

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.06.001 CSTR:32310.14.stbxb.2025.06.001

黄琦舜,汪涛,胡磊.三峡库区临库水稻田氮磷径流流失过程与强度[J].水土保持学报,2025,39(6):41-48.

HUANG Qishun, WANG Tao, HU Lei. Runoff loss process and intensity of nitrogen and phosphorus from paddy fields adjacent to Three Gorges Reservoir area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(6):41-48.

三峡库区临库水稻田氮磷径流流失过程与强度

黄琦舜^{1,2}, 汪涛¹, 胡磊^{1,2}

(1.中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所,成都 610041; 2.中国科学院大学,北京 100049)

摘要: [目的] 查明三峡库区临库水稻田氮磷径流流失过程和强度,评估梯级水稻田对氮磷的消减作用,为三峡库区农田面源污染防控提供科学依据。[方法] 通过野外田间试验,对2017—2018年水稻生育期历次降雨产流事件的径流量和各种形态氮磷浓度进行监测。[结果] 1) 临库水稻田氮磷径流流失潜在的环境风险极大,历次地表径流中总氮(TN)浓度为0.65~56.50 mg/L,总磷(TP)浓度为0.06~0.84 mg/L,47.6%的径流中TN浓度>2 mg/L,40.5%的径流中TP浓度>0.2 mg/L。2) 临库水稻田氮磷流失浓度和流失强度随生育期均呈逐渐下降的趋势。水稻全生育期地表径流TN、TP流失通量分别为2.89、0.29 kg/hm²,其中分蘖期氮、磷径流流失强度均最高。3) 梯级水稻田在水稻生长期对地表径流中TN、TP的平均消减率为19.18%、18.49%,其中水稻田TN最高消减率出现在成熟期(34.82%),TP最高消减率出现在分蘖期(26.46%)。[结论] 水稻分蘖期是临库水稻田氮磷地表径流流失的高风险期,但临库梯级水稻田也具有一定的消纳拦截作用,通过合理调控可减少库区水体的氮磷输入。

关键词: 三峡库区; 稻田; 氮; 磷; 流失强度

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)06-0041-08

Runoff Loss Process and Intensity of Nitrogen and Phosphorus from Paddy Fields Adjacent to Three Gorges Reservoir Area

HUANG Qishun^{1,2}, WANG Tao¹, HU Lei^{1,2}

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [Objective] To investigate the process and intensity of nitrogen (N) and phosphorus (P) runoff losses from paddy fields adjacent to the Three Gorges Reservoir area, and to assess the reduction effects of terraced paddy fields on N and P losses, thereby providing a scientific basis for the prevention and control of farmland non-point source pollution in the region. [Methods] Field experiments were conducted to monitor runoff volumes and N and P concentrations of various forms during rainfall-runoff events throughout the rice growth stages in 2017 and 2018. [Results] 1) The potential environmental risk of N and P runoff losses from reservoir-adjacent paddy fields was extremely high. Total nitrogen (TN) concentrations in surface runoff during each event ranged from 0.65 mg/L to 56.50 mg/L, and total phosphorus (TP) concentrations ranged from 0.06 mg/L to 0.84 mg/L. TN concentrations exceeded 2 mg/L in 47.6% of runoff, and TP concentrations exceeded 0.2 mg/L in 40.5% of runoff. 2) The concentrations and intensities of N and P losses from reservoir-adjacent paddy fields decreased gradually over the rice growth stages. The cumulative surface runoff fluxes of TN and TP during the entire growth stages were 2.89 kg/hm² and 0.29 kg/hm², respectively, with the highest intensity of N and P runoff losses observed during the tillering stage. 3) During the rice growing stage, the average reduction rates of TN and TP in surface runoff by terraced paddy fields were 19.18% and 18.49%, respectively. The highest TN reduction rate (34.82%) occurred

收稿日期: 2025-02-10

修回日期: 2025-04-18

录用日期: 2025-04-28

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-07-28

资助项目: 国家自然科学基金项目(42377416)

第一作者: 黄琦舜(1998—),男,硕士研究生,主要从事土壤环境研究。E-mail: huangqishun@imde.ac.cn

通信作者: 汪涛(1978—),男,博士,研究员,主要从事面源污染研究。E-mail: wangt@imde.ac.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

during the maturity stage, while the highest TP reduction rate (26.46%) occurred during the tillering stage. [Conclusion] The tillering stage is a high-risk period for N and P surface runoff losses from reservoir-adjacent paddy fields. However, terraced paddy fields have a certain capacity for retention and interception, and appropriate regulation can reduce N and P inputs into the reservoir water.

