

不同施磷量下稻田土壤磷素平衡及其潜在环境风险评估

区惠平¹, 周柳强¹, 黄美福¹, 黄金生¹, 韦运兰¹, 谢如林¹,
曾艳¹, 刘昔辉², 朱晓晖¹, 谭宏伟^{2*}

(1 广西农业科学院农业资源与环境研究所, 南宁 530007; 2 广西农业科学院甘蔗研究所, 南宁 530007)

摘要:【目的】对南方赤红壤区不同施磷量下稻田土壤的磷素平衡及其潜在环境风险进行评估, 为该地区合理施磷、减轻农业面源污染提供依据。【方法】采用大田定位监测试验, 3 个不同年份(2011~2013 年)早、晚稻分别设置 4 个施磷水平(施磷范围为 P_2O_5 0、63~81、126~162、252~324 kg/hm^2 , 分别用 P0、P1、P2、P3 表示), 连续 3 年测定早、晚稻的稻谷和稻秆产量, 分析其磷养分含量, 以施磷水平与水稻地上部磷素累积量间的差值表示土壤磷素表观盈余量。同时, 采集施基肥和穗肥后 1、2、3、5、7 和 9 d 的田面水, 测定总磷含量, 利用 Split-line 模型对 2011~2012 年每造水稻收获后小区耕层土壤 Olsen-P 含量和所有监测时间点的田面水总磷平均浓度进行分段回归, 并对二者之间的相关关系进行分段回归拟合。【结果】施磷量 P_2O_5 63~81 kg/hm^2 的处理稻谷产量显著提高, 但磷肥施用量增至 2 倍时, 稻谷产量无明显增加, 继续增至 4 倍时, 前 3 造水稻稻谷的产量增加也不明显。施磷可不同程度地提高水稻地上部的磷素累积量、土壤表观磷素盈余量和 Olsen-P 含量, 且三者均随施磷量的增加而增加。在施肥后 1~3 d 内无磷处理田面水总磷浓度较高, 是磷素流失的高危险期; 施磷量 P_2O_5 63~81 kg/hm^2 的处理显著提高了施肥后 2 d 内田面水的总磷浓度, 而 P_2O_5 252~324 kg/hm^2 的处理在监测期间田面水总磷浓度均显著高于无磷处理。Split-line 模型模拟土壤 Olsen-P 与田面水总磷的关系, 得出在本试验区土壤环境条件下, 可能导致田面水中磷激增的土壤 Olsen-P 临界含量为 19.0 mg/kg , 对应的施磷量为 P_2O_5 63 kg/hm^2 , 与土壤磷素持平的施磷量一致。【结论】综合考虑水稻产量效应、土壤磷素表观平衡和磷素环境风险, 在本研究区域目前的土壤环境条件下, P_2O_5 63 kg/hm^2 为水稻产量较高、环境风险较小的推荐施磷量。

关键词: 水稻; 磷; 流失; 风险

中图分类号: S511.062; X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505(2016)01-0040-08

Phosphorus balance in paddy soils and its environmental effect under different phosphorus application rates

OU Hui-ping¹, ZHOU Liu-qiang¹, HUANG Mei-fu¹, HUANG Jin-sheng¹, WEI Yun-lan¹, XIE Ru-lin¹,
ZENG Yan¹, LIU Xi-hui², ZHU Xiao-hui¹, TAN Hong-wei^{2*}

(1 Agricultural Resource and Environment Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China;
2 Sugarcane Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China)

Abstract: 【Objectives】The objective is to provide the basis for reducing agricultural non-point source pollution by evaluating phosphorus (P) balance in paddy soils in red soil zone of south China and its environmental effect under different P application rates. 【Methods】A continuous 3-year (2011-2013) field experiment design was used, and 4 different P application rates were selected, P_2O_5 0, 63-81, 126-162 and 252-324 kg/hm^2 . In this study, yields and P concentrations of grain and straw of both early cropping rice and late cropping rice were

收稿日期: 2014-06-17 接受日期: 2014-09-17 网络出版日期: 2015-06-01

基金项目: 农业部科技专项(201003014, WX-2-07-13, 201203030, 201203021); 广西农科院基金项目(2014JZ18, 2013YQ01, 2012YZ20, 2015YT30, 2012YZ20); 广西自然科学基金项目(2012GXNSFBA053062, 桂科合 14125008-2-15); 国家自然科学基金项目(21467004, U1033004); IPNI 项目资助。

作者简介: 区惠平(1983—), 女, 广东江门人, 副研究员, 主要从事作物营养与生态环境方面的研究。E-mail: ouhuiping2006@163.com

