

小麦及玉米苗期生物量对介质供磷水平的反应

华 瑞^{1a,1b}, 沈玉芳^{1a}, 李世清^{1a,1b}, 张福锁²

(1 西北农林科技大学 a. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, b. 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;
2. 中国农业大学 资源环境学院, 北京 100094)

【摘 要】 【目的】研究小麦和玉米对介质供磷水平的反应,为小麦玉米栽培中磷肥的合理施用提供参考依据。【方法】试验设 4 种磷水平(以 P₂O₅ 的浓度表示),分别为缺磷处理(0 mmol/L)、低磷胁迫(0.05 mmol/L)、中等供磷(0.3 mmol/L)和标准供磷(0.5 mmol/L);以小麦和玉米为指示作物,包括不同分蘖类型小麦(*Triticum aestivum* L.)小偃 22 号(多分蘖品种)和兰考 4 号(少分蘖品种)及两种不同产量潜力玉米(*Zea mays* L.)屯玉 65 号(高产品种)和户单 4 号(低产品种),组成完全试验方案,用营养液培养法研究小麦、玉米苗期生物量对介质不同供磷水平(0~0.5 mmol/L)的反应。【结果】小麦和玉米两种作物在苗期对磷胁迫均有明显反应,且玉米对磷素的反应并不低于小麦,但对磷素敏感的阶段不同,且这种敏感性因作物基因型差异而有所不同。植株不同部位对磷素反应亦不相同,在苗期早期(即出苗后 40 d 以前),作物冠层生长并不需要介质较高的供磷水平,而在苗期后期(即出苗后 40~50 d),磷胁迫对冠层生长会产生明显抑制作用;介质较低供磷水平有利于促进玉米根系生长,而小麦根系生长则需要较高的供磷水平。总体而言,在苗期早期阶段,玉米对介质供磷胁迫的反应强于小麦,而进入苗期后期生长阶段则以小麦的反应强于玉米。【结论】在玉米苗期早期,介质供磷尤为重要;对小麦而言,介质供磷对其冠层的影响效果在出苗 40 d 以后才能显现。

【关键词】 小麦;玉米;介质供磷水平;苗期;生物量

【中图分类号】 Q945.1;S158.3 【文献标识码】 A 【文章编号】 1671-9387(2008)11-0082-09

Different responses of seedlings biomass of wheat
and maize to phosphorus levels

HUA Rui^{1a,1b}, SHEN Yu-fang^{1a}, LI Shi-qing^{1a,1b}, ZHANG Fu-suo²

(1 a. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, b. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094, China)

Abstract: 【Objective】 This study was to provide us with foundation of optimizing application of phosphorous fertilizer. 【Method】 Pot experiment was conducted to investigate the responses of seedlings biomass of wheat (*Triticum aestivum* L.) and maize (*Zea mays* L.) to phosphorus levels. The treatments included four phosphate concentrations(P₂O₅ 0, 0.05, 0.3, 0.5 mmol/L). Two varieties of wheat (Xiaoyan 22 and Lankao 4) and maize (Tunyu 65 and Hudan 4) were grown in Hoagland solution. 【Result】 Results showed that both wheat and maize responded to low phosphorus stress. However, the responses were different in growth period and genotypes. Shoot biomass and root biomass of crops also responded differently. During the earlier stage of seedling (40 days after emergence), shoot biomass of crops didn't decrease signif-

* [收稿日期] 2007-11-21
[基金项目] 国家自然科学基金项目(30670326, 30571116);中国科学院西部之光联合学者项目(2006LH01)
[作者简介] 华 瑞(1973—),女,陕西临潼人,在读硕士,主要从事植物营养研究。E-mail: huarui504@126.com
[通讯作者] 李世清(1963—),男,甘肃秦安人,教授,博士生导师,主要从事土壤-植物氮素营养研究。E-mail: sqli@ms.iswc.ac.cn

icantly with the low concentration of phosphate compared with normal phosphate (0.5 mmol/L) while opposite results were found during the later stage of seedling (40—50 days after emergence). Under low-phosphate stress, root biomass of maize increased while root biomass of wheat was found to be decreased. Total biomass of maize was more sensitive to the reduction of phosphate concentration than that of wheat during the earlier stage of seedling while the reverse was true during the later stage of seedling. 【Conclusion】 During the earlier stage of seedling, sufficient P is important for maize growth while P level begins to show great effect on shoot biomass of wheat at the later stage of seedling (40 days after emergence).

Key words: wheat(*Triticum aestivum* L.); maize(*Zea mays* L.); phosphorus level; stage of seedling; biomass

磷是植物生长发育必需的大量营养元素之一,磷素不足严重影响作物产量。研究表明,在世界 13.19 亿 hm^2 耕地中,缺磷土壤约占 43%^[1],我国 1.07 亿 hm^2 农田中,有 2/3 土壤严重缺磷^[2-3],因此施磷是我国作物增产的主要有效途径之一。但由于作物对磷肥的当季利用率一般只有 5%~15%,即使将后效包括在内也不超过 25%^[4],而长期大量施用磷肥,同时会带来诸多环境问题^[5-6]。大量研究证明,由于遗传特性的差异,作物对缺磷胁迫的适应机制明显不同,因此对磷素的利用效率也存在显著差异,这种差异不仅表现在不同植物之间,而且也表现在同一植物的不同品种之间^[7-9]。小麦是我国主要的粮食作物之一,玉米是粮食、经济、饲料兼用的高产作物,二者在我国乃至世界粮食生产中均占有十分重要的地位。因此,提高小麦、玉米对介质磷素的吸收利用能力,挖掘土壤潜在磷素资源,筛选“磷高效”种质资源,对充分发挥植物高效利用土壤磷素营养的潜力,具有非常重要的科学和实践意义。