Keywords: Three Gorges Reservoir area; paddy fields; nitrogen; phosphorus; loss intensity

Received: 2025-02-10

Revised: 2025-04-18

Accepted: 2025-04-28

Online(www.cnki.net): 2025-07-28

三峡库区是长江流域重要的大型水库,是长江中下游水质安全的重要保障^[1]。但三峡库区山高坡陡,人地矛盾突出,为满足高密度人口生存需要,提高单位面积产量,农民大量使用农药和化肥^[2]。据统计^[3],2022年,三峡库区19个区县农用化肥施用量(折纯)共534.84万t。农业生产过程中,过量化肥施入土壤后会直接造成土壤板结、酸化、硝酸盐积累等耕地质量下降问题^[4],且一部分过剩的氮磷养分会通过暴雨或强降雨形成的径流被带入库区水体,是水库水体富营养化的重要污染途径^[5]。目前,富营养化问题已经是三峡水库所面临和有待解决的主要水污染问题之一^[6]。

针对库区日益严重的水体富营养化现象,国内科学界对三峡库区面源污染开展了大量卓有成效的研究工作。在库区土壤养分迁移与流失研究方面,紫色土坡耕地径流中氮磷的主要形态以颗粒态氮、颗粒态磷为主^[7-8],且流失的主要途径是地表径流^[9]。对于库区内不同土地利用类型面源污染的研究中,朱波等^[10]研究石盘丘小流域主要土地利用区非点源氮磷污染的来源与负荷发现,居民点、坡耕地和果园是三峡库区面源污染的主要贡献者;陈成龙等^[11]研究发现,春季作物时期3种土地利用类型TN、NO₃-N地表平均流失浓度差异最显著,其大小关系为旱地>桑树套种地>水田;金昶颖^[12]对王家桥小流域面源污染特征研究发现,不同土地利用类型的年均TP负荷强度从大到小依次为柑橘、玉米、小麦、林地、水稻、灌木林。总体来说,已有研究主要集中在三峡库区旱地的氮磷流失。对于库区水田氮磷流失的研究也有一些报道,但关于三峡库区临库稻田氮磷流失的时空特点及其向邻近水体的输出强度尚不清楚。

水稻田是三峡库区重要的土地利用类型,占库区耕地总面积的26.3%^[13]。受限于取水难度和为了耕作方便,三峡库区大多数水稻田在地势较低处临库而建,且以冬水田为主,施肥量大,其上方的坡耕地和果园土壤中残留的氮磷也可随地表径流经水稻田流入库区水体。因此,查明三峡库区临库水稻田氮磷径流

流失过程和强度,对三峡库区面源污染防治具有重要意义。本文通过野外大田试验,研究三峡库区临库水稻田氮磷流失的过程与输出强度,以期为三峡库区农田面源污染防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于三峡库区忠县石宝寨新政村石盘丘小流域(30°24'59"~30°29'44"N, 108°08'09"~108°12'05"E),海拔119~780 m,地势南部低北部高,属低山丘陵区。该地区气候属暖湿亚热带东南季风区,年平均日照时间1 327.5 h,年平均气温18.2℃,无霜期341 d,多年平均降水量1 140 mm,每年5—9月为雨季,降雨量占全年降水总量的70%左右^[13-14]。该区域土壤以中性紫色土、水稻土为主,小流域各主要土地利用类型面积占小流域总面积比例分别为水稻田占46%、果园占17%、旱坡地占13%,水田以冬水田为主^[14],大多为单季稻,部分为双季再生稻,再生稻第2季产量低,稻田排水以田块间通过田埂溢流为主。

1.2 试验设计

在石盘丘小流域选择有代表性的梯级稻田(顺坡自上而下相连的3块稻田)作为研究对象,每块稻田面积约为470 m²,种植方式为冬水田,常年滞水(图1)。在选定的3块稻田一侧修建宽0.5 m的排水沟渠,以规避梯级稻田上方来水进入监测田块。3块稻田种植作物均为再生稻。每块稻田施肥量保持一致,按当地习惯第1季施肥量为163 kg/hm²(尿素)、100 kg/hm²(过磷酸钙),所有肥料作基肥一次性施用,第2季再生稻不施肥。水稻种植按当地习惯,每年4月移栽,种植密度0.4 m×0.3 m,8月底第1季收获,10月底第2季收获。在每个梯级稻田出口设置薄壁矩形三角堰监测径流量,矩形堰长1.5 m、宽0.8 m、深度0.5 m,堰口为90°倒立等腰三角形口,在堰内安装水位自动监测仪,实时记录水位变化。根据薄壁三角堰水位-流量关系曲线,分别计算稻田出口径流量。利用虹吸式自记雨量计实时记录降雨量。

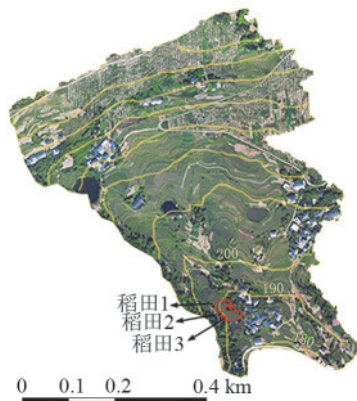


图1 监测样地分布

Fig. 1 Distribution of monitoring plots

1.3 样品采集与分析

分别在每块稻田三角堰出水口设置采样点。2017年开始试验,持续监测2 a。2017年5月开始采集地表径流水样,11月结束,2018年4月底开始采样,11月结束。径流样品采集频率为逢降雨产流必采,不降雨时每周采集1次。采样时利用经过稀硫酸处理并用去离子水洗净的聚乙烯塑料瓶采集500 mL水样,每块稻田的三角堰出水口独立采样,采集后的水样立刻放入冷藏箱保存,送回实验室并分别分析3块稻田的水样指标,24 h内未分析完毕的水样加硫酸酸化至 $\text{pH} < 2$,并在1周内完成分析。

