

施硅对土壤-水稻系统中磷迁移的影响*

李仁英^{1,2} 沈孝辉¹ 谢晓金¹ 徐向华¹ 李映雪¹ 黄文秋¹ 霍云亭¹

(1 南京信息工程大学应用气象学院, 江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044)

(2 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)

EFFECT OF SILICON ON TRANSLOCATION OF PHOSPHORUS IN SOIL-RICE SYSTEM

Li Renying^{1,2} Shen Xiaohui¹ Xie Xiaojin¹ Xu Xianghua¹ Li Yingxue¹ Huang Wenqiu¹ Huo Yunting¹

(1 Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, College of Applied Meteorology,

Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

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

关键词 水稻; 硅; 磷; 积累; 铁膜

中图分类号 S365

文献标识码 A

磷是植物所必需的营养元素,但在土壤中磷易被土壤固定从而使磷肥的当季利用率只有 10% ~ 25%,因此人们力争寻找各种途径以提高磷的当季利用率^[1-2]。由于磷、硅在化学性质和结构上具有相似性,因而许多学者展开了有关磷、硅相互作用的研究^[3-4]。胡克伟等^[5]研究发现施磷降低了土壤中硅的吸附量,并增加了土壤硅的解吸量及解吸率。施用硅酸钙等外源硅增加了土壤溶液中的磷浓度,提高了有效磷的含量^[6-7]。胡克伟等^[8]采用室内培养试验研究了施磷和施硅处理对水稻土中磷、硅存在形态的影响,结果表明,施硅影响土壤无机磷的形态,磷、硅具有相互促进肥效的关系。Ma 和 Takahashi^[3]认为,在低磷水平时,施用硅肥可使植株地上部分 P/Fe 和 P/Mn 比率增加,减少 Fe、Mn 等金属离子对植物的毒害,从而提高了缺磷植株体内磷酸的移动性和利用率。

水稻是一种典型的湿地植被,为了适应长期渍

水而引起的缺氧环境,在进化过程中形成了发达的通气组织,可以通过叶片将大气中的氧气输送至根系,使渍水土壤中存在的大量还原性 Fe^{2+} 在根表及根质体外被氧化,从而形成明显可见的红色铁氧化物、氢氧化物胶膜状包被(铁膜)^[9]。许多研究表明,水稻根表铁膜影响水稻对磷的吸收^[10-11]。水稻根表铁膜的形成受水稻品种、硫肥及磷肥等的影响^[12-14]。但目前为止,尚不清楚施硅对水稻根表铁膜形成的影响及其引起的根表铁膜中磷的变化。

对于施硅对磷元素的影响,以往的研究主要集中在土壤中硅与磷元素的交互作用,但对于硅磷交互作用而引起的磷在水稻体内的迁移及分布状况的研究目前尚不足。本研究通过水稻盆栽试验,研究了施硅对水稻不同生育期不同部位磷积累的影响,并分析了施硅条件下,土壤溶液中磷含量及水稻根表铁膜中磷富集的特点,从而为合理施肥、提高磷肥利用率提供科学依据。

* 国家自然科学基金项目(41001190,41101294,41103039)、土壤与农业可持续发展国家重点实验室项目(Y052010018)、中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室项目、江苏省自然科学基金项目(BK2010572)、大学生实践创新训练计划项目(201210300018,10CX004)共同资助

† 作者简介:李仁英(1975—),女,山东泰安人,博士,副教授,主要从事土壤重金属的行为及其环境效应研究。E-mail: ryli2005@nuist.edu.cn

收稿日期:2013-04-11;收到修改稿日期:2013-10-22

1 材料与方 法

1.1 供试土壤

供试土壤为浙江省上虞市的表层红壤性水稻

表 1 供试土壤的基本理化性质

pH	有机质 (g kg ⁻¹)	全氮 (g kg ⁻¹)	全磷 (g kg ⁻¹)	有效磷 (mg kg ⁻¹)	速效钾 (mg kg ⁻¹)	全硅 (g kg ⁻¹)	有效硅 (mg kg ⁻¹)
6.98	28.8	0.99	0.97	47.65	281	4.34	76.69
全铁 (%)	全锰 (%)	土壤机械组成(%)					
		<0.002 mm	0.002~0.02 mm	0.02~0.2 mm	0.2~2 mm		
2.10	368	30.9	27.4	40.5	1.23		