* 通信作者 E-mail: hwtan@gxaas.net

detected, and P surplus was calculated by the difference of P levels and aboveground P accumulation. Moreover, total P in field water above soil surface at 1, 2, 3, 5, 7 and 9 days after the basal and earing fertilizing was also detected, then the relation between total P in field water above soil surface and soil Olsen-P concentration from 2011 to 2012 year was analyzed by the split-line model. **【Results】**The P_2O_5 63–81 kg/hm² phosphorus treatment significantly improves the rice yield as compared with the non P fertilization control, and not significant as compared with the treatment of double and 4 times P rates of the fertilizer. The fertilizer-P application increases the aboveground P accumulation, soil P surplus and soil Olsen-P concentration which are increased with the increment of the P fertilizer amounts. The total phosphorus (TP) in the field water is high during the first 1–3 days in the control, which is the dangerous duration for P running off. Compared with the control, the TP content in the surface water of the P_2O_5 63–81 kg/hm² treatment is significantly higher within 2 days after the fertilization, and always high during the monitoring period in the P_2O_5 252–324 kg/hm² treatment. The simulation with the split line model on the relationship between soil Olsen-P and field water TP above soil surface shows that the change point of soil Olsen-P which relates to the field water TP concentration above soil surface is 19.0 mg/kg, corresponding to a P application rate of about P_2O_5 63 kg/hm², and equals to the recommended fertilizer rate based on the line relationship model between fertilizer-P application rate and P surplus. **【Conclusions】** As far as the rice yield, soil P surplus and its environmental effect are considered, P_2O_5 63 kg/hm² is suitable for the double rice cropping system in red soils of South China.

Key words: rice; phosphorus; loss; risk

施磷肥是水稻增产和稳产的重要农业措施之一。但由于磷肥的不合理施用,加上稻季降水频繁,土壤磷随地表径流的损失成了水体中磷的重要污染源。曹宁等^[1]指出,辽宁、吉林和黑龙江省由农田进入水体环境的磷负荷 2002 年比上世纪 80 年代分别增加了 3%、229% 和 125%。农田水对沟渠水总磷的增荷率高达 82%^[2]。因此,科学管理农田磷素并防止其向水体的迁移对控制和减少磷的地表流失,减轻农业面源污染具有重要意义。

降低水稻种植期田面水磷含量是控制稻田磷径流流失的关键因子,利用田面水磷浓度与土壤 Olsen-P 含量间的关系,寻求引发田面水磷激增的土壤 Olsen-P 突变点,是当前评价磷素环境效应的有效方法。但受土壤性质、气候、农作管理等多种因素的影响,不同稻作区田面水中磷素的富集状况、流失量以及对水体污染的潜在风险不一。例如,周萍等^[3]在江汉平原稻作区的研究表明,施磷后 7 d 内田面水磷浓度较高,是磷素通过田面水流失的高危险期,常规施肥下田面水的安全排放期为施肥后 24 d; 而施泽升等^[4]在洱海北部稻作区的研究指出,施肥后 2 周内是控制磷损失的关键时期。因此,有必要针对具体稻作区进行土壤磷环境风险研究。目前的研究多侧重于太湖地区^[5-6]、紫色土稻作区^[7]和北方稻作区^[8],但关于南方赤红壤稻作区土壤磷素的径流风险鲜有报道。磷是作物必需的 3 大

营养物质之一,前人关于结合作物产量效应、磷素平衡及环境效应提出一个既能满足作物高产又不污染环境的施磷量阈值的试验较少,且国内的研究多为一年监测试验,多年连续监测试验较少。本研究以南方赤红壤稻作区为研究对象,通过定位试验,连续 3 年监测不同施磷水平下水稻产量、土壤磷素平衡与田面水磷素浓度变化特征,从农学和环境方面揭示磷肥施用与稻田磷素流失风险之间的关系,为科学评估赤红壤区稻田施磷的环境效应及合理施磷、减轻农业面源污染提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

大田试验于 2011~2013 年在广西南宁武鸣县里建英才村(108°3′19″E, 23°14′60″N)进行。该地属亚热带湿润季风气候,是南方赤红壤区典型的水稻产区,平均气温 21.6℃,年降水量 1650 mm,年均日照 1800 h。供试土壤为砂页岩发育的水稻土。试验前稻田土壤 0—20 cm 土层有机质含量 32.2 g/kg, pH (H₂O) 7.25, 全氮 1.5 g/kg, 全磷 1.0 g/kg, 全钾 4.1 g/kg, 碱解氮 128 mg/kg, 速效磷 19.9 mg/kg, 速效钾 132 mg/kg。

1.2 试验设计

试验设置 4 个磷水平: 对照(不施磷肥, P0); 当地磷肥施用量(P1); 2 倍当地磷肥施用量(P2);