水样分析指标包括总氮、可溶性总氮(DN)、硝态氮(NO_3^- -N)、铵态氮(NH_4^+ -N)、颗粒态氮(PN)、总磷、可溶性总磷(DP)、颗粒态磷(PP)。水样带回实验室后,首先将水样摇匀后取少量液体,利用连续流动分析仪直接进行测定TN和TP浓度^[8],将水样经 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤后测定 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、DN和DP浓度。DN浓度采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定;DP浓度采用过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法测定; NO_3^- -N浓度采用紫外分光光度法测定; NH_4^+ -N浓度采用靛酚蓝试剂比色法测定;DN浓度采用碱性过硫酸钾-紫外分光光度法^[15-16]测定;PP浓度由TP浓度与DP浓度相减而得;PN的浓度由TN浓度与DN浓度相减而得^[17]。

1.4 数据处理

单个污染物的年污染流失强度(Q , kg/hm^2)为全年次降雨径流污染流失强度(Q_i , g/m^2)的累加,即

$$Q_i = \frac{C_i \times V_i}{S \times 100} \quad (1)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (2)$$

式中: i 为统计年度内产生径流的降雨次数($i=1,2,\dots,n$); n 为统计年度内产生径流的降雨总次数; C_i 为统计年度内第 i 次所有稻田降雨径流中污染物平均后的含

量, mg/L ; V_i 为统计年度内第 i 次降雨径流量, m^3 ; S 为观测稻田面积, m^2 。

梯级稻田对氮磷径流流失(TN、TP)的消减率计算公式为:

$$E = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \times 100\% \quad (3)$$

式中: E 为消减率,%; C_1 为梯级稻田入口水田的氮磷浓度, mg/L ; C_2 为梯级稻田出口水田的氮磷浓度, mg/L 。

试验数据统计分析采用SPSS 21.0和Excel 2010软件,多重比较选用LSD法;利用Origin 9.0软件制图。

2 结果与分析

2.1 稻田径流中氮磷流失的过程

2.1.1 稻田地表径流中氮磷浓度的形态特征 通过对三峡库区水稻田地表径流中氮磷浓度的长期监测,得到2017—2018年库区水稻不同生育期地表径流中各种形态氮磷浓度及其形态分配特征。由表1可知,不同时期TN和TP浓度的大小顺序均为分蘖期>拔节期>孕穗期>成熟期>休闲期。水稻分蘖期TN、TP浓度明显高于其他时期,平均浓度分别为16.93、0.72 mg/L 。4—5月是石盘丘小流域水田、旱坡地和菜地的主要施肥期,施肥增加土壤中氮、磷养分含量,降雨产生的径流带走的易溶性氮、磷及表层土壤颗粒吸附的氮、磷含量也相应增加,可能是水稻分蘖期地表径流中的氮磷含量浓度较高的原因。

不同生育期 NO_3^- -N浓度占TN浓度的8.13%~12.71%, NH_4^+ -N浓度占TN浓度的5.30%~39.57%,PN浓度占TN浓度的47.58%~84.64%,说明颗粒态氮是库区稻田径流中氮素的主要形态。PP浓度占TP浓度的61.85%~98.63%,说明颗粒态磷是库区稻田径流中磷素的主要形态。曹洪志等^[18]研究表明,稻田在水稻生长季节有田面水的保护,因表土不被雨滴直接击打使得产生的径流中颗粒态磷很少。而本研究中地表径流颗粒态磷较多,可能是因为所采集的是降雨产流时的瞬时水样,降雨搅动田面水使沉积的颗粒态磷再悬浮所导致。

2.1.2 降雨-径流变化特征 2017年和2018年在稻田生长期观测到的降雨产流事件见图2。2017年降雨产流事件的降雨量为15.4~104.6 mm,降雨地表径流平均流量为 $(16.2 \pm 9.2) \text{m}^3$;2018年降雨产流事件的降雨量为10.2~109.6 mm,降雨地表径流平均流量为 $(9.8 \pm 6.3) \text{m}^3$;降雨-径流过程存在明显的响应关系。降雨量年内分布有明显差异,2017年降雨主要集中在5—9月,而2018年主要集中在4—8月。观测期内,2017年暴雨级以上级别的降雨共10场,2018年暴雨级以上级别的降雨共3场。

表 1 水稻不同生育期地表径流中各种形态氮磷平均浓度

Table 1 Average nitrogen and phosphorus concentrations of various forms in surface runoff during different rice growth stages

生育期	TN	NO ₃ ⁻ -N		NH ₄ ⁺ -N		PN		TP	PP	
		浓度/ (mg·L ⁻¹)	占比/%	浓度/ (mg·L ⁻¹)	占比/%	浓度/ (mg·L ⁻¹)	占比/%		浓度/ (mg·L ⁻¹)	占比/%
分蘖期	16.93a	1.65	9.74	6.70	39.57	8.58	50.69	0.72a	0.71	98.63
拔节期	4.82b	0.61	12.71	1.73	35.89	2.43	50.47	0.33b	0.30	89.19
孕穗期	1.21c	0.10	8.45	0.18	15.03	0.92	76.20	0.31b	0.28	88.62
成熟期	1.85c	0.85	46.13	0.10	5.30	0.88	47.58	0.16c	0.10	61.85
休闲期	0.92c	0.07	8.13	0.06	6.99	0.77	84.64	0.10c	0.08	81.50

