

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.02.013

田昌, 周旋, 杨俊彦, 等. 化肥氮磷优化减施对水稻产量和田面水氮磷流失的影响. 土壤, 2020, 52(2): 311–319.

化肥氮磷优化减施对水稻产量和田面水氮磷流失的影响^①

田昌¹, 周旋², 杨俊彦^{3*}, 石敦杰¹, 荣湘民¹, 谢桂先¹, 彭建伟¹

(1 湖南农业大学资源环境学院, 土壤肥料资源高效利用国家工程实验室, 长沙 410128; 2 湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410125; 3 湖南华绿生态农业发展有限公司, 湖南湘潭 411100)

摘要: 为探讨氮(N)、磷(P)减量对降低稻田养分地表径流损失风险的影响, 以毛里湖稻区为研究对象, 连续两年(2016—2017年)进行田间小区试验, 研究化肥氮磷优化减施对水稻产量和生长期中田面水 N、P 动态变化特征及径流流失的影响。结果表明: 常规施肥处理(CF)和有机替代 20% 化肥 N 处理(0.8FN+0.2ON)稻田田面水总氮(TN)、NH₄⁺-N 和总磷(TP)浓度在施肥后迅速达到峰值, 之后逐渐下降。而控释氮肥减 N 处理能有效减缓 N 素释放速度, 田面水 N 素流失量远低于 CF 处理, 且磷肥减量处理 TP 流失量低于 CF 处理。与 CF 处理相比, 控释氮肥减 N 20%(0.8N)和控释氮肥+过磷酸钙减量 20%(0.8NP)处理水稻两年平均分别增产 5.55%、3.22%, N 素累积量分别提高 19.01%、13.66%, 氮肥偏生产力分别显著提高 31.94%、28.83%, 氮肥农学利用率分别提高 47.52%、33.75%, 氮肥吸收利用率分别提高 95.30%、73.31%。0.8NP 处理较 0.8N 处理水稻磷肥偏生产力两年平均显著提高 22.08%, 而 0.8FN+0.2ON 处理较 CF 处理 P 素累积量和磷肥吸收利用率分别降低 11.14%、36.04%。总体而言, 控释氮肥与磷肥减量既保证高产稳产, 又有效降低稻田施肥初期 N、P 径流损失风险。在综合考虑农业生产节本增效和控制农田面源污染的前提下, 可采用控释氮肥减量的施肥模式。

关键词: 氮磷减量; 水稻; 肥料利用率; 径流损失

中图分类号: S145.4; X52 **文献标志码:** A

Effects of Reducing Nitrogen and Phosphorous Fertilizers on Rice Yield, Nitrogen and Phosphorus Losses in Paddy Field

TIAN Chang¹, ZHOU Xuan², YANG Junyan^{3*}, SHI Dunjie¹, RONG Xiangmin¹, XIE Guixian¹, PENG Jianwei¹

(1 College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University & National Engineering Laboratory of High Efficient Use on Soil and Fertilizer Resources, Changsha 410128, China; 2 Soil and Fertilizer Institute of Hunan Province, Changsha 410125, China; 3 Hunan Hualü Ecological Agriculture Development Co., Ltd. 411100, China)

Abstract: To explore the effects of reducing nitrogen (N) and phosphorus (P) fertilizers on rice yield and runoff losses of N and P in paddy fields, a field plot experiment with different fertilization was conducted from 2016 to 2017 in the rice-planting area of Maoli Lake, the yield of rice, the variation of N and P in surface water, the runoff losses of N and P, and the use efficiencies of N and P fertilizers were monitored and compared after fertilization during the rice-growing period. The results showed that the concentrations of TN, NH₄⁺-N and TP in surface water of paddy field under the treatments of conventional fertilization (CF) and organic-substitution of 20% fertilizer-N (0.8FN+0.2ON) peaked rapidly after fertilization, and then gradually decreased. However, the treatments of controlled release fertilizer with reduced N reduced effectively the release rate of N, and its N loss in surface water was much lower than that of CF treatment, and TP loss under the treatment of reduced P fertilizer was lower than that of CF treatment. Compared with CF treatment, from 2016 to 2017, the treatments of 20% reducing controlled release fertilizer-N (0.8N) and 20% reducing controlled release-N fertilizer + calcium superphosphate-P (0.8NP) increased meanly the yield of rice by 5.55% and 3.22%, N accumulation by 19.01% and 13.66%, N fertilizer partial factor productivity by 31.94% and 28.83%, N fertilizer agronomic efficiency by 47.52% and 33.75%, N fertilizer recovery efficiency by 95.30% and 73.31%, respectively. Compared with 0.8N treatment, 0.8NP treatment increased mean P fertilizer partial factor productivity of rice significantly by

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800500)和湖南省自然科学基金项目(2019JJ50233、2019JJ50337)资助。

* 通讯作者(541249768@qq.com)

作者简介: 田昌(1986—), 男, 湖南浏阳人, 博士, 实验师, 主要从事农业面源污染防治研究。E-mail: chtian12@126.com

22.08%。Compared with CF treatment, 0.8FN+0.2ON treatment reduced P accumulation and P fertilizer recovery efficiency by 11.14% and 36.04%, respectively. In conclusion, reducing controlled release N fertilizer and/or P fertilizer can not only ensure high and stable rice yield, but also effectively reduce the runoff losses of N and P at the initial stage of fertilization in rice field. The fertilization mode of reducing controlled-release N fertilizer can be adopted in order to save the cost of agricultural production and control the non-point source pollution.