4 倍当地磷肥施用量(P3),每处理 3 次重复。不同年份早、晚稻具体施肥量见表 1。小区面积 19.52 m²[4 m(宽) × 4.88 m(长)],共 12 个小区,随机区组排列。各小区间用 33 cm 高的铝塑板隔开,并设独立的排灌口。铝塑板高出田面 13 cm,以防小区间跑水、蹿水、串肥,铝塑板交接处用塑料薄膜密封。

种植方式为双季稻。早稻于每年 3 月 28 ~ 4 月 1 日播种,4 月 21 日移栽,7 月 20 日左右收获;晚稻于 7 月 5 ~ 12 日播种,7 月 30 ~ 8 月 4 日移栽,11 月 4 日左右收获。种植密度 33 × 10⁴ holes/hm²,每穴 2 苗。各处理氮、钾肥用量相同。磷肥(钙镁

磷肥,含 P₂O₅ 18%)作基肥一次性施入,氮肥(尿素,含 N 46%)和钾肥(氯化钾,含 K₂O 60%)分别按基肥:分蘖肥:穗肥比为 3:3:4 和 1:0:1 的比例施用。基肥于水稻移栽前一天撒施后用木耙混入约 5 cm 的表土中,分蘖肥和穗肥均采用撒施方式。水稻秧苗返青期、分蘖期均保持水深 3 ~ 5 cm,在分蘖末期至拔节期排水晒田 5 ~ 7 d,孕穗期、抽穗开花期恢复水深 3 ~ 5 cm,乳熟~成熟期实行间歇灌溉,干干湿湿,收获前 7 d 自然落干。早、晚稻品种 2011 年为泸香 658 和丰两优一号;2012 年为良丰优 339 和 Y 两优 6 号;2013 年为特优 582 和博优 253。

表 1 不同年份双季稻施肥量(kg/hm²)

Table 1 Fertilizer application rates in double rice field in different years

年份 Year	处理 Treatment	早稻 Early rice			晚稻 Late rice		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
2011	P0	172.5	0	121.5	172.5	0	108
	P1	172.5	81	121.5	172.5	63	108
	P2	172.5	162	121.5	172.5	126	108
	P3	172.5	324	121.5	172.5	252	108
2012	P0	169.05	0	121.5	172.5	0	108
	P1	169.05	75.6	121.5	172.5	63	108
	P2	169.05	151.2	121.5	172.5	126	108
	P3	169.05	302.4	121.5	172.5	252	108
2013	P0	151.8	0	121.5	138	0	108
	P1	151.8	81	121.5	138	81	108
	P2	151.8	162	121.5	138	162	108
	P3	151.8	324	121.5	138	324	108

1.3 样品采集与测定方法

分别于基肥及穗肥施用后的第 1、2、3、5、7、9 和 11 d 上午 9:00 ~ 11:00,在田面水保持稳定的情况下,在田埂四周,采用长竹竿插入塑料勺,在不扰动土层的情况下伸入田面水内同一深度处采集田面水样。每小区采集 5 个样点,混匀后取 500 mL 立即用于田面水总磷的测定。于早、晚稻收获期各小区分秸秆和稻谷单独实获计产,同时随机选取植株 6 株,分为秸秆和稻谷,分别称重、烘干,计算水分含量,并将样品粉碎后测定全磷含量。另于 2011 ~ 2012 年早、晚稻收获后采取耕层土壤(0—20 cm),风干过筛,测定有效磷(Olsen-P)含量。

田面水总磷采用过硫酸钾氧化—钼蓝比色法^[9]测定;植株全磷采用 H₂SO₄—H₂O₂ 消煮,钼钒黄比色法^[10]测定;土壤 Olsen-P 测定采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提—钼蓝比色法^[10]测定。

水稻地上部磷素养分累积量和土壤磷素养分表观盈余量根据下式计算:

地上部磷素养分累积量 = 秸秆产量 × 秸秆含磷量 + 稻谷产量 × 稻谷含磷量;

土壤磷素养分表观盈余量 = 施磷量 - 地上部磷素养分累积量。

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2007 与 DPS 7.5 进行处理,Origin 6.0 和 Excel 2007 软件作图,LSD 法进行多重比较,用 split-line 模型预测在该供试土壤上发生径流时的土壤 Olsen-P 临界值。

2 结果与分析

2.1 不同施磷量对水稻的产量效应

表 2 表明,施磷可显著增加稻谷产量,施磷比不施磷处理的 3 年平均稻谷产量早、晚稻分别增加

表 2 不同施磷水平下的水稻产量 (kg/hm^2)

