杨坤宇, 王美慧, 王　毅, 等. 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[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(8): 1723-1734.

YANG Kun-yu, WANG Mei-hui, WANG Yi, et al. Characteristics and determinants of nitrogen and phosphorus runoff losses under different agronomic measures in double cropping paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8): 1723-1734.

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[1,2], 王美慧[1,2], 王　毅[1*], 尹黎明[3*], 李　勇[1], 吴金水[1]

(1.中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; 2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.湖南省水利水电科学研究院, 长沙 410007)

摘　要:选择湖南省长沙县典型中亚热带双季稻田长期定位试验小区,通过田间观测明确不同施肥、水分管理、秸秆还田、生物质炭农艺管理措施对氮磷径流流失的影响,采用冗余分析方法(RDA)探明稻田氮磷径流流失的主控因子。研究结果表明:早晚稻各处理田面水总氮浓度在施肥后(基肥、分蘖肥和穗肥)第1 d达到峰值,并在10 d后逐步恢复到平稳水平;早稻田面水总磷浓度在施基肥后第1 d迅速达到最高,晚稻在施肥后第5 d才达到峰值。早晚稻田面水氮磷浓度受农艺管理措施影响明显,在间歇灌溉条件下,施有机肥、秸秆还田与生物质炭比常规化肥处理分别降低总氮浓度34.05%、15.34%~19.76%和15.46%~17.47%;秸秆还田与生物质炭相对常规化肥处理分别降低田面水总磷浓度6.33%~8.76%和9.09%~13.66%。铵态氮和颗粒态磷是氮磷径流流失的主要化学形态,施肥后10 d内是氮磷径流流失风险窗口期,该期间总氮和总磷径流流失分别占稻季总流失量的82.53%~97.66%和6.73%~47.02%。冗余分析结果表明配施有机肥促进氮磷径流流失,施用生物质炭主要促进稻田氮素径流流失,秸秆还田主要减少稻田氮素径流流失。综合考虑氮磷径流流失防控潜力、实际效果和实施可行性,中亚热带双季稻田采取高效水分管理(尤其是流失风险窗口期)加秸秆还田是减少稻田氮磷径流流失的可行方式。

关键词:氮;磷;径流流失;稻田;农艺管理措施

中图分类号:X592　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1672-2043(2019)08-1723-12　　doi:10.11654/jaes.2019-0609

Characteristics and determinants of nitrogen and phosphorus runoff losses under different agronomic measures in double cropping paddy fields

YANG Kun-yu[1,2], WANG Mei-hui[1,2], WANG Yi[1*], YIN Li-ming[3*], LI Yong[1], WU Jin-shui[1]

(1.Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2.University of China Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3.Hunan Institute of Water Resources and Hydropower Research, Changsha 410007, China)

Abstract: The typical central subtropical double-cropping rice ecosystem was observed in the Changsha County, Hunan Province, to determine the effects of different agronomic measures(e.g. fertilization, water management, straw returning, and bio-charcoal application) on nitrogen(N) and phosphorus(P) runoff losses, and to identify the key determinants of the NP runoff losses through the redundancy analysis method(RDA). The results suggested that: The total-N(TN) concentrations in surface ponding water peaked one day after fertilization (base fertilizer, tiller fertilizer, and heading fertilizer) under different agronomic measures in the paddy fields, and then decreased to a sta-

收稿日期:2019-05-30　　**录用日期:**2019-07-30

作者简介:杨坤宇(1994—),女,广西北海人,硕士研究生,从事土壤生态研究。E-mail:yangkunyu17@mails.ucas.edu.cn

***通信作者:**王　毅　E-mail:wangyi@isa.ac.cn;尹黎明　E-mail:921792236@qq.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0800104);湖南省重点研发计划项目(2017NK2150)

Project supported: The National Key R&D Program of China(2017YFD0800104);The Key R&D Project in Hunan Province(2017NK2150)

ble level 10 days after fertilization; the total-P (TP) concentrations peaked one day after base fertilization during the early rice season, while peaked five days after base fertilization during the late rice season. The NP concentrations in surface ponding water were strongly affected by the agronomic measures. Under the intermittent irrigation condition, organic fertilizer application, straw returning, and bio-charcoal application reduced the TN concentrations by 34.05%, 15.34%~19.76%, and 15.46%~17.47%, respectively, and straw returning and bio-charcoal application decreased TP concentrations by 6.33%~8.76% and 9.09%~13.66%, respectively, compared with the conventional chemical fertilizer application. The TP and TN were lost mainly in chemical forms of ammonium-N and particle-P in surface runoff of paddy fields, and the period within 10 days after fertilization was the window period for the NP runoff losses, when occurred 82.53%~97.66% and 6.73%~47.02% of TN and TP runoff losses during the whole cropping season, respectively. The RDA indicated that application of organic fertilizer promoted the TN and TP runoff losses, application of bio-charcoal increased the TN runoff loss, and straw returning reduced the TN runoff loss, in the paddy fields. Based on the comprehensive consideration on the potential and actual effects, and practice feasibility of agronomic measures, implementing efficient water management (especially during the window period) and straw returning should be the suitable strategy for preventing the NP runoff losses in the double rice ecosystem fields in the central subtropics.

Keywords: nitrogen; phosphorus; runoff loss; paddy fields; agronomic management factors

为满足日益增长的粮食需求，大量化肥和农药投入到农业系统，造成过剩氮磷通过地表径流大规模向下游水体迁移，引发长期性和区域性的水体富营养化现象[1-2]。美国国家环保局研究结果表明，面源污染占全美污染总量的2/3，其中农业贡献率为75%左右[3-4]。欧洲农业面源排放氮、磷分别占地表水污染总负荷的60%和24%~71%[5-6]。据2010年发布的第一次全国污染源普查数据，我国农业面源污染氮、磷排放总量分别为270.46万t和28.47万t，分别占全国排放总量的53%和67%，农业面源污染以氮磷污染为主[7-8]。水稻是我国主要粮食作物，全国稻田单季平均施氮量为150 kg·hm^{-2}，氮肥利用率仅27%~35%[9]；单季平均施磷量为90 kg·hm^{-2}，磷肥利用率仅10%~20%[10-12]。因此，防控稻田氮磷径流流失对我国农业面源污染治理至关重要。

优化农艺管理措施（配施有机肥、水分管理、秸秆还田、生物质炭）是防控稻田氮磷径流流失的重要途径。农艺管理措施对稻田氮磷径流流失影响研究众多，但农艺管理对氮磷径流流失程度常受地理位置、土壤种类、气候变化、措施类型和干预强度等显著影响[13-16]，造成研究结果不一致，甚至矛盾[17-18]。稻田总磷径流流失量一般情况下随有机肥施用量增加而增加[19]，但郭智等[20]却发现有机肥替代50%化肥显著降低23%的磷素流失。大多数情况下施用生物质炭比常规化肥处理可显著减少总氮和总磷流失，但也有研究发现施用生物质炭仅减少总氮流失8%~13%，对削减总磷流失无显著效果[21-22]。虽然间歇灌溉较传统灌溉可降低23%的总氮和10%的总磷流失[23]，但间歇灌溉可通过强化土壤硝化作用，同时增加9%~16%的硝态氮流失[24]。秸秆还田通过改善土壤理化性质，降低稻田径流中氮磷浓度，从而减少氮磷流失[25]，而Wang等[26]发现秸秆还田仅显著减少稻田氮素径流流失，对磷素流失无显著效果。因此，农艺管理措施对稻田氮磷径流流失的影响规律需深入研究。本研究选择中亚热带典型双季稻田，观测不同施肥、水分管理、秸秆还田、生物质炭措施对氮磷径流流失影响，采用冗余分析方法（RDA）明确有效防控稻田氮磷径流流失的主控因子，以期为控制中亚热带双季稻田氮磷径流流失和防治农业面源污染提供技术支持和科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验依托于湖南省长沙县中国科学院亚热带农业生态研究所长沙农业环境观测研究站不同施肥方式的长期（8年，始于2012年）定位试验（27°55′~28°40′N，112°56′~113°30′E，海拔46~452 m），区域多年平均气温17.5 ℃，无霜期274 d，年日照时数1663 h，年平均降雨量1422 mm，年平均蒸发量1272 mm，属典型中亚热带湿润季风气候，种植制度为双季稻。土壤类型为花岗岩发育的水稻土，试验前采取0~20 cm土壤测定理化指标，具体见表1。

