

江汉平原稻虾轮作模式地表径流氮、磷流失特征

陈玲, 范先鹏, 黄敏, 刘冬碧, 吴茂前, 夏颖, 张富林, 张志毅, 倪承凡, 程子珍

引用本文:

陈玲, 范先鹏, 黄敏, 刘冬碧, 吴茂前, 夏颖, 张富林, 张志毅, 倪承凡, 程子珍. 江汉平原稻虾轮作模式地表径流氮、磷流失特征[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(7): 1520–1530.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1397>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

太湖地区稻麦轮作农田有机和常规种植模式下氮磷径流流失特征研究

陈秋会, 席运官, 王磊, 李妍, 张弛, 田伟, 田然, 肖兴基, 赵克强

农业环境科学学报. 2016, 35(8): 1550–1558 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0102>

不同农艺管理措施下双季稻田氮磷径流流失特征及其主控因子研究

杨坤宇, 王美慧, 王毅, 尹黎明, 李勇, 吴金水

农业环境科学学报. 2019, 38(8): 1723–1734 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0609>

广东稻田氮素径流流失特征

姚建武, 宁建凤, 李盟军, 王荣辉, 曾招兵, 罗英健, 艾绍英, 李振森, 陈位超, 欧计寅

农业环境科学学报. 2015(4): 728–737 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.04.018>

秸秆还田影响长江下游稻田周年氮磷径流风险

张刚, 张世洁, 王德建, 俞元春, 张磊

农业环境科学学报. 2021, 40(3): 640–649 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0499>

不同施肥方式下洱海流域水稻-大蒜轮作体系氮磷径流损失研究

姚金玲, 张克强, 郭海刚, 王凤, 张贵龙, 任天志

农业环境科学学报. 2017, 36(11): 2287–2296 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0537>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陈玲, 范先鹏, 黄敏, 等. 江汉平原稻虾轮作模式地表径流氮、磷流失特征[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(7): 1520–1530.

CHEN L, FAN X P, HUANG M, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus loss in surface runoff under the rice–crawfish rotation system in the Jianghan Plain, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(7): 1520–1530.



开放科学 OSID

江汉平原稻虾轮作模式地表径流氮、磷流失特征

陈玲^{1,2}, 范先鹏^{2*}, 黄敏¹, 刘冬碧², 吴茂前², 夏颖², 张富林², 张志毅², 倪承凡², 程子珍²

(1. 武汉理工大学资源与环境学院, 武汉 430064; 2. 湖北省农业科学院植保土肥所, 国家农业环境潜江观测实验站, 湖北省农业面源污染工程技术中心, 武汉 430064)

摘要:为明确江汉平原地区典型稻虾轮作模式的农田地表径流流失特征,推动稻虾综合生态种养模式的可持续发展,从2018年9月至2021年9月,采用原位监测的方法,对稻虾轮作模式典型田块地表径流发生过程进行了研究。结果表明:该模式稻田年产生径流10次,产流量 $(1\,270\pm287)$ mm,产流系数44.7%。总氮年均流失量 (24.59 ± 4.70) kg·hm⁻²,其中虾季占50.8%,稻季占49.2%;总磷年均流失量 (3.28 ± 1.03) kg·hm⁻²,其中虾季占46.3%,稻季占53.7%。流失的氮素以可溶性总氮为主(77.4%),其中硝态氮占44.5%,铵态氮占34.8%;流失的磷素以可溶性磷为主(54.8%)。农田地表径流总氮平均浓度为 (1.88 ± 2.10) mg·L⁻¹,总磷平均浓度为 (0.25 ± 0.14) mg·L⁻¹。虾季总氮浓度平稳,稻季施肥后波动较大且有峰值;总磷只在虾季投料和稻季施肥后有小幅波动,并无明显峰值。稻虾轮作模式地表径流氮、磷的流失形态,径流总氮、总磷浓度,田面水中氮、磷浓度受田面水层与投入品的影响,虾季和稻季表现不同,平均氮、磷浓度值高于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类标准限值。研究识别出稻虾轮作模式的氮、磷流失风险时段为:虾季结束时的排水期、稻季成熟期的排水期以及强降雨和施肥后1周内的耦合期。

关键词:稻虾轮作;地表径流;氮流失;磷流失;江汉平原

中图分类号:S511;S966.12 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)07-1520-11 doi:10.11654/jaes.2021-1397

Characteristics of nitrogen and phosphorus loss in surface runoff under the rice–crawfish rotation system in the Jianghan Plain, China

CHEN Ling^{1,2}, FAN Xianpeng^{2*}, HUANG Min¹, LIU Dongbi², WU Maoqian², XIA Ying², ZHANG Fulin², ZHANG Zhiyi², NI Chengfan², CHENG Zizhen²

(1. School of Resources and Environment, Wuhan University of Technology, Wuhan 430064, China; 2. Institute of Plant Protection and Soil Fertilizer, Hubei Academy of Agricultural Sciences, National Station for Qianjiang Agro-Environment, Hubei Engineering Research Center for Agricultural Non-point Source Pollution Control, Wuhan 430064, China)

Abstract: To promote the sustainable development of rice–crawfish integrated ecological planting and rearing systems, the characteristics of farmland surface runoff loss in a typical rice–crawfish rotation system were clarified in the Jianghan Plain. From September 2018 to September 2021, a typical rice–crawfish rotation plot was selected for *in situ* monitoring to study the surface runoff. The results showed that the annual runoff frequency was 10 times, the yield was $(1\,270\pm287)$ mm, and the yield coefficient was 44.7%. The annual total nitrogen loss was (24.59 ± 4.70) kg·hm⁻², of which 50.8% and 49.2% loss was in the crawfish and rice seasons, respectively. The average annual loss

收稿日期:2021-12-01 录用日期:2022-01-28

作者简介:陈玲(1996—),女,湖北孝感人,硕士研究生,从事农业面源污染监测与治理研究。E-mail:Chenling_134@163.com

*通信作者:范先鹏 E-mail:fan1965@163.com

基金项目:湖北省农业科技创新行动项目(2018skjcx01)

Project supported: The Agricultural Science and Technology Innovation Action Project of Hubei Province, China(2018skjcx01)

of total phosphorus was $(3.28 \pm 1.03) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, of which the crawfish and rice seasons accounted for 46.3% and 53.7%, respectively. The nitrogen loss was mainly as soluble total nitrogen (77.4%), including nitrate nitrogen (44.5%) and ammonium nitrogen (34.8%). Phosphorus loss was primarily as soluble phosphorus (54.8%). The average concentration of total nitrogen and total phosphorus was $(1.88 \pm 2.10) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $(0.25 \pm 0.14) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. The total nitrogen concentration in the crawfish season was stable but fluctuated considerably and peaked after fertilization in the rice season. Total phosphorus fluctuated only slightly after crawfish feeding and fertilization in the rice season but had no obvious peak value. In the rice-crawfish system, the form of nitrogen and phosphorus loss in surface runoff, the concentration of nitrogen and phosphorus in runoff, and the concentration of nitrogen and phosphorus in surface water were affected by the surface water layer and inputs. The crawfish season and the rice season showed different performances, and the average concentrations of nitrogen and phosphorus were higher than the class III standard limit of the *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838—2002). The risk periods of nitrogen and phosphorus loss in the rice-crawfish rotation system were identified as drainage at the end of the crawfish season, drainage at the mature stage of the rice season, and coupling stage within one week after heavy rainfall and fertilization.

