

鄱阳湖平原双季稻区稻田氮磷流失的季节分布特征及污染风险分析

杨涛, 王玉清, 吴火亮, 俞莹, 陈静蕊, 陈晓芬, 秦文婧, 刘佳, 徐昌旭

引用本文:

杨涛, 王玉清, 吴火亮, 俞莹, 陈静蕊, 陈晓芬, 秦文婧, 刘佳, 徐昌旭. 鄱阳湖平原双季稻区稻田氮磷流失的季节分布特征及污染风险分析[J]. *农业环境科学学报*, 2023, 42(4): 852–860.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0841>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

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

农业环境科学学报. 2022, 41(7): 1520–1530 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1397>

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>

"双季稻-冬闲田"生态系统碳交换动态变化及其影响因素

魏甲彬, 徐华勤, 周玲红, 成小琳, 唐先亮, 傅志强, 唐启源, 唐剑武

农业环境科学学报. 2018, 37(5): 1035–1044 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1179>

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>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

杨涛, 王玉清, 吴火亮, 等. 鄱阳湖平原双季稻区稻田氮磷流失的季节分布特征及污染风险分析[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(4): 852-860.
YANG T, WANG Y Q, WU H L, et al. Analysis of seasonal distribution characteristics and pollution risk of nitrogen and phosphorus losses in double-cropping rice fields in the Poyang Lake Plain[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(4): 852-860.

鄱阳湖平原双季稻区稻田氮磷流失的季节分布特征及污染风险分析

杨涛¹, 王玉清², 吴火亮³, 俞莹³, 陈静蕊^{1*}, 陈晓芬¹, 秦文婧¹, 刘佳^{1*}, 徐昌旭¹

(1. 江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所, 国家红壤改良工程技术研究中心, 南昌 330200; 2. 南昌县农业农村局, 南昌 330200; 3. 江西省农业生态与资源保护站, 南昌 330046)

摘要:为明确鄱阳湖平原双季稻区稻田氮磷流失的季节性分布及污染风险,于2015—2019年对位于江西省南昌市南昌县向塘镇国控监测点的“冬闲-双季稻”种植模式进行了原位监测。结果表明:监测期早稻季径流量占全年总量的比例最高,为39.11%~61.50%,其次是冬闲季,占23.31%~54.30%,而晚稻季的径流量最小;氮磷养分流失量与径流量的季节分配规律相似,也大体表现为早稻季>冬闲季>晚稻季。然而,监测期多数年份(除2016年外)防控关键期(施肥后10 d)的径流量及氮磷流失量占全年总量的比例均低于13%,表明双季稻田防控关键期的污染风险可能被夸大。但极端降水条件下,径流量、氮流失量和磷流失量在全年的占比分别为27.34%~52.19%、14.21%~54.06%和25.38%~45.95%,远高于防控关键期,表明极端降水可能导致较大的双季稻田面源污染风险。因此,对于鄱阳湖平原双季稻区,早稻季和冬闲季均是稻田氮磷流失防控的重要时期。由于降水事件具有偶然性,仅靠降低“防控关键期”的氮磷流失来防控面源污染具有较大风险,极端降水条件下的氮磷流失防控可能是未来消减双季稻区面源污染的重点研究方向。

关键词:鄱阳湖平原;双季稻;氮磷流失;季节分布;污染风险

中图分类号:X52 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)04-0852-09 doi:10.11654/jaes.2022-0841

Analysis of seasonal distribution characteristics and pollution risk of nitrogen and phosphorus losses in double-cropping rice fields in the Poyang Lake Plain

YANG Tao¹, WANG Yuqing², WU Huoliang³, YU Ying³, CHEN Jingrui^{1*}, CHEN Xiaofen¹, QIN Wenjing¹, LIU Jia^{1*}, XU Changxu¹

(1. Soil and Fertilizer & Resources and Environmental Institute, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Nanchang 330200, China; 2. Agriculture and Rural Bureau of Nanchang County, Nanchang 330200, China; 3. Jiangxi Agricultural Ecology and Resource Protection Station, Nanchang 330046, China)

Abstract: To better understand the seasonal distribution and pollution risk of nitrogen and phosphorus losses in double-cropping rice fields in the Poyang Lake Plain, *in-situ* monitoring was carried out on the "winter fallow double-cropping rice" planting pattern at the state-controlled monitoring site of Xiangtang Town, Nanchang County, Jiangxi Province, China during 2015—2019. According to the results, the runoff volume in the early rice season showed the highest proportion (39.11%—61.50%) of the annual total during the

收稿日期:2022-08-22 录用日期:2023-01-02

作者简介:杨涛(1983—),男,江西南昌人,硕士,助理研究员,主要从事农业环境保护方面的研究。E-mail:51477229@qq.com

*通信作者:陈静蕊 E-mail:chenjr5526@163.com; 刘佳 E-mail:liujia422@126.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD1700203);江西省现代农业科研协同创新专项(JXTCXQN 202209, JXTCXQN202008);国家现代农业产业技术体系建设专项(绿肥, CARS-22-Z-06)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China (2021YFD1700203); Modern agriculture Collaborative Innovation Project in Jiangxi Province (JXTCXQN202209, JXTCXQN202008); China Agriculture Research System of MOF and MARA (Green Manure, CARS-22-Z-06)

