

不同磷素水平对水稻根系生长及部分营养元素吸收的影响^①

王 静^{1,2}, 章林平², 王利鹃¹,
朱亦君², 邵国胜², 崔 翠¹

1. 西南大学 农学与生物科技学院, 重庆 400715; 2. 中国水稻研究所, 杭州 311400

摘要: 以珍汕 97B 和密阳 46 为研究材料, 采用营养液培养, 研究 1 mg/L、10 mg/L 和 20 mg/L 3 种不同磷质量浓度对水稻根系生长、根系阳离子交换量(CEC)及部分矿质元素吸收的影响. 结果表明, 较低的外源磷素水平(1 mg/L)显著提高植株总根长、根体积、根表面积和根直径. 低磷水平可以降低 2 个品种根系阳离子交换能力; 高磷水平处理 10 d 和 20 d 时, 2 个品种水稻根系阳离子交换能力表现不同, 其中珍汕 97B 根系阳离子交换量在 2 个时间段均显著增加, 较对照分别增加 24.9% 和 16.33%; 而密阳 46 则较对照差异不具有统计学意义. 从外源施磷水平对水稻植株地上部分和地下部分磷来看, 低磷处理显著降低了 2 个品种植株地上与地下部分磷元素的积累, 并影响其对 Fe、Mn 和 Zn 的吸收和运转; 高磷(20 mg/L)处理后, 促进了幼苗磷素吸收和积累, 对铁(Fe)、锰(Mn)和锌(Zn)的吸收与积累也因品种不同而出现不同的变化特点. 不同的外源磷素施用对 2 品种铜元素的吸收和运输影响较小.

关键词: 磷; 水稻(*Oryza Sativa* L.); 营养元素吸收; 根系

中图分类号: S511

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2015)07-0030-07

磷(P)是植物生长所必须的三大营养元素之一, 在能量代谢、糖分代谢、酶活性调节、信号传导及光合作用中发挥着重要作用^[1-2], 磷的丰缺最终影响着作物生长发育及产品的产量和品质^[3-4]. 缺磷的根本原因是土壤中有有效磷被固定或随农业灌溉水而流失, 导致可溶性磷质量浓度降低, 引发作物对磷肥的当季利用率降低^[5]. 农业生产中通常依靠增施磷肥来满足作物正常生长发育的需求, 然而磷肥施用量过量又引发环境污染问题^[6-7]. 因此, 如何利用作物本身特性来提高土壤中磷利用效率, 已引起广大农业科学工作者的普遍关注. 根系是植物吸收养分的主要器官, 作物根系形态会影响其对土壤中有效磷吸收, 根系分泌物的活化作用又影响着土壤中难溶性磷的吸收^[8]. 前人对不同磷水平下玉米^[9]、落花生^[10]及油菜^[11]等作物根系的研究表明, 缺磷时作物会形成较大的根系, 或者分泌较多的酸性磷酸酶, 提高根系对磷素的吸收. 因此, 挖掘植物自身磷营养高效利用的种质资源, 改良作物磷营养性状成为目前植物磷营养研究的热点和重点. 水稻作为世界上主要的粮食作物之一, 其生长环境中过量的铁(Fe)、锰(Mg)、锌(Zn)等元素严重抑制了水稻的生长, 有研究证明, 锰胁迫能降低种子活力, 提高过氧化物酶活性^[12], 较高质量浓度的锌显著降低油菜叶片数、株高、干质量等指标^[13]. 在长期的生长进化过程中, 根系具有一定氧化能力, 可将根际周围的还原性铁、锰等元素氧化形成氧化物胶膜沉积在根系表面^[14-15]. 不同基因型水稻在不同磷水平下, 其生理特性

① 收稿日期: 2014-01-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31070243).

作者简介: 王 静(1986-), 女, 河南新乡人, 硕士研究生, 主要从事作物栽培生理研究.

通信作者: 崔 翠, 副教授.

