植物营养与肥料学报 2012,18(2):324-331
Plant Nutrition and Fertilizer Science

不同磷供应水平下小麦根系形态及根际过程的变化特征

陈 磊[1], 王盛锋[1], 刘荣乐[2], 汪 洪[1]*
(1 农业部植物营养与肥料重点实验室,中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,北京 100081,
2 中国农业科学院,中国农业科学院研究生院 北京 100081)

摘要:以石麦 15 和衡观 35 两个品种小麦为试验材料,应用根袋栽培方式,研究了不同施磷量对小麦根系形态和根际特征的影响。结果表明,与施磷量 P_2O_5 0.1 g/kg 相比,高量供磷(P_2O_5 0.3 g/kg)条件下石麦 15 地上部生物量和磷累积量增加幅度大于衡观 35;但不施磷处理衡观 35 地上部生物量降低幅度小于石麦 15,磷含量和累积量高于石麦 15,衡观 35 耐低磷能力较强。土壤供磷不足时,衡观 35 总根长中直径≤0.16 mm 细根所占比例高于石麦 15,根系平均直径较小;而高磷供应下,石麦 15 根系中直径≤0.16 mm 细根长度较长,在总根长中所占比例较高。总根长和直径≤0.16 mm 的细根长度与植株地上部磷累积量之间呈显著正相关关系。总根长越长尤其是细根越多,有利于促进植株对磷的吸收。与非根际土壤相比,高磷供应下根际土壤有机磷含量增加,微生物量磷含量降低;而供磷不足时根际土壤碱性磷酸酶活性较高,有机磷含量较低。与施磷量 P_2O_5 0.1 g/kg 相比,高量供磷下根际土壤 pH 值升高、碱性磷酸酶活性下降,不施磷处理根际土壤 pH 值降低。本研究表明,供磷不足时,小麦根系形态和根际过程均发生适应性变化,而高量供磷条件下,小麦植株根系形态的改变因品种而异。

关键词:磷;小麦;根系形态;根际
中图分类号:S512.1.062.01　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-505X(2012)02-0324-08

Changes of root morphology and rhizosphere processes of wheat under different phosphate supply

CHEN Lei[1], WANG Sheng-feng[1], LIU Rong-le[2], WANG Hong[1]*
(*1 Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Ministry of Agriculture/Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China*
2 The Graduate School, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: A rhizobox experiment was carried out to study effects of various concentrations of phosphate (Pi) supply on root morphology, rhizosphere processes, and plant P uptake of two wheat genotypes (Shimai 15 and Hengguan 35). The results showed that Shimai 15 had more increases of shoot biomass and phosphorus(P) content with high Pi application compare with Hengguan 35. While the decreases of shoot biomass and P accumulation of Hengguan 35 under limited Pi supply were much lower than those of Shimai 15, indicating Hengguan 35 might have higher tolerance to low Pi stress than Simai 15. Under the high Pi supply, the fine root length within ≤0.16 mm diameter and its percentage in total root length of Shimai 15 were greater than those of Hengguan 35. Contrarily, without Pi fertilization, the total root length and the proportion of fine roots with diameter ≤ 0.16 mm in total roots of were larger in Hengguan 35 than Shimai 15. Under the high Pi supply, the higher soil organic P content and the lower soil microbial biomass P were in rhizosphere, while without Pi supply, the activity of soil alkaline phosphatase was

收稿日期:2011-07-04　　**接受日期**:2012-01-04
基金项目:国家重点基础研究发展计划资助课题(2007CB109302);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2010-8);北京市自然科学基金项目(6112021)资助。
作者简介:陈磊(1986—),男,黑龙江哈尔滨人,硕士研究生,主要从事养分资源高效利用与作物根系生物学研究方面的工作。Tel:010-82108662, Email:chengz69@yahoo.cn。* 通讯作者 Tel:010-82108662, E-mail:wanghong@caas.ac.cn

higher and soil organic P content and soil pH were lower in rhizosphere. Compared with the optimum Pi supply, the high Pi supply increased soil pH and decreased the activity of alkaline phosphatase in rhizosphere. However, low Pi supply decreased soil pH in rhizosphere. It is suggested that the adaptations of plants on two fronts would occur when subjected to the low Pi stress. One is better root characteristics, such as longer roots, especially with more fine roots, which are important for plant to efficiently utilize soil Pi, and the other is the rhizosphere processes, such as soil acidification and the transformation of soil organic P to Pi, which help plant to acquire more Pi from rhizosphere soils and benefit plant's tolerance to the low Pi stress. However, the changes of root morphology under high Pi supply may be associated with the wheat cultivars with different capacity of P uptake and P accumulation.
Key words: phosphorus; wheat; root morphology; rhizosphere