monitoring period, followed by the winter fallow season (23.31%–54.30%) and the late rice season. The seasonal distribution of nitrogen and phosphorus losses was similar to that of the runoff volume, with a higher proportion in the early rice season than in the winter fallow season. In most monitoring years (except 2016), however, both the runoff volume and nitrogen and phosphorus losses accounted for less than 13% of the annual total in the critical period of prevention and control (10 days after fertilization), revealing a possibly exaggerated pollution risk in the critical period of prevention and control in double-cropping rice fields. In contrast, under extreme precipitation conditions, the proportions of runoff volume, nitrogen loss, and phosphorus loss were as high as 27.34%–52.19%, 14.21%–54.06%, and 25.38%–45.95% of the annual total, respectively, much higher than those in the critical period of prevention and control. This indicates that extreme precipitation may bring a higher risk of non-point source pollution in double-cropping rice fields. Hence, both the early rice season and the winter fallow season are important periods for the prevention and control of nitrogen and phosphorus losses in the double-cropping rice fields in the Poyang Lake Plain. Given the unpredictability of precipitation events, it may lead to risks when the prevention and control of non-point source pollution is achieved only by reducing the nitrogen and phosphorus losses in "the critical period of prevention and control". Thus, the prevention and control of nitrogen and phosphorus losses in extreme precipitation conditions is a potential key research direction for relieving non-point source pollution in double-cropping rice fields.

Keywords: Poyang Lake Plain; double-cropping rice; nitrogen and phosphorus loss; seasonal distribution; pollution risk

水稻是我国第一大粮食作物,近五年的播种面积占粮食作物总播种面积的1/4^[1]。然而,水稻生产中长期以来不合理施肥,以及粗放的田间管理模式和不均衡的降水条件,导致稻田成为农业面源的第二大污染源^[2–3]。

由于稻田长期处于淹水环境,在降雨及灌溉过量的条件下产生的地表径流成为稻田氮磷养分流失进入周边水体的主要方式^[4–5]。影响径流养分流失的主要因素有两个:其一是径流量,其二是径流水中养分的浓度。传统观念认为,稻田每次施肥后的7~10 d是田面水浓度较高的时段,此时产生的地表径流水中的养分浓度较高,是稻田氮磷流失防控的关键时期^[6–7]。该观点过分强调了径流水水质对稻田面源污染防治的重要性,却忽视了径流水量对面源污染风险的贡献。

受全球变暖影响,极端降水的发生频率和发生范围都呈持续增加趋势^[8–10],作为驱动地表径流的主要气象因子,降水的强度及时长是影响地表产流量高低的关键因素^[11–12]。稻田对田面水的存储时间和空间有限,尤其是在极端降水条件下,大量田面存水势必需要外排,虽然其氮磷养分浓度较低,但水量较大,排放的养分量也不容忽视。因此,研究极端降水情况下稻田排水产生的污染风险可为我国南方稻区面源污染防治提供重要的数据支持。

鄱阳湖平原是我国南方双季稻重要种植区之一,在当前全球灾害频发、疫情肆虐的形势下,保证双季稻区稻米产量稳定对我国粮食安全意义重大。与水旱轮作及单季稻种植模式相比,双季稻田全年淹水时

间更长,加上亚热带季风气候带来的充沛降水,其氮磷养分流失风险也可能更大。要有效降低双季稻区的农业面源污染风险,关键在于明确其养分流失的季节分布特征,进而有针对性地研发相应的防控措施。前人大多关注于水稻季的氮磷养分流失特征及相关防控技术研发^[13],而对冬闲季的报道却很少。为此,本研究以鄱阳湖平原区典型的冬闲–双季稻模式为研究对象,连续5 a监测了全年度的地表径流变化,期为南方双季稻区农业面源污染防治、水稻清洁生产提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验点位于江西省南昌市南昌县向塘镇高田村(28°27'N, 115°59'E),该地属于亚热带湿润性季风气候区,年均气温及年均降水量分别为17.8℃和1 624.4 mm。土壤类型为潴育型水稻土,质地为砂质壤土。监测点建立时土壤耕层(0~20 cm)的基础理化性状为:土壤pH 5.14,有机质含量37.19 g·kg⁻¹,全氮、全磷、全钾含量分别为2.29、0.44、9.74 g·kg⁻¹,铵态氮和硝态氮含量分别为7.01 mg·kg⁻¹和1.89 mg·kg⁻¹,有效磷和速效钾含量分别为7.67 mg·kg⁻¹和56.00 mg·kg⁻¹。该试验为国控监测点一般点原位监测试验,监测点建于2014年,正式运行时间为2015年。

1.2 研究方案

1.2.1 试验设计

按照全国国控监测点一般点建设要求,该田间监测试验共设置3个处理:常规处理、主因子优化处理、

综合优化处理,每个处理3次重复。小区面积为32 m²,随机排列。本研究监测时间为2015—2019年,监测点种植模式为冬闲-双季稻。每年早、晚稻的施肥时间及移栽收获时间见表1。本研究所有数据的获取均基于对常规处理的监测。常规处理田间管理模式及施肥方式均参照当地农民习惯操作,早、晚稻施肥情况为:早稻基肥施用量为45%复合肥(N:P₂O₅:K₂O=20:10:15)375 kg·hm⁻²,分蘖肥追施尿素(N 46%)150 kg·hm⁻²、氯化钾(K₂O 60%)90 kg·hm⁻²,折合N、P₂O₅、K₂O分别为144.0、37.5、110.3 kg·hm⁻²;晚稻基肥施用45%复合肥375 kg·hm⁻²,分蘖肥追施尿素187.5 kg·hm⁻²、氯化钾105 kg·hm⁻²,折合N、P₂O₅、K₂O分别为161.3、37.5、119.3 kg·hm⁻²。