Keywords: rice-crawfish rotation system; surface runoff; nitrogen loss; phosphorus loss; Jiangnan Plain

江汉平原位于长江中游,长江与汉江之间,该区域水网密布,是全国最重要的水稻种植基地,常年水稻种植面积 66.7 万 hm^2 ,也是全国最重要的淡水养殖区,区域水质关系到长江水环境安全。近年来,区域内稻虾综合种养模式由于小龙虾良好的经济效益而快速发展,2019年全国小龙虾产量排名前30的县(市、区)中,江汉平原占9个^[1],稻虾模式面积达到 40 万 hm^2 ,为地区经济的发展做出了巨大贡献。但是,稻虾综合种养模式的生态环境效益尚存争议。一方面,稻田引入小龙虾促进了物质在稻田内的就地循环和能量运转,具有良好的生态效益^[2]。小龙虾养殖的残饵和粪便为水稻生长提供了有机养分,相较于池塘养殖,实现了水资源的节约和氮、磷的循环利用。另一方面,相较于其他稻作模式,稻虾模式对水资源消耗严重^[3];同时由于秸秆还田和饲料投入,稻虾综合种养模式田面水硝态氮、氨氮含量高于单季稻田,增加了水体富营养化的风险^[4]。传统稻田的地表径流主要受到降雨和灌溉的驱动^[5],优化施肥可以有效控制农田地表径流氮、磷流失,有机肥替代措施^[6]、控释氮肥^[7]和添加生物炭^[8-9]均能减少氮、磷径流流失,肥料深施和穴施能有效降低径流总氮、总磷浓度,有效控制农田氮、磷流失^[10],错期施肥和优化施肥量也是减控农田氮、磷流失的方法^[11]。稻虾轮作模式巧妙地将养殖和种植相结合,同时还改变了水分管理与养分投入的方式,因此具有与传统稻田不同的氮、磷流失特征。本研究选择江汉平原地区最有代表性的稻虾轮作模式稻田,进行连续3 a(2018年9月至2021年9月)的原位监测,明确农田地表径流氮、磷流失特征与规律,为精准减控稻虾综合种养模式氮、磷污染提供依据,助力稻虾产业的可持续发展。

1 材料与方法

1.1 监测区域概况

监测区域位于湖北省潜江市浩口镇柳洲村($112^{\circ}37'E, 30^{\circ}22'N$),处于江汉平原腹地,属北亚热带季风湿润型气候,年均气温 16.1°C ,无霜期 250 d ,年均降水量 1100 mm 。土壤类型为长江冲积物母质发育而成的潮土型水稻土,是典型的南方水网农区。

监测田块位于连片稻虾综合种养区域内,为“日”字型结构,宽 61.50 m ,长 195.10 m ,总面积 1.19 hm^2 ,其中稻田净面积 0.84 hm^2 ,养殖沟面积 0.25 hm^2 ,养殖沟占比约20%。养殖环沟均宽 6.00 m 、深 2.00 m ,田间养殖沟宽 4.00 m 、深 1.00 m (图1)。该监测田块2015年由稻麦轮作改造为稻虾综合种养模式。

1.2 监测方法

监测并记录监测田块每次发生的降雨、灌溉、排水以及其他所有农事操作和投入品。降雨量采用雨量器(JQR-I型,JB·T 9458—1999)计量;灌溉量采用水表计量;排水量采用田间水位法计量;在稻田田面和养殖沟分别安装水位尺,记录单次灌排和降雨前后水位,其他时期每2~3 d记录一次水位。监测设施安放位置见图1。

监测田块的农事操作均按农户习惯(表1)进行。养虾季为水稻收获后(9月底10月初)至次年水稻插秧之前(6月初),开始复水时田面水深为 $10\sim 20 \text{ cm}$,后逐渐加深至 $50\sim 60 \text{ cm}$,2月中下旬或3月初开始投放虾饲料,4—5月捕捞成虾。稻季分两次施肥,第一次施复合肥,第二次施尿素(表2)。稻季田面不养虾,水稻收割后秸秆全量还田。