和根系形态的变化不同^[16]以及根表铁锰氧化物胶膜的厚度不同,因而直接影响水稻根系构型及对营养元素的吸收.此外,植物各矿质元素之间有紧密的相关关系,研究表明在酸性铝毒条件下,适当施入钙、磷营养能显著促进紫花苜蓿的生长,提高苜蓿的生物量和氮素营养^[17].前人研究磷素对水稻生长的影响主要是磷素对水稻株高、根长及矿质元素吸收的影响,而对不同磷素条件下水稻根系形态的变化及外源磷元素对根系阳离子交换量的影响的研究较少.本研究分析了不同磷水平下水稻根系生长、根系阳离子交换量(CEC)及部分营养元素吸收状况,探讨水稻在不同磷水平下的生理生态适应机制,以期更加清楚地了解水稻磷营养特性,为进一步提高水稻磷营养的利用效率提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 材料处理

试验材料是由前期实验筛选出的亚铁耐性差异具有统计学意义的 2 个水稻品种:珍汕 97B(耐亚铁毒害型)和密阳 46(亚铁毒害敏感型),其中珍汕 97B 是浙江省温州市农业科学研究所于 1968 年利用珍珠矮和粳矮选 4 号杂交育成的早籼稻品种,现为我国大面积推广的汕优系列杂交稻品种不育系珍汕 97A 的保持系;密阳 46 系南朝鲜从“统一/IR24//IR1317///IR24”中选偏粳型强优势恢复系.2 个材料均由中国水稻研究所提供.

试验分别于 2012 年 11 月及 2013 年 6 月在中国水稻研究所富阳实验基地玻璃温室和网室内重复进行 2 次.玻璃温室内温度维持在 30℃左右,网室采用自然温度.光照强度均为自然光照.种子经 5%次氯酸钠溶液消毒 5 min 后浸种 48 h,于 35℃催芽 24 h 后播于沙床.待幼苗长至二叶一心时,选择生长一致的幼苗移栽于装有 4.5 L 营养液的黑色塑料桶(直径 19.3 cm,高 20.8 cm),通过海绵固定进行营养液培养,每桶栽植 5 穴,每穴 3 株.

自来水预培养 1 d,全营养液培养一周后分别采用 1 mg/L、10 mg/L 和 20 mg/L 不同磷水平进行处理,以 $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 作为磷源,其中 10 mg/L 为 CK,其磷质量浓度等于全营养液磷质量浓度,其他养分质量浓度均一致.每 3 d 更换 1 次培养液,用 0.1 mol/L HCl 或 0.1 mol/L NaOH 调 pH 值至 5.0.试验采用裂区设计,品种为主区,磷水平为副区,每处理 6 盆.营养液按国际水稻所(IRRI)推荐配方配制^[18].

在磷处理 10 d 及 20 d 时每处理分别随机选取 5 穴水稻幼苗作为一个重复,其中 1 穴用于根系形态分析,另 4 穴水稻幼苗用于株高及干物质质量测定,磨碎后用于测定根系阳离子交换量(CEC)和元素质量分数.重复 3 次.

2 年试验结果基本一致,因此采用 2013 年 6 月份试验数据进行分析.

1.2 测定项目与方法

1.2.1 根系形态相关指标测定

分别在磷处理 10 d 及 20 d 取样将新鲜根系用自来水浸泡 30 min,并用流水小心将根系冲洗干净,以单株为单位,利用万深 LS-A 型植物图像扫描仪(Phantom 9850XL Plus)将完整根系图像存入计算机,用根系分析系统对根系总根长、总根表面积、根体积、根平均直径、根尖数以及根系分形维数进行分析.

1.2.2 根系阳离子交换量(CEC)测定

采用崔国贤等^[19]淋洗法稍加修改.称取根系干样 0.10 g,放入 100 mL 三角瓶中,加几滴蒸馏水,加入 0.01 mol/L HCl 溶液 50 mL,搅拌 5 min,根样下沉后过滤,用蒸馏水反复冲洗残渣至无氯离子(用 2% AgNO_3 检验),用 50 mL 1 mol/L KCl 溶液将根样全部洗入原三角瓶中,滴加 7~8 滴酸碱混合指示剂,用 pH 计测定悬浮液的 pH 值,用 0.005 mol/L KOH 滴定至 pH 值为 7.0,记录 KOH 溶液的体积 $V(\text{mL})$.根系阳离子交换量 $\text{CEC}(\text{cmol/kg}) = 0.005 \times V(\text{mL}) \times 100 / \text{根样干物质质量}(\text{g})$.