Table 2 Rice yields under different phosphate application rates

部位 Site	处理 Treatment	2011		2012		2013	
		早稻	晚稻	早稻	晚稻	早稻	晚稻
		Early rice	Late rice	Early rice	Late rice	Early rice	Late rice
稻谷 Grain	P0	7270 b	5047 b	5752 b	6270 c	6468 c	5767 c
	P1	8048 a	5510 a	6451 a	6976 b	6654 c	6445 b
	P2	8272 a	5552 a	6539 a	7292 ab	7268 b	6824 ab
稻秆 Straw	P0	8371 a	5588 a	6831 a	7698 a	7939 a	7296 a
	P1	7370 c	5769 b	7477 b	8765 c	7986 c	7701 c
	P2	7750 b	6070 ab	8277 a	9605 b	8061 c	8566 b
	P3	7948 b	6145 ab	8472 a	10051 b	9163 b	9044 ab
	P3	8326 a	6169 a	8885 a	10784 a	10133 a	9206 a

注 (Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

8.5%~18.7% 和 10.8%~20.5%。随施磷量的增加,稻谷产量有增加的趋势,但 P1 和 P2 处理的差异不显著,并且在第 3 年二者显著低于 P3 处理。稻秆产量表现出与稻谷相似的规律。

2.2 不同施磷量对土壤磷素累积平衡的影响

从表 3 可以看出,施磷显著增加了水稻地上部的磷素累积量,施磷处理早、晚稻地上部磷素 3 年平均累积量比不施磷分别增加 16.4%~32.9% 和 12.4%~29.6%。随施磷量的增加,地上部磷素有增加趋势,且 P1 处理显著低于 P3 处理。但是,施磷

条件下早、晚稻土壤每年均有不同程度的磷素盈余,且土壤表观磷素盈余量均表现为随施磷量的增加而显著增加。两者呈极显著线性正相关(表 4)。按该方程拟合计算,3 年平均土壤磷素持平的早、晚稻施磷量分别为 P_2O_5 60 和 63 kg/hm^2 。

土壤 Olsen-P 含量也表现出随施磷量的增加而提高的趋势(表 5),两者呈显著线性关系(图 1)。P0 和 P1 处理的土壤 Olsen-P 含量差异不显著,P2 处理在 2012 年晚稻显著高于 P0 和 P1 处理,P3 处理在每造水稻收获后,土壤 Olsen-P 含量均显著高于

表 3 不同施磷量下的土壤磷素平衡 (kg/hm^2)

Table 3 Soil P balance under different phosphate application rates

稻季 Rice season	处理 Treatment	2011		2012		2013	
		地上部磷累积量	土壤表观 磷盈余量	地上部磷累积量	土壤表观 磷盈余量	地上部磷累积量	土壤表观 磷盈余量
		Aboveground P accumulation	P surplus	Aboveground P accumulation	P surplus	Aboveground P accumulation	P surplus
早稻 Early rice	P0	51.2 c	-51.2 d	51.8 c	-51.8 d	60.1 c	-60.1 d
	P1	59.2 b	21.8 c	60.3 b	15.3 c	70.4 b	10.6 c
	P2	63.9 ab	98.1 b	63.6 ab	87.6 b	72.6 b	89.4 b
晚稻 Late rice	P3	67.0 a	257.0 a	68.1 a	234.3 a	81.7 a	242.3 a
	P0	45.6 c	-45.6 d	55.8 d	-55.8 d	71.3 c	-71.3 d
	P1	50.1 b	12.9 c	62.6 c	0.4 c	81.4 b	-0.4 c
	P2	52.3 ab	73.7 b	69.1 b	56.9 b	82.7 b	79.3 b
	P3	53.0 a	199.0 a	78.7 a	173.3 a	92.1 a	231.9 a

注 (Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

表 4 土壤表观磷盈余量与施磷量的关系

Table 4 Relationship between P surplus and phosphate application rate

年份 Year	早稻 Early rice			晚稻 Late rice		
	线性方程 Linear equation	R^2	土壤磷持平时施磷量 P application rates under soil P balance	线性方程 Linear equation	R^2	土壤磷持平时施磷量 P application rates under soil P balance
2011	$y = 0.953x - 53.77$	0.999	56.4	$y = 0.973x - 47.30$	0.999	48.6
2012	$y = 0.949x - 54.32$	0.999	57.2	$y = 0.909x - 56.58$	0.999	62.2
2013	$y = 0.938x - 62.40$	0.999	66.5	$y = 0.940x - 73.48$	0.999	78.2

表 5 不同施磷量下稻田土壤 Olsen-P 含量 (mg/kg)

Table 5 Soil Olsen-P concentrations under different phosphate application rates

处理 Treatment	种植前 Before plantation	2011		2012		平均 Average
		早稻 Early rice	晚稻 Late rice	早稻 Early rice	晚稻 Late rice	
P0		18.6 b	19.3 b	17.7 b	13.1 c	17.1
P1	19.9	19.5 b	18.9 b	20.3 b	15.4 c	18.6
P2		20.4 b	22.8 b	20.3 b	21.2 b	21.2
P3		24.9 a	31.4 a	27.7 a	29.9 a	28.5