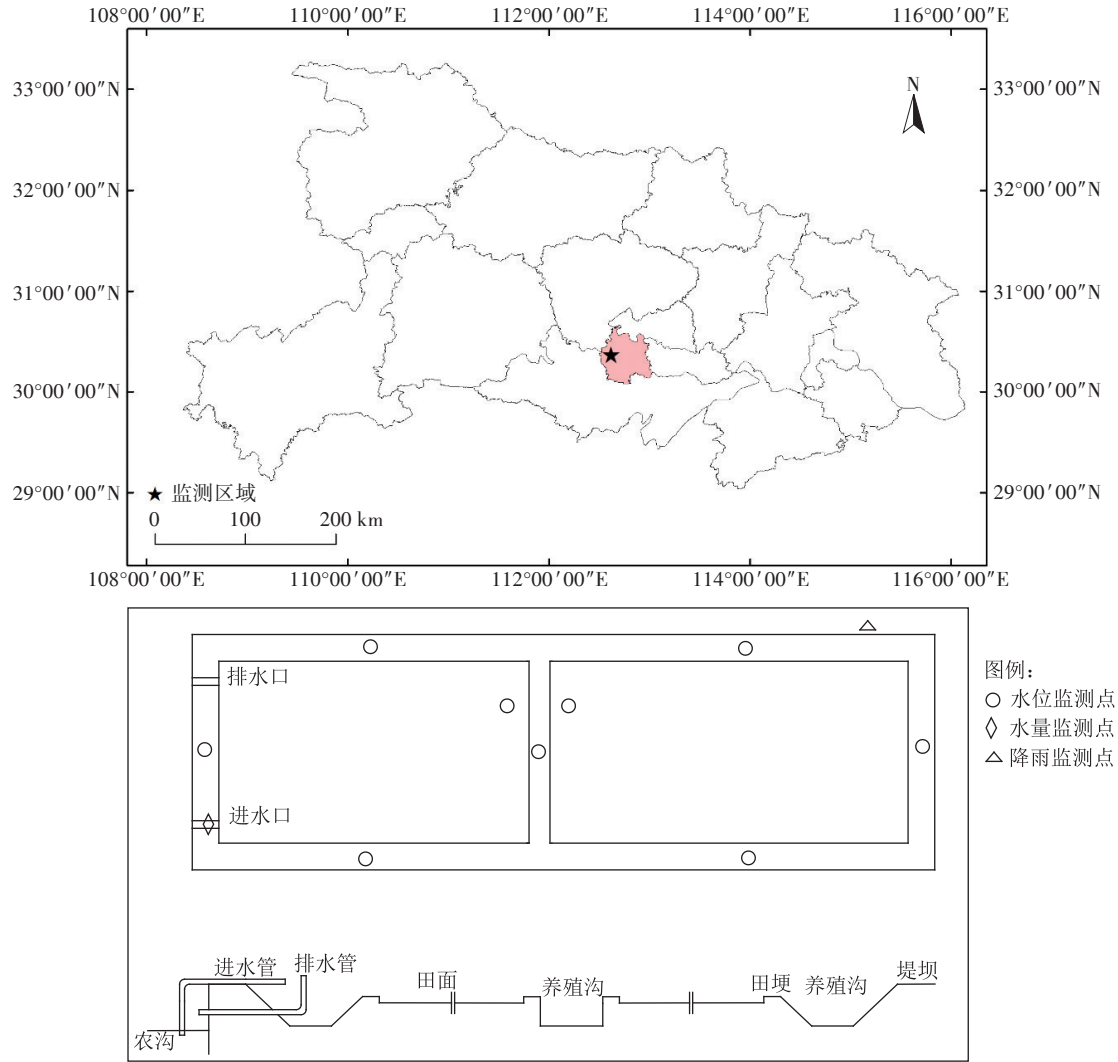


图1 监测区域所在位置及监测田块示意图

Figure 1 Location of monitoring area and schematic diagram of monitoring field

表1 定位监测田块主要农事操作记录

Table 1 Record form of main farming operations in the field

种养季 Farming season	主要农事阶段 Main farming stage	第1年 First year	第2年 Second year	第3年 Third year
虾季	水稻收获后晒田	2018-09-19	2019-09-21	2020-10-13
	开始复水,进入冬季养虾期	2018-10-08	2019-10-03	2020-10-31
	饵料投放期	2019-03-06—05-18	2020-02-25—05-15	2021-02-18—05-31
	集中排水,虾季结束	2019-06-05	2020-06-03	2021-06-05
稻季	水稻插秧	2019-06-07	2020-06-05	2021-06-07
	第一次施肥	2019-06-22	2020-06-15	2021-06-05
	第二次施肥	—	2020-06-26	2021-06-28
	水稻收获	2019-09-20	2020-10-12	2021-09-26

1.3 样品采集与检测方法

1.3.1 采样方法及检测指标

本研究采集降雨样、灌溉水样、排水样和田面水样,具体检测指标及采样方法等见表3。

1.3.2 检测方法

水样总氮(TN)、可溶性总氮(DTN)采用碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定,硝态氮(NO₃-N)采用紫外分光光度法测定,铵态氮(NH₄⁺-N)采用靛酚

表2 监测年度不同投入品养分施用量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)
Table 2 Nutrients application rate in different year($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

年度 Year	虾饲料 Crawfish fodder		复合肥 Compound fertilizer			尿素 Urea
	N	P	N	P_2O_5	K_2O	N
2018—2019年度	44.4	14.9	64.0	29.3	37.3	0
2019—2020年度	35.2	8.0	64.0	29.3	37.3	46.7
2020—2021年度	71.0	16.2	69.4	26.7	40.0	58.4

蓝比色法测定;水样总磷(TP)、可溶性总磷(DTP)采用过硫酸钾氧化-钼蓝比色法测定。颗粒态氮(PN)为TN和DTN的差值。可溶性有机氮(DON)为DTN和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的差值。颗粒态磷(PP)为TP和DTP的差值。

1.3.3 计算方法

(1)径流量

稻虾轮作模式田块四周堤坝高出田面约1.05 m,几乎不产生溢流,排水均由人为控制,每开放排水管排水一次,记为一次径流。

水位高于田面时($h \geq 1.05$ m),全田排水:

$$Q_1 = \frac{S_{\text{前}} + S_{\text{后}} + \sqrt{S_{\text{前}} \times S_{\text{后}}}}{3} \times (h_{\text{前}} - h_{\text{后}})$$

$$S = (187.1 + 4h) \times (53.5 + 4h)$$

水位低于田面时($1.05 \text{ m} \geq h \geq 0$ m),仅养殖沟排水:

$$Q_2 = \frac{(h_{\text{前}} + h_{\text{后}} + 4) \times (h_{\text{前}} - h_{\text{后}})}{2} \times 489.2 + 4 \times (h_{\text{前}} - h_{\text{后}}) \times 59.5$$

故有,

$$R = \begin{cases} \frac{Q_1}{11\ 900} \times 0.001, h_{\text{前}} \geq h_{\text{后}} \geq 1.05 \text{ m} \\ \frac{Q_1 + Q_2}{11\ 900} \times 0.001, h_{\text{前}} \geq 1.05 \text{ m} \geq h_{\text{后}} \\ \frac{Q_2}{11\ 900} \times 0.001, 1.05 \text{ m} \geq h_{\text{前}} \geq h_{\text{后}} \end{cases}$$

式中: R 为径流量, mm ; Q 为排水体积, m^3 ; h 为田间多个水位尺读数的均值,均为相对于沟底的水位, m ; S

为水位为 h 时的水面面积, m^2 ; 187.1和53.5分别为稻虾田最底部的长和宽, m ; 489.2为环沟长度, m ; 59.5为田中沟长度, m ; 11 900为田块面积, m^2 。

(2)产流系数

产流系数为一段时间内,田块径流量与降雨量和灌溉量的比值。

$$RC = \frac{R}{P + I} \times 100\%$$

式中: RC 为产流系数,%; P 为降雨量, mm ; I 为灌溉量, mm 。

(3)氮、磷流失量

氮、磷流失量计算公式为:

$$TL = 0.001 \times \sum_{i=1}^n (c_i \times V_i) / 1.19$$

式中: TL 为氮、磷流失量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; i 为第 i 次径流; c_i 为第 i 次径流的浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; V_i 为第 i 次径流量, m^3 ; 1.19为田块总面积, hm^2 。

1.3.4 数据处理

采用Excel 2016进行数据处理,采用Origin 2020绘图。

2 结果与分析

2.1 径流发生特征

3年共发生29次径流,第1年和第2年各产流9次,第3年产流11次(表4)。3个年度内,虾季的产流次数分别是5、5、4次,稻季的产流次数分别是4、4、7

表3 采样方法及检测指标

Table 3 Sampling methods and detection indexes

水样 Water sample	采样时间 Sampling time	采样方法 Sampling method	保存方法 Preserving method	检测指标 Detection index
降雨样	2018-09-19— 2021-09-26	单次降雨结束后,于次日上午9点记录降雨量,并采集雨量器中所有雨水,混匀后取两份500 mL水样	冷冻保存	总氮(TN)、可溶性总氮(DTN)、硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)、铵态氮($\text{NH}_4\text{-N}$)、总磷(TP)、可溶性总磷(DTP)和pH
灌溉水样	2018-09-19— 2021-09-26	记录每次灌溉时间和灌溉量,灌溉期间在进水口处连续多次(不少于8次)取样,每次取水样1 000 mL,将所有水样混合后,取两份500 mL水样		
排水水样	2018-09-19— 2021-09-26	记录每次排水时间,排水期间在排水口处连续多次(不少于8次)取样,每次取水样1 000 mL,将所有水样混合后,取两份500 mL水样		
田面水样	2020-10-13— 2021-09-26	每10 d采集一次田面水。在虾季饵料投放期,每月选择1次饵料投放期连续10 d采集田面水;在稻季每次施肥后连续10 d采集田面水。田间均匀多点取样,混匀后取两份500 mL水样		

次。3个年度年平均产流量为 $(1\,270\pm 287)$ mm, 虾季平均产流量为 (710 ± 25) mm, 高于稻季平均产流量 (560 ± 307) mm, 年均产流系数为44.7%, 其中虾季为38.8%, 稻季为55.3%, 虾季明显低于稻季。年际间虾季产流量差异较小, 变异系数为4.35%, 但稻季产流量差异较大, 变异系数高达67.0%, 这主要与虾季和稻季的需水、排水特征明显不同有关。

2.2 稻虾轮作模式氮、磷流失特征

2.2.1 农田氮、磷流失量

3个年度监测结果表明(表5): 稻虾轮作模式农田TN年均流失量为 (24.59 ± 4.70) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 其中虾季流失量为 (12.49 ± 2.50) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 占全年的50.8%, 稻季流失量为 (12.10 ± 4.41) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 占全年的49.2%。TP年均流失量为 (3.28 ± 1.03) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 其中虾季流失量为 (1.52 ± 0.50) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 占全年的46.3%, 稻季流失量为 (1.76 ± 1.21) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 占全年的53.7%。