1.2.3 营养元素质量分数测定

地上部及根系经烘干磨碎后称取 0.250 g,用浓硝酸和高氯酸混合液(3:1)硝煮后,双蒸水定容至 50 mL.采用原子吸收分光光度计(SP-3520,上海光谱)测定硝化液中铁、锰、锌(Zn)及铜(Cu)等矿质元

素质量分数;采用钼兰比色法测定植株全磷质量分数^[20].

1.3 数据处理

数据整理及分析采用 Microsoft Excel 2007 及 DPS 7.55 软件进行.

2 结果与分析

2.1 不同外源磷质量浓度对水稻根系形态的影响

分别测定 2 个品种在不同磷水平处理 10 d 及 20 d 时其根系形态特征(表 1). 结果表明,低磷水平(1 mg/L)处理后 2 个品种在 2 个时间段的最长根长、总根长、根尖数、根直径、根表面积和根体积均有不同程度的增加,其中珍汕 97B 的最长根长、总根长和根表面积和单株根尖数在处理 20 d 时均较对照差异具有统计学意义;密阳 46 的最长根长在处理 10 d 和 20 d 时均较对照显著增加,总根长、单株根尖数和根表面积在处理 10 d 时较对照差异具有统计学意义,但是到 20 d 时较对照差异已经不具有统计学意义;根的分形维数较对照差异不具有统计学意义,说明低磷胁迫通过改变根的形态来提高其吸收能力,但是其根系分根数却没有具有统计学意义增加,根系并没有因为其部分形态特征的改变而发达程度得到提高. 高磷水平(20 mg/L)处理下,珍汕 97B 在处理 10 d 和 20 d 时其最长根长、总根长和根尖数等较对照具有一定的增加或者减少,但是差异均不具有统计学意义;而密阳 46 在处理 10 d 时的最长根长、单株根尖数均较对照显著增加,但是在处理 20 d 时各形态指标较对照差异已经不具有统计学意义. 处理 10 d 与 20 d 对根系维数影响较对照均不具有统计学意义,表明高磷状态下,根系不再通过提高其根系生长来促进其吸收能力,根系发达程度没有受到影响.

表 1 不同磷水平处理 10 d 和 20 d 时对水稻根系生长的影响

品种	时间/ d	处理/ (mg·L ⁻¹)	最长根长/ cm	总根长/ cm	单株根系表面积/ cm ²	单株根系体积/ cm ³	平均直径/ cm	根尖数/ 株	分形维数
珍汕 97B	10 d	1	24.96±0.52aA	939.76±68.84aA	176.81±14.99aA	5.05±0.78aA	0.64±0.03bA	2 764.5±293.97aA	1.57±0.01aA
		10(CK)	23.91±0.36abAB	797.65±108.24aA	174.47±21.14aA	4.06±0.76aA	0.63±0.019bA	2 662±281.72aA	1.55±0.02aA
		20	22.67±0.57bB	759.21±112.04aA	157.77±28.36aA	4.89±0.99aA	0.72±0.03aA	2 122.5±168.73aA	1.57±0.02aA
	20 d	1	27.55±0.63aA	1 851.75±127.70aA	477.49±49.86aA	31.26±4.21aA	0.75±0.02aA	5 483.5±497.58aA	1.68±0.02aA
		10(CK)	25.39±0.61bAB	1 355.99±90.59bB	354.20±42.07bA	25.77±5.19aA	0.74±0.04aA	4 280.75±264bAB	1.67±0.02aA
		20	24.44±0.75bB	1 278.19±66.70bB	401.75±37.29abA	33.60±6.10aA	0.88±0.08aA	3 326.75±413.43bB	1.70±0.01aA
密阳 46	10 d	1	20.69±0.22aA	667.94±61.68aA	103.89±12.84aA	2.75±0.44aA	0.54±0.02aA	2437.75±130.5aA	1.53±0.02aA
		10(CK)	18.33±0.26cC	484.24±38.74bA	71.99±6.83bA	1.82±0.25aA	0.52±0.04aA	1967±152.09bA	1.49±0.005aA
		20	19.54±0.4bB	589.54±44.85abA	90.55±5.75abA	2.44±0.39aA	0.54±0.02aA	2460±153.56aA	1.49±0.01aA
	20 d	1	22.43±0.49aA	1576.53±35.10aA	346.14±40.69aA	22.24±3.49aA	0.69±0.02aA	4579.75±574.35aA	1.69±0.02aA
		10(CK)	20.45±0.33bB	1372.99±108.31aA	367.11±32.93aA	30.90±6.05aA	0.73±0.01aA	3974.5±471.85aA	1.70±0.01aA
		20	21.08±0.37bAB	1386.42±264.91aA	356.73±81.34aA	27.92±7.30aA	0.69±0.03aA	4273±548.39aA	1.70±0.02aA

