

磷酸一钙施用模式对水稻有效性及 土壤中有有效磷分布的影响^①

王 涛^{1,2}, 周健民¹, 王火焰^{1*}

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008;

2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 利用温室盆栽试验研究了磷酸一钙不同施用模式对水稻的有效性 & 土壤中有有效磷 (P) 分布的影响, 并提出了水田中 P 肥的施用模式。结果表明: P 肥撒施时, 表层水中总 P 浓度最高, 达 4.8 mg/L, 而其他施肥模式下表层水中总 P 浓度可满足 GB3838-2002 III 类水水质要求; 混施可为水稻提供立体的吸收空间, 有效性高; 沟施时, 肥料 P 主要集中在施肥带上下约 3 cm 的范围内; 在水田中, 施用 P 肥时应优先考虑混施, 若土壤中 P 素有效性相对较高, 应尽量在旱作时施用。

关键词: 磷肥; 有效性; 水稻土

中图分类号: S147.3

磷 (P) 是植物生长所必需的三大营养元素之一, 然而在我国, 约有 50% 的农田缺 P (有效 P < 10 mg/kg)^[1], 为提高土壤生产力, 农业生产中广泛施用 P 肥。但 P 肥的当季利用率很低, 仅有 10%~20%, 甚至更低, 其余的则被固定后进入土壤 P 库^[2-3]。土壤可以通过吸附、沉淀等过程暂时储存植物没有吸收利用的那部分 P^[4], 但长期过量的在 P 吸附饱和的土壤上施用 P 肥, 过量的 P 就会通过土壤侵蚀及淋滤等过程进入地表水和地下水中, 引起水体的富营养化^[5-9]。在我国南方地区, 水稻大面积种植, 为提高单产, 盲目施肥, P 肥投入量大而利用率低, 每年通过农田径流损失的 P 量非常大^[10-12], 对“江南水乡”河网富营养化构成了严重的威胁。科学施用 P 肥、提高水田中 P 肥的利用率、减少径流损失对控制农田面源污染具有重要意义。

本文探讨了在水田中, P 肥不同施用模式对水稻的有效性、田面表层水中总 P 的浓度及土壤中有有效 P 分布的影响, 以期提高水田中 P 肥的利用率及水作条件下科学施用 P 肥提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试的土壤样品于 2007 年 11 月采自湖北省潜江市浩口镇农田, 取样地块, 上一年夏季种植水稻, 冬季撂荒, 土壤类型属于长江冲积物母质发育的灰潮土, 土层深厚, 排灌一般, 质地为砂壤, 代表地力为中等肥力, 取样深度为 0~20 cm, 取样中心点北纬 30°22'54.5", 东经 112°37'21.5", 海拔 27.5 m。样品采回后, 室温下自然风干, 磨碎, 过 20 目筛后储存备用。土壤基本理化性质采用传统方法测定^[13], 结果列于表 1 中。供试的水稻品种选用普通水稻南梗 42 (江苏省洪泽湖农场种子公司, 质量标准: GB4404.1-1996), 供试的 P 肥品种选用磷酸二氢钙 (MCP)。

1.2 试验设计

试验于 2008 年 5 月在中国科学院南京土壤研究所温室内进行, 水稻经催芽后在苗床上育苗一个月。试验选用的盆钵长 35 cm、宽 25 cm、高 12 cm, 每盆装

表 1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of tested soil

pH (H ₂ O)	CaCO ₃ (g/kg)	有机质 (g/kg)	Olsen-P (mg/kg)	全 P (mg/kg)	速效 K (mg/kg)	CEC (cmol/kg)
8.05	27.1	21.8	8.72	498	70	14.7

①基金项目: 国家“973”项目 (2007CB109301) 和国家自然科学基金项目 (30671202) 资助。

* 通讯作者 (hywang@issas.ac.cn)