1.2 试验设计

试验设对照(不施硅肥)和施硅两个处理。对于施硅处理,在水稻移栽前向土壤中施入硅酸溶液(硅酸钠(Na₂SiO₃)溶液通过氢饱和的阳离子交换树脂,得到的交换溶液即为硅酸溶液),使外源硅施入量为 50 mg kg⁻¹。

称取 2 kg 土壤放入 PVC 盆中,向土壤中施入含 N、P 和 K 分别为 40 g L⁻¹、12.5 g L⁻¹和 25 g L⁻¹的 NH₄H₂PO₄、CO(NH₂)₂和 KCL 混合溶液 20 ml,使土壤中施入的 N、P 和 K 分别为 400 mg kg⁻¹、125 mg kg⁻¹和 250 mg kg⁻¹,充分混匀后,把土壤溶液采集器埋入土壤中央以便采集土壤溶液,每个处理设 4 个重复。

1.3 水稻培养

供试水稻采用镇稻 10 号。水稻种子用 30% 的 H₂O₂ 浸泡消毒 15 min,用蒸馏水洗净后浸泡在蒸馏水中,并在 30℃ 的培养箱中培养过夜。然后将种子转移至吸水纸上,期间不断补充水分。待发芽 5d 后,将长势一致的水稻秧苗转移至 PVC 盆中,每盆移栽 3 棵。26 d 后间苗,使每盆保留两棵长势一致的水稻秧苗。水稻生长在温室中,期间不断补充蒸馏水,使水稻在整个生长过程均保持 2~3cm 淹水层。

1.4 样品的采集、制备及测定方法

根据水稻的生长规律,在苗期、分蘖期、拔节期、孕穗期、开花期、灌浆期和成熟期 7 个时期采集水稻植株样品,并同时采集土壤溶液。将处于营养生长期的水稻样品,分为茎、叶、根三部分;将处于生殖生长的水稻样品分为茎、叶、根和穗等部位。各部位样品经自来水、蒸馏水洗净后,用吸水纸吸

干(0~20 cm)。土壤风干,拣去枯枝落叶和小石子后,过 5mm 筛备用。土壤 pH、有机质、全氮、全磷、有效磷、速效钾、全铁、全锰及土壤机械组成按照常规方法测定^[15],其结果见表 1。

干,在 70℃ 的温度下烘 48 h,测定干重。然后将植物各部位样品研磨,用 HNO₃/HClO₄ 消煮。消煮液中的磷采用钒钼黄比色法测定,土壤溶液中的磷和硅采用钼蓝比色法测定^[15]。

水稻根表铁膜的浸提与测定:植株收获后,水稻新鲜根系上的铁膜用 DCB 的方法浸提(以下均以 DCB 表示),此方法是在 Taylor 和 Crowder^[16]方法的基础上改进的。DCB 浸提液由 0.03 mol L⁻¹ Na₃C₆H₅O₇·2H₂O(柠檬酸三钠)、0.125 mol L⁻¹ NaHCO₃ 的混合液和固体的 Na₂S₂O₄(连二亚硫酸钠,俗称保险粉)组成。收获后的水稻新鲜根系用蒸馏水冲净,称取 0.7 g 左右,放至 100ml 的烧杯中,加入 0.03 mol L⁻¹ Na₃C₆H₅O₇·2H₂O、0.125 mol L⁻¹ NaHCO₃ 的混合液 30 ml 和 1.0 g Na₂S₂O₄,混合均匀后,在室温下(20~25℃)浸提 1 h,然后将浸提液转入 100 ml 容量瓶中,并用去离子水冲洗根系 3 次后定容至 100 ml。测定浸提液中的磷、铁的含量,铁氧化膜的数量用 DCB 浸提液中铁的含量与水稻根干重之比来表示(mg kg⁻¹)。