关于小麦和玉米对磷肥及低磷胁迫的适应性反应,目前已有大量研究^[10-16]。有报道认为,与所谓“喜磷”豆科作物相比,小麦对磷肥反应并不逊色^[12];玉米是低磷敏感性作物,但对低磷胁迫的反应在不同品种间存在显著差异^[17-18]。以往对小麦、玉米磷营养的研究,往往集中在单一作物不同基因型的比较,而有关小麦和玉米两种作物对磷素反应的差异研究还比较少。作物苗期是磷素营养的关键期和敏感期,苗期吸收的磷素大约占全生育期磷素吸收量的 2/3 以上^[19]。基于此,本研究以具有不同产量潜力的玉米基因型(高产品种屯玉 65 号和低产品种户单 4 号)和不同分蘖能力的小麦基因型(多分蘖品种小偃 22 号和少分蘖品种兰考 4 号)为供试材料,在相同环境下通过水培试验,比较小麦和玉米苗期生物量对介质供磷水平反应的差异,以期合理施用磷肥提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试小麦和玉米 试验选取具有不同分蘖特性的小麦品种及不同产量潜力的玉米品种为供试材料。供试小麦(*Triticum aestivum* L.)品种为小偃 22 号与兰考 4 号,其种子全磷含量分别为 5.91 和 3.73 mg/g;玉米(*Zea mays* L.)品种为屯玉 65 号与户单 4 号为其种子全磷含量分别为 3.06 和 5.37 mg/g。小偃 22 号为弱冬性品种,分蘖力较强;兰考 4 号为大穗型,分蘖力较弱。屯玉 65 号产量较高,一般为 12 000 kg/hm^2 ;户单 4 号产量相对较低,一般为 11 000 kg/hm^2 。

1.1.2 营养液 营养液采用 Hoagland 营养液,其组分为:Ca(NO₃)₂·4H₂O(5 mmol/L),KNO₃(5 mmol/L),MgSO₄·7H₂O(2 mmol/L),KH₂PO₄,Fe-EDTA(Na₂-EDTA 和 FeSO₄)。微量元素用阿农微量元素混合液补充,其成分为:H₃BO₃(2.86 g/L),MnCl₂·4H₂O(1.81 g/L),ZnSO₄·7H₂O(0.22 g/L),Cu₅O₄·5H₂O(0.08 g/L),Na₂MoO₄·2H₂O(0.025 g/L)。

1.2 试验设计

水培试验在中国科学院水利部水土保持研究所植物营养试验场移动式透光防雨棚进行。为保证试验结果的可靠性和验证试验结果的重现性,试验共进行了两期,一期试验于 2006-09~2006-10 进行,在作物生长期,晴天(包括晴间多云天气)占 2/5,阴雨天占 3/5,棚下温度为 12~21 ℃;二期试验于 2007-04~2007-05 进行,在作物生长期,晴天占 2/5,阴天占 2/5,阴雨天占 1/5,棚下温度为 13~25 ℃。

供试作物种子要求籽粒饱满一致、无病虫害。小麦种子先在 0~7 ℃下春化处理 15 d,然后将小麦和玉米种子均用体积分数 10% H₂O₂ 溶液表面消

毒 30 min,用蒸馏水冲洗干净,再用去离子水浸种吸胀(小麦 6 h,玉米 24 h),在石英砂盘中育苗,上覆干净湿滤纸于暗室中发芽。

育苗在植物恒温智能培养箱中进行,设定温度为 25 ℃,湿度为 60 %,照度为 0 级。每天喷适量水以保持石英砂处于一定湿度,待根长为 2~4 cm 时,选苗并用海绵固定在带孔塑料泡沫板上后,移植于不透光的盛有蒸馏水的培养钵中,每天换蒸馏水 1 次并通气。培养 3~4 d,待根系伸长到 5~7 cm 后进行营养液培养。

培养定植时,选取长势一致的幼苗移栽入内径 10.3 cm、深 22.0 cm、容积为 1.8 L 的灰色 PVC 盆钵中,穿过打孔的盆钵盖,用海绵缠绕固定植株,玉米每钵定植 4 株,小麦定植 6 株。在移动式透光防雨棚下,用配好的不同磷水平的 Hoagland 营养液进行正式溶液培养。每日用气泵通气 2 次,每次 2 h;培养期间,每天加去离子水补充损失的水分以维持原有液面,各盆钵中液面高度保持一致;每周更换 1 次 Hoagland 营养液。为防止作物出现缺铁黄化现象,每隔 1 d 补充 1 次铁盐(Fe-EDTA),用量为每升营养液加 1 mL 铁盐。试验设 4 个介质磷浓度水平(以 P₂O₅ 表示),分别为 0,0.05,0.3 和 0.5 mmol/L,依次用 P0、P1、P2 和 P3 表示,分别代表缺磷对照、低磷胁迫、中等供磷和标准供磷。缺磷、低

磷及中等供磷处理中缺少的 K⁺由 KCl 补充,其 K⁺与标准供磷处理中的 K⁺浓度相等。以上试验因子和磷水平组成完全试验方案,共 16 个处理,每处理重复 9 次。

分别于作物定植培养后 15 d(相当于出苗后 25 d)、30 d(出苗后 40 d)和 40 d(出苗后 50 d)采样,每次采样做 3 次重复,进行相关指标测定。在两期试验中,小麦和玉米作物同时栽培、同时采样,以消除因试验条件不同而产生的差异。

