

水分与有机酸对水稻土肥际微域磷迁移转化的影响^①

陈小琴，康 欧，周健民*，王火焰

(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)

摘 要：通过土柱培养实验对肥际微域中磷的迁移转化及其受水分和有机酸的影响进行了研究。结果表明：随着培养时间延长，土壤肥际微域中水溶性磷和有效磷的累积量均显著下降，从微域角度证明了磷肥进入土壤后随时间延长有效性降低。淹水和配施草酸均有利于水溶性磷和有效磷的迁移扩散，但淹水条件下配施草酸与否肥际微域水溶性磷和有效磷的累积量均显著低于 60% 田间持水量下的累积量。60% 田间持水量下配施草酸均能增加肥际微域中水溶性磷和有效磷的累积量，而淹水条件下则相反，配施草酸显著降低了肥际微域中水溶性磷和有效磷的累积量。

关键词：肥际微域；磷；草酸；淹水

中图分类号：S143.2

肥料施入土壤后，特别在集中施用，肥料颗粒附近会形成一种特殊的微域环境，这就是肥际微域^[1]。肥际微域中养分浓度数倍或十几倍于整个土体，因而该微域中各种理化生物学性质与整个土体差异较大，该微域中肥料的变化与肥料施用效果有密切关系。对于磷肥而言，由于磷的移动性较差和易于吸持或固定，磷的肥际效应更为明显。反过来，肥际微域中磷的反应也进一步影响着磷的迁移与转化^[2-4]。

缺磷土壤植物根系分泌物中可以分离出较多低分子量有机酸^[5]，因而低分子量有机酸对磷在土壤中迁移转化的影响也是值得关注的研究点之一^[6-10]。但低分子量有机酸对肥际微域中磷迁移和转化的实际影响研究尚不多见。水分是肥料在土壤中的反应的一个重要因素。一般认为，土壤含水量的增加会导致磷由施肥点向土体扩散量的增加^[11-12]，对不同水分含量下肥际微域中磷的迁移与转化的研究具有一定的重要意义。因此本研究拟以湖北潜江水稻土为研究对象，采用室内土柱培养法，对 60% 田间持水量和淹水两种水分条件下配施草酸与否的磷酸二氢铵在肥

际微域中的迁移与转化进行研究，以了解肥际微域中水分和有机酸对磷的影响，为磷肥当季利用率提高和新型高效磷肥的研制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤为水稻土，属潜育水耕型人为土，采自湖北潜江，为耕层(0 ~ 15 cm)土壤，土样经风干后，研磨，过 1 mm 筛备用。供试土壤基本理化性质用常规方法测定^[13]，结果如表 1 所示。

供试磷肥和有机酸品种为分析纯磷酸二氢铵(MAP)和草酸(OA)。

1.2 研究方法

本研究采用室内土柱培养法。所用培养容器为内圆外方的蜡筒，高 11 cm，内径 13 cm，由石蜡和凡士林按 2 : 1 比例在水浴中熔化并混匀后，注入模具浇铸而成^[14]。蜡筒一端用保鲜膜封口，将 1 690 g 土调节水分达 60% 田间持水量后分 3 次均匀装入蜡筒，土壤体积质量为 1.3 g/cm³，土柱高约 10 cm。后

表 1 供试土壤基本理化性质
Table 1 Agrochemical properties of soil tested

质地	pH (H ₂ O, 1 : 2.5)	CEC (cmol/kg)	速效磷(mg/kg)	铵态氮(mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	有机质 (g/kg)	CaCO ₃ (g/kg)
砂粉土	8.05	14.7	8.72	29.2	69	21.8	27.1

基金项目：国家重点基础研究发展计划项目(2007CB109301，2013CB127401)，国家自然科学基金项目(41271309)和国际植物营养研究所(IPNI)合作项目(Nanjing-11)资助。

* 通讯作者(jmzhou@issas.ac.cn)

