



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

硅铁施用对水稻生长及磷吸收的影响

刘煜椿, 李仁英, 谢晓金, 李霖, 徐向华, 张婧, 吴思佳, 简静, 李玉聪

引用本文:

刘煜椿, 李仁英, 谢晓金, 等. 硅铁施用对水稻生长及磷吸收的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(4): 511–517.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0145>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

磷高效转基因水稻OsPT4对红壤无机磷组成的影响

魏琳琳, 倪土, 臧怀敏, 李刚, 修伟明, 杨殿林, 赵建宁

农业资源与环境学报. 2017, 34(5): 414–421 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0077>

不同土壤水势下贝莱斯芽孢杆菌B006菌剂对茄子的促生增产作用

耿妍, 郭荣君, 张爱香, GOVRINERiMoshe, 李世东

农业资源与环境学报. 2020, 37(3): 398–406 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0026>

硫对水稻幼苗镉积累特性及亚细胞分布特征的影响

潘瑶, 尹洁, 高子平, 王景安, 刘仲齐

农业资源与环境学报. 2015(3): 275–281 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0026>

膨润土对轻度镉污染土壤钝化修复效应研究

徐奕, 赵丹, 徐应明, 孙约兵

农业资源与环境学报. 2017, 34(1): 38–46 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0208>

施加脱硫石膏对紫色土壤-水稻系统重金属累积的影响

胡翔宇, 向秋洁, 罗伯林, 尚二凤, 木志坚

农业资源与环境学报. 2018, 35(5): 459–466 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0044>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘煜椿, 李仁英, 谢晓金, 等. 硅铁施用对水稻生长及磷吸收的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(4): 511–517.

LIU Yu-chun, LI Ren-ying, XIE Xiao-jin, et al. Effect of silicon and iron on the growth and phosphorus uptake of rice[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(4): 511–517.



开放科学 OSID

硅铁施用对水稻生长及磷吸收的影响

刘煜椿¹, 李仁英^{1,2*}, 谢晓金¹, 李霖¹, 徐向华¹, 张婧¹, 吴思佳¹,
简静¹, 李玉聪¹

(1.南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044; 2.江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044)

摘要:为探讨硅铁施用对水稻生长和磷吸收的影响,指导合理施肥、提高磷素利用率,利用水培试验研究了不同浓度铁(0、0.5、1、2 mmol·L⁻¹)预处理下施加不同浓度硅(0、1、4 mmol·L⁻¹)对水稻生长及磷吸收的影响。结果表明,低浓度的铁预处理对水稻 SPAD、株高、根长和地上部干质量无显著影响,而高浓度的铁预处理下,这些指标则显著降低($P<0.05$)。中低浓度铁处理下施硅在一定程度上增加了水稻株高、根长和地上部干质量,但未达到显著水平($P>0.05$)。铁预处理显著增加了水稻根表铁膜的厚度及根表铁膜中的磷含量($P<0.05$),施硅则显著降低了 0.5 mmol·L⁻¹ 和 1 mmol·L⁻¹ 铁预处理的水稻根表铁膜的厚度($P<0.05$)。铁预处理对水稻根部的磷含量无显著影响,但显著降低了地上部磷的含量($P<0.05$)。施硅对水稻根和地上部的磷含量无显著影响。研究表明,施铁处理显著诱导了根表铁膜的出现,增加了铁膜中的磷含量并且显著降低了地上部的磷含量;施硅在一定程度上缓解了水稻生长中的铁毒害现象,并且能够改变根表铁膜厚度,减少根冠比,从而影响水稻磷的吸收转运。

关键词:铁;铁膜;水稻;硅;磷

中图分类号:S511;S143

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2020)04-0511-07

doi: 10.13254/j.jare.2019.0145

Effect of silicon and iron on the growth and phosphorus uptake of rice

LIU Yu-chun¹, LI Ren-ying^{1,2*}, XIE Xiao-jin¹, LI Lin¹, XU Xiang-hua¹, ZHANG Qi¹, WU Si-jia¹, JIAN Jing¹, LI Yu-cong¹

(1.College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2.Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In order to provide important information for improving the utilization efficiency of phosphorus (P) fertilizer, the effect of silicon (Si) (0, 1, 4 mmol·L⁻¹) on the growth and P uptake of rice, under iron (Fe) (0, 0.5, 1, 2 mmol·L⁻¹) pretreatment, was studied using hydroponic experiments. The results showed that pretreatment with low concentration Fe did not significantly affect rice SPAD, plant height, root length and shoot dry weight, but these indexes were significantly decreased under pretreatment with high concentration Fe ($P<0.05$). Although the application of Si increased plant height, root length, and shoot dry weight of rice to some extent, it was not significant ($P>0.05$). Fe pretreatment significantly increased the amount of iron plaque on the root surface of the rice and the phosphorus concentration sequestered on the iron plaque of the root surface ($P<0.05$). The application of Si significantly reduced the amount of iron plaque on the root surface under pretreatment with 0.5 mmol·L⁻¹ and 1 mmol·L⁻¹ Fe ($P<0.05$). Fe pretreatment did not significantly affect the phosphorus concentration in rice roots, but significantly reduced the phosphorus concentration in the shoots ($P<0.05$). Silicon application did not significantly affect the phosphorus concentration in rice roots or shoots. Our results indicated that Fe pretreatment induced, significantly, the appearance of iron plaque on the root surface, increased the phosphorus sequestration on iron plaque and significantly reduced the phosphorus concentration in the shoots. Silicon application alleviated Fe toxicity during rice growth to a certain extent, and could affect the uptake and translocation of phosphorus by changing the amount of iron plaque on root surfaces and reducing the root-shoot ratio.

