

磷肥施用对水稻生长和磷素吸收的影响^①

江尚焘^{1,2}, 王火焰^{1*}, 周健民¹, 刘晓伟^{1,2}, 陈照明^{1,2}, 严陶韬^{1,3}

(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 中国科学院大学, 北京 100049;

3 南京林业大学, 南京 210037)

摘要: 采用田间微区试验研究不同磷肥的施用位置和类型对姜堰、广德两地水稻生长、磷素吸收以及施肥后地表水磷浓度的影响, 为水稻根区施磷提供科学依据。磷肥种类为磷酸二氢钙(MCP)和磷酸氢二铵(DAP), 施用方式有: 表面撒施; 偏 3 cm, 深 5 cm 穴施; 偏 12 cm, 深 5 cm 穴施。结果显示施磷对两地水稻均无显著增产, 姜堰地区水稻产量显著高于广德。不同施磷位置对水稻吸磷量有显著影响, 姜堰、广德两地 MCP 偏 3 cm 处理的水稻总吸磷量较 MCP 偏 12 cm 处理分别高 13% 和 12%, 且 DAP 偏 12 cm 处理的水稻总吸磷量显著高于 MCP 偏 12 cm 处理, 两地增幅分别达到 12% 和 16%, 磷肥撒施虽然在水稻分蘖期有较高的吸磷量, 但在水稻成熟期不如磷肥偏 3 cm 穴施。施肥第 10 天的地表水总磷浓度以磷肥表面撒施处理较高, 比磷肥穴施处理分别高 245%(姜堰)和 94%(广德)。以上结果表明: 适当位置的磷肥穴施不但能够促进水稻对磷的吸收, 还能有效缓解径流排水造成的磷流失; 磷酸氢二铵的磷肥适宜施用距离范围较磷酸二氢钙远。

关键词: 水稻; 磷肥; 施用位置; 磷酸二氢钙; 磷酸氢二铵

中图分类号: S511.5; S143.2

水稻是我国主要的粮食作物之一, 磷作为植物生长发育所必需的大量元素, 合理的磷肥供应对水稻高产稳产起着重要作用。土壤对磷肥极强的吸附固定使其具有很强的后效^[1], 又因为淹水条件能够显著提高土壤 Olsen-P 含量^[2], 导致磷肥对水稻的增产作用有时并不明显。但磷素在种植作物的土壤中必定是一个耗竭的过程, 根据李比希的养分归还原理, 必须补充损失的磷肥才能保持土壤磷养分的平衡。可是生产磷肥的磷矿石是不可再生资源, 磷肥的不当施用不仅导致资源浪费, 更可能引起水体富营养化^[3-4]。因此, 如何合理施用磷肥对提高水稻对磷肥的吸收利用并降低环境风险至关重要。

从养管理上考虑, 选择合适的磷肥种类、磷肥用量和施磷位置是提高水稻对磷肥的利用效率的重要途径。目前已有许多研究表明磷肥用量和磷肥种类对水稻产量以及磷肥利用率均有不同程度的影响^[5-9], 但由于磷元素在土壤中的移动性很弱, 磷肥施用位置的选择往往较为苛刻。传统的磷肥撒施易导致磷肥累积在土壤表层, 既不利作物根系对磷养

分的获取, 且当遇到强降水时, 大量的磷肥也会随地表径流而损失进入水环境^[10-11]。有研究表明, 在旱地中磷肥深施较表面撒施能够有效提高作物产量及其对磷肥的吸收^[12-15]; 在水田中氮肥的深施能够显著增产并促进水稻对氮素的吸收^[16-17], 但有关磷肥在水稻田中深施的研究较为少见。“根肥互作”一直以来为业内所关注, 在时间和空间上使养分的供应与作物对养分的需求得以同步, 以便最大程度地提高根系对养分的捕获尤其重要^[18], 因此, 通过有效的施用技术, 将肥料施在活性根系分布区域, 使养分扩散与根系生长相匹配, 不但能够实现养分的高效利用, 在非根区对肥料养分的拦截作用下, 还能大幅度降低肥料的损失^[19]。已有研究表明玉米、大豆等作物的根系能够对局部供磷作出响应, 促进供磷区根系的生长^[20-23]。据此我们认为将磷肥集中施入水稻根区范围内, 能够更大程度上提高水稻对磷养分的利用。随着水稻穴播同步侧位深施肥技术的逐渐成熟^[24], 实现水稻机械根区一次性施肥必将是未来的发展趋势。本研究于江苏姜堰(土质偏砂)