为了使试验结果更加可靠,本研究中数据为两期试验结果的平均值。

1.3 测定项目与方法

将植株按茎叶(冠层)、根系分开采集,在鼓风干燥恒温箱中于 105 ℃杀青 30 min 后,再在 80 ℃下烘干,用 1/10 000 电子天平称质量。

1.4 统计方法

数据用 Microsoft Excel 2003 和 SAS 8.1 软件进行处理,采用 DUNCAN 进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 小麦、玉米苗期冠层生物量对介质供磷水平反应的差异

介质供磷水平对小麦和玉米苗期冠层生物量的影响见表 1 和表 2。

表 1 不同供磷水平对小麦苗期冠层生物量的影响

Table 1 Effects of phosphorus levels on shoot biomass of wheat

苗龄/d Day after emergence	磷水平 P level	小偃 22 号 Xiaoyan 22			兰考 4 号 Lankao 4			平均 Average		
		生物量 (g·株 ⁻¹) Biomass	较 P0 增长 比例/% Increase comparing with P0	较 P1 增长 比例/% Increase comparing with P1	生物量 (g·株 ⁻¹) Biomass	较 P0 增长 比例/% Increase comparing with P0	较 P1 增长 比例/% Increase comparing with P1	生物量 (g·株 ⁻¹) Biomass	较 P0 增长 比例/% Increase comparing with P0	较 P1 增长 比例/% Increase comparing with P1
25	P0	0.094 a	—	—	0.082 a	—	—	0.088 a	—	—
	P1	0.079 a	—16.0	—	0.093 a	13.4	—	0.086 a	—2.3	—
	P2	0.078 a	—17.0	—1.3	0.091 a	11.0	—2.2	0.085 a	—3.4	—1.2
	P3	0.074 a	—21.3	—6.3	0.091 a	11.0	—2.2	0.083 a	—5.7	—3.5
40	P0	0.349 b	—	—	0.160 b	—	—	0.255 b	—	—
	P1	0.533 a	52.7	—	0.496 a	210.0	—	0.515 a	102.0	—
	P2	0.516 a	47.9	—3.2	0.518 a	223.8	4.4	0.517 a	102.8	0.4
	P3	0.558 a	59.9	4.7	0.547 a	241.9	10.3	0.553 a	116.9	7.4
50	P0	0.317 c	—	—	0.160 c	—	—	0.239 c	—	—
	P1	1.260 b	297.5	—	1.078 b	573.8	—	1.169 b	389.1	—
	P2	1.353 b	326.8	7.4	1.459 a	811.9	35.3	1.406 a	488.3	20.3
	P3	1.528 a	382.0	21.3	1.474 a	821.3	36.7	1.501 a	528.0	28.4

注:同列同苗龄数据后标不同字母者表示差异显著($P<0.05$),标相同字母者表示差异不显著($P>0.05$)。下表同。
Note:Different letter in each column indicate significant difference at the 0.05 levels, same letters indicate no significant difference. Same as below.

从表 1 和表 2 可以看出,小麦、玉米苗期对介质不同供磷水平的反应明显受到生长阶段的影响。从平均值看,在作物苗期生长前期,即出苗后 25 d,不同供磷水平对小麦冠层生物量的影响不明显,不同

供磷处理的小麦生物量为 0.083~0.088 g/株;但不同供磷水平对玉米冠层生物量有明显影响,与 P0 处理相比,P1、P2 和 P3 处理的玉米冠层生物量分别增加 0.158,0.161 和 0.115 g/株,差异均达显著水平 ($P<0.05$)。出苗后 40 d,不同处理小麦和玉米冠层生物量对介质的供磷水平均有较强反应,且玉米的反应仍强于小麦;与 P0 相比,P1、P2 和 P3 处理的小麦冠层生物量分别增加 0.260,0.262 和 0.298 g/株,增长率分别为 102.0%,102.8%和 116.9% ($P<0.05$);玉米冠层生物量分别增加0.878,1.291 和 1.138 g/株,增长率分别为186.0%,273.5%和 241.4% ($P<0.05$)。出苗后 50 d,小麦对介质供磷的反应又明显强于玉米。介质供磷后,小麦冠层生

物量平均增加 4.7 倍 ($P<0.05$),玉米仅增加 3.1 倍 ($P<0.05$)。

比较不同供磷水平对作物冠层生物量的影响可以看出,两种作物苗期不同生长阶段对介质最佳磷水平的需求不同。与 P0 相比,出苗 25 d,小麦冠层生物量在介质各供磷水平下均表现出负效应,而玉米冠层生物量却有明显增加;出苗 40 d,介质供磷对两种作物冠层生物量均表现为正效应,但小麦冠层生物量的增长变化在介质供磷水平为0.05 mmol/L 时已基本趋于稳定,而玉米冠层生物量在介质供磷水平为0.3 mmol/L 时达到最大;出苗 50 d,小麦和玉米的冠层生物量均在磷水平为 0.5 mmol/L 时达到最大值。