1.5 数据分析

使用统计软件 SPSS14.0 和 Excel 2003 对试验数据进行统计分析,显著性检验以及多重比较。

2 结果与讨论

2.1 施硅对土壤溶液中硅和磷含量的影响

图 1 是水稻不同生长阶段土壤溶液中硅和磷的含量变化。从图 1a 中可知,随着水稻的生长,土壤溶液中的硅含量逐渐减少,在灌浆期达到最小值,成熟期又有所回升。在水稻的营养生长阶段,与对

照相比,施硅增加了土壤溶液中的硅含量,在苗期达到显著差异($p < 0.05$)。而在水稻的生殖生长期,施硅减少了土壤溶液中的硅含量,在灌浆期和成熟期达到了显著差异($p < 0.05$)。从图 1b 可知,随着水稻的生长,土壤溶液中的磷含量逐渐降低,在孕穗期基本达到平稳。在水稻的苗期、拔节期和孕穗期,施硅增加了土壤溶液中的磷含量,但并未达到显著性差异。但在成熟期,施硅使土壤溶液中的磷含量显著增加了 97% ($p < 0.05$)。施硅增加土壤溶液中磷含量的可能原因是土壤施硅之后,硅酸根离子与磷酸根离子之间竞争吸附位点,从而使土

壤磷解吸到土壤溶液中^[8]。但在水稻的大部分生长阶段,施硅并未显著增加土壤溶液中的磷含量。笔者前期的研究表明,土壤对磷的解吸量与施硅量有关,施硅量越大,磷的解吸量也就越大。在本研究中,土壤的施硅量较小(为 50 mg kg^{-1}),因此,对于大部分的生长阶段,施硅未显著增加土壤溶液中的磷含量。而在成熟期,施硅显著增加土壤溶液中的磷含量,可能与成熟期水稻的生命活动减小,泌氧能力降低,从而导致土壤中部分闭蓄态磷和铁锰氧化态磷释放至土壤溶液中有关。

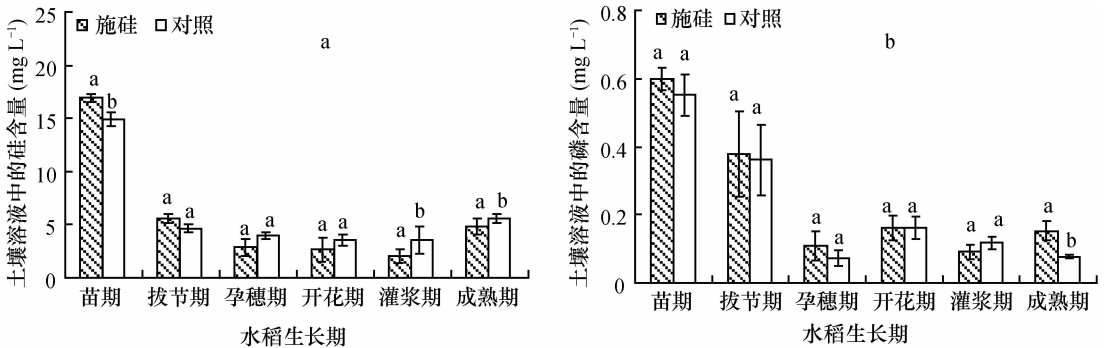


图 1 土壤溶液中的硅(a)和磷(b)在水稻不同生长期的含量变化

一般而言,土壤施入硅肥后,土壤溶液中的硅含量较对照高。而在本研究中,施硅对土壤溶液中硅含量的影响因水稻生育期不同而具有一定差异。据研究,水稻是典型的喜硅作物,水稻对硅的吸收量与水稻的生长阶段有很大关系,水稻生殖期的吸硅量占全生育期的 65.3% ~ 66.5%,而水稻营养期吸硅量仅占 9.1% ~ 9.6%^[17]。在水稻的营养生长期(本研究的苗期及拔节期),由于水稻对硅的需求量较少,因此,土壤溶液中的硅含量主要与施硅量和土壤的理化性质有关。但在生殖生长期,由于水稻对硅的吸收量增大,因此,土壤溶液中的硅含量与水稻的吸收能力有很大关系。由表 2 可知,土壤中施硅促进了水稻的生长,从而增强了水稻对硅的吸收能力,这可能是施硅后导致生殖期土壤溶液中硅含量较低的原因之一。