作者简介：陈小琴(1974—)，女，江苏盐城人，博士，主要从事土壤肥力与植物营养、养分交互作用方面的研究。E-mail: xqchen@issas.ac.cn

用保鲜膜将整个蜡筒密封,垂直放于 20℃培养箱内避光平衡 48 h。

本实验共设单施磷酸二氢铵(MAP)、磷酸二氢铵配施草酸(MAP+OA)及不施肥对照(CK)3 个处理。肥料用量分别为:磷酸二氢铵 14.0 g(纯磷用量为 3.86 g),草酸 2.0 g,施磷肥处理磷肥用量相同。每个处理各重复 3 次。在土柱水分平衡之后将相应处理肥料施于土柱顶端,并在肥料表层铺盖 1 cm 厚已调节好水分的土壤。对于淹水处理的土柱,分层调节水分达 80% 田间持水量,平衡 48 h 后将相应肥料施于土柱顶端,并加盖 1 cm 厚已调节好水分的土壤,从顶端缓慢喷入去离子水,平衡后使淹水层达 1 cm。装好的土柱用保鲜膜密封,放入培养箱培养,并分别在培养 30 天和 90 天后去除保鲜膜,继续在培养箱里落干培养 30 天(此时土壤水分含量约为 60% 田间持水量)后,将蜡筒从顶端按 2.5 mm 厚度切成薄片,对于 60% 田间持水量的土柱在培养 60 天和 120 天后分别取样,进行分析测试。土样水溶性和酸溶性磷含量的提取测定方法^[15]:称取相当于 1 g 干土重的鲜土样于具塞塑料离心管中,加入 5 ml 去离子水振荡 10 min,离心,取上清液,重复 1 次,混合两次离心液,所得磷量为水溶性磷含量;继续向离心管中加入 5 ml

的 1 mol/L HCl 溶液,振荡 10 min 后离心分离,取上清液,再重复 2 次,混合 3 次离心液所得磷量为酸溶性磷含量。有效磷含量采用 Olsen 法^[16]提取测定。

1.3 数据分析

本实验土样中磷含量用干基表示,数据统计分析通过 Excel 2003 和 SPSS 17.0 软件完成。

2 结果与分析

2.1 水溶性磷在肥际微域中的含量分布

水溶性磷在肥际微域中的含量变化如图 1 所示。培养 60 天后,单施磷酸二氢铵处理(MAP)在 60%田间持水量条件下和淹水土壤中水溶性磷迁移距离分别为 42.5 mm 和 57.5 mm。配施草酸后,两种水分条件下水溶性磷的迁移距离均增加了 7.5 mm。培养时间延至 120 天后,60% 田间持水量下,MAP 和配施草酸两种处理中水溶性磷在土壤中的迁移距离比 60 天时增加了 7.5 mm,淹水条件下 MAP 和配施草酸两种处理水溶性磷在土壤中的迁移距离较 60 天时差异不明显。配施草酸与否,与 60% 田间持水量相比,淹水条件下 MAP 中水溶性磷在肥际微域中的迁移距离均相对较大。这样的结果可能与淹水时质流也是磷在土壤中一种重要的迁移