试验共选取8个等氮处理（早稻120 kg·hm^{-2}，晚稻150 kg·hm^{-2}）：常规化肥+间歇灌溉（NPK+IF）、常规化肥+低施秸秆+间歇灌溉（NPK+LS+IF）、常规化肥+高施秸秆+间歇灌溉（NPK+HS+IF）、常规化肥+长期淹水（NPK+CF）、常规化肥+高施秸秆+长期淹水（NPK+HS+CF）、50%氮肥+有机肥+间歇灌溉（50%NPK+M+IF）、常规化肥+低施生物质炭+间歇灌溉（NPK+LB+IF）、常规化肥+高施生物质炭+间歇灌

表1 研究区土壤基本指标

Table 1 Basic indexes of soil in the study area

总有机碳 Total organic carbon/g·kg^{-1}	总氮 Total nitrogen/ g·kg^{-1}	氨态氮 Ammoniacal nitrogen/mg·kg^{-1}	硝态氮 Nitrate nitrogen/ mg·kg^{-1}	总磷 Total phosphorous/ g·kg^{-1}	速效磷 Available phosphorus/mg·kg^{-1}	总钾 Total potassium/ g·kg^{-1}	pH	容重 Unit weight/ g·cm^{-3}
17.5	1.62	11.87	0.95	0.55	9.17	28.4	5.1	1.31

溉（NPK+HB+IF），其中低施秸秆（LS）和高施秸秆（HS）分别为3000 kg·hm^{-2}和6000 kg·hm^{-2}，低施生物质炭（LB）和高施生物质炭（HB）分别为24 000 kg·hm^{-2}和48 000 kg·hm^{-2}。每个处理3个重复，共24个小区，小区长宽为7 m×5 m，采取随机区组方式呈三行分布，周围设置保护行。小区田埂高20 cm，水泥砌筑，以减少小区间侧渗与串流。每个小区设立相互独立的灌排系统，灌溉水为邻近沟渠水。淹水灌溉模式小区除水稻收获期外长时间维持4~8 cm水位，间歇灌溉模式采取“前水不见后水”方式。小区出水口高10 cm，若遇大雨田面水高过出水口，则产流排出。水稻烤田期间，自然落干田面水。

试验时间为2017年晚稻季至2018年早稻季。供试早稻品种为湘早45，晚稻品种为T优-207，各处理肥料施用量见表2。氮肥分3次施用（图3和图4），分别为基肥、分蘖肥和穗肥，施用量比率为5∶3∶2。过磷酸钙（P_2O_5）、钾肥（K_2O）、秸秆、生物质炭和有机肥（猪粪）作为基肥一次性施入。生物质炭是从三里新能源有限公司（河南商丘）购买，为小麦秸秆在500 ℃下热解而成，总氮5.8 g·kg^{-1}、总磷1.2 g·kg^{-1}、pH 9.3、阳离子交换量28.6 cmol·kg^{-1}、容重0.18 g·cm^{-3}。

1.2 水位和水质监测与分析

研究期间气温和降雨量采用全自动气象站（IntelimetAdvantage，DynamaxInc，美国）记录。每个小区固定位置垂直安装直尺，每日早晚固定时刻读取田面水位高度。每10 d 1次固定周期采集田面水样，施肥期间（基肥、分蘖肥和穗肥）采样频次加密至每日1次，连采3 d。采样时利用50 mL医用注射器，在不扰动土层情况下，随机采集小区内3个点位田面水中上层水样，混入250 mL塑料瓶中，随即带回实验室放入4 ℃冰箱保存，并测定田面水氮磷浓度。若遇降雨产流和人为排水事件，加采小区出水口径流水样；灌溉时采集整个试验区入水总口水样。水样分析指标包括总氮（TN）、铵态氮（NH_4^+-N）、硝态氮（NO_3^--N）、总磷（TP）、可溶性磷（DP）和颗粒态磷（PP）。TN用碱性过硫酸钾消化后用流动分析仪测定，NH_4^+-N和NO_3^--N用抽滤后水样（过0.45 μm滤膜的水样）经流动分析仪测定；TP用过硫酸钾消解后经紫外分光光度法测定，DP用抽滤后水样经过硫酸钾消解后紫外分光光度计测定，PP采用差减法（TP减去DP）计算得到。

1.3 数据分析

小区产流期间排水量基于田间观测水位，采用水量平衡公式计算。由于产流事件通常只持续几小时到1 d，因此计算过程不考虑田间蒸散和土壤渗漏，计算公式如下：

$$Q=(P+H_{before})-E_{int}-H_{after} \quad (1)$$

表2 不同处理的施肥方案（折算为纯氮/磷，kg·hm^{-2}）

Table 2 Fertilization schemes of different treatments（converted to pure nitrogen/phosphorus，kg·hm^{-2}）

处理 Treatments	早稻 Early rice						晚稻 Late rice					
	化肥 Chemical fertilizer		秸秆 Straw		猪粪 Manure		化肥 Chemical fertilizer		秸秆 Straw		猪粪 Manure	
	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P
NPK+IF	120	32.75	0	0	0	0	150	32.75	0	0	0	0
NPK+LS+IF	100.08	32.75	19.92	4.92	0	0	130.08	32.75	19.92	4.92	0	0
NPK+HS+IF	80.16	32.75	39.84	9.84	0	0	110.16	32.75	39.84	9.84	0	0
NPK+CF	120	32.75	0	0	0	0	150	32.75	0	0	0	0
NPK+HS+CF	80.16	32.75	39.84	9.84	0	0	110.16	32.75	39.84	9.84	0	0
50%NPK+M+IF	60	0	0	0	60	47.47	75	0	0	0	75	59.35
NPK+LB+IF	120	32.75	0	0	0	0	150	32.75	0	0	0	0
NPK+HB+IF	120	32.75	0	0	0	0	150	32.75	0	0	0	0

式中：Q为小区径流量，mm；P为实际降雨量，mm；H_{before}为降雨前田面水高度，mm；H_{after}为降雨后田面水高度，mm；E_{int}为水稻冠层截留量，mm。其中E_{int}基于小区水稻叶面积指数（LAI），采用德国Hoyningen-Huene[27]构建的农田生态系统冠层截留估算方法计算，该方法广泛应用于多个水文模型[28]。具体公式如下：

当$P<P_{gr}$时

$$E_{int}=-0.42+0.245\times P+0.2\times LAI-0.011\times P^2+0.027\,1\times P\times LAI-0.010\,9\times LAI^2 \quad (2)$$

当$P>P_{gr}$时

$$E_{int}=0.935+0.498\times LAI-0.005\,75\times LAI^2 \quad (3)$$

其中$P_{gr}=11.05+1.223\times LAI$

式中：P_{gr}为降雨最大截留量，mm。

故此，各处理氮磷径流流失量为：

$$F=\sum_{i=1}^{n}(C_i\times Q_i)\times 10^{-2} \quad (4)$$

式中：F为小区氮磷径流流失量，kg·hm^{-2}；C_i为第i次径流事件中NH_4^+-N、NO_3^--N、TN、DP或TP的浓度，mg·L^{-1}；Q_i为第i次径流事件中小区径流量，mm；n为一个水稻生育周期内径流事件总次数。

各小区氮磷径流流失率计算公式如下：

$$R=\frac{F}{N}\times 100\% \quad (5)$$

式中：R代表氮素径流流失率，%；F代表小区氮磷径流流失量，kg·hm^{-2}；N代表小区施氮/磷量，kg·hm^{-2}。

采用冗余分析方法（RDA）解析稻田氮磷径流流失的主控因子。在进行冗余分析之前，所有数据采用SPSS 19.0进行相关性分析，去除不同数量级差异对分析结果造成的影响[29]，然后应用CANOCO 5.0软件进行农艺因子-氮磷流失因子排序分析。首先构造农艺因子矩阵和氮磷流失因子矩阵，农艺因子矩阵包括水分管理、秸秆还田、有机肥、生物质炭，氮磷流失因子矩阵包括TN和TP的径流流失量。农艺因子-氮磷流失因子关系用双序图表示。

2 结果与分析

2.1 降雨量和田间径流量

研究期间降雨量如图1所示，早稻季累积降雨量为212 mm，发生6次径流事件，晚稻季累积降雨量为204 mm，发生4次径流事件。早稻平均径流量为133.83 mm，晚稻平均径流量为133.42 mm（图2）。间歇灌溉模式下径流量低于长期淹水，NPK+IF处理（早：92.31 mm，晚：101.06 mm）低于NPK+CF处理（早：145.73 mm，晚：129.19 mm）；NPK+LB+IF处理（早：98.75 mm，晚150.18 mm）低于NPK+HB+IF处理（早：133.26 mm，晚：156.86 mm）。