2.2 施硅对水稻不同部位生物量的影响

表 2 是不同生育期水稻各组织的生物量。从表 2 可知,随着水稻的生长,水稻各部位的生物量显著增加($p < 0.05$),在开花期、灌浆期或成熟期达到最大值。施硅均不同程度地增加了不同时期水稻组织的生物量,其中根、茎、叶和穗(其中穗包括籽粒部分,下同)的生物量分别增加 1.53% ~ 75.93%、

0.95% ~ 53.77%、6.62% ~ 37.8% 和 5.88% ~ 59.78%。在水稻成熟期,施硅处理的根、茎和穗的生物量均显著高于对照($p < 0.05$),其生物量分别提高了 5.79%、12.98% 和 5.88%。施硅使水稻籽粒增加了 4.16%,但未达到显著性差异。巫世芬等^[18]和张国良等^[19]研究表明,施用硅肥使水稻增产 5.2% ~ 12.85%,并增加每穗实粒数和千粒重。Li 等^[20]也报道了施硅增加了水稻生物量的结果。水稻施硅增产的原因与水稻施硅后,抑制水稻蒸腾作用、提高水稻光合生产率和土壤的供氮能力,并增加水稻对氮、磷的吸收有关^[21]。近年来,硅肥对水稻的增产作用,在国内外引起了广泛关注,因此,人们将硅肥定义为继 N、P、K 之后第四大肥料元素。

2.3 施硅对水稻各部位磷积累量的影响

由表 3 可知,水稻不同部位的磷积累动态呈现不同的规律。磷在叶片中的积累量随着水稻的生长而显著增加($p < 0.05$),在拔节期达到最大值,而后又逐渐降低。磷在水稻茎和根中的积累量在开花期达到最大,之后在灌浆期或成熟期又逐渐减少。磷在穗中的积累量随着生育期的进行而显著增加($p < 0.05$),在成熟期达到最大值。水稻叶、茎和根中的磷在拔节期至开花期之间的积累量较大

主要体现在两个方面的原因:一方面,在拔节期至开花期之间,水稻生命活动比较旺盛,对营养物质需求量最大;另一方面,随着水稻进一步的生长发育,至孕穗期已形成比较完整的根系,与土壤接触的面积加大,从而增大了水稻对土壤磷的吸收并不断地供应水稻各组织细胞分裂的需要^[22]。

水稻不同部位磷积累量的顺序在水稻不同时期有所差异,对于对照,在苗期和拔节期,磷的积累量的顺序为茎 > 叶 > 根;分蘖期为叶 > 茎 > 根;孕

穗期和开花期为茎 > 根 > 叶 > 穗;灌浆期为茎 > 根 > 穗 > 叶,而成熟期为穗 > 茎 > 籽粒 > 根 > 叶。施硅改变了苗期及灌浆期磷积累顺序,苗期变为叶 > 茎 > 根;灌浆期变为茎 > 穗 > 根 > 叶。导致这种分布趋势的主要原因可能与在植物生长过程中,磷元素不断地从根部经过茎叶等部位向穗部转移,从而降低了根茎叶中的磷积累量,增加了穗中磷的积累量,这与陆发喜等^[23]对不同生育期水稻磷肥的吸收规律研究结果一致。

