

基于田间原位监测的稻田排水化学需氧量动态变化及沟道调蓄削减研究

黄昕然, 黄增健, 李江, 缴锡云, 郭维华, 顾哲, 刘凯华

引用本文:

黄昕然, 黄增健, 李江, 等. 基于田间原位监测的稻田排水化学需氧量动态变化及沟道调蓄削减研究[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(8): 2023–2032.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2025-0184>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同雨强和植被盖度对稻田径流及氮素流失的影响

严磊, 邓旭哲, 薛利红, 侯朋福, 徐德福, 杨林章

农业环境科学学报. 2021, 40(12): 2761–2769 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0397>

种植方式对稻田氨挥发及氮磷流失风险的影响

杨振宇, 罗功文, 赵杭, 胡旺, 王艺哲, 张含丰, 张玉平

农业环境科学学报. 2021, 40(7): 1529–1537 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1481>

巢湖圩区再生稻田甲烷及氧化亚氮的排放规律研究

王天宇, 樊迪, 宋开付, 张广斌, 徐华, 马静

农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1829–1838 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0181>

不同灌溉模式和施氮量条件下稻田甲烷排放及其与有机碳组分关系

王楷, 李伏生, 方泽涛, 董艳芳, 刘靖雯, 黄忠华, 罗维钢

农业环境科学学报. 2017, 36(5): 1012–1020 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1581>

稻田氨挥发和水稻产量对增效复合肥减氮施用的响应

朱荣, 柳丽丽, 齐永波, 穆静, 蒋东, 章力干, 郜红建

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 1935–1943 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0104>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

黄昕然, 黄增健, 李江, 等. 基于田间原位监测的稻田排水化学需氧量动态变化及沟道调蓄削减研究[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(8): 2023–2032.

HUANG X R, HUANG Z J, LI J, et al. Dynamic changes of chemical oxygen demand in paddy field drainage and reduction of channel storage and storage based on *in-situ* field monitoring[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2025, 44(8): 2023–2032.



开放科学 OSID

基于田间原位监测的稻田排水化学需氧量动态变化及沟道调蓄削减研究

黄昕然¹, 黄增健^{1,2}, 李江^{1,3*}, 缴锡云^{1,4}, 郭维华^{1,4}, 顾哲^{1,4}, 刘凯华^{1,4}

(1. 河海大学农业科学与工程学院, 南京 210098; 2. 上海浦河工程设计有限公司, 上海 200333; 3. 农业水资源高效利用全国重点实验室(中国农业大学), 北京 100083; 4. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 南京 210098)

摘要:为探究南方水网区稻田面源化学需氧量(COD)排放特征,本研究于江苏省常州市武进区太湖湾耕读基地进行为期2 a的田间原位监测试验。基于试验数据对水稻全生育期内田沟水深、COD动态变化及其排放特征进行分析,并对沟道排水调蓄过程中COD的去除效果进行研究。结果表明:水稻返青期和分蘖期是面源污染排放的关键时期,2023年稻田、沟道承接稻田总排水量分别为 $4\,501.0\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $6\,754.5\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$,此时稻田排水量和COD排放量显著增加;施肥是稻田和沟道水体COD浓度上升的主要原因,2024年施用基肥后COD浓度达 $46.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,拔节期施肥后COD浓度最高升至 $81.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;而降雨、灌溉、排水的交替作用使得全生育期内COD浓度呈现波动变化趋势;全生育期内稻田水COD平均浓度均大于或等于沟道水COD平均浓度;将稻田排水调蓄在沟道内并进行一段时间的消解,3次调蓄试验的COD减排量分别为 1.0 、 0.8 、 $2.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。研究表明,返青期和分蘖期是稻田COD排放的关键阶段,需重点关注该时期的水质管理;施肥事件会显著提高短时间内的水体COD浓度,应合理控制施肥时间和方式;沟道调蓄可有效削减 14.5% ~ 27.0% 的COD负荷,是控制稻田面源污染的有效手段。

关键词:面源污染;化学需氧量;稻田;排水沟;去除率

中图分类号:X71;X52 文献标志码:A 文章编号:1672–2043(2025)08–2023–10 doi:10.11654/jaes.2025-0184

Dynamic changes of chemical oxygen demand in paddy field drainage and reduction of channel storage and storage based on *in-situ* field monitoring

HUANG Xinran¹, HUANG Zengjian^{1,2}, LI Jiang^{1,3*}, JIAO Xiyun^{1,4}, GUO Weihua^{1,4}, GU Zhe^{1,4}, LIU Kaihua^{1,4}

(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Shanghai Puhe Engineering Design Co., Ltd., Shanghai 200333, China; 3. National State Key Laboratory of Efficient Utilization of Agricultural Water Resources, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 4. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to explore the emission characteristics of non-point chemical oxygen demand (COD) from paddy fields in the southern water network area, a two-year field *in-situ* monitoring experiment was conducted in the Taihu Lake Bay Cultivation and Reading Base, Wujin District, Changzhou City, Jiangsu Province. Based on experimental data, this study analyzes the water depth, COD dynamic changes, and emission characteristics of paddy ditches throughout the entire growth period, and investigates the COD removal efficiency during the drainage and storage process of the ditches. The results showed that the greening and tillering stages of rice are key periods for non-point

收稿日期:2025-02-26 录用日期:2025-06-20

作者简介:黄昕然(2001—),女,安徽合肥人,硕士研究生,从事农业高效用水研究。E-mail:231310010024@hhu.edu.cn

*通信作者:李江 E-mail:lijiang@hhu.edu.cn

基金项目:国家重点研发计划子课题(2021YFD1700803-02, D21YFD17008);农业水资源高效利用全国重点实验室开放研究基金项目(SKLAWR-2024-10);国家自然科学基金项目(52209052)

Project supported: National Key Research and Development Program of China(2021YFD1700803-02, D21YFD17008); Open Research Fund of State Key Laboratory of Efficient Utilization of Agricultural Water Resources (SKLAWR-2024-10); National Natural Science Foundation of China (52209052)

source pollution emissions. In 2023, the total drainage of paddy fields and gully connected paddy fields were $4\ 501.0\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ and $6\ 754.5\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively. At this time, the drainage and COD emissions of paddy fields significantly increased; Fertilization is the main reason for the increase in COD concentration in paddy fields and ditch water bodies. After applying base fertilizer in 2024, the COD concentration reached $46.2\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and the highest COD concentration reached $81.0\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ after fertilization during the jointing stage; The alternating effects of rainfall, irrigation, and drainage result in fluctuating COD concentrations throughout the entire growth period; The average concentration of COD in paddy water throughout the entire growth period is greater than or equal to the average concentration of COD in channel water; The drainage from the paddy field was stored in the ditch and digested for a period of time. The COD reduction rates from three storage experiments were 1.0, 0.8, and $2.0\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively. Research has shown that the greening and tillering stages are critical stages for COD emissions in paddy fields, and water quality management during these periods should be given special attention; Fertilization events can significantly increase the COD concentration in water bodies in a short period of time, and the timing and method of fertilization should be reasonably controlled; Channel regulation and storage can effectively reduce COD load by 14.5% to 27.0%, and is an effective means of controlling non-point source pollution in rice fields.

