

砂培条件下两种磷效率棉花根系形态及根际特征差异

王 靓, 盛建东, 陈波浪*

(新疆农业大学草业与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 为对比两种磷效率棉花在两种磷水平 (0.1 和 5 mmol/L) 的根系形态和根际特征的差异。以磷高效型棉花 ZM42 和磷低效型棉花 XLZ13 为研究对象设计砂培花盆分层试验, 测定生物量、吸磷量、根系形态数据、分层 Olsen-P、pH 值和酸性磷酸酶。结果表明: 在砂培条件下两种磷效率棉花生物量和磷素积累量随施磷量的增加均有不同程度增加; ZM42 在两种磷处理的根部生物量、吸磷量以及根冠比都优于 XLZ13。在两种磷处理下, ZM42 根系中根径 (0~0.4 mm) 的细根长度较 XLZ13 长, 细根在总根长中的比例较高。总根长中细根越多有利于促进植株对磷的吸收。生长介质中磷含量降低时, 棉花根际 pH 值也随之降低, 高效品种 ZM42 的根际 pH 值降低幅度显著高于 XLZ13; 两种磷效率棉花在两个时期的根际土壤磷酸酶活性均随着施磷量的减少而增加, 磷高效棉花 ZM42 分泌的土壤磷酸酶活性均高于磷低效棉花 XLZ13。由此可见, 两种磷效率棉花在相同生长介质中根际机理存在差异, 且在低磷胁迫下磷高效棉花根系形态特征改变是根际磷活化主要机理之一。

关键词: 磷效率; 棉花; 根系形态; 根际特征

中图分类号: Q945.12; S562

文献标识码: A

文章编号: 1673-6257 (2016) 03-0067-07

在我国约有 51% 的土壤缺磷^[1]。磷肥施入土壤后作物当季利用率仅为 10%^[2], 因为磷肥施入土壤极易被微生物转化成难利用有机磷或是作物难利用的 Fe-P、Ca-P、Al-P^[3]。实际上土壤中的全磷量很高, 但植物可以吸收利用的有效磷却很低, 造成所谓的遗传学缺磷^[4], 作物生产中磷肥能够直接影响其品质和产量。磷在土壤中易被固定, 从而降低了被作物吸收利用的有效性。从国内外研究的趋势来看, 针对磷肥利用率较低, 解决的主要途径之一就是利用磷高效品种来提高对难溶性磷的利用率^[5]。从作物对磷的吸收特点看, 磷元素的扩散系数非常小, 在土壤中的迁移主要靠浓度梯度和土壤的扩散条件, 作物只能从根周围很小的土柱中对其进行吸收利用^[6]。

筛选和培育磷素高效利用基因型是缓解土壤磷素严重缺乏, 挖掘作物自身潜力, 提高作物对土壤磷素的吸收利用效率的有效途径之一。磷高

效型也称耐低磷基因型, 是指生长介质中磷养分浓度较低时植株通过自身的调节, 以弥补磷营养的不足, 并获得与足磷时相当或接近的籽粒产量; 磷低效型也称磷肥敏感基因型, 指向生长介质中提供磷肥后植物吸收磷素并获得较高产量的能力的品种。在相同作物的不同基因型之间, 磷效率也存在差异^[7]。在对菜豆、玉米、小麦、水稻、烟草等作物不同磷效率的研究里发现, 磷高效作物对提高磷肥利用率以及土壤磷资源, 适应低磷胁迫存在较大的潜力^[8-12]。有研究表明, 植物在缺磷的条件下可通过生理学过程或根系形态学改变以得到更多的磷。生理学过程可导致根部生物量的增加, 根际土壤磷酸酶的增加^[13]以及根际土壤 pH 值的下降^[14]。根系形态学改变表现在磷高效品种的根系数量、根毛长度和密度、根系鲜干重、根系总吸收面积、活跃吸收面积、根体积均高于磷低效品种^[15-18], 这些特征扩大了根系与土体的接触面积, 更有利于对磷素的吸收。棉花是新疆种植的主要经济作物之一, 土壤缺磷成为棉花获得高产的一个限制因素。而棉花仅在钾效率方面有一些初步的研究^[19-20], 在磷效率基因型差异及其机理方面的研究报道较少^[21], 因此, 开展不同基因型棉花对低磷胁迫反应的差异研究具有十分重要的意义。

收稿日期: 2015-04-07; **最后修订日期:** 2015-06-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31260499); 新疆自治区土壤学重点学科。