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271309)资助。

* 通讯作者(hywang@issas.ac.cn)

作者简介: 江尚焘(1990—), 男, 福建福州人, 硕士研究生, 主要从事养分高效利用机理与调控措施方面的研究。E-mail: 472483105@qq.com

和安徽广德(土质偏黏)两地开展田间微区试验,选在土壤中迁移性能不同的磷酸二氢钙(MCP)和磷酸氢二铵(DAP)为材料,探究该两种磷肥的表面撒施和不同距离的穴施对水稻生长和磷素吸收的影响,旨在为当地选择合理的水稻施磷方式的同时,为根区施磷提供理论支持,并给将来农业一次根区施肥机械提供设计依据。

表 1 供试土壤基本性质
Table 1 Basic properties of tested soils

试验地	质地类型	颗粒组成(g/kg)			pH	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	速效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
		2~0.05 mm	0.05~0.002 mm	<0.002 mm						
姜堰	砂质壤土	567	345	88	7.7	22.4	1.66	0.91	18.1	81.3
广德	粉砂质黏壤土	227	612	161	5.6	10.2	1.12	0.32	12.6	57.8

本试验采用田间微区进行研究,两地均设 7 个磷肥处理,其中包括 1 个对照、2 种磷肥和 3 种施磷方式。2 种供试磷肥分别为分析纯磷酸二氢钙(MCP,含 P 24.6%)和分析纯磷酸氢二铵(DAP,含 P 23.5%;含 N 21.2%),3 种施磷方式分别为:表面撒施;深 5 cm、偏 3 cm 穴施;深 5 cm、偏 12 cm 穴施。磷肥用量统一为 P_2O_5 150 kg/hm²,均在水稻插秧前基施,各处理重复 4 次,随机区组排列。

2 个试验地微区面积均为 2.25 m²(1.5 m × 1.5 m),供试水稻品种均为武运粳 24,采用穴盘育秧-移栽的方式,姜堰于 2014 年 6 月 19 日插秧,广德于 2014 年 6 月 24 日插秧。株距 18 cm,行距 25 cm,每个微区种植 6 行,每行 8 株。供试氮肥为尿素(含 N 46%),用量 N 为 225 kg/hm²,按基肥:分蘖:拔节=4:3:3 分 3 次撒施,其中磷酸氢二铵中的氮在磷酸二氢钙处理中以等氮量尿素替代,即替代的尿素与磷酸二氢钙一同穴施,其他尿素按常规施肥方式进行。供试钾肥为氯化钾(含 K₂O 60%),用量为 K₂O 180 kg/hm²,作基肥一次撒施。

1.2 样品采集与测定分析

植物样共分两个时期进行采集:分蘖期(约插秧后 50 天)和成熟期(约插秧后 120 天)。其中分蘖期仅采取地上部植物样,成熟期将地上部植物样分籽粒和秸秆收获,植物样品收获后,在 105℃ 下杀青 1 h 并在 75℃ 下烘干。施肥移栽水稻后第 10 天采集各小区的田面水。植物样品经过硫酸-双氧水消煮^[25]后用法国家 SmartChem200 全自动化学分析仪测定植株的磷含量(钼锑抗比色法)。水样经定量滤纸过滤后采用电感耦合等离子光谱发生仪(ICP)进行测定其总磷浓度。养分利用率相关计算公式如下:

$$\text{磷肥表观利用率 PUE}(\%) = (\text{施磷区吸磷量} - \text{对照}$$

1 材料与方方法

1.1 试验设计

试验于 2014 年 6—10 月在江苏省泰州市姜堰区梁徐镇(以下简称“姜堰”)和安徽省宣城市广德县邱村(以下简称“广德”)两实验点进行,两地土壤基本理化形状有所不同(表 1)。

区吸磷量)/施磷量×100

试验数据采用 Excel 2003 软件进行数据计算和作图,利用 SPSS13.0 软件对数据进行统计分析,结果采用 Duncan 法在 $P < 0.05$ 水平上进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同施磷处理对水稻干物质累积量的影响

