

朱 坚, 纪雄辉, 田发祥, 等. 典型双季稻田施磷流失风险及阈值研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(7): 1425–1433.

ZHU Jian, JI Xiong-hui, TIAN Fa-xiang, et al. Research on P loss risk and threshold value in typical double-cropping rice field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(7): 1425–1433.

典型双季稻田施磷流失风险及阈值研究

朱 坚^{1,2}, 纪雄辉^{2*}, 田发祥², 吴家梅², 刘昭兵², 彭 华^{1,2}, 柳赛花², 官 迪²,
谢运河²

(1.中南大学研究生院隆平分院, 长沙 410125; 2.湖南省农业科学院/农业部长江中游平原农业环境重点实验室/农田土壤重金属污染防控与修复湖南省重点实验室, 长沙 410125)

摘 要:通过3年(2011—2013年)的双季稻田小区试验,探明了不同施磷量对双季稻产量、土壤磷素积累、磷素流失风险的影响,并确定了土壤收支平衡的施磷阈值。研究结果表明:连续3年不同施磷量处理水稻早、晚季产量为5474~5552 kg·hm⁻²和7096~7521 kg·hm⁻²,过量施用磷肥对水稻产量无显著增产效果,反而有减产的风险。施用磷肥后,土壤 Olsen-P 含量显著提高。田面水 TP 平均浓度与土壤中 Olsen-P 呈显著正相关关系;施磷后田面水磷素动态能用指数模型($Y=C_0 \cdot e^{kt}$, $k>0$)拟合,即随着磷肥施用量增加,田面水磷素流失风险增加。结合水稻产量效应、土壤磷素表观平衡和磷素环境风险,推荐研究区域早、晚稻施磷阈值分别为(48.53±7.07) kg P₂O₅·hm⁻²和(56.87±7.90) kg P₂O₅·hm⁻²。

关键词:磷素;流失;阈值;双季稻

中图分类号:X592 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)07-1425-09 doi:10.11654/jaes.2017-0314

Research on P loss risk and threshold value in typical double-cropping rice field

ZHU Jian^{1,2}, JI Xiong-hui^{2*}, TIAN Fa-xiang², WU Jia-mei², LIU Zhao-bing², PENG Hua^{1,2}, LIU Sai-hua², GUAN Di², XIE Yun-he²

(1. Longping Branch of Graduate School of Central South University, Changsha 410125, China; 2. Hunan Academy of Agriculture Sciences/Ministry of Agriculture Key Laboratory of Agriculture Environment in Middle Reach Plain of Yangtze River/Key Lab of Prevention, Control and Remediation of Soil Heavy Metal Pollution in Hunan Province, Changsha 410125, China)

Abstract: Effects of different rates of phosphorus (P) application on the grain yield, soil P accumulation, and risk of P loss through surface runoff were studied in double-cropping rice fields to determine the threshold values of the optimal P fertilizer application rates, using the field plot experiments during 2011—2013. The results showed that average yields of the early and late rice were 5474~5552 kg·hm⁻² and 7096~7521 kg·hm⁻² during the 3-year observation period, respectively, and excessive P fertilizer application did not significantly increase the rice yields, but in fact increased the risk of yield reduction. P fertilizer application significantly increased soil Olsen-P contents. The average total-P (TP) concentrations in the surface water of rice fields showed a significantly linear relationship with the soil Olsen-P contents. The dynamics of P concentrations could be simulated using the exponential model ($Y=C_0 \cdot e^{kt}$, $k>0$), suggesting that the risk of P loss through surface runoff would elevate with the increasing P fertilizer application rates. Considering the effects of P fertilizer application on rice yields, soil P surplus, and environmental risk of P loss, the recommended threshold for the optimal P fertilizer application rates were estimated to be (48.53±7.07) kg P₂O₅·hm⁻² and (56.87±7.90) kg P₂O₅·hm⁻² for the early and late rice, respectively, in southern China.

Keywords: phosphorus; loss; threshold; double-cropping rice

收稿日期:2017-03-12

作者简介:朱 坚(1986—),男,博士研究生,研究方向为农业生态环境。E-mail:zhujian313@sina.com

*通信作者:纪雄辉 E-mail:1546861600@qq.com

基金项目:湖南省重点研发计划项目(2016JC2028)

Project supported: The Key Research and Development Projects Hunan Province, China(2016JC2028)

近年来,在过分追求稻田产量的过程中,磷肥施用量已远远超过作物的实际需磷量。不少地区农田土壤中磷素大量累积,土壤有效磷库达到较高水平,农田土壤有效磷接近或超过作物需要的临界水平。作物对磷肥的利用率很低,通常情况下当季作物只利用5%~15%,加上后效一般也不超过25%,约75%~90%的施入磷滞留在土壤中^[1]。磷肥利用率下降不仅造成磷肥资源的浪费,增加农业生产成本,也增加了农田磷素随地表径流或淋溶向水体迁移的风险,导致水体富营养化^[2-3]。

水体富营养化是近年我国主要湖泊相继大规模暴发蓝藻的根本原因。其中,磷是引起水体富营养化的主要元素之一,是水体富营养化的最小限制因子,也是浮游植物生长繁殖速率的限制因子^[4]。据报道,欧洲自然水体中的磷素有35%~70%来源于农业面源污染^[5-6],太湖流域农田面源磷对水体磷的贡献率高达19%^[7]。因此,合理施用磷肥,减少农业面源污染显得尤为重要。