Keywords: non-point source pollution; chemical oxygen demand; paddy field; drainage ditch; removal rate

水稻作为我国重要的粮食作物之一,《国家统计局关于2023年粮食产量数据的公告》中显示,稻谷种植面积占谷物总播种面积的28%,年产量维持在2亿吨左右,是我国粮食安全的重要保障。然而,随着农业生产的快速发展,水稻种植过程中的面源污染问题日益凸显。太湖流域作为典型的南方水网稻作区,其农田排放的污染物主要是氮、磷等,降雨产生的地表径流以及人为排水使污染物经农田排水口排出或田埂溢出后进入排水沟渠,再汇入周边塘浜,最终进入河流^[1],导致下级水体富营养化,其中稻田氮素流失贡献比例为47.8%~60.3%,而磷素流失比例为7.8%~14.4%^[2]。此外,稻田排水中的有机污染物(如农药残留和作物残体)也会影响水体的自净能力和水生生态系统的健康,引发区域水体污染物的无序排放,进而对水生生态系统造成破坏,威胁区域水环境安全,成为农业面源污染的重要来源^[3]。

南方水网区作为我国水稻生产的核心区域,主要包括长江中下游平原、珠江三角洲和华南双季稻区,其贡献了全国约66%的水稻产量。其中,太湖流域作为重要的优质水稻产区,其密集的水网和丰富的水资源为水稻种植提供了得天独厚的条件,但同时也使得该地区面临更为严峻的面源污染扩散风险^[4]。在该区域,稻田排水通过沟道系统进入周边水体,这一过程中携带的大量农田面源污染物,尤其是施肥残留的氮、磷等营养盐以及有机污染物,导致水体化学需氧量(COD)显著升高。研究表明,稻田排水中的COD主要来源于有机肥料的分解、土壤有机质的流失以及农药残留等,这些污染物在排水过程中通过地表径流和地下渗漏进入沟道系统,并最终汇入周边水体,导致水体富营养化和有机污染加剧。此外,高浓度的COD不仅

影响水体自净能力,还可能对水生生态系统造成破坏,进而威胁区域水环境安全^[5]。因此,研究“稻田-沟道”系统中COD的动态变化特征,对于揭示稻田面源污染的形成机制、评估沟道系统的去除效果具有重要意义。

“稻田-沟道-塘浜”是我国南方稻作区的一种典型结构,旨在实现灌溉排水、养分循环、防洪抗旱等功能^[6]。农田排水沟道是南方稻作区“稻田-沟道-塘浜”三级系统中的重要一环,主要负责承接稻田排水,并排入下级负责接纳水体的塘浜河道中,其作为农田污染物受纳的第一场所,主要通过物理拦截^[7]、植物吸收^[8]和微生物降解^[9]等多种机制消解稻田排水中的面源污染物。近年来,有关农田排水沟削减污染物的研究不断深入,罗纨等^[10]认为沟道能削减70%~84%农田排放的污染物;段四喜等^[11]通过试验表明沟道对COD的平均削减率为38.33%;张迎颖等^[12]通过设置不同强化净化措施的沟渠,得到了60.0%~78.1%的COD削减率。此外,沟道形状^[13]、材质^[8]、种植植物^[14]等因素也会影响实际面源污染物去除效果。尽管已有大量研究探讨了农田排水沟道的污染物消纳能力,但由于研究区域、实验条件和方法的不同,研究结果仍存在较大差异。此外,现有研究多集中于短期实验,对于沟道长期运行过程中的污染物去除稳定性研究较少,且在复杂多变的实际稻田环境中,如何综合考虑各种因素并制定出具有普适性和高效性的沟道优化方案,也是亟待解决的难题。

基于此,本研究通过为期2a的田间原位监测试验,系统分析了水稻全生育期内稻田、沟道水深及COD浓度的动态变化特征,并基于3次沟道关闸调蓄过程对水体的自净降解作用进行了重点探究,旨在为南方稻作区稻田、沟道的污染物减排与水质管理提供

科学依据,以充分发挥现有沟道对稻田排水的水质净化潜力,从而促进农业面源污染的有效控制与生态环境的可持续发展。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于江苏省常州市武进区雪堰镇新康村太湖湾耕读基地(31°54' N, 120°00' E),该地属太湖流域,为典型亚热带季风气候,年均降水量达1 149 mm,降水多集中于夏秋时期,年均蒸发量1 351 mm,年均气温15.6℃,全年无霜期227 d。试验区有约60 a的耕种历史,土壤肥力较高,质地以黏土为主,有机质含量为2.36%,总氮含量为1.26 g·kg⁻¹,pH为6.60。试验田块配套的排水沟道内种植有美人蕉、菖蒲等水生植物。由于长期滞水,沟道土壤处于还原环境,质地以黏土为主,透水性较差,表层呈现典型的青灰色潜育化特征。当地水系纵横,水网密布,通过泵站从河浜提水对稻田进行灌溉。试验田块配有1条排水沟道,1处塘浜,排水路径为:稻田排水至排水沟道,沟道水经末端智慧闸门后排入塘浜。研究区域内稻田面积共计26 500 m²,选择区域内最东侧稻田,作为代表田块进行定期水质采样分析,其面积为6 580 m²,田间排水口高度距田面为70 mm。排水沟道为土沟,沟道总长320 m,全程平均宽度约为1 m,深

1.5 m,面积为1 112.5 m²,末端与塘浜衔接处建有智慧闸门1处,可控制闸门启闭,调控排水量大小。

1.2 试验设计

研究区内种植水稻,品种为南粳46。于2023、2024年进行为期2 a的试验,稻田水分管理均为常规灌排模式,水稻生育期内灌水上限、下限,蓄雨上限及施肥方案参照技术规范确定,具体如表1所示。

本试验共设置稻田、沟道2处水样采集点,其中稻田采样点分别位于试验田块的东、南、西3处,沟道采样点位于农沟的首端及末端,至试验田块排水口和沟道末端排水闸门的距离分别为3 m和5 m(图1),每处采样点均设置3个重复。日常情况下,每5 d取样一次;如遇施肥事件,则需在施肥前1 d及施肥后1、3、5 d分别取样,并在取得样品的24 h内采用重铬酸盐法(HJ 828—2017)对COD浓度进行化验分析。此外,每日上午7时与下午5时采用水尺分别观测稻田与沟道水深,如发生灌水事件,则对田间来水进行测量估计,精确到毫米。

2023年沟道在承接稻田来水后,有水即排。2024年试验期间依托排水沟道末端闸门对排水沟道进行排水调蓄,方案如表2所示。

1.3 面源污染物排放与去除率计算方法

1.3.1 排水计算方法

稻田和沟道COD排放的主要途径为径流损失,

表1 试验期间水稻灌溉排水与施肥制度

Table 1 Irrigation, drainage and fertilization system of rice during the experiment period