表 2 水稻不同生长期各组织的生物量

水稻组织	处理	水稻生长期生物量(g)						
		苗期	分蘖期	拔节期	孕穗期	开花期	灌浆期	成熟期
叶	对照	0.27 ± 0.03aA	3.05 ± 0.18aA	12.71 ± 0.64aB	12.44 ± 0.94aB	12.68 ± 0.77aB	12.94 ± 0.40aB	14.65 ± 2.22aB
	施硅	0.33 ± 0.01aA	4.20 ± 0.16bB	13.90 ± 0.16aC	14.37 ± 0.57aCD	14.96 ± 1.19aCD	17.10 ± 0.51bCD	15.62 ± 1.20aD
茎	对照	0.19 ± 0.03aA	2.16 ± 0.22aA	17.77 ± 0.82aB	18.53 ± 0.86aBC	22.08 ± 1.30aBC	20.94 ± 0.59aBC	20.83 ± 1.00aC
	施硅	0.23 ± 0.01aA	3.32 ± 0.24bA	17.84 ± 0.22aB	23.16 ± 0.84bC	23.05 ± 0.55aC	26.57 ± 4.12aC	23.53 ± 1.10bC
根	对照	0.13 ± 0.01aA	1.23 ± 0.12aA	11.39 ± 0.38aB	11.04 ± 0.54aB	13.81 ± 0.33aC	14.18 ± 0.58aC	15.30 ± 1.20aC
	施硅	0.14 ± 0.01aA	2.16 ± 0.17bA	11.56 ± 0.50aB	12.86 ± 0.18bBC	14.67 ± 1.18aBCD	17.07 ± 1.95aCD	16.18 ± 0.70 bD
穗	对照	—	—	—	2.15 ± 0.29aA	3.67 ± 0.08aB	9.61 ± 0.33aC	13.32 ± 0.27aD
	施硅	—	—	—	3.43 ± 0.24bA	4.00 ± 0.14aA	12.34 ± 0.43bB	14.11 ± 0.01bC
籽粒	对照	—	—	—	—	—	—	9.38 ± 0.35a
	施硅	—	—	—	—	—	—	9.77 ± 0.22a

注:数据是平均值(标准误 ± n = 4)。同一列不同小写字母代表不同硅处理差异显著($p < 0.05$),同一行不同大写字母表示不同生长期差异显著($p < 0.05$)。下同

表 3 水稻不同生长期各组织的磷积累量

水稻组织	处理	水稻生长期磷积累量(g 盆 ⁻¹)						
		苗期	分蘖期	拔节期	孕穗期	开花期	灌浆期	成熟期水稻组织
叶	对照	0.10 ± 0.01aA	1.03 ± 0.09aB	3.68 ± 0.32aD	3.02 ± 0.36aCD	2.59 ± 0.30aCD	2.24 ± 0.14aC	1.30 ± 0.49aB
	施硅	0.12 ± 0.01aA	1.09 ± 0.09aB	3.50 ± 0.07aD	2.94 ± 0.27aD	3.41 ± 0.12bD	2.14 ± 0.15aC	1.52 ± 0.06aB
茎	对照	0.12 ± 0.01aA	0.80 ± 0.09aA	6.77 ± 0.24aC	6.95 ± 0.69aC	7.10 ± 0.31aC	4.40 ± 0.28aB	4.84 ± 0.84aB
	施硅	0.09 ± 0.01aA	1.06 ± 0.07aA	6.53 ± 0.30aB	7.64 ± 0.30aC	8.30 ± 0.60aC	5.76 ± 0.57aB	5.23 ± 0.23aB
根	对照	0.05 ± 0.01aA	0.34 ± 0.05aA	2.22 ± 0.07aB	3.37 ± 0.27aCD	4.19 ± 0.22aD	3.52 ± 0.40aCD	3.11 ± 0.28aC
	施硅	0.07 ± 0.004aA	0.47 ± 0.03aA	2.04 ± 0.18aB	3.28 ± 0.05aC	3.60 ± 0.28aC	3.15 ± 0.47aC	3.21 ± 0.19aC
穗	对照	—	—	—	0.44 ± 0.07aA	1.52 ± 0.03bB	2.59 ± 0.25aC	7.09 ± 0.37aD
	施硅	—	—	—	0.69 ± 0.06bA	0.88 ± 0.07aA	3.71 ± 0.07bB	7.43 ± 0.74aC
籽粒	对照	—	—	—	—	—	—	3.13 ± 0.20a
	施硅	—	—	—	—	—	—	4.03 ± 0.01b

比较施硅对水稻各部位磷积累量的影响发现,施硅对水稻茎、叶和根磷积累量没有显著影响,但施硅显著影响了水稻穗和籽粒中的磷积累量($p < 0.05$)。在水稻成熟期,与对照相比,施硅使水稻