为方便比较不同时段降水及径流在全年的分布,本研究将每个监测周年分为早稻季、晚稻季、冬闲季3季,早稻季从泡田期开始至收获止,早稻收获后至晚稻收获止为晚稻季,全年其他时段为冬闲季。极端降水条件的定义为24 h内降水量≥50 mm(气象降雨暴雨以上级别)。

1.2.2 样品采集、测定及方法

降水数据来源于国家气象局(南昌县点,代号58606)。径流水采用径流池(长、宽、高分别为4、1、0.8 m)收集。每次降水并产生径流排水后,记录各小区径流池水面高度(mm),计算小区径流量。水样采集前先用清洁工具充分搅匀径流池中的径流水,然后利用清洁容器在径流池不同部位、不同深度多点采样,样品混匀后装入取样瓶送测。总氮(TN)采用碱性过硫酸钾消煮-紫外分光光度法测定;总磷(TP)采用碱性过硫酸钾消煮-钼蓝比色法测定。基于前人的研究结果^[6-7],本研究中氮磷防控关键期暂定义为每次施肥后的前10 d。

1.2.3 数据处理

采用Microsoft Excel 2003、Origin 2021和SPSS 13.0

软件进行数据统计分析和制图。采用SPSS 13.0软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA),Duncan法进行不同处理的差异显著性检验,显著水平设置为 $\alpha=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 降水的年度变化及月度分配

2015—2019年的降水量分别为2 205.6、1 869.0、1 704.4、1 889.5 mm和1 612.8 mm(图1)。除2015年的11月和2018年的9月外,其他年份降水量较多的时段均集中在每年的3—7月。每年降水量最多的月份均为6月,2015—2019年该月的降水量分别为493.3、385.9、514.4、308.0、329.9 mm,占全年降水量的比例范围为16.3%~30.2%。极端降水发生频率较高的月份主要集中在4、6月和7月,2015—2019年极端降水产生的雨量分别为443.0、427.4、336.9、401.3 mm和416.9 mm,在全年降水量中的占比为19.8%~25.8%。2015—2019年降水天数集中在146~178 d之间(图2),降水天数较多的时段主要集中在每年的3—6月,单月降水天数最多的是2017年6月,为25 d。

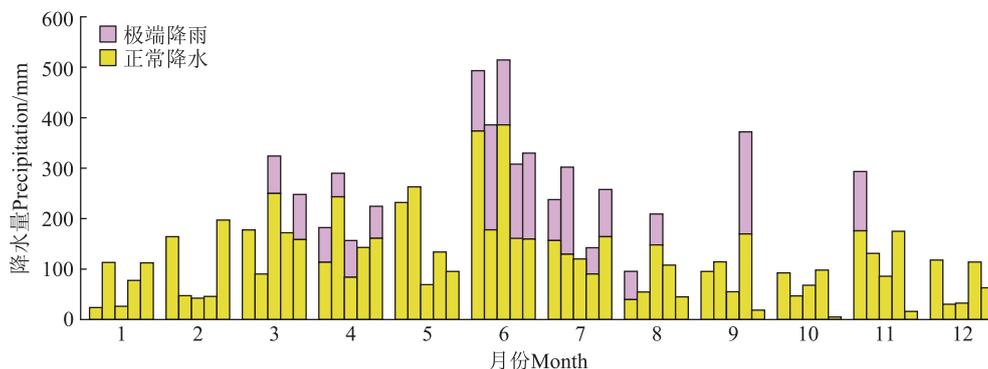
2.2 降水及产流损失的季节分配

2015—2019年,冬闲季、早稻季、晚稻季的降水量范围分别为670.1~959.1 mm、584.3~963.1 mm、68.7~577.9 mm(表2)。2015—2017年,3季降水量的多少表现为早稻季>冬闲季>晚稻季,2018年和2019年降水量的多少则表现为冬闲季>早稻季>晚稻季。如表2所示,受降水影响,2015—2018年径流的季节分配与降水分配表现一致,且同年不同季节之间差异显著($P<0.05$)。2019年冬闲季的径流量也显著高于早稻季,晚稻季无径流。2015—2017年冬闲季径流占全年的比例为23.31%~32.48%,2018年和2019年分别占比为54.30%和51.81%;2015—2017年早稻季径流占全年的比例为58.50%~61.50%,2018年和

表1 2015—2019年早、晚稻移栽、施肥及收获时间

Table 1 Fertilization, transplanting and harvest schedule of early and late rice during 2015—2019

早稻 Early rice				晚稻 Late rice			
移栽 Transplanting	基肥 Base fertilizer	分蘖肥 Tillering fertilizer	收获 Harvest	移栽 Transplanting	基肥 Base fertilizer	分蘖肥 Tillering fertilizer	收获 Harvest
2015-04-28	2015-04-27	2015-05-07	2015-07-21	2015-07-29	2015-07-28	2015-08-06	2015-11-02
2016-04-25	2016-04-24	2016-05-02	2016-07-13	2016-07-18	2016-07-17	2016-07-25	2016-10-31
2017-04-29	2017-04-28	2017-05-05	2017-07-13	2017-07-19	2017-07-18	2017-07-25	2017-10-25
2018-04-26	2018-04-25	2018-05-10	2018-07-15	2017-08-05	2018-07-23	2018-08-04	2018-10-31
2019-04-23	2019-04-22	2019-04-30	2019-07-22	2019-07-27	2019-07-27	2019-08-06	2019-10-21



每月从左至右的5条柱子分别代表2015、2016、2017、2018年和2019年。

The five columns from left to right in each month represents 2015, 2016, 2017, 2018 and 2019, respectively.