年份 Year	生育期 Growth period	灌溉 Irrigation			施肥 Fertilization			
		灌水上限 Irrigation upper limit/mm	灌水下限 Irrigation lower limit/mm	蓄雨上限 Upper limit of rainfall storage/mm	施肥量 Fertilizer amount/ (kg·hm ⁻²)	施肥日期 Fertilization date	肥料种类 Fertilizer type	成分配比 Composition ratio
2023	返青期(06-17—06-30)	30	10	70	750	06-17	缓释肥(基肥)	有效成分≥48% N-P-K:30-6-12
	分蘖期(07-01—08-06)	50	20	70				
	拔节期(08-07—08-22)	70	30	70	300	08-09	尿素(穗肥)	含氮量≥46%
	抽穗期(08-23—09-11)	50	20	70				
	成熟期(09-12—11-01)	自然落干	自然落干	自然落干				
2024	返青期(06-12—06-20)	30	10	70	600	06-12	缓释肥(基肥)	有效成分≥48% N-P-K:30-6-12
	分蘖期(06-21—08-03)	50	20	70				
	拔节期(08-04—08-30)	70	30	70	225	08-09	缓释肥(穗肥)	有效成分≥40% N-P-K:20-7-13
	抽穗期(08-31—09-10)	50	20	70				
	成熟期(09-11—11-01)	自然落干	自然落干	自然落干				

注:试验区稻田田面与排水口高差70 mm,因此最大蓄雨上限均为70 mm。

Note: The height difference between the paddy field surface and the drainage outlet in the test area is 70 mm, so the maximum rainfall storage upper limit is 70 mm.

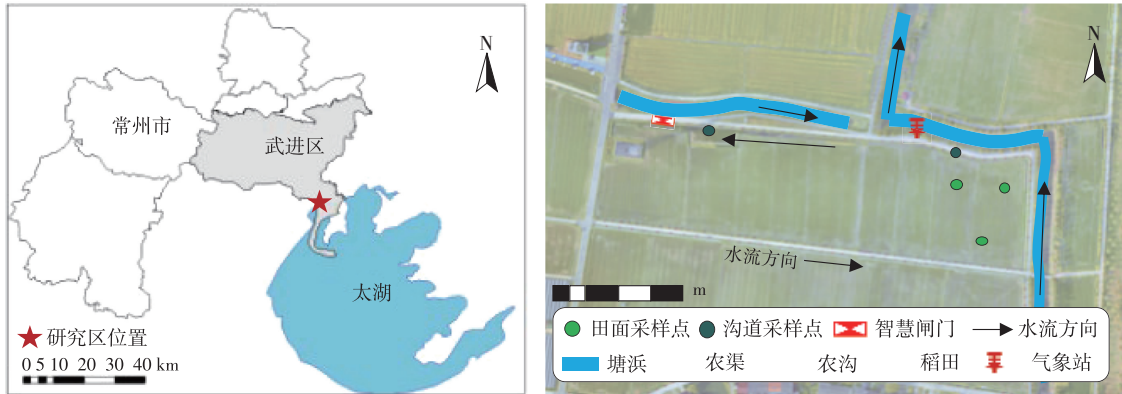


图1 研究区位置与采样点分布图

Figure 1 Distribution of location and sampling points in the study area

表2 沟道排水调蓄方案

Table 2 Channel drainage storage scheme

年份 Year	时间 Date	闸门状态 Gate state	备注 Remark
2023	水稻全生育期	开启	沟道有水即排, 不作调蓄
2024	06-13—06-17	关闭	6月13日稻田为配合施肥进行灌溉发生排水
	07-05—07-09	关闭	7月5日因稻田日常灌水发生排水
	07-18—07-24	关闭	7月18日因稻田日常灌水发生排水
	07-25—08-01	关闭	7月25日因稻田日常灌水发生排水
	其余时间	开启	降雨过程中为满足排水需求而保持开启

主要分别由田面排水及沟道排水导致。其计算方式为先由水量平衡公式计算得出稻田及沟道各自的排水量,再根据水中COD浓度计算生育期内的COD排放量^[15]。具体公式如下:

$$H_{\text{field}_t} = H_{\text{field}_{t-1}} + P_t + I_t - S_{\text{field}_t} - D_{\text{field}_t} - ET_{c_t} - L_{\text{field}_t} \quad (1)$$

式中: H_{field_t} 为第 t 天的稻田水层深度, mm; P_t 为第 t 天降水量, mm; I_t 为 t 时刻田间灌水量, mm; S_{field_t} 为第 t 天稻田渗漏量, 本研究中参考实际生产过程经验取值, 设为 3 mm; D_{field_t} 为第 t 天地表排水量, mm; ET_{c_t} 为第 t 天作物蒸散发量, mm; L_{field_t} 为第 t 天稻田侧渗量, 本研究区内稻田侧向渗漏可以忽略^[16], 故取 0。该公式计算时所用时间步长为 1 d。

稻田水位上限超过最大蓄雨深度时, 视作稻田向沟道排水, 排水量计算方式如下:

$$D_{\text{field}_t} = \begin{cases} H_{\text{field}_t} - H_p & H_{\text{field}_t} > H_p \\ 0 & H_{\text{field}_t} \leq H_p \end{cases} \quad (2)$$

式中: D_{field_t} 为第 t 天地表排水量, mm; H_p 为降水或灌溉后稻田最大允许蓄水深度, 本试验根据田间实际情况, 取值为 70 mm。

作物蒸散发量参照作物系数法进行计算, 其相关

公式如下:

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (3)$$

式中: ET_c 为作物蒸散发量, $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$; K_c 为作物系数, 本研究中各生育期作物系数取值见表 3^[17]。

表3 作物系数取值

Table 3 Crop coefficient value

作物生育期 Crop growth period	取值范围 Value range	取值 Value
返青期	0.8~1.0	0.95
分蘖期	1.2~1.4	1.35
拔节期	1.6~1.7	1.65
抽穗期	1.9~2.0	1.95
成熟期	0.9~1.0	0.95

沟道作为稻田排水系统的重要一环, 承担着排水和蓄滞、消解污染物的重要功能。当发生大规模降水事件时, 沟道需承接稻田来水, 并尽快向下一级河浜排水。试验期间, 若沟道底部闸门打开, 则沟道有水即排, 且视作单日内可将水完全排尽。在沟道底部闸门关闭并对稻田来水进行蓄滞的这一时期, 沟道水量平衡公式如下:

$$H_{\text{ditch}_t} = H_{\text{ditch}_{t-1}} + P_t + \frac{D_{\text{field}_t} \times A_{\text{field}}}{A_{\text{ditch}}} - E_{\text{ditch}_t} - S_{\text{ditch}_t} \quad (4)$$

式中: H_{ditch_t} 和 $H_{\text{ditch}_{t-1}}$ 分别为第 t 天和第 $t-1$ 天的沟道水深, mm; P_t 为第 t 天降水量, mm; D_{field_t} 为第 t 天稻田排出水量, mm; A_{field} 为沟道承接排水的稻田总面积, 取值为 26 500 m^2 ; A_{ditch} 为沟道总面积, 取值为 1 112.5 m^2 ; E_{ditch_t} 为第 t 天沟道水面蒸发量, mm; S_{ditch_t} 为第 t 天沟道渗漏量, 沟内无排水时, 其值为 0, 沟道承接稻田排水时, 依据相关土壤质地, 设其值为 3 mm ^[18]。