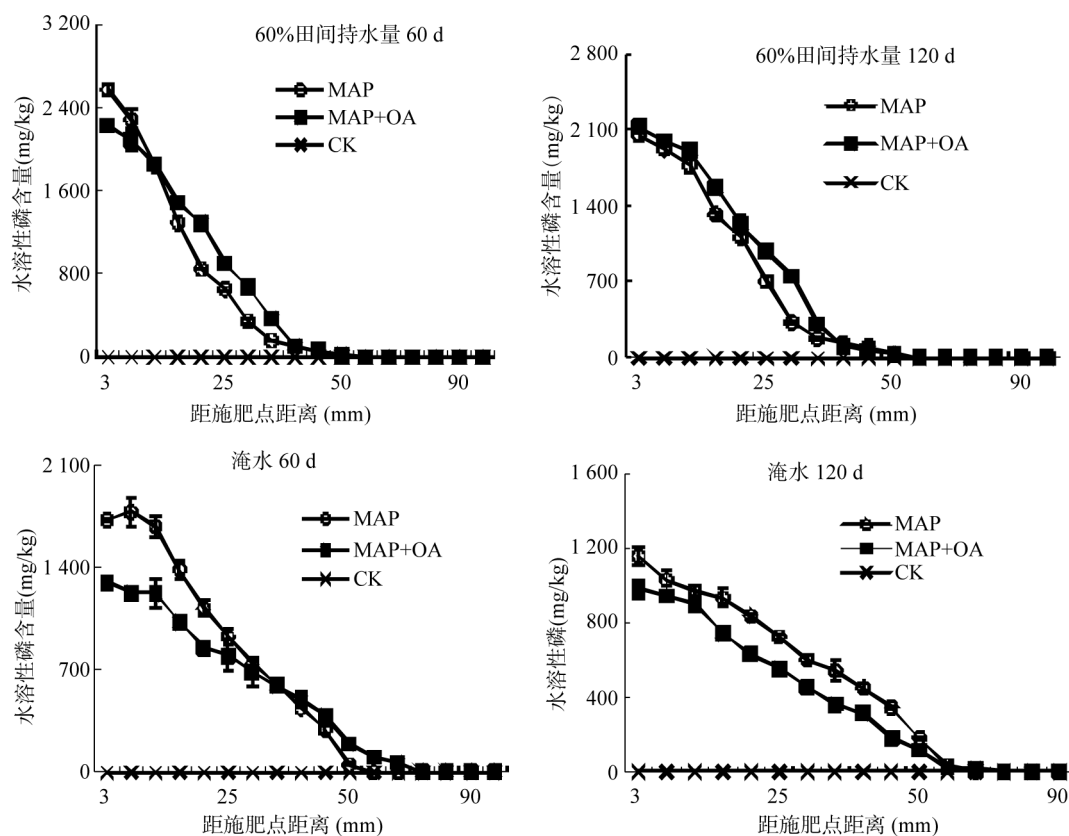


图 1 水分和草酸对水稻土肥际微域中水溶性磷的影响

Fig. 1 Effect of moisture and OA on the content of water-extractable P in the fertsphere of paddy soil

方式有关^[17]。

从图 1 还可以看出,各处理水溶性磷的含量均随着距施肥点距离的增加而减少。培养相同时期后,配施草酸与否,距施肥点相应距离的肥际微域中水溶性磷含量均为 60% 田间持水量条件下的更高。培养时间从 60 天延至 120 天后,施肥点附近(0~5 mm 区域)土壤水溶性磷含量均显著下降。图 2 所示为两种水分条件下各处理培养 120 天后水溶性磷含量较 60 天时的变化情况((60 天磷含量 - 120 天磷含量)/60 天磷含量 × 100%)。结果显示,60% 田间持水量下水溶性磷含量下降率随着距施肥点距离的增加而

逐渐下降,在距施肥点距离 12.5 mm 处水溶性磷含量下降率为负,而淹水条件下在距施肥点 30 mm 处水溶性磷含量下降率仍保持在 30% 左右。表明随着培养时间的增加,60% 田间持水量条件下肥际微域土壤水溶性磷有向下迁移的趋势,淹水条件下微域土壤水溶性磷含量随培养时间延长而降低,可能与土壤对磷的吸持或固定有关。两种水分条件下配施草酸均对距施肥点相应距离肥际微域水溶性磷含量的下降有缓冲作用。