上世纪80年代的第二次全国土壤普查结果表明，我国有近半数省（区）其总面积的50%以上的土壤速效磷含量在5 mg/kg以下，土壤速效磷含量在10 mg/kg以下的占到80%～90%[1]，土壤缺磷曾是作物生产的主要限制因素之一。为了提高作物产量，缓解不断增加的人口对粮食需求的压力，磷肥施用量持续增加[2]。磷肥施入土壤，作物当季磷肥利用率较低，易被土壤固持或固定，可在土壤中积累。据鲁如坤等估算，从1954年到1992年止的近40年间，我国累计施用磷肥7880万吨（P_2O_5），按平均每季磷肥利用率15%和复种指数1.5计算，土壤中的积累态磷（P_2O_5）可达6100万吨[3]。按鲁如坤的方法计算，在1995～2007年的13年间，我国农田土壤又有约7050万吨P_2O_5积累。耕地土壤长期定位监测点的数据表明，经过多年来磷肥施用和土壤培肥，我国土壤速效磷含量呈逐年上升趋势，2006年土壤速效磷含量已经达到27.4 mg/kg[4]。积累在土壤中的磷素，若不加以有效利用，既造成了磷肥资源的浪费，也会加大土壤磷素流失的风险，对环境构成一种潜在的污染威胁。

良好的根系形态和生理特性对植物高效利用土壤磷具有重要意义，为适应土壤中养分资源供应不均匀的条件，植物根系往往表现出较强的可塑性反应。研究表明，低磷条件下，植物根系构型发生改变，主根生长受抑，侧根和根毛形成增多，伸长增大[5-7]。在农业生产高度集约化的地区，磷肥过量和不合理施用的现象开始出现。在华北地区的调查结果显示，有43%的农户在小麦季磷肥施用量超过150 kg/hm^2[8]。杨莉琳等[9]于2000～2002年在太行山山前平原高产区进行定位试验研究表明，小麦季磷肥施用为75～150 kg/hm^2 P_2O_5时对后作玉米的产量没有明显影响。集约化农业生产条件下，养分投入量较大，土壤中较高的磷素供应水平对作物根系生长发育及植株磷素吸收利用有何影响，需要深入研究。

根际是作物—土壤—微生物及环境相互作用的场所，是土壤养分、水分及有害物质从土壤进入作物系统参与食物链物质循环的必经门户。植物同化大气CO_2，将部分光合产物转运至地下，促进根系生长，根系分泌物增加，激发根际土壤微生物的生长和新陈代谢，有利于土壤中养分转化，对植物高效利用土壤养分有着重要影响[10]。

缺磷胁迫下植物除了根系形态发生变化外，还可通过根际过程的改变来增强土壤磷的高效利用，如根系分泌质子和有机酸活化土壤中无机磷，磷酸酶促进土壤有机磷向无机磷转化[11]。张福锁等[12]认为，深入研究集约化农业生产体系下根际土壤中养分的动态变化及利用状况，探讨不同基因型作物根际养分形态转化及其有效性，以调节作物根际营养环境，对于提高肥料资源的高效利用、促进农业持续发展具有重要意义。

小麦为须根系植物，根系由胚根（初生根）、节根（次生根）以及侧根组成。侧根从胚根和节根上生长出来，是植物根系的重要组成部分，占到根系总长度和总面积的大部分。本研究选择河北省主推的石麦15和衡观35两个小麦品种为试验作物，进行土培试验，探讨了不同磷肥用量条件下小麦根系形态及根际过程的变化特征。

1　材料与方法

1.1　供试作物

选择目前在河北推广种植的2个小麦品种石麦15和衡观35。石麦15属于冬性，中晚熟品种，亲本来源为GS冀麦38/92R137。衡观35为半冬性，中早熟小麦品种，亲本组合为84观749/衡87-4263。

1.2　供试土壤

供试土壤为砂质潮土，采自河北省廊坊市。土壤有机质含量为5.28 g/kg，全氮0.307 g/kg，Olsen-

P 5.24 mg/kg,速效钾(NH_4Ac 浸提 K)58.6 mg/kg,pH 8.42(水土比2.5∶1)。

1.3 试验设计

试验在温室进行,采用自制的 PVC 盆栽装置,高 23.5 cm,内径 15.2 cm,盆壁厚 0.6 cm。在盆中间放置 300 目尼龙网做成的根袋,每盆装 4.5 kg 干土,根袋中装 1.2 kg 干土(图1)。