2019—2020年度氮、磷流失量较其他两个年度偏高, 因为该年度稻季降雨量大而且集中, 所以导致稻季的氮、磷流失量显著增加。不同年度稻、虾两季氮、磷流失量占比略有不同, 这与当年的降雨特征和

田间措施(投食、施肥、灌排)等相关。平均来看, 虾、稻两季的氮、磷流失量均相差较小。

2.2.2 农田氮、磷流失形态

3个年度监测结果表明(图2): 稻虾轮作模式氮素流失以DTN为主, 占77.4%, 其中 NO_3^- -N占44.5%, NH_4^+ -N占34.8%; 磷素排放以DTP为主, 占54.8%, PP占45.2%。

虾季和稻季氮素流失虽然都是以DTN为主, 但所占比例不同, 虾季只占69.8%, 而稻季占85.3%。同时, 两季流失DTN的组成也有很大的不同: 虾季以 NO_3^- -N为主(60.7%), 其次是DON(28.3%), 而 NH_4^+ -N占比最少(11.0%); 稻季则以 NH_4^+ -N为主(55.0%), 其次是 NO_3^- -N(30.8%), DON最少(14.2%)。

虾季磷素流失主要以DTP为主, 占全部磷流失量的62.2%, PP占37.8%。而稻季略有不同, DTP和PP流失量相当, 分别占48.4%和51.6%。

氮和磷流失形态主要是受虾、稻两季的水分管理、投入品以及生产措施的影响。虾季田面长期保持一定的水层, 且在饲料投放期需要定期换水, 导致饲料中蛋白质分解成的 NH_4^+ -N不易积累, 在硝化作用下转化为硝酸盐, 因此流失的氮以 NO_3^- -N为主。稻

表4 江汉平原稻虾轮作模式径流发生特征

Table 4 Runoff characteristics of rice-crawfish rotation system in Jiangnan Plain

年度 Year	生长季 Farming season	产流次数 Runoff time	径流量 Runoff volume/mm	降雨量 Precipitation/mm	灌溉量 Irrigation volume/mm	产流系数 Runoff coefficient/%
2018—2019 年度	虾季	5	704	460	1 286	40.4
	稻季	4	364	129	634	47.7
	周年	9	1 068	589	1 920	42.6
2019—2020 年度	虾季	5	682	418	1 895	29.5
	稻季	4	994	1 094	389	67.1
	周年	9	1 676	1 512	2 284	44.2
2020—2021 年度	虾季	4	743	523	909	52.0
	稻季	7	324	295	500	40.7
	周年	11	1 067	818	1 432	47.9
均值	虾季	5	710±25	467±43	1 363±25	38.8±9.2
	稻季	5	560±307	506±421	508±307	55.3±11.1
	周年	10	1 270±287	973±392	1 871±287	44.7±2.3

表5 江汉平原稻虾轮作模式氮、磷流失量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

Table 5 Nitrogen and phosphorus loss in rice-crawfish rotation system in Jiangnan Plain($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

年度 Year	TN			TP		
	虾季Crawfish season	稻季Rice season	合计Total	虾季Crawfish season	稻季Rice season	合计Total
2018—2019年度	9.21	10.77	19.98	1.13	1.07	2.20
2019—2020年度	12.99	18.04	31.03	1.19	3.47	4.66
2020—2021年度	15.26	7.49	22.75	2.22	0.74	2.96
年平均	12.49±2.50	12.10±4.41	24.59±4.70	1.52±0.50	1.76±1.21	3.28±1.03

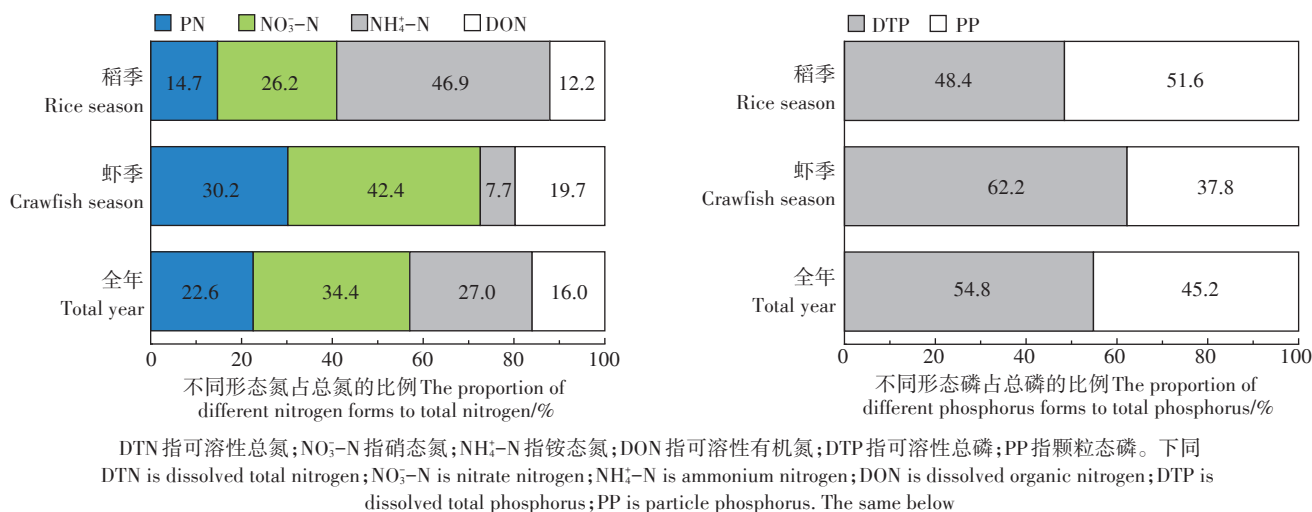


图2 稻虾轮作模式径流流失各形态氮、磷占比

Figure 2 Proportions of nitrogen and phosphorus in runoff loss of rice-crawfish rotation system

季施肥期田面水水层浅,施肥后的一段时间内,受降雨的影响发生径流,因此氮素流失的形态以 NH₄⁺-N 为主。

2.3 稻虾轮作模式农田径流氮、磷浓度特征

2.3.1 农田径流氮素浓度特征

3个年度监测结果表明(表6):稻虾轮作模式农田径流 TN 加权平均浓度为(1.88±2.10) mg·L⁻¹,DTN 浓度为(1.45±1.89) mg·L⁻¹,NO₃⁻-N 浓度为(0.65±0.20) mg·L⁻¹,NH₄⁺-N 浓度为(0.51±1.35) mg·L⁻¹,且年际间变化较小。稻季农田径流 TN、DTN,尤其是 NH₄⁺-N 浓度明显高于虾季,稻季 TN 浓度为(2.01±2.76) mg·L⁻¹、DTN 浓度为(1.72±2.52) mg·L⁻¹、NH₄⁺-N 浓度为(0.94±1.72) mg·L⁻¹,虾季 TN 浓度为(1.17±0.56) mg·L⁻¹、DTN 浓度为(1.23±0.22) mg·L⁻¹、NH₄⁺-N 浓度为(0.14±0.08)

mg·L⁻¹。稻季 NO₃⁻-N 浓度为(0.53±0.22) mg·L⁻¹,明显低于虾季的(0.75±0.14) mg·L⁻¹。

分析同一种种养季内各次径流氮浓度变化发现(图3),虾季农田径流各形态氮素浓度较为平稳,无明显峰值。稻季径流氮浓度变幅较大,浓度峰值出现在施肥后的首次排水中,主要发生在播种移栽期至返青分蘖期,也是底肥和返青分蘖肥施用后的一段时期,主要表现为 TN 和 NH₄⁺-N 浓度升高,NO₃⁻-N 浓度变化较小,且峰值浓度大小与距离施肥时间有关。作为投入品,肥料明显比饲料对农田径流氮浓度的影响更大。