作者简介: 王靓 (1988-), 女, 新疆哈密人, 硕士研究生, 研究方向为土壤生态学。E-mail: liang309828695@qq.com。

通讯作者: 陈波浪, E-mail: chenwang200910@sina.com。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本研究选用新疆农业科学院提供的棉花品种：磷高效基因型中棉42号(ZM42)和磷低效基因型新陆早13号(XLZ13)。采用砂培的方法，研究两种磷效率基因型棉花的根系形态和根际特征差异。首先挑选健康饱满的种子用3% H₂O₂ 灭菌后在25℃下培养24 h，待出芽后备用。选取粒径为0.5~2 mm的石英砂，用自来水冲洗干净后置于5 mol/L的HCl中浸泡3 d，然后用蒸馏水洗净、灭菌、晾干备用。

1.2 试验设计

试验于新疆农业大学温室内进行，室内温度为(25±5)℃，设置2个处理：低磷处理(P₁: 0.1 mmol/L)，高磷处理(P₂: 5 mmol/L)。塑料花盆的规格为直径30 cm，高28 cm，每盆分为3层(从上至下为0~10 cm、10~20 cm、>20 cm)，每层之间用孔径为2.5 mm的玻璃纤维筛网分隔(保证根系能顺利穿过)^[13]。出芽的棉花种子播种在距石英砂表面3 cm处，每盆2株，设置12次重复。采用改良的Hoagland营养液和阿农微量元素营养液为基液进行培养^[22]，营养液组成(mmol/L)：低磷P₁ [KH₂PO₄ 0.1, Ca(NO₃)₂ 2.5, KNO₃ 9.9, CaSO₄ 2.5] 和高磷P₂ [KH₂PO₄ 5, Ca(NO₃)₂ 5, KNO₃ 5] 处理。在棉花长出第4片真叶时营养液每5 d浇灌一次，浇灌之前用清水漫灌一次，尽量清洗残留的营养液。

在苗期和花铃期两次采样。采样时先收获植株地上部，再进行地下部的分层收获。将地下部按3层分离，分层保留根系及根系周围的石英砂，以便测定其植株生物量、植株吸磷量、根系形态数据、根际pH值、根系分泌酸性磷酸酶等指标，采样时每个指标采集均有3个重复。

1.3 测定指标与方法

生物量：棉花植株地上部、根部收获后，105℃杀青1 h，然后于75℃下7 h烘干至恒重，称重。

根系形态数据：收获后的根扫描获得数字化的根系图象后，用专门的图象分析软件LA-S进行根系形态参数定量测定。

植株全磷：植株样品粉碎过0.25 mm筛，用H₂SO₄-H₂O₂ 消煮，钼锑抗比色法测磷含量^[23]。

根际石英砂pH值(电位法)：选用5:1的水砂比，pH计(型号FE20K)测定。

根际根系酸性磷酸酶活性的测定：采用对硝基

苯磷酸盐法。称取1.00 g 介质石英砂置于50 mL三角瓶中，加入0.2 mL 甲苯、4 mL pH值6.5的缓冲溶液和1 mL对硝基苯磷酸二钠盐。轻摇混匀，37℃培养箱中培养1 h。加入1 mL的CaCl₂溶液和4 mL NaOH溶液终止反应，轻摇几秒钟，过滤。用分光光度计在410 nm进行比色测定。酸性磷酸酶活性以单位鲜重土壤在单位时间内分泌的酸性磷酸酶水解对硝基苯磷酸二钠(p-NPP)产生的对硝基苯酚[μg/(g·h)]的量来表示^[23]。

1.4 数据分析方法

所用数据均使用Excel进行整理，运用SPSS 18.0软件进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 两种磷效率棉花不同时期生物量及吸磷量差异

由表1可知，两种磷效率棉花生物量和磷素积累量随施磷量的增加均有不同程度增加。在两种磷水平下，ZM42的植株总生物量均高于XLZ13，且随培养时间的延长两者差距逐渐增大。对比低磷和高磷两个处理，两个生长期中高效品种ZM42生物量较低效品种XLZ13分别增加了36.89%、1.12%和19.38%、14.87%。且磷高效棉花的单株磷素积累量均高于低效品种。随生育进程推进，棉株根系和地上部干物质质量显著增加，但地上部的增长速度大于根系，故根冠比则逐渐减小，磷高效品种ZM42的根冠比大于磷低效品种XLZ13。

表1 不同时期两种磷效率棉花生物量和吸磷量

取样时期	基因型	磷水平	生物量(g/株)			根冠比	吸磷量(mg/株)		
			水部	地上部	总量		根部	地上部	总量
苗期	XLZ13	P ₁	0.30c	0.74c	1.03c	0.40a	2.33c	4.73d	7.07d
			ZM42	0.45b	0.96b	1.41b	0.46a	3.55b	6.63c
	XLZ13	P ₂	0.52a	1.26a	1.78a	0.42a	4.62a	15.36b	19.98b
			ZM42	0.54a	1.26a	1.80a	0.43a	5.13a	16.16a
花铃期	XLZ13	P ₁	0.67b	2.53b	3.20b	0.27a	3.36b	21.96b	25.33b
			ZM42	0.93ab	2.89b	3.82b	0.32a	4.68b	25.53b
	XLZ13	P ₂	0.97ab	4.14a	5.11a	0.23a	8.50a	78.84a	87.34a
			ZM42	1.25a	4.62a	5.87a	0.27a	8.72a	87.01a