近年来,不少研究试图通过相关数学模型计算施磷阈值,进而确定农田磷肥使用量,具体包括计算农田土壤磷素的淋溶阈值^[8-9]、径流损失阈值^[10]和泥沙侵蚀流失阈值^[11]等。Hesketh等^[12]提出了土壤磷素淋溶发生“阈值”(Change-Point)的概念,具体做法是用土壤Olsen-P含量与CaCl₂-P含量分别为横轴和纵轴作相关曲线,曲线上的拐点相对应的Olsen-P值,即为阈值。但有研究表明,土壤Olsen-P含量与CaCl₂-P含量之间并没有出现相应拐点^[13-14]。还有一些学者希望用土壤Olsen-P含量与田面水磷素含量的关系来找到该拐点^[15-16]。前人的研究大多围绕土壤、田面水磷流失风险来探讨农田施磷阈值,然而基于粮食安全与环境安全双重效应来研究双季稻田磷肥阈值的报道较少。本文通过田间磷肥定位试验,研究施用磷肥对双季稻产量、土壤Olsen-P积累量、田面水磷素浓度动态以及土壤收支平衡等的影响,旨在探明稻田磷动态及流失风险,确定稻田磷肥施用阈值,为稻田磷肥合理施用技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤及试验区概况

试验在南方典型双季稻田内进行,共实施3年(2011—2013年)。试验田位于湖南省长沙县干杉乡干杉社区下大屋组(28°08′18″N,113°12′0″E),区内年平均降水量为1400 mm,主要集中在春季和夏季,

年平均温度为16.8℃,最高和最低月平均温度分别为28.9℃(7月)和4.7℃(1月)。试验田土壤为第四纪红色粘土发育的红黄泥。试验前,土壤的基本理化性质:有机质37.67 g·kg⁻¹、pH值(水土比2.5:1)为5.88、总氮(TN)1.92 g·kg⁻¹、总磷(TP)0.64 g·kg⁻¹、铵态氮(NH₄⁺-N)17.13 g·kg⁻¹、硝态氮(NO₃⁻-N)0.33 g·kg⁻¹、有效磷(Olsen-P)12.63 mg·kg⁻¹、有效钾154.70 g·kg⁻¹,肥力处于中等水平。

1.2 试验设计

试验采用6.0 m×5.0 m小区进行,设4个处理,3次重复,共计12个小区,随机区组排列,四周设保护行,小区间起垄隔开。试验处理:P0(不施磷)、P1(早稻:75 kg P₂O₅·hm⁻²、晚稻:45 kg P₂O₅·hm⁻²)、P2(早稻:150 kg P₂O₅·hm⁻²、晚稻:90 kg P₂O₅·hm⁻²)、P3(早稻:300 kg P₂O₅·hm⁻²、晚稻:180 kg P₂O₅·hm⁻²)。各处理氮肥和钾肥施用量一致,早、晚稻分别施150 kg N·hm⁻²、90 kg K₂O·hm⁻²和180 kg N·hm⁻²、135 kg K₂O·hm⁻²。其中磷、钾肥分别为过磷酸钙和氯化钾,做基肥1次施入;氮肥做2次施入,基肥(70% N)为碳酸氢铵,与表土层混施追肥(30% N)为尿素,施基肥后第9 d施入,施用方法为表面撒施。

1.3 取样及分析方法

基肥施磷后,连续10 d隔天取田面水样1次,每季共计取样5次,取样时间在9:00—11:00。田面水采集方法:站在田埂四周,用长竹竿绑定采样塑料杯,不扰动土层,多点混合采集约250 mL田面水装于塑料瓶中,-4℃以下冷冻保存。分析TP、可溶性总磷(TDP)。TP用过硫酸钾消煮(120℃,200 kPa,40 min)钼蓝比色法测定(GB 11893—1989);TDP经0.45 μm滤膜、过硫酸钾消化后钼蓝比色法测定。小区稻谷与秸秆采用单打实收分别记重。水稻地上部磷素养分累积量和土壤磷素表观盈余量根据下式^[1]计算:

作物地上部磷累积量=秸秆产量×秸秆含磷量+稻谷产量×稻谷含磷量

土壤磷素表观盈余量=施磷量-作物地上部磷累积量

1.4 数据处理

采用Excel 2007和SPSS 17.0软件进行数据处理,采用Origin 6.0和Excel 2007软件作图,应用LSD法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同施磷量对双季稻产量的影响

不同施磷处理稻田产量情况见表 1。从 3 年的平均产量来分析,连续 3 年监测不同施磷量的水稻早、晚季平均产量分别为 5474~5552 kg·hm⁻² 和 7096~7521 kg·hm⁻²,不同处理间平均产量差异不显著,表明区域土壤 Olsen-P 含量较高,基本能够满足水稻的生长需求,短期内不施磷肥或大量施磷对水稻产量没有显著影响。对比不同年际间的产量发现,2011、2012 年水稻产量与施磷量的关系不显著,试验进行到第 3 年时,不同处理间水稻产量呈现出显著差异。其中 3 年连续不施磷处理(P0)的水稻产量呈现减产趋势,早、晚稻季较施磷处理(P1、P2、P3)减产幅度达 1.4%~2.9%和 2.5%~5.1%。2013 年早稻季 P2 处理产量最高,与 P3 处理差异不显著,显著高于 P1 处理;晚稻季同样是 P2 处理最高,但不同施磷处理间产量差异不显著。

2.2 不同施磷量对稻田耕层土壤 Olsen-P 的影响

连续 3 年 6 季的磷肥用量试验显示,不同磷肥施用量耕层土壤 Olsen-P 表现出不同程度的增加(表 2)。P0 处理土壤 Olsen-P 含量呈现逐年下降的趋势,从初始的 12.63 mg·kg⁻¹ 降至 8.44 mg·kg⁻¹,降低率达 33.2%($P<0.05$)。本研究结果还表明,随施磷年限的增加,土壤 Olsen-P 的含量逐渐增加,施磷量与土壤 Olsen-P 含量呈显著线性相关($R^2=0.983$, $P<0.05$),且土壤 Olsen-P 累积速率与磷肥施用量显著正相关。2013 年晚稻季,P1、P2、P3 处理土壤 Olsen-P 含量较

初始值分别增加 56.1%、187.7%和 502.1%,P3 处理土壤 Olsen-P 累积速率分别为 P1 处理和 P2 处理的 3.86 倍和 2.09 倍。不同施磷处理间,耕层土壤 Olsen-P 含量达到显著水平($P<0.05$)。