Key words: Reducing nitrogen and phosphorus; Rice; Fertilizer use efficiency; Runoff loss

水稻生产需持续供肥,而降雨和稻田排水等自然和人为因素会造成地表径流,从而导致稻田养分流失,使稻田 N、P 面源流失总量处于较高水平^[1],加剧环境水体富营养化^[2-4]。因此,如何实现稻田养分优化减投、水稻高产稳产与环境友好的协调发展备受关注^[5]。

农田 N、P 通过地表径流流失受降雨、土壤、耕作和施肥等多种因素的影响^[6]。施肥总量控制是防止农田 N、P 流失的最有效方法之一^[7]。大量研究表明:减少肥料用量、改进施肥方式、调整施肥时间及肥料种类等可减少稻田 N、P 养分的流失,并取得了一定效果^[8]。其中,改进施肥方式和优化施肥量能有效减少稻田 N、P 流失^[9]。

控释氮肥可通过控制 N 素释放来协调作物养分的供给,既可减少 N 素损失,又可提高氮肥利用率^[10];控释氮肥减 N 10%~30% 施用能保障水稻产量,且明显提高氮肥利用率,显著减少 N 素养分损失^[11]。磷肥减 P 10%~20% 施用水稻不减产,且明显提高磷肥利用率^[12]。有机肥施用能提高氮肥利用效率,减少农田 N 素损失,增加土壤 P 库稳态有机磷和高稳态有机磷含量^[13-15]。前人研究侧重于单一的优化施肥技术,而组合以上施肥技术并研究其应用效果鲜有报道。为此,笔者在本课题组前期研究基础上^[11-12,15],以湘北常德市毛里湖稻区为研究对象,对比研究化肥氮磷减量的不同优化施肥技术及其组合对水稻产量,稻田面水 N、P 动态变化及径流损失的影响,为优选稻田肥料施用技术,控制稻田 N、P 径流流失提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 供试地点

试验于 2016—2017 年 5—9 月在湖南省常德市津市市毛里湖农区稻田(111°46′~112°40′E, 29°11′30″~29°39′40″N)进行,该区属于亚热带季风气候,年均气温 16.7℃,年降水量 1 200~1 900 mm,无霜期 272 d。供试土壤为河潮土发育的河潮泥,2016 年和 2017 年 0~20 cm 土壤基本理化性状分别为: pH

6.74 和 6.51,有机质 26.87 和 25.17 g/kg,全氮 1.78 和 1.97 g/kg,全磷 0.60 和 0.69 g/kg,全钾 26.74 和 32.17 g/kg,碱解氮 84.08 和 104.08 mg/kg,有效磷 12.74 和 10.54 mg/kg,速效钾 217.72 和 217.72 mg/kg。

1.2 供试材料

供试中稻品种均为 c 两优 198。供试氮肥为普通尿素(含 N 46%)、控释氮肥(含 N 42%,树脂包膜尿素,金正大生态股份有限公司生产),磷肥为过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%),钾肥为氯化钾(含 K₂O 60%),有机肥为“强湘牌”精制有机肥(含有机质 47%、N 2.827%、P₂O₅ 2.237%、K₂O 0.802%)。

1.3 试验设计

采用田间小区试验,2016 年设置 3 个处理:①常规施肥处理(CF),N、P₂O₅用量分别为 180、40 kg/hm²;②控释氮肥减量 20% 处理(0.8N),N、P₂O₅用量分别为 144、40 kg/hm²;③控释氮肥与过磷酸钙均减量 20% 处理(0.8NP),N、P₂O₅用量分别为 144、32 kg/hm²。各处理 K₂O 用量为 120 kg/hm²。

2017 年设置 5 个处理:①不施 N、P 处理(CK);②常规施肥处理(CF),N、P₂O₅用量分别为 180、40 kg/hm²;③控释氮肥减量 20% 处理(0.8N),N、P₂O₅用量分别为 144、40 kg/hm²;④控释氮肥与过磷酸钙均减量 20% 处理(0.8NP),N、P₂O₅用量分别为 144、32 kg/hm²;⑤有机肥替代 20% 化肥 N 处理(0.8FN+0.2ON):N、P₂O₅用量为 180、40 kg/hm²。各处理 K₂O 用量为 120 kg/hm²。

小区面积 30 m²(4.0 m×7.5 m),重复 3 次,随机区组排列。小区用田埂隔开,用塑料薄膜包覆,防止串水串肥。所有处理氮、钾肥 60% 做基肥(土层混施),40% 做分蘖肥(表层撒施);磷肥作基肥(土层混施)一次性施用。2016 年和 2017 年中稻均于 5 月 31 日施基肥并移栽,6 月 10 日施追肥,9 月 20 日收割。整个生育期的水肥管理、病虫害防治及其他管理与当地生产一致。

1.4 测定项目与分析方法

1.4.1 田面水样品采集 分别于施基肥后第 1、2、3、5、7、9 天和施追肥后第 1、2、3、5、7、9、11、

13、15、17 天取田面水水样, 采样时间为每天 8:00—10:00。各小区用 100 ml 医用注射器按照对角线取样法(不扰动水层), 抽取 5 个点混合样共 300 ml 于塑料瓶中, 待测。

每个小区排水口处用收集桶收集径流, 当降雨或灌溉产生径流水时, 收集径流收集桶中水样。

1.4.2 水样测定方法 水样中总氮(TN)浓度采用碱性过硫酸钾-紫外分光光度法测定; 水样中总磷(TP)浓度采用碱性过硫酸钾-可见分光光度法测定; 水样中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度采用 SmartChem™ 200 全自动间断化学分析仪测定。

1.4.3 产量测定及植株样品的采集和分析 水稻收获期按小区单打单晒计产。分别计稻谷和秸秆产量, 取样测定稻谷和秸秆 N 和 P 含量。

1.5 计算公式

肥料吸收利用率(RE, %)=(施肥区地上部植株养分吸收量-空白区地上部植株养分吸收量)/施肥量 $\times 100$ (1)

肥料农学利用率(AE, kg/kg)=(施肥区产量-空白区产量)/施肥量 (2)

肥料偏生产力(PFP, kg/kg)=施肥处理产量/施肥量 (3)

1.6 数据分析

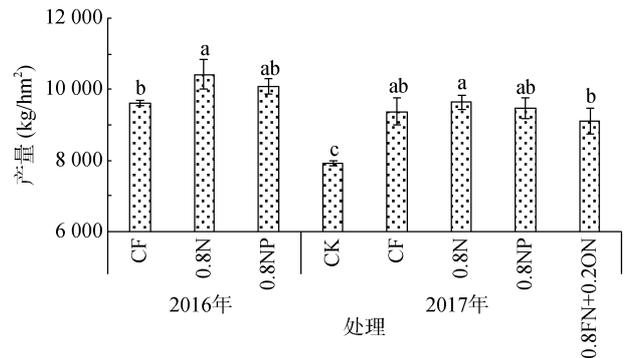
采用 Microsoft Excel 2013 和 SPSS 17.0 软件进行数据处理和分析, 处理间差异显著性分析采用 LSD 检验法。