作者简介: 王涛 (1981—), 男, 山东济南人, 博士研究生, 主要从事土壤化学方面的研究。E-mail: maywoody123@163.com

土 10 kg, 施肥量为 P_2O_5 0.15 g/kg, K_2O 0.15 g/kg, N 0.10 g/kg, 肥料品种分别选用磷酸二氢钙、尿素、氯化钾。P肥的施用方式设以下几种: 不施肥 (CK); 撒施 (SA), 将P肥均匀地撒在土壤表面; 混施 (MA), 将P肥与土壤充分混合均匀; 定点沟施, 垂直方向距土壤表层 5 cm, 水平方向距植株根系分别为 0 cm (d0)、10 cm (d10) 和 20 cm (d20)。N肥和K肥在所有处理中均以水溶液方式浇灌施入, 待盆钵内的水浸透土壤后保持表层 1 cm 深的水层, 平衡两天, 此时盆钵内土层厚度约 10 cm。选取长势好、苗壮、大小一致的秧苗, 将其根部泥土用自来水冲洗干净后移栽至盆钵内, 等株距移栽, 每盆平行于施肥带种植一行, 共 12 株。移栽后, 每天视失水情况补充适量水分, 始终保持土壤表层 1 cm 深的水层, 表层水取样前 8 h 停止浇水, 待水稻分蘖后追施N肥 0.05 g/kg, 其他管理措施同田间管理, 最后一次水样采集后不再补充水分, 直至落干, 等待收获, 每个处理重复 3 次。

1.3 样品采集与分析方法

表层水样: 水稻移栽后, 分别于 3、7、14、28、49、77、129 天采集表层水样, 经 0.45 μ m 微孔滤膜过滤后 ICP-AES 测定其中总 P 的含量。

植物样品: 第一次采集是在水稻分蘖完成后, 每盆取 3 株地上部植物样, 用蒸馏水洗净烘干, $H_2SO_4-H_2O_2$ 消解后, 用钼锑抗比色法测定其中总 P 的含量^[14]; 第二次采集是在水稻收获后, 将籽粒与秸秆分开采集, 采用上次相同的处理方法分别测定籽粒和秸秆中总 P 的含量。

土壤样品: 为减少扰动, 土壤样品在水稻收获后采集, 定点沟施处理中分别取施肥带上下左右的土壤样品, 取出的土壤样品呈条带状, 截面 2 cm $\times$ 2 cm, 将样条两端与盆钵紧密接触的部分切除, 选取中间部分装入自封袋内带回实验室分析; 不施肥、撒施、混施的取样方法参考定点沟施, 分别在相应的位置进行取样 (表 3)。样品取回后于室温下自然风干, 磨碎, 过 20 目筛后测定其中 Olsen-P 的含量^[15]。

1.4 数据处理

试验所得数据用 Excel2003 处理, 并用 SPSS13.0 对 P 肥不同施用模式下, 水稻植株中总 P 含量进行单因素方差分析 (One-way ANOVA) 和 LSD 多重比较。

2 结果与讨论

2.1 表层水样中总磷浓度分析

P 肥不同施用模式下, 田面水中总 P 的浓度如图 1 所示。在水稻生长前期, 当 P 肥撒施在土壤表层时,

大部分肥料 P 会随灌溉水进入田面水中, 还有一部分会被表层土壤吸附, 田面表层水中总 P 的浓度最高可达 4.8 mg/L, 远远超出其他施肥模式下的浓度, 直到水稻生长后期才与其他施肥模式下的浓度相当; P 肥混施模式下, 在水稻生长初期, 表层水中总 P 的浓度较定点沟施略高, 但仍低于 0.2 mg/L, 满足我国地表水环境质量标准 (GB3838-2002) 中 III 类水水质要求; 在水稻生长后期, P 肥不同施用模式下表层水中总 P 的浓度差异不显著, 且均满足 GB3838-2002 III 类水水质要求。