图1 2015—2019年降水量的月度分布动态

Figure 1 Dynamic of monthly precipitation during 2015—2019

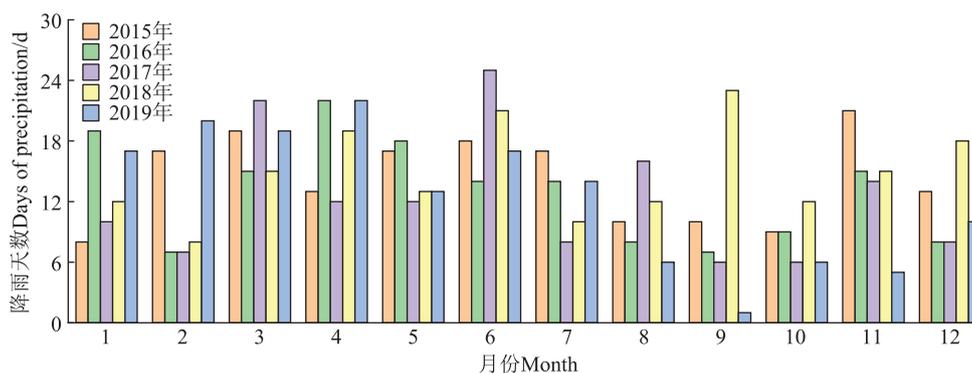


图2 2015—2019年降水天数的月度分布动态

Figure 2 Dynamic of precipitation days per month during 2015—2019

表2 2015—2019年径流量及总氮总磷流失量的季节分配

Table 2 Seasonal distribution of runoff, TN and TP loss during 2015—2019

指标 Indexes	季节 Season	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年
降水量 Precipitation/mm	冬闲 Fallow	959.1	702.2	670.1	727.3	861.1
	早稻 Early rice	963.1	951.0	703.9	584.3	683.0
	晚稻 Late rice	283.4	215.8	330.4	577.9	68.7
径流量 Runoff/($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	冬闲 Fallow	2 652.0b	3 217.0b	2 865.5b	4 448.5a	4 625.5a
	早稻 Early rice	6 589.0a	6 092.0a	7 191.0a	3 204.0b	4 302.5b
	晚稻 Late rice	1 867.0c	596.5c	2 236.0c	540.5c	0c
总氮流失量 TN loss/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	冬闲 Fallow	5.3c	11.6b	9.2b	12.7a	14.8a
	早稻 Early rice	18.0a	29.3a	19.6a	11.7a	6.3b
	晚稻 Late rice	9.5b	1.3c	6.9b	1.4b	0c
总磷流失量 TP loss/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	冬闲 Fallow	0.34b	0.20b	0.40b	0.61a	0.35a
	早稻 Early rice	0.77a	1.60a	1.13a	0.36b	0.51a
	晚稻 Late rice	0.37b	0.04b	0.31b	0.31b	0b

注:同列不同小写字母表示处理间存在显著差异($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$) with the respective line.

2019年分别占比为39.11%和48.19%;各年份的晚稻季径流占比均较低,仅为0~18.19%(表3)。

与径流量的季节分配一致,2015—2017年径流导致的TN流失量最大的季节为早稻季,2018年和

2019年则为冬闲季(表2)。2015—2019年冬闲季和早稻季TN流失量占全年的比例为71.01%~100.00%(表3)。由径流引起的TP流失量的年际变化范围为0.86~1.84 kg·hm⁻²(表2)。除2018年外,各年份TP流失量的最大值均出现在早稻季,占全年流失总量的比例为52.28%~87.17%(表3)。2015—2017年冬闲季和晚稻季TP流失量的差异均不显著,2018年冬闲季TP流失量最高,而早、晚稻季TP流失量差异不显著。

2.3 氮磷防控关键期径流损失及其在全年中的占比

氮磷防控关键期的径流量及由此造成的氮磷流失量在年度之间差异较大(表4),径流量最高的为2016年的1 923.0 m³·hm⁻²,由此损失的TN和TP量分别为14.33 kg·hm⁻²和1.05 kg·hm⁻²;径流量最低的为2019年的215.5 m³·hm⁻²,由此损失的TN和TP量分别为0.98 kg·hm⁻²和0.01 kg·hm⁻²。防控关键期的径流量、TN和TP流失量在全年总量中的占比分别为2.41%~19.41%、4.63%~34.00%和1.04%~57.44%。除2016年外,其他年份关键期径流量占全年的比例均在10%以下,TN和TP的流失量在全年中的占比也均小于13%。可见,双季稻田氮磷防控关键期的径流

量、TN和TP流失量对全年总量的贡献相对较低。

2.4 极端降水条件下产流损失及占比

各年度极端降水下径流及氮磷流失量差异较大(表5),径流量的极值分别为2015年的5 797.5 m³·hm⁻²和2019年的2 440.5 m³·hm⁻²,TN流失量的极值分别为2015年的17.76 kg·hm⁻²和2019年的3.00 kg·hm⁻²,TP流失量的极值分别为2017年的0.84 kg·hm⁻²和2018年的0.34 kg·hm⁻²。极端降水下径流量、TN和TP流失量占全年总量的比例分别为27.34%~52.19%、14.21%~54.06%和25.38%~45.95%。可见,极端降水条件下双季稻田径流量、TN和TP流失量对全年总量的贡献要明显高于防控关键期。