2.2 田面水氮磷浓度动态变化特征

早晚稻各处理田面水TN浓度在施肥后（基肥、分蘖肥和穗肥）第1 d达到峰值，随着时间推移逐渐下降，在施肥10 d后达到较低水平并趋于稳定（图3）。各处理浓度峰值均表现为基肥>分蘖肥>穗肥。多数处理中早稻季田面水TN浓度高于晚稻，其中，早稻季NPK+IF处理TN浓度最高（38.65±11.34 mg·L^{-1}），NPK+HS+IF处理最低（27.50±7.99 mg·L^{-1}）；晚稻季

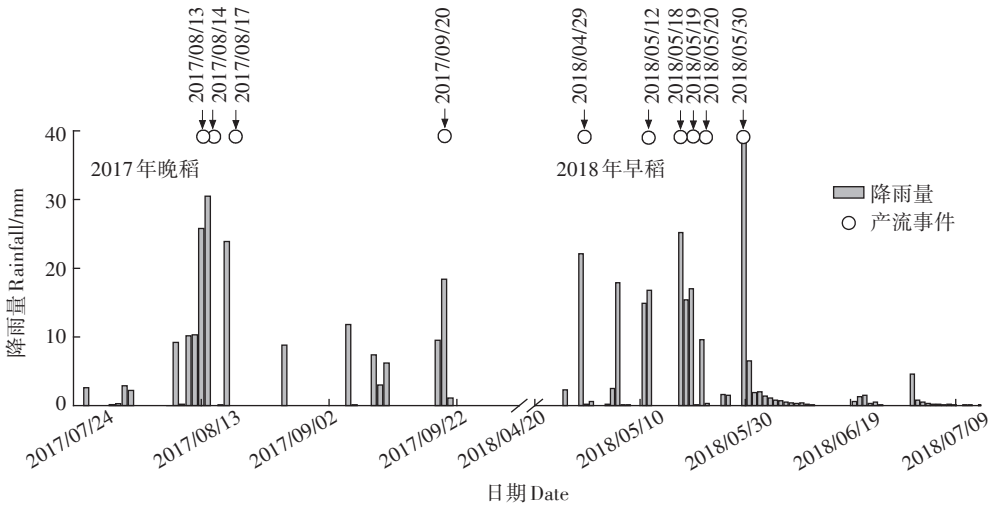

图1 观测期间日降雨量

Figure 1 Daily rainfall during the observation period

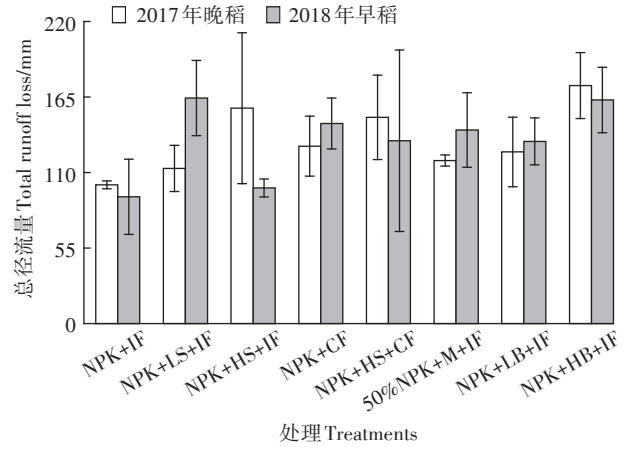

图2 观测期间稻田径流量

Figure 2 Surface runoff during the observation period

NPK+HS+CF处理最高（12.79±3.15 mg·L^{-1}），NPK+LS+IF处理最低（8.79±2.01 mg·L^{-1}）。在同样间歇灌溉条件下，施有机肥、秸秆还田与生物质炭比常规化肥（NPK+IF）处理的TN浓度分别降低34.05%、15.34%~19.76%和15.46%~17.47%。各处理田面水NH_4^+-N浓度占TN浓度比率为38.21%~40.33%，其浓度变化趋势与TN类似，在施肥后第1 d出现峰值，随后下降并在10 d后达到稳定。多数处理下早稻季田面水NH_4^+-N浓度高于晚稻季。在同样间歇灌溉条件下，施有机肥、秸秆还田与生物质炭相对常规化肥（NPK+IF）分别降低NH_4^+-N浓度8.36%、21.09%~26.67%和4.61%~63.30%。各处理田面水NO_3^--N浓度仅占TN浓度0.41%~0.84%，且变化稳定，没有明显出峰。

早稻各处理田面水TP浓度在施肥后第1 d迅速达到最高，晚稻在施肥后第5 d才达到峰值，随后在整个生育期出现几个无明显规律的波峰（图4）。早稻季田面水TP浓度一般高于晚稻季。早稻季50%NPK+M+IF处理TP浓度最高（1.78±0.23 mg·L^{-1}），NPK+CF处理最低（0.33±0.11 mg·L^{-1}）；晚稻季50%NPK+M+IF处理TP浓度最高（0.97±0.21 mg·L^{-1}），NPK+LB+IF处理最低（0.33±0.09 mg·L^{-1}）。在同

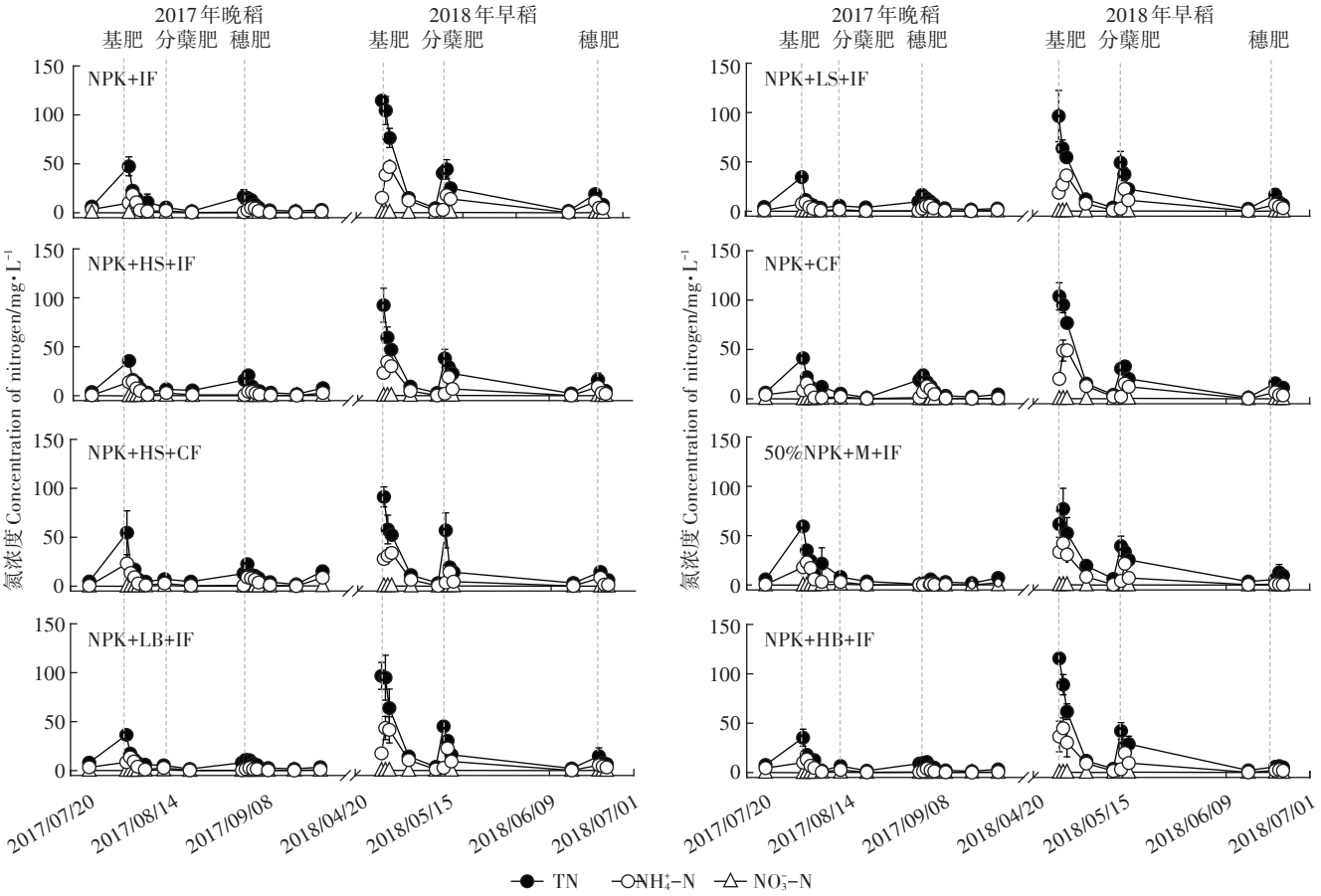

图3 稻田田面水铵态氮、硝态氮和总氮浓度变化

Figure 3 Dynamics of ammonia, nitrate and total nitrogen concentrations in surface ponding water of paddy fields