从表 2 可以看出,不同施磷处理的地上部干物质质量在水稻分蘖期差异较大,在水稻成熟期差异较小。在姜堰,MCP 撒施、DAP 撒施和 DAP 偏 3 cm 处理的水稻分蘖期地上部生物量均显著高于不施磷、MCP 偏 12 cm 和 DAP 偏 12 cm 处理,但与 MCP 偏 3 cm 处理无显著差异。在广德,MCP 撒施和 MCP 偏 3 cm 处理的水稻分蘖期地上部生物量显著高于不施磷、MCP 偏 12 cm 和 DAP 撒施处理,但与 DAP 偏 3 和 12 cm 处理差异不显著。通过主体间效应检验(表 3),显示两试验地的分蘖期地上部干物质质量也存在极显著差异,其中姜堰较广德的平均增幅达到 34%,试验地与磷肥施用方式间也存在显著交互效应。

到了水稻成熟期,在姜堰,各处理水稻籽粒产量变幅在 0.5%~6.3%,籽粒产量和秸秆干重均无显著差异,不施磷处理的总生物量最低(18.6 t/hm²),显著低于施磷处理(19.0~19.7 t/hm²),但施磷处理间无显著差异(表 2)。在广德,各处理水稻籽粒产量变幅在 1.3%~10.7%,虽然籽粒产量无显著差异,但 MCP 偏 3 cm 和 DAP 偏 3 cm 较两者撒施达到 8.9% 和 10.7% 的增幅,DAP 偏 3 cm 处理的秸秆干重最高(6.82 t/hm²),显著高于不施磷、MCP 撒施、MCP 偏 12 cm 和 DAP 撒施处理(5.69~6.18 t/hm²),与其他处理差异不显著,地上部总生物量为 MCP 偏 3 cm、DAP 偏 3 和 12 cm 处理处于较高水平(14.2~14.7 t/hm²),

表 2 水稻分蘖期和成熟期地上部干物质量
Table 2 Aboveground biomass of rice at tillering and maturing stages

试验地	处理	干物质量(t/hm ²)				收获指数
		分蘖期	成熟期			
			籽粒	秸秆	籽粒+秸秆	
姜堰	不施磷	5.01 c	9.79 a	8.83 a	18.6 b	0.53 a
	MCP 撒施	8.13 a	10.23 a	8.74 a	19.0 a	0.54 a
	MCP 偏 3 cm	7.11 ab	10.23 a	9.13 a	19.4 a	0.53 a
	MCP 偏 12 cm	6.37 bc	9.85 a	9.36 a	19.2 a	0.51 a
	DAP 撒施	8.39 a	9.84 a	9.21 a	19.1 a	0.52 a
	DAP 偏 3 cm	7.87 a	10.12 a	9.34 a	19.5 a	0.52 a
	DAP 偏 12 cm	6.19 bc	10.41 a	9.31 a	19.7 a	0.53 a
广德	不施磷	4.6 b	7.33 a	6.05 bc	13.4 ab	0.55 a
	MCP 撒施	6.05 a	7.19 a	6.18 bc	13.4 ab	0.54 a
	MCP 偏 3 cm	6.17 a	7.83 a	6.41 ab	14.2 a	0.55 a
	MCP 偏 12 cm	4.67 b	7.48 a	6.06 bc	13.5 ab	0.55 a
	DAP 撒施	4.62 b	7.10 a	5.69 c	12.8 b	0.56 a
	DAP 偏 3 cm	5.31 ab	7.86 a	6.82 a	14.7 a	0.54 a
	DAP 偏 12 cm	5.16 ab	7.54 a	6.60 ab	14.2 a	0.53 a

注：同列数据小写字母不同表示每个试验地处理间差异达到 $P < 0.05$ 显著水平，下表同。

表 3 主要指标主体间效应的检验
Table 3 Testing of treatment effects for major indexes

因子	地表水总磷	分蘖期生物量	籽粒产量	秸秆干重	分蘖期吸磷量	籽粒吸磷量	秸秆吸磷量	总吸磷量
试验地	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	0.001**	0.000**	0.000**
肥料类型	0.326	0.495	0.937	0.132	0.743	0.014*	0.000**	0.001**
施用方式	0.000**	0.001**	0.058	0.027*	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**
试验地×肥料类型	0.327	0.069	0.930	0.803	0.604	0.184	0.016*	0.039*
试验地×施用方式	0.000**	0.028*	0.206	0.282	0.203	0.065	0.023*	0.014*
肥料类型×施用方式	0.897	0.419	0.209	0.506	0.232	0.235	0.000**	0.053