注:占比表示各种形态氮磷浓度占TN或者TP浓度的比例;同列不同小写字母表示不同生育期差异显著($p < 0.05$)。

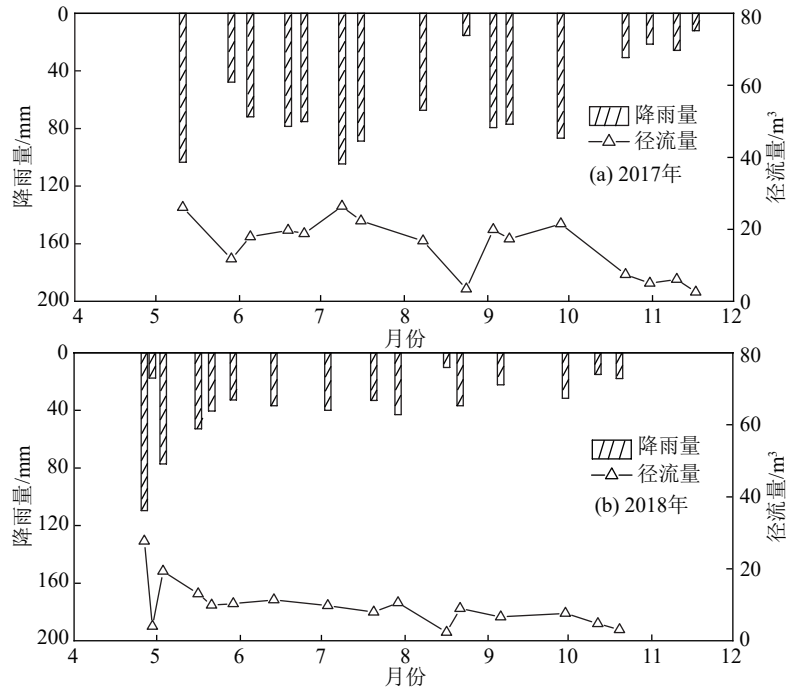


图 2 稻田历次降雨量和地表径流量

Fig. 2 Precipitation amounts in each rainfall event and surface runoff volumes from paddy fields

2.1.3 稻田径流中氮磷浓度的动态变化 2017—2018年, TN浓度为0.65~56.50 mg/L, TP浓度为0.06~0.84 mg/L。稻田径流中TN、TP浓度的变化趋势基本一致, 但不同生育期TN、TP浓度差异较大。分蘖期稻田径流中TN、TP浓度较高, 其中插秧后的1周内径流中TN、TP浓度均极高, TN浓度最高, 达到(56.50±13.20) mg/L。孕穗期、成熟期稻田径流氮磷浓度急剧下降, 至休闲期时, 氮磷浓度均降低到低于国家地表水Ⅲ类水质标准。说明水稻分蘖期(特别是施肥后1周内)是三峡库区稻田氮磷径流流失的窗口期。进一步分析表明, TN浓度超2 mg/L(国家地表水Ⅴ标准)的径流样本占比47.6%, TP浓度超0.2 mg/L(国家地表水Ⅲ标准)的径流样本占比40.5%。超标的浓度主要出现在分蘖期(图3、图4), 说明三峡库区稻田氮磷径流流失的防控应重点关注水稻分蘖期。

2.2 稻田流失氮磷对邻近库区水体的输出强度

水稻不同生育期氮磷随地表径流流失的强度见

表2。由表2可知, 分蘖期稻田氮磷径流流失强度均最高, 分别为1.40、0.11 kg/hm²; 其次为拔节期, 氮磷流失强度分别为0.72、0.03 kg/hm²; 孕穗期和成熟期氮流失强度相差不大, TN流失强度分别为0.33、0.07 kg/hm²; 拔节期和成熟期TP流失强度相差不大, 分别为0.36、0.05 kg/hm²; 水稻收获后的休闲期, 稻田氮磷地表径流流失强度极低, 分别仅为0.08、0.01 kg/hm²。多重比较结果显示, 不同生育期库区稻田氮磷地表径流流失强度均差异显著。分蘖期氮磷流失强度最高是受降雨与施肥的影响, 因为石盘丘小流域水田的施肥期处在水稻的分蘖期, 同时该时期内发生了大暴雨级降雨(图2)。拔节期则可能与该时期内频繁的降雨产流有关, 石盘丘小流域雨季降雨多分布在4—6月, 拔节期处于5—6月。相关研究^[19]表明, 氮磷流失浓度高输出时期同为降雨量高峰期。

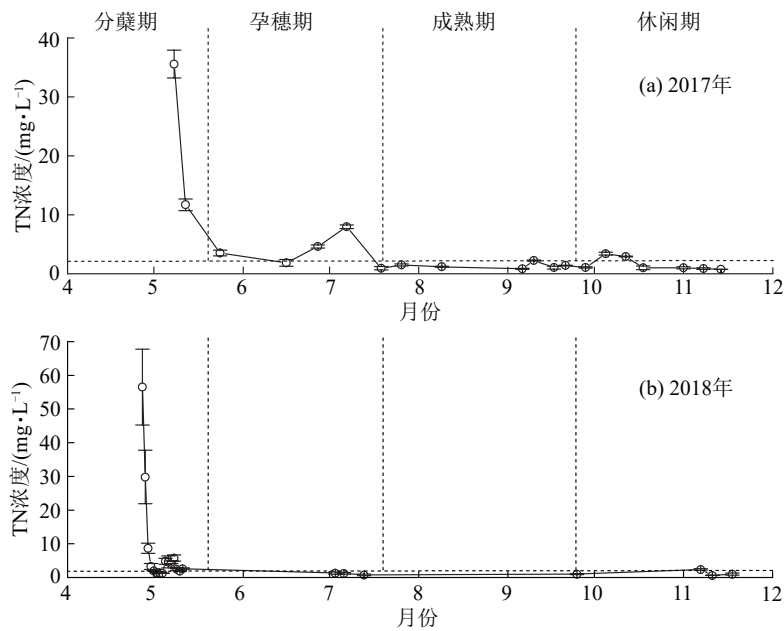


图 3 稻田地表径流中总氮浓度动态变化

Fig. 3 Dynamics of total nitrogen concentration in surface runoff from paddy fields