注 (Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

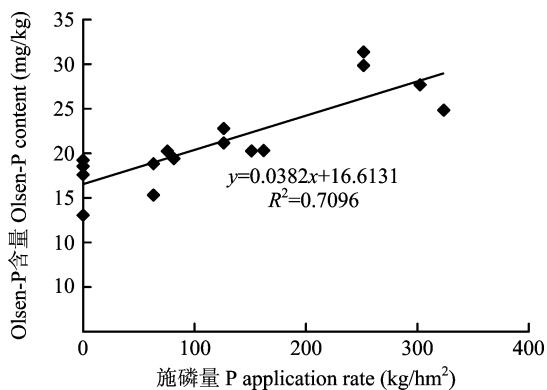


图 1 施磷量与土壤 Olsen-P 含量的关系

Fig. 1 Relationship between phosphate application rate and soil Olsen-P concentration

其它处理。随着植稻次数的增加, P0 和 P1 处理, 土壤 Olsen-P 含量有波动下降的趋势, 2 年平均分别较试验前下降了 13.9% 和 6.7%, 而 P2 和 P3 处理均呈波动上升趋势, 2 年平均分别较试验前增加 6.4% 和 43.1%。

2.3 不同施磷量对稻田田面水总磷的影响

稻田田面水总磷的动态变化(图 2)显示, 施肥后 3 d 内田面水总磷波动较大, 在 2011~2012 年早稻穗肥期和晚稻基肥期, 田面水总磷均在施肥后 2

~3 d 达到最大值, 而其它施肥期及 2013 年稻季田面水总磷均在施肥后第 1 d 达到最大值, 峰值过后各处理田面水总磷浓度均急速下降, 5 d 后趋于稳定。施肥后 5 d 内 P0、P1、P2、P3 处理田面水总磷浓度 3 年平均早稻基肥期分别为 0.222、0.511、0.767 和 1.174 mg/L, 穗肥期为 0.144、0.240、0.354 和 0.702 mg/L; 晚稻基肥期为 0.486、0.727、0.927 和 1.540 mg/L; 穗肥期为 0.184、0.268、0.617 和 1.023 mg/L。此时间段施磷处理田面水总磷浓度均高于国家环境保护总局规定的农业用水区直接进入湖、库的地表水质总磷浓度的临界值 0.2 mg/L^[11]。不施磷肥的 P0 处理在基肥施用 3~5 d 后或穗肥施用 1~3 d 后田面水总磷即可降至 0.2 mg/L。P1 处理在穗肥施用 3 d 后, 田面水总磷才能降至这一水平, 而高磷处理, 尤其是 P3 处理除了 2012 年早稻的穗肥期, 在监测时间段田面水总磷均高于这一水平。可见, 不施磷肥处理在施肥后 3 d 内可能有较高的磷流失风险。而施磷处理, 尤其高量施磷使得田面水总磷浓度增加, 磷通过径流损失的风险增大, 风险期延长。在动态监测的各时间点, P1 处理在 2011~2012 年稻季施肥前后 2 d 内田面水总磷浓度显著高于 P0 处理, 其他时间点无