注：*，** 分别表示效应达到 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 显著水平。

显著高于 DAP 撒施(12.8 t/hm²)，但与其余处理无显著差异。姜堰的籽粒产量和秸秆干重均显著高于广德，增幅分别达到 35% 和 46%。

2.2 不同施磷处理对水稻磷素吸收利用的影响

2.2.1 水稻含磷量

从表 4 可以看出,不同的施磷处理对水稻的含磷量有显著影响。在姜堰, MCP 撒施和 MCP 偏 3 cm 处理的水稻分蘖期植株含磷量显著高于 MCP 偏 12 cm 和 DAP 偏 3 cm, 但与其余处理无显著差异。到了水稻成熟期, MCP 偏 3 cm 处理的籽粒含磷量最高, 显著高于除 DAP 偏 3 和 12 cm 处理之外的其他处理, DAP 偏 3 cm 处理的秸秆含磷量最高, 显著高于除 MCP 撒施和 DAP 偏 12 cm 处理之外的其他处理。在广德, 水稻分蘖期的植株含磷量仅 DAP 撒施显著高于不施磷和 DAP 偏 12 cm 处理, 且 DAP 偏 12 cm 处理同其余处理没有显著差异。到了水稻成熟期, 不施磷和 MCP 撒施处理的籽粒含磷量

均显著低于其他处理, DAP 偏 3 cm 和 12 cm 处理的秸秆含磷量显著高于其他处理。

2.2.2 水稻吸磷量

不同处理的水稻吸磷量差异显著, 其中磷肥撒施处理在水稻分蘖期和水稻成熟期的表现有所不同(表 4)。在姜堰, 分蘖期的水稻吸磷量以 MCP 撒施、MCP 偏 3 cm、DAP 撒施和 DAP 偏 3 cm 处理处于较高水平(25.8 ~ 31.6 kg/hm²), 显著高于不施磷、MCP 偏 12 cm 处理。到了水稻成熟期, MCP 偏 3 cm 处理的籽粒吸磷量最高, 且显著高于除 DAP 偏 3 cm 和 12 cm 外的其他处理, 秸秆吸磷量则是 DAP 偏 3 cm 处理最高, 显著高于除 MCP 撒施外的其他处理。从总吸磷量上看, MCP 偏 3 cm、DAP 偏 3 cm 和 12 cm 处理均处于较高水平(41.6 ~ 43.1 kg/hm²), 显著高于不施磷、MCP 偏 12 cm 和 DAP 撒施处理, 其中 MCP 偏 3 cm 处理较 MCP 偏 12 cm 处理高 13%。在广德, 分蘖期的水稻吸磷量以 MCP 撒施、MCP 偏

表 4 水稻分蘖期和成熟期植株的含磷量和吸磷量
Table 4 P concentration and P accumulation of rice at tillering and maturing stages