注:同一列中不同的大写字母表示各品种处理间均值在 $p=0.01$ 水平上差异极具有统计学意义,小写字母表示各处理间均值在 $p=0.05$ 水平上差异具有统计学意义,下同.

2.2 不同磷水平对根系阳离子交换量(CEC)的影响

不同磷水平处理下根系阳离子交换量(CEC)表明,2 水稻品种在低磷水平处理 10 d 和 20 d 时均表现为 CEC 显著下降,其中珍汕 97B 较对照分别下降 16.38%和 16.87%;密阳 46 较对照分别下降 14.33%和 27.53%,说明较低的外源磷水平可以降低 2 个品种根系阳离子交换能力. 在高磷水平处理 10 d 和 20 d 时,2 个品种表现不同,其中珍汕 97B 在 2 个时间段均显著增加,较对照分别增加 24.9%和 16.33%;而密阳 46 则和对照差异不具有统计学意义. 随着磷质量浓度水平提高,珍汕 97B 根系 CEC 在磷质量浓度不高于 20 mg/L 时呈现出上升趋势,且增幅显著,而密阳 46 则外源处理磷质量浓度在 10 mg/L 左右时其阳离子

交换量已经达到饱和, 过度增施外源磷并不能增加其阳离子交换能力(表 2).

表 2 不同磷水平对 2 个水稻品种阳离子交换量的影响

处理(P)/ (mg · L ⁻¹)	10 d		20 d	
	珍汕 97B	密阳 46	珍汕 97B	密阳 46
1	10.47±0.19cC	12.85±0.09bB	10.43±0.11cC	11.72±0.21bB
10(CK)	12.52±0.05bB	15.00±0.31aA	12.55±0.12bB	16.17±0.24aA
20	15.63±0.23aA	14.83±0.22aA	14.60±0.09aA	16.42±0.80aA

2.3 不同磷水平对水稻植株磷及部分矿质元素吸收的影响

2.3.1 不同磷水平对水稻植株磷元素吸收的影响

外源磷元素处理对水稻幼苗植株地上、地下部分磷元素积累的影响见表 3. 结果表明, 相同处理时间时同一个品种地上部分与地下部分(根系)磷素积累量均表现为随外源磷质量浓度增加而升高, 各处理间差异均具有统计学意义; 从处理 10 d 和 20 d 时二者的比较来看, 2 个水稻品种均表现为处理在低磷水平(1 mg/L)情况下, 处理时间从 10 d 至 20 d, 其地上和地下部分磷元素质量分数均较对照大幅度降低; 而对照和高磷(20 mg/L)处理在 10 d 至 20 d 时磷元素质量分数变化增减幅度较小. 说明在一定范围内增加外源磷质量浓度有利于促进水稻幼苗根系磷素吸收及地上、地下部分的磷素积累, 外源低磷(1 mg/L)施用会严重限制水稻幼苗在生长过程中的磷素有效积累, 且低磷的限制作用随生长时间的延长表现得更加充分.