2.3 不同施磷处理的田面水磷素动态变化及流失风险

2.3.1 田面水 TP 与 TDP

连续 3 年 6 季不同施磷处理的田面水 TP 动态变化如图 1 所示。施磷后,各处理田面水 TP 动态规律基本一致。施肥后第 1 d,田面水 TP 浓度即达到峰值,之后急剧降低并保持在较低的水平。田面水 TP 浓度大小顺序为 P3>P2>P1>P0,表明随着施磷量的增加,田面水 TP 浓度相应升高。

不同施磷量处理间,P0 处理田面水 TP 峰值维持在较低的水平(0.38~0.83 mg·L⁻¹)。早稻季由于施磷量大,田面水 TP 浓度峰值相应较晚稻高,以 P3 处理为例,早稻季 TP 浓度峰值为 21.19~37.62 mg·L⁻¹,晚稻季为 12.24~16.97 mg·L⁻¹。不同年际间,田面水 TP 浓度峰值存在一定差异,原因主要是年际间不同的气候和水层深度影响了磷肥的水解和土壤对磷素的固定。磷肥施用 7 d 左右,所有处理水样 TP 浓度趋于稳定并接近最低值,这与前人的研究结果^[17-18]相似。在动态监测过程中,施磷量越高的处理田面水 TP 含量降至较低值所需的时间越长,P3 处理在施磷后第 5 d 还保持较高的浓度。田面水 TP 浓度越高,磷的径流损失风险越大,风险期也越长^[19]。通过监测还发现,施磷后,田

表 1 2011—2013 年不同处理双季稻产量(kg·hm⁻²)

Table 1 Effect of phosphate fertilizer supply on cropping yield during 2011—2013(kg·hm⁻²)

处理	2011 年		2012 年		2013 年		3 年平均	
	早稻	晚稻	早稻	晚稻	早稻	晚稻	早稻	晚稻
P0	6652a	6336b	5020a	8133a	4920b	6818b	5531±973a	7096±931a
P1	6562a	7187a	4989a	8331a	4989b	7047ab	5513±908a	7521±705a
P2	6284a	6284b	5069a	8231a	5069a	7184a	5474±702a	7233±974a
P3	6651a	6027b	5002a	8462a	5002a	6991ab	5552±952a	7160±1227a

注:同列不同字母表示差异显著($P<0.05$),下同。

Note: Values within a column followed by different letters are significantly different at $P<0.05$. The same below.

表 2 施磷对稻田耕层土壤 Olsen-P 的影响(mg·kg⁻¹)

Table 2 Effect of phosphate fertilizer supply on Olsen-P in rice soil(mg·kg⁻¹)

处理	初始值	2011 早稻	2011 晚稻	2012 早稻	2012 晚稻	2013 早稻	2013 晚稻
P0	12.63	8.77±0.55a	10.50±1.01c	10.53±1.66c	10.27±1.29c	10.13±1.17c	8.44±0.27d
P1		8.73±1.65a	11.47±1.03bc	12.37±2.74bc	16.19±3.32bc	19.87±2.57c	19.71±2.98c
P2		12.47±5.81a	16.20±2.65b	23.00±2.50b	22.03±7.04b	41.00±3.27b	36.34±2.67b
P3		10.73±1.08a	21.90±3.36a	41.27±12.60a	47.32±5.98a	86.80±10.19a	76.05±7.51a