2 结果与分析

2.1 水稻产量

由图 1 可知, 2016 年水稻籽粒产量以 0.8N 处理最高, 0.8NP 处理次之, 0.8N 处理显著高于 CF 处理。

与 CF 处理相比, 0.8N 和 0.8NP 处理水稻籽粒产量分别增加 8.29% 和 5.35%, 而 0.8NP 处理较 0.8N 处理减产 3.01%, 差异不显著。2017 年水稻籽粒产量以 0.8N 处理最高, 显著高于 0.8FN+0.2ON 处理。施氮、磷肥处理籽粒产量较 CK 增幅为 14.97% ~ 21.62%。0.8N、0.8NP 处理水稻籽粒产量较 CF 处理增产 2.80% 和 1.08%, 0.8FN+0.2ON 处理减产 2.82%, 处理间差异不显著。



(图中小写字母不同表示同一年份内不同处理间水稻产量差异达 $P < 0.05$ 显著水平)

图 1 不同施肥处理对水稻产量的影响

Fig. 1 Rice yield under different fertilization treatments

2.2 水稻氮磷吸收利用

由表 1 可知, 2016 年 0.8N 和 0.8NP 处理 N 素累积量分别显著高于 CF 处理 30.74%、18.99%; 0.8NP 处理 P 素累积量低于 CF 和 0.8N 处理, 但差异不显著。0.8N 处理和 0.8NP 处理的氮肥偏生产力高于 CF 处理, 分别显著提高 35.37% 和 31.31%; 0.8NP 处理磷肥偏生产力最高, 显著高于 CF 和 0.8N 处理; 0.8N 和 0.8NP 处理磷肥偏生产力较 CF 分别提高 8.29% 和 31.30%, 且 0.8N 处理磷肥偏生产力显著高于 CF 处理。

表 1 不同施肥处理下水稻氮磷养分吸收及利用率

Table 1 Uptake and utilization efficiencies of N and P by rice under different fertilization treatments

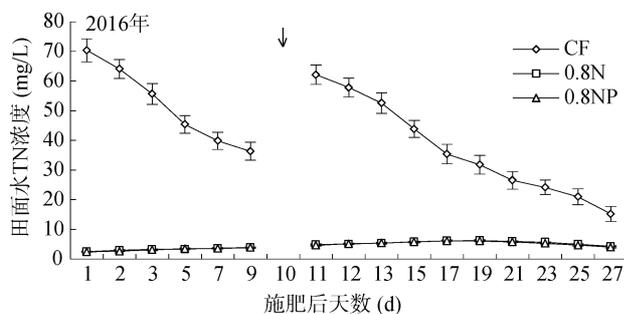
年份	处理	养分累积量(kg/hm ²)		肥料偏生产力(kg/kg)		肥料农学利用率(kg/kg)		肥料吸收利用率(%)	
		N	P	N	P	N	P	N	P
2016	CF	121.52 b	39.82 a	53.40 b	240.32 c				
	0.8N	158.88 a	41.61 a	72.29 a	260.25 b				
	0.8NP	144.60 a	37.51 a	70.12 a	315.54 a				
2017	CK	98.13 c	31.50 c						
	CF	133.01 b	45.61 a	52.07 b	234.31 b	8.06 ab	36.27 ab	19.38 b	35.27 a
	0.8N	145.97 a	45.19 a	66.91 a	240.86 b	11.89 a	42.82 ab	33.22 a	34.23 a
	0.8NP	144.08 a	42.60 a	65.79 a	296.04 a	10.78 a	48.49 a	31.91 a	34.67 a
	0.8FN+0.2ON	131.86 b	40.53 b	50.60 b	227.69 b	6.59 b	29.65 b	18.74 b	32.56 a

注: 表中小写字母不同表示同一年份不同处理间差异达 $P < 0.05$ 显著水平。

2017 年各施氮磷肥处理 N 素累积量显著高于 CK 处理, 其中 0.8N 处理和 0.8NP 处理 N 素累积量显著高于其他处理, CF、0.8N、0.8NP 与 0.8FN+0.2ON 处理较 CK 处理分别提高了 44.79%、48.75%、46.83%、34.37%。CF、0.8N、0.8NP 与 0.8FN+0.2ON 处理磷素累积量较 CK 处理分别提高 44.79%、43.46%、35.24%、28.67%, 而 0.8FN+0.2ON 显著低于其他施氮磷肥处理。减量施肥处理肥料偏生产力显著高于常量施肥处理。0.8N、0.8NP 处理的氮肥偏生产力显著高于 CF 处理和 0.8FN+0.2ON 处理, CF 处理与 0.8FN+0.2ON 处理无差异; 0.8NP 处理的磷肥偏生产力显著高于其他处理。0.8N 处理氮肥农学利用率最高, 其次为 0.8NP, 0.8FN+0.2ON 最低。0.8N 处理与 0.8NP 处理显著高于 0.8FN+0.2ON 处理, 与 CF 处理无显著差异; 0.8NP 处理磷肥农学利用率最高, 显著高于 0.8FN+0.2ON 处理, 其他处理之间无显著差异。0.8N 与 0.8NP 处理氮肥吸收利用率较 CF 处理显著提高 71.41%、64.65%, 较 0.8FN+0.2ON 处理显著提高 77.27%、70.28%。0.8FN+0.2ON 处理磷肥吸收利用率最低, 施氮磷肥处理间差异不显著。

2.3 稻田田面水 N、P 浓度

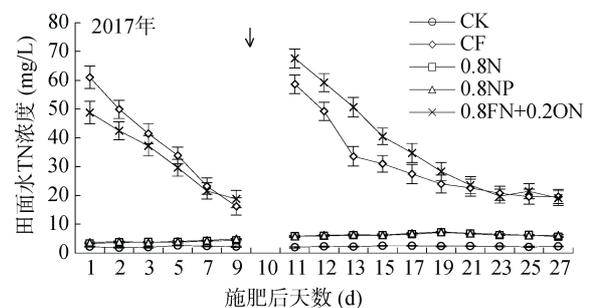
2.3.1 田面水 TN 浓度 如图 2 所示, 2016 年基肥施用后 CF 处理稻田田面水 TN 浓度迅速增高, 于第 1 天达到峰值(70.34 mg/L)后下降, 追肥后又达到峰值(62.14 mg/L)。可见, 施肥后的几天是控制 N 素径流损失的关键时期。0.8N 和 0.8NP 处理施肥后, 田面水中 TN 浓度缓慢上升, 监测期内处于较低水平。