Keywords: iron; iron plaque; rice; silicon; phosphorus

收稿日期:2019-03-21 录用日期:2019-05-21

作者简介:刘煜椿(1993—),女,重庆人,硕士研究生,主要从事农业环境方面的研究。E-mail:136287420@qq.com

*通信作者:李仁英 E-mail:ryli75@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41001190,41671318);大学生实践创新训练项目(201810300040Z,201910300286)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41001190,41671318); Practical Innovation Training Program for College Students (201810300040Z,201910300286)

稻田土壤长时间处于淹水的缺氧环境中,铁的氧化物极易被还原为二价铁离子。而水稻根际的二价铁离子会被由通气组织传达到植物根系的氧气和其他氧化性物质所氧化,形成铁氧化物/氢氧化物等物质,以膜胶状包裹在根表,形成红褐色的根表铁膜^[1]。研究表明,水稻根表铁膜是一种两性胶体,它可以作为营养元素的富集库^[2],当介质中养分缺乏时,将其活化利用;同时,由于植物根表铁膜能够在水稻根际通过吸附和沉淀等方式阻止重金属元素被水稻根系吸收转运^[3],因此有很多专家认为它具有潜在的降低重金属污染的功能^[4-5]。

水稻是典型的喜硅作物,施硅能够促进水稻生长,促进根系发育,提高根系氧化能力^[6];同时也能减少水稻对铁、铝、锰等重金属的吸收^[7]。磷、硅在化学性质和结构上具有相似性,施硅能够提高磷的生物有效性并促进水稻对磷的吸收^[8-11]。磷素作为水稻体内重要的元素,参与了水稻体内诸多的生理生化反应;但由于磷易被土壤吸附和固定,磷肥的当季利用率只有10%~25%^[12-13],使得农业成本提高并带来许多环境污染问题^[14]。因此,水稻对磷的吸收转运和提高磷肥的利用率一直是植物营养学研究的热点。

目前,施硅对水稻的影响大多集中于水稻生长发育和产量方面^[15-16],同时在重金属如砷、镉吸收方面也有研究^[17-20]。而在铁膜形成条件下,施硅对水稻生长及水稻磷吸收转运方面的研究还比较少。本文选取江苏常见水稻品种,分析铁膜存在条件下,施硅对水稻生长、铁膜变化和磷素吸收转运的影响,并分析了铁膜与水稻磷含量的关系,可为合理施肥、提高磷素利用率提供重要的科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试水稻品种为镇稻16号。试验中铁以氯化亚铁(FeCl_2)、硅以硅酸钠(Na_2SiO_3)的形式加入。营养液采用1/2强度的Kimura配方^[21],由 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 KNO_3 、 KH_2PO_4 、 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{Fe}-\text{EDTA}$ 、 $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、 H_3BO_3 、 $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 配制而成。其中,磷的浓度为 $12.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

挑选个大、饱满的水稻种子若干粒,用30%的双氧水浸泡15 min,然后用蒸馏水洗净,放至培养箱中进行育苗。待幼苗长至3叶1心时,选取长势、大小一致的水稻秧苗,移栽到塑料盆中,每盆4株,用1/2强

度的Kimura营养液培养30 d后,把水稻秧苗移至蒸馏水中浸泡12 h,备用。

试验设4个铁浓度:0、0.5、1、2 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (分别记作为Fe0、Fe0.5、Fe1、Fe2),3个硅浓度:0、1、4 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (分别记作为Si0、Si1、Si4),每个处理均重复3次,共36盆。首先将Kimura营养液浸泡后长势一致的水稻秧苗分别移栽到含有4个铁浓度的营养液中,营养液用0.1 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl和NaOH调节pH为5.5。3 d后,把水稻秧苗放入蒸馏水并培养12 h,然后分别置于不同硅浓度的营养液中,用0.1 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl和NaOH调节营养液中的pH为5.5。3 d后,进行收获。

1.3 样品的采集与分析

在水稻收获时采用叶绿素仪(SPAD-502)测定水稻叶片叶绿素相对含量SPAD值,然后测定水稻株高、根长。

水稻分地上部(茎叶)和地下部(根)进行收获,先后用自来水和蒸馏水清洗。洗后一部分鲜根用于浸提根表铁膜,测定根表铁膜中铁、磷和硅含量;一部分放在纸信封中,并置于70℃的烘箱中烘48 h至恒质量,烘干后测定根干质量和地上部干质量。

地上部和地下部水稻样品用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消解,采用钼蓝比色法测定消煮液中的磷含量。根表铁膜采用Dithionite-citrate-bicarbonate(DCB)浸提^[22-23],用钼蓝比色法测定浸提液中的磷、硅含量,用原子吸收法测定浸提液中的铁含量。

1.4 数据分析

根冠比=根干质量/地上部干质量。

试验所得数据均采用Microsoft Excel 2013进行处理和图表绘制。采用SPSS 20.0软件对数据进行单因素方差分析(One-way ANOVA),采用最小显著差异法(LSD)比较不同处理间的差异性($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 硅铁施用对水稻生长的影响