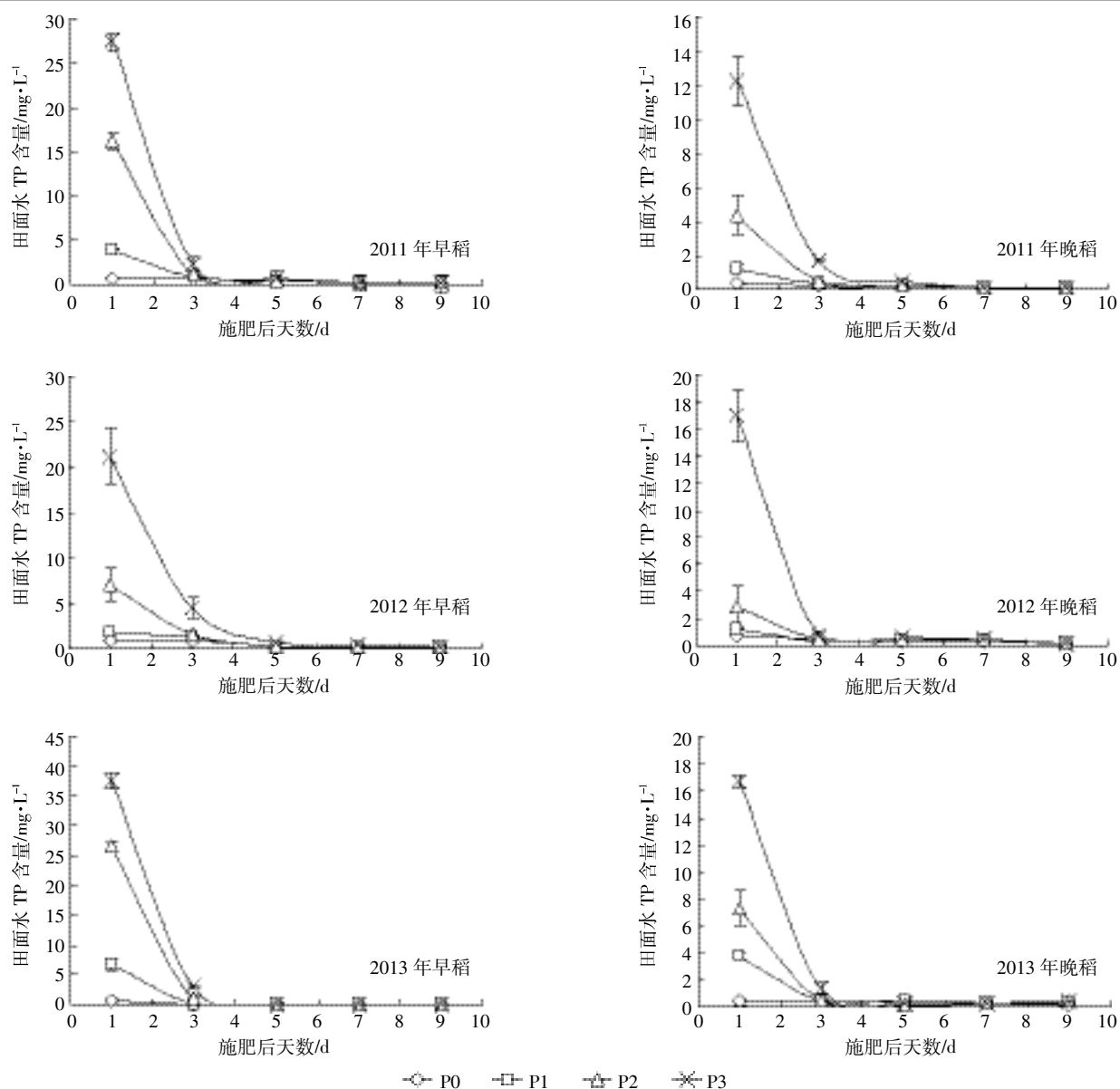


图1 2011—2013年不同施磷处理田面水TP动态

Figure 1 Dynamics of TP in surface water in different phosphorus treatment during 2011—2013

面水中TP浓度全部超过引起周边水体富营养化的临界值($0.01\sim 0.02\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),一旦发生降雨径流事件就会加剧磷素流失风险,诱发周边水体富营养化。

田面水TDP的动态变化与TP的趋势基本一致(图2)。于施肥后第1d田面水TDP达到峰值,P0、P1、P2、P3处理早稻TDP平均浓度分别为 0.44 、 2.85 、 8.96 和 $22.77\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;晚稻季分别为 0.27 、 1.01 、 3.15 和 $9.65\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,之后逐日降低直至稳定。对比图1和图2可以发现,磷肥施入稻田后,大部分磷素在短期内以可溶解态存在于田面水中。稻田施磷后,早、晚稻季TDP占TP的比例分别达 $54.1\%\sim 79.3\%$ 和 $48.3\%\sim$

65.0% ,为防控稻田磷素流失,应尽量避免在施肥后一周内进行排水。

2.3.2 田面水磷素动态模拟及流失风险评估

分析田面水磷素动态随时间的关系发现,田面水中各形态磷素的浓度与施肥时间呈极显著指数相关,用指数降低模型($Y=C_0\cdot e^{-kt}$, $k>0$)可以较好地预测田面水中TP和TDP的浓度变化(表3)。参照模型,以地表V类水质为标准($TP\leq 0.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),田面水TP浓度下降到该标准时,P1、P2、P3处理下早稻季田面水安全排放时间分别为第4、7、11d,晚稻季安全排放时间分别为第3、4、10d;若以TDP浓度 $0.02\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (水体