注：同一列的不同字母表示同一采样期处理间差异达到5%显著水平。下同。

2.2 两种磷效率棉花不同时期的根系形态差异

根系长度可以间接表现在土壤中的扩展空间，因而其在作物获取磷素方面有重要作用^[24]。把根径划分为细根(0~0.4 mm)、中根(0.4~1.2

mm) 和粗根 (>1.2 mm) 3 类, 研究磷对两种磷效率棉花根系的影响。不同磷效率棉花不同根径范围根系对磷的反应存在差别。从表 2 可以看出, 0~10 cm 砂层中苗期时低磷处理下, 磷高效品种 ZM42 的总根长、中根长和根表面积均显著高于磷低效品种 XLZ13, 高磷时磷高效品种 ZM42 除粗根外的各根系形态指标都显著高于磷低效品种 XLZ13; 花铃期时不同磷水平下, 磷高效品种 ZM42 的总根长、中根长和根表面积均显著高于磷低效品种 XLZ13。从表 3 可以看出, 在 10~20 cm 砂层中, 低磷处理下磷高效品种 ZM42 除总根长外的各根系指标均显著高于磷低效品种 XLZ13, 高磷时磷高效品种 ZM42 的根长数据显著高于磷低效品种 XLZ13。

表 2 不同时期两种磷效率棉花的根系形态特征 (0~10 cm 砂层)

取样时期	基因型	磷水平	根长 (cm)				根表面积 (cm ²)	根体积 (cm ³)
			总根长	0~0.4	0.4~1.2	>1.2		
苗期	XLZ13	P ₁	295.1d	217.4b	59.9c	17.6b	47.8c	32.6c
			ZM42	406.5b	223.5b	166.4a	16.6b	60.6b
	XLZ13	P ₂	365.1c	229.2b	103.3b	32.5a	65.9b	67.5b
			ZM42	460.7a	262.5a	173.7a	24.4ab	93.3a
花铃期	XLZ13	P ₁	543.2c	351.9c	151.3b	39.9c	93.2c	104.5b
			ZM42	828.7b	482.8bc	239.4a	77.9bc	161.2b
	XLZ13	P ₂	820.5b	523.1ab	157.8b	106.4ab	140.3b	125.6a
			ZM42	1 010.0a	663.2a	268.9a	139.6a	190.6a

对比两个砂层的根长, 可以得到在 0~10 cm 砂层中棉花总根长占棉花整株根长的比例较 10~20 cm 砂层高, 这可能与养分在土壤分布和移动规律有关。各个处理中细根 (0~0.4 mm) 比例在总根长中的比例较高, 磷高效品种 ZM42 的细根比例高于磷低效品种 XLZ13, 根系相对较细。由于细根的

吸收能力强于粗根, 所以磷高效品种 ZM42 的根系更能适应低磷胁迫。

表 3 不同时期两种磷效率棉花的根系形态特征 (10~20 cm 砂层)

取样时期	基因型	磷水平	根长 (cm)			根表面积 (cm ²)	根体积 (cm ³)	
			总根长	0~0.4	0.4~1.2			>1.2
苗期	XLZ13	P ₁	48.6c	25.4c	21.5b	1.9c	4.4d	3.5c
			ZM42	122.1b	89.8b	28.7ab	3.4b	10.1b
	XLZ13	P ₂	56.2c	28.6c	25.1b	2.4b	7.4c	7.2b
			ZM42	186.6a	147.2a	34.4a	5.2a	19.6a
花铃期	XLZ13	P ₁	102.9c	81.1c	18.8d	2.9c	18.2c	5.7c
			ZM42	128.4c	92.6b	26.8c	9.0b	22.1b
	XLZ13	P ₂	176.4b	98.7b	42.4b	8.8b	30.1ab	16.7ab
			ZM42	216.2a	158.0a	68.9a	15.1a	36.6a

2.3 两种磷效率棉花不同时期根际 Olsen-P 差异

根据图 1 可知, 随施磷量增加, 两种磷效率棉花的根际 Olsen-P 浓度呈增加趋势, 且在高磷处理时增加趋势尤为突出。随花盆深度降低, Olsen-P 的含量逐渐降低, 这也与磷在土壤中移动性较差有关。高磷处理时, 磷高效品种 ZM42 根际磷浓度较磷低效品种 XLZ13 分别提高了 3.51 和 7.68 mg/kg。在施磷量较低的情况下, 磷高效品种较低效品种根际 Olsen-P 的含量低, 即低磷时, 磷低效品种 XLZ13 根际磷浓度分别较磷高效品种 ZM42 多 3.46 和 2.46 mg/kg。上述结果表明, 在低磷条件下, 磷高效品种具有更强的活化、吸收土壤中磷的能力, 更能适应低磷环境条件。