0.8N 和 0.8NP 处理施用基肥后田面水 TN 平均浓度较 CF 处理分别降低 93.69% 和 93.83%, 追肥后分别降低 84.09% 和 84.49%。说明控释氮肥减量施用能显著降低稻田田面水 TN 浓度, 降低 N 素径流流失风险。0.8N 和 0.8NP 处理间 TN 浓度差异不大。说明磷肥减量施用对稻田田面水 TN 浓度影响较小。

2017 年 CK 处理稻田田面水 TN 浓度整体处于较低水平(1.82 ~ 2.56 mg/L)。CF 和 0.8FN+0.2ON 处理施肥后 TN 浓度变化规律一致, 均于基肥施用后第 1 天达到峰值(60.96 和 48.81 mg/L), 追肥后又达到峰值(58.61 和 67.59 mg/L)。0.8N 和 0.8NP 处理施用基肥后 TN 平均浓度较 CF 处理分别降低 89.76% 和 89.04%, 追肥后分别降低 79.64% 和 78.94%。0.8FN+0.2ON 处理施用基肥后和追肥后 TN 平均浓度分别为 33.07 mg/L 和 36.48 mg/L, 变化规律与 CF 处理相似。

2.3.2 田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度 如图 3 所示, 2016 年 CF 处理施基肥后田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度于第 1 天达到峰值(57.52 mg/L)后下降, 追肥后又达到峰值(53.04 mg/L)。0.8N 和 0.8NP 处理施基肥后田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度逐渐升高; 追肥后 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度跃升后缓慢下降, 0.8N、0.8NP 处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度均在施追肥后第 9 天达到峰值(4.98、5.08 mg/L)。0.8N、0.8NP 处理施基肥后 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度较 CF 处理分别降低 94.08%、94.08%, 追肥后分别降低 86.36%、85.94%。说明控释氮肥减量施用显著降低稻田田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度。



(图中箭头表示追肥时间, 下图同)

图 2 不同处理下稻田田面水 TN 浓度变化

Fig. 2 Changes of TN concentrations in surface water of paddy fields under different fertilization treatments

2017 年 CK 处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度一直处于较低水平(1.17 ~ 1.68 mg/L)。CF 与 0.8FN+0.2ON 处理施肥后 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 变化规律表现一致, 均于施基肥后第 1 天达到峰值(45.79、37.56 mg/L)。追肥后第 1 天又达到峰值(44.20、50.75 mg/L)。0.8N 和 0.8NP 处理施基肥后, 田面水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度逐渐升高, 追肥后 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度

跃升后缓慢下降。0.8N、0.8NP 处理施基肥后 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均浓度较 CF 处理分别降低 91.02%、90.20%, 追肥后分别降低 82.04%、81.57%。

2.3.3 田面水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度 如图 4 所示, 2016 年 CF 处理 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在施基肥后第 1 天最低(1.21 mg/L), 随后缓慢上升, 追肥 7 d 后介于 1.84 ~ 1.92 mg/L。0.8N

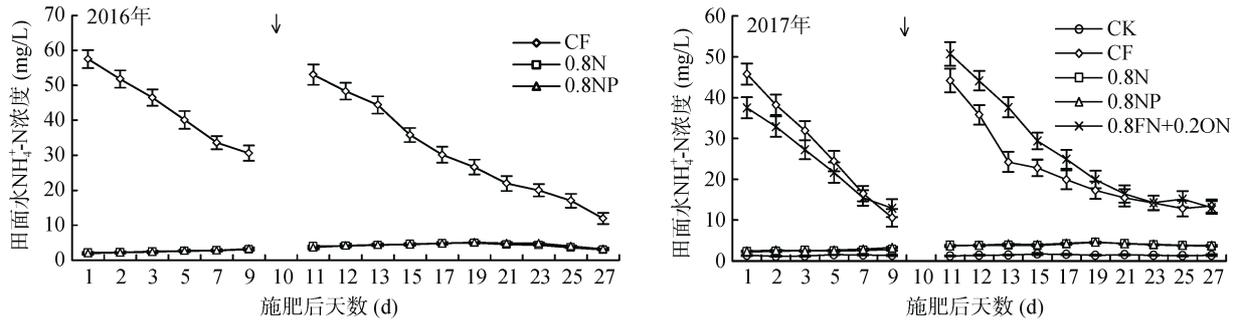


图 3 不同处理下稻田田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度变化

Fig. 3 Changes of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentrations in surface water of paddy fields under different fertilization treatments

和 0.8NP 处理 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度施肥后缓慢上升，追肥后跃升，之后分别为 0.70~0.81 mg/L 和 0.71~0.90 mg/L。0.8N、0.8NP 处理施肥后较 CF 处理分别降低 70.07%、68.67%，追肥后分别降低 57.91%、54.52%。淹水条件下硝化作用较弱，导致田面水中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度显著低于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度^[16]。

2017 年 CK 处理稻田田面水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度一直处于较低水平(0.25~0.41 mg/L)，施氮磷肥处理田面水

$\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度施肥后缓慢上升。0.8N 和 0.8NP 处理基肥施用后 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 平均浓度较 CF 处理分别降低 65.55% 和 63.93%，追肥后分别降低 52.00% 和 47.82%。0.8FN+0.2ON 处理施肥和追肥后变化规律与 CF 处理相似。稻田田面水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 主要是尿素水解产生 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 通过硝化作用形成，淹水时田面水硝化作用较弱，同时由于水稻吸收、反硝化作用和 N 素淋失等，稻田田面水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度较低^[17]。