表 2 不同供磷水平对玉米苗期冠层生物量的影响

Table 2 Effects of phosphorus levels on shoot biomass of maize

苗龄/d Day after emergence	磷水平 P level	屯玉 65 号 Tunyu 65			户单 4 号 Hudan 4			平均 Average		
		生物量 (g·株 ⁻¹) Biomass	较 P0 增长 比例/% Increase comparing with P0	较 P1 增长 比例/% Increase comparing with P1	生物量 (g·株 ⁻¹) Biomass	较 P0 增长 比例/% Increase comparing with P0	较 P1 增长 比例/% Increase comparing with P1	生物量 (g·株 ⁻¹) Biomass	较 P0 增长 比例/% Increase comparing with P0	较 P1 增长 比例/% Increase comparing with P1
25	P0	0.130 c	—	—	0.129 c	—	—	0.130 b	—	—
	P1	0.173 b	33.1	—	0.403 a	212.4	—	0.288 a	121.5	—
	P2	0.227 a	74.6	31.2	0.355 b	175.2	-11.9	0.291 a	123.9	1.0
	P3	0.176 b	35.4	1.7	0.313 b	142.6	-22.3	0.245 a	88.5	-14.9
40	P0	0.393 c	—	—	0.550 c	—	—	0.472 c	—	—
	P1	1.087 b	176.6	—	1.612 b	193.1	—	1.350 b	186.0	—
	P2	1.555 a	295.7	43.1	1.971 a	258.4	22.3	1.763 a	273.5	30.6
	P3	1.501 a	281.9	38.1	1.719 ab	212.6	6.6	1.610 a	241.1	19.3
50	P0	0.800 c	—	—	0.598 c	—	—	0.699 c	—	—
	P1	2.605 a	225.6	—	2.895 b	384.1	—	2.750 b	293.4	—
	P2	2.236 b	179.5	-14.2	3.121 a	421.9	7.8	2.679 b	283.3	-2.6
	P3	2.594 a	224.3	-0.4	3.897 a	551.7	34.6	3.246 a	364.4	18.0

从表 1 和表 2 还可以看出,同种作物不同基因型对介质不同供磷水平的反应不同。从冠层生物量看,在相同供磷水平下,户单 4 号玉米的冠层生物量基本高于屯玉 65 号;但小麦不同测定期不同基因型对不同供磷水平的反应趋势和程度并不一致。在出苗 25 d,与 P0 处理相比,介质供磷后小偃 22 号的冠层生物量平均下降 18.1%,兰考 4 号平均增加 11.8%;出苗 40 d,小偃 22 号平均增加 53.5% ($P<0.05$),而兰考 4 号的增长率高达 225.2% ($P<0.05$)。与 P1 相比,出苗后 25,40 和 50 d,小偃 22 号的冠层生物量平均分别增加-3.8%,0.8%和 14.4%,兰考 4 号的冠层生物量平均分别增加-2.2%,7.4%和 36.0% ($P<0.05$)。显然,无论与 P0 处理还是与 P1 处理相比,兰考 4 号对介质供磷的反应强度明显高于小偃 22 号。对玉米而言,与

P0 处理相比,在出苗后 25,40 和 50 d,屯玉 65 号的冠层生物量分别平均增加 0.5,2.5 和 2.1 倍,同期户单 4 号分别平均增加 1.8,2.2 和 4.5 倍;与 P1 处理相比,在出苗后 25,40 和 50 d,屯玉 65 号的冠层生物量分别平均增加 16.5%,40.6%和-7.3%,同期户单 4 号平均分别增加-17.1%,14.5%和 21.2%,说明屯玉 65 号出苗后 40 d 的介质供磷效应已很明显,而户单 4 号在出苗后 50 d 时介质供磷效应方达到最高。

从对介质不同磷水平的反应看,在玉米苗期生长早期(出苗后 25 d 前),与 P1 处理相比,户单 4 号对较高磷水平表现为负效应,说明在此生长阶段一定的磷胁迫更利于其冠层生长,而屯玉 65 号在出苗后 40~50 d,对较高介质磷水平表现为负效应。总体来看,虽然不同基因型小麦和玉米对介质磷水平

的反应不一致,但在苗期,小麦对磷反应差异的规律性及基因型间的差异性较玉米更为明显。

2.2 小麦、玉米苗期根系生物量对介质供磷水平反应的差异

介质不同供磷水平对小麦和玉米苗期根系生物量的影响见表 3 和表 4。由表 3 和表 4 可见,出苗后 25 d,小麦根系平均生物量在缺磷与供磷处理间均

存在显著差异($P<0.05$),但 P1、P2 和 P3 处理间差异不显著($P>0.05$),与 P0 处理相比,P1、P2 和 P3 处理的根系平均生物量分别降低 33.3%,36.8%和 35.1%;玉米根系平均生物量对供磷处理均表现为正效应,出苗 25 d,与 P0 处理相比,P1、P2 和 P3 处理的玉米根系平均生物量分别增加 29.9%($P<0.05$),26.5%($P<0.05$)和 5.1%($P>0.05$)。

表 3 不同供磷水平对小麦苗期根系生物量的影响
Table 3 Effects of phosphorus levels on root biomass of wheat

苗龄/d Day after emergence	磷水平 P level	小偃 22 号 Xiaoyan 22			兰考 4 号 Lankao 4			平均 Average		
		生物量 (g·株 ⁻¹) Biomass	较 P0 增长 比例/% Increase comparing with P0	较 P1 增长 比例/% Increase comparing with P1	生物量 (g·株 ⁻¹) Biomass	较 P0 增长 比例/% Increase comparing with P0	较 P1 增长 比例/% Increase comparing with P1	生物量 (g·株 ⁻¹) Biomass	较 P0 增长 比例/% Increase comparing with P0	较 P1 增长 比例/% Increase comparing with P1
25	P0	0.051 a	—	—	0.062 a	—	—	0.057 a	—	—
	P1	0.036 b	−29.4	—	0.039 b	−37.1	—	0.038 b	−33.3	—
	P2	0.034 b	−33.3	−5.6	0.037 b	−40.3	−5.1	0.036 b	−36.8	−5.3
	P3	0.036 b	−29.4	0.0	0.038 b	−38.7	−2.6	0.037 b	−35.1	−2.6
40	P0	0.124 a	—	—	0.129 b	—	—	0.127 a	—	—
	P1	0.089 b	−28.2	—	0.142 a	10.1	—	0.116 a	−8.7	—
	P2	0.117 a	−5.7	31.5	0.117 b	−9.3	−17.6	0.117 a	−7.9	0.9
	P3	0.130 a	4.8	46.1	0.119 b	−7.8	−16.2	0.125 a	−1.6	7.8
50	P0	0.233 c	—	—	0.182 c	—	—	0.208 c	—	—
	P1	0.336 b	44.2	—	0.318 ab	74.7	—	0.327 ab	57.2	—
	P2	0.312 b	33.9	−7.1	0.296 b	62.6	−6.9	0.304 b	46.2	−7.0
	P3	0.408 a	75.1	21.4	0.358 a	96.7	12.6	0.383 a	84.1	17.1