2.3.2 农田径流磷素浓度特征

3个年度监测结果表明(表7):稻虾轮作模式农田径流 TP 浓度为(0.25±0.14) mg·L⁻¹,DTP 浓度为

表6 江汉平原稻虾轮作模式农田径流不同形态氮的浓度(mg·L⁻¹)Table 6 Different forms nitrogen concentrations in rice-crawfish rotation system in Jiangnan Plain(mg·L⁻¹)

年度 Year	生长季 Farming season	TN	DTN	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N
2018—2019 年度	虾季	1.31±0.17	1.04±0.18	0.75±0.18	0.13±0.06
	稻季	2.21±2.14	1.82±2.27	0.63±0.20	1.02±2.18
	全年	1.68±1.59	1.36±1.63	0.71±0.20	0.49±1.57
2019—2020 年度	虾季	1.91±0.34	1.23±0.22	0.77±0.13	0.06±0.05
	稻季	1.82±1.95	1.61±1.13	0.46±0.08	0.97±1.06
	全年	1.85±1.38	1.46±0.83	0.59±0.19	0.60±0.90
2020—2021 年度	虾季	2.08±0.67	1.42±0.10	0.72±0.06	0.21±0.08
	稻季	2.32±3.38	1.87±3.12	0.56±0.26	0.74±1.72
	全年	2.15±2.76	1.56±2.55	0.67±0.21	0.38±1.44
均值	虾季	1.17±0.56	1.23±0.22	0.75±0.14	0.14±0.08
	稻季	2.01±2.76	1.72±2.52	0.53±0.22	0.94±1.72
	全年	1.88±2.10	1.45±1.89	0.65±0.20	0.51±1.35

表7 江汉平原稻虾轮作模式农田径流不同形态磷的浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)Table 7 Different forms phosphorus concentrations in rice-crawfish rotation system in Jianghan Plain ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

年度 Year	生长季 Farming season	TP	DTP	PP
2019年度	虾季	0.16±0.04	0.08±0.02	0.08±0.03
	稻季	0.22±0.17	0.12±0.04	0.10±0.14
	全年	0.19±0.13	0.09±0.04	0.09±0.10
2020年度	虾季	0.17±0.1	0.10±0.07	0.07±0.03
	稻季	0.35±0.13	0.15±0.02	0.20±0.15
	全年	0.28±0.15	0.13±0.06	0.15±0.14
2021年度	虾季	0.30±0.03	0.21±0.04	0.09±0.03
	稻季	0.23±0.15	0.15±0.07	0.08±0.09
	全年	0.28±0.12	0.20±0.06	0.09±0.07
均值	虾季	0.21±0.09	0.13±0.06	0.08±0.04
	稻季	0.29±0.17	0.14±0.06	0.15±0.14
	全年	0.25±0.14	0.14±0.06	0.11±0.11

(0.14 ± 0.06) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, PP浓度为(0.11 ± 0.11) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。稻季农田径流 TP 浓度为(0.29 ± 0.17) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 高于虾

季的(0.21 ± 0.09) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; DTP 浓度种养两季差异较小, 分别为(0.14 ± 0.06) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和(0.13 ± 0.06) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; PP 浓度稻季为(0.15 ± 0.14) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 明显高于虾季的(0.08 ± 0.04) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

分析同一种养季内各次径流磷浓度变化(图3)可知, 稻季变化幅度明显高于虾季。

2.4 稻虾轮作模式田面水氮、磷浓度

2.4.1 田面水氮素浓度变化

2020—2021 年度田面水监测结果表明: 全年田面水 TN、DTN、 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 平均浓度分别为(3.73 ± 3.71)、(3.14 ± 3.60)、(0.75 ± 0.33)、(1.07 ± 1.80) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 虾季田面水 TN、DTN、 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 平均浓度分别为(1.85 ± 0.67)、(1.46 ± 0.42)、(0.76 ± 0.16)、(0.21 ± 0.14) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 稻季田面水 TN、DTN、 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 浓度分别为(6.53 ± 4.54)、(5.65 ± 4.64)、(0.75 ± 0.48)、(2.37 ± 2.29) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。稻季田面水中的 TN、DTN 和 NH_4^+ -N 浓度明显高于虾季, 而两季的 NO_3^- -N 浓度差别较小。

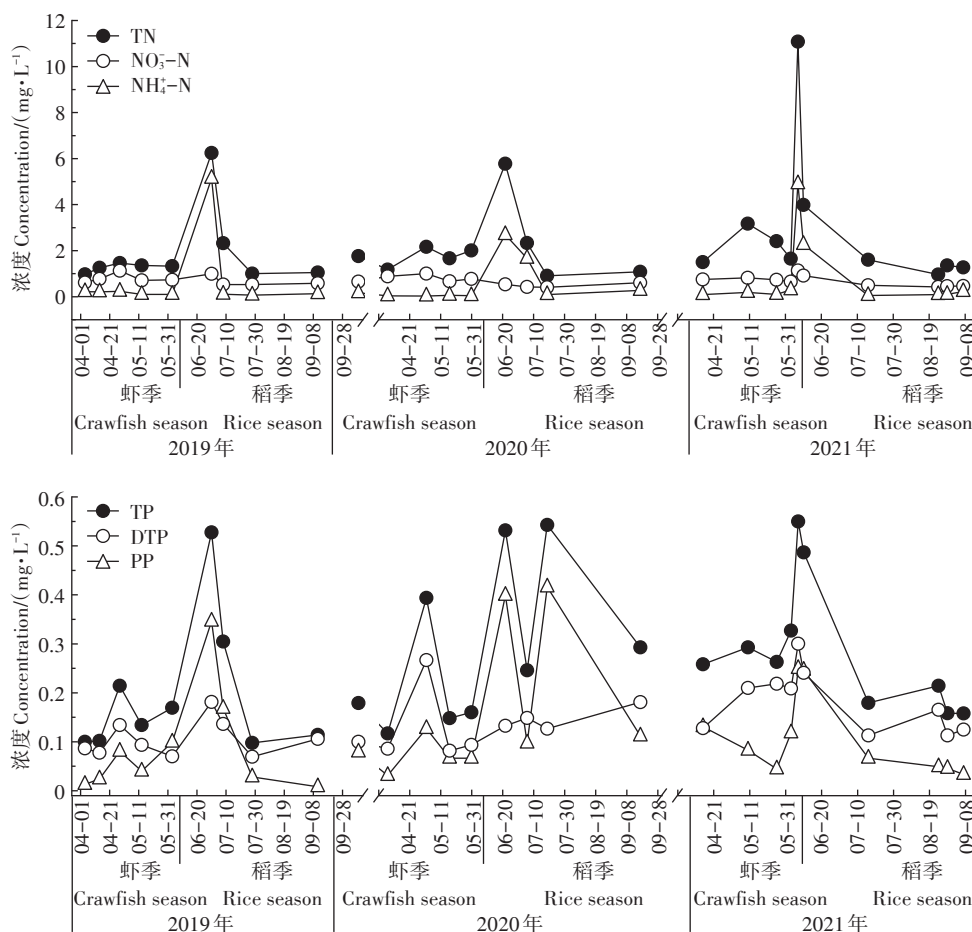


图3 江汉平原稻虾轮作模式农田径流不同形态氮、磷浓度变化特征

Figure 3 Characteristics of nitrogen and phosphorus concentrations in different forms in runoff under rice-crawfish rotation system in Jianghan Plain