3 讨论

3.1 双季稻田氮磷流失风险期

稻田作为水肥消耗大户,一直被认为是农业面源污染防治的重点对象,加上为追求高产,过量的化肥施用和粗放的水肥管理模式使其成为当前农业环境保护研究的热点之一^[14-15]。由于稻田长期处于淹水状态,若对稻田全生育期的径流进行管控,不但耗时

表3 各季节径流量及氮磷流失量在全年的占比(%)

Table 3 Seasonal runoff, nitrogen and phosphorus loss in different season(%)

季节 Season	指标 Indexes	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年
冬闲 Fallow	径流量 Runoff	23.87	32.48	23.31	54.30	51.81
	总氮 TN	16.28	27.41	25.79	49.27	70.31
	总磷 TP	22.75	10.78	21.18	50.73	40.55
早稻 Early rice	径流量 Runoff	59.32	61.50	58.50	39.11	48.19
	总氮 TN	54.73	69.41	54.84	45.16	29.69
	总磷 TP	52.28	87.17	61.03	31.41	59.45
晚稻 Late rice	径流量 Runoff	16.81	6.02	18.19	6.59	0
	总氮 TN	28.99	3.17	19.37	5.57	0
	总磷 TP	24.96	2.05	17.79	17.86	0

表4 防控关键期径流量、氮磷流失量及其在全年的占比

Table 4 The loss of runoff, nitrogen and phosphorus in critical period for prevention and control, and their proportion of whole year

年份 Year	径流量 Runoff/ (m ³ ·hm ⁻²)	总氮 TN/ (kg·hm ⁻²)	总磷 TP/ (kg·hm ⁻²)	占比 Proportion/%		
				径流量 Runoff	总氮 TN	总磷 TP
2015	809.5	2.46	0.15	7.29	7.48	9.92
2016	1 923.0	14.33	1.05	19.41	34.00	57.44
2017	1 205.5	4.11	0.22	9.81	11.48	11.74
2018	577.5	3.13	0.15	7.05	12.13	11.38
2019	215.5	0.98	0.01	2.41	4.63	1.04
平均值	946.2	5.00	0.32			
变异系数 CV/%	69.1	106.7	132.1			

表5 极端降水下的径流量、氮磷流失量及其在全年的占比

Table 5 The loss of runoff, nitrogen and phosphorus of extreme rainfall and their proportion of whole year

年份 Year	极端降水/次 Extreme rainfall/times	径流量 Runoff/(m ³ ·hm ⁻²)	总氮 TN/(kg·hm ⁻²)	总磷 TP/(kg·hm ⁻²)	占比 Proportion/%		
					径流量 Runoff	总氮 TN	总磷 TP
2015	5	5 797.5	17.76	0.62	52.19	54.06	42.05
2016	3	3 651.0	14.96	0.47	36.86	35.51	25.38
2017	4	5 310.5	13.71	0.84	43.20	38.28	45.95
2018	3	2 776.0	8.72	0.34	33.88	33.75	26.40
2019	4	2 440.5	3.00	0.39	27.34	14.21	45.75
平均值	3.8	3 995.1	11.63	0.53	38.69	35.16	37.11
变异系数 CV/%	22.0	37.5	50.1	38.2			

长、难度大,且需消耗大量人力、物力,因此众多研究者希望通过对关键风险期进行重点管控,达到降低稻田面源污染风险的目的。

对稻田设置“防控关键期”来降低面源污染风险是基于对径流水“质”管控来实现的。本研究中,2016年早稻季的径流量(6 092.0 m³·hm⁻²)与2015年(6 589.0 m³·hm⁻²)相差较小,但其氮、磷流失量(TN 29.3 kg·hm⁻²、TP 1.60 kg·hm⁻²)却远大于2015年(TN 18.0 kg·hm⁻²、TP 0.77 kg·hm⁻²)(表2)。这个结果看似有悖常理,但是通过对径流水数据的梳理发现,2015年早稻季产流共计10次,落入“防控关键期”的径流次数仅为2次,径流水中TN和TP的平均浓度分别为3.21 mg·L⁻¹和0.11 mg·L⁻¹;2016年早稻季产流共计8次,落入“防控关键期”的径流次数为3次,且其中1次发生在基肥施入后的第2天,其径流水中TN和TP的平均浓度分别为4.86 mg·L⁻¹和0.25 mg·L⁻¹(数据未列出)。众所周知,稻田施肥后的前3 d是田面水浓度最高的时段,这可能是导致2016年早稻季径流量较低而氮磷流失量却较高的主要原因。因此,“防控关键期”的设置确实对稻田面源污染风险的防控具有较大的影响。

由于基肥期和分蘖肥期是稻田径流的易发期^[16],加上该时段的施肥量占整个水稻生长季总量的60%~100%,一般认为基肥和分蘖肥期的“防控关键期”具有较高的潜在污染风险。而本研究5 a监测结果表明,除2016年外,其余4 a早、晚稻两季“防控关键期”氮、磷流失量在全年中的占比均低于13%(表4)。其原因是稻田氮、磷流失发生的基础是产流,即便某一时段施肥量高、降水频繁,但如果降水强度不足以产生径流,那么将不会产生很大的污染风险。因此,仅对以田面水浓度变化确定的“防控关键期”进行管控可能有失偏颇。