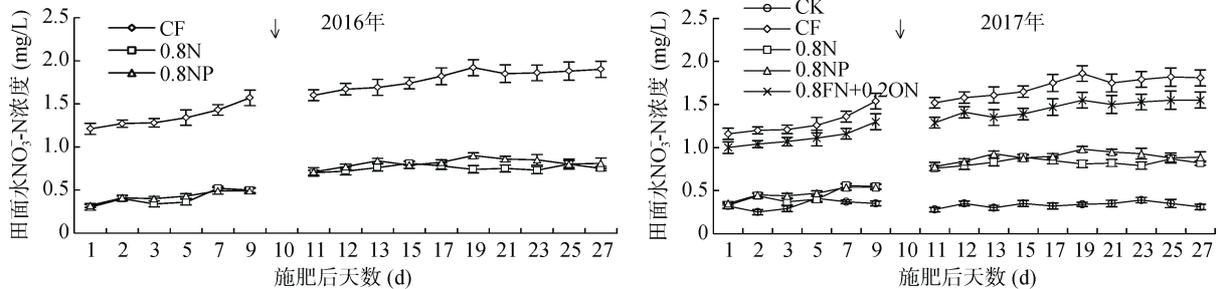


图 4 不同处理下稻田田面水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度变化

Fig. 4 Changes of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ concentrations in surface water of paddy fields under different fertilization treatments

2.3.4 田面水 TP 浓度 如图 5 所示，2016 年基肥施用后 CF、0.8N 和 0.8NP 处理稻田田面水 TP 浓度同时第 1 天出现峰值(0.16、0.16、0.12 mg/L)。由于土壤对 P 素的固定和水稻的吸收，随着时间的推移田面水 TP 浓度逐渐下降，在施用基肥后第 9 天达到稳定。监测期内 CF 处理田面水 TP 浓度为 0.05~0.16 mg/L。0.8NP 处理较 CF、0.8N 处理田面水 TP 浓度分别降低 23.91%、28.72%。追肥后第 1 天，田面水 TP 浓度有所升高。这是由于施肥扰动表面土壤，使部分 P 素脱离土壤吸附而进入田面水，田面水 P 浓度升高。

2017 年 CK 处理 TP 浓度维持在较低水平(0.04~0.06 mg/L)，CF、0.8N、0.8NP 与 0.8FN+0.2ON 处理田面水 TP 浓度变化规律一致，在施基肥后到达峰值(0.17、0.17、0.13 和 0.18 mg/L)后，缓慢降低。追肥后第 1 天，部分处理田面水 P 浓度有所升高。减 P

处理施肥后，田面水 TP 浓度明显下降，0.8NP 处理田面水 TP 浓度较 CF、0.8N 与 0.8FN+0.2ON 处理分别下降 24.55%、20.79%、24.73%。

2.3.5 养分损失量 由图 6 可知，与 CF 处理相比，2016 年 0.8N 处理稻田田面水 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 径流损失分别降低 69.08%、70.61%、60.23%，0.8NP 处理分别降低 70.14%、71.80%、54.94%。0.8NP 处理 TP 径流损失较 CF 处理降低 18.40%，与 0.8N 处理差异不显著。

与 CK 处理相比，2017 年施氮磷肥处理稻田田面水 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TP 径流损失分别增加 2.37~12.20、1.28~8.10、0.40~1.18、0.009~0.016 kg/hm²。与 CF 处理相比，0.8N 处理稻田田面水径流损失 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、分别降低 70.19%、74.34%、52.08%，0.8NP 处理分别降低 69.83%、73.55%、48.29%，0.8FN+0.2ON 处理分别降低 47.22%、47.43%、

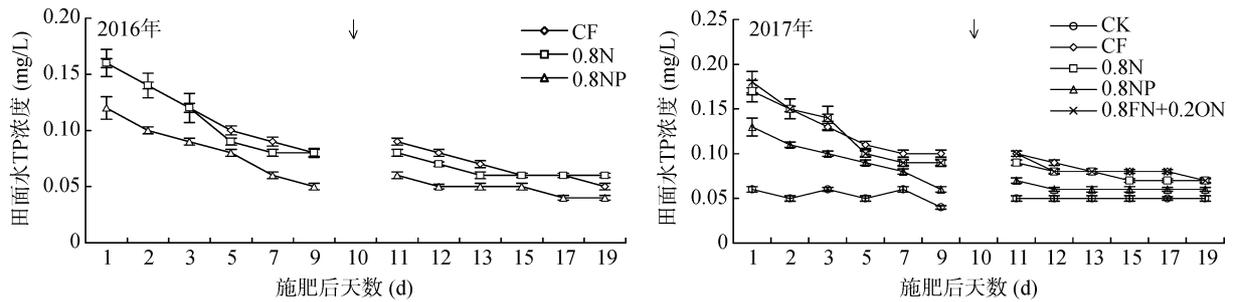


图 5 不同施肥处理下稻田田面水 TP 浓度变化

Fig. 5 Changes of TP concentrations in surface water of paddy fields under different fertilization treatments

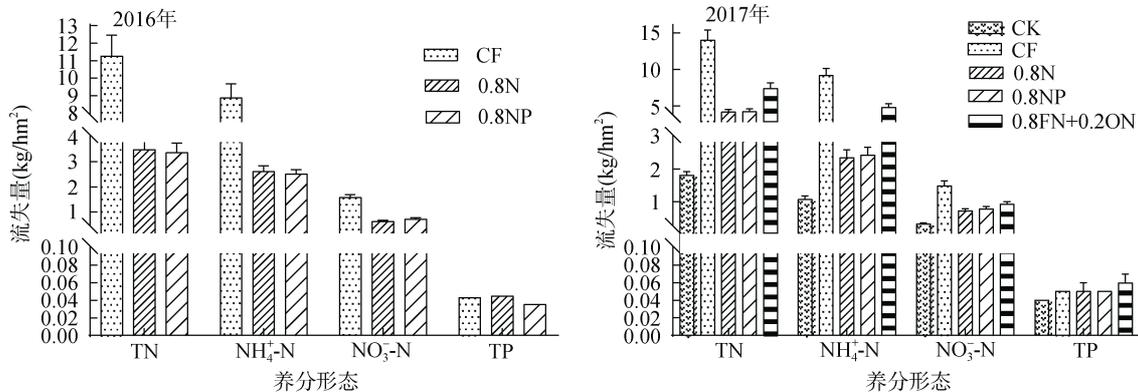


图 6 不同施肥处理下稻田地表径流 N、P 流失量

Fig. 6 N and P runoff losses from paddy fields during rice season under different fertilization treatments

38.61%；0.8N 和 0.8FN+0.2ON 处理稻田田面水 TP 径流损失分别增加 2.73% 和 8.43%，0.8NP 处理降低 5.14%。说明控释肥减量能有效降低稻田 N 素流失，磷肥减量施用能有效降低稻田 P 素流失，而等 N 条件下，有机肥替代化肥施用，减少稻田 N 素流失率，但增加 P 素流失率。