2.4 两种磷效率棉花不同时期根际 pH 值差异

对两个生长期的 pH 值数据分别做显著性分析。图 2 结果显示两个生长时期中, 无论是低磷还是高

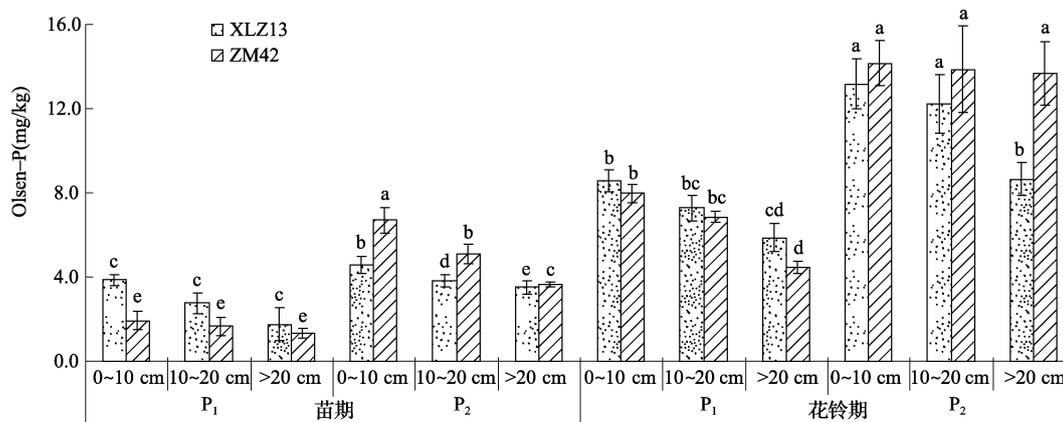


图 1 不同时期两种棉花磷效率根际 Olsen-P

注: 柱上不同小写字母表示同一采样期不同品种间差异达到 5% 显著水平。下同。

磷处理, 棉花根际 pH 值都是随砂层深度降低而降低, 这可能与介质中的磷含量的多少有关。低磷胁迫下两种磷效率棉花均能通过不同程度地降低根际石英砂 pH 值适应缺磷环境, 且磷高效品种 ZM42

的 pH 值降低幅度大于磷低效品种 XLZ13。花铃期时高磷条件的石英砂 Olsen - P 含量较高, 磷素供应充足, 棉花植株无需再分泌酸性物质 H⁺, 维持相对适宜的根际 pH 值, 确保其生命活动有序进行。