样间歇灌溉条件下，秸秆还田与生物质炭相对NPK+IF处理分别降低田面水TP浓度6.33%~8.76%和9.09%~13.66%。各处理田面水PP占TP浓度的72.60%~77.79%，PP变化趋势与TP类似。早、晚稻期间50%NPK+M+IF处理PP浓度均是最高（1.43±0.82、0.79±0.3 mg·L^{-1}），早稻季NPK+IF处理最低（0.21±0.14 mg·L^{-1}），晚稻季NPK+LB+IF处理最低（0.23±0.09 mg·L^{-1}）。田面水DP占TP浓度的22.21%~28.01%。早稻季DP浓度一般高于晚稻季，无论早稻还是晚稻季，50%NPK+M+IF处理DP浓度均是最高，NPK+CF处理均是最低。在同样间歇灌溉条件下，秸秆还田和生物质炭处理比NPK+IF处理分别提高了DP浓度3.29%~40.62%和63.29%~66.58%。

2.3 稻田氮磷径流流失特征

如图5所示，大部分处理早稻TN平均径流流失量（16.50±2.20 kg·hm^{-2}）和流失率（11%）高于晚稻（10.77±0.59 kg·hm^{-2}，7.18%）。其中，施肥（基肥、分蘖肥和穗肥）后10 d内TN流失分别占早、晚稻TN流失的82.53%~99.19%和85.17%~97.66%（表3）。早稻季NPK+HB+IF处理流失量最大（26.91±11.81 kg·hm^{-2}），NPK+HS+IF处理流失量最小（8.07±9.08 kg·hm^{-2}），流失率分别为22.42%和6.73%；晚稻季NPK+HS+CF处理流失量最大（13.86±8.41 kg·hm^{-2}），50%NPK+M+IF处理流失量最小（8.14±2.67 kg·hm^{-2}），流失率分别为9.24%和5.43%。在相同施肥情况下，两季水稻在间歇灌溉处理下TN流失量均低于长期淹水处理（NPK+IF与NPK+CF分别为12.38±0.45、15.73±0.46 kg·hm^{-2}，NPK+HS+IF与NPK+HS+CF分别为9.35±5.24、13.81±5.66 kg·hm^{-2}）。各处理早稻NH_4^+-N平均径流流失量（8.12±0.92 kg·hm^{-2}）高于晚稻（4.63±0.45 kg·hm^{-2}），分别占TN径流流失量的49.19%和43.00%（表4）。早稻季NPK+HB+IF处理流失量最大（11.26±10.53 kg·hm^{-2}），NPK+HS+IF处理流失量最小（3.55±5.65 kg·hm^{-2}）；晚稻季NPK+LB+IF处理流失量最大（6.18±5.18 kg·hm^{-2}），50%NPK+M+IF处理流失量最小（2.40±0.88 kg·hm^{-2}）。相反地，早稻

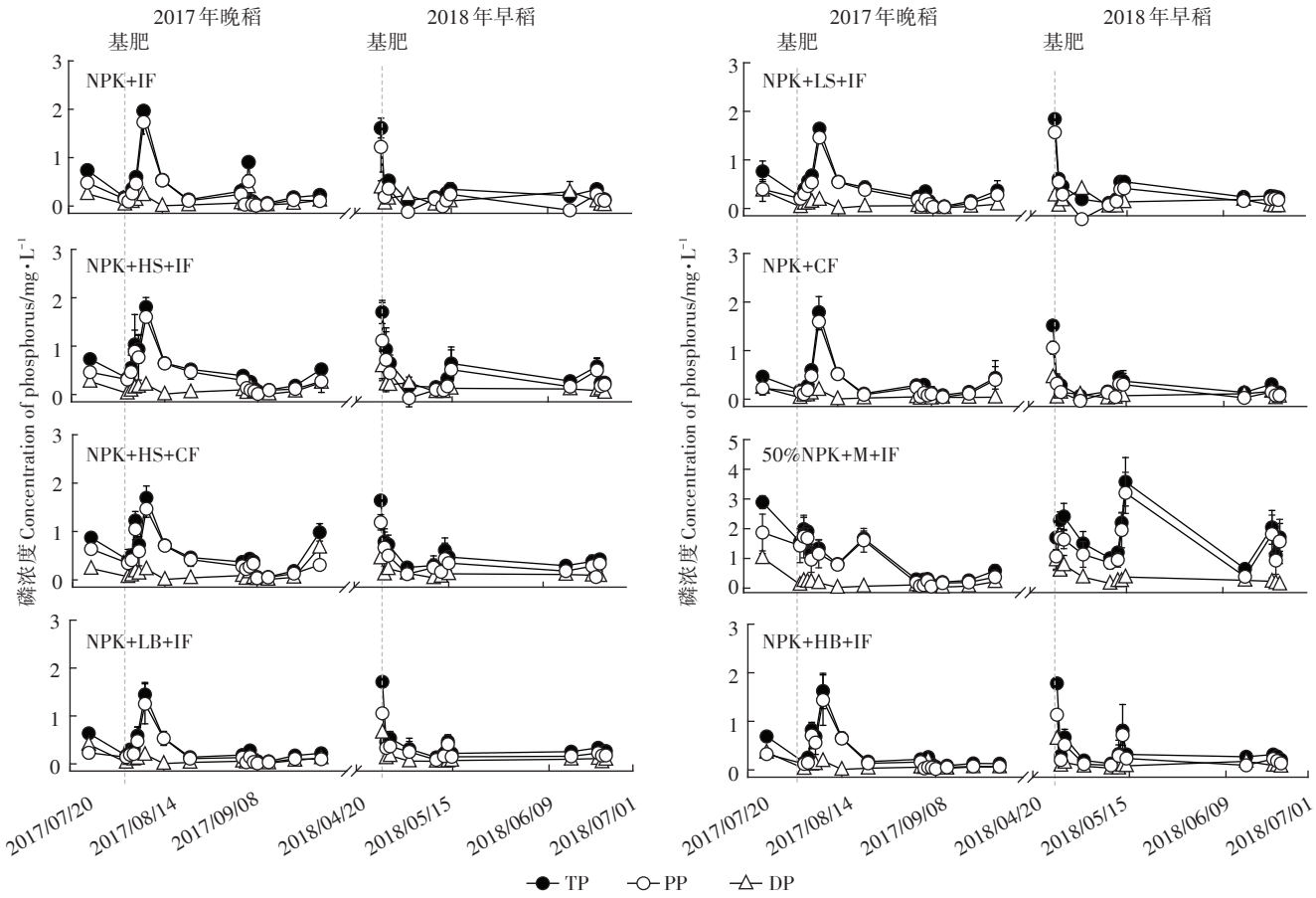

图4 稻田田面水磷素浓度变化

Figure 4 Dynamics of dissolved and total phosphorus concentrations in surface ponding water of paddy fields