受亚热带季风气候的影响,每年3—7月是南方稻区雨水密集且雨量较大时段(图1、图2),同时也是极端降水频发期,并且该时段基本涵盖了早稻整个本田期,因此早稻季一般被认为是双季稻区氮磷流失风险最高的时期。本研究的监测结果也表明,2015—2019年间,多数年份早稻季的氮磷流失量显著高于晚稻季和冬闲季(表2、表3)。晚稻季降水较少,氮磷养分流失量在全年的占比均小于1/3,部分干旱年份甚至无产流(表2),因此晚稻季属于污染风险较低时段。由于径流水中养分浓度主要受施肥量的影响^[17],从而导致冬闲季常被认为是稻田面源污染防控的低风险期而被忽视。然而,冬闲季虽然不施肥,但其在一年中长达5个多月,因此产流的几率和比例不容忽视。本研究中,冬闲季氮、磷流失量远高于同一年份的晚稻季,其对全年氮、磷流失量的贡献率分别为16.28%~70.31%和10.78%~50.73%(表2、表3)。因此,在未来双季稻区面源污染的防控中,冬闲季作为防控的关键一环也应引起足够的重视。

稻田氮磷养分的流失除受径流水“质”的影响,也受径流水“量”的影响。当前全球气候变化明显,极端降水的发生频率越来越高^[9-10]。由于稻田对田面水的存蓄能力有限,在短时强降水尤其是极端降水条件下,稻田的地表径流量相当可观。除雨水冲刷带走的土壤颗粒中的氮磷养分外,降水还会诱导水-土界面养分的加速溶出,由此造成的氮、磷养分流失分别可占单次径流氮、磷养分流失量的22%~59%和27%~63%^[18]。本研究中,2016—2019年间,在产流仅有3~4次的情况下,极端降水诱导的地表径流氮、磷流失量约占全年总损失量的1/3左右(表5)。此外,部分时段长期连续降雨也会导致大量虽低“质”但高“量”的持续性径流损失。如本研究中2017年早稻季降水仅有703.9 mm,但主要发生在6月,该月总降水天数达

25 d, 长期连续降水使稻田一直处于水饱和状态, 大部分雨水无法得到消纳而形成径流, 导致其早稻季氮磷流失量在监测期虽不是最高但径流量却最大。

基于以上分析, 本研究认为在双季稻区面源污染防控上, 对径流水“量”的控制可能比对“质”的控制更重要。虽然极端降水下形成的径流水中氮磷浓度可能高于甚至略低于周边受纳水体, 但是对下游汇集来水的湖、库来说, 依然是氮磷污染的重要源头。在不影响水稻生产的前提下, 极端及持续性降水产生的大量径流如何存储、水中养分如何在农田生态系统中消纳是必须解决的技术难题, 也是未来南方双季稻区面源污染防控的重点关注方向。

3.2 双季稻田面源污染防控

源头控制、过程拦截和末端治理被认为是农业面源污染防控的主要途径。过程拦截和末端治理由于需要额外的成本投入且周期较长而难于推广, 因此当前农业面源污染防控的主要技术研究多是针对源头控制来开展的。源头控制主要从两方面来实现: 其一是通过控肥改善水“质”实现控污; 其二是通过控水减少水“量”实现控污。在控肥方面, 主要有有机肥替代化肥^[19]、施用控释肥^[20-21]、侧深施肥^[22]等技术措施。例如, 陈静蕊等^[23]研究发现, 早稻季紫云英还田并部分替代化肥可减少20%以上的TN流失量。纪雄辉等^[20]的研究表明, 施用控释氮肥可以显著降低施肥后10 d内田面水的TN含量, 进而减少稻田氮素流失。在减氮10%的条件下, 控释肥能显著降低稻田的氮流失量且同时实现水稻的增产^[24]。另外, 冯国禄等^[22]的研究表明, 11 cm左右的肥料深施也具有较好的减排降污潜力, 可作为控制农田面源污染的有效措施。在控水方面, 主要通过干湿交替^[25]、提升稻田排水口高度和延长稻田淹水时间^[26-27]等方式来降低面源污染风险。与常规淹灌相比, 干湿交替通过减少稻田径流量实现减排目标。但连续的干湿交替可能会增加稻田田面水中的磷含量^[28-29], 这就意味着, 与淹灌处理相比, 干湿交替可能通过影响径流水的水“质”增加磷素流失风险。除了在水稻生长季通过控水控肥减少氮磷流失外, 在冬闲季种植填闲作物也被认为是减少稻田氮磷流失的重要措施。Zhao等^[30]的研究表明, 与稻麦轮作模式相比, 冬闲季种植蚕豆/紫云英等填闲作物能显著降低冬季氮磷流失。虽然源头控制的技术和方法很多且有效, 但大多局限于田块尺度上实现氮磷在农田系统的内部循环。由于田块容量有限, 这些技术对高强度短时降水或中等强度持续降水的控