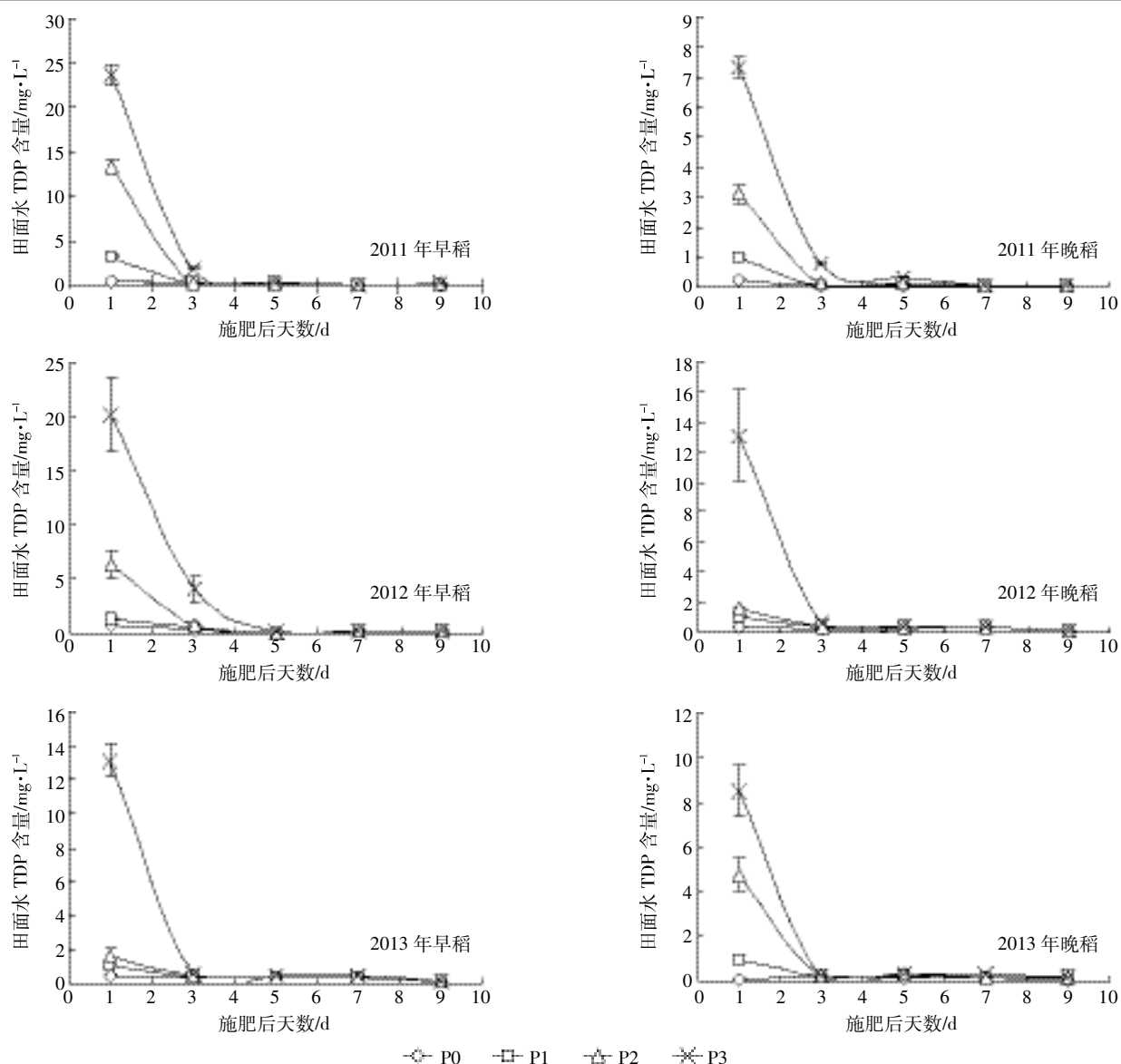


图 2 2011—2013 年不同施磷处理田面水 TDP 动态

Figure 2 Dynamics of TDP in surface water in different phosphorus treatment during 2011—2013

富营养化阈值)为允许安全排放浓度,通过模拟发现, P1、P2、P3 处理田面水安全排放天数均为负数,说明在水稻生育期内,任一次田间排水都存在诱发附近水域水体富营养化的可能。

2.4 土壤中 Olsen-P 与田面水 TP 浓度的关系

不同施磷处理稻田耕层土壤中 Olsen-P 与水稻生长期田面水 TP 浓度的平均值关系如图 3 所示。随施磷量增加,稻田耕层土壤中 Olsen-P 呈现不断增加的趋势,田面水 TP 浓度也随土壤 Olsen-P 含量的增加而显著线性增加($y=0.043 1x+0.035 1$)。该区域的研究结果证实,土壤 Olsen-P 含量增加到某一值时田面水 TP 平均浓度并没有激增,因而未导致流失风险加

剧的现象出现。

2.5 稻田施磷土壤中磷素收支平衡

2.5.1 土壤磷素收支平衡

连续 3 年施用磷肥,土壤中磷的表观平衡(表 4)显示,水稻地上部分从土壤中带走的磷素量为 $(46.85 \pm 1.29) \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2}$,不同施磷量间作物积累磷含量差异不大。

在不考虑沉降与灌溉时,不施磷处理的土壤磷库每年亏损 $44.22 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。长此以往,土壤磷素水平将急剧下降,严重破坏土壤养分平衡。P1 处理基本能维持土壤中的磷收支平衡,年均盈余量为 $7.14 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。土壤中磷素盈余量随着磷肥施用量增加而增加。当年

表 3 磷肥施用后田面水磷素浓度动态指数模拟结果

Table 3 Exponential simulation of the decrease in the P concentrations in the surface water after P fertilizing

稻季	参数	TP			TDP		
		P1	P2	P3	P1	P2	P3
早稻	$C_0/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.18	0.21	0.53	0.07	0.11	0.39
	k/d^{-1}	3.14	4.37	3.99	3.64	4.44	4.06
	r	0.848 2	0.874 9	0.961 9	0.951 5	0.926 8	0.991 6
	P	0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1
晚稻	$C_0/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.17	0.16	0.26	0.13	0.10	0.14
	k/d^{-1}	2.02	3.41	4.25	2.02	3.41	4.25
	r	0.802 0	0.908 7	0.985 8	0.951 4	0.894 3	0.958 1
	P	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1

注: C_0 代表常数项系数; k 代表回归系数; r 代表相关系数; P 代表 F 检验统计量的观察值相应的概率。

Note: C_0 was the constant; k was the regression coefficient; r was the correlation coefficient; P was the probability of the observed value in F -test.

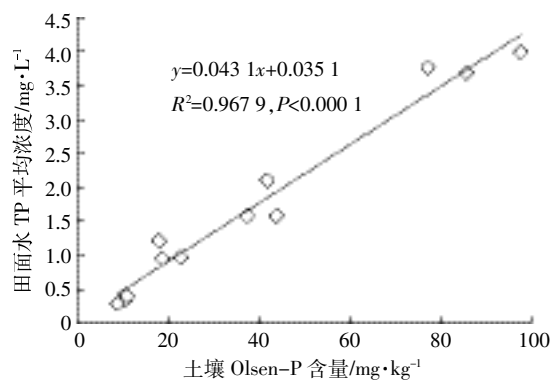


图 3 土壤中 Olsen-P 含量与田面水 TP 平均浓度的关系
Figure 3 Relationship between Olsen-P content and average concentration of TP in field

均施磷量达 $210\text{ kg P}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 每年土壤磷素盈余量达 $159.94\text{ kg P}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。试验结果表明, 过量施用磷肥将造成土壤中磷素的大量累积, 增加稻田磷素流失风险。

2.5.2 基于土壤磷收支平衡的阈值分析

分析不同施磷量与土壤磷收支平衡的关系发现, 土壤磷素收支平衡可以用方程 $y=ax-b$ 表示(表5), 不同稻季的土壤磷收支平衡均达到极显著的线性相关 ($P<0.001$)。由于磷在土壤中的迁移能力较弱, 近期有学者^[1]试图用土壤中磷素平衡点作为施磷阈值。本研究也试图通过施磷与磷收支平衡的关系, 分别计算双季稻田土壤磷素平衡阈值。不同年份间, 早稻季土壤磷平衡范围为 $40.29\sim53.11\text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$, 晚稻季土壤磷平衡范围为 $50.68\sim65.81\text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$ 。差异的原因可能是不同年份间水稻产量不同, 导致水稻从土壤中携出的磷不同(表4)。对3年的土壤磷素进行总体平衡分析发现, 早、晚稻季土壤磷素平衡的施磷量分别