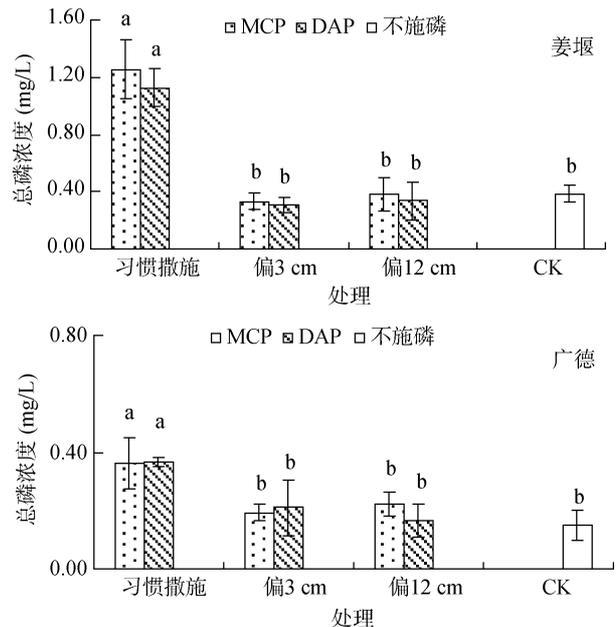
试验地	处理	含磷量(g/kg)			吸磷量(kg/hm ²)				磷肥表观利用率(%)
		分蘖期	成熟期		分蘖期	成熟期		籽粒+秸秆	
			籽粒	秸秆		籽粒	秸秆		
姜堰	不施磷	3.76 ab	2.65 bc	1.18 d	18.7 d	25.9 c	10.4 c	36.4 c	-
	MCP 撒施	3.88 a	2.65 bc	1.54 ab	31.6 a	27.1 bc	13.4 ab	40.5 b	6.38 b
	MCP 偏 3 cm	3.94 a	2.89 a	1.33 bc	28.2 ab	29.6 a	12.2 b	41.8 ab	8.25 ab
	MCP 偏 12 cm	3.21 b	2.46 c	1.37 bc	20.5 cd	24.3 d	12.8 b	37.1 c	1.12 c
	DAP 撒施	3.44 ab	2.67 b	1.29 cd	28.8 ab	26.2 c	11.9 bc	38.1 c	2.67 c
	DAP 偏 3 cm	3.27 b	2.81 ab	1.58 a	25.8 ab	28.4 ab	14.8 a	43.1 a	10.34 a
	DAP 偏 12 cm	3.68 ab	2.74 ab	1.4 abc	22.8 bc	28.6 ab	13.2 b	41.6 ab	7.96 ab
广德	不施磷	3.2 c	2.28 c	1.22 c	14.6 c	16.7 c	7.4 c	24.1 d	-
	MCP 撒施	3.65 bc	2.85 b	1.20 c	22.1 a	20.5 bc	7.4 c	27.9 c	5.80 c
	MCP 偏 3 cm	3.83 bc	3.41 a	1.38 b	23.5 a	26.7 a	8.9 b	35.5 a	17.39 a
	MCP 偏 12 cm	3.5 bc	3.32 a	1.14 c	16.1 bc	24.8 a	6.9 c	31.7 bc	11.58 bc
	DAP 撒施	4.64 a	3.44 a	1.22 c	21.4 ab	24.5 ab	6.9 c	31.4 bc	11.07 bc
	DAP 偏 3 cm	4.23 ab	3.61 a	1.59 a	22.5 a	28.4 a	10.8 a	39.2 a	23.06 a
	DAP 偏 12 cm	3.59 bc	3.46 a	1.61 a	18.5 ab	26.1 a	10.6 a	36.8 a	19.30 a

3 cm和DAP偏3 cm处于较高水平(22.1~23.5 kg/hm²),显著高于不施磷、MCP偏12 cm处理。到了水稻成熟期,MCP偏3 cm和12 cm以及DAP偏3 cm和12 cm处理的籽粒吸磷量处于较高水平,显著高于不施磷和MCP撒施处理,而秸秆吸磷量则以DAP偏3和12 cm处理最高,显著高于其他处理。从总吸磷量上看,MCP偏3 cm、DAP偏3和12 cm处理处于较高水平,显著高于其他各处理,其中MCP偏3 cm处理较MCP偏12 cm处理高12%。由于采用统一的磷肥用量,磷肥表观利用率所呈现的结果与总吸磷量一致。

由表3可知,试验地点、磷肥类型和施用方式均对水稻总吸磷量有显著影响,其中试验地和其他两个因子间存在交互效应,表中还显示磷肥类型和施用方式在水稻秸秆吸磷量上也存在交互效应。通过在相同施用方式下对两种磷肥类型进行比较,可以发现,当磷肥偏12 cm穴施时,DAP的总吸磷量较MCP分别高12%(姜堰)和16%(广德),差异均达显著水平。

2.3 不同施磷处理对地表水总磷浓度的影响

从图1可以看出,不同的磷肥施用方式对施肥后第10天的地表水总磷浓度有显著影响。在姜堰,习惯撒施处理的地表水总磷浓度(1.13~1.26 mg/L)显著高于其他处理(0.31~0.38 mg/L),平均增幅为245%。在广德,同样显示习惯撒施处理的地表水总磷浓度(0.36~0.37 mg/L)显著高于其他处理(0.15~0.22 mg/L),平均增幅为94%。由表3可知,两地的地表水总磷也存在显著差异,且试验地和磷肥施用方式间存在交互作用。



(图中小写字母不同表示每个试验地处理间差异达 $P < 0.05$ 显著水平)