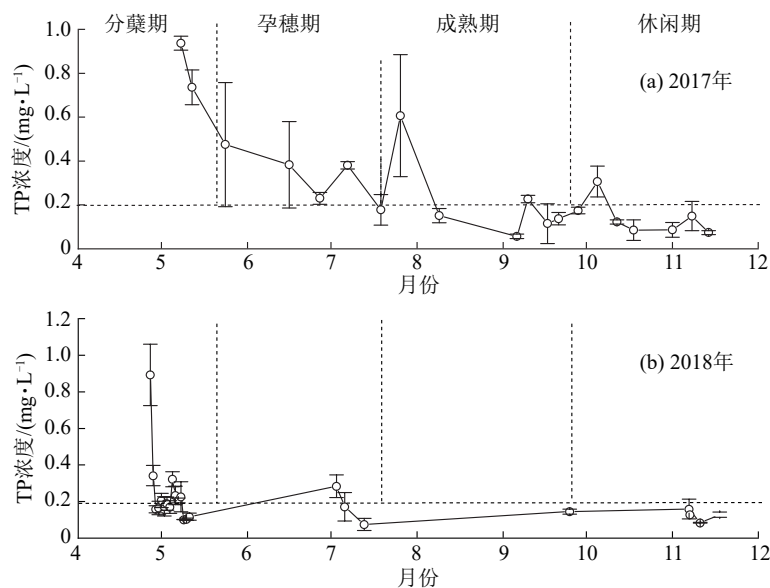


图 4 稻田地表径流中总磷浓度动态变化

Fig. 4 Dynamics of total phosphorus concentration in surface runoff from paddy fields

表 2 水稻不同生育期地表径流氮磷流失强度

Table 2 Nitrogen and phosphorus loss intensities in surface runoff during different rice growth stages

生育期	TN		TP	
	流失强度/ (kg·hm ⁻²)	占比/%	流失强度/ (kg·hm ⁻²)	占比/%
分蘖期	1.40±0.04a	48.52	0.12±0.01a	41.38
拔节期	0.72±0.02b	24.88	0.04±0.01c	13.80
孕穗期	0.33±0.02c	11.26	0.07±0.01b	24.14
成熟期	0.36±0.04c	12.51	0.05±0.01c	17.24
休闲期	0.08±0.01d	2.83	0.01±0.01d	3.45
全年	2.89±0.02		0.29±0.01	

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同生育期差异显著($p < 0.05$)。下同。

2.3 梯级稻田对氮磷径流流失的消减效率

不同水稻生育期梯级稻田对 TN、TP 的消减率见表 3。由表 3 可知,梯级稻田对 TN 的消减率为 7.25%~34.82%。在水稻生长期梯级稻田对地表径流中 TN、TP 的平均消减率分别为 19.18%、18.49%,其中稻田对 TN 的消减率最高在成熟期(34.82%),对 TP 的消减率最高在分蘖期(26.46%)。分蘖期后,梯级稻田对 TN 去除率明显升高,一方面可能是因为气温上升的同时田间水温也相应上升,对总氮的去除效率有一定的促进作用^[20];另一方面,是因为水稻的生长发育过程中对氮素的大量吸收。而 TP 的消减率为 8.70%~26.56%,其中分蘖期对 TP 的消减率最高,可

能是由于此阶段的水稻生长对磷的需求较大,且根系的不断发育加大水稻对磷元素的吸收;而孕穗期和成熟期稻田地表径流 TP 浓度变化较小且消减率较低,一方面可能是该时期不受施肥的影响,土壤表层磷的吸附-解吸处于动态平衡;另一方面,可能是孕穗期水稻

虽进入生殖生长期对磷需求较高,但吸收速率趋于稳定导致消纳能力有限,而成熟期水稻生长基本停滞,根系对磷的吸收能力下降。可见,梯级稻田对地表径流中携带的氮磷养分有一定的消纳和拦截作用,可作为库区面源污染防治的重要缓冲区域。

表 3 水稻不同生育期梯级稻田对氮磷径流流失的消减率

Table 3 Reduction rates of nitrogen and phosphorus runoff losses by terraced paddy fields during different rice growth stages

生育期	TN				TP			
	稻田 1/ (kg·hm ⁻²)	稻田 2/ (kg·hm ⁻²)	稻田 3/ (kg·hm ⁻²)	消减率/%	稻田 1/ (kg·hm ⁻²)	稻田 2/ (kg·hm ⁻²)	稻田 3/ (kg·hm ⁻²)	消减率/%
分蘖期	30.24±26.84	28.31±21.44	26.66±20.68	12.30±2.51b	0.38±0.30	0.33±0.21	0.26±0.17	26.56±9.56a
孕穗期	1.16±0.69	1.17±0.62	0.83±0.48	29.31±7.43a	0.16±0.06	0.15±0.04	0.14±0.05	15.62±3.25a
成熟期	1.21±0.02	1.04±0.04	0.79±0.01	34.82±1.02a	0.16±0.01	0.14±0.03	0.14±0.01	8.70±1.25b
休闲期	1.33±0.91	1.27±1.01	1.25±1.02	7.25±0.72b	0.14±0.04	0.13±0.05	0.11±0.02	23.07±3.67a