表 4 不同施磷处理的磷素收支平衡

Table 4 Phosphorus balance of different phosphorus treatments

稻季	处理	磷投入/ $\text{kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$	磷投入/ $\text{kg P}\cdot\text{hm}^{-2}$	作物积累磷/ $\text{kg P}\cdot\text{hm}^{-2}$	土壤磷表 观平衡/ $\text{kg P}\cdot\text{hm}^{-2}$
2011 年早稻	P0	0	0	22.70	-22.70
	P1	75	32.75	24.07	8.68
	P2	150	65.49	22.89	42.60
	P3	300	130.99	23.71	107.27
2011 年晚稻	P0	0	0	23.80	-23.80
	P1	45	19.65	22.98	-3.33
	P2	90	39.30	24.31	14.99
	P3	180	78.59	24.20	54.39
2012 年早稻	P0	0	0	22.61	-22.61
	P1	75	32.75	23.00	9.74
	P2	150	65.49	22.08	43.42
	P3	300	130.99	21.35	109.63
2012 年晚稻	P0	0	0	19.35	-19.35
	P1	45	19.65	21.88	-2.23
	P2	90	39.30	25.43	13.87
	P3	180	78.59	26.01	52.58
2013 年早稻	P0	0	0	17.92	-17.92
	P1	75	32.75	15.58	17.17
	P2	150	65.49	20.97	44.52
	P3	300	130.99	20.43	110.56
2013 年晚稻	P0	0	0	26.27	-26.27
	P1	45	19.65	28.26	-8.62
	P2	90	39.30	29.13	10.17
	P3	180	78.59	33.22	45.37

为 $(48.52\pm7.07)\text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $(56.87\pm7.90)\text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$, 从土壤磷素平衡的角度来考虑, 该施磷量可作为区域早、晚稻季施磷阈值。

表 5 基于土壤磷素收支平衡的磷阈值

Table 5 Phosphorus threshold based on soil phosphorus balance

稻季	相关方程	决定系数	P 阈值/ kg·hm ⁻²	P ₂ O ₅ 阈值/ kg·hm ⁻²
2011 早稻	$y=0.995\ 4x-23.082$	$R^2=0.999\ 9^{**}$	23.19	53.11
2011 晚稻	$y=0.990\ 4x-23.494$	$R^2=0.999\ 8^{**}$	23.72	54.33
2012 早稻	$y=1.011\ 3x-22.912$	$R^2=0.999\ 9^{**}$	22.66	51.89
2012 晚稻	$y=0.915\ 0x-20.246$	$R^2=0.998\ 2^{**}$	22.13	50.68
2013 早稻	$y=0.971\ 5x-17.092$	$R^2=0.998\ 8^{**}$	17.59	40.29
2013 晚稻	$y=0.913\ 6x-26.252$	$R^2=0.999\ 9^{**}$	28.73	65.81
早稻平均	$y=0.992\ 8x-21.032$	$R^2=0.999\ 9^{**}$	21.18	48.52
晚稻平均	$y=0.939\ 7x-23.332$	$R^2=0.999\ 8^{**}$	24.83	56.87

注: x 代表磷肥投入量; y 代表土壤磷素表观平衡值。

Note: x was phosphate fertilizer input; y was soil phosphorus balance values.

3 讨论

研究表明,在南方土壤上,当 Olsen-P 含量大于 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,施磷对水稻生长无影响^[20]。本研究中连续 3 年施用磷肥,P3 处理 Olsen-P 含量超过 $86\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,水稻产量较 P1 处理没有显著增产效果,反而存在减产风险。同时,早、晚稻季水稻产量存在较大差异,早稻季磷肥施用量较晚稻高,但水稻产量低于晚稻,主要原因可能是早稻季土壤温度较低,磷酸酶活性受到抑制,晚稻季虽施磷少,但光热条件充足,磷酸酶活性高,故产量较早稻季高。土壤 Olsen-P 含量是制约水稻增产的主要原因^[4]。本研究中,连续不施磷处理较施磷处理的土壤 Olsen-P 含量和产量均有降低趋势,这与长期不施磷土壤中的植株可利用磷库逐渐减少有关。

颜晓^[21]等在太湖地区进行的连续 13 年磷肥用量试验结果显示,长期不施磷处理土壤 Olsen-P 在经过一个显著下降过程后,不再显著降低。长期低磷处理土壤 Olsen-P 含量表现为由最初的亏缺状态转变为盈余累积,最后维持在基本稳定的水平。本试验结果中,连续 3 年 P1 处理的土壤 Olsen-P 含量由最初的亏缺状态转变为盈余累积,说明该施用量已经完全能够满足双季稻生产的需求,区域稻田施磷量不宜超过该施磷量。

土壤有效磷不仅是表征土壤供磷能力和确定磷肥用量的重要指标,同时也是反映农田磷环境风险的主要参数。土壤有效磷与地表径流磷含量呈显著正相关^[15,22-23]。鲁如坤等^[24]提出土壤 Olsen-P 为 $50\sim70\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 是农田磷通过渗漏污染水源的大致临界指标。洛

桑试验站结果^[12]也证实:土壤灌溉水中的磷浓度与磷肥用量呈正相关,当土壤 Olsen-P 超过 $60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,灌溉水中可溶性磷随土壤 Olsen-P 的增加呈线性增加。本试验结果表明,磷肥施用量与土壤 Olsen-P 含量显著线性相关。连续 3 年磷肥用量达到 P3 水平时,土壤 Olsen-P 含量超过 $86\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,极大地增加了磷素通过径流与渗漏流失的风险。在太湖地区乌栅土上的研究表明,磷肥施用后 10 d 是磷素地表径流流失的高风险期,而高量施用磷肥,磷素的流失风险期延长,可持续至 $50\sim70\text{ d}$ ^[25]。本试验也得出相似结论,过量施磷会导致磷素流失风险延长,但是流失风险期存在一定的差异,由于该区域土壤类型为酸性红黄泥,土壤质地较为粘重,土壤固磷能力较强,即使在高磷施用条件下,田面水磷素含量在施肥后 4~6 d 内即降低至 $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下。