图 1 施磷第 10 天地表水总磷浓度

Fig. 1 Total P concentration in surface water in 10 days after P was applied

3 讨论

水稻田在淹水环境下,由于三价铁离子的还原和钙磷化合物溶解度的增加,提高了土壤磷对水稻的有效性,所以通常田间磷养管理遵循“重旱轻水”的策略^[26]。从本研究中也可以看出,两地的施磷处理较不施磷对照均无显著增产。然而,现有研究表明:稻季施用的磷肥可供下季旱作的小麦或油菜所利用,

且仅在旱季小麦施用磷肥会导致土壤磷素的耗竭,因此水旱两季均施磷肥才是最有效的施磷策略^[27-29]。在此基础上,如何在水稻中合理施用磷肥才是人们的关注焦点。本研究结果显示,在水稻分蘖期,磷肥撒施处理的生物量和磷素吸收大多处于较高水平,而到水稻成熟期,则是偏 3 cm 穴施处理的吸磷量表现最好,这是由于水稻在生长前期,根系大多分布于浅层土壤,撒施于表面的磷肥可供水稻直接利用,但随着根系的向下伸长,磷肥深施的优势也逐渐凸显出来,还有一部分原因可能归功于少量氮肥与磷肥共同穴施。然而,对于偏 12 cm 穴施处理,尤其是 MCP,其磷素吸收的表现也不够理想,两地 MCP 偏 3 cm 处理的水稻总吸磷量较 MCP 偏 12 cm 处理分别高 13% 和 12%,这可能与施用距离过远不利于根肥接触有关,直接证据是有研究表明:磷肥即使在淹水土壤中的迁移距离也只有 6.5 cm^[30],远小于偏 12 cm 的施磷距离。可见磷肥的施用位置对水稻生长有一定的影响,本试验土壤的本底磷已满足水稻生长需要,因此,处理间的产量无显著差异,若在缺磷土壤上进行该项试验,不同处理间水稻产量的差异则会更加明显。另外,值得注意的是,DAP 偏 12 cm 处理对水稻磷素吸收利用与 DAP 偏 3 cm 没有明显差异,且显著优于 MCP 偏 12 cm 处理,姜堰广德两地的 DAP 偏 12 cm 处理的水稻总吸磷量分别较 MCP 高 12% 和 16%,我们推测这主要是两种磷肥在土壤中迁移性能的差异所致,其证据有金亮等^[31-32]曾在土壤保持田间持水量下对 MCP 和 DAP 磷肥的迁移进行比较,结果表明 DAP 的迁移距离较 MCP 远 2~3 cm,本试验是在完全淹水条件下进行,且 DAP 较 MCP 有更好的水溶性,因此 DAP 的迁移距离理应更远。

农田氮磷流失造成的水体富营养化一直以来都是人们较关心的问题^[33]。水田地地表排水不同于旱地,在较为集中的雨季季节或是遇到狂暴雨时,水田可能会被被迫进行地表排水^[34]。本研究结果显示,在施磷第 10 天,姜堰广德两地磷肥表面撒施造成地表水总磷的浓度较磷肥穴施分别高 245% 和 94%,说明磷肥的深施能够在一定程度上减轻地表排水造成的磷损失。从结果中还可以看出,姜堰的地表水总磷明显高于广德,两地的本底磷水平是原因之一,还可能与两个试验地的土壤质地不同有关,姜堰地区土质偏砂,广德土质偏黏,有研究表明,土壤质地/黏粒含量对土壤磷吸附能力有显著影响^[35-36],李祖荫和吕家琰^[37]在物理黏粒的固磷特性研究中发现石灰性土壤中影响磷吸附固定的主要是 0.01 mm 物理性黏

粒,从两地的土壤颗粒组成来看,姜堰的供试土壤中 0.05~0.002 mm 颗粒占 34.5%,而广德的供试土壤中 0.05~0.002 mm 颗粒占 61.2%。可见对于保肥性较差的砂质土壤更应注重磷肥的施用方式。

通过以上分析得知,虽然在本研究中水稻施磷没有明显的增产,但选择适当的磷肥穴施位置依然有两个主要优势:促进水稻的磷素吸收利用;对于降水充沛的姜堰和广德两个地区,能够有效缓解径流排水造成的磷流失。在水稻插秧施肥一体化的机械设计上应注意不同磷肥所适宜的施用距离范围,如本试验中,磷酸二氢钙的施用距离不宜离水稻秧苗过远,而磷酸氢二铵的施用距离则在一定范围内均可。

