[28] 发现太湖低地圩区排水 TP 质量浓度均值 $0.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 储茵等^[29] 调研巢湖低地圩区排水 TN、TP 质量浓度分别为 $0.8 \sim 6.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.05 \sim 0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; HUA 等^[30] 调研发现汉江平原农业地表径流 TP 质量浓度均值为 $0.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。太湖、巢湖圩区、汉江平原和鄱阳湖流域位于长江中下游地区, 属于亚热带季风气候, 降雨量差异较小; 土地利用类型以农田为主, 主要作物类型为水稻, 研究发现地表径流氮磷浓度相似。

不同水期下电排灌站排水水质分析结果表明 (图 4), 涨水期排水 TN、TP 质量浓度高于洪水期; 涨水期排水 TN、TP 质量浓度均值和 COD 值分别为 (4.03 ± 1.61) 、 (0.23 ± 0.15) 和 $(16.36 \pm 9.92) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其超标倍数均值分别是 3.03、0.31 和 0.09; 洪水期排水 TN、TP 质量浓度均值和 COD 值分别为 (2.42 ± 1.61) 、 (0.20 ± 0.15) 和 $(17.47 \pm 9.92) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其超标倍数均值分别是 1.43、0.26 和 0.15, 这与围垦区农事活动有

关^[31]。现场调研结果表明,围垦区沟渠、坑塘密集,在4—6月(涨水期)的早稻生长季,稻田分别施加尿素和有机氮肥作为基肥和分蘖期追肥,随着高频次暴雨和大雨(图2b)导致溢流出来的田面水汇入沟渠和坑塘中,水体氮以有机氮为主^[32],洪水期围垦区内沟渠和坑塘的水体停留时间长,沟渠植被硝化速率高^[33],排水水体以 NO_3^- -N为主。因此,涨水期排水 TN 质量浓度高于洪水期,且涨水期以有机氮为主,而洪水期以无机氮为主,其中无机氮以 NO_3^- -N 为主(59.6%)。不同土地利用类型和水体污染特征在氮形态上的差异,农业低地集水区,电排灌站排水以 NO_3^- -N 主要形式^[34],而城市以 NH_4^+ -N 为主^[35]。受降雨驱动影响下的地表径流水体磷形态以 PP 为主^[36],电排灌站排水 PP 占 TP 的 60.67%,且与浊度呈显著正相关性($P<0.05$)。涨水期电排灌站排涝运行时间长,引起水体扰动大,排水沟渠中底泥再悬浮,导致涨水期浊度高于洪水期(图4c),高浊度与高 TP 浓度密切相关^[37];鄱阳湖南昌湖区南矶山断面汇入区域研究发现 TP 浓度与浊度呈显著正相关($P<0.05$),且 PP 占比超 60%^[38]。