田面水中不同形态磷素浓度与时间呈极显著指数相关(表 3),用指数降低模型($Y=C_0\cdot e^{-kt}$, $k>0$)可以较好地预测田面水中 TP 和 TDP 的浓度变化。该结论与施泽升等^[26]在普洱地区的研究结果相同,但与周萍等^[27]在江汉平原潮土上的“对数负相关”结果存在差异。张志剑等^[28]在青紫泥上的研究证实,从减少磷素流失的角度出发,在施磷灌水后约一周之内或田间耘田时,田间排水磷素流失潜能增大。本研究中若以 TDP 浓度 $0.02\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (水体富营养化阈值)为允许安全排放浓度进行模拟,则施磷处理的安全排放天数均为负数,说明在监测期内,任何一次田间排水都存在诱发附近水域水体富营养化的可能,这与张志剑等^[28]的结论一致。

国外在旱地^[29]和牧草地^[30]上的研究表明,土壤磷素径流流失的大小在其他条件(植被、气候、土壤等生态和管理)一致的前提下,随土壤有效磷含量的增加而提高,但是在土壤有效磷含量达到一定累积水平前,径流携带流失的磷量随有效磷增加非常有限,一旦达到这个有效磷水平后径流迁移的磷素就会迅速和急剧增加。Hesketh 等^[12]研究表明,田面水 TP 平均浓度随着土壤 Olsen-P 的增加,通常会出现突变点。但本研究中并未出现 Olsen-P 含量增加到某一值时田面水 TP 平均浓度增幅明显的现象,其原因可能是该试验所采用的土壤质地较为粘重,土壤固磷能力较强,且成土母质和成土过程造成土壤磷素含量很低;同时该地区降雨量和降雨强度大,土壤矿物迅速风化和部分矿质元素大量流失,导致大量铁铝氧化物的形成,使土壤对施入的磷肥具有较高的吸附固定能力。

英国洛桑试验站进行的 100 多年的研究表明,磷的移动每年不超过 0.1~0.5 mm,且最远只能从施肥点向周围移动1~3 cm^[5]。何园球等^[31]研究表明红壤的固磷能力可达 130~2900 kg·hm⁻²。因此对这种土壤,即使大量施入磷肥,也不能使田面水 TP 平均浓度出现激增现象。

4 结论

(1)过量施用磷肥对水稻产量无显著增产效果,反而有减产的风险。连续过量施用磷肥可以显著增加耕层土壤中 Olsen-P 含量,但长期不施磷肥和连续种植作物,土壤磷库中的 Olsen-P 会逐渐被消耗。

(2)施磷后,田面水存在较高的磷素径流损失风险,早稻季不同施磷量处理田面水安全排放时间为 4~11 d,晚稻季为 3~10 d。不同施磷处理土壤中 Olsen-P 与田面水 TP 平均浓度呈线性相关关系,没有明显的拐点,这可能与试验区土壤质地粘重、含铁铝氧化物较高、土壤固磷能力较强有关。

(3)早、晚稻季基于土壤磷素收支平衡的施磷阈值分别为(48.53±7.07) kg P₂O₅·hm⁻²和(56.87±7.90) kg P₂O₅·hm⁻²。

参考文献:

- [1] 区惠平,周柳强,黄美福,等.不同施磷量下稻田土壤磷素平衡及其潜在环境风险评估[J].植物营养与肥料学报,2016,22(1):40-47.
OU Hui-ping, ZHOU Liu-qiang, HUANG Mei-fu, et al. Phosphorus balance in paddy soils and its environmental effect under different phosphorus application rates[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(1):40-47.
- [2] Wang L Q, Liang T, Chong Z Y, et al. Effect of soil type on leaching and runoff transport of rare earth elements and phosphorus in laboratory experiments[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2010, 6(3):37-40.
- [3] 张海佳,梁成华,梁涛,等.肥料类型对稀土和磷在土壤径流中迁移的影响研究[J].广东农业科学,2011,38(9):45-49.
ZHANG Hai-jia, LIANG Cheng-hua, LIANG Tao, et al. The impacts of fertilizers on transportation behaviors of rare earth elements and phosphorus in soil[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2011, 38(9):45-49.
- [4] 郑粉莉,李靖,刘国彬.国外农业非点源污染(面源污染)研究动态[J].水土保持研究,2004,11(4):64-65,112.
ZHENG Fen-li, LI Jing, LIU Guo-bin. The research development on overseas agricultural non-point source pollution[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11(4):64-65, 112.
- [5] Heckrath G, Brookes P C, Poulton P R. Phosphorus leaching from soils containing different phosphorus concentrations in the Broadbalk Experiment[J]. *J Environ Qual*, 1995, 24(5):904-910.
- [6] Mateos D M, Pedrocchi C, Comin F A, et al. Effects of wetland construction on water quality in a semi-arid catchment degraded by intensive agricultural use[J]. *Ecological Engineering*, 2009, 36(5):631-639.
- [7] 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 Jian-ning, SHEN Qi-rong, RAN Wei. 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.
- [8] 杨龙,王晓燕,王子健,等.富营养化水体磷阈值的动态 AGP 模拟研究[J].生态环境学报,2009,18(5):1625-1630.
YANG Long, WANG Xiao-yan, WANG Zi-jian, et al. Simulation on phosphorus threshold for lake eutrophication by a dynamic algae growth potential (AGP) experimentation[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(5):1625-1630.
- [9] 刘利花,杨淑英,吕家珑.长期不同施肥土壤中磷淋溶“阈值”研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2003,31(3):123-126.
LIU Li-hua, YANG Shu-ying, LÜ Jia-long. Studies on "threshold value" of phosphorus leaching in long-term different fertilization soils[J]. *J of Northwest Sci-Tech Univ of Agri For (Nat Sci Ed)*, 2003, 31(3):123-126.
- [10] 张凤华,刘建玲,廖文华.农田磷的环境风险及评价研究进展[J].植物营养与肥料学报,2008,14(4):797-805.
ZHANG Feng-hua, LIU Jian-ling, LIAO Wen-hua. Environmental risk and assessment of agricultural phosphorus: A review[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(4):797-805.
- [11] 王振华,朱波,李青云.不同土地利用方式下侵蚀泥沙中磷释放风险评价[J].中国环境科学,2011,31(3):474-480.
WANG Zhen-hua, ZHU Bo, LI Qing-yun. Risk assessment on phosphorus release from eroded sediments in different land uses[J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(3):474-480.
- [12] Hesketh N, Brookes P C. Development of an indicator for risk of phosphorus leaching[J]. *J Environ Qua*, 2000, 29(1):105-110.
- [13] 赵牧秋,陈欣,史云峰.磷肥施用对红壤有效磷含量和易流失磷含量的影响[J].安徽农业科学,2012,40(6):3335-3338.
ZHAO Mu-qiu, CHEN Xing, SHI Yun-feng. Influence of phosphorus fertilizer application on available phosphorus and easy-loss phosphorus content in red soil[J]. *J of Anhui Agri Sci*, 2012, 40(6):3335-3338.
- [14] 刘建玲,廖文华,张作新,等.磷肥和有机肥的产量效应与土壤积累磷的环境风险评价[J].中国农业科学,2007,40(5):959-965.
LIU Jian-ling, LIAO Wen-hua, ZHANG Zuo-xin, et al. The response of vegetable yield to phosphate fertilizer and organic manure and environmental risk assessment of phosphorus accumulated in soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(5):959-965.
- [15] 牛明芬,温林钦,赵牧秋,等.可溶性磷损失与径流时间关系模拟研究[J].环境科学,2008,29(9):2581-2585.
NIU Ming-fen, WEN Lin-qin, ZHAO Mu-qiu, et al. Simulation of relationship between dissoluble phosphorus loss and runoff time[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(9):2581-2585.
- [16] 通乐嘎,李成芳,杨金花,等.免耕稻田田面水磷素动态及其淋溶损失[J].农业环境科学学报,2010,29(3):527-533.
TONG Le-ga, LI Cheng-fang, YANG Jin-hua, et al. Floodwater phosphorus dynamics and losses from no-tillage rice fields[J]. *Journal of A-*