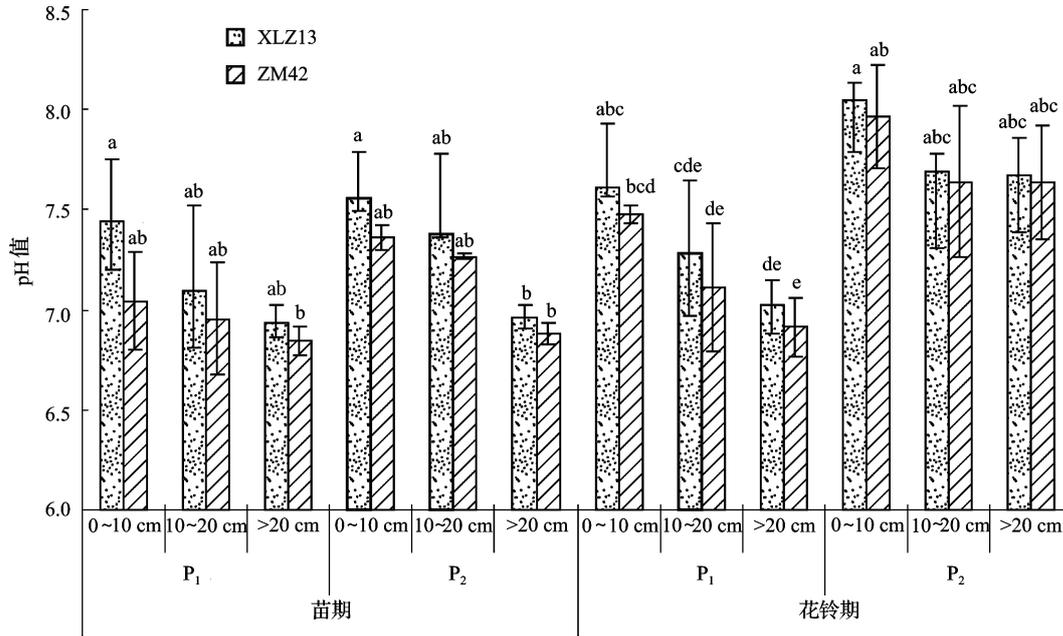


图2 不同时期两种棉花磷效率根际 pH 值

2.5 两种磷效率棉花不同时期根系分泌的酸性磷酸酶差异

根尖外层细胞的酸性磷酸酶以及分泌到土壤根际的酶参与了土壤中有有机磷的矿化分解, 更有利于根系对磷的吸收^[25]。随着生育期的延长和施磷量的增加, 两种磷效率棉花的根际土壤磷酸酶活性都有不同程度的降低, 这说明磷胁迫下两种磷效率棉

花都能通过分泌酸性磷酸酶来适应缺磷环境。除了苗期低磷时的 > 20 cm 磷酸酶活性的值, 两种磷效率棉花磷酸酶活性都随砂层深度降低而增加, 这可能是苗期根长还未达到 > 20 cm 这个范围造成的。所有处理磷高效品种 ZM42 的酸性磷酸酶含量均高于磷低效品种 XLZ13, 且在苗期 P₁ 的 0~10、10~20 cm 和 P₂ 的 0~10 cm 差异达到了显著水平。

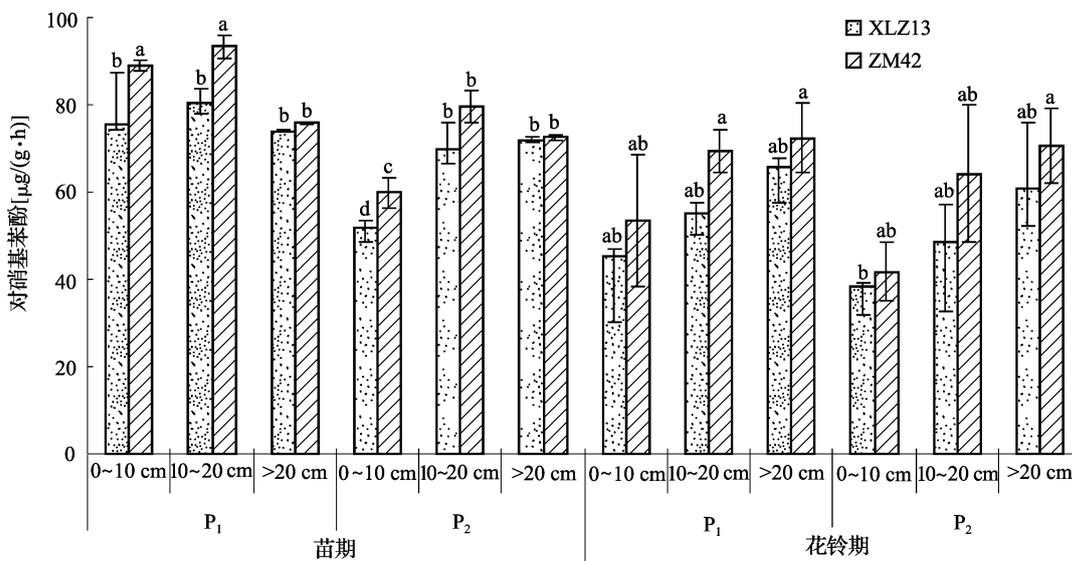


图3 不同时期两种棉花磷效率根际酸性磷酸酶活性

3 结论与讨论

3.1 两种磷效率棉花生物量及吸磷量的差异比较

磷高效棉花具有较强磷素积累、物质生产能力和对水溶性磷的吸收能力^[20]。在砂培条件下随施磷量的增加,磷高效品种 ZM42 能积累较多的磷并形成较多的生物量。而在低磷处理中,磷高效品种较磷低效品种根际土壤 Olsen - P 耗竭程度突出。在低磷条件下磷高效品种具有更强的吸收和利用磷素的能力,随着磷素的增加响应更加明显。两个生长期中,磷高效品种 ZM42 在两种磷水平下的根部生物量、吸磷量及根冠比都优于磷低效品种 XLZ13,这说明磷高效品种棉花能通过光合产物优先向根系分配,以刺激根部的生长,提高土壤养分磷的有效性^[26]。高磷处理下磷高效品种 ZM42 地上部吸磷量在两个生长期中都高于磷低效品种 XLZ13,这说明在供磷充分时,磷高效品种棉花仍能高效地吸收土壤中的磷,且植株体内磷含量显著高于磷低效品种,这与侯焱焱等^[27]对小麦的研究结果一致。在相同磷条件下,磷高效品种能比磷低效品种生成更多生物量,形成干物质能力较强,这一结果与张锡洲等^[28]在小麦上研究结果一致。