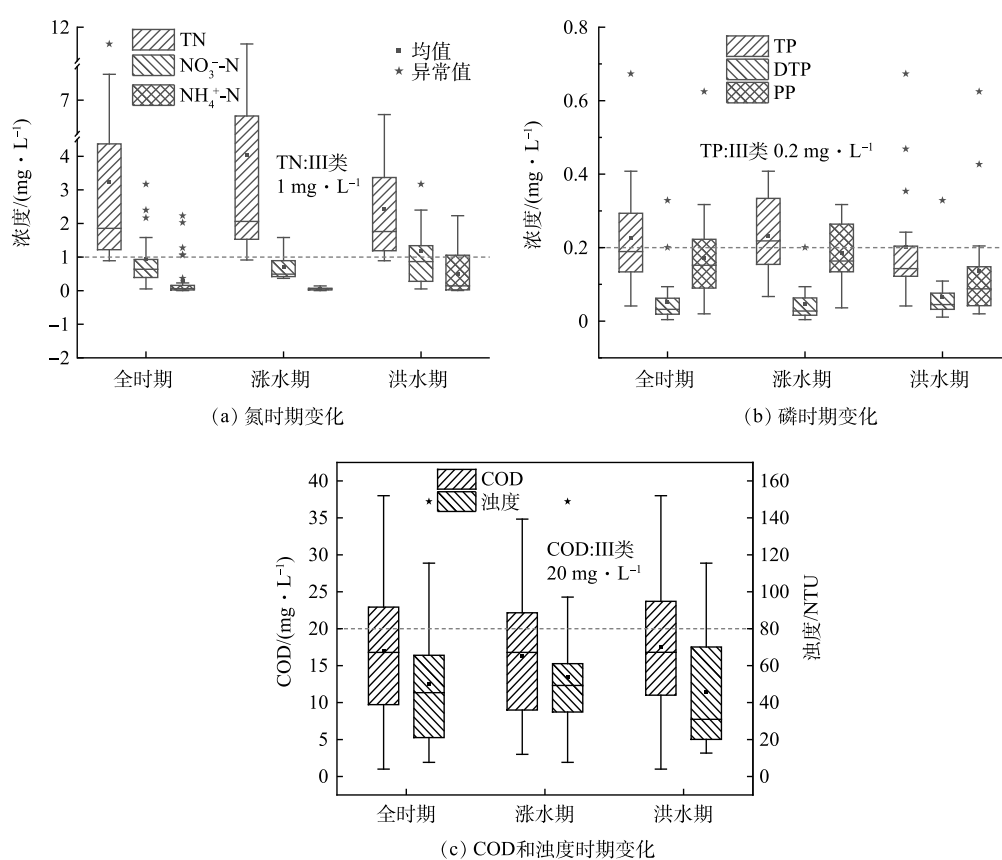


图4 电排灌站排水的主要水质参数

Fig. 4 Drainage water quality of electric drainage and irrigation stations

2) 排水水质的空间分布特征。如图5所示,排水 TN、TP 平均质量浓度和浊度为上段>下段>中段,排水 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 平均质量浓度为上段>中段>下段,排水 COD 值、DTP 平均质量浓度为下段>中段>上段。上段排水 TN、TP 平均质量浓度最高,分别为 (3.45 ± 2.09) 、 (0.26 ± 0.17) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,分别超标 2.3 倍、0.45 倍;下段排水 COD 值最高 (19.64 ± 8.9) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,超标倍数均值为 0.18。人类活动和农田种植面积是影响排水水质空间分布的重要因素,人类活动对鄱阳湖水质产生的影响不容忽视^[39-40];上段、中段和下段的人口分别占 78.73%、19.78% 和 1.48%,其农田面积占各自区域的 30.17%、36.81% 和 57.34%。蒋巷联圩上段以集镇为主,人口稠密,生活污水处理设施有待完善,未经处理的污水直排入中心沟渠,最终通过电排灌站排放至受纳水体,因此,导致排放水体中 TN、TP 浓度最高。

在排水方向上,排往南支的排水 TN、TP 质量浓度均值和 COD 值高于排往中支,其值分别为

(3.41 ± 2.9)、(19.18 ± 9.29)、(0.21 ± 0.15) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 超标倍数均值分别为 2.03、0.17、0.28。王朔月等^[41]的研究表明, 2017—2018 年赣江上游流向鄱阳湖区的氮磷浓度呈阶梯状递增, 其中赣江(下游) 污染物浓度显著高于香溪河和架竹河(上游)。刘文强等^[42]研究赣江中支周坊断面 TP 超标规律, 发现其主要发生在涨水期, 而电排灌站在涨水期的大量排水加剧了断面 TP 超标的风险。