3 讨论

3.1 临库稻田存在氮磷流失的环境风险

自三峡水库蓄水以来,水环境变化显著,水体富营养化现象日趋严重^[21]。受限于取水难度和耕作条件,三峡库区大多数水稻田在地势较低处临库而建,因此临库稻田的氮磷流失将直接进入三峡水库,可能加剧水库水体富营养化。黎嘉成^[19]对石盘丘小流域非点源污染物来源与通量研究发现,观测期内(2018年3—11月)不同土地利用类型下 TN 流失通量的大小顺序为水田>柑橘园>旱坡地>菜地>自然林地,水田 TN 流失量是自然林地的 31 倍。姜世伟^[22]通过对石盘丘小流域内水稻田的长期采样分析,得到田面水 TN 和 TP 的平均浓度分别为 3.07、0.42 mg/L,未能达到国家地表水 III 标准。本研究发现,47.6% 的径流中 TN 浓度>2 mg/L(国家地表水 V 标准),40.5% 的径流中 TP 浓度>0.2 mg/L(国家地表水 III 标准),说明临库稻田氮磷流失的环境风险极大。

降雨和施肥是影响稻田氮磷流失的关键因素,特别是施肥后不久的降雨。根据临库稻田径流中氮磷浓度的动态变化可知,超标浓度主要出现在水稻分蘖期和孕穗期,2 个时期分别是水稻田的主要施肥期和当地降雨量较大的时期。陈仕奇等^[23]在石盘丘小流域的研究也发现,雨季氮磷流失分别占全年总氮、总磷负荷的 58.94% 和 67.60%。说明临库稻田氮磷径流流失的防控应重点关注这 2 个时期,建议通过适当减肥或选择新型肥料,升级对应的施肥技术等措施来有效降低临库稻田氮磷输出。

3.2 梯级稻田防控库区小流域面源污染的潜力

稻田作为一种特殊的人工湿地,可发挥湿地功能实现氮磷的净化。薛利红等^[24]对稻田湿地的净化效果研究表明,稻田人工湿地对低污染水中氮、磷的去除率可分别达 77%~93%、87%~98%;范鸿志等^[25]采用池塘养殖肥水进行水稻灌溉的研究表明,

稻田表面流处理池塘养殖水可以去除其中 30% 的总氮和 20% 的总磷,从而明显改善养殖水的水质;陈杰等^[20]将稻田湿地用于消纳村庄污水的研究表明,当水稻处于分蘖期后,COD、TP、NH₄⁺-N 和 TN 平均去除率最高,分别为 47.2%、84.0%、78.9% 和 68.6%。本研究中,梯级稻田在水稻生长期对地表径流中 TN、TP 的平均消减率分别为 19.18%、18.49%,且临库梯级稻田生育期的 TN 和 TP 的流失通量分别为 2.89、0.29 kg/hm²,低于整个石盘丘小流域 TN 和 TP 的年流失通量(5.00、0.53 kg/hm²)^[23],说明库区梯级稻田不是流域污染的主要来源,并具有一定的消纳拦截作用。

梯级稻田的田埂、浅水层和水稻植株的物理拦截可减缓水流速度,使地表径流中的悬浮颗粒物沉降,颗粒态养分随之被截留,且梯级稻田的滞留作用延长了径流与土壤、生物接触时间,促进养分转化与吸收,如土壤化学吸附与固定、水稻的直接吸收和微生物的同化作用等^[26-27]。三峡库区山高坡陡,自上而下形成山顶果园(林地)-坡耕地-水田-消落带的生态格局。因此,可利用稻田对氮、磷营养消纳能力较大且成本低的特点,将梯级稻田作为缓冲拦截带,通过合理设计来控制三峡库区的农田面源污染。

4 结论

1) 三峡库区临库稻田氮磷径流流失潜在的环境风险极大。47.6% 的径流中 TN 浓度>2 mg/L,40.5% 的径流中 TP 浓度>0.2 mg/L。

2) 水稻生育期地表径流 TN、TP 流失通量分别为 2.89、0.29 kg/hm²,其中分蘖期氮磷径流流失强度最高。说明水稻分蘖期可能是三峡库区临库稻田氮磷径流流失的高风险期,也可能是库区农业面源污染防治需要重点关注的窗口期。

3) 三峡库区梯级稻田对地表径流中的氮磷物质具有一定的消纳拦截作用。在水稻生长期梯级稻田对地表径流中 TN、TP 的平均消减率分别为 19.18%、

18.49%,其中稻田对TN的消减率最高在成熟期(34.82%),对TP的消减率最高在分蘖期(26.46%)。

参考文献:

- [1] 姚仕明,姚立强.长江流域水安全保障分析及对策建议[J].人民长江,2025,56(4):1-7.
YAO S M, YAO L Q. Analysis and countermeasures of water security in Changjiang River basin [J]. Yangtze Rive, 2025, 56(4): 1-7.
- [2] 张洋,樊芳玲,周川,等.三峡库区农桑配置对地表氮磷流失的影响[J].土壤学报,2016,53(1):189-201.
ZHANG Y, FAN F L, ZHOU C, et al. Effects of crop/mulberry intercropping on surface nitrogen and phosphorus losses in Three Gorges Reservoir area [J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(1): 189-201.
- [3] 刘晓波,吴雷祥,黄钰铃.三峡水库水质安全保障现状与新需求[J].中国水利,2024(22):74-78.
LIU X B, WU L X, HUANG Y L. Current situation and new requirements for safeguarding water quality in the Three Gorges Reservoir [J]. China Water Resources, 2024(22): 74-78.
- [4] 高莹,孙喜军,景鹏娟,等.西安市化肥施用面源污染环境风险评价研究[J].陕西农业科学,2021,67(10):66-74.
GAO Y, SUN X J, JING P J, et al. Study on environmental risk evaluation of non-point source pollution caused by chemical fertilizer application in Xi'an [J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2021, 67(10): 66-74.
- [5] 何文博.农业面源污染防治规划研究:以海南陵水县为例[D].长沙:湖南农业大学,2019.
HE W B. Study on prevention and control planning of agricultural non-point source pollution: A case study of Lingshui County, Hainan Province [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2019.
- [6] 刘志超,迟明慧.三峡库区汉丰湖水华期水体富营养化研究[J].防化研究,2024,3(2):68-72.
LIU Z C, CHI M H. Study on water eutrophication during algal bloom period in Hanfeng Lake of the Three Gorges Reservoir area [J]. CBRN Defense, 2024(2): 68-72.
- [7] 梁斐斐,蒋先军,袁俊吉,等.降雨强度对三峡库区坡耕地土壤氮、磷流失主要形态的影响[J].水土保持学报,2012,26(4):81-85.
LIANG F F, JIANG X J, YUAN J J, et al. Main features of the loss of nitrogen and phosphorus and rainfall intensity influence in the slope farmland of the Three Gorges Reservoir area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(4): 81-85.
- [8] 曹瑞霞,刘京,邓开开,等.三峡库区典型紫色土小流域径流及氮磷流失特征[J].环境科学,2019,40(12):5330-5339.
CAO R X, LIU J, DENG K K, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus losses and runoff in a typical purple soil watershed in the Three Gorges Reservoir area [J]. Environmental Science, 2019, 40(12): 5330-5339.
- [9] 刘莲,刘红兵,汪涛,等.三峡库区消落带农用坡地磷素径流流失特征[J].长江流域资源与环境,2018,27(11):2609-2618.
LIU L, LIU H B, WANG T, et al. Phosphorus loss from sloping cropland in water fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(11): 2609-2618.
- [10] 朱波,汪涛,王建超,等.三峡库区典型小流域非点源氮磷污染的来源与负荷[J].中国水土保持,2010(10):34-36.
ZHU B, WANG T, WANG J C, et al. Source and load of non-point source nitrous and phosphorus pollution of typical small watersheds in the Three Gorges Reservoir area [J]. Soil and Water Conservation in China, 2010(10): 34-36.
- [11] 陈成龙,高明,倪九派,等.三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响[J].环境科学,2016,37(5):1707-1716.
CHEN C L, GAO M, NI J P, et al. Nitrogen losses under the action of different land use types of small catchment in Three Gorges Region [J]. Environmental Science, 2016, 37(5): 1707-1716.
- [12] 金昶颖.三峡库区小流域面源污染特征研究[D].北京:北京林业大学,2023.
JIN C Y. Characteristics of non-point source pollution in small watershed of Three Gorges Reservoir area [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2023.
- [13] 许其功,刘鸿亮,沈珍瑶,等.三峡库区典型小流域氮磷流失特征[J].环境科学学报,2007,27(2):326-331.
XU Q G, LIU H L, SHEN Z Y, et al. Characteristics on nitrogen and phosphorus losses in the typical small watershed of the Three Georges Reservoir area [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(2): 326-331.
- [14] 霍洪江,汪涛,魏世强,等.三峡库区紫色土坡耕地氮素流失特征及其坡度的影响[J].西南大学学报(自然科学版),2013,35(11):112-117.
HUO H J, WANG T, WEI S Q, et al. Characteristics of nitrogen loss from hillslope croplands of purple soil in the Three Gorges Reservoir area and impacts of slope gradients [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2013, 35(11): 112-117.
- [15] 邓华,高明,龙翼,等.石盘丘小流域不同土地利用方式下土壤氮磷流失形态及通量[J].环境科学,2021,42(1):251-262.
DENG H, GAO M, LONG Y, et al. Characteristics of soil nitrogen and phosphorus losses under different land-use schemes in the Shipanqiu watershed [J]. Environmental Science, 2021, 42(1): 251-262.
- [16] 倪珂.三峡库区典型农业小流域土壤侵蚀与养分流失对景观格局的响应[D].重庆:西南大学,2022.
NI K. Response of soil erosion and nutrient loss to landscape pattern in typical agricultural watersheds in the Three Gorges