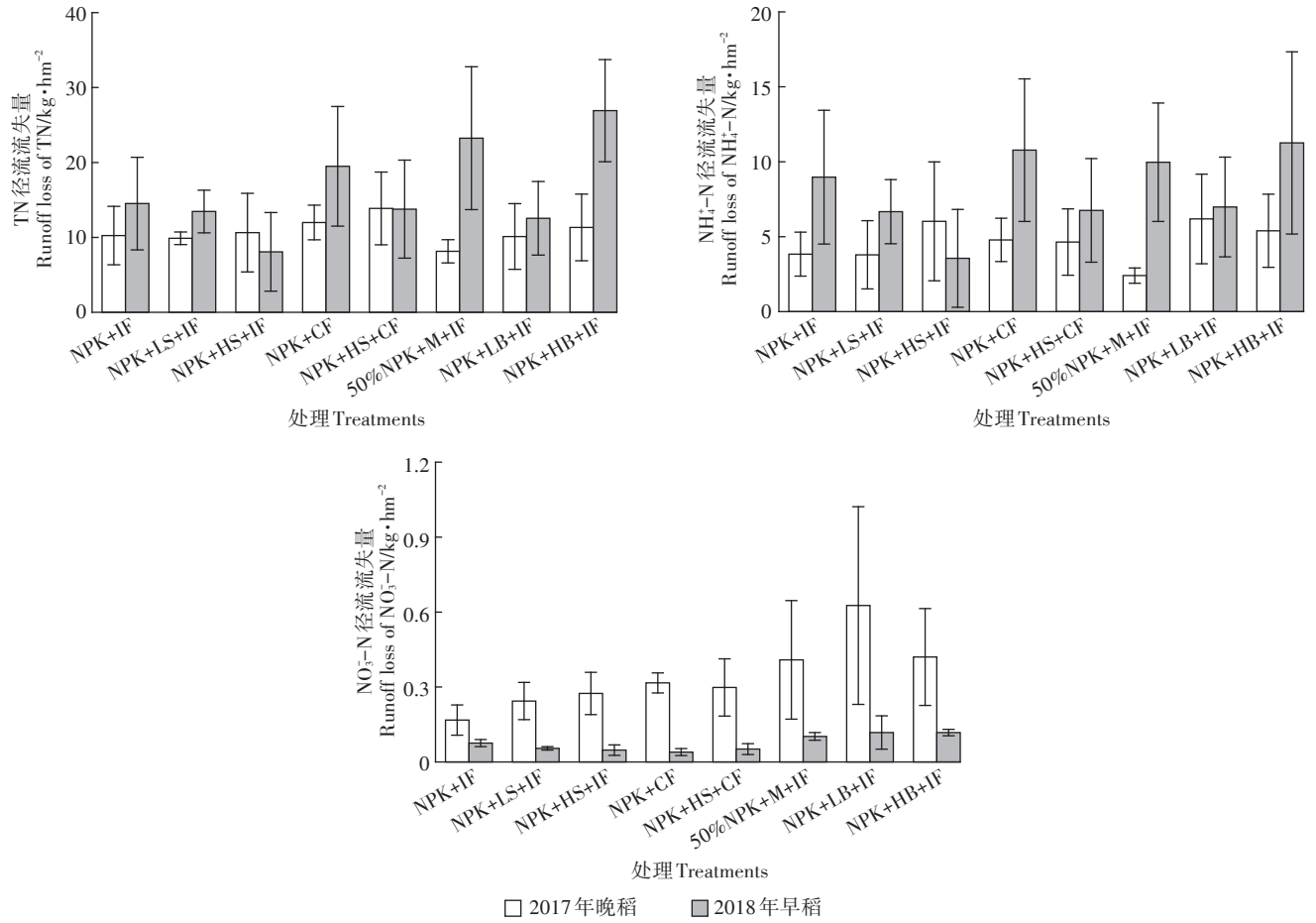

图5 稻田氮素径流流失量

Figure 5 Nitrogen runoff loss in paddy fields

表3 施肥后10 d内氮磷径流流失量占稻季流失量的百分比（%）

Table 3 Percentage of nitrogen and phosphorus runoff losses within 10 days after fertilization to the total losses of cropping season（%）

处理 Treatments	施肥后10 d内氮素径流流失量/稻季总流失量 Nitrogen runoff lose within 10 days after fertilization（base，tiller and panicle）/ Total loss		施肥（基肥）后10 d内磷素径流流失量/稻季总流失量 Phosphorus runoff lose within 10 days after fertilization（base）/ Total loss	
	早稻 Early rice	晚稻 Late rice	早稻 Early rice	晚稻 Late rice
NPK+IF	97.65	96.34	38.13	15.57
NPK+LS+IF	84.83	97.55	14.86	22.20
NPK+HS+IF	99.19	85.03	17.24	26.59
NPK+CF	93.46	97.66	24.40	6.73
NPK+HS+CF	90.86	85.17	28.51	15.86
50%NPK+M+IF	82.53	92.07	47.02	34.78
NPK+LB+IF	92.13	94.88	23.83	13.17
NPK+HB+IF	88.48	91.16	42.14	9.55

表4 稻田氮磷径流流失形态（%）

Table 4 Nitrogen and phosphorus runoff patterns in paddy fields（%）

稻季 Rice season	NH_4^+-N/TN	NO_3^--N/TN	DP/TP	PP/TP
早稻	49.19	0.46	27.37	67.10
晚稻	43.00	3.20	10.48	81.31

NO_3^--N平均径流流失量低于晚稻，仅占TN径流流失量的0.46%和3.20%。

如图6所示，大部分处理早稻TP平均径流流失量（0.52±0.15 kg·hm^{-2}）和流失率（0.69%）低于晚稻（0.90±0.09 kg·hm^{-2}，1.2%）。早、晚稻施肥10 d后TP

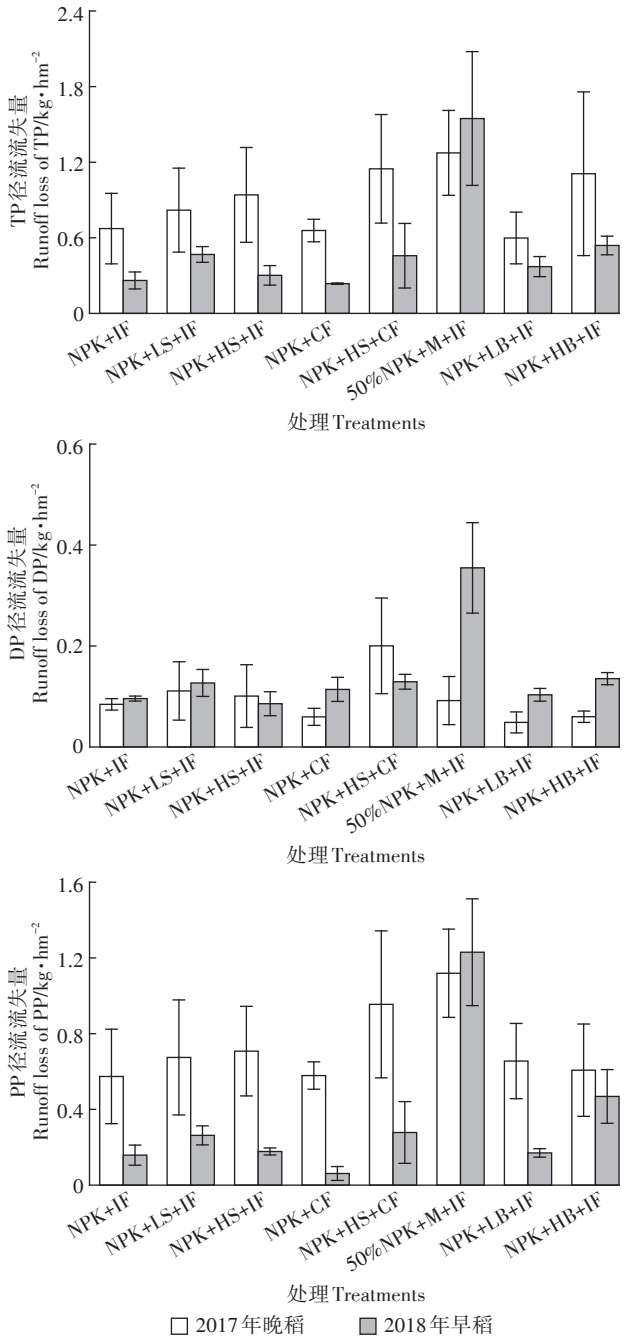

图6 稻田磷素径流流失量

Figure 6 Phosphorus runoff loss in paddy fields

流失量占稻季总流失量的14.86%~47.02%和6.73%~34.78%(表3)。早、晚季50%NPK+M+IF处理TP流失量最大,分别为1.55±0.92 kg·hm^{-2}和1.27±0.75 kg·hm^{-2},流失率分别为1.29%和0.85%;两季稻田NPK+LB+IF处理TP平均流失量最小,早、晚稻季分别为0.371±0.01和0.60±0.36 kg·hm^{-2},磷素流失率分别为0.49%和0.80%。在相同施肥情况下,早、晚季稻NPK+HS+CF处理TP流失量均高于NPK+HS+IF处理,但是NPK+IF与NPK+CF几乎持平。大部分处理早稻PP平均径流流失量(0.35±0.08 kg·hm^{-2})低于晚稻(0.73±0.04 kg·hm^{-2}),分别占TP流失量的67.10%和81.31%(表4)。早、晚稻50%NPK+M+IF处理PP流失量均最大,分别为1.12±0.23 kg·hm^{-2}和1.23±0.28 kg·hm^{-2};两季PP流失量平均值NPK+CF处理最小,早、晚季分别为0.58±0.07 kg·hm^{-2}和0.06±0.04 kg·hm^{-2}。早稻DP平均径流流失量(0.143±0.03 kg·hm^{-2})总体高于晚稻(0.094±0.02 kg·hm^{-2}),分别占TP流失量的27.37%和10.48%。早稻50%NPK+M+IF处理DP流失量最大(0.35±0.16 kg·hm^{-2});NPK+HS+IF处理流失量最小(0.086±0.04 kg·hm^{-2})。晚稻NPK+HS+CF处理流失量最大(0.20±0.16 kg·hm^{-2});NPK+LB+IF处理DP流失量最小(0.049±0.02 kg·hm^{-2})。