由表1可知,与不施铁的处理相比,施用铁降低了水稻的SPAD、株高、根长和地上部干质量,在2 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe浓度处理下,达到显著降低水平($P < 0.05$)。而施用铁对根干质量无显著影响。在中低浓度的铁处理下,施硅虽然在一定程度上增加了水稻株高、根长和地上部干质量,但与对照相比未达到显著水平。根冠比是植物地下部分与地上部分的鲜质量或干质量的比值,它能够反映植物地下部分与地上部分的相关性。由图1可知,施用铁增加了水稻的根

表 1 硅铁施用对水稻 SPAD 值和生长状况的影响
Table 1 Effect of iron and silicon on SPAD and rice growth

铁浓度 Fe concentration/ $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$	硅浓度 Si concentration/ $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$	SPAD	株高 Plant height/cm	根长 Root length/cm	根干质量 Root dry weight/g	地上部干质量 Shoot dry weight/g
0	0	35.13±0.67a	35.21±0.43ab	23.84±0.85a	0.59±0.01bcd	1.49±0.08abc
	1	34.58±1.61ab	35.46±1.93ab	23.18±1.18abc	0.63±0.12abc	1.62±0.23ab
	4	34.76±0.64ab	36.16±1.42a	23.13±0.87abc	0.63±0.04abc	1.65±0.19a
0.5	0	33.69±0.64bc	34.55±1.33ab	22.93±0.4abc	0.68±0.04a	1.43±0.08bc
	1	32.85±0.35c	35.28±0.12ab	24.10±0.34a	0.67±0.04ab	1.52±0.05abc
	4	33.79±0.44bc	35.08±0.92ab	23.25±0.55abc	0.62±0.04abc	1.49±0.20abc
1	0	33.83±0.21abc	34.49±0.53ab	23.11±0.39abc	0.64±0.02abc	1.42±0.10bc
	1	33.15±0.86c	34.55±0.55ab	23.36±0.89ab	0.60±0.02abcd	1.47±0.08abc
	4	34.03±0.22abc	35.52±1.24ab	23.95±0.41a	0.61±0.03abcd	1.51±0.11abc
2	0	33.69±0.66bc	32.37±0.21c	22.34±1.22bc	0.61±0.06abcd	1.39±0.17c
	1	33.46±0.61bc	33.92±0.73bc	22.18±0.49bc	0.56±0.02cd	1.45±0.03abc
	4	32.73±0.03c	34.03±0.73bc	21.89±0.28c	0.53±0.03d	1.40±0.06c

注:数据为平均值±标准误差;同列数据后不同字母表示处理之间差异显著($P<0.05$)。

Note: Data are means±standard error; Different lowercase letters after data in the same column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$).

冠比,其中 0.5 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe 处理根冠比最大,但施硅却减少了水稻的根冠比,随着硅浓度的增加,水稻的根冠比呈下降趋势。

2.2 硅铁施用对水稻根表铁膜中铁、硅、磷含量的影响

图 2 是硅铁施用后,水稻根表铁膜中的铁、硅和磷含量的变化。通常情况下,根表铁膜的量是以单位干质量根系表面铁膜中的铁含量来衡量的^[24]。由图 2A 可知,施用铁显著增加了水稻根表铁膜的量($P<0.05$)。对于相同的铁处理,施用硅降低了根表铁膜的量。对于 0.5 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的铁处理,达到了显著降低的水平($P<0.05$)。

施用铁增加了水稻根表铁膜吸持固定的硅含量,在较低浓度铁处理下,根表铁膜吸持固定的硅含量无显著差异,而在 2 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 铁处理下,施用硅显著增加了根表铁膜吸持固定的硅含量($P<0.05$,图 2B)。

施用铁显著增加了水稻根表铁膜吸持固定的磷含量,其中 0.5 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的铁处理增幅大,与不施铁处理相比增加 224.13%。施用硅对根表铁膜中磷含量的影响因施用铁浓度不同而具有一定差异。在 0.5 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 1 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 铁预处理下,施用硅降低了根表铁膜中的磷含量,而在 2 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 铁预处理下,施用硅增加了铁膜中的磷含量(图 2C)

2.3 硅铁施用对水稻各部位磷含量的影响

图 3 是硅铁施用下水稻各部位磷含量的变化。由图 3A 可知,施用铁显著降低了水稻地上部的磷含量($P<0.05$)。与对照相比,2 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的铁处理使地