2.2 有效磷在肥际微域中的含量分布

图 3 所示为肥际微域中有效磷含量分布。培养 60 天后,60% 田间持水量条件和淹水条件下 MAP

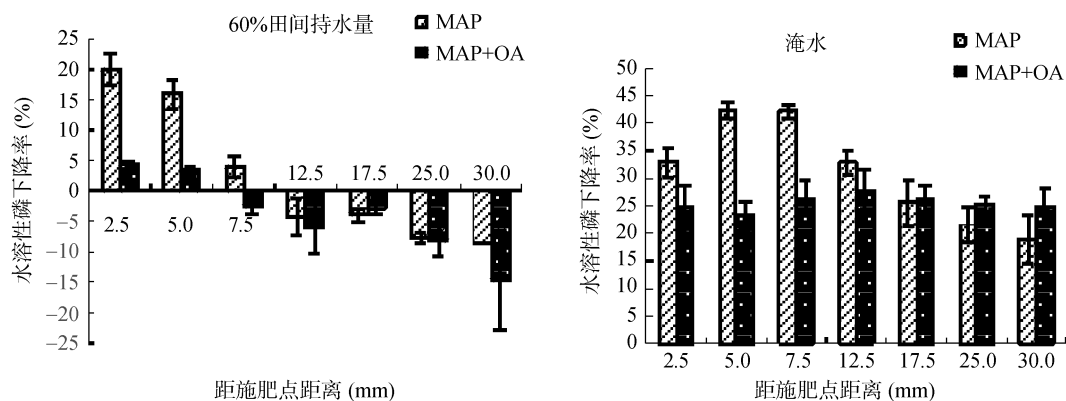


图 2 培养 120 天与培养 60 天后水稻土肥际微域水溶性磷含量差异

Fig. 2 The difference of water-extractable P contents in the fertilosphere of paddy soil after incubation for 60d and 120d

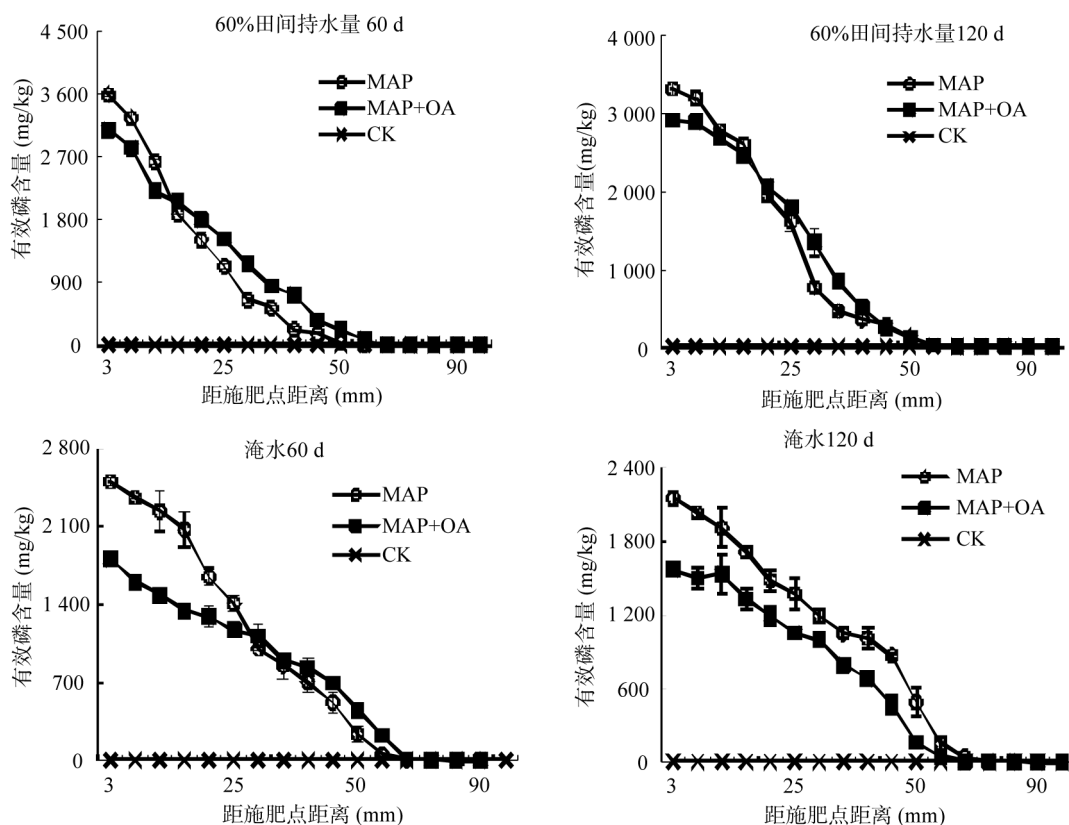


图 3 水分和草酸对水稻土肥际微域中有效磷的影响

Fig. 3 Effect of moisture and OA on the content of Olsen-P in the fertilosphere of paddy soil