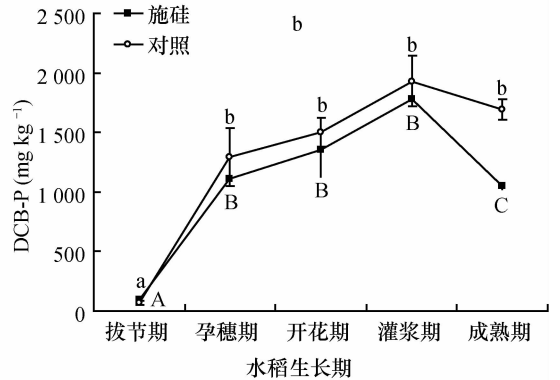
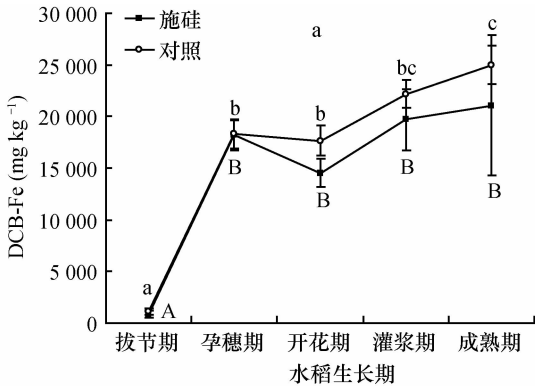
根、茎和叶的磷积累量分别增加 3.5%、8.2%、16.9%。郭伟等^[24]的研究也表明,施硅增加了水稻地上部的磷含量。但这与水培条件下,施硅显著降低水稻地上部磷含量的试验结果不一致^[3,25],其机

理并不十分清楚,这也说明了水培和土培之间存在着一定的差异。与对照相比,施硅使成熟期籽粒中的磷积累量显著增加了 28.7% ($p < 0.05$),这说明施硅有利于磷向水稻籽粒部分积累。施硅使灌浆期磷积累量顺序从茎 > 根 > 穗 > 叶变为茎 > 穗 > 根 > 叶,也说明了施硅增加了磷向籽粒的转移。

2.4 施硅对水稻根表铁膜及铁膜中磷的影响

图 2 是不同采样时期水稻根表铁膜含量 (DCB-Fe) 和根表铁膜富集的磷含量 (DCB-P)。从图 2a 可知,随着水稻的生长,DCB-Fe 显著增加 ($p < 0.05$),在成熟期达到最大值,这表明在水稻的生长过程中,

铁膜不断形成。与对照相比,施硅处理减少了水稻根表铁膜的形成量。根表铁膜的形成量主要取决于土壤中 Fe^{2+} 含量和根系微环境中的氧化能力^[26]。硅肥减少水稻根表铁膜的形成可能是施硅后,硅改变了水稻根际的氧化能力,从而减少了铁膜的形成。据研究,施肥是影响水稻根表铁膜形成的一个重要因素,影响程度取决于施肥种类, KNO_3 显著抑制水稻根表铁膜的形成, NH_4Cl 略微促进水稻根表铁膜的形成^[26]。但目前为止,硅肥对于水稻根表铁膜的生成研究还不够深入,还需要在硅肥使用量及硅肥施用种类等方面进一步研究。



注:不同字母表示不同采样时期差异显著 ($p < 0.05$) (大写字母表示施硅处理,小写之字母表示对照)

图 2 不同采样时期水稻根表铁膜含量(a)和根表铁膜中磷的含量(b)

从图 2b 可知,DCB-P 随着水稻的生长显著增加 ($p < 0.05$),在灌浆期达到最大值,成熟期减少。与对照相比,施硅处理减少了 DCB-P,其中在成熟期达到了显著性差异 ($p < 0.01$)。施硅减少了根表铁膜中磷的含量可能与施硅减少了根表铁膜量有关。刘艳菊等^[27]研究表明,水稻根表铁膜中磷的含量与铁膜的厚度显著相关,铁膜越厚,其富集的磷也越高。本研究中 DCB-Fe 和 DCB-P 之间的显著相关性也说明了水稻根表铁膜对磷具有显著的富集作用(图 3)。蔡妙珍等^[27]也得出了根表铁膜数量与铁膜对磷的富集量呈显著正相关的结论。