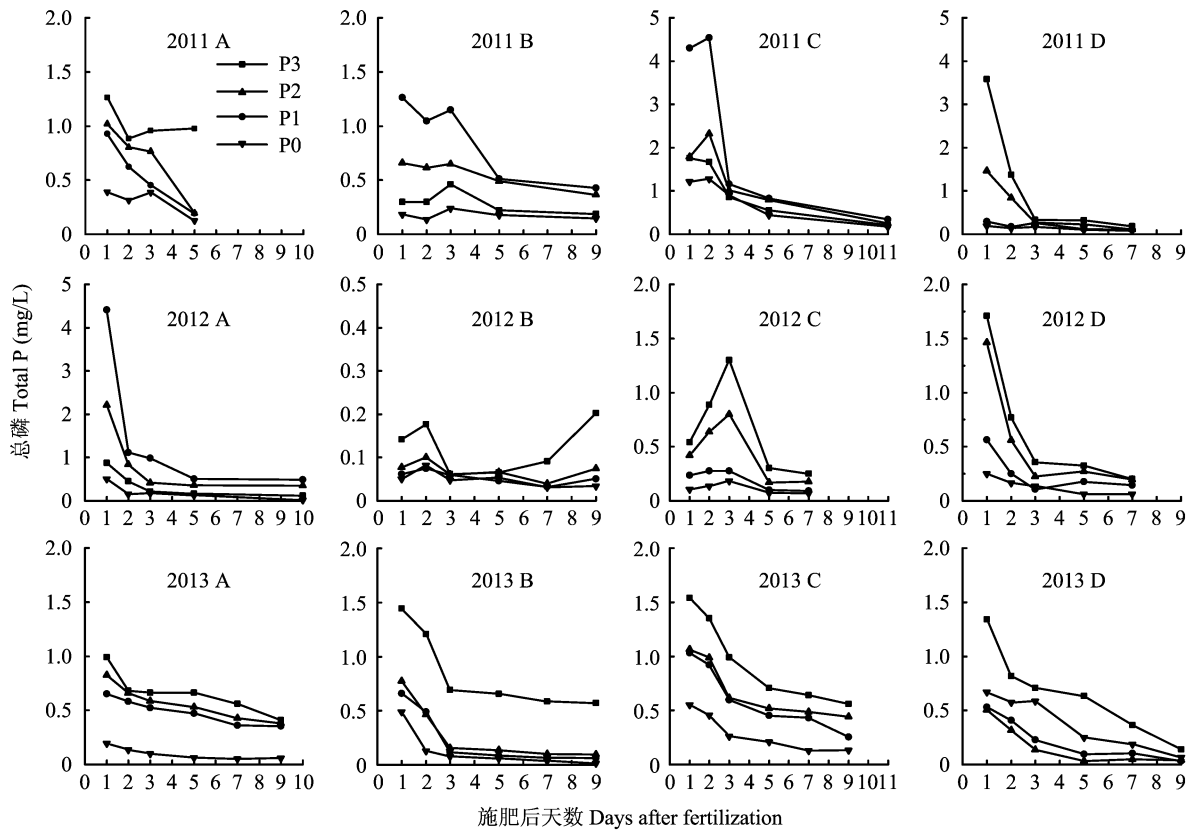


图2 稻田田面水总磷含量的动态变化

Fig. 2 Dynamic change of total P concentration in surface water of paddy fields

[注 (Note): A—早稻基肥期 Basal period of early cropping rice; B—早稻穗肥期 Booting period of early cropping rice;
C—晚稻基肥期 Basal period of late cropping rice; D—晚稻穗肥期 Booting period of late cropping rice.]

显著差异。P3 处理在各时间点均显著高于 P0 和 P1 处理。除了 2011 年早稻穗肥期以外,穗肥追施后田面水总磷均显著增加,增幅为 7.6% ~ 953.0%。说明追肥可加大田面水磷的径流损失风险。

2.4 土壤 Olsen-P 与田面水总磷浓度的关系

以 2011 ~ 2012 年每造水稻收获后小区耕层土壤 Olsen-P 含量为横坐标,以水稻生长期小区所有监测时间点的田面水总磷浓度的平均值为纵坐标作图(图 3),采用分段回归模型(Split-line model)对稻田表层土壤 Olsen-P 含量与田面水总磷浓度之间的相关关系进行分段回归拟合。拟合方程如下:

$$C_{TP} = -0.2643 + 0.0318C_{Olsen-P} \\ (n = 15, r = 0.4345, P = 0.1056);$$

$$C_{TP} = -1.2638 + 0.0843C_{Olsen-P} \\ (n = 32, r = 0.8217, P < 0.0001)。$$

此分段模型的拐点处 Olsen-P 含量为 19.0 mg/kg,即当耕层土壤 Olsen-P 低于该含量范围值

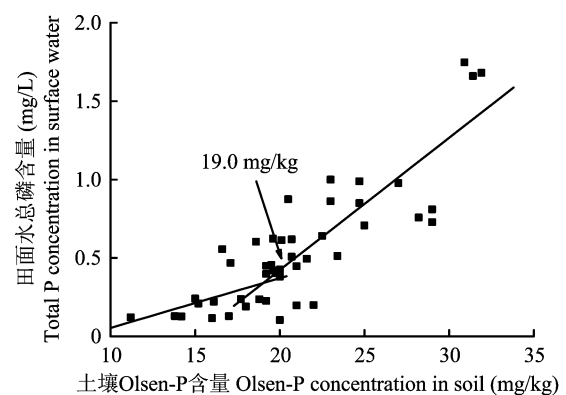


图3 耕层土壤 Olsen-P 含量与田面水总磷浓度的关系
Fig. 3 Relationship between Olsen-P concentration in surface soil of paddy fields and total P in surface water

时,田面水总磷浓度随土壤 Olsen-P 含量的增加而增大不明显;而当土壤 Olsen-P 浓度大于该范围值时,田面水总磷浓度会在短期内迅速升高。根据图 1,由施磷量与土壤 Olsen-P 的关系计算出该拐点处 Olsen-P 含量对应的施磷量为 P_2O_5 62.9 kg/hm²。