污效果不甚理想。

小区域内田-沟、田-沟-塘并存是南方地区常见的农田布局模式^[31]。沟、塘作为稻田与周边水体之间的缓冲带, 具有存蓄和净化的双重功效。在雨水不足时, 沟、塘可以提供灌溉水源, 在降水过量时, 其可为地表排水提供存储空间并兼具净化水体的作用。沟-塘系统通过底泥吸附、植物吸收、微生物分解等一系列物理、化学及生物学作用, 降低进入下游水体的氮、磷养分浓度, 目前农田面源污染防控正受到越来越多的关注^[32-34]。已有研究表明, 田-沟协同控制灌排可分别减少稻田径流水TN和TP污染负荷的59.7%和66.7%^[32]; 不同类型的生态塘对稻田径流的去除率均可达到50%以上^[33]。受农业现代化进程、国家政策等因素的影响, 近十几年来我国部分地区农田周边的沟、塘正在被淤泥填平或被人为填埋, 致使其在农田生态系统中的面积不断缩减且割裂化严重^[26]。原本相互连通的沟塘所具有的蓄洪抗旱、截流控污等生态功能得不到充分发挥, 进一步导致了极端降水造成的面源污染问题突出^[35]。本研究中, 5 a极端降水的年平均次数仅为3.8次, 但其导致的氮磷流失量在全年中的占比却高达1/3。因此, 如何保护和重建稻田沟、塘系统的连通性, 提高其在农田生态系统中的占比, 可能是未来防控双季稻区农田面源污染的重要方向。

4 结论

(1) 除早稻季外, 冬闲季也应是南方双季稻区面源污染防控的重点关注时段。

(2) 受降水随机性的影响, 传统依靠降低“防控关键期”氮磷流失量来治理双季稻区面源污染的模式, 其效果存在较大不确定性。

(3) 受气候条件的影响, 控水可能是双季稻区农田面源污染防控需要首先关注的问题。极端降水条件下低浓度、高水量的农田径流对周边环境也存在较大的污染风险, 保护和重建稻田的沟、塘系统可能是未来实现水稻清洁生产的重要途径之一。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴(2018—2022)[DB/OL].[2022-07-15]. <http://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/>. National Bureau of Statistics. China statistical yearbook (2018—2022)[DB/OL].[2022-07-15]. <http://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/>.
- [2] HOU X, ZHAN X, ZHOU F, et al. Detection and attribution of nitrogen runoff trend in China's croplands[J]. *Environmental Pollution*, 2018,

- 23:270-278.
- [3] 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.
- [4] LI J, TONG J C, XIA B X, et al. Numerical simulation and experimental study on farmland nitrogen loss to surface runoff in a raindrop driven process[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 54: 754-768.
- [5] LI P, LU J, WANG Y, et al. Nitrogen losses, use efficiency, and productivity of early rice under controlled-release urea[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2018, 251: 78-87.
- [6] 吕亚敏, 吴玉红, 李洪达, 等. 减肥措施对稻田田面水氮、磷动态变化特征的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2018, 34(4): 349-355. LÜ Y M, WU Y H, LI H D, et al. Effects of dynamic changes of nitrogen and phosphorus concentrations in surface water of paddy field under different fertilizer rate[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, 34(4): 349-355.
- [7] 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): 1190-1199. ZHANG F L, WU M Q, XIA Y, et al. Changes in nitrogen and phosphorus in surface water of paddy field in Jianghan Plain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(5): 1190-1199.
- [8] ZHU X, TROY T J. Agriculturally relevant climate extremes and their trends in the world's major growing regions[J]. *Earth's Future*, 2018, 6(4): 656-672.
- [9] MYHRE G, ALTERSKJAER K, STJEM C W, et al. Frequency of extreme precipitation increases extensively with event rareness under global warming[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 16063.
- [10] JIAN Y, FU J, LI B, et al. Increased extreme hourly precipitation over China's rice paddies from 1961 to 2012[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 10609.
- [11] DENG L Z, SUN T S, ZHANG L P, et al. Effects of erosion degree, rainfall intensity and slope gradient on runoff and sediment yield for the bare soils from the weathered granite slopes of SE China[J]. *Geomorphology*, 2020, 352: 106997.
- [12] 严磊, 邓旭哲, 薛利红, 等. 不同雨强和植被盖度对稻田径流及氮素流失的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(12): 2761-2769. YAN L, DENG X Z, XUE L H, et al. Effects of different rainfall intensities and vegetation coverage on runoff and nitrogen loss from rice fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(12): 2761-2769.
- [13] 黄思怡. 不同施肥模式对双季稻氮磷养分损失的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2020: 4-5. HUANG S Y. Effects of different fertilization modes on nitrogen and phosphorus loss in double-cropping rice[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2020: 4-5.
- [14] 王静, 郭熙盛, 王允青, 等. 保护性耕作与平衡施肥对巢湖流域稻田氮素径流损失及水稻产量的影响研究[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(6): 1164-1171. WANG J, GUO X S, WANG Y Q, et al. Effects of conservation tillage and balanced fertilization on nitrogen loss from paddy field and rice yields in Chaohu region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(6): 1164-1171.
- [15] 陈子薇, 应珊珊, 刘银秀, 等. 不同施肥类型对稻田氮素流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(1): 36-43. CHEN Z W, YING S S, LIU Y X, et al. Effect of different fertilizer type on nitrogen loss in paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(1): 36-43.
- [16] 侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 等. 稻田径流易发期不同类型肥料的氮素流失风险[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(7): 1353-1361. HOU P F, XUE L X, YU Y L, et al. Nitrogen loss risk of paddy field under different fertilizations in runoff prone period[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(7): 1353-1361.
- [17] 田玉华, 尹斌, 贺发云, 等. 太湖地区稻季的氮素径流损失研究[J]. *土壤学报*, 2007, 44(6): 1070-1075. TIAN Y H, YIN B, HE F Y, et al. Nitrogen loss with runoff in rice season in the Taihu Lake region, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(6): 1070-1075.
- [18] WU Y L, HUANG W C, ZHOU F, et al. Raindrop-induced ejection at soil-water interface contributes substantially to nutrient runoff losses from rice paddies[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2020, 304: 107135.
- [19] 邱卫国, 唐浩, 王超. 水稻田面水氮素动态径流流失特性及控制技术[J]. *农业环境科学学报*, 2004, 23(4): 740-744. QIU W G, TANG H, WANG C. Rule of lose of nitrogen in the surface water of rice fields and control technology[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(4): 740-744.
- [20] 纪雄辉, 郑圣先, 鲁艳红, 等. 控释氮肥对洞庭湖区双季稻田表面水氮素动态及其径流损失的影响[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(7): 1432-1440. JI X H, ZHENG S X, LU Y H, et al. Effects of controlled release nitrogen fertilizer on surface water N dynamics and runoff loss in double cropping paddy fields in Dongting Lake area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(7): 1432-1440.
- [21] 晏军, 吴启侠, 朱建强, 等. 基于稻田控水减排的氮肥运筹试验研究[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(2): 229-236. YAN J, WU Q X, ZHU J Q, et al. Experimental research on nitrogen management based on emission controlling for paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(2): 229-236.
- [22] 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, 34(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, 34(7): 114-119.
- [23] 陈静蕊, 陈晓芬, 秦文婧, 等. 紫云英还田对江西早稻季田面水氮磷动态的影响[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(7): 1352-1358. CHEN J R, CHEN X F, QIN W J, et al. The effect of Chinese milk vetch application on dynamic changes of nitrogen and phosphorus concentrations in paddy field surface water[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(7): 1352-1358.
- [24] 田昌, 周旋, 谢桂先, 等. 控释尿素减施对双季稻田径流氮素变化、损失及产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(3): 216-221. TIAN C, ZHOU X, XIE G X, et al. Effect of controlled-release urea application on nutrient distribution of soil profile from double-rice cropping field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32