- Reservoir area[D].Chongqing: Southwest University, 2022.
- [17] 郭敏丽. 颗粒有机物矿化驱动磷释放的光化学机制及其环境效应研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2024.
- GUO M L. Study on the photochemical mechanism and environmental effects of phosphorus release driven by mineralization of particulate organic matter [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2024.
- [18] 曹志洪, 林先贵, 杨林章, 等. 论“稻田圈”在保护城乡生态环境中的功能 I. 稻田土壤磷素径流迁移流失的特征[J]. 土壤学报, 2005, 42(5): 799-804.
- CAO Z H, LIN X G, YANG L Z, et al. Ecological function of "paddy field ring" to urban and rural environment I. characteristics of soil P losses from paddy fields to waterbodies with runoff[J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(5): 799-804.
- [19] 黎嘉成. 三峡库区石盘丘小流域氮磷非点源污染特征研究[D]. 重庆: 西南大学, 2019.
- LI J C. Study on non-point source pollution characteristics of nitrogen and phosphorus in shipanqiu Small watershed in Three Gorges Reservoir area [D]. Chongqing: Southwest University, 2019.
- [20] 陈杰, 陈婕, 王逸超, 等. 耕作型稻田消纳村庄生活污水及其土壤脲酶活性研究[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(10): 33-37.
- CHEN J, CHEN J, WANG Y C, et al. Study on the treatment of village sewage and urease activity of soil in cultivated paddy field [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2021, 60(10): 33-37.
- [21] 付莉, 张磊, 蔚建军, 等. 三峡库区支流回水区水体分层与藻类生长[J]. 环境工程学报, 2015, 9(5): 2265-2271.
- FU L, ZHANG L, YU J J, et al. Water stratification and its relevance to growth of algal community at backwater area in Three Gorges Reservoir[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(5): 2265-2271.
- [22] 姜世伟. 三峡库区典型小流域面源污染特征研究[D]. 重庆: 重庆师范大学, 2017.
- JIANG S W. Study on characteristics of non-point source pollution in typical small watershed of Three Gorges Reservoir area[D]. Chongqing: Chongqing Normal University, 2017.
- [23] 陈仕奇, 龙翼, 严冬春, 等. 三峡库区石盘丘小流域氮磷输出形态及流失通量[J]. 环境科学, 2020, 41(3): 1276-1285.
- CHEN S Q, LONG Y, YAN D C, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus output and loss flux in the Shipanqiu watershed, Three Gorges Reservoir area [J]. Environmental Science, 2020, 41(3): 1276-1285.
- [24] 薛利红, 杨林章. 太湖流域稻田湿地对低污染水中氮磷的净化效果[J]. 环境科学研究, 2015, 28(1): 117-124.
- XUE L H, YANG L Z. Purification of water with low concentrations of N and P in paddy wetlands in Taihu Lake region [J]. Research of Environmental Sciences, 2015, 28(1): 117-124.
- [25] 范鸿志, 朱建强. 稻田表面流处理对池塘养殖水的净化效果[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2013, 10(5): 61-63.
- FAN H Z, ZHU J Q. Purification effect of fishpond water treated by surface flow in paddy field [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2013, 10(5): 61-63.
- [26] 陶玲, 彭格格, 陈思媛, 等. 稻田湿地循环利用池塘养殖尾水效果[J]. 水生生物学报, 2022, 46(10): 1466-1474.
- TAO L, PENG G G, CHEN S Y, et al. Effect of recycling fishpond wastewater in paddy wetland [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2022, 46(10): 1466-1474.
- [27] 周元. 利用稻田改善池塘水质研究[D]. 湖北 荆州: 长江大学, 2013.
- ZHOU Y. Study on using paddy fields to improve the quality of pond water[D]. Jingzhou, Hubei: Yangtze University, 2013.
- (上接第 40 页)
- [110] 冯慧琳, 徐辰生, 何欢辉, 等. 生物炭对土壤酶活和细菌群落的影响及其作用机制[J]. 环境科学, 2021, 42(1): 422-432.
- FENG H L, XU C S, HE H H, et al. Effect of biochar on soil enzyme activity & the bacterial community and its mechanism[J]. Environmental Science, 2021, 42(1): 422-432.
- [111] ASGHAR W, KATAOKA R. Green manure incorporation accelerates enzyme activity, plant growth, and changes in the fungal community of soil[J]. Archives of Microbiology, 2022, 204(1): e7.
- [112] YE X F, LIU H E, LI Z, et al. Effects of green manure continuous application on soil microbial biomass and enzyme activity[J]. Journal of Plant Nutrition, 2014, 37(4): 498-508.
- [113] 操敏, 李明. 行间生草对葡萄园土壤养分酶活性及微生物群落的影响[J/OL]. 生态与农村环境学报, 1-16 [2025-04-19]. <https://doi.org/10.19741/j.issn.1673-4831.2024.0885>.
- CAO M, LI M. Effects of inter-row grass on soil nutrient enzyme activity and microbial community in vineyards [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 1-16 [2025-04-19]. <https://doi.org/10.19741/j.issn.1673-4831.2024.0885>.
- [114] WEN Z H, WHITE P J, SHEN J B, et al. Linking root exudation to belowground economic traits for resource acquisition[J]. New Phytologist, 2022, 233(4): 1620-1635.
- [115] WU A J, FANG Y, LIU S, et al. Root morphology and rhizosphere acid phosphatase activity in legume and graminoid species respond differently to low phosphorus supply[J]. Rhizosphere, 2021, 19: e100391.
- [116] FAN X Y, GE A H, QI S S, et al. Root exudates and microbial metabolites: Signals and nutrients in plant-microbe interactions[J]. Science China Life Sciences, 2025, 68(8): 2290-2302.