1.3.2 面源污染物排放计算方法

在根据水量平衡公式计算得出稻田及沟道各自

的排水量后,可根据水中COD浓度计算各生育期内的COD排放量。具体公式如下:

$$F_{\text{field}} = \frac{0.01 \times \sum (D_{\text{field}_t} \times C_{\text{field}_t})}{A} \quad (5)$$

$$F_{\text{ditch}} = \frac{0.01 \times \sum (D_{\text{ditch}_t} \times C_{\text{ditch}_t})}{A} \quad (6)$$

式中: F_{field} 和 F_{ditch} 分别为稻田及沟道的COD排放量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; D_{field_t} 和 D_{ditch_t} 分别为第 t 天稻田和沟道所排出的水量, mm ; C_{field_t} 和 C_{ditch_t} 分别为第 t 天稻田水和沟道水COD的浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

1.3.3 COD去除率

在本研究中,COD负荷的计算需要依赖COD浓度实测值以及对应水位深度,其换算公式如下:

$$L_{\text{COD}} = C_t \times H_t \times 0.01 \quad (7)$$

式中: L_{COD} 为第 t 天水体COD负荷, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; C_t 为第 t 天水体浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; H_t 为第 t 天水深, mm 。

在评价沟道调蓄期间对COD的削减效率时,常采用去除率进行描述,其公式如下:

$$\eta = \frac{L_{\text{COD}_{\text{进}}} - L_{\text{COD}_{\text{出}}}}{L_{\text{COD}_{\text{进}}}} \times 100\% \quad (8)$$

式中: η 为调蓄期间的COD去除率,%; $L_{\text{COD}_{\text{进}}}$ 为进水时水中COD负荷, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; $L_{\text{COD}_{\text{出}}}$ 为调蓄结束排水时水中COD负荷, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

2 结果与分析

2.1 田沟水深动态变化

2.1.1 稻田

图2为2023、2024年水稻生育期内稻田水深动态

变化情况。由图2可知,2023、2024年水稻生育期内总灌水量分别为435.0 mm和515.0 mm,总降水量分别为622.6 mm和947.3 mm,对应年内最大日降雨量分别为110.2 mm和152.6 mm。从全生育期来看,2 a的实际田面水深均呈波动变化,不同生育期的田面水深变化差异明显,由于受到实际排口高度的限制,田面最大水深均维持在70 mm左右。此外,2023、2024年分蘖期的田面水深呈现波动下降的趋势,且在分蘖末期落干,2023年于分蘖末期共落干18 d,2024年共落干6 d。

2.1.2 沟道

图3为2023、2024年水稻生育期内沟道实测水深动态变化情况。从全生育期来看,2023、2024年沟道承接稻田总排水量分别为4 501.0 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 和6 754.5 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。2 a的沟道实测水深动态变化均呈现波动变化的趋势,且返青期至分蘖期的波动频率更大,这可能与稻田灌排模式、降雨等因素有关。返青期至分蘖期阶段正值梅雨季节,降雨事件频发,雨量充沛,导致稻田水位超过蓄雨上限而产生排水,此外,水稻的生长特性也在一定程度上影响沟道水深的变化。

2.2 田沟水COD浓度动态变化

图4a和图4b分别为2023、2024年水稻生育期内COD浓度变化情况。由图4a和图4b可知,2023、2024年在返青期时田、沟水COD浓度均出现陡然上升现象,其峰值的出现主要受施用基肥的影响。分蘖期时稻田、沟道水COD浓度呈现出波动变化的趋势,产生该现象的原因可能是分蘖期是水稻生长的关键阶段,该阶段稻田需进行多次灌溉与排水操作(图2和图