- (3):216-221.
- [25] 董斌, 霍军力, 李新建, 等. 不同灌溉模式下稻田降雨利用和径流量试验[J]. 武汉大学学报:工学版, 2007, 40(6):8-12. DONG B, HUO J L, LI X J, et al. Experiment study on relation of rainfall utilization and runoff in paddy fields under different irrigation regimes[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2007, 40(6):8-12.
- [26] LU B, SHAO G, YU S, et al. The effects of controlled drainage on N concentration and loss in paddy field [J]. *Journal of Chemistry*, 2016, 2016(2):1-9.
- [27] LIU L H, OUYANG W, LIU H B, et al. Potential of paddy drainage optimization to water and food security in China[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2021, 171:105624.
- [28] 江孟孟, 赵喜辉, 谢小文, 等. 氮肥形态与干湿交替灌溉下水稻土壤酶及养分差异[J]. 植物生理学报, 2021, 57(5):1123-1134. JIANG M M, ZHAO X H, XIE X W, et al. Difference of soil enzyme activity and soil nutrient content of rice under alternative wetting and drying irrigation and nitrogen form interaction[J]. *Plant Physiology Journal*, 2021, 57(5):1123-1134.
- [29] 田仓, 虞轶俊, 吴龙龙, 等. 不同灌溉和施肥模式对稻田磷形态转化和有效性的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(24):112-122. TIAN C, YU Y J, WU L L, et al. Effects of various irrigation and fertilization schedules on the transformation and availability of phosphorus in paddy fields[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(24):112-122.
- [30] ZHAO X, WANG S Q, XING G X, et al. Maintaining rice yield and reducing N pollution by substituting winter legume for wheat in a heavily-fertilized rice-based cropping system of southeast China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 202:79-89.
- [31] CHEN W, HE B, NOVER D, et al. Farm ponds in southern China: challenges and solutions for conserving a neglected wetland ecosystem [J]. *The Science of the Total Environment*, 2019, 659:1322-1334.
- [32] 朱成立, 郭相平, 刘敏昊, 等. 水稻沟田协同控制灌排模式的节水减污效应[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3):86-91. ZHU C L, GUO X P, LIU M H, et al. Reduction of nitrogen, phosphorous and runoff by coordination controlled drainage with basin and ditch in paddy field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(3):86-91.
- [33] 王晓玲, 李建生, 李松敏, 等. 生态塘对稻田降雨径流中氮磷的拦截效应研究[J]. 水利学报, 2017, 48(3):291-298. WANG X L, LI J S, LI S M, et al. Study on the interception effects of ecological pond on nitrogen and phosphorus in the rainfall runoff of rice field[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(3):291-298.
- [34] 梁浩, 胡宗荟, 杨士红, 等. 稻田-沟塘系统水氮动态模拟与灌排调控模型构建[J]. 农业工程学报, 2021, 37(22):49-57. LIANG H, HU Z H, YANG S H, et al. Simulation of the water and nitrogen dynamics for paddy field-ditch pond system and model construction of irrigation and drainage regulation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(22):49-57.
- [35] 李玉凤, 刘红玉, 皋鹏飞, 等. 农村多水塘系统水环境过程研究进展[J]. 生态学报, 2016, 36(9):2482-2489. LI Y F, LIU H Y, GAO P F, et al. Agricultural multi-pond systems and their hydrological processes: a review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(9):2482-2489.