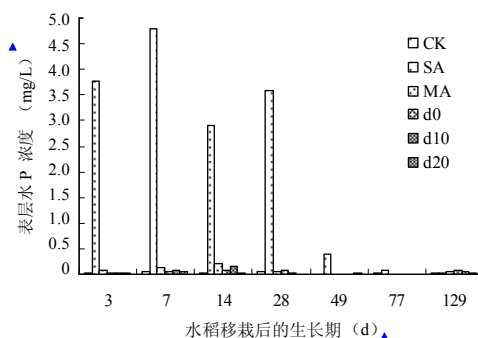


图 1 水稻生长期表层水总 P 浓度

Fig. 1 Concentrations of total P in surface water during rice growing period

植物吸收的 P 主要是土壤溶液中的 $H_2PO_4^-$ 和 HPO_4^{2-} , 可见, P 肥撒施在土壤表层时其有效性最高, 然而, 这样的施肥模式很容易导致 P 肥随农田径流排至周围水体中, 特别是在雨季, 高浓度的含 P 径流排出后对周围水体的污染极大; 当 P 肥混施于土壤中时, 虽然表层土壤中的部分 P 可进入田面水中, 但其浓度很低, 对环境的危害较小; 定点沟施模式下, 肥料 P 很容易被土壤吸附固定, 不易移动, 表层水中总 P 浓度较对照处理差异不显著, 随农田径流流失的可能性很小。因此, 从环境保护的角度来讲, 在水田中施用 P 肥时, 应避免采用撒施模式, 而要优先考虑将 P 肥用作基肥混施或沟施于土壤中, 使其慢慢地释放其肥效, 同时也大大降低了对周围水体富营养化的威胁。

2.2 磷肥不同施用模式对水稻的有效性

P 肥不同施用模式下, 水稻分蘖后植株及收获后秸秆和籽粒中总 P 含量如表 2 所示。在水稻生长初期 (分蘖前), P 肥撒施、混施和沟施于植株根系正下方 (d0) 时, 植株中总 P 的含量与对照处理差异显著, 而在其他施肥模式下, 植株中总 P 的含量与对照处理差异不显著, 主要是因为撒施时灌溉水可以溶解绝大

带格式的: 首行缩进: 0 字符

带格式的: 字体: 六号

带格式的: 字体: 宋体

部分肥料 P 使之进入表层水溶液中，减少了土壤对 P 的吸附固定，提高了 P 肥的有效性，加之在水稻生长初期，根系大部分扎入泥土较浅，并有相当部分的根系裸露在表层水中，可以直接吸收表层水溶液中的 P，因此植株中总 P 的含量较其他 P 肥施用模式下要高；P 肥混施入土壤中时，P 在土壤中的分布较为均匀，与植物根系接触紧密，易于被植物吸收利用，有效性也高；而当 P 肥沟施于土壤中时，灌溉水渗透至土壤中下层，肥料 P 溶解后即被土壤吸附固定，移动性很差，对水稻的有效性较低，只有当植株大量缺 P 时才会慢慢释放出来供植物吸收利用。

水稻收获后，P 肥混施模式下，秸秆中总 P 的含量与对照处理差异显著，而在其他施肥模式下，秸秆中总 P 的含量与对照处理差异不显著；籽粒中总 P 的含量，在 P 肥撒施和混施时与对照处理差异显著，而在其他施肥模式下，与对照处理差异不显著。可见，

在水稻生长后期，P 肥撒施的肥效较混施也略差，主要是因为土壤表层中的 P 肥不易向土体下部迁移，随水稻根系的生长，当根系穿过表层的富 P 带后，从下层土壤中吸收的 P 较少，而在混施模式下，P 肥在土壤中的分布较为均匀，根系可以在更广的立体空间中吸收 P；在定点沟施模式下，即使 P 肥施入植株根系正下方（d0）时，其有效性也较差，分析原因认为在试验条件下，先将 P 肥集中沟施于土壤中平衡一定时间后，再移栽水稻，此时肥料 P 已被土壤固定，移动性变差，植物根系在此富 P 带上方和下方吸收利用的 P 都很少，即使是在施肥带上，如果植株根系不能与之紧密接触时，吸收的 P 也很少，故此时 P 肥的有效性较差；当离开植株根系一定水平距离（d10 和 d20）沟施 P 肥时，因 P 肥较易被土壤固定，移动性差，肥料 P 很难迁移到植株根系附近，故此时 P 肥的有效性也很差。