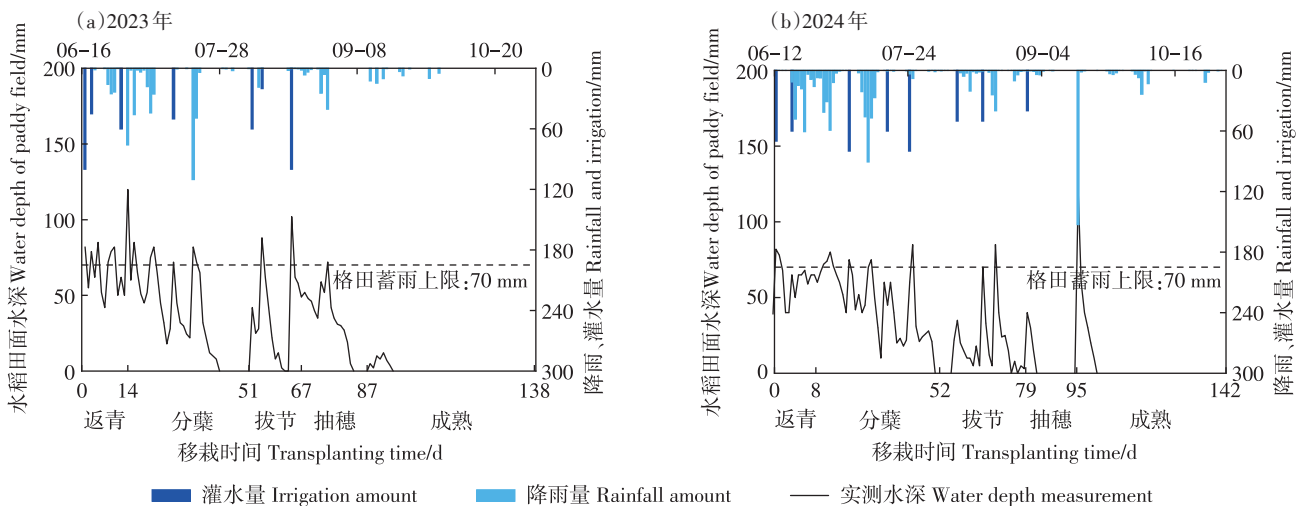


图2 稻田水深动态变化情况

Figure 2 Dynamic change of water depth in paddy field

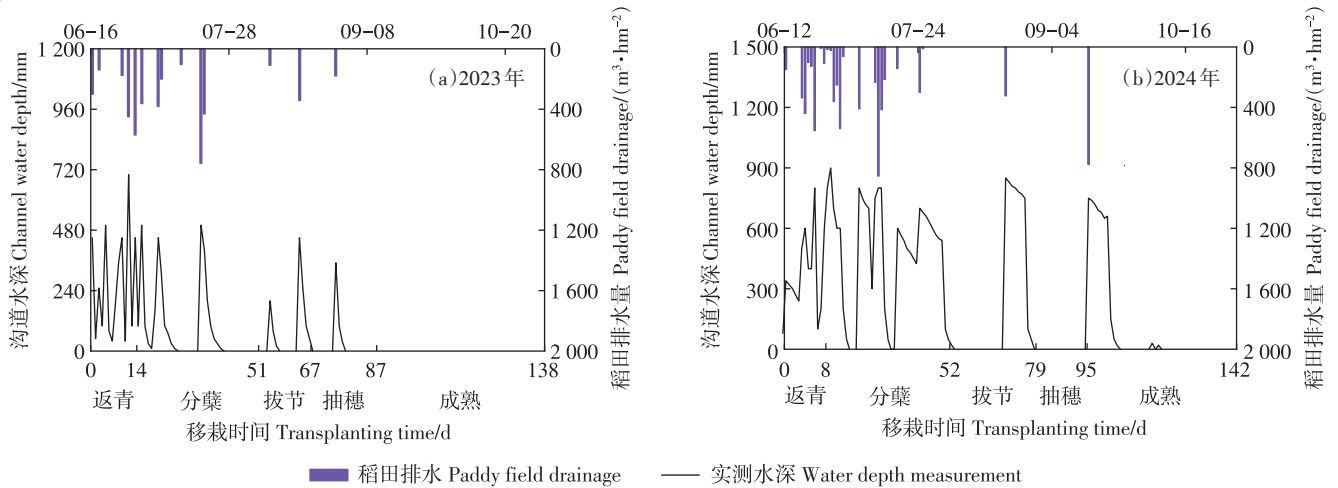


图3 沟道水深动态变化情况

Figure 3 Dynamic change of ditch water depth

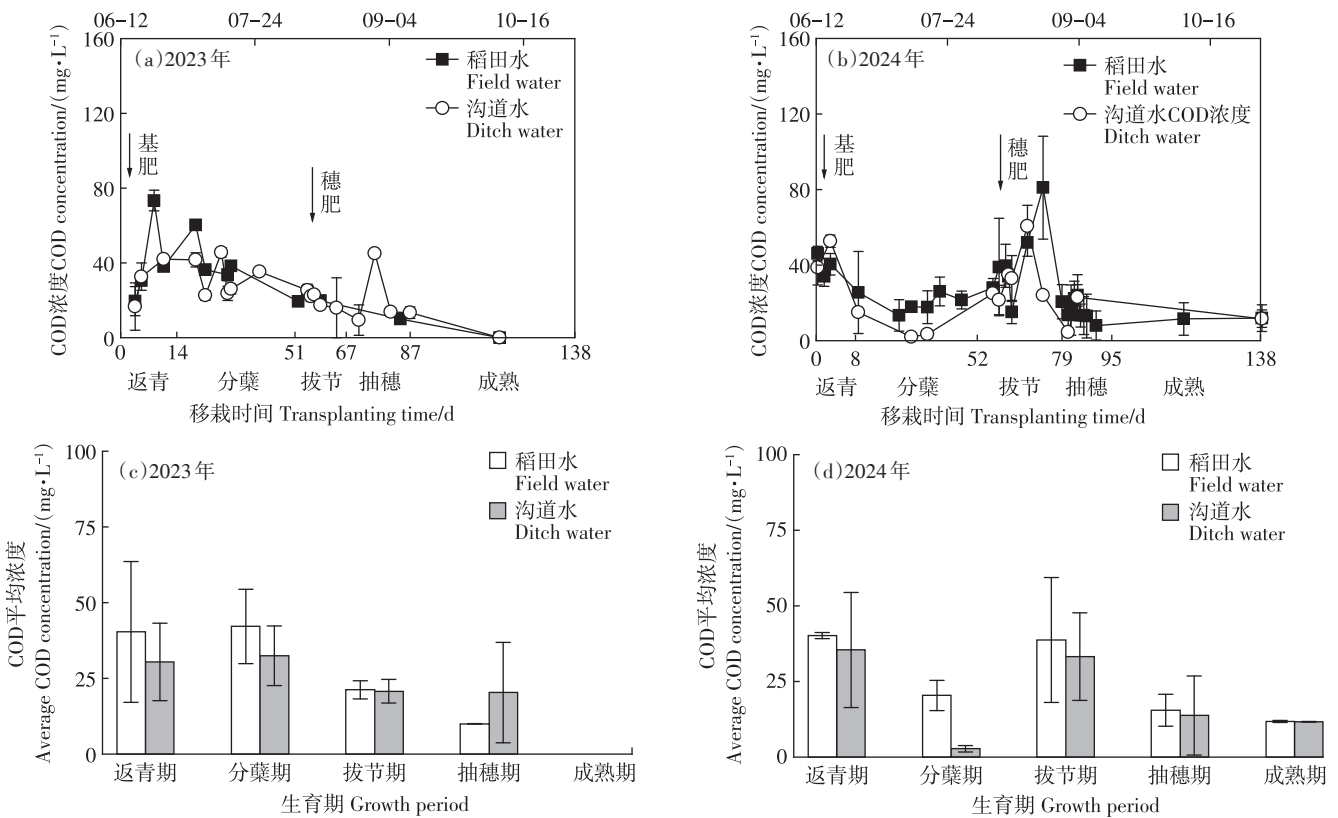


图4 稻田、沟道水COD浓度动态变化情况

Figure 4 Dynamic change of COD concentration in paddy field and ditch water

3),灌溉时稻田中的有机物和土壤颗粒被水流带入沟道,增加了水中的有机负荷,进而导致COD浓度上升,而在排水过程中,沟道水体得以更新,COD浓度则因稀释作用而降低,这种灌溉与排水的交替作用是导致分蘖期稻田水和沟道水COD浓度呈现波动变化的重要原因。2023、2024年均于拔节期进行施肥,但

二者COD浓度变化趋势不同,即2023年田、沟水COD浓度在施肥后出现缓慢上升趋势,而2024年呈现出迅速上升现象,这一差异主要由于2023年施肥期间稻田发生了较多的降雨产流事件(图2a),导致田间肥力流失,限制了COD浓度的升高。而2024年返青期内,施用基肥后COD浓度为 $46.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,在多次稻

田排水事件发生后,返青期结束时降至 $25.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,同年拔节期内则由于仅发生1次排水事件(图2b),稻田水COD浓度能在一定时间内逐渐升高,从8月10日施肥后1d的 $39.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 升至8月24日最大值 $81.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。成熟期水稻自然落干,稻田、沟道中无水层,田、沟水COD浓度均逐渐下降,直至平稳。

图4c为2023年不同生育期内道田、沟道水COD平均浓度动态变化趋势。由图4c可知,受施用基肥的影响,返青期-分蘖期内稻田、沟道水COD平均浓度均呈现缓慢上升趋势,而分蘖期-成熟期内稻田水COD平均浓度持续下降,沟道水COD平均浓度除拔节期-抽穗期(极小上升, $0.40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)外,其余生育期也均为下降趋势。图4d为2024年不同生育期内稻田、沟道水COD平均浓度动态变化趋势。由图4d可知,2024年水稻全生育期内稻田、沟道水COD平均浓度变化一致,均呈现出“高-低-高-低”的波动下降趋势,其峰值的出现主要受施肥时间的影响。此外,全生育期内稻田水COD平均浓度均大于或等于沟道水COD平均浓度,产生这种现象的原因可能是稻田水体中有机物的输入量较高,且稻田水体流动性较差,导致有机物积累。