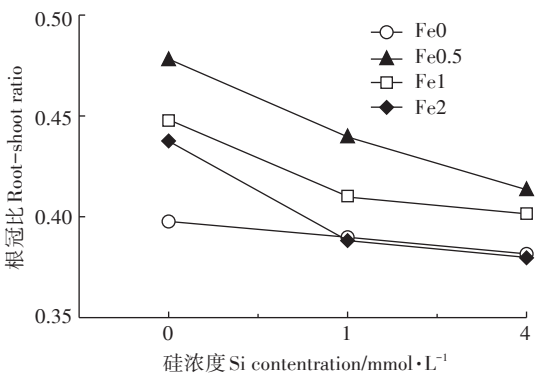
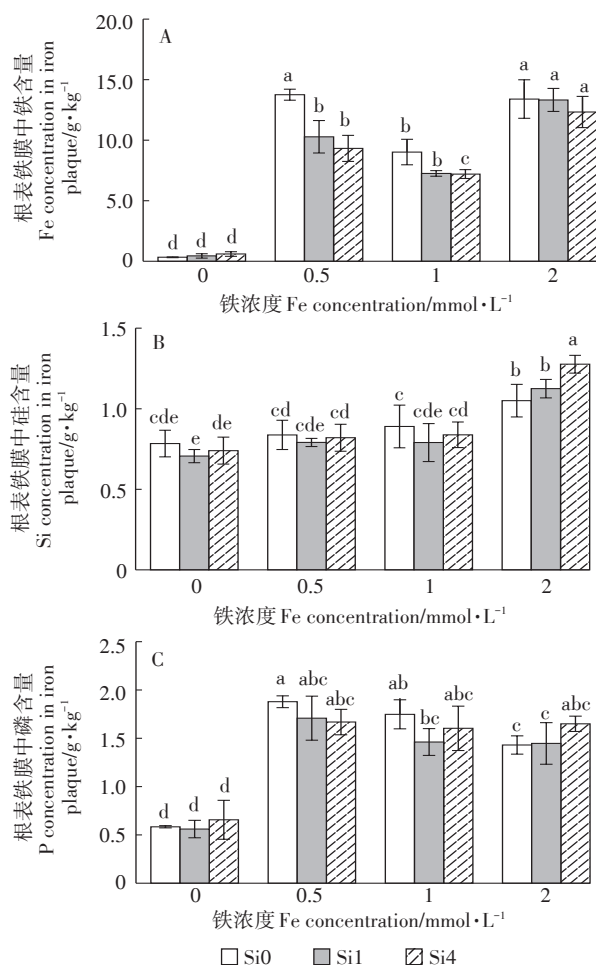


图 1 硅铁施用对水稻根冠比的影响
Figure 1 Effect of iron and silicon on root-shoot ratio of rice

上部磷含量显著降低 20%。而不同铁处理之间无显著差异。施用硅对水稻地上部磷含量无显著影响。由图 3B 可知,施用铁增加了水稻根部的磷含量,施用硅对根部的磷含量无显著影响($P>0.05$)。

2.4 水稻磷含量与根表铁膜磷含量的关系

由图 4A 可知,铁膜铁与铁膜磷两者之间可用多项式拟合,其 R^2 在施硅的情况下接近 1($P<0.01$),表明两者之间拟合度极好。随铁膜厚度的增加,铁膜磷含量表现出先增加后减少的趋势,最高约为 $1.85 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。施硅降低了铁膜磷的含量,说明硅处理能够降低铁膜对磷的固持,1 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的硅处理较 4 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的硅处理降幅大。由图 4B、图 4C 可知,随着铁膜磷含量的增加,根部磷含量增加,而地上部磷含量减少。施硅在一定程度上减少了地上部和根部的磷含量。



不同字母表示处理之间差异显著($P < 0.05$)。下同
Different letters indicate significant differences among treatments($P < 0.05$). The same below

图2 硅铁施用对水稻根表铁膜中铁、硅、磷含量的影响

Figure 2 Effect of iron and silicon on the concentration of Fe, Si, and P in iron plaque of rice

3 讨论

水稻吸收土壤或溶液中的二价铁离子过多时,会产生铁毒害,表现为植株生长受到强烈抑制、叶片出现黄褐色斑点、产量大幅减少,甚至会出现绝收现象^[25],而且水稻在受到不同浓度铁胁迫时表现不同。蔡妙珍等^[26]研究发现,低浓度铁胁迫能够提高酶活性,是水稻抵御二价铁毒害的一种机制,但较高浓度铁胁迫明显抑制水稻地上部和根系的生长,降低叶片叶绿素含量和酶活性。本研究中,低浓度铁处理没有显著影响水稻SPAD、株高、根长和根干质量,而在高浓度铁处理下,这些指标显著降低($P < 0.05$),表明较高浓度的铁处理对水稻生长产生了毒害作用。