2.3 电排灌站排水的主要污染物负荷量

由表 1 可知, 2023 年蒋巷联圩电排灌站年排放的 TN、TP 和 COD 负荷分别为 111.07、6.14 和 501.95 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$, 其中涨水期排水 TN、TP 和 COD 负荷分别占全年 93.01%、90.20% 和 86.57%。从区域分布看, 中段排放的 TN、TP 和 COD 负荷量最高, 分别占全区域 47.50%、52.67% 和 49.13%; 虽然中段排水的氮磷质量浓度低(图 5(a) 和图 5(b)), 但其排水量最大(图 3(b)), 占比超过年总排水量 50% 以上。从电排灌站排水去向看, 排往南支方向的 TN、TP 和 COD 负荷大于排往中支方向, 分别占总负荷的 51.57%、57.69% 和 56.89%。围垦区 TN 负荷年排放量是 TP 负荷的 18.07 倍, 这与高田田等^[43]对巢湖流域农业面源氮磷负荷输出结果一致; 在中低强度的降雨下, 排放的农田尾水会留在沟渠和池塘中^[44]。沟渠和池塘能够有效阻断农田氮磷输出过程, 增加水力停留时间, 且沟渠坑塘内大量水生植物能够充分吸收氮磷^[45-46]。蒋巷联圩土地利用以农田为主, 区内河网密布, 沟渠坑塘众多, 研究发现暴雨 7 d 内的排水量占总降水量的 61.99%, 因此, 建议将电排灌站作为鄱阳湖流域围垦区内农业面源污染控制的重要节点, 统筹电排灌站的运行管理, 结合天气预报, 充分利用围垦区内沟渠池塘缓滞作用, 减少农业面源污染物排放, 降低对受纳水体水环境质量的影

3 结论

1) 2023 年排水量 ($2.69\times10^7\text{ m}^3$) 较 2021 年减少了 75.04%, 涨水期因暴雨频率增加引起排水量占比增加, 由 2021 年的 63.36% 增加到 2023 年的 89.08%。年总排水量为中段>下段>上段; 赣江南支排水方向的排水量大于赣江中支。

2) 2023 年电排灌站排水中 TN、TP 的质量浓度年均值超过地表 III 水, 其中涨水期 TN 和 TP 质量浓度最高, 平均值分别为 (4.03 ± 1.61) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 (0.23 ± 0.15) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其平均超标倍数分别为 3.03、0.31; 蒋巷联圩上段电排灌站排水中 TN、TP 质量浓度最高。

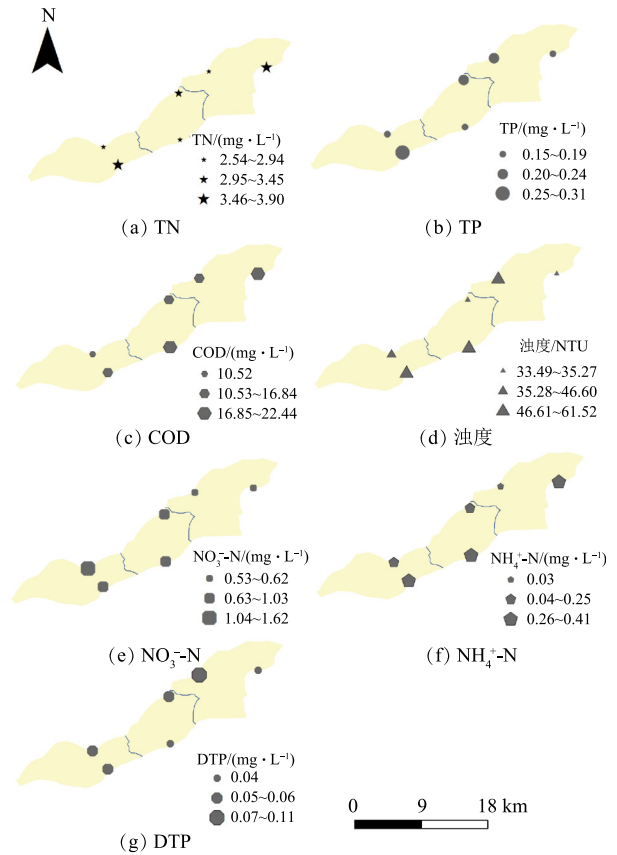


图 5 电排灌站排水主要污染物的空间变化特征

Fig. 5 Spatial variation characteristics of drainage pollutants from electric drainage and irrigation stations