3 讨论

3.1 化肥减量施用对水稻产量、肥料利用率及田面水 N、P 流失的影响

施 N 量是影响稻田田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 浓度的主要因子^[18]。施 N 显著增加田面水的 N 素浓度，且随着施 N 量的减少而降低^[8]。夏小江等^[19]发现，两试验点稻田田面水 TN 浓度均在施肥当日达最高，后迅速下降，基肥在施肥 7 d 后逐渐趋于稳定，追肥则在施肥 5 d 后逐渐趋于稳定。施 N 后 1 周或 15 d 是防止稻田田面水 N 素大量流失的关键时期^[8,19]，本研究结果与此一致。

前期研究表明：氮肥减量施用能有效降低稻田田面水 N、P 流失^[11]。赵冬等^[8]发现，随着施 N 量的增加，氮肥农学效率不断下降，N 素径流损失不断增大。吴俊等^[20]认为，双季稻田减量施肥处理年累计流失

负荷较对照处理下降 6%~53%，当季稻田 N 素流失率在 1.4%~2.6%。减量施肥虽然能明显降低 N 素流失负荷，但 N 素表观流失率却随施肥量减小而上升。本研究中，控释氮肥减施(0.8N 和 0.8NP)处理基肥后田面水两年 TN 平均浓度较 CF 处理降低 89.04% 以上，追肥后降低 78.94% 以上；TN 径流流失量降低 69.83% 以上。控释氮肥适量减施能基于满足水稻生长需求，获得较高养分效率，得到与高投入相当的作物产量。

一般而言，高水平磷肥投入会促进土壤富 P 化，增加土壤 P 的流失风险^[21-22]。夏小江等^[19]发现，稻田田面水 TP 浓度在施肥后迅速增加，于第 1 天达峰值，且随时间推移田面水 TP 浓度逐渐下降，8~9 d 后基本稳定。本研究中，磷肥施用后稻田田面水 TP 浓度迅速达到最大值，后快速下降。0.8NP 处理田面水 TP 平均浓度基肥和追肥施用后分别较常规施肥降低 23.91%、24.55%，TP 径流损失降低 5.14%。适当减少磷肥施用量能有效降低稻田田面水 TP 浓度，从而降低 P 素流失风险，与前期研究结果基本一致^[23]。因此，从源头上减少氮、磷肥施入，阻止过剩养分进入水体，是控制农业面源污染的关键。

磷肥适当减量可维持水稻的正常产量^[24]。胡润

等^[25]发现, 土壤有效磷中等水平下, 将控释磷肥用量降至当地农民习惯用量 50% 左右对水稻产量的影响较小。易均等^[12]发现, 磷肥减施 20% 以内对双季稻产量无影响。付立东等^[26]发现, 适量施用磷肥可提高磷肥利用率、磷肥偏生产力, 但磷肥用量过多时反而会影 响水稻的生长发育, 从而降低水稻产量。龚海青等^[24]发现, 磷肥减量后, P 素供应不足, 不利于水稻生育后期生长发育和籽粒形成有关。本研究中, 0.8N 和 0.8NP 处理两年平均增产分别为 5.55%、3.22%。说明适当降低磷肥用量对水稻产量影响不显著。0.8NP 处理较 0.8N 处理显著提高水稻磷肥偏生产力 22.08%, 对地上部 P 素累积、磷肥农学利用率及磷肥利用率无影响。说明减 P 20% 处理磷肥农学利用率、磷肥利用率较常规施肥和控释氮肥减量 20% 无明显差异。因此, 适当降低磷肥用量对水稻产量影响不大, 可提高磷肥农学效率和磷肥偏生产力。

3.2 有机肥替代化肥对水稻产量、肥料利用率及田面水 N、P 流失的影响

合适的有机无机配比可保证水稻稳产, 而有机肥占比过高或过低导致水稻生长前期或后期营养不足都有可能造成水稻减产^[27]。陈贵等^[28]发现, 长期施用有机肥的条件下, 减少 25% 化肥对水稻产量, 干物质累积, N、P 累积和生理利用效率以及土壤养分含量均无明显影响。替代 20% 化肥 N 处理中稻产量、氮磷肥农学利用率及利用率较常规施肥无显著差异, 本研究结果与此一致。有机无机肥配合施用对水稻产量的促进作用主要是通过提高功能叶的净光合速率、有效穗、每穗实粒数来实现。

徐明岗等^[29]发现, 化肥有机肥配施有利于水稻稳产高产, 产量最高, 比不施氮肥产量增加 68%; 提高单位面积总穗数和穗粒数。孟琳等^[30]发现, 有机肥与化肥配施处理能获得与单施化肥处理持平或者更高的产量; 与单施化肥处理相比, 施 N 量在 240 kg/hm² 内时, 有机氮肥替代无机氮肥的最佳比例为 10% ~ 20%, 此时水稻的产量、氮肥利用率以及经济效益均达到最高水平。

与施用过磷酸钙等无机磷肥相比, 施用有机肥能有效削减水中 TP 残留量, 控制稻田 P 素流失风险^[31]。郭智等^[32]发现, 有机肥替代 50% 无机肥可显著降低 23% 以上的 TP 径流流失率。但随着有机肥替代比例的增加, 稻田地表径流 TN 和 TK 流失率逐渐下降, TP 流失率逐渐增加^[27]。孙瑞娟等^[33]发现, 田面水中溶解性 TP 在整个生育期内与猪粪用量呈显著正相关。张志剑等^[21]发现, 与单施无机磷肥相比, 有机