表 4 不同供磷水平对玉米苗期根系生物量的影响
Table 4 Effects of phosphorus levels on root biomass of maize

苗龄/d Day after emergence	磷水平 P level	屯玉 65 号 Tunyu 65			户单 4 号 Hudan 4			平均 Average		
		生物量 (g·株 ⁻¹) Biomass	较 P0 增长 比例/% Increase comparing with P0	较 P1 增长 比例/% Increase comparing with P1	生物量 (g·株 ⁻¹) Biomass	较 P0 增长 比例/% Increase comparing with P0	较 P1 增长 比例/% Increase comparing with P1	生物量 (g·株 ⁻¹) Biomass	较 P0 增长 比例/% Increase comparing with P0	较 P1 增长 比例/% Increase comparing with P1
25	P0	0.138 a	—	—	0.095 c	—	—	0.117 b	—	—
	P1	0.095 b	−31.2	—	0.208 a	119.0	—	0.152 a	29.9	—
	P2	0.145 a	5.1	52.6	0.151 b	58.9	−27.4	0.148 a	26.5	−2.6
	P3	0.106 b	−23.2	11.6	0.139 b	46.3	−33.2	0.123 b	5.1	−19.1
40	P0	0.342 c	—	—	0.311 b	—	—	0.327 b	—	—
	P1	0.408 b	19.3	—	0.496 a	59.5	—	0.452 a	38.2	—
	P2	0.528 a	54.4	29.4	0.448 a	44.1	−9.7	0.488 a	49.2	8.0
	P3	0.482 ab	40.9	18.1	0.463 a	48.9	−6.7	0.473 a	44.6	4.7
50	P0	0.633 b	—	—	0.308 d	—	—	0.471 c	—	—
	P1	1.092 a	72.5	—	0.809 b	162.7	—	0.951 a	101.9	—
	P2	0.652 b	3.0	−40.3	0.638 c	107.1	−21.1	0.645 b	36.9	−32.2
	P3	0.781 ab	23.4	−28.5	1.122 a	264.3	38.7	0.952 a	102.1	0.1

出苗后 40 d,介质供磷水平对小麦根系平均生物量并未产生显著影响;玉米根系生物量对介质供磷反应显著($P<0.05$),与 P0 处理相比,P1、P2 和 P3 处理的玉米根系平均生物量分别增加 38.2%,49.2%和 44.6%。

50 d 时,小麦根系平均生物量对介质供磷表现为显著正效应($P<0.05$),与 P0 处理相比,P1、P2 和 P3 处理的根系生物量分别增加 0.119,0.096 和 0.175 g/株,增长率分别为 57.2%,46.2%和 84.1%;此时玉米根系平均生物量对介质供磷的反

应强于小麦,与 P0 处理相比,P1、P2 和 P3 处理的玉米根系生物量分别增加 0.480,0.174 和 0.481 g/株,增长率分别为 101.9%,36.9%和 102.1% ($P<0.05$)。

比较不同供磷水平对作物根系生物量的影响可以发现,不同测定时期作物根系需要的最佳磷水平并不一致。与 P1 处理相比,在出苗 25 d,小麦和玉米根系平均生物量对进一步增加介质磷水平的反应不明显;出苗后 40 d,两种作物对进一步增加介质供磷水平开始表现出差异,此时玉米比小麦反应明显,小麦根系平均生物量在介质磷浓度为 0.5 mmol/L 时达到最大,而玉米在介质磷水平为 0.3 mmol/L 时达到最大;出苗后 50 d,小麦根系平均生物量仍在介质供磷水平为 0.5 mmol/L 时最大,而玉米根系平均生物量在介质供磷水平为 0.05 mmol/L 时已接近峰值,说明介质供磷水平较低,有利于促进玉米苗期后期根系的生长,而对小麦根系,则需要较高的介质供磷水平。

从同种作物不同基因型的根系生长发育来看,在介质相同供磷水平下,除出苗后 25 d 外,出苗后 40 和 50 d,小偃 22 号的根系生物量均基本高于兰考 4 号,两种小麦基因型根系与冠层生物量的表现基本一致。屯玉 65 号与户单 4 号根系生物量的差异与生长阶段有关,出苗后 25 d,在介质相同供磷水平下,户单 4 号的根系生物量略高于屯玉 65 号,而在出苗后第 40 和 50 天时,屯玉 65 号的根系生物量基本大于户单 4 号。与 P0 相比,在出苗 25 和 40 d,介质供磷后小麦根系生物量均减小,其中小偃 22 号平均下降 30.7%和 9.7%,兰考 4 号平均下降 38.7%和 2.3%;出苗 50 d,随介质供磷水平的增加,小偃 22 号和兰考 4 号的根系生物量均显著增加,分别增加 51.1%和 78.0%。与 P1 处理相比,出苗 25,40 和 50 d,小偃 22 号的根系生物量分别平均增加-2.8%,38.8%和 7.2%,兰考 4 号分别平均增加-3.9%,-16.9%和 2.9%。可见与低磷处理的 P1 相比,小偃 22 号根系对介质供磷的反应明显大于兰考 4 号。总体上,随苗期生长阶段的推进,介质供磷对小麦根系生物量的影响逐渐明显,不同基因型小麦间冠层生物量对介质供磷水平反应的差异规律性远远强于根系。对玉米根系而言,与 P0 处理相比,在 25,40 和 50 d,屯玉 65 号的根系生物量平均增加-16.4%,38.2%和 33.0%;户单 4 号平均增加 74.7%,50.8%和 178.0% ($P<0.05$)。与 P1 处理相比,在 25,40 和 50 d,屯玉 65 号的根系生物