3 讨论

前人研究表明,土壤 Olsen-P 含量只要达到 5~7 mg/kg,即可满足水稻高产要求^[12]。在南方土壤上,当 Olsen-P 含量大于 10 mg/kg 时,施磷对水稻生长无影响^[10]。与上述结果不一致,本试验结果表明,即使基础土样 Olsen-P 含量为 19.9 mg/kg,施磷仍可显著提高水稻稻谷和稻秆产量。这是由于酸性赤红壤中富含的高量 Fe、Mn 等对磷的强烈固定作用,使得水稻可利用有效性磷含量降低^[13]。当施磷量由 P1 处理增至 P2 处理时,稻谷产量无显著增加,继续增至 P3 时,前 3 造水稻稻谷产量也并无显著增加。从土壤磷素平衡和土壤 Olsen-P 含量来看,当施磷量超过 P_2O_5 126 kg/hm² 时,土壤磷素表观盈余量及 Olsen-P 含量显著增加,而连续 2 年不施磷肥,土壤 Olsen-P 含量由 18.6 减至 13.1 mg/kg。连续施用 P_2O_5 63~81 kg/hm²,土壤 Olsen-P 呈波动下降趋势,2 年内下降了 6%。因此,在南方赤红壤区双季稻体系下,考虑产量和维持土壤磷素表观平衡的要求,每造水稻施 P_2O_5 60 kg/hm² 左右的磷肥是必需的。

本试验结果(图 2)表明,施磷导致稻田田面水总磷浓度显著增加,且表现为施磷量越高,田面水总磷浓度越高。说明施磷存在潜在的环境风险,且施磷量越大,风险越高。用 Split-line 模型拟合得到本试验区土壤环境条件下,指示稻田磷素径流风险的土壤 Olsen-P 突变点浓度为 19.0 mg/kg(图 3)。这与颜晓等^[6]、周全来等^[8]在太湖地区和北方地区稻田得出土壤 Olsen-P 突变点为 24.8 mg/kg 和 82.7 mg/kg 有一定差异。结合不施磷肥处理,在水稻施入基肥和穗肥后 1~3 d 内田面水也有较高的总磷浓度,推测这可能与土壤的扰动有关。由于土壤含磷量高,水稻移栽前,耕翻、耙田、追肥扰动等农艺管理一方面将下层相对还原性强的土壤翻至表层与田面水接触,促进土壤磷素的溶解与释放^[14];另一方面,耙田过程导致田面水中 <0.1 mm 粒径的土壤悬浮颗粒增加^[15]。再者,施氮刺激土壤中磷素的释放^[16]。由于随施磷量的增加,土壤 Olsen-P 含量增加(表 5),因此,在扰动条件下容易导致土壤颗粒磷含量增加,进而迅速增加田面水总磷。

Wang 等^[17]和谢学俭等^[18]指出,稻田磷流失主要是田面水中磷随降雨溢出水田或人工排水而损失。在本试验条件下,人工排水仅发生在分蘖

末期和拔节期,因而施肥后由排水而引起的稻田磷流失风险较小。相反,广西雨季集中于夏季,且近 45 a 年,广西春播期降水全区性增加,其中南部沿海降水明显增加^[19],因此,在不施磷肥的情况下,扰动施肥后稻田磷素主要存在随降雨溢出而流失的风险,尤其在施肥后第 1 d,田面水总磷浓度在国家环境保护总局规定的农业用水区允许直接进入湖、库的地表水总磷浓度临界值(0.2 mg/L)之上。因此,应避免雨天施肥以防止田面水中的磷以农田径流方式进入水体。

颜晓等^[6]在太湖地区乌栅土的长期定位试验结果表明,长期施磷 P_2O_5 137.5 kg/hm² 导致土壤 Olsen-P 含量(26.9 mg/kg)显著高于稻田磷素径流的土壤耕层 Olsen-P 临界值浓度(24.8 mg/kg),引发磷素径流风险。与其结果相似,在本试验条件下,高于 P_2O_5 126 kg/hm² 的施磷量,土壤 Olsen-P 含量高于稻田磷素径流风险的土壤 Olsen-P 突变点浓度,且田面水总磷浓度增加,而施 P_2O_5 63~81 kg/hm²,土壤 Olsen-P 无显著差异,田面水总磷浓度仅在施磷肥后 2 d 内显著提高,其它时间段与 P0 处理无显著差异。由此可见,施磷量为 P_2O_5 63~81 kg/hm² 时土壤磷流失的风险相对较低。

综上所述,考虑到磷素在土壤中过量累积而引发的环境风险、水稻产量效应以及土壤磷素表观收支平衡,在赤红壤地区双季稻体系下,以施磷量 P_2O_5 63 kg/hm² 为宜。

参考文献:

- [1] 曹宁,曲东,陈新平,等. 东北地区农田土壤氮、磷平衡及其对面源污染的贡献分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(7): 127-133.
Cao N, Qu D, Chen X P, et al. Analysis of the contribution to non-point pollution made by balanced fertilizer in North east China [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2006, 34(7): 127-133.
- [2] 汤秋香,任天志,雷宝坤,等. 洱海北部地区不同轮作农田氮、磷流失特征研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 608-615.
Tang Q X, Ren T Z, Lei B K, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus loss in various crop rotation systems in northern watershed of Erhai Lake [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(3): 608-615.
- [3] 周萍,范先鹏,何丙辉,等. 江汉平原地区潮土水稻田面水磷素流失风险研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(4): 47-50, 116.
Zhou P, Fan X P, He B H, et al. Research on loss risk of phosphorus in surface water of paddy soil in Jiangnan Plain region

- [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(4): 47-50, 116.
- [4] 施泽升, 续勇波, 雷宝坤, 等. 洱海北部地区不同氮、磷处理对稻田田面水氮磷动态变化的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(4): 838-846.
- Shi Z S, Xu Y B, Lei B K, *et al.* Dynamic changes of nitrogen and phosphorus concentrations in surface waters of paddy soils in the northern area of Erhai Lake [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(4): 838-846.
- [5] 赵建宁, 沈其荣, 冉炜. 太湖地区侧渗水稻土连续施磷处理下稻田磷的径流损失[J]. *农村生态环境*, 2005, 21(3): 29-33.
- Zhao J N, Shen Q R, Ran W. Phosphorus loss with runoff from a side bleaching paddy soil under continual P application in Taihu Lake region [J]. *Rural Eco-Environment*, 2005, 21(3): 29-33.
- [6] 颜晓, 王德建, 张刚, 等. 长期施磷稻田土壤磷素累积及其潜在环境风险[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(4): 393-400.
- Yan X, Wang D J, Zhang G, *et al.* Soil phosphorous accumulation in long-term P fertilization paddy field and its environmental effects [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(4): 393-400.
- [7] 李学平, 石孝均. 紫色水稻土磷素动态特征及其环境影响研究[J]. *环境科学*, 2008, 29(2): 434-439.
- Li X P, Shi X J. Dynamic characteristics of phosphorus in purple paddy soil and its environmental impact [J]. *Environmental Science*, 2008, 29(2): 434-439.
- [8] 周全来, 赵牧秋, 鲁彩艳, 等. 施磷对稻田土壤及田面水磷浓度影响的模拟[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(10): 1845-1848.
- Zhou Q L, Zhao M Q, Lu C Y, *et al.* Effects of P application on P concentrations in paddy soil and its surface water: A simulation test [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(10): 1845-1848.
- [9] 国家环保局. 中华人民共和国国家标准 GB11893-89 水质总磷的测定-钼酸铵分光光度法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
- SEPA. National standards of Peoples Republic of China GB11893-89 water quality determination of total phosphorous - Ammonium molybdate spectrophotometric method[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 1989.
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- Lu R K. The analysis methods of soils and their agrochemistries [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [11] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. GB3838-2002 地表水环境质量标准[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- SEPA, AQSIQ. GB3838 - 2002 environmental quality standards for surface water[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [12] 鲁如坤. 土壤磷素水平和水体环境保护[J]. *磷肥与复肥*, 2003, 18(1): 4-8.
- Lu R K. The phosphorus level of soil and environmental protection of water body [J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2003, 18(1): 4-8.
- [13] 廖宗文, 林东教, 王建林. 红壤的磷肥有效性差异及其土壤化学特点的初步研究[J]. *华南农业大学学报*, 1996, 17(1): 67-71.
- Liao Z W, Lin D J, Wang J L. A preliminary study on the difference of P fertilizer availability in red earths and relative characteristics of soil chemistry [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 1996, 17(1): 67-71.
- [14] 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.
- Zhang Z J, Wang K, Zhu Y M, *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.
- [15] He Z L, Wilson M J, Campbell C O, *et al.* Distribution of phosphorus in soil aggregate fractions and its significance with regard to phosphorus transport in agricultural runoff [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 1995, 83(1-2): 69-84.
- [16] 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 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.
- [17] Wang K, Zhang Z J, Zhu Y M, *et al.* Surface water phosphorus dynamics in rice fields receiving fertilizer and manure phosphorus[J]. *Chemosphere*, 2001, 42: 209-214.
- [18] 谢学俭, 冉炜, 沈其荣. 淹水条件下水稻田中磷的淋溶研究[J]. *土壤*, 2003, 35(6): 506-509.
- Xie X J, Ran W, Shen Q R. P loss through vertical leaching from paddy field under submerged conditions[J]. *Soils*, 2003, 35(6): 506-509.
- [19] 黄嘉宏, 李江南, 李自安, 等. 近45a广西降水和气温的气候特征[J]. *热带地理*, 2006, 26(1): 23-28.
- Huang J H, Li J N, Li Z A, *et al.* Climatic characteristics of precipitation and temperature in the past 45 years in Guangxi [J]. *Tropical Geography*, 2006, 26(1): 23-28.