处理有效磷分布距离分别可至 50 mm 和 65 mm。配施草酸后, 60% 田间持水量下有效磷扩散距离增加了 15 mm, 而淹水条件下扩散距离几乎不变。培养时间从 60 天延至 120 天后, 两种水分条件下各处理有效磷扩散距离几乎无变化。

随着距施肥点距离的增加, 有效磷含量逐渐减少。培养相同时期后, 配施草酸与否, 距施肥点相应距离的肥际微域中有效磷含量均为 60% 田间持水量条件下的更高。培养时间从 60 天延至 120 天后, 施

肥点附近(0 ~ 5 mm 区域)土壤有效磷含量均显著下降。两种水分条件下各处理培养 120 天后有效磷含量较 60 天时的变化结果显示(图 4), 60% 田间持水量下距施肥点不同距离有效磷含量随培养时间的延长变化不大或有所增加。两种水分条件下配施草酸均对距施肥点相应距离肥际微域有效磷含量的变化有缓冲作用。

2.3 酸溶性磷在肥际微域中的含量分布

肥际微域酸溶性磷的分布模式与有效磷相似(图 5)。培养 60 天或 120 天后, 60% 田间持水量

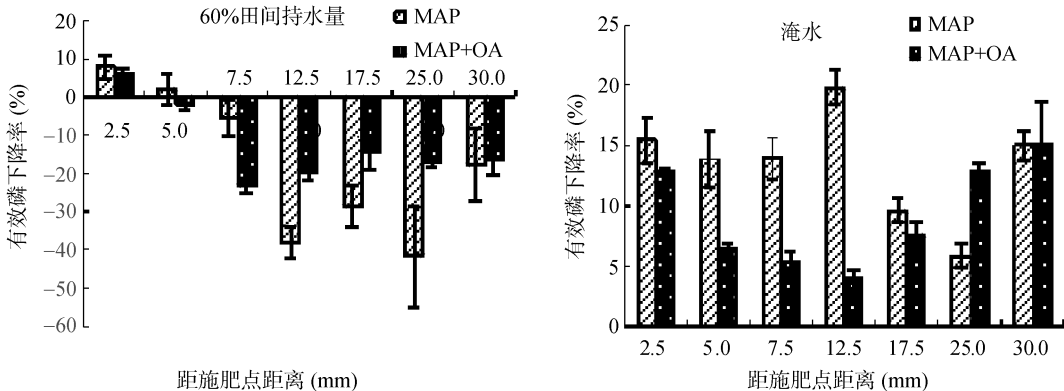


图 4 培养 120 天与培养 60 天后水稻土肥际微域有效磷含量差异

Fig. 4 The difference of Olsen-P contents in the fertilosphere of paddy soil after incubation for 60d and 120d