2.4 稻田氮磷径流流失主控因子

RDA排序较好地描述了稻田氮磷径流流失量与农艺措施的响应关系,如图7所示,实线箭头连线在

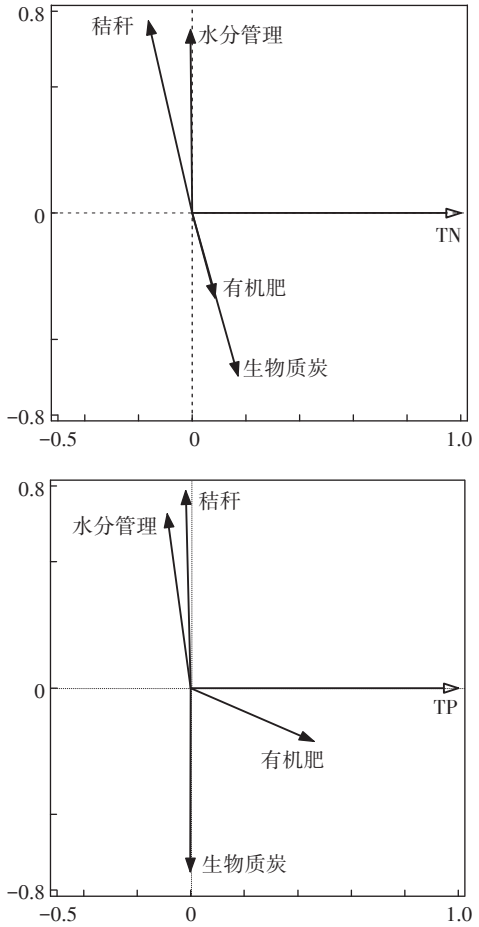

图7 稻田氮磷径流流失与农艺因子的冗余分析(P<0.05)

Figure 7 Redundancy analysis between nitrogen and phosphorus runoff losses and agronomic factors in the paddy fields(P<0.05)

排序轴（TN、TP径流流失）上投影长短表示农艺因子与排序轴之间相关性强弱，投影长度越长，相关性越强。农艺因子对稻田TN径流流失重要性排序为生物质炭>有机肥>秸秆>水分管理；稻田TP径流流失重要性排序为有机肥>水分管理>秸秆>生物质炭。实线箭头连线与空心箭头连线的夹角余弦值表征农艺因子与TN、TP径流流失的相关性正负。结果发现配施有机肥促进氮磷径流流失，施用生物质炭主要促进稻田TN径流流失，秸秆还田主要减少稻田TN径流流失。

3 讨论

田间观测结果表明，各处理早、晚稻平均径流量基本持平（图2）。我国中亚热带区域受夏季湿润季风气候影响，降雨频发，一般而言早稻季更容易发生降雨-产流事件。研究期间受反常气候影响，早、晚稻降雨量相近，导致两个稻季径流量接近。在相同施肥处理下，间歇灌溉处理的径流量低于长期淹水处理。稻田是由田埂包围形成的一个封闭人工湿地，只有在降雨和灌溉水量超过田间可蓄水容量时才会从出水口溢出产流[30-32]。在间歇灌溉模式下，田间地表积水深度一般较浅，具有较大蓄水容量，有利于在降雨事件中蓄容降水和减少地表产流，进而减少稻田氮磷径流流失风险。

从田面水氮磷浓度动态来看，观测期间早晚稻田面水TN和TP浓度波动幅度大（图3）。早晚稻各处理中田面水TN浓度均在施肥后（基肥、分蘖肥和穗肥）第1 d达到峰值，峰值过后TN浓度随时间推移逐渐下降，在施肥10 d后达到较低水平并趋于稳定。施肥后10 d内田面水TN浓度高表明了巨大的氮素流失风险，是稻田氮素径流流失风险窗口期。10 d之后田面水TN浓度降低的原因主要包括：作物吸收利用和尿素水解产生的NH_4^+-N通过氨挥发和反硝化损失[33-36]。早稻田面水TP浓度在施肥后第1 d达到峰值，晚稻田面水TP浓度在施肥后第5 d出峰（图4），可能与晚稻磷肥是在耙田之前施用，影响了磷肥肥效释放有关。田面水TP浓度在出峰后降低，随后出现多次小波动，可能是因为磷肥施入土壤后只有小部分离子态的磷酸盐被作物吸收利用，大部分会被土壤固持转化为难溶性磷酸盐类，由于大雨和灌水的反复冲刷与击溅，扰动稻田表土并在一定程度上释放土壤固持的磷，故此，田面水TP浓度出现不稳定的下降趋势[37-38]。

从田面水氮磷化学组成来看，田面水氮素形态以NH_4^+-N为主[39]。一方面是由于施用尿素水解产生的大量NH_4^+-N[2]，另一方面是稻田长时间淹水和低pH环境对土壤硝化过程的抑制作用[40]。田面水磷素以PP形态为主（图4），应与磷容易被土壤颗粒固持转化为难溶性铁/铝/钙氧化物结合态磷（Fe/Al/Ca-P）有关[2]。从早、晚稻季节规律性来看，各处理早稻田面水各形态氮磷浓度一般高于晚稻，这可能与早、晚稻季气温差异有关，在较高温度下土壤生物地球化学过程反应速度较高，促进了土壤氮磷向水体环境的释放[41]。从农艺管理措施来看，在间歇灌溉条件下，施有机肥、秸秆还田与生物质炭比常规化肥处理分别降低TN浓度34.05%、15.34%~19.76%和15.46%~17.47%。可能是因为猪粪中氮素主要以有机态的形式存在，释放缓慢；秸秆还田有利于补充外源碳源，促进化肥氮素的微生物固定[13]；而生物质炭对氮素主要形式（NH_4^+和NO_3^-）均有较强的吸附作用[42-43]。在间歇灌溉条件下，秸秆还田与生物质炭相对常规化肥处理分别降低田面水TP浓度6.33%~8.76%和9.09%~13.66%，但是配施有机肥与常规化肥处理相比明显提升田面水TP浓度47.17%~83.09%，低于郑小龙等[44]的77%~96%。这可能因为试验所用的有机肥（猪粪）中磷含量不同。由于猪粪中的磷具有较高的水溶性，不易被土壤固定[45]，故此会明显提升田面水TP浓度。

从氮磷径流流失量来看，早稻TN径流流失量大于晚稻，考虑到早晚稻径流量接近一致，早稻较高的TN径流流失量可能与其氮肥投入量较大有关。田面水中NH_4^+-N是TN的主要化学组分，且与TN时间动态波动规律一致，故NH_4^+-N流失量同样呈现早稻大于晚稻的现象。稻田NO_3^--N流失量仅占TN径流流失量的0.46%~3.20%，因此NO_3^--N不适宜作为稻田氮素流失的主要监测指标，但可以作为辅助监测指标。尽管早稻田面水TP、PP和DP平均浓度高于晚稻，但各处理TP和PP平均径流流失量早稻低于晚稻，DP平均径流流失量早稻高于晚稻，可能与田面水各形态磷浓度动态波动不一致有关。在相同施肥情况下，间歇灌溉处理能够有效减少氮磷流失（图5和图6），表明优化稻田水分管理的重要性。施肥后10 d内稻田TN和TP径流流失分别占总流失量的82.53%~97.66%和6.73%~47.02%，因此施肥后10 d是稻田氮磷径流流失风险窗口期，尤其是对氮流失而言，这与冯珂等[21]提出的施肥后10 d内是稻田氮磷流失的最大风险期相吻合。因此，为减少稻田氮磷径流流失，施肥后10 d内的水分管理尤其需要加强。