无机磷配施显著提高田表水 P 素水平。朱利群等^[34]发现, 全部施用猪粪有机肥处理和不施肥之间差异不大, 全部施用尿素处理稻田田面水 TN 最高, 施用 50% 有机肥田面水 TN 浓度明显低于全部施用有机肥处理, 且明显高于全部施用有机肥处理。本研究中, 有机肥替代 20% N 处理田面水 TN 浓度变化规律与 CF 处理一致。刘汝亮等^[14]发现, 宁夏引黄灌区水稻种植中利用羊粪与化肥配施降低田面水 TN 浓度。金熠等^[3]施用有机肥显著提高稻田田面水中 TP 的浓度, 施肥后第 1 天迅速达到峰值; 稻田 TP 径流流失量随有机肥施用量的增加而增加, P 素径流流失率均不超过当季施 P 总量的 2%; 稻田淹水期田面水 TP 浓度主要受到当季降雨、施肥等因素的影响。有机肥施用后第 1 天田面水 TP 浓度迅速达到峰值, 随后偶有波动但呈现逐渐降低的趋势; 施肥后第 1 周是防止稻田 P 素径流流失的关键时期, 应避免在强降雨将要来临的时间施肥。有机肥替代 20% 化肥氮处理较 CF 处理对 N 素地上部累积量、氮肥偏生产力、氮肥农学利用率、氮肥利用率及磷肥偏生产力、磷肥农学利用率无影响, 但降低 P 素地上部累积量 11.14%、磷肥利用率 36.04%。

3.3 控释氮肥减量对水稻产量、养分吸收与利用、稻田田面水 N、P 流失的影响

N 素径流损失与氮肥用量呈显著正相关, 减量化肥能有效降低农田 N 素流失量, 其中缓释肥、控释肥等措施表现突出^[20]。纪雄辉等^[35]研究表明, 与施用尿素相比, 施用控释肥料能显著降低稻田表层水 TN、NH₄⁺ 浓度峰值。施用等 N 量控释氮肥、70% N 控释氮肥的 TN 损失量比施用普通尿素的分别减少 24.5% 和 27.2%; 控释氮肥能显著降低双季稻施用尿素 15 d 内表层水和径流液中的 N 素浓度, 从而显著消减整个水稻生育期 TN 的径流损失。田发祥等^[36]发现, 与常规施 N(早稻 150 kg/hm², 晚稻 180 kg/hm²) 相比, 减 N 30% 膜包衣尿素和减 N 30% 硫包衣尿素 NH₄⁺-N 径流损失量分别显著降低 34.1%、26.6%; 减 N 30% 膜包衣尿素水溶性非无机 N 和 TN 径流损失较尿素分别减少 29.0% 和 26.3%。杨春蕾等^[37]发现, 控释肥在水稻分蘖期田面水 TN 浓度显著低于普通尿素。本研究表明, 稻田施用控释氮肥后田面水 N 浓度较低, 在缓慢升高到峰值后开始下降, 且显著低于普通尿素处理。由于控释氮肥缓慢释放尿素的特性, 可将输入田面水的 N 素维持在较低水平, 同时水稻根系也在不断吸收, 从而降低田面水中 TN 浓度。

控释氮肥能控制 N 素释放, 降低水稻生长前期稻

田表面水 N 素浓度, 减少其降雨径流损失风险^[38]。鲁艳红等^[38]发现, 施用等 N 量控释氮肥处理比施用尿素处理总氮径流损失量降低 24.5% ~ 27.2%。施用尿素稻田田面水 TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的浓度在尿素施用后 1 ~ 3 d 内达到最高值, 且显著高于施用控释氮肥处理, 大大增加 N 素损失的风险; 施用控释氮肥可延缓养分释放速率, 有效减少土壤 N 素的挥发与淋溶损失^[35]。控释氮肥具有缓慢释放 N 素的特性, 使水稻田面水的 N 素浓度维持较低的水平, 从而降低农田 N 素径流损失风险^[39]。

张丽娟等^[40]发现, 平均 4 次产流中, 相对于传统施肥, 优化施肥氮肥分次施用及缓释肥处理产生的径流中 TN 浓度可降低约 22.98% ~ 42.88%。叶玉适等^[17]发现, 控释 BB 肥和树脂包膜尿素较常规尿素处理田面水 TN 平均浓度分别降低 24.6% 和 78.3%, TN 径流流失量分别降低 29.4% 和 32.8%。本研究表明, 控释肥减 N 不仅能显著减少 N 素径流损失, 还能减少 N 素渗漏损失。本研究中, 施用控释氮肥可明显降低田面水 N 素浓度, 两年 0.8N 处理在施基肥后 9 d 内 TN 浓度较 CF 处理分别降低 93.69%、89.76%, 施追肥后 17 d 内分别平均降低 84.09%、79.64%。

控释氮肥能明显地降低稻田氨挥发、淋失和硝化-反硝化的损失, 氮肥利用率和农学效率显著地高于尿素^[41]。本研究中, 0.8N 处理、0.8NP 处理两年平均增产 5.55% 和 3.22%。施用控释氮肥处理较常规施肥对水稻有增产, 而增产主要因为发挥控释氮肥肥效长的优势。

田发祥等^[36]得出, 不同减 N 比率的缓控释肥对中稻产量的影响不明显, 但显著提高氮肥的利用, 早晚稻的氮肥农学效率分别提高 12.4% ~ 35.8% 和 27.4% ~ 56.6%。与常规尿素处理相比, 减 N 30% 的膜包衣尿素处理减少 N 素使用量还可提高双季稻的 N 素吸收, 从而提高双季稻氮肥利用率 23.5% 和 21.1%。本研究中, 0.8N 处理、0.8NP 处理较 CF 处理 N 素累积量两年分别平均增加 19.01%、13.66%, 氮肥偏生产力两年分别平均显著提高 31.94%、28.83%, 氮肥农学利用率提高 47.52%、33.75%、氮肥利用率提高 95.30%、73.31%。适量降低氮肥用量能够增强水稻对 N 素的吸收, 在保持高产的同时实现 P 素利用效率的同步提高。控释氮肥具有控制养分释放的特点, 在 N 素释放的高峰期, 农田 N 素损失量较大, 如果田间条件下 N 素释放高峰期与作物吸肥高峰期相吻合, 会显著地降低其损失率, 从而提高

作物产量和肥料利用率^[42]。

4 结论

在湖北常德市毛里湖稻区, 减量施肥处理能有效降低田面水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度, 降低 N 素径流流失风险; 控释氮肥或与磷肥减量 20% 施用既可以保证高产稳产, 又可有效降低稻田 N 素径流损失风险, 可在实际生产中应用推广。

参考文献:

- [1] 张志剑, 董亮, 朱荫涓. 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): 475-480.
- [2] Zhao X, Zhou Y, Min J, et al. Nitrogen runoff dominates water nitrogen pollution from rice-wheat rotation in the Taihu Lake region of China[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2012, 156(4): 1-11.
- [3] 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.
- [4] 魏静, 郭树芳, 翟丽梅, 等. 有机无机肥配施对水稻氮素利用率与氮流失风险的影响[J]. 土壤, 2018, 50(5): 25-31.
- [5] Daniel J C, Hans W P, Robert W H, et al. Controlling eutrophication: Nitrogen and phosphorus[J]. Science, 2009, 323(20): 1014-1015.
- [6] 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.
- [7] 张敏, 赵森, 田玉华, 等. 太湖地区高产高效措施下水稻氮淋溶和径流损失的研究[J]. 土壤, 2018, 50(1): 35-42.
- [8] 赵冬, 颜廷梅, 乔俊, 等. 稻季田面水不同形态氮素变化及氮肥减量研究[J]. 生态环境学报, 2011, 20(4): 743-749.
- [9] 潘根兴, 褚清河, 张英, 等. 太湖地区高产水稻土经济极点施肥: 一种农田 N、P 养分负荷的田间控制技术[J]. 环境科学, 2003, 24(3): 96-100.
- [10] 侯红乾, 冀建华, 刘益仁, 等. 缓/控释肥对双季稻产量、氮素吸收和平衡的影响[J]. 土壤, 2018, 50(1): 43-50.
- [11] 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): 24-31.
- [12] 易均, 谢桂先, 刘强, 等. 磷肥减施对双季稻生长和产量及磷肥利用率的影响[J]. 湖南农业大学学报(自科版), 2016, 42(2): 197-201.
- [13] 韩晓飞, 谢德体, 高明, 等. 减磷配施有机肥对水旱轮作紫色水稻土磷素淋失的消减效应[J]. 生态学报, 2017, 37(10): 3525-3532.
- [14] 刘汝亮, 张爱平, 李友宏, 等. 长期配施有机肥对宁夏引黄灌区水稻产量和稻田氮素淋失及平衡特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(5): 947-954.

- [15] 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.
- [16] 刘若萱, 贺纪正, 张丽梅. 稻田土壤不同水分条件下硝化/反硝化作用及其功能微生物的变化特征[J]. 环境科学, 2014, 35(11): 4275-4283.
- [17] 叶玉适, 梁新强, 金熠, 等. 节水灌溉与控释肥施用对稻田田面水氮素变化及径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(5): 105-112.
- [18] 田玉华, 贺发云, 尹斌, 等. 不同氮磷配合下稻田田面水的氮磷动态变化研究[J]. 土壤, 2006, 38(6): 727-733.
- [19] 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.
- [20] 吴俊, 樊剑波, 何园球, 等. 不同减量施肥条件下稻田田面水氮素动态变化及径流损失研究[J]. 生态环境学报, 2012(9): 1561-1566.
- [21] 张志剑, 王珂, 朱荫涓, 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.
- [22] 王伟妮, 鲁剑巍, 鲁明星, 等. 湖北省早、中、晚稻施磷增产效应及磷肥利用率研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 545-553.
- [23] 谢学俭, 陈晶中, 宋玉芝, 等. 磷肥施用量对稻麦轮作土壤中亚季磷素及氮素径流损失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(6): 2156-2161.
- [24] 龚海青, 张敬智, 陈晨, 等. 磷肥后移与减量对水稻磷素利用效率的影响[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(5): 144-152.
- [25] 胡润. 控失磷钾肥对水稻农艺性状及产量的影响[J]. 中国稻米, 2010, 16(6): 39-42.
- [26] 付立东, 王宇, 李旭, 等. 磷肥不同施用量对水稻产量及磷肥利用率的影响[J]. 北方水稻, 2011, 41(4): 20-24.
- [27] 刘红江, 陈虞雯, 孙国峰, 等. 有机肥-无机肥不同配施比例对水稻产量和农田养分流失的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36(2): 405-412.
- [28] 陈贵, 赵国华, 张红梅, 等. 长期施用有机肥对水稻产量和氮磷养分利用效率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(1): 92-97.
- [29] 徐明岗, 李冬初, 李菊梅, 等. 化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(10): 3133-3139.
- [30] 孟琳, 张小莉, 蒋小芳, 等. 有机肥料氮替代部分化肥氮对稻谷产量的影响及替代率[J]. 中国农业科学, 2009, 42(2): 532-542.
- [31] 吴美玲, 张绍荣, 龙国, 等. 有机肥控制稻田氮磷流失风险效果初步研究[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(18): 4328-4332.
- [32] 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.
- [33] 孙瑞娟, 王德建, 林静慧, 等. 有机肥施用水田土壤溶液氮磷动态变化及环境的潜在影响[J]. 土壤, 2009, 41(6): 907-911.
- [34] 朱利群, 田一丹, 李慧, 等. 不同农艺措施条件下稻田田面水总氮动态变化特征研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6): 85-89.
- [35] 纪雄辉, 郑圣先, 鲁艳红, 等. 施用尿素和控释氮肥的双季稻田表层水氮素动态及其径流损失规律[J]. 中国农业科学, 2006, 39(12): 2521-2530.
- [36] 田发祥, 纪雄辉, 石丽红, 等. 不同缓控释肥料减氮对洞庭湖区双季稻田氮流失与作物吸收的影响[J]. 农业现代化研究, 2010, 31(2): 220-223.
- [37] 杨春蕾, 袁玲, 李英才, 等. 南太湖流域控释包膜尿素对水稻产量及稻田氮素流失的影响[J]. 土壤通报, 2013, 44(1): 184-190.
- [38] 鲁艳红, 纪雄辉, 郑圣先, 等. 施用控释氮肥对减少稻田氮素径流损失和提高水稻氮素利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(3): 490-495.
- [39] 李旭, 谢桂先, 刘强, 等. 控释氮肥减量施用对稻田氮素径流和渗漏损失的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 70-74.
- [40] 张丽娟, 马中文, 马友华, 等. 优化施肥和缓释肥对水稻田面水氮磷动态变化的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 90-94.
- [41] 郑圣先, 刘德林, 聂军, 等. 控释氮肥在淹水稻田土壤上的去向及利用率[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(2): 137-142.
- [42] 左海军, 张奇, 徐力刚. 农田氮素淋溶损失影响因素及防治对策研究[J]. 环境污染与防治, 2008, 30(12): 83-89.