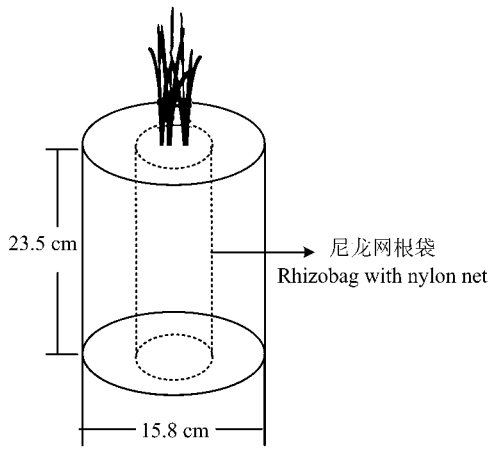

图1 盆栽示意图

Fig.1 The schematic diagram of the pot trial

小麦播种前,一次性底施不同用量的磷肥(以 P_2O_5 g/kg 干土计):0(不施磷)、0.1(中量)和0.3(高量)。磷肥用 KH_2PO_4,多余的 K^+ 用 K_2SO_4 平衡,同时按 N 0.10 g/kg 干土的用量将尿素与土壤混匀底施,补充氮肥。每个处理4次重复。

1.4 植株培养与样品采集

种子经1%(V/V)的 NaClO 消毒30 min后,去离子水洗净,30℃下催芽,露白后播于土壤中。植株3叶期间苗,每盆留7株。去离子水浇灌,称重法保持土壤含水量为70%的田间持水量。生长44 d后收获地上部分,将根袋取出,收集其中小麦根系样品,抖根法收集根际土,根袋外土壤作为非根际土对照,土壤过1 mm筛后置于-20℃下冷冻保存。

1.5 根系分析

将根系用清水洗净,计数初生根和节根数目。扫描根系样品获取数字化图像,利用 WinRHIZO 根系分析系统(Regent Instruments Inc.,Canada)对图像进行分析,获得总根长、根系平均直径及直径分别为≤0.16 mm、0.16～0.48 mm 和 > 0.48 mm 范围内的根系长度。

1.6 植株生物量和地上部磷含量的测定

小麦地上部用去离子水洗净,105℃下杀青30 min,70℃下烘干称重。样品粉碎过筛后,用 H_2SO_4-H_2O_2 消煮,钒钼黄比色法测定 P 含量[14]。根系扫描分析结束后,把样品用去离子水清洗干净,在70℃烘干至恒重,称量得到根系干重。

1.7 土壤有关项目测定

土壤 pH 值以水∶土比为2.5∶1,pH 计测定。土壤 Olsen-P 用0.5 mol/L $NaHCO_3$ 浸提,钼锑抗比色法测定[13]。土壤有机磷总量为:550℃下灼烧土壤样品,未灼烧等量土样作对照,0.2 mol/L(1/2 H_2SO_4)溶液浸提,差值为土壤有机磷含量。土壤微生物量磷采用氯仿熏蒸—$NaHCO_3$ 提取法测定,土壤微生物量磷 Bp = Epi/Kp,其中 Epi 表示熏蒸和未熏蒸土壤微生物量磷的差值,转换系数 Kp 取值0.4[14]。土壤碱性磷酸酶采用对硝基苯磷酸盐法测定,酶活性以单位时间内单位鲜重土壤分泌磷酸酶水解底物对硝基苯磷酸二钠所产生的对硝基苯酚的量来表示,酶活单位为 g/(kg·h)[13]。

对试验数据进行方差分析(ANOVA),采用 Duncan 新复极差方法检验不同处理之间的差异显著性($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 生物量

从表1可以看出,与中量施磷(P_2O_5 0.1 g/kg)处理相比,不施磷处理明显降低了两个品种小麦地上部生物量,石麦15和衡观35分别降低48.7%和42.4%。不施磷小麦植株生长表现出典型的缺磷症状,生长矮小,叶色黄化。与施 P_2O_5 0.1 g/kg 处理相比,高量施磷(P_2O_5 0.3 g/kg)处理显著增加了地上部生物量,石麦15和衡观35分别增加30.1%和18.2%。不施磷处理下,石麦15根系干重比中量施磷处理明显较低,降低了26.0%;而衡观35根系生物量下降不明显。高量磷处理未明显增加两个品种小麦根系生物量。在中量和高量磷供应下,石麦15根系干重显著大于衡观35。与中量供磷相比,土壤供磷不足(不施磷)时两个品种小麦的根冠比明显增大,石麦15和衡观35分别增加了47.8%和41.2%;高磷处理下石麦15根冠比显著降低,降低了19.1%;衡观35也呈降低趋势。在相同磷供应水平下,石麦15的根冠比显著大于衡观35。

表 1　不同磷供应下小麦生物量

Table 1　Biomass of two wheat genotypes under different phosphate (Pi) supply

品种 Genotype	供磷水平(P_2O_5 g/kg) Pi supply	地上部干重(g/plant) Shoot dry weight	根系干重(g/plant) Root dry weight	根冠比 Root/Shoot ratio
石麦 15 Shimai 15	0	0.160 ±0.011 c	0.054 ±0.003 cd	0.340 ±0.011 a
	0.1	0.312 ±0.014 b	0.073 ±0.004 ab	0.230 ±0.005 c
	0.3	0.406 ±0.024 a	0.076 ±0.007 a	0.186 ±0.008 d
衡观 35 Hengguan 35	0	0.190 ±0.007 c	0.047 ±0.002 d	0.250 ±0.001 b
	0.1	0.330 ±0.019 b	0.057 ±0.003 cd	0.177 ±0.004 de
	0.3	0.390 ±0.009 a	0.063 ±0.003 bc	0.160 ±0.004 e

注(Notes): 表中数据是平均值 ± 标准误,同一列数据后不同字母表示差异达到5% 显著水平 The data are means ± SE. Different letters after the data in the same column indicate significant difference at the $P < 0.05$ level.