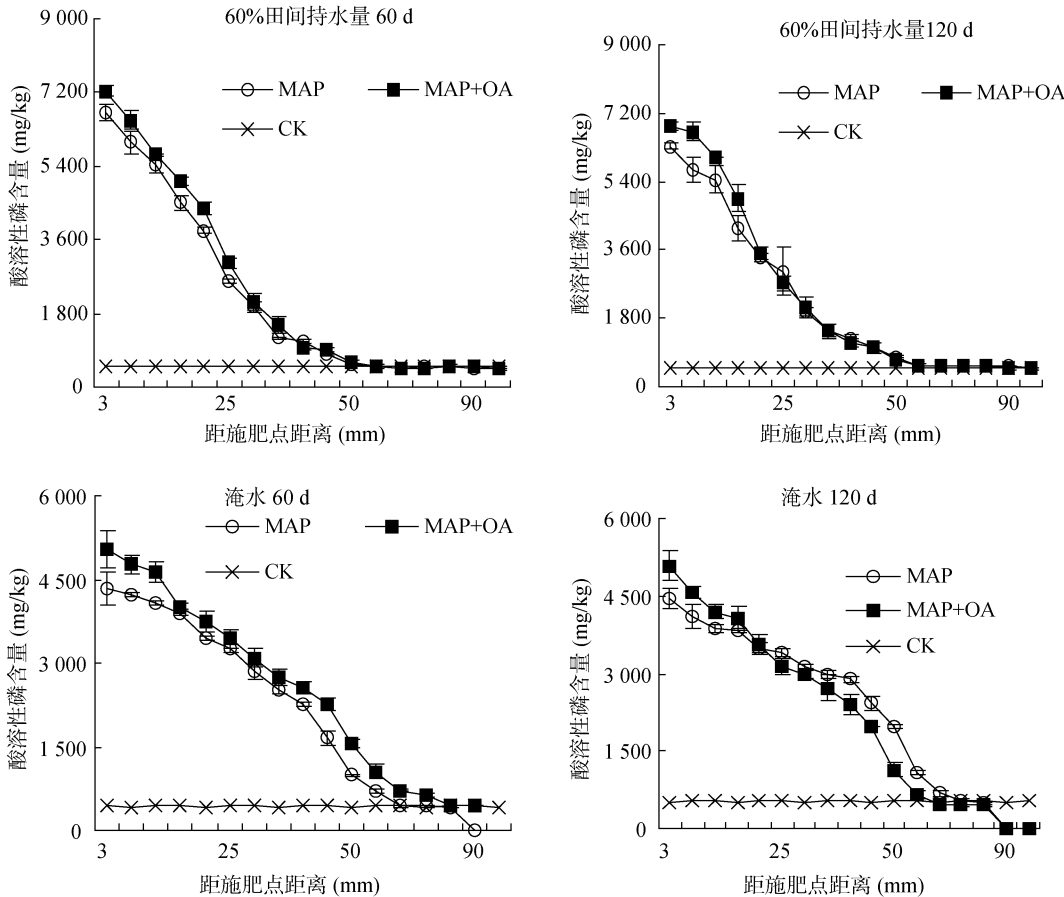


图 5 水分和草酸对水稻土肥际微域中酸溶性磷的影响

Fig. 5 Effect of moisture and OA on the content of HCl-extractable P in the fertilosphere of paddy soil

下肥际微域土壤酸溶性磷含量明显高于淹水条件下距施肥点相应距离土壤酸溶性磷含量。配对 *T* 检验表明,随着培养时间的延长,两种水分条件下土壤肥际微域里酸溶磷的含量均无显著变化。

2.4 肥际微域中不同形态磷累积量

比较肥际微域中不同形态磷的累积量(表 2)可以看出,随着培养时间的延长,两种水分条件下各施肥处理土壤肥际微域中水溶性磷和有效磷的累积量均有显著下降。进一步说明磷进入土壤后随时间延长有效性降低。淹水条件下各处理肥际微域水溶性磷和有效磷的累积量均显著低于 60% 田间持水量下的累积量。60% 田间持水量下培养 60 天或 120 天,配施草酸均能增加肥际微域中水溶性磷和有效磷的累积量,而淹水条件下则相反,配施草酸显著降低肥际微域中水溶性磷和有效磷的累积量。较多在好气条件下进行的研究表明,包括草酸等在内的有机酸或小分子量有机酸通过对土壤磷的活化或对有效态磷的络合,提高磷的有效性^[18]。章永松等^[19]通过好气与淹水条件下猪粪、稻草和纤维素对磷的活化实验发现,好气条件下供试有机肥均对土壤无机磷有活化作用,而淹水条件下这些有机肥

则明显增加土壤对磷的固定,并指出这与有机肥对磷的活化被淹水条件下新形成的铁氧化物对磷的吸附所掩盖有关,也即与“铁的泵升”作用有关^[20-21]。因本实验切片所得土样有限,未能测试其中 Fe-P 含量,但本组另有相同供试材料的相关研究结果表明,淹水 150 天后 Fe-P 含量可达施磷量的 15% 左右,而非淹水条件下测得 Fe-P 含量保持在施磷量的 5% 左右^[22]。由上述研究推断,本实验中淹水条件下配施草酸对磷有效性的降低有可能与 Fe-P 含量的增加有关。

酸溶性磷反映了土壤固相中的磷,因此可以将每一土柱所浸提水溶性磷与酸溶性磷浸提量之和减去空白处理土柱的浸提磷量作为来自于肥料中的总磷量^[23],计算磷肥的回收率(总磷量占施磷量的百分数)和各形态磷量占总施磷量的百分数,结果见表 4。在培养 120 天和 60 天后不同施肥处理磷的回收率均大于 70%,淹水条件下磷的回收率相对较低。培养 120 天后磷的回收率均小于培养 60 天的结果,尤其是在淹水条件下。磷肥施入土壤后,绝大部分成为土壤固相中的磷,仅有一小部分以水溶态磷存在。