量分别增加 32.1%,23.8%和-34.4%;户单 4 号分别增加-30.3% ($P<0.05$),-8.2% ($P>0.05$) 和 8.8% ($P<0.05$)。显然,与 P0 处理相比,户单 4 号根系生物量对介质供磷的反应强于屯玉 65 号,但与 P1 处理相比,户单 4 号和屯玉 65 号的根系生物量无规律性差异。

2.3 小麦、玉米苗期整株生物量对介质供磷水平反应的差异

表 5 和表 6 表明,两种作物整株生物量(冠层+根系)与冠层对介质供磷水平反应的规律性基本一致。从平均值可以看出,在出苗后 25 d,与 P0 相比,P1、P2 和 P3 处理小麦的整株生物量均有所降低,而玉米却分别增加 78.5%,78.5%和 49.2% ($P<0.05$)。出苗后 40 d,小麦和玉米整株生物量对介质供磷均有明显反应,此时玉米反应仍强于小麦;与 P0 处理相比,P1、P2 和 P3 处理小麦整株生物量分别增加 65.1%,66.4%和 77.7% ($P<0.05$),而玉米相应增加 125.8%,182.1%和 161.0% ($P<0.05$)。出苗 50 d 时,小麦对介质供磷的反应略强于玉米,介质供磷后,小麦整株生物量平均增幅达 2.8 倍;而玉米平均增幅为 2.2 倍。

两种作物整株生物量随介质供磷水平的增加而增大,在介质供磷水平为 0.5 mmol/L 时达到最大。与 P1 处理相比,出苗 25 d,小麦和玉米整株生物量对进一步增加介质供磷水平的反应不显著 ($P>0.05$);出苗 40 d,进一步增加介质供磷水平,小麦整株生物量反应仍不明显 ($P>0.05$),玉米整株生物量显著增加,与 P1 处理相比,P2 和 P3 处理分别增加 24.9%和 15.6%;出苗 50 d,小麦整株生物量随介质供磷水平的增加而显著增加 ($P<0.05$),而玉米的增加量相对较小。

与 P0 处理相比,出苗 25 d,小偃 22 号和兰考 4 号的整株生物量平均下降 22.5%和 9.9%。出苗 40 和 50 d,小偃 22 号平均分别增加 36.9%和 214.9%,兰考 4 号平均分别增加 123.4%和 385.7%。与 P1 处理相比,在 25,40 和 50 d,小偃 22 号整株生物量平均分别增加-3.5%,6.4%和 12.8%,兰考 4 号平均分别增加-2.7%,2.1%和 28.5%。显然,无论与 P0 处理还是与 P1 处理相比,兰考 4 号整株生物量对介质供磷水平的反应显著高于小偃 22 号。

与 P0 处理相比,出苗后 25,40 和 50 d,屯玉 65 号的整株生物量分别平均增加 0.2,1.5 和 1.3 倍;户单 4 号分别平均增加 1.3,1.6 和 3.6 倍;与 P1 处理相比,在出苗后 25,40 和 50 d,屯玉 65 号的整株

生物量分别平均增加 22.5%,36.0%和-15.3%,户单 4 号平均分别增加-21.7%,9.2%和 18.5%。说明尽管户单 4 号整株生物量普遍高于屯玉 65 号,但二者对介质供磷的反应,特别是与介质低供磷水平相比,仍缺乏规律性差异。在出苗 25 和 40 d,屯玉 65 号对介质供磷水平反应的敏感性强于户单 4

号,而在第 50 d,户单 4 号反而强于屯玉 65 号。

以上结果表明,虽然小麦不同基因型苗期生物量对介质不同供磷水平的反应程度不同,但趋势基本一致;而玉米不同基因型对磷素反应差异的规律性及基因型间的差异性不及小麦明显。

表 5 不同供磷水平对小麦苗期整株生物量的影响
Table 5 Effects of phosphorus levels on biomass of wheat

苗龄/d Day after emergence	磷水平 P level	小偃 22 号 Xiaoyan 22			兰考 4 号 Lankao 4			平均 Average		
		生物量 (g·株 ⁻¹) Biomass	较 P0 增长 比例/% Increase comparing with P0	较 P1 增长 比例/% Increase comparing with P1	生物量 (g·株 ⁻¹) Biomass	较 P0 增长 比例/ % Increase comparing with P0	较 P1 增长 比例/% Increase comparing with P1	生物量 (g·株 ⁻¹) Biomass	较 P0 增长 比例/% Increase comparing with P0	较 P1 增长 比例/% Increase comparing with P1
25	P0	0.145 a	—	—	0.144 a	—	—	0.145 a	—	—
	P1	0.115 b	—20.7	—	0.132 a	—8.3	—	0.124 b	—14.5	—
	P2	0.112 b	—22.8	—2.6	0.128 a	—11.1	—3.0	0.120 b	—17.2	—3.2
	P3	0.110 b	—24.1	—4.3	0.129 a	—10.4	—2.3	0.120 b	—17.2	—3.2
40	P0	0.473 b	—	—	0.289 b	—	—	0.381 b	—	—
	P1	0.621 a	31.3	—	0.637 a	120.4	—	0.629 a	65.1	—
	P2	0.633 a	33.8	1.9	0.635 a	119.7	—0.3	0.634 a	66.4	0.8
	P3	0.688 a	45.5	10.8	0.665 a	130.1	4.4	0.677 a	77.7	7.6
50	P0	0.550 c	—	—	0.342 c	—	—	0.446 c	—	—
	P1	1.596 b	190.2	—	1.396 b	308.2	—	1.496 b	235.4	—
	P2	1.664 b	202.6	4.3	1.755 a	413.2	25.7	1.710 a	283.4	14.3
	P3	1.936 a	252.0	21.3	1.832 a	435.7	31.2	1.884 a	322.4	25.9