- gro-Environment Science, 2010, 29(3):527-533.
- [17] 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 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 Sciences*, 2000, 14(1):55-57.
- [18] 金 洁, 杨京平, 施洪鑫. 水稻田面水中氮磷素的动态特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2):357-362.
- JIN Jie, YANG Jing-ping, SHI Hong-xin, et al. Variations of nitrogen and phosphorus in surface water body of paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(2):357-362.
- [19] 孙海栓, 吕乐福, 刘春生, 等. 不同形态磷肥的径流流失特征及其效应[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4):90-93.
- SUN Hai-shuang, LÜ Le-fu, LIU Chun-sheng, et al. Characteristics of runoff losses and effects of different forms of phosphate fertilizer[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(4):90-93.
- [20] 朱文彬, 汪 玉, 王慎强, 等. 太湖流域典型稻麦轮作农田稻季不施磷的农学及环境效应探究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(6):1129-1135.
- ZHU Wen-bin, WANG Yu, WANG Shen-qiang, et al. Agronomic and environmental effects of P fertilization reduction in rice-wheat rotation field in Taihu Lake Region of Southeast China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(6):1129-1135.
- [21] 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 Xiao, WANG De-jian, ZHANG Gang, 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.
- [22] 高 超, 张桃林, 吴蔚东. 农田土壤中的磷向水体释放的风险评价[J]. 环境科学学报, 2001, 21(3):344-348.
- GAO Chao, ZHANG Tao-lin, WU Wei-dong. Risk evaluation of agricultural soil phosphorus release to the water bodies[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, 21(3):344-348.
- [23] 张焕朝, 张红爱, 曹志洪. 太湖地区水稻土磷素径流流失及其Olsen磷的“突变点”[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2004, 28(5):6-10.
- ZHANG Huan-chao, ZHANG Hong-ai, CAO Zhi-hong. Research on phosphorus runoff losses from paddy soils in the Taihu Lake Region and its Olsen-P "Change-point"[J]. *Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition)*, 2004, 28(5):6-10.
- [24] 鲁如坤, 时正元. 我国南方6省农田养分平衡现状评价和动态变化研究[J]. 中国农业科学, 2000, 33(2):63-67.
- LU Ru-kun, SHI Zheng-yuan. Nutrient balance of agroecosystem in six provinces in Southern China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(2):63-67.
- [25] 汪 玉, 赵 旭, 王 磊, 等. 太湖流域稻麦轮作农田磷素累积现状及其环境风险与控制对策[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5):829-835.
- WANG Yu, ZHAO Xu, WANG Lei, et al. Accumulation, environmental risk and control of phosphorus in rice-wheat rotation farmland in Taihu Lake Watershed[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(5):829-835.
- [26] 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 Ze-sheng, XU Yong-bo, LEI Bao-kun, 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.
- [27] 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):41-50, 116.
- ZHOU Ping, FAN Xian-peng, HE Bing-hui, 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):41-50, 116.
- [28] 张志剑, 郑洪福. 水稻田土-水系统中磷素行为及其环境影响研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(2):229-232.
- ZHANG Zhi-jian, ZHENG Hong-fu. Phosphorus behavior in soil-water system of paddy field and its environmental impact[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(2):229-232.
- [29] Edwards A C, Withers P J A. Soil phosphorus management and water quality: A UK perspective[J]. *Soil Use and Management*, 1998, 14(S4):124-130.
- [30] Sharpley A N, Daniel T, Sims T, et al. Agricultural phosphorus and eutrophication[R]. Washington DC: US Department of Agriculture, 1999.
- [31] 何园球, 李成亮, 刘晓利, 等. 水分和施磷量对筒育水耕人为土中磷素形态的影响[J]. 土壤学报, 2008, 45(6):1081-1086.
- HE Yuan-qiu, LI Cheng-liang, LIU Xiao-li, et al. Effects of soil moisture content and phosphorus application rate on form of soil on organic phosphorus in red paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(6):1081-1086.