表 2 P 肥不同施用模式下水稻植株中总 P 的含量（g/kg）
Table 2 Contents of total P in rice plant under different phosphate fertilization modes

施肥模式	分蘖后	收获后	
		秸秆	籽粒
CK	2.26 ± 0.23 ab	0.84 ± 0.18 a	3.56 ± 0.35 a
SA	3.42 ± 0.12 c	1.04 ± 0.23 ab	3.96 ± 0.22 b
MA	3.24 ± 0.12 c	1.23 ± 0.28 b	4.05 ± 0.20 b
d0	2.73 ± 0.01 d	0.79 ± 0.10 a	3.83 ± 0.14 ab
d10	2.45 ± 0.04 b	0.80 ± 0.05 a	3.60 ± 0.08 a
d20	2.17 ± 0.02 a	0.88 ± 0.21 a	3.70 ± 0.13 ab

注：表中数值为平均值 ± STD；同一列中不同字母表示差异显著（p<0.05）。

2.3 土壤样品中有效磷的分布

表 3 列出了 P 肥不同施用模式下，施肥带及其周围土壤中 Olsen-P 的含量。从表 3 可以看出，当 P 肥撒施在土壤表面时，在表层土壤中，Olsen-P 有富集的趋势，在下层土壤中的含量较低，说明 P 肥撒施时虽然大部分会进入表层水中，然而上层土壤仍然会吸附固定部分 P，这部分 P 与水稻移栽初期根系深度相当，是水稻生长初期所需 P 素的主要来源之一；当 P 肥与土壤混施时，P 肥在土壤中的分布较为均匀，因此，Olsen-P 的含量除在表层土壤中含量较低外，在其他层次中的含量相当，因而对植物吸收利用的空间较大，其中表层土壤中 Olsen-P 含量较下层偏低是因为在取表层水样时将部分溶于水的 P 带走的缘故；当 P 肥定点沟施于土壤中时，无论是施在水稻根系的正下方（d0），还是距其根系有一定水平距离（d10 和 d20），Olsen-P 在施肥带中的含

量都可高出周围土体中的含量上百倍，从垂直方向看，施入的 P 肥主要集中在施肥带上下约 3 cm 的范围内，只有很少部分会迁移到土壤表层及下层，金亮等^[16]的研究也表明，磷酸一钙施入石灰性土壤后，约有 30% 的肥料 P 仍残留在原施肥点，另有约 70% 会进入土壤，然而经过 31 天后，其迁移距离也只有 4.5 cm。

从反应机理上讲，当可溶性的 P 肥施入土壤后，特别是在集中施用（条施、穴施、带施等等），在施肥点及其附近会形成一个特殊的微域环境，与周围土体有很大的不同，即肥际微域^[17]。在肥际微域，肥料 P 的浓度可以比周围土体中 P 的浓度高几倍、十几倍^[17]，甚至上千倍^[18]，如此高浓度的 P 肥溶液可以溶解土壤中的矿物，释放出 Al、Fe、Ca 等离子，这些离子与可溶性的磷酸盐反应形成沉淀，从而使肥料 P 的移动性变差^[19]。当 P 肥混施时，肥际效应较

沟施时弱，肥料P被大量的土壤颗粒分散均匀后，首先是被土壤吸附，当局部P肥溶液的浓度达到一定值后才会引起土壤矿物破坏，释放出金属阳离子与肥料P发生沉淀；而在沟施时，肥际效应明显，施入的肥料P被沉淀在施肥带附近，从而使得Olsen-P在施肥带中的含量远远超出了周围土体中的含量。

表 3 施肥带及其周围土壤样品中 Olsen-P 的含量
Table 3 Contents of Olsen-P in fertilization bands and the surroundings