表 3 不同磷水平对水稻植株磷质量分数的影响

部位	处理/ (mg · L ⁻¹)	珍汕 97B		密阳 46	
		10 d	20 d	10 d	20 d
		mg · kg ⁻¹			
地上部	1	6 621.38±168.47cC	3 870.66±134.00cC	6 621.38±48.13cC	4 833.41±291.80cC
	10(CK)	10 688.51±277.56bB	10 590.27±24.07bB	10 138.37±110.29bB	11 336.90±173.55bB
	20	13 439.23±181.71aA	15 914.88±821.12aA	14 677.06±216.61aA	16 936.58±378.25aA
地下部	1	4 479.74±150.30cC	3 300.86±291.80cC	7 092.93±127.35cC	3 575.94±349.60cC
	10(CK)	9 313.15±450.90bB	11 965.63±220.58bB	12 889.09±63.68bB	15 305.79±271.23bB
	20	12 044.22±544.05aA	14 755.65±63.68aA	14 716.35±521.21aA	17 329.54±144.40aA

2.3.2 不同磷水平对水稻植株部分矿质元素质量分数的影响

不同磷水平处理水稻植株后对其地上和地下部分矿质元素质量分数因品种、处理时间长短而表现出不同的变化特点(表 4). 在 Fe 元素质量分数上, 外源低磷导致 2 个品种处理 10 d 和 20 d 时其地上部分均具有不同程度的上升, 其中珍汕 97B 在处理 10 d 时较对照差异具有统计学意义, 而地下部分在 2 个时间段均较对照显著下降, 说明低磷处理对 2 个品种 Fe 元素的吸收主要影响在根部吸收, 而对地上部分磷素积累影响不大; 当外源磷素质量浓度提高到 20 mg/L 时, 2 个不同品种 Fe 元素积累表现不同, 其中珍汕 97B 地上部分因高磷呈现出下降趋势, 而地下部分则较对照略有上升, 但均较对照差异不具有统计学意义, 说明一定范围内的高磷处理对珍汕 97B 地下部分 Fe 吸收、Fe 往其地上部分的运输和积累影响不大; 密阳 46 地上部分较对照其 Fe 元素质量分数均有一定的上升, 而地下部分则较对照显著下降, 结果表明密阳 46 在高磷条件下, 地下部分磷和 Fe 的耦合受到一定的抑制. 在 Mn 元素质量分数方面, 低磷处理导致 2 个品种的地上和地下部分 Mn 质量分数均显著低于对照, 而高磷处理时 2 个品种均只表现为处理 20 d 时地上部分显著高于对照, 其余均和对照差异不具有统计学意义, 研究结果说明在一定的质量浓度和时间范围内, 随着磷质量浓度的提高, 水稻植株对 Mn 的吸收增加. 外源低磷处理导致 2 个品种地上和地下部分 Zn 质量分数变化不同, 其中低磷胁迫下, 2 个品种地上和地下部分在 10 d 和 20 d 时 Zn 质量分数均下降, 除密阳 46 在处理 20 d 时地上部分较对照差异不具有统计学意义外, 其余差异均具有统计学意义, 说明外源施磷质量浓度降低, 将降低植株对 Zn 的吸收和积累; 但是在外施高质量浓度磷时, 珍汕 97B 在处理 10 d 时地上部分显著下降, 其余均和对照相当, 而密阳 46 则表现为 2 个时间段地上和地下部分含 Zn 均较对照上升, 且除

10 d时地上部分较对照上升差异不具有统计学意义外, 其余均差异具有统计学意义, 说明高磷质量浓度处理前期对珍汕 97B 的 Zn 吸收有一定的抑制作用, 而密阳 46 则随外源施磷质量浓度增加而 Zn 吸收和运转量增加. 外源磷的处理对 2 个品种 Cu 质量分数均不具有统计学意义.