2.3 稻田及沟道面源污染物排放分析

图5为2023、2024年稻田及沟道不同生育期内排水量和COD排放量变化情况。由图5a可知,2023年稻田、沟道的COD排放量和排水量主要集中在返青期与分蘖期,这一现象主要与2023年的气候条件与水管理方式有关。在返青期,稻田水位普遍保持较高水平,受降雨、排水等因素驱动,稻田向沟道中产生

了较多排水,这些排水携带了大量的溶解性有机物和营养物质,从而导致沟道中的COD排放量显著增加。此外,分蘖期时间较长,且正值梅雨季节,雨量丰沛,进一步增加了稻田排水的频率和水量,使得排水量和COD排放量在这一时期达到峰值。相比之下,在拔节、抽穗和成熟期,由于稻田水位较低、降水事件减少,排水量和COD排放量显著降低。2024年的稻田、沟道的COD排放量和排水量则主要集中在分蘖期(图5b),出现这一现象的原因主要是2024年降水量主要集中在分蘖期,这一时期的累计降水量达到 509.80 mm ,显著高于其他生育期,此外,分蘖期强降雨事件频发,导致稻田水位超过蓄雨上限而产生排水,将前期积累的有机物质通过地表径流和地下渗漏等途径输出,形成显著的面源污染负荷。

2.4 沟道调蓄期间COD去除效果分析

图6为2024年间3次沟道关闸蓄滞期间沟道内水位、COD浓度及排放量的变化情况,其中,分别在6月13日至6月17日、7月18日至7月24日、7月25日至8月1日这3个时段内对稻田来水进行关闸蓄滞(因数据量过少,不列出7月5日至7月9日相关结果)。如图6a所示,由于蒸发、渗漏等因素影响,在沟道开闸排水前,3次蓄滞过程中水深略微下降。图6b则为3次蓄滞期间沟道水体实测COD浓度变化,其中,前两次蓄滞期间,沟道水COD浓度呈现先减小后增加的趋势,第3次蓄滞期间,沟道水COD浓度则持续下降,由 $17.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至 $15.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。总体而言,从蓄滞开始至开闸排水,沟道水COD浓度显著降低。此外,根据公式(6)对沟道COD排放量进行计算,结

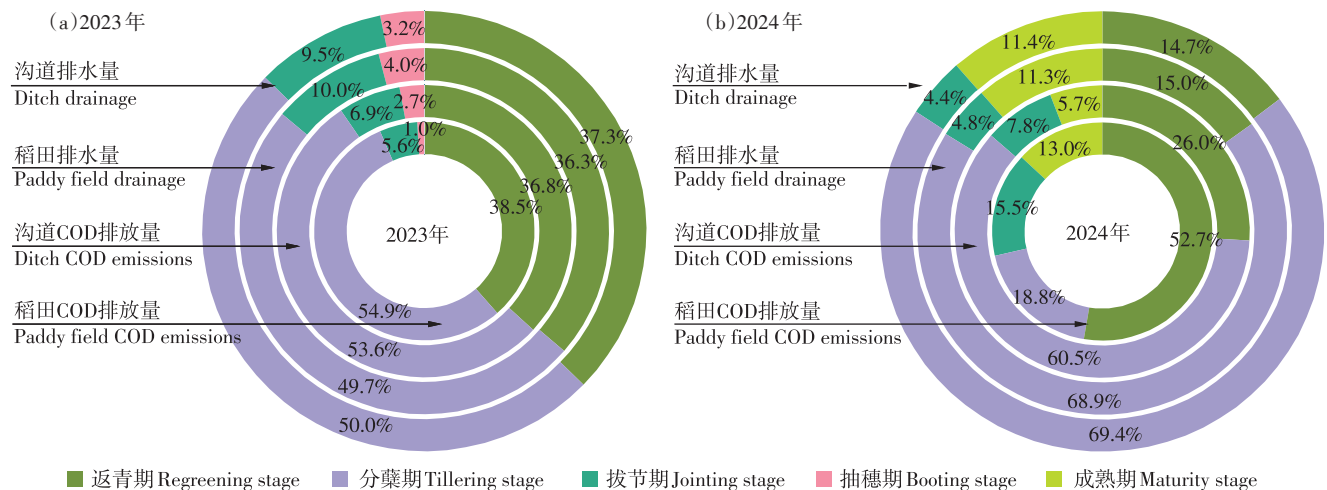


图5 2023年及2024年水稻全生育期稻田、沟排水以及COD排放分析

Figure 5 Analysis of ditch drainage and COD emission during the whole growth period of rice in 2023 and 2024

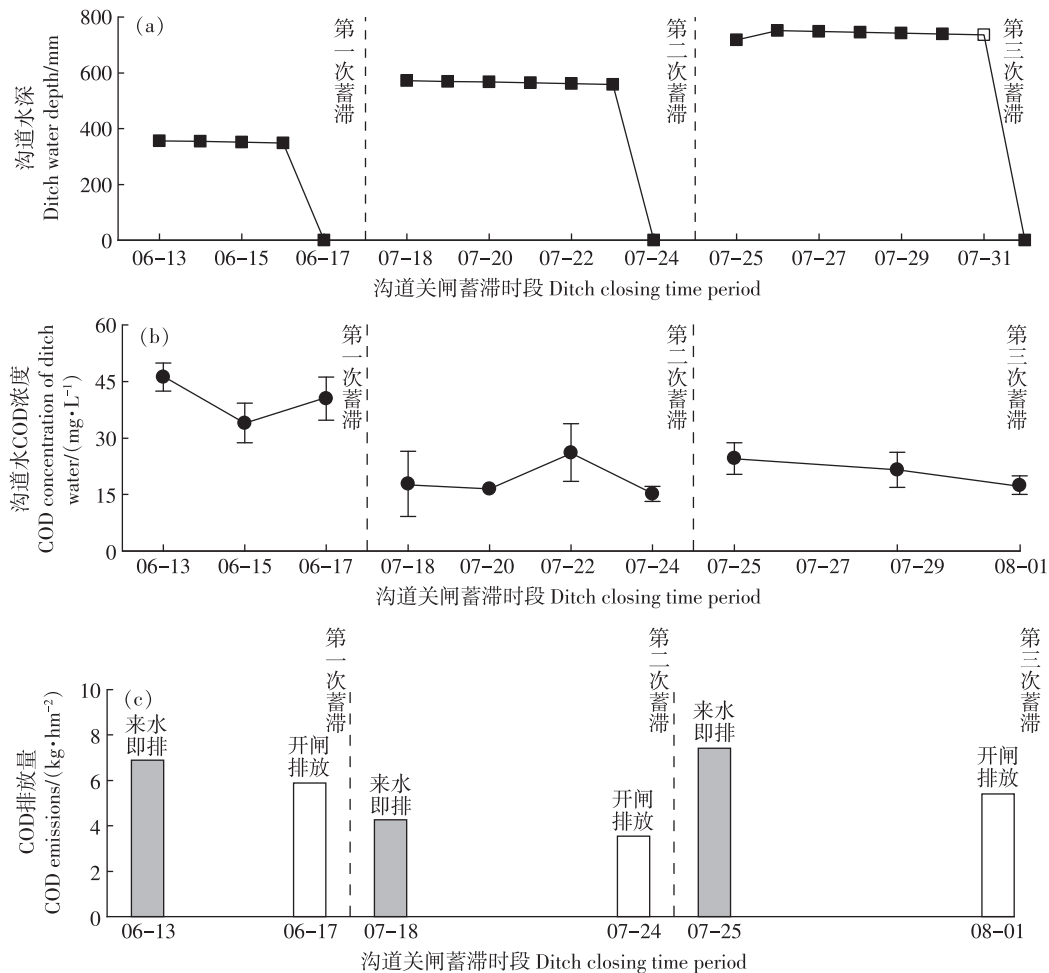


图6 排水沟道蓄滞条件下沟道COD浓度及排放量变化

Figure 6 Change of COD concentration and discharge amount in drainage ditch under the condition of detention