表 6 不同供磷水平对玉米苗期整株生物量的影响
Table 6 Effects of phosphorus levels on biomass of maize

苗龄/d Day after emergence	磷水平 P level	屯玉 65 号 Tunyu 65			户单 4 号 Hudan 4			平均 Average		
		生物量 (g·株 ⁻¹) Biomass	较 P0 增长 比例/% Increase comparing with P0	较 P1 增长 比例/% Increase comparing with P1	生物量 (g·株 ⁻¹) Biomass	较 P0 增长 比例/ % Increase comparing with P0	较 P1 增长 比例/% Increase comparing with P1	生物量 (g·株 ⁻¹) Biomass	较 P0 增长 比例/% Increase comparing with P0	较 P1 增长 比例/% Increase comparing with P1
25	P0	0.268 b	—	—	0.224 b	—	—	0.246 b	—	—
	P1	0.267 b	−0.4	—	0.611 a	172.8	—	0.439 a	78.5	—
	P2	0.372 a	38.8	39.3	0.506 a	125.9	−17.2	0.439 a	78.5	0.0
	P3	0.282 b	5.2	5.6	0.451 a	101.3	−26.2	0.367 a	49.2	−16.4
40	P0	0.735 c	—	—	0.861 b	—	—	0.798 c	—	—
	P1	1.495 b	103.4	—	2.108 a	144.8	—	1.802 b	125.8	—
	P2	2.083 a	183.4	39.3	2.419 a	181.0	14.8	2.251 a	182.1	24.9
	P3	1.983 ab	169.8	32.6	2.182 a	153.4	3.5	2.083 ab	161.0	15.6
50	P0	1.433 c	—	—	0.906 c	—	—	1.170 c	—	—
	P1	3.697 a	158.0	—	3.704 b	308.8	—	3.701 b	216.3	—
	P2	2.887 b	101.5	−21.9	3.759 b	314.9	1.5	3.323 b	184.0	−10.2
	P3	3.375 a	135.5	−8.7	5.019 a	454.0	35.5	4.197 a	258.7	13.4

3 讨 论

磷高效植物是指在磷素营养供应不足时,能较标准或一般品种获得更多生物量或经济产量的植物,一般有两种机制:一是在缺磷土壤上能够活化较多的非有效磷供根系吸收;二是体内磷代谢效率较

高,能以少量磷维持作物同化。磷敏感品种是指某品种的产量或生物量能随施磷量增加而显著增加,反之则为磷不敏感品种^[20]。一般以供磷后增产多少为依据评价作物对磷肥的反应^[12],对苗期作物则以其生物量为标准。作物耐低磷机制复杂,在不同生育阶段对磷的需求不同,不同基因型各生育阶段

对胁迫因子的敏感程度也有不同^[20]。但总体上,大多数作物的苗期是磷素营养的敏感期和临界期,该阶段吸收的磷素大体上占全生育期的 2/3 以上^[19],后期主要为体内磷的再转移和重复利用。作物苗期对缺磷反应比较敏感。在本试验中,小麦和玉米在缺磷(P0 处理)和低磷胁迫(P1 处理)时表现出明显的缺磷症状,特别是在定植 30 d(出苗 40 d)后,P0 和 P1 处理植株矮小,叶片明显变小,小麦不发生分蘖,玉米出现叶缘、茎秆发红等症状;在中等供磷(P2 处理)下基本没有缺磷症状;而在标准供磷水平(P3 处理)时植株生长正常。因此,无论从植株冠层、根系以及整株看,还是从缺磷症状看,本研究的磷水平设计仍然能够代表介质缺磷、低磷胁迫、中等供磷及其标准(充分)供磷等模式。

本试验结果表明,小麦和玉米在苗期对介质不同供磷水平的敏感性不同,且这种敏感性因作物基因型、部位及测定时期不同而异。在苗期早期,作物冠层生长并不需要较高的介质供磷水平;而在苗期后期,磷胁迫对冠层生长会有明显影响。对根系而言,较低的介质供磷水平有利于促进玉米根系生长;而对小麦根系,则需要较高的介质供磷水平。对整株作物而言,玉米对介质供磷水平的反应敏感期比小麦早。对同一作物不同基因型而言,不同基因型小麦苗期生物量对介质不同供磷水平的反应趋势基本一致,而玉米不同基因型对磷素的反应及基因型间差异的规律性则相对较差。总体而言,介质供磷后,在苗期早期(出苗后 40 d 以前),玉米对介质磷胁迫的反应远较小麦强;而在苗期后期(即出苗后 40~50 d),尽管两种作物对磷胁迫均有明显反应,但小麦的反应又强于玉米。以上结果显示,在玉米苗期早期生长阶段,介质供磷尤为重要;而对小麦,介质供磷的效应在出苗 40 d 以后才能表现出来。同时也说明玉米对磷素的反应并不比小麦低,仅是敏感时期不同而已。

本研究仅进行了作物苗期对介质供磷反应的差异探讨,对于作物整个生长期对介质供磷反应的差异,还需作进一步研究。但由于小麦和玉米对磷素需要的关键期在苗期,因此本研究结果对理解小麦和玉米对磷素营养反应的差异,仍然具有一定的参考价值。

[参考文献]

[1] 刘建中,李振声,李继云.利用植物自身潜力提高土壤中磷的生物有效性[J].生态农业研究,1994,2(1):16-23.