整个养虾季田面水氮浓度变化较小,只在5月中旬以后小龙虾快速生长及捕捞期,田面水TN和DTN的浓度才有小幅度升高(图4)。而在稻季,田面水氮浓度变化有明显的峰值期。受底肥和返青分蘖肥施用影响,稻季出现两次氮浓度峰值。在施底肥和追肥

后第1天,田面水中TN、DTN和 NH_4^+-N 浓度达到峰值,5~7 d降至最低水平;而 NO_3^--N 浓度一直保持平稳。同时受稻季田面水分管理的影响,6月中下旬,随着田面水量的减小,TN、DTN和 NO_3^--N 浓度不断升高,在降雨后浓度下降;而 NH_4^+-N 浓度一直保持平

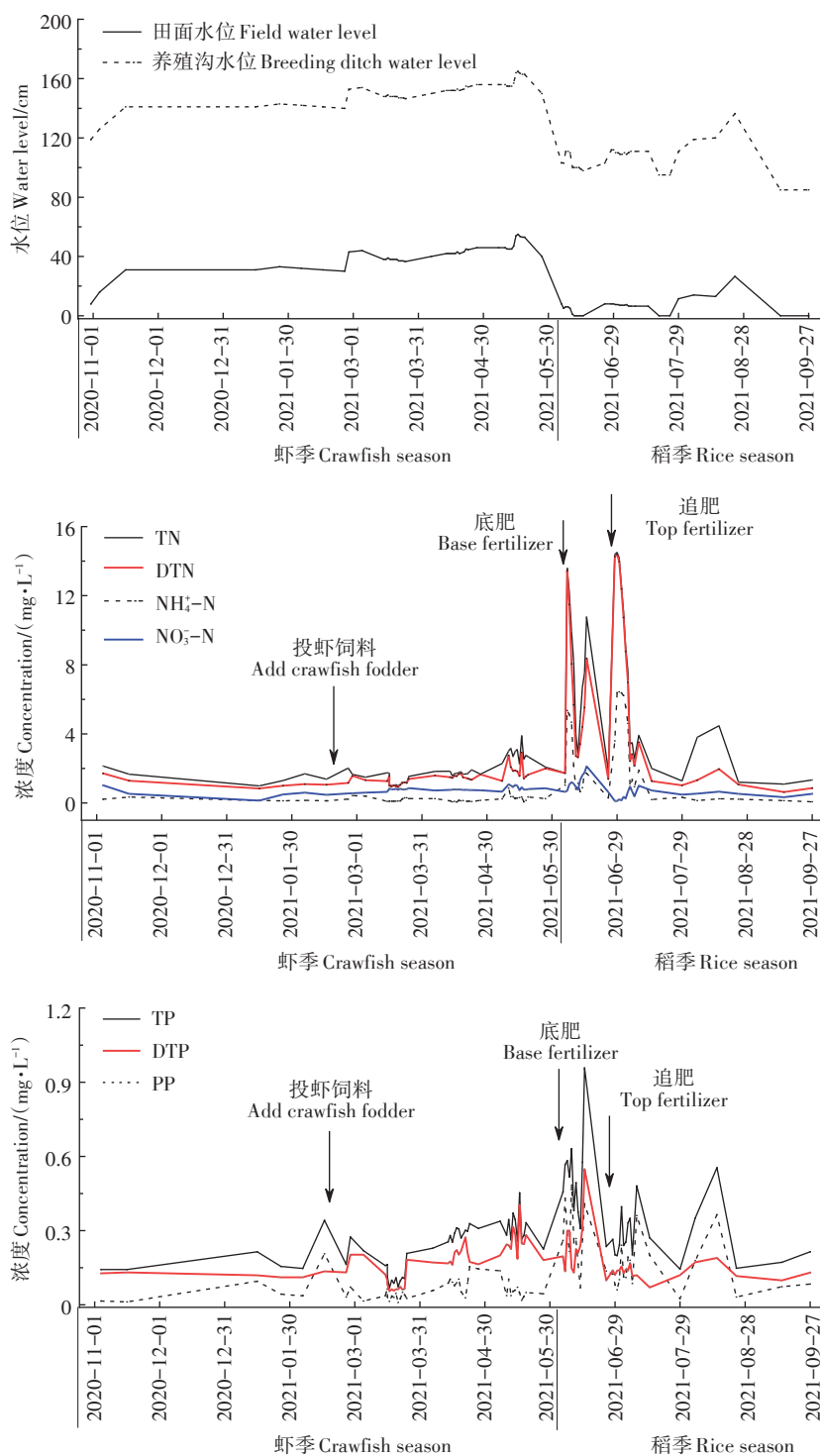


图4 江汉平原稻虾模式农田田面水不同时期氮、磷浓度变化

Figure 4 Changes of nitrogen and phosphorus concentrations in surface water of rice-crawfish system at different periods in Jiangnan Plain

稳。水稻生长后期田面水氮浓度的小幅波动,主要是受降雨的影响。

2.4.2 田面水磷素浓度变化

2020—2021年度的田面水监测结果表明:稻虾轮作模式田面水TP、DTP和PP的平均浓度分别为 (0.29 ± 0.15) 、 (0.17 ± 0.08) 、 (0.11 ± 0.11) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。稻季田面水TP浓度为 (0.37 ± 0.18) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,高于虾季的 (0.23 ± 0.09) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,两季DTP浓度差别较小,稻季为 (0.18 ± 0.09) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,虾季为 (0.17 ± 0.08) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

整个虾季田面水磷浓度变化相对比较平稳,只是在3月中旬开始投放饵料后,受投放饵料、捕捞等扰动的影响,田面水中磷浓度开始小幅上升(图4)。而稻季,受施肥、水分管理等农事活动的影响,田面水中磷浓度一直小幅波动,但无明显峰值,且生长前期的变化大于后期。

3 讨论

3.1 稻虾轮作模式农田地表径流氮、磷流失量

稻虾轮作模式农田地表径流氮、磷流失量与稻麦轮作、双季稻等稻田轮作模式相比,虽然同样年际间变化大,但并没有明显增加,其中稻季的流失量与单季稻的流失量相当(表5)。本研究的3a监测中,虾季氮、磷径流流失量分别为 $9.21\sim15.26$ 、 $1.13\sim2.22$ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,稻季氮、磷径流流失量分别为 $7.49\sim18.04$ 、 $0.74\sim3.47$ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。我国不同地区、不同模式稻田氮、磷流失量见表8。张子璐等^[12]基于文献调研,研究了我国六大稻区的氮、磷径流流失量,其中华中单双季稻区

的平均氮、磷流失量分别为 16.59 、 0.89 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。缪杰杰等^[13]在安徽巢湖的监测结果为单季稻氮、磷流失量分别为 $11.49\sim17.68$ 、 $1.23\sim1.60$ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

稻虾轮作模式农田地表径流流失量与稻虾共作模式相当,虾季的流失量也没有明显差异。在张丁月等^[14]的研究结果中,稻虾共作模式农田排水氮、磷输出量分别为 31.72 、 1.43 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。倡国涵等^[15]研究了稻虾共作模式虾季结束时的养殖废水氮、磷排放通量,结果分别为 $9.6\sim10.7$ 、 $2.0\sim2.5$ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