表 2 水稻土肥际微域中不同形态磷累积量
Table 2 Amount of various forms of P from the fertilizer in the fertilosphere of paddy soil

培养时间(d)	水分条件	肥料处理	水溶性磷累积量 (g)	酸溶性磷累积量(g)	有效磷累积量(g)
60	60%田间持水量	MAP	1.00 ab	2.32 ab	1.45 b
		MAP+OA	1.04 a	2.36 a	1.57 a
	淹水	MAP	0.87 d	2.22 ab	1.26 d
		MAP+OA	0.72 e	2.40 a	1.04 f
120	60%田间持水量	MAP	0.95 c	2.33 ab	1.17 e
		MAP+OA	0.99 bc	2.34 ab	1.35 c
	淹水	MAP	0.63 f	2.12 b	1.24 d
		MAP+OA	0.49 g	2.26 ab	0.90 g

注:同列不同小写字母表示处理间差异在 $P<0.05$ 水平显著(Duncan 检验),下同。

表 3 肥料磷的回收率及各形态磷占施肥总磷量的百分比
Table 3 Percentage of P in different forms to total P amount from fertilizer

培养时间(d)	水分条件	肥料处理	回收率 (%)	酸溶性磷累积量/施磷量 (%)	水溶性磷累积量/施磷量 (%)	有效磷累积量/施磷量 (%)
60	60%田间持水量	MAP	86.4 ab	60.2 ab	26.2 ab	37.6 b
		MAP+OA	88.2 a	61.3 a	26.9 a	40.8 a
	淹水	MAP	79.9 c	57.4 ab	22.5 d	32.7 d
		MAP+OA	80.8 bc	61.1 a	18.7 e	27.1 f
120	60%田间持水量	MAP	85.1 abc	60.4 ab	24.7 c	30.2 e
		MAP+OA	86.3 ab	60.7 a	25.6 bc	34.9 c
	淹水	MAP	71.3 d	54.9 b	16.4 f	32.2 d
		MAP+OA	71.2 d	58.5 ab	12.8 g	23.3 g

3 结论

(1) 随着培养时间延长,各处理土壤肥际微域中水溶性磷和有效磷的累积量均显著下降,从微域角度证明磷肥进入土壤后随时间延长有效性降低。

(2) 淹水和配施草酸均有利于水溶性磷和有效磷的迁移扩散,但淹水条件下配施草酸与否肥际微域水溶性磷和有效磷的累积量均显著低于60%田间持水量下的累积量。60%田间持水量下配施草酸均能增加肥际微域中水溶性磷和有效磷的累积量,而淹水条件下则相反,配施草酸显著降低肥际微域中水溶性磷和有效磷的累积量,可能与淹水条件下Fe-P含量的增加有关。

参考文献:

- [1] 鲁如坤. “微域土壤学”——一个可能的土壤学的新分支[J]. 土壤学报, 1999, 36(2): 287–288
- [2] 杜振宇, 周健民. 磷在红壤肥际微域中的迁移和转化[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 1–5
- [3] 金亮, 周健民, 王火焰, 陈小琴, 杜昌文. 石灰性土壤肥际磷酸二氢铵的转化与肥料磷的迁移[J]. 磷肥与复肥, 2008, 23(5): 14–18
- [4] 杜振宇, 王清华, 周健民, 王火焰. 磷在潮土肥际微域中的迁移和转化[J]. 土壤学报, 2012, 49(4): 725–730
- [5] 胡红青, 李妍, 贺纪正. 土壤有机酸与磷素相互作用的研究[J]. 土壤通报, 2004, 35(2): 222–229
- [6] Gahoonia TS, Asmar F, Giese H, Nielsen GG, Nielsen NE. Root-released organic acids and phosphorus uptake of two barley cultivars in laboratory and field experiments[J]. Eur. J. Agron., 2000, 12: 281–289
- [7] 介晓磊, 李有田, 庞荣丽, 刘世亮, 化党领. 低分子量有机酸对石灰性土壤磷素形态转化及有效性的影响[J]. 土壤通报, 2005, 36(6): 856–860
- [8] 李成保, 徐仁扣, 肖双成. 几种有机酸对土壤中磷活动性的增强效应[J]. 土壤学报, 2005, 42(3): 508–512
- [9] Garg S, Bahl GS. Phosphorus availability to maize as influenced by organic manures and fertilizer P associated phosphatase activity in soils[J]. Bioresour. Technol., 2008, 99: 5 773–5 777
- [10] 王树起, 韩晓增, 李晓慧, 严君, 乔云发, 王守宇. 低分子量有机酸对黑土无机磷动态变化的影响[J]. 江苏农业学报, 2009, 25(4): 763–768
- [11] Sharma PK, Kalia AK. Factors influencing diffusion of phosphate in some soils of Himalayan region[J]. Indian Soc. Soil Sci., 1985, 33: 378–383
- [12] 谢学俭, 冉玮, 沈其荣, 杨春悦. 田间条件下³²P在淹水水稻土中的垂直运移[J]. 南京农业大学学报, 2003, 26(3): 56–59
- [13] 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
- [14] Khasawneh FE, Soilau JM. Soil preparation and sampling for studying ion movement[J]. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1969, 33: 476–477
- [15] Hao X, Cho CM, Racz GJ. Chemical retardation of phosphate diffusion in an acid soil as affected by liming[J]. Nutr. Cycl. Agro., 2002, 64: 213–224
- [16] Olsen SR, Cole CV, Watanabe FS, Dean LA. Estimation of available P in soils by extraction with sodium bicarbonate[J]. USDA circular, 1954, 939: 1–19
- [17] Sim T, Simard R, Joen B. Phosphorus loss in agricultural drainage: Historical perspective and current research[J]. Environ. Qual., 1998, 27: 277–293
- [18] 庞荣丽, 介晓磊, 方金豹, 谭金芳, 李有田. 有机酸对不同磷源施入石灰性潮土后无机磷形态转化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(1): 39–43
- [19] 章永松, 林咸永, 罗安程, 苏玲. 有机肥(物)对土壤中磷的活化作用及机理研究: I. 有机肥(物)对土壤不同形态无机磷的活化作用[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(2): 145–150
- [20] Sah RN, Mikkelsen DS, Hafez AA. Phosphorus behavior in flooded—drained soils. . Iron transformation and phosphorus sorption[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1989, 53: 1 723–1 729
- [21] Bartlett RJ, James BR. System for categorizing redox status by chemical field testing[J]. Geoderma, 1995, 68: 211–218
- [22] 王涛. 磷肥在土壤中的转化过程及其施用方式对水稻的有效性研究[D]. 南京: 中国科学院南京土壤研究所, 2010
- [23] Earl KD, Syers JK, McLaughlin JR. Origin of the effects of citrate and acetate on phosphate sorption by soils and synthetic gels[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1978, 43: 674–678

Effect of Moisture Conditions and OA Co-application on the Transference and Transformation of Phosphorus in the Fertisphere of A Paddy Soil from Central China

CHEN Xiao-qin, KANG Ou, ZHOU Jian-min^{*}, WANG Huo-yan

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

Abstract: The effect of moisture conditions and oxalic acid (OA) co-application was researched on the transference and transformation of phosphorus from phosphate fertilizer in the fertisphere (micro zone between fertilizer and soil) of a paddy soil from Hubei Province, central China. The results showed that the amounts of water soluble P and Olsen P were significantly reduced with the incubation time increasing. The transference and movement of water soluble P and Olsen P could be promoted by flooding or co-application of OA. But the amounts of water soluble P and Olsen P were less in soil with flooding than that with the moisture of 60% of field water capacity. The amounts of water soluble P and Olsen P in the fertisphere of soil wetted to 60% of field water capacity were increased with the co-application of OA, but decreased when the soil was flooded.

Key words: Fertisphere, Phosphorus, Oxalic acid (OA), Flooding