表 1 蒋巷联圩电排灌站排水的主要污染物负荷估算表

Table 1 Estimated loading of drainage main pollutants from electric drainage and irrigation stations in Jiangxiang Lianwei

水期	位置	排水去向 (赣江)	排放负荷/($\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$)			负荷占比/%		
			TN	TP	COD	TN	TP	COD
涨水期	上段	中支	2.39	0.19	9.09	2.15	3.05	1.81
	上段	南支	9.58	0.56	30.63	8.62	9.11	6.10
	中段	中支	33.30	1.53	112.89	29.98	24.84	22.49
	中段	南支	16.16	1.49	106.12	14.55	24.22	21.14
	下段	中支	16.05	0.70	79.11	14.45	11.33	15.76
	下段	南支	25.83	1.08	96.70	23.26	17.64	19.27
洪水期	上段	中支	0.04	0.01	0.15	0.03	0.16	0.03
	上段	南支	0.23	0.03	1.23	0.21	0.45	0.25
	中段	中支	1.41	0.11	10.62	1.27	1.78	2.12
	中段	南支	1.89	0.11	16.98	1.70	1.82	3.38
	下段	中支	0.61	0.07	4.51	0.55	1.13	0.90
	下段	南支	3.59	0.27	33.91	3.23	4.45	6.76
合计			111.07	6.14	501.95	100	100	100

3) 2023 年电排灌站排水中 TN、TP、COD 负荷分别为 111.07、6.14 和 501.95 t·a⁻¹, 涨水期其对应的占比分别为 93.01%、90.20% 和 86.57%。中段 TN、TP、COD 负荷量占比最高, 分别为 47.50%、52.67% 和 49.13%; 赣江南支排水方向排水 TN、TP、COD 负荷大于赣江中支。