3.2 两种磷效率棉花根系形态特征比较

适应土壤中养分资源供应不均匀条件,植物根系及根际过程往往表现出较强的可塑性反应。相关分析表明,两个棉花品种的总根长和根径在(0~0.4 mm)的细根与地上部磷积累量之间呈显著正相关关系,相关系数分别达到了0.82和0.79($p < 0.01$)。高家合等^[11]对烟草的研究中得到,磷高效高产型烟草在高磷条件根系发达,总根长和根表面积均较大,与本试验结果一致。根系在介质浅层的生长较为活跃,这与养分元素在介质中的分布有很大关系。在两种磷处理下,磷高效品种 ZM42 根系中根径(0~0.4 mm)的细根长度在总根长中的比例明显高于磷低效品种 XLZ13(表2、表3)。供磷不足或高量供磷处理下,棉花根系中根径(0~0.4 mm)的细根对提高植株吸收介质磷具有重要意义。本试验直径(0~0.4 mm)细根中很大程度上是侧根部分,这也证实了侧根的发育与作物磷营养之间关系密切,在陈磊等^[29]对小麦的研究里也得到证实。

3.3 两种磷效率棉花根际环境的差异比较

在低磷处理下,磷高效作物具有较强的吸磷能

力,获得较高的磷素来满足自身生命活动所需。但作物还可通过适应根际土壤环境,提高对磷的活化能力,这也可解决根际 Olsen - P 亏缺现象。梁宏玲等^[30]对低磷胁迫下的磷高效基因型油菜研究发现,根际土的有效磷浓度均低于磷低效基因型,且高效基因型能产生较多的生物量。刘璇等^[2]在对两种磷效率小麦根际特征差异的研究中得到,不同土壤条件磷高效小麦根际土壤水溶性磷浓度总是低于磷低效型小麦。低磷时磷低效品种根际磷浓度要高于磷高效品种,这与王庆仁等^[31]对小麦的研究结果一致。本研究结果表明,不同施磷条件下磷高效品种棉花较磷低效品种能吸收较多的磷素,且形成更多的生物量。

根际土壤的 pH 值状况是反映根系生理活动的一项重要指标。生长介质中 Olsen - P 含量降低时,棉花根际 pH 值也随之降低。本研究发现,低磷处理时磷低效品种 XLZ13 的根际 pH 值降低幅度显著低于磷低效品种 ZM42,而前者根部吸磷量也是显著低于后者,可以得出磷高效品种棉花在低磷条件下通过降低根际 pH 值来活化介质中的磷从而缓解磷胁迫,增加植株吸磷量。这与张誉方等^[1]、展晓莹等^[5]的研究结果一致。

低磷胁迫条件能增加棉花根系分泌酸性磷酸酶的量,进而促进根系对磷素的吸收。王树亮等^[32]对小麦研究表明,缺磷土壤的小麦根际磷酸酶活性与正常磷土壤相比明显增加;两种磷效率棉花在两个生长期的根际土壤磷酸酶活性均随着施磷量的减少而增加,与本试验结果相同。磷高效棉花 ZM42 分泌的土壤磷酸酶活性均高于磷低效棉花 XLZ13,这与展晓莹等^[5]对小麦的研究结果相同。

综上所述,两种施磷处理棉花根系形态和根际过程产生可塑性反应。供磷不足时,两种磷效率棉花在不同土层深度中根系形态和根际过程都发生了适应性变化,而供磷充足时棉花根系形态的改变因品种而异。由此可见,两种磷效率棉花在相同生长介质中根际机理存在差异,且在低磷胁迫下磷高效棉花根系形态特征改变是根际磷活化主要机理之一,且受磷水平的影响。

盆栽试验在一定程度上限制了根系的生长,由此导致根系试验数据小于大田真实数据。因此,棉花磷效率的根际机理还有待于进一步的田间试验验证。

参考文献:

- [1] 张誉方, 展晓莹, 闫海丽, 等. 黑垆土和红壤上两种磷效率小麦根际特征差异 [J]. 中国土壤与肥料, 2012, (4): 44-47.
- [2] 刘璇, 闫海丽, 张淑香. 石灰性土壤上两种磷效率小麦根际特征差异 [J]. 中国土壤与肥料, 2009, (4): 36-39.
- [3] Gweyi - Onyango J P, Gunter N, Romheld V. Differential benefits of rock phosphate (RP) by tomato (*Lycopersicon Esculentum* Mill.) plant as affected by nitrogen forms and soil types [J]. African Journal of Food Agriculture Nutrition and Development, 2010, 4 (10): 2460-2477.
- [4] 丁广大, 陈水森, 石磊, 等. 植物耐低磷胁迫的遗传调控机理研究进展 [J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19 (3): 733-744.
- [5] 展晓莹, 张丽, 刘晓斌, 等. 高磷条件下不同磷效率小麦对磷的吸收及根际土壤磷组分差异 [J]. 核农学报, 2013, 27 (11): 1762-1770.
- [6] Gahooia T S, Nielsen N E, Joshi P A, et al. Variation in root hairs of barley cultivars doubled soil phosphorus uptake [J]. Euphytica, 2002, 9 (8): 177-181.
- [7] 陆欣春, 韩晓增, 邹文秀. 作物高效利用土壤磷素的研究进展 [J]. 土壤与作物, 2013, 2 (4): 164-172.
- [8] 吴沂珀, 张锡洲, 李廷轩, 等. 小麦不同磷效率品种对不同磷源的利用差异及酸性磷酸酶的作用 [J]. 核农学报, 2013, 27 (3): 351-357.
- [9] 李莉梅. 不同基因型水稻磷素营养差异机理的研究 [J]. 华北农学报, 2013, 28 (2): 155-160.
- [10] 张丽梅, 贺立源, 李建生, 等. 不同耐低磷基因型玉米磷营养特性研究 [J]. 中国农业科学, 2005, 38 (1): 110-115.
- [11] 高家合, 邓碧儿, 曾秀成, 等. 烟草磷效率的基因型差异及其与根系形态构型的关系 [J]. 西北植物学报, 2010, 30 (8): 1606-1610.
- [12] 廖红, 严小龙. 菜豆根构型对低磷胁迫的适应性变化及基因型差异 [J]. 植物学报, 2000, 42 (2): 158-163.
- [13] Mohammad N, Hans L, Michael D A, et al. Distribution of carboxylates and acid phosphatase and depletion of different phosphorus fractions in the rhizosphere of a cereal and three grain legumes [J]. Plant and Soil, 2006, (281): 109-120.
- [14] Hoberg E, Marschner P, Lieberei R. Organic acid exudation and pH changes by *Gordonia* sp and *Pseudomonas fluorescens* grown with P adsorbed to goethite [J]. Microbiological Research, 2005, 160 (2): 177-187.
- [15] Johnson J F, Allan D L, Vance C P. Root carbon dioxide fixation by phosphorus-deficient *Lupinus albus*, contribution to organic acid exudation by proteoid roots [J]. Plant Physiology, 2006, 11 (2): 19-30.
- [16] 崔航, 李立颖, 谢小林, 等. 不同基因型柱花草的根系构型差异及其磷效率 [J]. 草业学报, 2013, 22 (5): 265-271.
- [17] 沈宏, 施卫明. 不同作物对低磷胁迫的适应机理研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7 (2): 172-177.
- [18] 张海伟, 黄宇, 叶祥盛, 等. 低磷胁迫下甘蓝型油菜酸性磷酸酶对磷效率的贡献分析 [J]. 中国科学 (生命科学), 2010, 40 (5): 418-427.
- [19] 陈波浪, 盛建东, 蒋平安, 等. 不同棉花品种钾素吸收利用差异的比较 [J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15 (5): 1154-1159.
- [20] 郝艳淑, 姜存仓, 王晓丽, 等. 不同棉花基因型钾效率特征及其根系形态的差异 [J]. 作物学报, 2011, 37 (11): 2094-2098.
- [21] 李卫华, 盛建东, 陈波浪, 等. 棉花磷素养分高效利用品种的筛选 [J]. 新疆农业大学学报, 2010, 33 (2): 109-115.
- [22] 刘晓斌, 展晓莹, 张丽, 等. 液培条件下磷水平对两种磷效率小麦根际特征的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2013, (6): 22-27.
- [23] 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. 313-314.
- [24] 刘霜, 李廷轩, 戢林, 等. 不同磷处理下两种生态型粗齿冷水花的富磷特征及根系形态差异 [J]. 草业学报, 2013, 22 (3): 211-217.
- [25] 展晓莹, 侯炎炎, 张淑香. 不同磷形态对两种磷效率小麦根系指标与根际特征差异的影响 [J]. 核农学报, 2013, 27 (7): 1012-1019.
- [26] 马祥庆, 梁霞. 植物高效利用磷机制的研究进展 [J]. 应用生态学报, 2004, 15 (4): 712-716.
- [27] 侯焱焱, 展晓莹, 刘璇, 等. 不同形态无机磷对两种磷效率小麦根际特征的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2011, (1): 30-33, 43.
- [28] 张锡洲, 阳显斌, 李廷轩. 不同磷效率小麦对磷的吸收及根际土壤磷组分特征差异 [J]. 中国农业科学, 2012, 45 (15): 3083-3092.
- [29] 陈磊, 王盛锋, 刘荣乐, 等. 不同磷供应水平下小麦根系形态及根际过程的变化特征 [J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18 (2): 324-331.
- [30] 梁宏玲, 石磊, 徐芳森, 等. 甘蓝型油菜不同磷效率基因型对土壤难溶性磷吸收利用的差异 [J]. 中国油料作物学报, 2007, 29 (3): 297-301.
- [31] 王庆仁, 李继云, 李振声. 磷高效基因型小麦对缺磷胁迫的根际适应性反应 [J]. 西北植物学报, 2000, 20 (1): 1-7.
- [32] 王树亮, 田奇卓, 李娜娜, 等. 不同小麦品种对磷素吸收利用的差异 [J]. 麦类作物学报, 2008, 28 (3): 476-483.