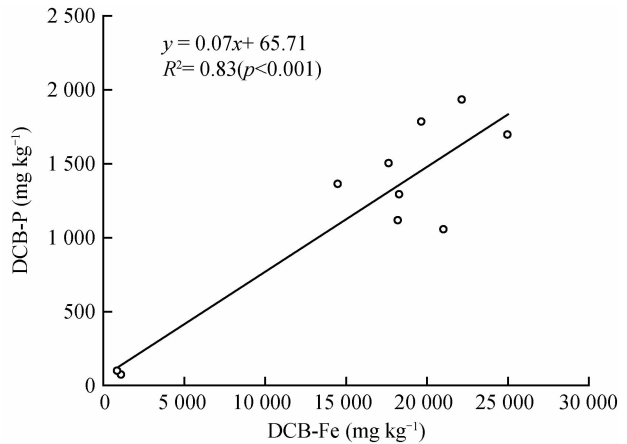


图 3 水稻根表铁膜含量与磷的含量关系

许多研究表明,根表铁膜增加了湿生植物对磷的吸收^[10,28-29]。从本研究中施硅减少水稻根表铁膜形成的角度,施硅似乎应该减少水稻对磷的吸收。然而本研究中,施硅却增加了水稻各部位磷的含量。研究表明,土壤中施硅减少了土壤磷的吸附并增加了土壤磷的解吸,从而增加了土壤磷的有效性^[8]。因此,表明施硅对土壤磷有效性及水稻磷吸收量的增加程度大于由于根表铁膜的减少而造成的对磷吸收的影响,从而最终增加了水稻对磷的吸收。

3 结论

土壤溶液中磷和硅的含量随着水稻生育期的进行而减少,施硅增加了土壤溶液中磷的含量,在成熟期达到了显著性差异。施硅不同程度地增加了水稻各部位的生物量。随着水稻的生长,水稻各

部位的磷积累量显著增加,叶片中的磷积累量在拔节期达到最大值,根茎中的磷积累量在开花期达到最大值,而穗在成熟期达到最大值。土壤中施硅虽然未显著增加水稻根、茎和叶的磷积累量,但显著增加了水稻穗及籽粒的磷积累量,施硅使成熟期籽粒中的磷积累量显著增加了 28.7%。磷在水稻不同部位的分布规律因生长期不同而有所差异,在成熟期磷积累量的顺序为:穗 > 茎 > 籽粒 > 根 > 叶。水稻根表铁膜中的铁和磷的含量随着生育期的进行呈现增加的趋势,两者呈显著正相关关系($p < 0.001$)。施硅降低了水稻根表铁膜的形成量,同时降低了铁膜对磷的富集。