果表明若不进行蓄滞,沟道承接稻田来水直接排放,3个时段内分别将排出6.9、4.3、7.4 kg·hm⁻²的COD负荷。进行蓄滞后,则在时段末的COD排放量分别为5.9、3.5、5.4 kg·hm⁻²,COD减排量分别为1.0、0.8、2.0 kg·hm⁻²,调蓄对COD的去除率分别为14.5%、18.6%、27.0%。

3 讨论

本研究通过试验观测发现,稻田、沟道水中COD浓度动态变化与施肥事件呈现显著相关性。具体而言,施肥事件发生时段内,稻田水、沟道水COD浓度在短期内呈现急剧上升趋势,相比之下,在水稻分蘖期和抽穗期等非施肥阶段,稻田水及沟道水中的COD浓度均维持在较低水平。这一现象是因施肥后肥料快速溶解并释放氮、磷等物质,且部分养分未能及时被作物充分吸收,因此该时段内水中COD浓度保持较高水平^[19]。此外,在2 a试验期间内的绝大多

数时间,田面水COD浓度均大于沟道水,这是由于沟道内部水体流动性较强,同时沟道水还可能与雨水相混合,使得其中的有机物被稀释,而稻田水直接接触土壤和作物根系,土壤中的残留肥料、植物残体等,会不断向水中释放有机物质,导致田面水的COD浓度较高^[20]。另外,在稻田中,水体的缺氧环境促进了厌氧微生物的代谢活动,加速了有机物的分解过程,从而易导致COD浓度上升^[21]。而在土质沟道中生长的美人蕉、菖蒲等植物,具有一定水质净化能力,因此,沟道水中的COD浓度较稻田水更低^[22]。

水稻返青期和分蘖期是稻田及沟道系统面源污染排放的关键时期。Wang等^[23]研究指出,灌溉水量与面源污染负荷量之间存在非线性关系:当灌溉水量低于临界阈值时,污染负荷增量相对平缓;然而,一旦超过该拐点,面源污染负荷将呈现显著增长态势。本研究区域水稻生育前期的主要水分来源为季节性降雨,由于水稻幼株期具有较高的生理需水量,加之降

水事件的不确定性和不可控性,极易在稻田系统中形成显著的地表径流。尽管径流过程对COD浓度具有一定的稀释效应,但由于排水总量的大幅增加,最终导致COD的总排放量显著升高。

沟道是农业面源污染传导过程中重要的通道,通过增加污染物在水体中的水力停留时间,能发挥水体自净功能,减少污染物浓度及排放量。本研究发现,尽管沟道调蓄过程中COD浓度会有升高情况,但相较调蓄开始时,调蓄结束沟道开闸放水时的水体COD浓度均有一定程度的降低,这一结果表明沟道对COD具有一定去除作用,多项试验同样得出该结论^[24-25]。此外,相较于沟道直接排出稻田来水,进行一定时间的沟道调蓄可显著减少最终的COD排放量,从而减少下级生态塘浜所要承受的污染负荷。

在“稻田-沟道”生态系统中,稻田田面水因施肥活动、微生物代谢作用以及水-土界面物质交换等过程,其COD浓度始终维持在较高水平。作为稻田排水的受纳水体,沟道水体的COD主要来源于稻田高浓度COD排水的输入。在调蓄阶段初期,由于高浓度COD稻田排水与沟道内残留的低浓度COD水体发生混合稀释作用,沟道水体的COD浓度呈现显著下降趋势。此外,通过闸门调控实现的沟道蓄滞措施,不仅延长了水体的水力停留时间,还促进了稻田排水中颗粒态COD的沉降过程,使其在重力作用下下沉至底泥。在此过程中,多重环境因子共同驱动了COD的降解:阳光辐射(特别是紫外光组分)通过光化学氧化作用促使水中大分子有机物分解^[26];高温环境提高了微生物的代谢活性,加速了水中菌群对有机物的生物降解过程^[27];同时,水生植物和微生物群落通过吸收及分解等途径对溶解性有机物进行利用^[28-29]。这些协同作用机制最终导致沟道排水在调蓄阶段的COD浓度显著降低。但由于各影响因素间存在复杂的交互作用,目前尚难以准确量化各因素在COD去除过程中的影响,未来研究需着重构建多因素耦合作用模型,以深入解析沟道系统对污染物的去除机制,为农业面源污染控制提供理论依据。

4 结论

(1)返青期和分蘖期是稻田和沟道系统面源污染排放的关键时期,这一时期由于降雨频繁和灌溉需求大,稻田排水量和COD排放量显著增加,导致水体污染负荷升高。

(2)施肥事件发生后,稻田和沟道水体的COD浓

度在短期内急剧上升,尤其是施用缓释肥后,COD浓度上升更为迅速。

(3)在沟道内进行一定时间的关闸调蓄能有效降低稻田来水中的COD浓度,并且可以削减14.5%~27.0%的COD排放负荷。

参考文献:

- [1] 薛利红,段婧婧,杨林章.太湖流域农田灌排系统生态化改造技术及相关标准[J].江苏农业学报,2022,38(1):81-86. XUE L H, DUAN J J, YANG L Z. Ecological transformation technology and related standards of farmland irrigation and drainage system in Taihu Lake basin[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 38(1): 81-86.
- [2] 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. MIN J, JI R T, WANG X, et al. Changes in planting structure and nitrogen and phosphorus loss loads of farmland in Taihu Lake region[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(8):1230-1238.
- [3] 耿芳,刘连华,欧阳威,等.长江流域典型单季稻田水文及氮素流失特征[J].农业环境科学学报,2023,42(1):132-141. GENG F, LIU L H, OUYANG W, et al. Hydrology and nitrogen loss characteristics of a typical rice paddy field in the Yangtze River basin [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(1):132-141.
- [4] JIN B M, YANG S H, XU J Z. Nitrogen and phosphorus losses through runoff from paddy fields with different water and nitrogen managements [J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2018, 27(8):5212-5222.
- [5] 罗华溢,金泽凡,唐次来,等.稻田水系统各单元功能协同:防控农业面源污染新策略[J].水生态学杂志,2025,46(1):155-165. LUO H Y, JIN Z F, TANG C L, et al. Functions of paddy field water system units and their synergistic effects in reducing agricultural non-point source pollution[J]. *Journal of Hydroecology*, 2025, 46(1):155-165.
- [6] 时红,才硕,孙占学,等.田-沟-塘系统纳洪减污效应研究进展[J].节水灌溉,2024(1):16-22. SHI H, CAI S, SUN Z X, et al. Research progress on the effect of flood control and pollution reduction in field-ditch-pond system[J]. *Water Saving Irrigation*, 2024(1):16-22.
- [7] 周杨阳.晒合型生态排水沟优化设计及其稳定性分析研究[D].扬州:扬州大学,2023. ZHOU Y Y. Optimization design and stability analysis of meshedecological drainage ditch[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2023.
- [8] 郝贝贝,王楠,吴昊平,等.生态沟渠对珠三角稻田径流污染的削减功能研究[J].生态环境学报,2022,31(9):1856-1864. HAO B B, WANG N, WU H P, et al. Research on the reduction function of ecological ditches on runoff pollution from rice field in the Pearl River Delta[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(9):1856-1864.
- [9] 杨文焕,彭耀华,徐岩,等.植物+微生物联合生态沟渠在盐度胁迫下的营养盐去除效果[J].中国环境科学,2025,45(1):430-439. YANG W H, PENG Y H, XU Y, et al. Nutrient removal effect of plant+microbial combined ecological ditch under salinity stress[J]. *China Environmental Science*, 2025, 45(1):430-439.