表 4 不同磷水平对水稻植株部分矿质元素质量分数的影响 mg · kg⁻¹

品种	时间/d	部位	处理	Fe	Mn	Zn	Cu
珍汕 97B	10	地上部	1	485.51±23.94aA	336.03±3.46bB	68.27±0.56bA	31.36±5.15aA
			10(CK)	412.92±16.36bAB	435.17±18.62aAB	73.78±2.75aA	32.53±6.23aA
			20	365.78±5.79bB	503.66±38.09aA	67.35±1.43bA	24.93±1.33aA
		地下部	1	1182.84±30.16bB	49.24±3.27bB	87.21±2.25bB	135.85±11.60aA
			10(CK)	1810.90±11.43aA	69.50±3.43aA	105.84±0.59aA	132.70±7.46aA
			20	1848.71±48.49aA	75.09±6.47aA	103.04±1.61aA	152.50±9.77aA
	20	地上部	1	525.96±16.71aA	316.82±13.23cB	66.63±1.85aA	27.27±1.49aA
			10(CK)	512.14±9.73aA	412.49±10.15bA	69.078±1.02aA	26.47±0.30aA
			20	490.90±25.94aA	459.49±11.99aA	69.19±3.11aA	26.26±1.07aA
		地下部	1	1496.70±35.74bB	47.66±2.59cB	85.98±3.05bB	103.93±12.95aA
			10(CK)	1885.57±22.42aA	66.06±2.89aA	136.36±4.15aA	127.97±9.94aA
			20	1929.62±30.58aA	57.67±2.74bAB	135.97±5.99aA	108.29±9.38aA
密阳 46	10	地上部	1	419.49±10.65aA	693.22±19.28bB	90.43±1.39bA	33.54±1.02aA
			10(CK)	393.36±8.10aA	911.04±12.56aA	98.13±3.94aA	32.85±0.15aA
			20	393.98±11.40aA	923.98±7.95aA	101.53±1.86aA	34.06±0.56aA
		地下部	1	1848.77±4.25cC	111.15±7.84bB	135.59±0.82cB	260.78±12.40aA
			10(CK)	2067.05±17.82aA	199.72±5.33aA	161.02±0.89bB	265.35±2.88aA
			20	1970.30±18.07bB	191.8±4.61aA	187.12±9.63aA	265.11±7.97aA
	20	地上部	1	462.92±17.43aA	540.74±31.66cC	84.07±2.39bB	30.79±1.35aA
			10(CK)	455.62±34.65aA	781.93±19.32bB	91.02±1.05bB	30.10±0.18aA
			20	529.62±42.09aA	893.92±18.60aA	111.41±3.51aA	29.74±1.43aA
		地下部	1	1546.03±11.69cB	52.20±0.16bB	117.31±5.31cB	176.62±13.80aA
			10(CK)	2129.92±15.80aA	109.15±9.29aA	169.13±4.72bA	184.86±9.17aA
			20	2079.92±12.45bA	118.71±2.49aA	190.33±5.59aA	187.37±7.18aA

3 讨 论

根系发育是作物遗传特性以及外部环境共同作用的结果^[21], 大量的研究表明, 植物对磷的吸收和根系形态有着密切的关系^[1]. Newman 等^[22]证明小麦的根系总长度与吸磷量呈显著正相关. 本研究低磷水平(1 mg/L)增加了 2 种水稻品种的最长根长、总根长、单株根系表面积、单株根系体积、根系平均直径及单株根尖数, 这与李海波等^[23]的研究结果相似; 高磷水平(20 mg/L)降低了珍汕 97B 的最长根长、总根长及单株根尖数, 提高单株根系体积、根系平均直径, 但高磷水平(20 mg/L)促进了密阳 46 的最长根长及单株根尖数的增加. 研究表明, 当水稻根系所在的生长环境中有效磷高于或低于作物自身所需时, 便促进了根系形态的适应性变化, 使根系朝着更有利于植株生长和吸收根际磷等矿质元素的方向发展.