参考文献:

- [1] 安迪,杨令,王冠达,等. 磷在土壤中的固定机制和磷肥的高效利用[J]. 化工进展, 2013, 32(8): 1 967-1 973
- [2] 朱昌锋. 淹水对土壤磷有效性影响的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2008
- [3] 李瑞鸿,洪林,罗文兵. 漳河灌区农田地表排水中磷素流失特征分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 102-106
- [4] 司友斌,王慎强,陈怀满. 农田氮、磷的流失与水体富营养化[J]. 土壤, 2000, 32(4): 188-193
- [5] 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
- [6] 卜容燕,任涛,鲁剑巍,等. 水稻-油菜轮作条件下磷肥效应研究[J]. 中国农业科学, 2014, 47(6): 1 227-1 234
- [7] 刘洪峰,邓家琴,万江红. 不同磷肥对水稻产量及肥料利用率的影响[J]. 耕作与栽培, 2015(2): 23-24
- [8] Slaton N A, Wilson C E, Norman R J, et al. Rice response to phosphorus fertilizer application rate and timing on alkaline soils in Arkansas[J]. Agronomy Journal, 2002, 94(6): 1 393-1 399
- [9] 漆光成,唐新莲,左方华,等. 不同磷肥品种在石灰性水稻田的施用效果及后效[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(12): 3 616-3 617
- [10] Deubel A, Hofmann B, Orzessek D. Long-term effects of tillage on stratification and plant availability of phosphate and potassium in a loess chernozem[J]. Soil & Tillage Research, 2011, 117: 85-92
- [11] Zhang H C, Cao Z H, Shen Q R, et al. Effect of phosphate fertilizer application on phosphorus (P) losses from paddy soils in Taihu Lake Region I. Effect of phosphate fertilizer rate on P losses from paddy soil[J]. Chemosphere, 2003, 50(P11 S0045-6535(02)00207-26): 695-701
- [12] Singh D K, Sale P W G, Routley R R. Increasing phosphorus supply in subsurface soil in northern Australia: Rationale for deep placement and the effects with various crops[J]. Plant and Soil, 2005, 269(1-2): 35-44
- [13] 赵亚丽,杨春收,王群,等. 磷肥施用深度对夏玉米产量和养分吸收的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(23): 4 805-4 813