2.2　地上部磷浓度与累积量

表 2 显示,小麦地上部磷浓度在不同磷处理间差异不明显。在中量和高量磷供应条件下,衡观 35 地上部磷浓度显著高于石麦 15。与中量磷处理相比,不施磷条件下小麦地上部磷累积量明显降低,石麦 15 和衡观 35 分别降低了 50.0% 和 49.2%;高磷处理小麦地上部磷累积量增多,石麦 15 和衡观 35 分别比不施磷增加了 28.0% 和 15.4%。在相同磷供应水平下,衡观 35 地上部磷累积量明显高于石麦 15。

表 2　不同磷供应下小麦地上部磷浓度与累积量

Table 2　P concentration and P accumulation in shoots of wheat plants under different Pi supply

品种 Genotype	供磷水平(P_2O_5 g/kg) Pi supply	地上部磷浓度(mg/g) P concentration in shoot	地上部磷累积量(mg/plant) P accumulation in shoot
石麦 15 Shimai 15	0	405.9 ±13.6 b	64.6 ±3.2 e
	0.1	418.8 ±43.0 b	129.1 ±8.1 c
	0.3	412.8 ±28.7 b	165.3 ±3.7 b
衡观 35 Hengguan 35	0	465.1 ±13.5 ab	88.1 ±3.5 d
	0.1	537.3 ±24.9 a	173.5 ±6.8 b
	0.3	514.0 ±15.7 a	200.2 ±2.9 a

注(Notes): 表中数据是平均值 ± 标准误,同一列数据后不同字母表示差异达到5% 显著水平 The data are means ± SE. Different letters after the data in the same column indicate significant difference at the $P < 0.05$ level.

2.3　根系形态

与中量施磷(P_2O_5 0.1 g/kg)处理相比,不施磷处理的小麦节根数较少,石麦 15 和衡观 35 的节根数分别减少了 37.1% 和 40.2%;高磷处理没有明显增加小麦节根数(表 3)。相同磷处理的两个小麦品种节根数无差异。不施磷处理小麦总根长石麦 15 和衡观 35 分别比中量磷处理降低了 12.8% 和 34.2%。相比中量磷处理,高磷处理明显增加了石麦 15 的总根长,增加幅度为 36.4%,但衡观 35 的总根长没有明显增加。石麦 15 的根系平均直径在不同磷处理间差异不明显;高磷供应显著增加了衡观 35 小麦根系平均直径。不施磷时衡观 35 根系平均直径较石麦 15 小。

2.4　不同直径范围内根系长度分布

与中量磷处理相比,不施磷处理显著降低直径 ≤0.16 mm 的根系长度,石麦 15 和衡观 35 分别降低了 30.7% 和 54.5%(表 4);而在高磷处理下石麦 15 直径≤0.16 mm 的根系长度显著增加,增加幅度达到 72.7%。但对于石麦 15,相比中量磷处理,不施磷处理并没有明显降低直径在 0.16 ~ 0.48 mm 范围内的根系长度;而对衡观 35,则显著降低了直径在 0.16 ~ 0.48 mm 范围内的根系长度,降低幅度

表3 不同磷供应下小麦根系形态

Table 3 Effects of Pi rates on root morphological characteristics of two wheat genotypes

品种 Genotype	供磷水平(P_2O_5 g/kg) Pi supply	节根数(No./plant) Number of nodal roots	总根长(cm) Total root length	根系平均直径(mm) Average root diameter
石麦15 Shimai 15	0	7.3 ±0.3 b	1122.8 ±91.0 cd	2.1 ±0.1 ab
	0.1	11.6 ±0.8 a	1287.5 ±186.7 ab	1.9 ±0.3 abc
	0.3	12.2 ±0.7 a	1756.4 ±67.7 a	2.1 ±0.1 ab
衡观35 Hengguan 35	0	7.3 ±0.4 b	919.9 ±48.6 d	1.5 ±0.1 c
	0.1	12.2 ±0.4 a	1397.7 ±87.2 bc	1.6 ±0.1 bc
	0.3	12.9 ±0.2 a	1509.2 ±61.4 ab	2.2 ±0.2 a

注(Notes):表中数据是平均值±标准误,同一列数据后不同字母表示差异达到5%显著水平 The data are means ± SE, different letters after the data in same column indicate significant difference at the $P < 0.05$ level.