一般认为, 根系在缺磷条件下根系分泌较多的有机酸是根系活化根周围难溶性磷的机制之一^[24], 低磷处理明显增加耐低磷基因型和低磷敏感型玉米根系有机酸分泌量^[25]. 在本研究条件下, 低磷水平(1 mg/L)极显著降低了 2 种水稻品种植株磷元素质量分数和根系 CEC, 同时还对植株磷、锰和锌元素质量分数有明显的抑制作用; 高磷水平(20 mg/L)提高了水稻根系 CEC, 提高了其磷元素的吸收和合成, 也促进了水稻植株对磷、锰和锌元素的吸收. 铁与磷能在土壤里、培养基里、根表面与植物体内相互物理结合^[26]. 水稻在不同磷质量浓度下, 其根系形态、生理特性及根表铁膜的厚度不同, 这些差异直接影响了水稻根系对铁的

吸收^[16], 即铁磷互作. 本研究也得到了相似的结果.

4 结 论

不同的水稻品种对不同磷水平的反应不同, 各品种在最适磷水平下才能使资源浪费和环境污染程度降到最低, 并且植株的生长潜力得到充分的发挥. 在较低的磷水平下(1 mg/L)2 个品种主根长、地上部铁质量分数、总根长、根体积、根表面积、平均直径和根尖数均大于对照, 根系 CEC、地下部铁质量分数以及植株磷、锰、锌元素显著或极显著降低. 在较高的磷水平下(20 mg/L)水稻植株地上部铁质量分数显著降低而地下部铁质量分数及其他矿质元素质量分数和根系 CEC 则显著增加, 主根长、根表面积、根体积和根系平均直径等不同的品种反应不同. 因此, 研究不同磷水平下水稻营养元素的吸收和根系形态的变化, 在生产上和实际栽培过程中对于更好地指导磷肥的施用具有重要的意义.

参考文献:

- [1] RAGHOTHAMA R G, ACQUISITION P. Annual Review Plant Physiology and Plant Molecular Biology [J]. Biology 1999, 50(1): 665—693.
- [2] RAUSCH C, BUCHER M. Molecular Mechanism of Phosphate Transport in Plants [J]. Planta, 2002, 216(1): 23—27.
- [3] LYNCH J P. Root Architecture and Plant Productivity [J]. Plant Physiol, 1995(1), 109: 7—31.
- [4] WISSUWA M. How do Plants Achieve Tolerance to Phosphorus Deficiency? Small Causes with Big Effects [J]. Plant Physiol, 2003, 133(4): 1947—1958.
- [5] QUAN Wei-min, YAN Li-jiao. Effect of Agricultural Nonpoint Source Pollution Eutrophication of Water Body and Its Control Measure [J]. Acta Ecol Sin, 2002, 22(3): 291—299.
- [6] 单保庆, 尹澄清, 于 静, 等. 降雨—径流过程中土壤表层磷迁移过程的模拟研究 [J]. 环境科学学报, 2001, 21(1): 7—12.
- [7] WITHERS P J A, EDWARDS A C, FOY R H. Phosphorus Cycling in UK Agriculture and Implications for Phosphorus Loss from Soil [J]. Soil Use & Management, 2001, 17(3): 139—149.
- [8] MARSCHNER H, ROMHELD V, CAKMAK I. Root-Induced Changes of Nutrient Availability in the Rhizosphere [J]. J Plant Nutr, 1987, 10(9): 1175—1184.
- [9] GAUME A, MACHLER F, LLEON C D, et al. Low Ptolerance by Maize Genotypes: Significance of Root Growth, and Organic Acids and Acid Phosphate Root Exudation [J]. Plant and Soil, 2001, 228(12): 253—264.
- [10] AE N, ARIHARA J, OKADA K, et al. Phosphorus Uptake by Pigeonpea and Its Role in Cropping Systems of the Indian Subcontinent [J]. Science, 1990, 248(4954): 477—480.
- [11] 刘 慧, 刘景福, 刘武定. 不同磷营养油菜品种根系形态及生理特性差异研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(1): 40—45.
- [12] 田学军, 郭亚力, 李春燕, 等. 锰胁迫对甘蓝型油菜 *Brassica napus* L. 种子活力和幼苗抗氧化系统的影响 [J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2012, 37(2): 77—81.
- [13] 王丹丹, 杨静慧, 李双跃, 等. 锌对油菜幼苗生长的影响 [J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2013, 38(7): 134—139.
- [14] ARMSTRONG W. The Oxidizing Activity of Water Logged Soils [J]. Physiol Plant, 1967, 20(4): 920—926.
- [15] TANAKA A, LOE R, NAVASERO S A. Some Mechanisms Involved in Development of Iron Toxicity Symptoms in the Rice Plant [J]. Soil Sci Plant Nutr, 1966, 12(4): 32—38.
- [16] SATTELMACHER B, HORST W J, BECKER H C. Factors That Contribute to Genetic Variation for Nutrient Efficiency of Crop Plants [J]. Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung Und Bodenkunde, 1994, 157(3): 215—224.
- [17] 王晓峰, 罗 珍, 刘晓燕, 等. 钙磷对紫花苜蓿根瘤菌体系酸铝胁迫的修复效应 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2013, 35(5): 108—111.
- [18] ZHU Zheng-ge, FU Ya-ping, XIAO Han, et al. Ac/Ds Transposition Activity in Transgenic Rice Population and DNA Flanking Sequence of Ds Insertion Sites [J]. Acta Botanica Sinica, 2003, 45(1): 102—107.