- [14] Gealy D R. Deep phosphorus fertiliser placement and reduced irrigation methods for rice (*Oryza sativa* L.) combine to knock-out competition from its nemesis, barnyard grass (*Echinochloa crus-galli* (L.) P. Beauv) [J]. *Plant and Soil*, 2015, 391(1-2): 427-431
- [15] Matar A E, Borwn S C. Effect of rate and method of phosphate placement on productivity of durum wheat in mediterranean environments[J]. *Fertilizer Research*, 1989, 20: 75-82
- [16] 黄庆裕, 蒲才潮. 碳酸氢铵全层深施对水稻的增产效果[J]. *土壤肥料*, 2006(1): 60-61
- [17] 陈荣业, 范钦桢. 碳铵粒肥在非石灰性水稻土上深施的氮素供应状况[J]. *土壤学报*, 1978(1): 75-82
- [18] Shen J, Li C, Mi G, et al. Maximizing root/rhizosphere efficiency to improve crop productivity and nutrient use efficiency in intensive agriculture of China[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2013, 64(5): 1 181-1 192
- [19] 王火焰, 周健民. 根区施肥——提高肥料养分利用率和减少面源污染的关键和必需措施[J]. *土壤*, 2013, 45(5): 785-790
- [20] 王绍辉, 张福墁. 局部施肥对植株生长及根系形态的影响[J]. *土壤通报*, 2002, 33(2): 153-155
- [21] Lynch J P. Root phenes for enhanced soil exploration and phosphorus acquisition: Tools for future crops[J]. *Plant Physiology*, 2011, 156(3): 1 041-1 049
- [22] 朱祝军, 孙羲, Sattelmacher B, 等. 局部供磷对玉米根系生长、磷吸收速率的影响[J]. *植物生理学报*, 1993(3): 221-228
- [23] 林雅茹, 唐宏亮, 申建波. 野生大豆根系形态对局部磷供应的响应及其对磷吸收的贡献[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(1): 158-165
- [24] 陈雄飞, 罗锡文, 王在满, 等. 水稻穴播同步侧位深施肥技术试验研究[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(16): 1-7
- [25] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000
- [26] 范明生, 江荣风, 张福锁, 等. 水旱轮作系统作物养分管理策略[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(2): 424-432
- [27] Timsina J, Connor D J. Productivity and management of rice-wheat cropping systems: Issues and challenges[J]. *Field Crops Research*, 2001, 69(2): 93-132
- [28] 卜容燕, 任涛, 鲁剑巍, 等. 水稻-油菜轮作条件下磷肥效应研究[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(6): 1 227-1 234
- [29] Yadvinder-Singh, Dobermann A, Bijay-Singh, et al. Optimal phosphorus management strategies for wheat-rice cropping on a loamy sand[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(4): 1 413-1 422
- [30] 康欧. 不同供肥模式下磷肥在肥迹微域的迁移与转化特征[D]. 成都: 四川农业大学, 2010
- [31] 金亮, 周健民, 王火焰, 等. 石灰性土壤肥际磷酸二铵的转化与肥料磷的迁移[J]. *磷肥与复肥*, 2008, 23(5): 14-18
- [32] 金亮, 周健民, 王火焰, 等. 石灰性土壤肥际磷酸一钙的转化及肥料磷的迁移[J]. *土壤*, 2009, 41(1): 72-78
- [33] 司友斌, 王慎强, 陈怀满. 农田氮、磷的流失与水体富营养化[J]. *土壤*, 2000, 32(4): 188-193
- [34] 陈俊, 姚菊强, 俞永远, 等. 施磷水田田表排水磷素流失特征及其机制研究[J]. *广东农业科学*, 2007(8): 36-39
- [35] 沈仁芳, 蒋柏藩. 黄淮海地区潮土对磷的吸附和解吸特性[J]. *土壤*, 1993, 25(2): 68-70
- [36] 夏瑶, 娄运生, 杨超光, 等. 几种水稻土对磷的吸附和解吸特性研究[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(11): 1 369-1 374
- [37] 李祖荫, 吕家珑. 碳酸钙与物理粘粒固磷特性的研究[J]. *土壤*, 1995, 27(6): 304-310

Effects of Application Methods of Phosphorus Fertilizers on the Growth and Phosphorus Absorption of Rice in Jiangyan and Guangde Regions

JIANG Shangtao^{1,2}, WANG Huoyan^{1*}, ZHOU Jianmin¹, LIU Xiaowei^{1,2}, CHEN Zhaoming^{1,2}, YAN Taotao^{1,3}

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China*; 2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 3 *Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China*)

Abstract: A field micro-plot experiment was conducted to determine the effects of different placements and species of phosphorus (P) fertilizers on rice growth, P uptake by rice and P concentration in surface water after fertilization, providing a scientific basis for root zone P fertilization. P fertilizer species included mono-calcium phosphate (MCP) and diammonium phosphate (DAP), P fertilizer application methods included: 1) surface broadcasting; 2) point placement with 5 cm below and 3 cm away from seedling; 3) point placement with 5 cm below and 12 cm away from seedling. The results showed that no differences were observed between P and P-free treatments in rice yield in both regions, and rice yield in Jiangyan was greater than that in Guangde. Total P uptake by rice was significantly affected by P applied placements. The yield for 3 cm-point placement of MCP was 13% and 12% higher than that for 12 cm-point placement of MCP in Jiangyan and Guangde, respectively. The yield for the treatment with DAP was significantly higher than that with MCP in 12 cm-point placement, and increased percentages were 12% and 16% in Jiangyan and Guangde, respectively. Although relatively high total P uptake by rice was found in surface broadcasting treatments at tillering stage, 3 cm-point placement performed better than surface broadcasting at maturing stage. After 10 days of fertilization, P concentration in surface water for surface broadcasting treatment was 245% (Jiangyan) and 94% (Guangde) higher than that for point placement treatment. These results suggested that: 1) reasonable point placement of P application not only promoted P uptake by rice, but also inhibited P loss from paddy fields with surface water drainage; 2) DAP could place relatively more far away from seedling than MCP.

Key words: Rice; Phosphorus fertilizer; Placement; Mono-calcium phosphate; Diammonium phosphate