表4 不同直径范围内根系长度分布

Table 4 Root length distribution of wheat classified by various diameters as influenced by different Pi supply

品种 Genotype	供磷水平(P_2O_5 g/kg) Pi supply	直径范围 Diameter range(mm)		
		≤0.16	0.16～0.48	>0.48
石麦15 Shimai 15	0	285.9 ±33.6 d(25.3 d′)	684.8 ±56.0 b(61.2 a′)	147.7 ±4.9 b(13.4 a′)
	0.1	412.6 ±66.6 c(31.9 c′)	696.2 ±95.2 b(54.5 c′)	173.2 ±24.3 ab(14.6 a′)
	0.3	712.4 ±17.4 a(40.9 b′)	817.6 ±48.4 a(46.7 d′)	217.8 ±15.8 a(12.4 a′)
衡观35 Hengguan 35	0	284.6 ±20.7 d(31.0 c′)	537.1 ±24.8 d(58.7 b′)	93.8 ±3.3 d(10.3 b′)
	0.1	625.4 ±49.0 b(44.8 a′)	634.6 ±32.4 bc(45.7 d′)	130.5 ±3.9 c(9.4 b′)
	0.3	591.1 ±17.2 b(39.4 b′)	714.4 ±37.8 b(47.5 d′)	196.2 ±10.4 a(13.0 a′)

注(Notes):表中数据是平均值±标准误,括号内数据是不同直径范围内根系长度占总根长的百分比,同一列数据后不同字母表示差异达到5%显著水平 The data of root length are means ± SE. Values in the parentheses show the percentage of the length of root with various diameters in total root length. Different letters after the data in the same column indicate significant difference at the $P < 0.05$ level.

为15.4%;高磷供应下石麦15直径在0.16～0.48 mm范围内根系长度比中量磷处理增加了17.4%,而衡观35的变化不明显。直径>0.48 mm的小麦根系长度在不施磷处理比中量磷处理明显降低,石麦15和衡观35分别降低了14.7%和28.1%,但高磷处理比中量磷处理明显增加了直径>0.48 mm的根系长度,石麦15和衡观35的根系长度(>0.48 mm)分别增加25.8%和50.3%。

不施磷处理下,直径≤0.16 mm的细根比例在总根长中所占比例较低,而直径在0.16～0.48 mm的根系所占比例较高,随施磷量增加,石麦15根系中细根比例增多,而衡观35根系中细根比例下降。不施磷处理衡观35的直径≤0.16 mm的根系比例较石麦15高,根系相对较细。

相关分析表明,两个小麦品种总根长和直径≤0.16 mm的细根长度与地上部磷浓度之间相关性不明显,而与植株地上部磷累积量之间呈显著正相关关系,相关系数分别达到了0.65和0.53($P < 0.01$)。

2.5 根际土壤不同形态磷素含量

表5看出,不施磷条件下根际和非根际土壤中速效磷含量均较低;高磷处理显著增加土壤速效磷含量。不施磷处理的根际土壤速效磷含量显著低于非根际土壤。高磷处理,石麦15的根际和非根际土壤中速效磷含量高于衡观35。

与中量施磷处理相比,不施磷处理根际土壤微生物量磷较高,高磷供应并未明显增加根际土壤微生物量磷;高磷处理衡观35非根际土壤中微生物量磷较高。不施磷时,石麦15根际土壤中微生物量磷含量大于衡观35。不施磷处理下,石麦15根际土

表 5　不同磷供应下小麦根际和非根际土壤不同形态磷素含量变化

Table 5　Effects of Pi rates on concentrations of various Pi forms in rhizosphere and non- rhizosphere soils

土壤 Soil	供磷水平 Pi supply (P_2O_5 g/kg)	石麦 15 Shimai 15			衡观 35 Hengguan 35		
		速效磷 Olsen-P (mg/kg)	微生物量磷 MBP (mg/kg)	有机磷 Organic-P (mg/kg)	速效磷 Olsen-P (mg/kg)	微生物量磷 MBP (mg/kg)	有机磷 Organic-P (mg/kg)
根际土 Rhizosphere	0	4.1 ±0.1 d	4.3 ±0.5 a	104.2 ±8.7 b	4.4 ±0.1 d	2.8 ±0.1 c	67.0 ±3.2 d
	0.1	23.8 ±1.3 b	1.4 ±0.2 c	93.2 ±8.7 bc	25.7 ±2.0 b	1.4 ±0.2 d	76.2 ±3.2 c
	0.3	68.6 ±3.4 a	1.5 ±0.2 c	71.0 ±7.1 c	61.9 ±2.3 a	1.5 ±0.3 d	78.0 ±4.3 c
非根际土 Non-rhizosphere	0	4.9 ±0.1 c	3.6 ±0.4 ab	147.7 ±16.7 a	4.7 ±0.1 c	3.6 ±0.3 b	106.5 ±4.6 a
	0.1	24.6 ±1.4 b	3.4 ±1.1 a	105.0 ±11.2 b	23.1 ±1.0 b	2.8 ±0.1 c	92.4 ±3.4 b
	0.3	65.5 ±3.3 a	4.0 ±0.8 a	42.4 ±6.7 d	59.8 ±2.9 a	8.2 ±2.5 a	51.1 ±2.5 e

注(Notes): MBP — Microbial biomass P; 表中数据是平均值 ± 标准误,同一列数据后不同字母表示差异达到 5% 显著水平 The data are means ± SE. Different letters after the data in same column indicate significant difference at the $P < 0.05$ level.