[19] 崔国贤, 李宗道. 苕麻不同基因型的吸钾能力及其与根系参数的关系 [J]. 农业现代化研究, 2000, 21(6): 371—375.

[20] 南京农业大学. 土壤农化分析(Ⅱ) [M]. 北京: 农业出版社, 1996.

[21] SCHIEFELBEIN J W, BENFEY P N. The Development of Plant Root: New Approaches to Underground Problem [J]. Plant Cell, 1991, 3(11): 1147—1154.

[22] NEWMAN E I, ANDREWS R E. Uptake of Phosphorus and Potassium in Relation to Root Growth and Root Density [J]. Plant and Soil, 1973, 38(1): 49—69.

[23] 李海波, 夏 铭, 吴 平. 低磷胁迫对水稻苗期侧根生长及养分吸收的影响 [J]. 植物学报, 2001, 43(11): 1154—1160.

[24] 王美丽, 严小龙. 大豆根形态和根分泌物特性与磷效率 [J]. 华南农业大学学报, 2001, 22(3): 1—4.

[25] 黄爱缨, 代先祝, 王三根, 等. 低磷胁迫对玉米自交系苗期根系分泌有机酸的影响 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2008, 30(4): 073—077.

[26] MARSCHNER H. Mineral Nutrition of Higher Plants [M]. London: Academic Press, 1995.

Effects of Different Phosphorus Levels on Root Growth of Rice Cultivars and the Absorption of Some Nutrient Elements

WANG Jing^{1,2}, ZHANG Lin-ping², WANG Li-juan¹,
ZHU Yi-jun², SHAO Guo-sheng², CUI Cui¹

1. School of Agronomy and Biotechnology, Southwest University, Chongqing 400715, China;
2. China National Rice Research Institute, Hangzhou 311400, China

Abstract: Rice varieties Zhenshan97B and Miyang46 were cultured in nutrient solutions containing phosphorus at P2O5 1, 10 and 20 mg/L to study the effects of P on root growth and root cation exchange capacity (CEC) and on the absorption of some mineral elements by the plants. Phosphorus at a low level (1 mg/L) significantly improved total root length, root volume, root surface area and average diameter of the root of the two varieties. Low P level (1 mg/L) significantly reduced root CEC of both varieties. At a high P level (20 mg/L), the two varieties responded differently: root CEC of Zhenshan97B significantly increased after 10 and 20 days' treatment, by 24.9% and 16.33%, as compared with the control, respectively, while that of Miyang46 was not significantly different from that of the control. As for phosphorus content of rice plants, low P level (1 mg/L) significantly reduced P content of the shoot and the roots of both varieties, and affected absorption and transportation of Fe, Mn and Zn in them. On the contrary, high P level (20 mg/L) improved absorption and accumulation of phosphorus, and resulted in huge change in Fe, Mn and Zn contents in rice seedlings between the two varieties. Different phosphorus levels had little influence on absorption of Cu in rice seedlings.

Key words: phosphorus; rice (*Oryza sativa* L.); nutrient element absorption; root

责任编辑 夏 娟