铁处理后,再施用硅肥是否会缓解铁对水稻造成的负影响呢? 本研究发现,在中低浓度的铁处理下,

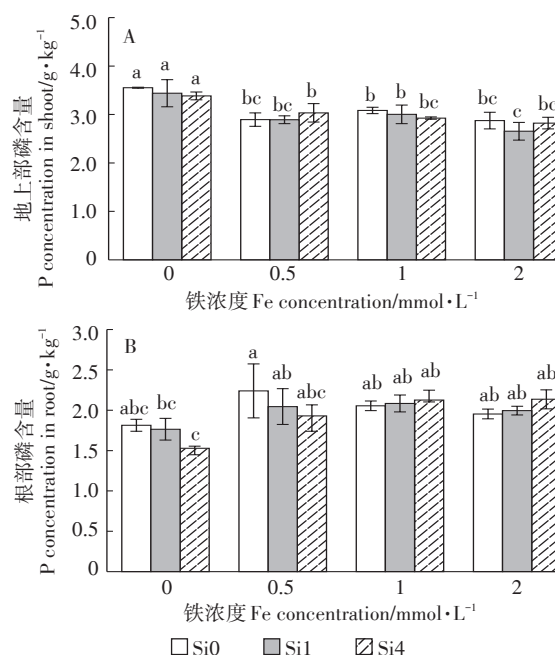


图3 硅铁施用对水稻各部位磷含量的影响

Figure 3 Effect of iron and silicon on P concentration in shoot and root of rice

施用硅肥虽然没有显著影响水稻的生长,但在一定程度上增加了水稻SPAD、株高、根长及根干质量。有研究表明,施硅能够提高根系氧化力、促进地上部分的生长并降低水稻根冠比^[27],还能缓解铁对水稻根系的毒害^[28-30]。高浓度铁胁迫下施硅对水稻生理特性、生长发育和产量有明显正效应,高浓度铁锰和低浓度硅组合下水稻根系活力、SOD(超氧化物歧化酶)、CAT(过氧化氢酶)活性最差,MDA(丙二醛)的含量最高,而低浓度铁锰和高浓度硅处理下水稻相应的生理指标均较高^[31]。Fu等^[30]研究发现,0.1 mmol $\cdot$ L $^{-1}$ 的铁诱导产生铁膜并且对水稻根表产生毒害;加入1 mmol $\cdot$ L $^{-1}$ 的硅能够明显减轻铁对根部的毒害作用,其原理在于硅与三价铁结合使根细胞壁加厚,因此减少了铁在根表的量。本研究中施硅没有显著影响水稻生长,一方面可能是由于水稻尚处于幼苗期,对硅的吸收能力弱,加之水培时间较短等。另一方面,可能由于本研究是在铁预处理下根表铁膜形成后施入硅肥,根表铁膜对硅元素吸收起到屏蔽作用,减弱了硅对水稻生长的改善作用。张国良等^[32]研究也证实,不同生育期水稻对硅吸收能力不同,施硅对分蘖初期的干物质积累影响不大。

施铁能够使水稻根表铁膜中铁含量明显增加、铁膜增厚。随着铁膜厚度的增加,铁膜磷含量大量增加,表明根表铁膜对磷的固持作用随着铁膜厚度增加

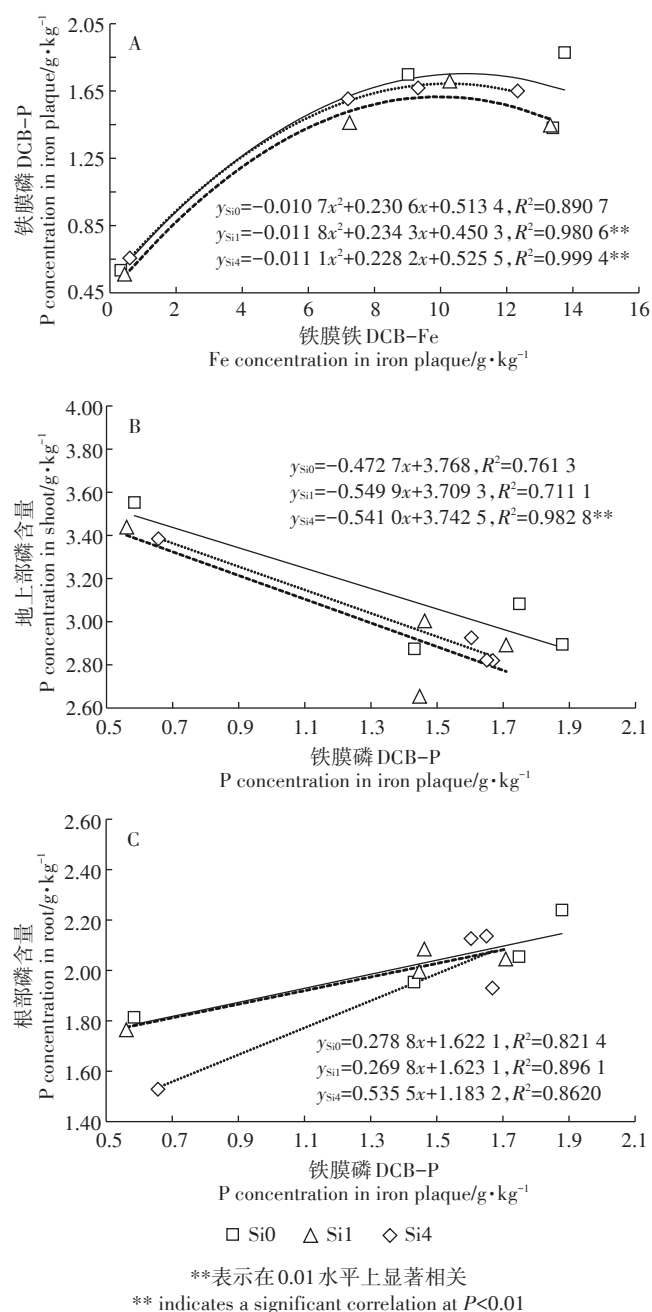


图4 水稻磷含量与根表铁膜中磷和铁的关系

Figure 4 Relationship between P in rice plant and P, Fe on root iron plaque

而增强,但铁膜过厚对磷的吸附会有所减少;同时,根部磷含量随着铁膜磷的增加而增加,但地上部磷含量却随着铁膜磷的增加而减少。表明在本研究的施铁浓度下,铁膜对水稻磷的吸收转运情况表现为铁膜越厚、吸附固定的磷越多,使得转移到地上部的磷含量明显减少,表现出水稻地上部磷含量的减少。根表铁膜中的磷通常是在根表铁膜形成过程中,二价铁被氧