壤中微生物量磷含量与非根际土壤差异不明显,衡观 35 根际土壤中微生物量磷低于非根际土壤;在中量和高量磷供应下小麦的根际土壤中微生物量磷含量均明显低于非根际土壤。不施磷处理小麦非根际土壤中有机磷含量比中量磷处理高;高磷处理非根际土壤中有机磷含量显著降低,石麦 15 的根际土壤中有机磷含量也较低。

土壤供磷不足(不施磷)时,根际土壤有机磷含量显著低于非根际土壤,而高磷处理,根际土壤中有机磷含量显著大于非根际土壤。不施磷处理,石麦 15 根际和非根际土壤的有机磷含量均明显高于衡观 35。

2.6　根际土壤碱性磷酸酶活性和 pH 值的变化

与高磷处理相比,不施磷和中量磷处理的根际土壤碱性磷酸酶的活性显著增加,而非根际土壤碱性磷酸酶活性没有变化。在不施磷和中量施磷条件下,根际土壤碱性磷酸酶活性显著高于非根际土壤。相同磷处理条件下,土壤碱性磷酸酶活性在两个小麦品种之间没有明显差异(表 6)。

与中量施磷相比,不施磷时小麦根际与非根际土壤 pH 均较低,而高磷处理两个品种小麦的根际土壤 pH 明显升高。不同供磷条件对衡观 35 的非根际土壤 pH 影响不明显。不施磷时,小麦根际土壤 pH 略低于非根际土壤; 而高磷供应下,根际土壤

表 6　不同磷供应下小麦根际和非根际土壤中碱性磷酸酶活性与土壤 pH 值的变化

Table 6　Effects of Pi rates on alkaline phosphatase activity and soil pH values in rhizosphere and non- rhizosphere soils

土壤 Soil	供磷水平 Pi supply (P_2O_5 g/kg)	石麦 15 Shimai 15		衡观 35 Hengguan 35	
		碱性磷酸酶活性 Alkal. phosphatase [g/(kg · h)]	土壤 pH Soil pH	碱性磷酸酶活性 Alkal. phosphatase [g/(kg · h)]	土壤 pH Soil pH
根际土 Rhizosphere	0	12.23 ±0.25 ab	7.26 ±0.01 cd	11.92 ±0.55 ab	7.34 ±0.02 d
	0.1	12.58 ±0.78 a	7.37 ±0.01 b	12.32 ±0.95 a	7.43 ±0.01 b
	0.3	9.90 ±0.70 c	7.45 ±0.02 a	10.62 ±0.36 bc	7.46 ±0.02 a
非根际土 Non-rhizosphere	0	10.64 ±0.82 bc	7.29 ±0.02 c	10.06 ±0.80 bc	7.37 ±0.02 cd
	0.1	9.99 ±0.39 c	7.38 ±0.01 b	9.58 ±0.33 c	7.40 ±0.05 bc
	0.3	9.23 ±0.34 c	7.41 ±0.01 b	9.49 ±0.62 c	7.41 ±0.01 bc

注(Notes): 表中数据是平均值 ± 标准误,同一列数据后不同字母表示差异达到 5% 显著水平 The data are means ± SE. Different letters after the data in same column indicate significant difference at the $P < 0.05$ level.

pH 显著高于非根际土壤。在磷供应不足(不施磷)时,衡观 35 根际和非根际土壤的 pH 高于石麦 15(表6)。

3 讨论

本试验显示,两个小麦品种对不施磷和施磷的反应呈现明显差异,与中量磷处理相比,不施磷时衡观35 的生物量降低幅度小于石麦15(表1),但地上部磷含量和累积量(表2)明显高于石麦 15,这表明衡观 35 耐低磷胁迫的能力明显比石麦 15 强;但在高磷处理下石麦 15 生物量(表 1)和磷累积量(表2)增加幅度明显高于衡观 35,表明石麦 15 对高量磷肥供应的反应强于衡观 35。究其原因,可能与根系形态变化有密切关系。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。小麦根系总根长以及直径≤0.16 mm 的细根长度与植株磷累积量之间呈极显著正相关关系。在不供磷条件下,衡观 35 根系中直径≤0.16 mm 细根长度所占比例比石麦 15 明显多(表4),根系平均直径较小(表3)。而在高磷条件下,石麦 15 根系中直径≤0.16 mm 的细根长度较衡观 35 大,细根在总根长中的比例较高(表 4)。土壤供磷不足或高量供磷条件下,小麦根系中直径≤0.16 mm 的细根对提高植株吸收土壤磷具有重要的意义。本实验直径≤0.16 mm 细根中很大程度上是侧根部分。侧根的发生发育与作物磷营养之间关系密切[15-16]。缺磷和低磷(0.01 mmol/L P)处理下,小麦侧根数明显高于正常或高磷处理,侧根密度也显著增加,侧根数量和侧根总长度与植株吸磷量间呈显著正相关关系[17]。