处理	距植株距离	取样层次	Olsen-P	处理	距植株距离	取样层次	Olsen-P		
	(cm)	(cm)	(mg/kg)		(cm)	(cm)	(mg/kg)		
CK	0	0~3	6.49	SA	0	0~3	37.9		
		3~6	6.86			3~6	13.4		
		6~9	6.03			6~9	9.74		
	5	3~6	6.33		5	3~6	10.8		
		10	0~3			5.11	10	0~2	36.8
			3~6			5.54		2~4	18.8
	6~9		6.38			4~6		9.43	
	15	3~6	5.80			15	6~8	9.94	
		20	0~3				5.04	8~9	9.77
			3~6		5.66		3~6	11.3	
	6~9		8.07		20		3~6	12.0	
	MA	0	0~3		17.7		d0	0	0~2
3~6			23.7	2~4	102				
6~9			21.1	4~6	1099				
5		3~6	24.2	5	6~8	351			
		10	0~2		9.53	8~9		37.1	
			2~4		21.0	10		3~6	14.6
4~6			26.6		3~6			9.06	
6~8		25.8	15		3~6			8.81	
15		8~9			28.5	20		3~6	8.67
		3~6		29.8					
		3~6	29.3						
d10		0	0~3	9.26	d20	0		0~3	6.64
	3~6		9.32	3~6			6.78		
	6~9		6.10	6~9			6.81		
	5	3~6	12.3	5		3~6	8.07		
		10	0~2			7.49	10	3~6	5.70
			2~4			23.0		15	3~6
	4~6		1036			20			0~2
	6~8	310	2~4				242		
	8~9	15.8	4~6				1600		
	15	3~6	8.02	15		6~8	162		
		20	3~6			8.71	20	8~9	61.4

2.4 水田中磷肥的施用模式

在水田中，P肥撒施在土壤表层时，大部分会进入表层的灌溉水中，在水稻的淹水生长阶段随农田径流流失的风险大，特别是在雨季，是一种不可取的P肥施用方式，但在水土保持条件好，P素缺乏严重且其

他施用模式不易操作的土壤上可以酌情考虑；P肥混施可使P肥在土壤中的分布较为均匀，从而为作物生长提供立体的吸收空间，有效性高，是一种推荐的P肥施用模式；当P肥沟施于土壤中后，溶解的部分肥料P可以被土壤吸附固定而暂时储存起来，迁移性变差，很难

迁移到表层灌溉水中, 大大降低了随农田径流流失的风险, 并且仍是作物可以吸收利用的有效P源, 在作物缺P时可以重新释放出来供其吸收利用, 或是在下一季作物中发挥其有效性, 也是水田中一种较佳的P肥施用模式。另外, 水田作物对P的需求性一般都比旱地作物小^[20], 因此, 在水田中, 若土壤P素有效性相对较高, 就要减少P肥的施用量或不施, 尽量在旱作时施用。

3 结论

(1) 在P肥撒施时, 表层水中总P浓度远远超出其他施肥模式下的浓度, 存在随农田径流流失的风险; 混施和沟施时, 肥料P可被土壤吸附固定, 不易流失。

(2) 在P肥撒施时, Olsen-P会在土壤表层富集, 不易向土壤下层迁移; 混施可为水稻提供立体的吸收空间, 有效性最高; 沟施时, P肥扩散距离很短, 主要集中在施肥带上下约3 cm的范围内。

(3) 在水田中施用P肥时, 应优先考虑混施; 若土壤中P素有效性相对较高, 就要减少P肥的施用量或不施, 尽量在旱作时施用。

参考文献:

- [1] 谢如林, 谭宏伟. 我国农业生产对磷肥的需求现状及展望. 磷肥与复肥, 2001, 16(2): 6-9
- [2] Orvis PE, Hellums DT. Water solubility of phosphate fertilizer: Agronomic aspects—A review. Paper series 17, International Fertilizer Development Center, Alabama, USA, 1993
- [3] de Visser PHB, van Breemen N. Effects of water and nutrient applications in a Scots pine stand to tree growth and nutrient cycling. Plant Soil, 1995, 173: 299-310
- [4] Kittrick JA, Jackson ML. Electron-microscope observations of the reaction of phosphate with minerals, leading to a unified theory of phosphate fixation in soils. J. Soil Sci., 1956, 7:81-89
- [5] Sims JT, Edwards AC, Schoumans OF, Simard RR. Integrating soil phosphorus testing into environmentally based agricultural management practices. J. Environ. Qual., 2000, 29: 60-71
- [6] Hooda PS, Truesdale VW, Edwards AC, Withers PJA, Aitken MN, Miller A, Rendell AR. Manuring and fertilization effects on phosphorus accumulation in soils and potential environmental implications. Adv. Environ. Res., 2001, 5: 13-21
- [7] Smith KA, Jackson DR, Withers PJA. Nutrient losses by surface runoff following the application of organic manures to arable land: 2 Phosphorus. Environ. Pollut., 2001, 112: 53-60
- [8] Toor GS, Condron LM, Di HJ, Cameron KC, Cade-Menun BJ. Characterization of organic phosphorus in leachate from a grassland soil. Soil Biol. Biochem., 2003, 35: 1317-1323
- [9] McDowell RW, Sharpley AN. Variation of phosphorus leached from Pennsylvanian soils amended with manures, composts or inorganic fertilizer. Agric. Ecosyst. Environ., 2004, 102: 17-27
- [10] 于会彬, 席北斗, 郭旭晶, 翟丽华, 何连生, 许其功, 刘鸿亮. 降水对农田排水沟渠中氮磷流失的影响. 环境科学研究, 2009, 22(4): 409-414
- [11] 郭红岩, 王晓蓉, 朱建国. 太湖一级保护区非点源磷污染的定量化研究. 应用生态学报, 2004, 15(1): 136-140
- [12] 张红爱, 张焕朝, 钟萍. 太湖地区典型水稻土稻-麦轮作地表径流中磷的变动规律. 生态科学, 2008, 27(1): 17-23
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
- [14] Murphy J, Riley JP. A modified single solution method for the determination of phosphate in nature waters. Analytica Chimica Acta, 1962, 27: 31-36
- [15] Olsen SR, Cole CV, Watanabe FS, Dean LA. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. USDA Circ., 1954, 939
- [16] 金亮, 周健民, 王火焰, 陈小琴, 杜昌文. 石灰性土壤肥际磷酸一钙的转化及肥料磷的迁移. 土壤, 2009, 41(1): 72-78
- [17] 鲁如坤. “微域土壤学”——一个可能的土壤学的新分支. 土壤学报, 1999, 36(2):287-288
- [18] Huffman EO, Taylor AW. The behavior of water-soluble phosphate in soils. Agr. Food Chem., 1963, 11: 182-187
- [19] Lindsay WL, Frazier AW, Stephenson HF. Identification of reaction products from phosphate fertilizers in soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1962, 26:446-452
- [20] 鲁如坤. 土壤磷素化学研究进展. 土壤学进展, 1990, 18(6): 1-5, 19

Effects of Monocalcium Phosphate Monohydrate Application Modes on Availability to Rice and Distribution of Available P in Soil

WANG Tao^{1,2}, ZHOU Jian-min¹, WANG Huo-yan¹

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences)*, Nanjing 210008, China;

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

Abstract: Influences of monocalcium phosphate monohydrate applying modes on the availability to rice and the distribution of available P in soil were studied through pot cultivation in greenhouse, and based on the results the desired applying mode of phosphate fertilizer in rice field was recommended. The results showed that the concentration of total P in surface water was the highest under broadcasting phosphate fertilizer on the soil surface, reaching up to 4.8 mg/L, while under other applying modes, the concentrations could meet the standard of III in GB3838-2002; mixed applying mode could provide solid uptake room and highly available P for rice; in furrow application mode, most of P applied accumulated in a short range of less than 3 cm upper and lower the application band; in rice field, mixed applying phosphate fertilizer was a preferential considered mode for phosphate application; however, if available P in soil was relatively high, phosphate fertilizer should be applied in dry season.

Key words: Phosphate fertilizer, Availability, Paddy soil