RDA结果表明，水分管理模式对TN流失无明显影响，而间歇灌溉减少TP流失。这是因为增加田间可蓄水容量和延长水流在稻田中滞蓄时间，促使了水中悬移质或颗粒态磷的沉淀下渗，降低磷浓度。配施有机肥促进稻田磷素流失，与结果中50%NPK+M+IF处理为所有处理中最大的磷素径流流失处理一致，表明有机肥中高含量的水溶性有机态磷增加稻田磷素流失风险[19]。秸秆还田减少稻田氮素流失，进一步证实了研究结果中NPK+HS+IF为所有处理中最小氮素径流流失处理（比NPK+IF处理减少氮素流失44.76%），比朱利群等[46]和刘红江等[47]的研究结果更为明显。秸秆还田通过为土壤提供丰富的有机碳及氮、磷、钾等矿质营养元素来改善土壤理化性状和生物学性状，同时秸秆腐解时微生物可吸收水土环境中氮磷[48-50]，降低氮磷径流流失风险。施用生物质炭促进稻田氮素流失，与前人研究结果不一致，可能是因为本研究中施用的生物质炭TN含量（5.8 g·kg^{-1}）远高于斯林林等[51]所用生物质炭TN含量（0.64 g·kg^{-1}）。

在相同施肥和间歇灌溉条件下，秸秆还田、施用有机肥与生物质炭降低田面水各形态氮浓度，秸秆还田与施用生物质炭降低TP和PP浓度。但是对于氮磷径流流失实际效果而言，施用有机肥和生物质炭却促进了氮磷径流流失，这突显了优化田间水分管理减少径流产生对防控稻田氮磷径流流失的重要性。田面水是稻田氮磷径流流失的主要来源，一定程度上可以表征氮磷径流流失潜力；虽然施用生物质炭具有降低氮磷流失的潜力，但在成本和实施上不具优势；配施有机肥（猪粪）可降低氮素流失潜力，但同时提高了磷素流失风险；中亚热带双季稻在机械收割时，秸秆就地粉碎还田是常见的农事操作方式。综合考虑氮磷径流流失防控潜力、实际效果和实施可行性，推广高效水分管理（尤其是流失风险窗口期）加秸秆还田方式是中亚热带双季稻田氮磷径流流失防控的可行策略。

4 结论

（1）早、晚稻田面水TN浓度在施肥后第1 d达到浓度峰值，并在10 d后逐步恢复到平稳水平；早稻田面水TP浓度在施基肥后第1 d达到最高，晚稻在施肥后第5 d才达到峰值。

（2）稻田田面水氮磷浓度受农艺管理措施影响明显，在间歇灌溉条件下，施有机肥、秸秆还田与生物质炭比常规化肥处理分别降低TN浓度34.05%、15.34%~19.76%和15.46%~17.47%；秸秆还田与生物质炭相比常规化肥分别降低田面水TP浓度6.33%~8.76%和9.09%~13.66%。

（3）施肥后10 d内是稻田氮磷径流流失风险窗口期，该期间TN和TP径流流失分别占稻季总流失量的82.53%~97.66%和6.73%~47.02%，且氮磷流失化学形态分别以NH_4^+-N和PP为主。

（4）采取高效水分管理（尤其是流失风险窗口期）加秸秆还田方式是防控中亚热带双季稻田氮磷径流流失的可行策略。

参考文献：

[1] 朱兆良，孙 波，杨林章，等. 我国农业面源污染的控制政策和措施[J]. 科技导报，2005，23（4）：47-51.
ZHU Zhao-liang, SUN Bo, YANG Lin-zhang, et al. Policy and countermeasures to control non-point pollution of agriculture in China[J]. *Science and Technology Review*, 2005, 23(4): 47-51.

[2] Wang Y, Li Y, Liu F, et al. Linking rice agriculture to nutrient chemical composition, concentration and mass flux in catchment streams in subtropical central China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2017, 184: 9-20.

[3] 史蒂文 F J. 农业土壤中氮[M]. 闵九康，沈育芝，严慧峻，等译. 北京：科学出版社，1989.
Steven F J. Nitrogen in agricultural soils[M]. MIN Jiu-kang, SHEN Yu-zhi, YAN Hui-jun, et al. Beijing: Science Press, 1989.

[4] 熊汉锋，万细华. 农业面源氮磷污染对湖泊水体富营养化的影响[J]. 环境科学与技术，2008，31（2）：25-27.
XIONG Han-feng, WAN Xi-hua. Investigation of nitrogen and phosphorus loadings on Liangzi Lake from agricultural Non-poinf source[J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, 31(2): 25-27.

[5] Vighi M, Chiaudani G. Eutrophication in Europe, the role of agricultural activities[C]//Hodgson E. Reviews of environmental toxicology. Amsterdam: Elsevier, 1987: 213-257.

[6] European Environment Agency. Europe′s water quality generally improving but agriculture still the main challenge[DB/OL].[2019-05-16]. http://www.eea.eu.int/.

[7] 张维理，武淑霞，冀宏杰，等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策：I. 21世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学，2004，37（7）：1008-1017.
ZHANG Wei-li, WU Shu-xia, JI Hong-jie, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies I. Estimation of agricultural non-point source pollution in China in early 21 century[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(7): 1008-1017.

[8] Gao C, Sun B, Zhang T. Sustainable nutrient management in Chinese agriculture: Challenges and perspective[J]. *Pedosphere*, 2006, 16(2): 253-263.

[9] 朱兆良. 肥料与农业和环境[J]. 大自然探索，1998（4）：26-29.
ZHU Zhao-liang. Fertilizer and agriculture and environment[J]. *Discov-*

ery of Nature, 1998(4):26-29.

[10] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5):915-924.
ZHANG Fu-suo, WANG Ji-qing, ZHANG Wei-feng, et al. Nutrient use efficiences of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5):915-924.

[11] Zhang D, Wang H Y, Pan J T, et al. Nitrogen application rates need to be reduced for half of the rice paddy fields in China[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2018, 265:8-14.

[12] Liu J, Zuo Q, Zhai L M, et al. Phosphorus losses via surface runoff in rice-wheat cropping systems as impacted by rainfall regimes and fertilizer applications[J]. *Integra Agric*, 2016, 15:667-677.

[13] 马凡凡, 刑素林, 徐云连, 等. 肥料施用对稻田氮磷流失的影响[J]. 中国稻米, 2018, 24(2):14-18.
MA Fan-fan, XING Su-lin, XU Yun-lian, et al. Effects of fertilization on nitrogen and phosphorus loss in paddy field[J]. *China Rice*, 2018, 24(2):14-18.

[14] 梁新强, 田光明, 李 华, 等. 天然降雨条件下水稻田氮磷径流流失特征研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1):59-63.
LIANG Xin-qiang, TIAN Guang-ming, LI Hua, et al. Study on characteristic of nitrogen and phosphorus loss from rice field by natural rainfall runoff[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(1):59-63.

[15] 王 强, 杨京平, 沈建国, 等. 稻田田面水中三氮浓度的动态变化特征研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3):51-54.
WANG Qiang, YANG Jing-ping, SHEN Jian-guo, et al. Study on dynamic change of three kinds of nitrogen in surface water of paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(3):51-54.

[16] Smith D R, Owens P R, Leytem A B, et al. Nutrient losses from manure and fertilizer applications as impacted by time to first runoff event[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 147(1):131-137.

[17] Timmons D R, Holtr F, Latterell J J, et al. Leaching of crop source of nutrients in surface runoff water[J]. *Water Resources Research*, 1970, 6(5):1367-1375.

[18] 黄云凤, 张珞平, 洪华生, 等. 小流域氮流失特征及其影响因素[J]. 水利学报, 2006, 37(7):801-806, 812.
HUANG Yun-feng, ZHANG Luo-ping, HONG Hua-sheng, et al. Characteristics and influencing factors of nitrogen loss of subwatershed[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(7):801-806, 812.

[19] 金 熠, 梁新强, 刘 于, 等. 增施有机肥对稻田田面水磷素形态和径流流失量的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4):42-47.
JIN Yi, LIANG Xin-qiang, LIU Yu, et al. Impact of organic fertilizer on dynamics of phosphrous forms in floodwater and P runoff from paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(4):42-47.

[20] 郭 智, 周 炜, 陈留根, 等. 施用猪粪有机肥对稻麦两熟农田稻季养分径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6):21-25.
GUO-Zhi, ZHOU Wei, CHEN Liu-gen, et al. Effects of pig manure application on surface runoff losses of soil nitrogen and phosphorus during the paddy season in intensive rice-wheat rotation field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(6):21-25.