相比于高密度的池塘养殖虾类,稻虾综合种养模式显著降低了水产养殖的氮、磷排放通量。陈东兴等^[16]研究了3种虾类池塘养殖方式下氮、磷污染排放情况,青虾、南美白对虾和罗氏沼虾TN排放强度分别为 37.20 、 181.00 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 148.00 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,TP排放强度分别为 7.78 、 46.80 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 34.50 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,远高于稻虾轮作中虾季的氮、磷流失量。

3.2 稻虾轮作模式氮、磷流失风险期与影响因素

农田地表径流氮、磷流失量与径流发生量和径流中氮、磷浓度有关。虽然稻虾综合种养对稻田的养殖沟和田埂进行了田间工程改造,增加了田间容量,但从监测结果看,稻虾轮作模式产流系数(44.7%)仍高于同地区稻作模式(34.7%)^[25],主要是由于虾季一直处于高水位运行,同时养虾过程还需要进行水质性换水和补水;而稻季出于机械栽种和收获的需要,排水量比其他稻作模式更大。从地表径流发生量来看,稻虾轮作模式一年有两次发生风险期:虾季结束时的排水和稻季收获前的排水。本研究监测结果表明:虾季

表8 我国不同地区、不同模式稻田氮、磷流失通量

Table 8 Nitrogen and phosphorus loss fluxes in paddy fields of different planting systems in different regions of China

种植制度 Cropping system	地点 Location	时间 Time	氮流失量 Nitrogen loss amount/ $(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$	磷流失量 Phosphorus loss amount/ $(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$	研究方法 Method	文献来源 Reference
稻-虾轮作	湖北-潜江	2019—2021	19.98~31.03	2.20~4.66	野外实测	本研究
稻-虾共作	湖北-荆州	2018	31.72	1.43	野外实测	[14]
稻-麦轮作	太湖流域	2011	18.55~78.21	0.53~2.33	野外实测	[17]
	太湖流域	2012	21.31~54.84	0.25~0.83	野外实测	[17]
单季稻	浙江-湖州	2015-05—2015-10	1.96~2.68	0.04~0.06	野外实测	[18]
	湖北-江陵	2019-05—2019-09	1.81~4.08		野外实测	[19]
	巢湖流域	2019-05—2019-09	11.49~17.68	1.23~1.60	野外实测	[13]
	黑龙江-兴凯湖	2013—2017	4.9~28.2		物理模型	[20]
	上海-奉贤	2019-06—2019-10	3.90~20.51	1.03~1.66	野外实测	[21]
双季稻	福建-福州	2008—2010	14.0~42.9	0.24~0.56	野外实测	[22]
	广东-增城	2008—2012	13.17~38.14	0.60~3.29	野外实测	[23-24]
	广东-清远	2008—2012	8.66~24.05	0.69~2.44	野外实测	[23-24]
	广东-高州	2008—2012	11.58~88.16	0.97~6.68	野外实测	[23-24]

结束时的氮、磷排放量分别占全年氮、磷排放量的29.9%、28.6%;水稻成熟期的氮、磷排放量分别占全年氮、磷排放量的9.3%、12.0%。

从地表径流氮、磷浓度来看,饵料对虾季田面水氮、磷浓度的影响明显不及施肥对稻季田面水浓度的影响。主要原因有两点:一是虾季田面水水层深(>40 cm),缓冲容量大,而稻季田面水水层浅(<15 cm);二是饵料中氮、磷多为有机态,养分的释放过程较长,而肥料中氮、磷多为无机态,水溶性好。因此,稻虾轮作模式稻季施肥期(播种栽插期至分蘖盛期)是氮、磷流失的高风险期。这与张富林等^[26]、夏小江等^[27]、吴俊等^[28]对稻田施肥后田面水TN、TP浓度在施肥当日达到最高,而后迅速下降,5~10 d趋于稳定的研究结果一致。施肥后遇到降雨而产生地表径流,极易发生氮、磷流失。稻虾轮作模式稻季施肥后至少一周为流失风险期。

监测时段内29次地表径流中,TN浓度高于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类标准(以下称Ⅲ类标准)的有26次,其中高于Ⅴ类标准的有10次。 NH_4^+-N 浓度高于Ⅲ类标准的有5次,均为稻季施肥后不久发生的径流。TP浓度高于Ⅲ类标准的有16次,其中高于Ⅴ类标准的有10次。

因此,稻虾轮作模式农田地表径流氮、磷流失风险期共有3个时间段:其一为虾季结束后,排放田面水至水层适合水稻栽插时期。田面水自然落干,尽可能减少外排水量和减少对田面水的扰动可以有效减少这一时期氮、磷的流失;其二是稻季底肥施用至追肥施用后一周的施肥期,即水稻栽播至分蘖盛期,除改进施肥方法(养分总量控制、控释肥替代、深施等)外,应尽可能降低田面水水位,提高稻田库容,减少降雨产流外排的风险;其三为稻季水稻收获前,排放田面水,使田面落干以利于机械收获,应控制好断水时间,尽可能让田面水自然落干,控制田面水的排放。

4 结论

(1)稻虾轮作模式年径流发生量为 $(1\,270\pm 287)$ mm,年均产流系数为44.7%;虾季由于养殖需要,产流量为稻季的1.3倍。

(2)稻虾轮作模式虾、稻两季的总氮、总磷流失量各占一半;受田面水层与投入品的影响,虾季和稻季氮、磷流失形态、径流水中各形态氮、磷浓度和田面水中各形态氮、磷浓度有所不同,虾季以硝态氮和可溶

态磷为主,稻季以铵态氮和颗粒态磷为主。

(3)识别稻虾轮作模式氮、磷流失的风险时段为:虾季结束时的排水期(6月初)、稻季成熟期的排水期(9月初),以及强降雨和施肥后一周内的耦合期(6—7月)。

(4)依据虾、稻两季田间管理和径流特征的不同,以下途径可有效减少氮、磷流失量:虾季适当降低养殖水位,在生产季节结束时,提前自然落干田面水;稻季减少排放施肥后泡田水,成熟期排水前控制断水时间,使田面水自然落干。

参考文献:

- [1] 农业农村部渔业渔政管理局,全国水产技术推广总站,中国水产学会. 2020中国小龙虾产业发展报告[J]. 中国水产, 2020(7): 8-17. Fisheries and Fisheries Administration of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Aquatic Technology Extension Station, China Fisheries Society. China crawfish industry development report 2020 [J]. *China Fisheries*, 2020(7): 8-17.
- [2] 奚业文,周洵. 稻虾连作共作稻田生态系统中物质循环和效益初步研究[J]. 中国水产, 2016(3): 78-82. XI Y W, ZHOU X. A preliminary study on material circulation and benefits of rice-crawfish patten in paddy ecomode[J]. *China Fisheries*, 2016(3): 78-82.
- [3] 曹涛贵,江洋,汪金平,等. 稻虾共作模式的“双刃性”及可持续发展策略[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(9): 1245-1253. CAO C G, JIANG Y, WANG J P, et al. “Dual character” of rice-crawfish culture and strategy for its sustainable development[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(9): 1245-1253.
- [4] 陈松文,江洋,汪金平,等. 湖北省稻虾模式发展现状与对策分析[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(2): 1-7. CHEN S W, JIANG Y, WANG J P, et al. Situation and countermeasures of integrated rice-crawfish farming in Hubei Province[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2020, 39(2): 1-7.
- [5] 杨育红,阎百兴. 降雨-土壤-径流系统中氮磷的迁移[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 27-30. YANG Y H, YAN B X. Transport of nitrogen and phosphorus in rainfall-soil-runoff interaction mode[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(5): 27-30.
- [6] 姜利红,谭力彰,田昌,等. 不同施肥对双季稻田径流氮磷流失特征的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(6): 33-38, 45. JIANG L H, TAN L Z, TIAN C, et al. Effects of fertilizer applications on runoff nitrogen and phosphorus loss in double cropping paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(6): 33-38, 45.
- [7] 刘汝亮,王芳,王开军,等. 控释氮肥侧条施用对东北地区水稻产量和氮肥损失的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 37(10): 63-68. LIU R L, WANG F, WANG K J, et al. Effects of side strip application of controlled release nitrogen fertilizer on rice yield and nitrogen loss in northeast China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 37(10): 63-68.
- [8] 肖建南,张爱平,刘汝亮,等. 生物炭施用对稻田氮磷肥流失的影响[J]. 中国农业气象, 2017, 38(3): 163-171. XIAO J N, ZHANG A P, LIU R L, et al. Effects of biochar application on the losses of nitrogen and phosphorus in surface water of paddy field[J]. *Chinese Journal of*