参考文献

- [1] 宋春丽,樊剑波,何园球,等. 不同母质发育的红壤性水稻土磷素吸附特性及其影响因素的研究. 土壤学报,2012,49(3):607—611
- [2] 王艳玲,章永辉,何园球. 红壤基质组分对磷吸附指数的影响. 土壤学报,2012,49(3):552—559
- [3] Ma J F, Takahashi E. Effects of silicon on the growth and phosphorus uptake of rice. *Plant and Soil*, 1990, 126(1):115—119
- [4] Haynes R J. Effect of lime, silicate, and phosphate applications on the concentrations of extractable aluminum and phosphate in a spodosol. *Soil Science*, 1984, 138(1):8—14
- [5] 胡克伟,颜丽,关连珠,等. 施磷对水稻土硅素吸附与解吸特性的影响. 植物营养与肥料学报,2003,9(3):299—302
- [6] Anderson D L, Snyder G H, Warren J D. Availability of phosphorus in calcium silicate slag. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1992, 23(9/10):907—918
- [7] Noda M, Komai Y. Effect of silicate materials on the availability of inorganic phosphate in the soil//Monbusho. Studies on the maximizing the yield of agricultural products by the application of silicate materials. Tokyo, Japan, 1958:100—115
- [8] 胡克伟,肇雪松,关连珠,等. 水稻土中硅磷元素的存在形态及其相互影响研究. 土壤通报,2002,33(4):272—274
- [9] 郭伟,林咸永,程旺大. 不同地区土壤中分蘖期水稻根表铁氧化物的形成及其对磷吸收的影响. 环境科学,2010,31(2):496—502
- [10] 张西科,张福锁,毛达如. 水稻根表铁氧化物胶膜对水稻吸收磷的影响. 植物营养与肥料学报,1997,3(4):295—299
- [11] 吕世华,张西科,张福锁,等. 根表铁、锰氧化物胶膜在磷不同浓度下对水稻磷吸收的影响. 西南农业学报,1999,12(Z1):7—12
- [12] 傅友强,梁建平,于智卫,等. 不同铁形态对水稻根表铁膜及铁吸收的影响. 植物营养与肥料学报,2011,17(5):1050—1057
- [13] Hu Z Y, Zhu Y G, Li M, et al. Sulfur(S)-induced enhancement of iron plaque in the rhizosphere reduces arsenic accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings. *Environment Pollution*, 2007, 147(2):387—393
- [14] Hu Y, Li J H, Zhu Y G, et al. Sequestration of As by iron plaque on the roots of three rice (*Oryza sativa* L.) cultivars in a low-P soil with or without P fertilizer. *Environmental Geochemistry and Health*, 2005, 27(2):169—176
- [15] 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
- [16] Taylor G J, Crowder A A. Use of DCB technique for extraction of hydrous iron oxides from roots of wetland plants. *American Journal of Botany*, 1983, 70(8):1254—1257
- [17] Ma J F, Nishimura K, Takahashi E. Effect of silicon on the growth of rice plant at different growth stages. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1989, 35(3):347—356
- [18] 巫世芬,赖育斌,罗国君,等. 硅肥在水稻上的施用效果. 江西农业学报,2005,17(4):149—151
- [19] 张国良,戴其根,周青,等. 硅肥对水稻群体质量及产量影响研究. 中国农学通报,2004,20(3):114—117
- [20] Li R Y, Stroud J L, Ma J F, et al. Mitigation of arsenic accumulation in rice with water management and silicon fertilization. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(10):3778—3783
- [21] 柯玉诗,黄小红,张壮塔,等. 硅肥对水稻氮磷钾营养的影响及增产原因分析. 广东农业科学,1997(5):25—27
- [22] 林兆松,郑文钻,宋银官,等. 水稻不同发育阶段对磷的吸收运转和分配. 原子能科学技术,1963(6):477—479
- [23] 陆发喜,邝炎华,高锦辉. 应用 ^{32}P 研究水稻在不同密植条件下及不同生育期对磷肥的吸收规律. 原子能科学技术,1963(5):401—405
- [24] 郭伟,朱永官,梁永超,等. 土壤施硅对水稻吸收磷的影响. 环境科学,2006,27(7):1393—1397
- [25] Guo W, Zhu Y G, Liu W J, et al. Is the effect of silicon on rice uptake of arsenate (As-V) related to internal silicon concentrations, iron plaque and phosphate nutrition? *Environmental Pollution*, 2007, 148(1):251—257
- [26] 陈学萍,朱永官,洪米娜,等. 不同施肥处理对水稻根表铁和磷形态的影响. 环境化学,2008,27(2):231—234
- [27] 刘艳菊,朱永官,丁辉,等. 水稻根表铁膜对水稻根吸收铅的影响. 环境化学,2007,26(3):327—330
- [28] 蔡妙珍,罗安程,章永松,等. 水稻根表铁膜对磷的富集作用及其与水稻磷吸收的关系. 中国水稻科学,2003,17(2):187—190
- [29] 王震宇,刘利华,温胜芳,等. 2种湿地植物根表铁氧化物胶膜的形成及其对磷素吸收的影响. 环境科学,2010,31(3):781—786

(责任编辑:檀满枝)