缺磷胁迫下植物可通过改变根际过程来增强对土壤磷的高效利用[10-11]。不施磷处理下小麦根际土壤速效磷含量明显降低,施用磷肥显著增加根际和非根际土壤磷含量(表5)。土壤磷分为有机磷和无机磷两种形态。李和生等[18]研究发现小麦根际土壤有机磷总量低于非根际土壤,认为根际土壤中活性有机磷、中度活性有机磷含量降低可能是因为降解,从而增加了土壤速效磷含量。本试验也发现在不施磷下,小麦根际土壤中有机磷含量显著低于非根际土壤,但在高磷供应下根际土壤中有机磷含量高于非根际土壤(表5)。

土壤微生物量磷是指土壤中所有活体微生物所含有的磷,是土壤有机磷中最活跃的部分,在农业土壤中微生物量磷约占有机磷总量的3%左右[19],但土壤微生物量磷周转速率快,对土壤磷的循环转化有着重要的作用[14]。与中量磷处理相比,不施磷处理小麦根际土壤微生物量磷含量较高,高磷供应并未增加根际土壤微生物量磷;在中量和高量磷施用下的两个小麦品种根际土壤微生物量磷含量均低于非根际土壤(表5)。

缺磷条件下 81(85) 5-3-3-3 和 NC37 小麦在低磷水平根系分泌酸性磷酸酶活性分别为供磷水平的 1.6 和 1.3 倍[17]。低磷胁迫下,不同玉米基因型根际磷酸酶活性增加程度不同,耐低磷基因型根际磷酸酶活性较高[20]。土壤磷酸酶可通过水解磷酸单酯除去底物分子上的磷酸基团,促进土壤有机磷向无机磷转化,生成磷酸根离子,提高土壤有机磷的作物有效性[11]。本试验发现,在不施磷和中量磷供应下,小麦根际土壤中碱性磷酸酶活性显著高于非根际土壤,但高磷供应下,根际土壤中碱性磷酸酶活性较低(表6),根际土壤中有机磷的下降与碱性磷酸酶活性的较高相一致,表明低磷胁迫下,小麦根际土壤中碱性磷酸酶活性升高,有利于促进有机磷的分解,导致根际土壤有机磷含量下降,而高磷供应下,根际有机磷转化过程不如低磷下明显。

缺磷胁迫时植物根系分泌质子和有机酸量增加,导致根际酸化,pH 降低,促进土壤磷的溶解,提高磷的有效性[11,21]。与低效型相比,低磷胁迫下磷高效菜豆不仅改变根系构型和形态,且分泌更多的质子和有机酸[22]。本研究表明与中量供磷相比,不施磷条件下小麦根际土壤 pH 较低,而高磷处理的根际土壤 pH 较高。不施磷时,小麦根际土壤 pH 略低于非根际土壤;在高磷条件下,根际土壤 pH 显著大于非根际土壤(表6),表明小麦适应低磷胁迫时,根际 pH 降低,而土壤供磷充足甚至磷高量时,小麦根际酸化过程不明显。

综上所述,不同施磷水平下,小麦根系形态和根际过程产生可塑性反应。土壤供磷不足时,衡观 35 和石麦 15 两个小麦品种的根系形态和根际过程均发生了适应性变化,而高供磷条件下,小麦根系形态的改变因品种而异。

参 考 文 献:

[1] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998. 910-911.
National Soil Survey Office. Chinese soil[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1998. 910-911.

[2] 鲁如坤. 我国的磷矿资源和磷肥生产消费-磷矿资源和磷肥生产[J]. 土壤, 2004, 36(1): 1-4.

Lu R K. Phosphorus resource of china and phosphate fertilizer production and consumption-P resources and P fertilizers production of China[J]. Soils, 2004, 36(1): 1-4.

[3] 鲁如坤，史正元，顾益初. 土壤积累态磷研究. Ⅱ 磷肥的表观积累利用率[J]. 土壤，1995，27(6)：286-289.
Lu R K, Shi Z Y, Gu Y C. Study on unused phosphorus in soil II. Apparent accumulated use efficiency of P fertility[J]. Soils, 1996, 27(6): 286-289.