[21] 冯 轲, 田晓燕, 王莉霞, 等. 化肥配施生物炭对稻田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 Ke, TIAN Xiao-yan, WANG Li-xia, 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-Environmental Sciences*, 2016, 35(2):329-335.

[22] 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 Jian-nan, ZHANG Ai-ping, LIU Ru-liang, et al. Effects of biochar application on the losses of nitrogen and phosphorus in surface water of paddy field[J]. *Agrometeorology of China,* 2017, 38(3):163-171.

[23] 张丽娟, 马友华, 石英尧, 等. 灌溉与施肥对稻田氮磷径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6):7-12.
ZHANG Li-juan, MA You-hua, SHI Ying-yao, et al. Effect of irrigation and fertilization on nitrogen and phosphorus runoff from paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(6):7-12.

[24] Yang S H, Peng S Z, Xu J Z, et al. Nitrogen loss from paddy field with different water and nitrogen managements in Taihu Lake region of China[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2013, 44(16):2393-2407.

[25] 朱 坚, 纪雄辉, 田发祥, 等. 秸秆还田对双季稻产量及氮磷径流损失的影响[J]. 环境科学研究, 2016, 29(11):1626-1634.
ZHU Jian, JI Xiong-hui, TIAN Fa-xiang, et al. Effects of straw-returning on double cropping rice yield and runoff loss of nitrogen and phosphorus in paddy fields[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(11):1626-1634.

[26] Wang J, Wang D J, Zhang G, et al. Nitrogen and phosphorus leaching losses from intensively managed paddy fields with straw retention[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 141:66-73.

[27] Hoyningen-Huene J V. Die Interzeption des Niederschalages in land wirtschaftlichen Pflflanzenbestaenden[C]. Berlin, Paul Parey Press, 1983.

[28] Kozak, Joseph A, Lajpat R, et al. Modelling crop canopy and residue rainfall interception effects on soil hydrological components for semi-arid agriculture[J]. *Hydrol Processes*, 2007, 21:229-241.

[29] 高惠璇. 两个多重相关变量组的统计分析(1)典型相关与典型冗余分析[J]. 数理统计与管理, 2002, 21(1):57-64.
GAO Hui-xuan. Statistical analysis of two groups of multiple correlated variables(1)Canonical correlation and canonical redundancy analysis[J]. *Application of Statistics and Management*, 2002, 21(1):57-64.

[30] 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):799-803.
CAO Zhi-hong, LIN Xian-gui, YANG Lin-zhang, 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):799-803.

[31] Xu Z, Yang Z, Ju M, et al. Nitrogen runoff dominates water nitrogen

pollution from rice-wheat rotation in Taihu Lake region of China[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2012, 156:1-11.

[32] 梁新强, 陈英旭, 李 华, 等. 雨强及施肥降雨间隔对油菜田氮素径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6):14-17.
LIANG Xin-qiang, CHEN Ying-xu, LI Hua, et al. Effect of rainfall intensity and rain-fertilization interval on N export by runoff in oilseed rape land[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(6):14-17.

[33] 宋勇生, 范晓晖, 林德喜, 等. 太湖地区稻田氨挥发及影响因素的研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(2):265-269.
SONG Yong-sheng, FAN Xiao-hui, LIN De-xi, et al. Ammonia volatilization from paddy fields in the Taihu Lake region and its infecting factors[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(2):265-269.

[34] 田光明, 蔡祖聪, 曹金留, 等. 镇江丘陵区稻田化肥氮的氨挥发及其影响因素[J]. 土壤学报, 2001, 38(3):324-332.
TIAN Guang-ming, CAI Zhu-cong, CAO Jin-liu, et al. Ammonia volatilization from paddy field and its affecting factors in Zhenjiang hilly region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(3):324-332.

[35] 邓美华, 尹 斌, 张绍林, 等. 不同施氮量和施肥方式对稻田氨挥发损失的影响[J]. 土壤, 2006, 38(3):263-269.
DENG Mei-hua, YIN Bin, ZHANG Shao-lin, et al. Effects of rate and method of N application on ammonia volatilization in paddy fields[J]. *Soils*, 2006, 38(3):263-269.

[36] Hofstra N, Bouwman A F. Denitrification in agricultural soils:Summarizing published data and estimating global annual rates[J]. *Nutrients Cycling in Agroecosystem*, 2005, 72(3):267-278.

[37] 夏小江, 胡清宇, 朱利群, 等. 太湖地区稻田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 Xiao-jiang, HU Qing-yu, ZHU Li-qun, 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.

[38] 张志剑, 王 珂, 朱荫湄, 等. 水稻田表水磷素的动态特征及其潜在环境效应的研究[J]. 中国水稻科学, 2000, 14(1):55-57.
ZHANG Zhi-jian, WANG Ke, ZHU Yin-mei, et al. Dynamic characteristics of phosphorus in surface water of paddy field and its potential environmental impact[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2000, 14(1):55-57.

[39] 张志剑, 董 亮, 朱荫湄, 等. 水稻田面水氮素的动态特征、模式表征及排水流失研究[J]. 环境科学学报, 2001, 21(4):475-800.
ZHANG Zhi-jian, DONG Liang, ZHU Yin-mei, et al. The dynamic characteristics and modeling of nitrogen in paddy field surface water and nitrogen loss from field drainage[J]. *Journal of Environmental Science*, 2001, 21(4):475-800.

[40] Krupa M, Tate K W, van Kessel C, et al. Water quality in rice-growing catchments in a Mediterranean climate[J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2011, 144:290-301.

[41] 吴金水, 葛体达, 胡亚军. 稻田土壤关键元素的生物地球化学耦合过程及其微生物调控机制[J]. 生态学报, 2015, 35(20):6626-6634.
WU Jin-shui, GE Ti-da, HU Ya-jun. A review on the coupling of bio-geochemical process for key elements and microbial regulation mechanisms in paddy rice ecosystems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(20):6626-6634.

[42] Lehmann J. A handful of carbon[J]. *Nature*, 2007, 447(7141):143-144.

[43] Hayes M H. Biochar and biofuels for a brighter future[J]. *Nature*, 2006, 443(7108):144.

[44] 郑小龙, 吴家森, 陈裴裴, 等. 生物质炭与不同肥料配施对水稻田面水养分流失风险的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1):221-226.
ZHENG Xiao-long, WU Jia-sen, CHEN Pei-pei, et al. Effects of different nitrogen and biomass carbon fertilization on nutrient loss risk in field surface water[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(1):221-226.

[45] 王少先, 刘光荣, 罗奇祥, 等. 稻田土壤磷素累积及其流失潜能研究进展[J]. 江西农业学报, 2012, 24(12):128-133.
WANG Shao-xian, LIU Guang-rong, LUO Qi-xiang, et al. Research advance in phosphorous accumulation and its loss potential in paddy soils[J]. *Journal of Jiangxi Agriculture*, 2012, 24(12):128-133.

[46] 朱利群, 夏小江, 胡清宇. 不同耕作方式与秸秆还田对稻田氮磷养分径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6):6-10.
ZHU Li-qun, XIA Xiao-jiang, HU Qing-yu. Effects of different tillage and straw return on nitrogen and phosphorus runoff loss from paddy fields[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(6):6-10.

[47] 刘红江, 郑建初, 陈留根, 等. 秸秆还田对农田周年地表径流氮、磷、钾流失的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(6):1031-1036.
LIU Hong-jiang, ZHENG Jian-chu, CHEN Liu-gen, et al. Effects of straw-returning on annual overland runoff NPK loss in farmland[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(6):1031-1036.

[48] Zeng Y H, Wu J F, Pan X H, et al. Study on yield and quality of double cropping rice in different straw return approaches[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(3):534-542.

[49] Fusi A, Bacenetti J, Gonzalez G A, et al. Environmental profile of paddy rice cultivation with different straw management[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 494/495:119-128.

[50] Watanabe T, Man L H, Vien D M, et al. Effects of continuous rice straw compost application on rice yield and soil properties in the Mekong Delta[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2009, 55(6):754-763.

[51] 斯林林, 周静杰, 吴良欢, 等. 生物炭配施缓控释肥对稻田田面水氮素动态变化及径流流失的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(12):5383-5390.
SI Lin-lin, ZHOU Jing-jie, WU Liang-huan, et al. Dynamics and runoff losses of nitrogen in surface water from paddy field under combined application of biochar and slow/controlled release fertilizer[J]. *Environmental Sciences*, 2018, 39(12):5383-5390.