- [10] 罗纨, 朱金城, 贾忠华, 等. 排水沟塘分布特性及与农田水力联系对水质净化能力的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 161-167. LUO W, ZHU J C, JIA Z H, et al. Effect of distribution characteristic and field hydraulic connection of drainage ditches and ponds on water quality purification[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(10): 161-167.
- [11] 段四喜, 张磊, 杨芳, 等. 典型生态拦截措施水质净化效果研究[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(3): 493-502. DUAN S X, ZHANG L, YANG F, et al. Study on water purification effect of typical ecological interception measures[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(3): 493-502.
- [12] 张迎颖, 李敏, 潘吴意, 等. 生态沟渠对农田退水污染物的净化效能及其配置规模[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(1): 105-116. ZHANG Y Y, LI M, PAN W Y, et al. Purification efficiency of pollutants in farmland runoff by the ecological ditch and its configuration scale[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2025, 44(1): 105-116.
- [13] 王华栋, 唐浩, 张卫. 生态沟渠对农田径流污染物的去除效果[J]. 环境污染与防治, 2021, 43(9): 1083-1088. WANG H D, TANG H, ZHANG W. Removal effects of ecological ditches on farmland runoff pollutants[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2021, 43(9): 1083-1088.
- [14] SHEN Y T, HOU S N, HU S L, et al. Water purification capacity of ecological ditch: a systematic review and meta-analysis of influencing factors[J]. *Ecological Engineering*, 2024, 204: 107280.
- [15] JYOLSNA, T, VASHISHT B B, YADAV M, et al. Field and simulation studies on yield, water and nitrogen dynamics and use efficiency in rice-wheat crops in sequence[J]. *Field Crops Research*, 2024, 311: 109366.
- [16] LAHUE G T, LINQUIST B A. The magnitude and variability of lateral seepage in California rice fields[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 574: 202-210.
- [17] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements: FAO irrigation and drainage paper 56[M]. Rome: FAO, 1998.
- [18] 李永和. 杭嘉湖平原地区稻田适宜渗漏量探讨[J]. 农田水利与小水电, 1990(12): 8-12. LI Y H. Discussion on the suitable leakage amount of paddy field in Hangjiahu Plain area[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 1990(12): 8-12.
- [19] 滕艳敏, 韩卉, 郝梓依, 等. 不同蔬菜种植模式对土壤淋溶水总氮、总磷和COD的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(5): 759-768. TENG Y M, HAN H, HAO Z Y, et al. Effect of vegetable cropping system on total nitrogen, phosphorus and COD in farmland leachate[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(5): 759-768.
- [20] 石吕, 薛亚光, 韩笑, 等. 淹水条件下不同麦秸还田方式对田面水氮磷及COD浓度的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(2): 247-252. SHI L, XUE Y G, HAN X, et al. Influences of different wheat straw returning methods on nitrogen, phosphorus and COD concentrations in surface water under flooding[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(2): 247-252.
- [21] 章泽宇. 生态沟渠-人工湿地组合系统处理道路径流效应研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2021. ZHANG Z Y. Study on road runoff effect treated by ecological ditch-constructed wetland combined system[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2021.
- [22] 张迎颖, 闻学政, 李敏, 等. 农村汇水河浜生态修复组合工程处理效果分析[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(7): 1563-1575. ZHANG Y Y, WEN X Z, LI M, et al. Removal efficiency of pollutants in the rural catchment branch by the combined engineering of ecological restoration[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(7): 1563-1575.
- [23] WANG H L, HE P, SHEN C Y, et al. Effect of irrigation amount and fertilization on agriculture non-point source pollution in the paddy field[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2019, 26(10): 10363-10373.
- [24] 杨旭斌, 邵建均, 应珊珊, 等. 浙江省生态沟渠对农业面源污染物的去除效果[J]. 浙江农林大学学报, 2024, 41(6): 1233-1241. YANG X B, SHAO J J, YING S S, et al. Removal effect of ecological ditches on agricultural non-point source pollutants in Zhejiang Province[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2024, 41(6): 1233-1241.
- [25] YANG Y, LIU C, CHEN Y, et al. Study on the intensified reduction of farmland non-point source pollution in winter using thermally insulated ecological shallow ditch[J]. *Earth and Environmental Science*, 2019, 344(1): 012168.
- [26] 马兰, 刘建广. 紫外耦合高级氧化工艺处理有机废水回用水的机理和研究进展[J]. 净水技术, 2021, 40(12): 12-19. MA L, LIU J G. Research progress and mechanism of UV-coupled AOPs for reclaimed water treatment of organic wastewater[J]. *Water Purification Technology*, 2021, 40(12): 12-19.
- [27] 贾智明. 低温季节池塘养殖尾水氮去除途径及硝酸盐扩散降氮技术[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023. JIA Z M. Nitrogen removal mechanism in pond aquaculture tailwater of low-temperature season and reducing nitrogen by nitrate diffusion technology[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023.
- [28] 李伟, 张一帆, 王璟. 碳中和背景下水生植物对富营养化湿地水体净化效果研究[J]. 安徽农业科学, 2025, 53(2): 56-59. LI W, ZHANG Y F, WANG J. Purification effects of aquatic plants in eutrophic wetlands under the background of carbon neutrality[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2025, 53(2): 56-59.
- [29] 王志荣, 庄海峰, 郑良燕, 等. 生态沟渠对农田排水中菌群组分、耐药基因谱及氮磷浓度的影响[J]. 环境化学, 2022, 41(9): 3055-3064. WANG Z R, ZHUANG H F, ZHENG L Y, et al. Effects of the ecological ditches on bacterial community composition, antibiotic resistance gene profiles, nitrogen and phosphorus concentrations in farmland drainage[J]. *Environmental Chemistry*, 2022, 41(9): 3055-3064.

(责任编辑: 李丹)