- Agrometeorology*, 2017, 38(3):163-171.
- [9] 冯轲, 田晓燕, 王莉霞, 等. 化肥配施生物炭对稻田面水氮磷流失风险影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(2):329-335. FENG K, TIAN X Y, WANG L X, et al. Influence of combined synthetic fertilizer and biochar applications on nitrogen and phosphorus losses from surface water of paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(2):329-335.
- [10] 冯国禄, 龚军慧. 尿素深施条件下模拟稻田中氮磷的动态特征及其降污潜力分析[J]. 重庆大学学报, 2011, 24(7):114-119. FENG G L, GONG J H. Dynamics of nitrogen and phosphorus in paddy field under deep application condition of urea pill and its pollution-reducing potential[J]. *Journal of Chongqing University*, 2011, 24(7):114-119.
- [11] 张亚莉, 陈德州, 徐梅宣, 等. 施肥量和降雨对水稻田氮流失影响的试验研究[J]. 现代农业装备, 2015(2):32-36. ZHANG Y L, CHEN D Z, XU M X, et al. Experimental study on the effects of fertilization and precipitation on nitrogen loss in paddy fields[J]. *Modern Agricultural Equipments*, 2015(2):32-36.
- [12] 张子璐, 刘峰, 侯庭钰. 我国稻田氮磷流失现状及影响因素研究进展[J]. 应用生态学报, 2019, 30(10):3292-3302. ZHANG Z L, LIU F, HOU T Y. Current status of nitrogen and phosphorus losses and related factors in Chinese paddy fields: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(10):3292-3302.
- [13] 缪杰杰, 刘运峰, 胡宏祥, 等. 不同施肥模式对稻田氮磷流失及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5):86-93. MIAO J J, LIU Y F, HU H X, et al. Effects of different fertilization modes on nitrogen and phosphorus loss and yield in paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(5):86-93.
- [14] 张丁月, 杨亚珍, 刘凯文, 等. 不同施肥模式下稻-虾共作的氮磷平衡及效益分析[J]. 中国土壤与肥料, 2020(4):124-129. ZHANG D Y, YANG Y Z, LIU K W, et al. Nitrogen-phosphorus balance and economic benefit of rice-crawfish culture under different fertilization patterns[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2020(4):124-129.
- [15] 吕国涵, 袁家富, 彭成林, 等. 稻虾共作模式下小龙虾养殖对水环境的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(23):299-303. SI G H, YUAN J F, PENG C L, et al. Effects of crawfish farming on water environment under rice-crawfish co-cropping mode[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(23):299-303.
- [16] 陈东兴, 杨超, 华雪铭, 等. 3种虾类养殖池塘污染强度及氮磷营养物质收支研究[J]. 河南农业科学, 2013, 42(8):132-136. CHEN D X, YANG C, HUA X M, et al. Pollution fluxes and budgets of nitrogen and phosphorus nutrients in three types of crawfish culture ponds[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2013, 42(8):132-136.
- [17] 陈秋会, 席运官, 王磊, 等. 太湖地区稻麦轮作农田有机和常规种植模式下氮磷径流流失特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(8):1550-1558. CHEN Q H, XI Y G, WANG L, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus runoff losses in organic and conventional rice-wheat rotation farmland in Taihu Lake region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(8):1550-1558.
- [18] 斯圆丽, 朱少威, 王季丰, 等. 施用包膜尿素对水稻生长和氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3):48-53. SI Y L, ZHU S W, WANG J F, et al. Effects of coated urea application on rice growth and runoff losses of nitrogen and phosphorus from paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(3):48-53.
- [19] 张富林, 刘冬碧, 范先鹏, 等. 农艺深施及配施缓控释氮肥对水稻产量及氮素损失的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(5):858-866. ZHANG F L, LIU D B, FAN X P, et al. Effects of agronomic deep application and combined application of controlled release nitrogen fertilizer on rice yield and nitrogen loss in a paddy field[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(5):858-866.
- [20] NAN Z, WANG X Y, DU Y, et al. Critical period and pathways of water borne nitrogen loss from a rice paddy in northeast China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 753:142116.
- [21] CUI N X, CAI M, ZHANG X, et al. Runoff loss of nitrogen and phosphorus from a rice paddy field in the east of China: Effects of long-term chemical N fertilizer and organic manure applications[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 22:e01011.
- [22] 黄东风, 李卫华, 王利民, 等. 水肥管理措施对水稻产量、养分吸收及稻田氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(2):62-66. HUANG D F, LI W H, WANG L M, et al. Effects of water and fertilizer managements on yield, nutrition uptake of rice and loss of nitrogen and phosphorus by runoff from paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(2):62-66.
- [23] 姚建武, 宁建凤, 李盟军, 等. 广东稻田氮素径流流失特征[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(4):728-737. YAO J W, NING J F, LI M J, et al. Characteristics of nitrogen runoff from paddy fields in Guangdong Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(4):728-737.
- [24] 宁建凤, 姚建武, 艾绍英, 等. 广东典型稻田系统磷素径流流失特征[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(3):257-268. NING J F, YAO J W, AI S Y, et al. Characteristics of phosphorus runoff losses from typical paddy fields in Guangdong Province, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(3):257-268.
- [25] 段小丽, 范先鹏, 张富林, 等. 湖北省稻田地表径流氮磷养分流失规律初探[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(18):3953-3957. DUAN X L, FAN X P, ZHANG F L, et al. Regular mode of nitrogen and phosphorus losses in rice field of Hubei Province[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2012, 51(18):3953-3957.
- [26] 张富林, 吴茂前, 夏颖, 等. 江汉平原稻田面水氮磷变化特征研究[J]. 土壤学报, 2019, 56(5):1190-1200. ZHANG F L, WU M Q, XIA Y, et al. Changes in nitrogen and phosphorus in surface water of paddy field in Jiangnan Plain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(5):1190-1200.
- [27] 夏小江, 胡清宇, 朱利群, 等. 太湖地区稻田面水氮磷动态特征及径流流失研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4):21-25. XIA X J, HU Q Y, ZHU L Q, et al. Study on dynamic changes of nitrogen and phosphorus in surface water of paddy field and runoff loss in Taihu region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(4):21-25.
- [28] 吴俊, 樊剑波, 何园球, 等. 不同减量施肥条件下稻田面水氮素动态变化及径流损失研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(9):1561-1566. WU J, FAN J B, HE Y Q, et al. Dynamics of nitrogen and runoff loss in ponding water of paddy field under different fertilization practices[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(9):1561-1566.

(责任编辑:李丹)