参考文献

- [1] HOU X J, FENG L, TANG J, et al. Anthropogenic transformation of Yangtze Plain freshwater lakes: Patterns, drivers and impacts[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 248: 111998.
- [2] XIE C, HUANG X, MU H, et al. Impacts of land-use changes on the lakes across the Yangtze Floodplain in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(7): 3669-3677.
- [3] 杨柳, 江丰, 谢正磊, 等. 鄱阳湖退田还湖圩区土地返耕利用的研究[J]. *中国土地科学*, 2017, 31(3): 44-50.
- [4] LI Z F, LUO C, XI Q, et al. Assessment of the AnnAGNPS model in simulating runoff and nutrients in a typical small watershed in the Taihu Lake basin, China[J]. *CATENA*, 2015, 133: 349-361.
- [5] 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.
- [6] YAN R H, LI L L, GAO J F. Modelling the regulation effects of lowland polder with pumping station on hydrological processes and phosphorus loads[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 637-638: 200-207.
- [7] VAN DER GRIFT B, BROERS H P, BERNDRECHT W L, et al. High-frequency monitoring reveals nutrient sources and transport processes in an agriculture-dominated lowland water system[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20(5): 1851-1868.
- [8] HUANG J, 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.
- [9] 徐海波, 王凯, 凌虹, 等. 江苏省主汛期水体水质变化特征及污染防治对策研究[J]. *环境污染与防治*, 2022, 44(3): 350-355.
- [10] 林晶晶, 张朦, 黄小龙, 等. 城市通江泵站排水对长江干流水质的影响——以武汉市江南泵站为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2024, 33(7): 1550-1562.
- [11] 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(C): 128258.
- [12] HUANG J, WANG X X, XIE B D C, et al. Long-term variations of TN and TP in four lakes fed by Yangtze River at various timescales[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(5): 3393-4009.
- [13] 杨中文, 张萌, 郝彩莲, 等. 基于源汇过程模拟的鄱阳湖流域总磷污染源解析[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(11): 2493-2506.
- [14] 李德龙, 黄萍, 许小华, 等. 基于 InfoWorks RS 的蒋巷联圩防洪保护区洪水演算[J]. *长江科学院院报*, 2018, 35(12): 52-56.
- [15] 朱利英, 郑利兵, 王亚伟, 等. 鄱阳湖南昌湖区典型断面总磷超标成因[J]. *中国环境科学*, 2024, 44(3): 1436-1447.
- [16] 李艳红, 王雪漫, 徐珺恺, 等. 鄱阳湖丰水期氮素分布特征及其对藻类的影响[J]. *水生态学杂志*, 2022, 43(4): 16-22.
- [17] 辛苑, 李萍, 吴晋峰, 等. 强降雨对北运河流域沙河水库水质的影响[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(1): 199-208.
- [18] 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, 2016.
- [19] XIA X H, YANG Z F, HUANG G H, et al. Nitrification in natural waters with high suspended-solid content: A study for the Yellow River[J]. *Chemosphere*, 2004, 57(8): 1017-1029.
- [20] DU Y G, LI T Y, HE B H. Runoff-related nutrient loss affected by fertilization and cultivation in sloping croplands: An 11-year observation under natural rainfall[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 319: 107549.
- [21] 徐贵茗, 耿建萍, 蒋咏, 等. 太湖流域典型平原圩区氮污染分析[J]. *江苏水利*, 2021, 24(9): 21-26.
- [22] 胡振鹏. 2022 年鄱阳湖特大干旱及防旱减灾对策建议[J]. *中国防汛抗旱*, 2023, 33(2): 1-6.
- [23] 姚仕明, 范达福, 栾华龙, 等. 鄱阳湖近年极端洪枯情势分析及应对策略[J/OL]. *长江科学院院报*, 2025: 1-9. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20240507.1501.004.html>.
- [24] 曹思佳, 李云良, 陈静, 等. 2022 年鄱阳湖极端干旱对洪泛区地下水文情势的影响[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(12): 6601-6610.
- [25] LEI X Y, GAO L, WEI J H, et al. Contributions of climate change and human activities to runoff variations in the Poyang Lake basin of China[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2021, 123: 103019.
- [26] 温泉沛, 霍治国, 周月华, 等. 南方洪涝灾害综合风险评估[J]. *生态学报*, 2015, 34(10): 2900-2906.
- [27] 朱利英, 赵凯, 张俊亚, 等. 不同降雨条件下北运河河岸带类型对径流污染削减效果的影响[J]. *环境科学*, 2022, 43(2): 770-781.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] HUA L, ZHAI L, LIU J, et al. Effect of irrigation-drainage unit on phosphorus interception in paddy field system[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 235: 319-327.
- [31] 华玲玲, 张富林, 翟丽梅, 等. 江汉平原水稻季灌排单元沟渠中氮磷变化特征及其环境风险[J]. *环境科学*, 2018, 39(6): 2715-2723.
- [32] 张富林, 吴茂前, 夏颖, 等. 江汉平原稻田田面水氮磷变化特征研究[J]. *土壤学报*, 2019, 56(5): 1190-1200.
- [33] DUAN J J, SHU T, XUE L I, et al. Nitrogen removal efficiency in sustainable eco-ditches with floating ryegrass mats: The effect of loading (hydraulic and nitrogen) and water level on N removal[J]. *Ecological Engineering*, 2023, 187: 106872.
- [34] ROZEMEIJER J C, VISSER A, BORREN W, et al. High-frequency monitoring of water fluxes and nutrient loads to assess the effects of controlled drainage on water storage and nutrient transport[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20(1): 347-358.
- [35] YU L, ROZEMEIJER J C, BROERS H P, et al. Drivers of nitrogen and phosphorus dynamics in a groundwater-fed urban catchment revealed by high-frequency monitoring[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2021, 25(1): 69-87.
- [36] GEBUS-CZUPYT B, WACH B. Application of $\delta^{18}\text{O}-\text{PO}_4$ analysis to recognize phosphate pollutions in eutrophic water[J]. *Ecohydrology & Hydrobiology*,