[4] 辛景树，徐明岗，田有国，张淑香. 耕地质量演变趋势研究-国家级耕地土壤监测数据整编[M]. 北京：中国农业科学技术出版社，2008. 62-63.
Xin J S, Xu M G, Tian Y G, Zhang S X. Research of the evolution of arable land quality[M]. Beijing: China Agricultural Scientech Press, 2008. 62-63.

[5] 陈磊，王盛锋，刘自飞，等. 低磷条件下植物根系形态反应及其调控机制[J]. 中国土壤与肥料，2011，(6)：1-12.
Chen L, Wang S F, Liu Z F *et al*. Morphological and physiological responses of plant root growth to low phosphorus stress[J]. Soil Fert. Sci. China, 2011, (6): 1-12.

[6] Abel S. Phosphate sensing in root development[J]. Curr. Opin. Plant Biol., 2011, 14(3): 303-309.

[7] Péret B, Clément M, Nussaume L, Desnos T. Root developmental adaptation to phosphate starvation: better safe than sorry[J]. Trends Plant Sci., 2011, 16: 442-450.

[8] 张智峰，张卫峰. 我国化肥施用现状及趋势[J]. 磷肥与复肥，2008，23(6)：9-12.
Zhang Z F, Zhang W F. The situation and trend of fertilizer application in China[J]. Phos. & Comp. Fert., 2008, 23(6): 9-12.

[9] 杨莉琳，贾良良，胡春胜，等. 太行山山前平原冬小麦-夏玉米精准施肥指标的修正[J]. 农业工程学报，2007，11(23)：89-94.
Yang L L, Jia L L, Hu C S *et al*. Revision of fertilizer recommendation for wheat and maize rotation in Taihang piedmont of North China[J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2007, 11(23): 89-94.

[10] Hinsinger P, Gobran G R, Gregory P J, Wenzel W W. Rhizosphere geometry and heterogeneity arising from root-mediated physical and chemical processes[J]. New Phytol., 2005, 168(2): 293-303.

[11] George T S, Fransson A M, Hammond J P, White P J. Phosphorus nutrition: rhizosphere processes, plant response and adaptations[A]. Bünemann E K, Oberson A, Fossard E. (eds.) Phosphorus in action: Biological processes in soil phosphorus cycling (Soil biology)[M]. Dordrecht, The Netherlands: Springer 2011. 245-271.

[12] 张福锁，申建波，冯固，等. 根际生态学-过程与调控[M]. 北京：中国农业大学出版社，2009.
Zhang F S, Shen J B, Feng G *et al*. Rhizosphere ecology-processes and management[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2009.

[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.
Lu R K. The analytical methods for soil and agrochemistry[M]. Beijing: China Agricultural Scientech Press, 2000.

[14] 吴金水，林启美，黄巧云，肖和艾. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京：气象出版社，2006.
Wu J S, Lin Q M, Huang Q Y, Xiao H A. Determination of soil microbial biomass and its application[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006.

[15] Péret B, De Rybel B, Casimiro I *et al*. Arabidopsis lateral root development: an emerging story[J]. Trends Plant Sci., 2009, 14(7): 399-408.

[16] Williamson L C, Ribrioux S P C P, Fitter A H, Leyser H M O. Phosphate availability regulates root system architecture in *Arabidopsis*[J]. Plant Physiol., 2001, 126: 875-882.

[17] 孙海国，张福锁，杨军芳. 不同供磷水平小麦苗期根系特征与其相对产量的关系[J]. 华北农学报，2001，16 (3)：98-104.
Sun H G, Zhang F S, Yang J F. Characteristics of root system of wheat seedlings and their relative grain yield[J]. Acta Agric. Boreali-Sin., 2001, 16(3): 98-104.

[18] 李和生，马宏瑞，赵春生. 根际土壤有机磷的分组及其有效性分析[J]. 土壤通报，1998，29(3)：116-118.
Li H S, Ma H R, Zhao C S. Rhizosphere soil organic phosphorus groups and their effectiveness analysis[J]. Chin. J. Soil Sci., 1998, 29(3): 116-118.

[19] Brookes P C, Mcgrath S P. Effects of metal toxicity on the size of the soil microbial biomass[J]. Soil Sci., 1984, 35: 341-346.

[20] Liu Y, Mi G H, Zhang F S *et al*. Rhizosphere effect and root growth of two maize (*Zea mays* L.) genotypes with contrasting P efficiency at low P availability[J]. Plant Sci., 2004, 167: 217-231.

[21] Vance C P, Uhde-Stone C, Allan D L. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource[J]. New Phytol., 2003,157: 427-447.

[22] Liao H, Yan X L, Rubio G *et al*. Genetic mapping of basal root gravitropism and phosphorus acquisition efficiency in common bean[J]. Funct. Plant. Biol., 2004, 31: 959-970.