[下转第86页]

- 质的影响 [J]. 土壤肥料, 2004, (3): 17-19.
- [15] 张朝春, 江荣风, 张福锁, 等. 马铃薯氮, 磷, 钾肥料效应研究 [J]. 中国马铃薯, 2005, 18 (6): 326-329.
- [16] Cucci G, Lacolla G. Effects of different fertilizing formulae on potato [J]. Italian Journal of Agronomy, 2007, 2 (3): 275-280.
- [17] 高翔, 李成亮, 张民, 等. 钾肥种类及用量对马铃薯生长和品质的影响 [J]. 水土保持学报, 2014, 28 (2): 143-148.
- [18] 张美琴, 马建华, 樊明寿. 氮素形态与马铃薯品质的关系 [J]. 中国马铃薯, 2009, 22 (6): 321-324.
- [19] 吕慧峰, 王小晶, 陈怡, 等. 氮磷钾分期施用对马铃薯产量和品质的影响 [J]. 中国农学通报, 2010, 26 (26): 197-200.

The effects of nitrogen, phosphorus and potassium application on yield and starch content of potato plants

WANG Tao¹, HE Wen-shou^{1*}, JIANG Hai-gang², WANG Yao-ke¹, DANG Ke-ke¹, ZHAO Xiao-xia¹ (1. The Agricultural School, Ningxia University, Yinchuan 750021; 2. Agricultural Technology Extension and Service Center of Haiyuan, Haiyuan Ningxia 755200)

Abstract: In this study, the effects of nitrogen, phosphorus and potassium application on yield and starch content of potato plants were investigated by 311-A regression design in rainfed agricultural area in Ningxia province. Mathematic models between yield and starch content and the parameters of nitrogen, phosphorus and potassium amount used were built. Meanwhile, the main factor and interaction factor affected yield and starch content were analyzed. The results showed that the optimum nitrogen, phosphorus and potassium application amount to acquire the highest yield was 267.3, 139.0 and 82.1 kg/hm², respectively, to acquire the highest economic value was 258.6, 131.1 and 71.1 kg/hm², respectively, to acquire the highest starch content was 183.9, 106.4 and 87.6 kg/hm², respectively.

Key words: yield of potato plants; starch; 311-A regression design; main factor; interaction factor

[上接第 72 页]

Effect of phosphorus levels on root morphology and rhizospheric characteristic between the different phosphorus efficiency cotton under sand culture condition

WANG Liang, SHENG Jian-dong, CHEN Bo-lang* (College of Grassland and Environmental Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi Xinjiang 830052)

Abstract: The experiment was conducted to investigate effects of different P levels (P₁ 0.1 mmol/L, P₂ 5 mmol/L) on root morphology and characteristics of rhizosphere in different P-efficiency cotton under the gravel culture conditions. Two different P-efficient cotton genotypes (the P efficient ZM42 and the P inefficient XLZ13) were selected for the study. Crop biomass, P uptake amount, root morphology, available P, pH and phosphatase activity in the rhizosphere were measured. Result showed that under the sand culture cotton biomass and accumulation of phosphorus increased with phosphorus application for both the P-efficient genotypes cotton. Root biomass, P uptake and root to shoot ratio of ZM42 was better than XLZ13. length of fine root (0~0.4 mm) in ZM42 was looger than XLZ13, and the proportion of fine roots in the total root length was higher, which was helpful to promote phosphorus absorption of plant. When the phosphorus content in growth medium was lower, to reduce the pH in the cotton rhizosphere also decreased. The pH of the rhizosphere of ZM42 was significantly higher than XLZ13. Rhizosphere phosphatase activity of two kinds of phosphorus efficiency cotton was increased as the phosphorus content decreased in the two periods. Phosphatase activity of ZM42 was higher than that of XLZ13. Thus, there was a difference with rhizosphere mechanism between the two phosphorus efficiency of cotton in the same growth medium, the change of root morphology characteristic of the P efficient cotton was one of the main mechanisms of rhizosphere phosphorus activation.

Key words: phosphorus efficient; cotton; root morphology; rhizosphere characteristic