- 2022, 22(1): 21-39.
- [37] 张洪, 薛雪, 郁达伟, 等. 鄱阳湖水位对沉积物磷释放的影响及总磷考核建议[J]. 人民长江, 2023, 54(1): 46-52.
- [38] 朱利英, 郁达伟, 章美良, 等. 水位对鄱阳湖赣江三角洲典型断面水环境质量变化的影响[J]. 环境科学学报, 2023, 43(11): 115-124.
- [39] CHEN Y Y, DUO L H, ZHAO D X, et al. The response of ecosystem vulnerability to climate change and human activities in the Poyang lake city group, China[J]. *Environmental Research*, 2023, 233: 116473.
- [40] LIU Z, WANG X H, JIA S Q, et al. Eutrophication causes analysis under the influencing of anthropogenic activities in China's largest fresh water lake (Poyang Lake): Evidence from hydrogeochemistry and reverse simulation methods[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 625: 130020.
- [41] 王朔月, 高扬, 陆瑶, 等. 鄱阳湖多尺度流域磷源输送特征及其生态效应[J]. 环境科学, 2020, 41(7): 3186-3193.
- [42] 刘文强, 郁达伟, 李昆, 等. 降雨特征对赣江南昌段河流断面不同水期的水质影响分析[J]. 环境工程, 2023, 41(8): 91-99.
- [43] 高田田, 谢晖, 万能胜, 等. 巢湖典型农村流域面源氮磷污染模拟及来源解析[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(11): 2428-2438.
- [44] ZHANG J, HUANG J C, QIAN R, et al. Lowland artificial watersheds with unique nutrient transport: Response to natural and anthropogenic drivers[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 622(B): 129635.
- [45] 马莹, 孙鹏, 许占军, 等. 基于微生物载体技术的沟渠生态修复治理体系的构建及工程应用[J]. *环境工程学报*, 2022, 16(5): 1721-1729.
- [46] 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.

(责任编辑: 曲娜)

Spatiotemporal characteristics of the discharged water quantity and quality from electric drainage and irrigation stations in a typical reclamation area of Poyang Lake

DU Bifa¹, HUANG Jianrong¹, ZHU Liying^{2,3,*}, LI Kun¹, HU Dazhou^{2,3}, GUI Shuanglin⁵, WEI Yuansong^{1,2,3,4}

1. School of Resources and Environment, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. Laboratory of Water Pollution Control, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 5. Institute of Energy, Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330096, China

Abstract A study was conducted to examine the temporal and spatial distribution of water quantity and quality in the drainage from electric drainage and irrigation stations in the Jiangxiang Lianwei region, a representative reclamation area within the Poyang Lake Basin, through collecting the historical data of rainfall, the discharged water from electric drainage and irrigation stations and site investigation of water quality. The purpose of this study was to establish a scientific foundation for control non-point source pollution from agriculture in reclamation zones. The results showed that there was a strong positive correlation between the displacement and rainfall intensity ($P < 0.05$) or rain type, and the displacement in 2023 (26.91 million m^3) was much lower than that in 2021 by 75.04%. A higher percentage of the displacement was caused by heavy rainfall events, which predominantly occurred during the rising water period. In 2023, the average concentrations of TN and TP in the discharged water exceeded the Class III surface water standards ($1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), of which the highest concentrations of TN and TP appeared at the rising water stage, and the average times of exceeding standard were 3.03 and 0.31, respectively, and the loading of discharged phosphorus and nitrogen was over 90% of that in 2023. Spatially, the order of the displacement was the central section > lower section > upper section, the order of the average concentrations of nitrogen and phosphorus was the upper section > lower section > central section, and the order of the loading of the discharged nitrogen and phosphorus was the central section > lower section > upper section. Furthermore, compared to the middle branch, the outflow towards the south branch of the Ganjiang River showed higher water volumes, nitrogen and phosphorus concentrations and loadings.

Keywords electric drainage and irrigation stations; spatial and temporal distribution; water quality analysis; reclamation area