化成三价铁后,形成难溶性磷酸铁沉积在铁膜中^[24]。有研究表明,根表铁膜的数量与铁膜富集的磷呈显著正相关^[33-34]。在铁膜对磷吸收影响方面,有观点认为铁膜吸附固定了磷,从而抑制了植物对其吸收;也有观点认为铁膜存在动态平衡,不阻碍植物对磷的吸收^[35]。张西科等^[36]研究发现,水稻根表铁膜在一定程度上就是磷的富集库,对水稻磷的吸收起促进作用,但铁膜太薄或者较厚会降低对磷的吸收,只有铁膜厚度适中时水稻吸收的磷元素才能达到最大值。吕世华等^[37]研究也得出当根表铁膜的量超过 $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,铁膜对水稻磷的吸收反而会起到抑制作用。曾祥忠等^[38]研究发现根表铁膜对水稻磷元素的吸收起抑制作用。本研究结果也表明根表铁膜抑制了水稻地上部磷的吸收。

有研究表明,在土培条件下施硅使得水稻根表铁膜的数量明显降低,这可能是因为施硅改变了水稻根际的氧化能力^[13]。Fu等^[30]在水培条件下用显微镜观察到施硅减少了表皮细胞和根毛表面的红色铁斑沉淀,同时诱导了根细胞壁变厚,认为施硅是通过减少根表铁膜的量和增强铁从地下部到地上部的转运来缓解亚铁在水稻根部的毒害作用。本研究也得出类似的结果,即施硅显著减少了根表铁膜的量。在本研究中,施硅虽然在一定程度上降低了水稻磷的含量,但并未达显著水平。有研究表明,施硅会显著降低地上部磷含量^[10],并且在高磷情况下,硅对磷元素的抑制更加明显,减少了水稻对磷的吸收和转运^[39]。水稻施硅后,吸收的硅大部分快速转运到地上部,而大部分磷仍然留在根中^[40]。施硅使得地上部磷含量减少的原因可能是施硅减少了根冠比,使得地上部质量增加,磷含量相对减少。本试验是水培试验,而在土培试验中,施硅对水稻磷吸收的影响将更为复杂。有研究表明,正是因为硅和磷的化学性质相似,施硅不但减少了土壤对磷的吸附总量,还降低了土壤对磷的结合力,使得磷更容易被解吸,从而增加了土壤磷的有效性^[8,41],所以,在土培的情况下,当施硅对根表铁膜的降低作用小于施硅对土壤磷有效性的提升作用时,也会使得水稻对磷的吸收增加^[13]。总的来说,施硅对水稻磷吸收的影响可以部分反映在对根表铁膜的影响上,施硅可以使根表铁膜厚度降低到适宜的程度,使得铁膜表面的磷解吸及跨越铁膜过程加快,从而进入根系,再从根系转移到地上部。因此施硅的浓度是影响这一过程的关键,施硅的量影响根表铁膜厚度,从而决定对磷的转运是促进或者抑制。

4 结论

(1)施铁浓度较低时对水稻影响较小,但施铁浓度高至 $2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时显著降低水稻的SPAD、株高、根长和地上部干质量;施硅能够缓解铁毒害现象,使水稻株高、根长和地上部干质量有所增加。

(2)施铁处理会明显诱导根表铁膜的出现,但铁膜厚度并不与施铁浓度成正比;铁处理显著增加了根表铁膜中的磷含量,并且铁膜中磷含量与铁膜厚度成正比。

(3)施硅显著减少了 $0.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 铁预处理的水稻根表铁膜的厚度。铁预处理对水稻根部的磷含量无显著影响,但显著降低了地上部磷的含量;施硅对水稻根和地上部的磷含量无显著影响。

参考文献:

- [1] 刘春英,陈春丽,弓晓峰,等. 湿地植物根表铁膜研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(10):2470-2480.
LIU Chun-ying, CHEN Chun-li, GONG Xiao-feng, et al. Progress in research of iron plaque on root surface of wetland plants[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(10):2470-2480.
- [2] Liang Y C, Zhu Y G, Xia Y, et al. Iron plaque enhances phosphorus uptake by rice (*Oryza sativa*) growing under varying phosphorus and iron concentrations[J]. *Annals of Applied Biology*, 2006, 149(3):305-312.
- [3] Hossain M B, Jahiruddin M, Loeppert R H, et al. The effects of iron plaque and phosphorus on yield and arsenic accumulation in rice[J]. *Plant and Soil*, 2009, 317(1/2):167-176.
- [4] 刘侯俊,李雪平,韩晓日,等. 镉处理根表铁膜对水稻吸收镉、锰、铜、锌的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(6):1356-1365.
LIU Hou-jun, LI Xue-ping, HAN Xiao-ri, et al. Influence of iron plaque on Cd, Mn, Cu and Zn uptakes of rice seedlings under different Cd treatments[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(6):1356-1365.
- [5] 张城铭,周鑫斌,高阿祥. 水稻不同生育期对硒吸收累积及铁膜的吸附特性[J]. 土壤学报, 2017, 54(3):693-702.
ZHANG Cheng-ming, ZHOU Xin-bin, GAO A-xiang. Uptake and accumulation of selenium and iron coating on rice root at different growth stages[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(3):693-702.
- [6] 吴朝晖. 硅素对水稻生长发育影响研究综述[J]. 湖南农业科学, 2005(5):44-46.
WU Zhao-hui. Summarize of effects of silicon on development of paddy [J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2005(5):44-46.
- [7] 刘松涛,李茜,王小玲. 硅素营养对水稻抗重金属毒害的研究进展[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(3):405-408, 417.
LIU Song-tao, LI Qian, WANG Xiao-ling. Progress in research of the resistance to heavy metal toxicity in rice by silicon nutrient[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2017, 56(3):405-408, 417.
- [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[J]. 土壤通报, 2002, 33(4):272-274.
HU Ke-wei, ZHAO Xue-song, GUAN Lian-zhu, et al. Study on interaction and forms of silicon and phosphate in paddy soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(4):272-274.
- [9] 郭伟,朱永官,梁永超,等. 土壤施硅对水稻吸收砷的影响[J]. 环境科学, 2006, 27(7):1393-1397.
GUO Wei, ZHU Yong-guan, LIANG Yong-chao, et al. Effect of application of silicon on arsenic uptake by rice seedlings in soil[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(7):1393-1397.
- [10] Ma J F, Takahashi E. Effect of silicon on the growth and phosphorus uptake of rice[J]. *Plant and Soil*, 1990, 126(1):115-119.
- [11] 高玉凤,焦峰,沈巧梅. 水稻硅营养与硅肥应用效果研究进展[J]. 中国农学通报, 2009, 25(16):156-160.
GAO Yu-feng, JIAO Feng, SHEN Qiao-mei. The research development of silicon nutrition and fertilizer application in rice[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(16):156-160.
- [12] 王汝慈,程式华,曹立勇. 水稻耐低磷胁迫研究进展[J]. 中国农学通报, 2009, 25(6):77-83.
WANG Ru-ci, CHENG Shi-hua, CAO Li-yong. Advancements in phosphorus deficiency tolerance study in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(6):77-83.
- [13] 李仁英,沈孝辉,谢晓金,等. 施硅对土壤-水稻系统中磷迁移的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(2):423-428.
LI Ren-ying, SHEN Xiao-hui, XIE Xiao-jin, et al. Effects of silicon on translocation of phosphorus in soil-rice system[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(2):423-428.
- [14] 王威,张联合,李华,等. 水稻营养吸收和转运的分子机制研究进展[J]. 中国科学:生命科学, 2015, 45(6):569-590.
WANG Wei, ZHANG Lian-he, LI Hua, et al. Recent progress in molecular dissection of nutrient uptake and transport in rice[J]. *Scientia Sinica Vitae*, 2015, 45(6):569-590.
- [15] 郑泽华,娄运生,左慧婷,等. 施硅对夜间增温条件下水稻生长和产量的影响[J]. 中国农业气象, 2018, 39(6):390-397.
ZHENG Ze-hua, LOU Yun-sheng, ZUO Hui-ting, et al. Effect of silicate application on hybrid rice growth and yield under nighttime warming[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2018, 39(6):390-397.
- [16] 于广星,宫殿凯,代贵金,等. 硅肥对水稻增产提质抗病虫的影响研究进展[J]. 中国稻米, 2019, 25(1):21-22, 25.
YU Guang-xing, GONG Dian-kai, DAI Gui-jin, et al. Research progress of silicon fertilizer on rice[J]. *China Rice*, 2019, 25(1):21-22, 25.
- [17] 王怡璇,刘杰,唐云舒,等. 硅对水稻镉转运的抑制效应研究[J]. 生态环境学报, 2016, 25(11):1822-1827.
WANG Yi-xuan, LIU Jie, TANG Yun-shu, et al. Inhibitory effect of silicon on cadmium accumulation and transportation in rice[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(11):1822-1827.
- [18] 李霖. 施硅对水稻生长及砷吸收的影响[D]. 南京:南京信息工程大学, 2017.
LI Lin. Effects of silicon on rice growth and arsenic uptake[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2017.
- [19] 李仁英,李苏霞,谢晓金,等. 施硅期对砷污染土中水稻体内磷含量与分布的影响[J]. 生态环境学报, 2015, 24(6):1050-1056.
LI Ren-ying, LI Su-xia, XIE Xiao-jin, et al. Effect of application periods of silicon on concentrations and distributions of arsenic and phosphorus in rice plants[J]. *Ecology and Environmental Sciences*,

- 2015, 24(6):1050-1056.
- [20] 代 邹. 硒和硅对不同镉积累杂交籼稻镉吸收转运的影响[D]. 成都:四川农业大学, 2017.
- DAI Zou. Effects of selenium and silicon on cadmium uptake and translocation in different indica hybrid rice cultivars with different grain cadmium accumulation ability[D]. Chengdu: *Sichuan Agricultural University*, 2017.
- [21] Li R Y, Ago Y, Liu W J, et al. The rice aquaporin Lsi1 mediates uptake of methylated arsenic species[J]. *Plant Physiology*, 2009, 150(4):2071-2080.
- [22] Taylor G J, Crowder A A. Use of the DCB technique for extraction of hydrous iron oxides from roots of wetland plants[J]. *American Journal of Botany*, 1983, 70(8):1254-1257.
- [23] Li R Y, Zhou Z G, Zhang Y H, et al. Uptake and accumulation characteristics of arsenic and iron plaque in rice at different growth stages[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2015, 46(19):2509-2522.
- [24] 白红红, 章林平, 王子民, 等. 锰对水稻亚铁毒害的缓解作用[J]. 中国水稻科学, 2013, 27(5):491-502.
- BAI Hong-hong, ZHANG Lin-ping, WANG Zi-min, et al. The ameliorative role of manganese on ferrous toxicity in rice plants[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2013, 27(5):491-502.
- [25] 崔宏浩, 陈正刚, 朱 青, 等. 外源物对冷浸田土壤亚铁量及水稻产量的影响[J]. 西南农业学报, 2015, 28(1):220-225.
- CUI Hong-hao, CHEN Zheng-gang, ZHU Qing, et al. Effects of different exogenous additives on ferrous iron content and rice yield in cold waterlogged paddy field[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2015, 28(1):220-225.
- [26] 蔡妙珍, 林咸永, 罗安程, 等. 过量 Fe^{2+} 对水稻生长和某些生理性状的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(1):96-99.
- CAI Miao-zhen, LIN Xian-yong, LUO An-cheng, et al. Effects of excessive Fe^{2+} on growth and physiological characters of rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2002, 8(1):96-99.
- [27] 刘 平, 何继英, 贺 宁, 等. 硅浓度对水稻生长、含水量、根冠比和过氧化物酶活性的影响[J]. 贵州农业科学, 1987(3):6-9.
- LIU Ping, HE Ji-ying, HE Ning, et al. Effects of silicon concentration on rice growth, water content, root-shoot ratio and peroxidase activity[J]. *Journal of Guizhou Agricultural Sciences*, 1987(3):6-9.
- [28] 苏以荣. 硅缓解亚铁对水稻根系毒害的研究[J]. 生态环境学报, 1993, 2(3):171-174.
- SU Yi-rong. Effect of silicon on alleviation of Fe^{2+} toxicity to rice roots[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 1993, 2(3):171-174.
- [29] 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? [J]. *Environmental Pollution*, 2007, 148(1):251-257.
- [30] Fu Y Q, Shen H, Wu D M, et al. Silicon-mediated amelioration of Fe^{2+} toxicity in rice (*Oryza sativa* L.) roots[J]. *Pedosphere*, 2012, 22(6):795-802.
- [31] 李玉影, 刘 颖, 刘双全, 等. 黑龙江省水稻硅肥效果研究[J]. 黑龙江农业科学, 2009(3):60-63.
- LI Yu-ying, LIU Ying, LIU Shuang-quan, et al. Study on the effect of silicon fertilizer application on rice in Heilongjiang Province[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2009(3):60-63.
- [32] 张国良, 戴其根, 张洪程, 等. 水稻硅素营养研究进展[J]. 江苏农业科学, 2003(3):8-12.
- ZHANG Guo-liang, DAI Qi-gen, ZHANG Hong-cheng, et al. Review of researches advance on rice silicon nutrition[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2003(3):8-12.
- [33] 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[J]. 中国水稻科学, 2003, 17(2):187-190.
- CAI Miao-zhen, LUO An-cheng, ZHANG Yong-song, et al. Adsorption of phosphate by iron plaque on rice roots in relation to phosphate uptake by rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2003, 17(2):187-190.
- [34] 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[J]. 环境化学, 2007, 26(3):327-330.
- LIU Yan-ju, ZHU Yong-guan, DING Hui, et al. The effect of root surface iron plaque on Pb uptake by rice (*Oryza sativa* L.) roots[J]. *Environmental Chemistry*, 2007, 26(3):327-330.
- [35] 程冰冰. 湿地植物根表铁膜形成及对植物吸收磷的影响研究进展[C]//2017(第五届)中国水生态大会论文集. 北京: 河海大学、贵州省水利学会, 2017:335-342.
- CHENG Bing-bing. Advances of iron plaque formation on the root surface of wetland plant and the effect to absorption of phosphorus to plants[C]//2017(5th) Proceedings of China water ecology conference. Beijing: Hohai University, Guizhou Water Conservancy Society, 2017:335-342.
- [36] 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[J]. 植物营养与肥料学报, 1997, 3(4):295-299.
- ZHANG Xi-ke, ZHANG Fu-suo, MAO Da-ru. Effect of root iron plaque on phosphorus uptake by rice plant[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 1997, 3(4):295-299.
- [37] 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[J]. 西南农业学报, 1999, 12(增刊1):7-12.
- LÜ Shi-hua, ZHANG Xi-ke, ZHANG Fu-suo, et al. The effect of ferric and manganese hydroxide cutan on root surface in different phosphorus concentrations on phosphorus uptake by rice plants[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 1999, 12(Suppl 1):7-12.
- [38] 曾祥忠, 吕世华, 刘文菊, 等. 根表铁、锰氧化物胶膜对水稻铁、锰和磷、锌营养的影响[J]. 西南农业学报, 2001, 14(4):34-38.
- ZENG Xiang-zhong, LÜ Shi-hua, LIU Wen-ju, et al. Effects of root surface iron and manganese oxide plaque on iron, manganese and phosphorus, zinc nutrition of rice[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2001, 14(4):34-38.
- [39] Guo W, Hou Y L, Wang S G, et al. Effect of silicate on the growth and arsenate uptake by rice (*Oryza sativa* L.) seedlings in solution culture [J]. *Plant and Soil*, 2005, 272(1/2):173-181.
- [40] 梁永超, 张永春. 植物的硅素营养[J]. 土壤学进展, 1993(3):7-14.
- LIANG Yong-chao, ZHANG Yong-chun. Silicon nutrition in plants[J]. *Advances in Soil Science*, 1993(3):7-14.
- [41] 胡克伟, 关连珠, 颜 丽, 等. 施硅对水稻土磷素吸附与解吸特性的影响研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2):214-218.
- HU Ke-wei, GUAN Lian-zhu, YAN Li, et al. Effect of supply silicon on adsorption and desorption action of phosphorus in paddy soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2002, 8(2):214-218.