Liu J Z,Li Z S,Li J Y.Utilization of plant potentialities to enhance the bio-efficiency of phosphorus in soil [J].Eco-Agriculture Research,1994,2(1):16-23. (in Chinese)

[2] 刘建中,李 滨,李继云,等.黑麦染色体组有效利用土壤潜在磷的基因的遗传分析 [J].遗传学报,1997,24(6):519-523.

Liu J Z,Li B,Li J Y,et al.Genetic study of gene effects of rye genome on characteristics of efficiently utilizing potential soil phosphorus [J].Acta Genetica Sinica,1997,24(6):519-523. (in Chinese)

[3] 李绍长,白 萍,龚 江.作物磷效率研究进展 [J].石河子大学学报:自然科学版,2002,6(3):251-254.

Li S C,Bai P,Gong J.A review of the studies on the phosphate efficiency in crop [J].Journal of Shihezi University:Natural Science Edition,2002,6(3):251-254. (in Chinese)

[4] Barber S A,Mackay. Root growth and potassium uptake by two corn genotypes in the field [J].Fert Res,1986,10:217-231.

[5] 李生秀.植物营养与肥料学科的现状与展望 [J].植物营养与肥料学报,1999,5(3):193-205.

Li S X.The current state and prospect of plant nutrition and fertilizer science [J].Plant Nutrition and Fertilizer Science,1999,5(3):193-205. (in Chinese)

[6] Gahoonia T S,Nielsen N E. Root traits as tools for creating phosphorus efficient crop varieties [J].Plant and Soil,2004,260:47-57.

[7] 鲁如坤.土壤磷素水平和水体环境保护 [J].磷肥与复肥,2003,18(1):4-7.

Lu R K.The phosphorus level of soil and environmental protection of water body [J].Phosphate and Compound Fertilizer,2003,18(1):4-7. (in Chinese)

[8] 郭程瑾,李宾兴,周彦珍,等.不同磷效率小麦品种的磷吸收特性 [J].植物遗传资源学报,2006,7(1):49-53.

Guo C J,Li B X,Zhou Y Z,et al.Characteristics of phosphorus acquisition in wheat varieties with different P efficiencies [J].Journal of Plant Genetic Resources,2006,7(1):49-53. (in Chinese)

[9] 沈 宏,施卫明,王校常,等.不同作物对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.

Shen H,Shi W M,Wang X C,et al.Study on adaptation mechanisms of different crops to low phosphorus stress [J].Plant Nutrition and Fertilizer Science,2001,7(2):172-177. (in Chinese)

[10] 陈 磊,郝明德,张少民,等.黄土高原旱地长期施肥对小麦养分吸收和土壤肥力的影响 [J].植物营养与肥料学报,2007,13(2):230-235.

Chen L,Hao M D,Zhang S M,et al.Effect of long-term application of fertilizer on wheat nutrient uptake and soil fertility in Loess Plateau [J].Plant Nutrition and Fertilizer Science,2007,13(2):230-235. (in Chinese)

[11] 刘建玲,杨福存,李仁岗.长期肥料定位试验粟钙土中磷肥在莠麦上的产量效应及行为研究 [J].植物营养与肥料学报,2006,12(2):201-207.

Liu J L, Yang F C, Li R G. The yield responses of naked of oats to phosphorus fertilizer and phosphorus behavior in chestnut soil in long-term experiment [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(2): 201-207. (in Chinese)

[12] 李生秀, 李世清. 小麦、毛苕和豌豆对磷肥的反应 [J]. 西北农业大学学报, 1992, 20(增刊): 74-78.

Li S X, Li S Q. Responses of wheat, vicia and pea to phosphate fertilizer [J]. Acta Universitatis Agriculturae Boreali-occidentalis, 1992, 20(Suppl): 74-78. (in Chinese)

[13] 刘向生, 陈范骏, 春 亮, 等. 玉米自交系耐低磷胁迫的自交系差异 [J]. 玉米科学, 2003, 11(3): 23-27.

Liu X S, Chen F J, Chun L, et al. Genotypic difference of maize inbred lines in tolerance to phosphorus deficiency [J]. Journal of Maize Sciences, 2003, 11(3): 23-27. (in Chinese)

[14] 刘存辉, 张可炜, 张举仁, 等. 低磷胁迫下磷高效玉米单交种的形态生理特性 [J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(3): 327-333.

Liu C H, Zhang K W, Zhang J R, et al. Morphological and physiological characteristics of P-efficient maize hybrid to stress of phosphorus deficiency [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(3): 327-333. (in Chinese)

[15] 邱慧珍, 张福锁. 活化钙镁磷肥对不同磷效率基因型冬小麦生长及磷效率的影响 [J]. 土壤通报, 2002, 33(4): 295-299.

Qiu H Z, Zhang F S. Effects of modified Calcium -magnesium phosphates on growth and phosphorus efficiency of winter wheat genotypes with different phosphorus efficiency [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2002, 33(4): 295-299. (in Chinese)

[16] 李慧明, 高志强, 张永清, 等. 不同基因型春小麦根系对低磷胁迫的生物学响应 [J]. 山西农业大学学报, 2006, 26(2): 138-140.

Li H M, Gao Z Q, Zhang Y Q, et al. Biological response of different spring wheat genotypes roots to low-phosphorus stress [J]. Journal of Shanxi Agricultural University, 2006, 26(2): 138-140. (in Chinese)

[17] 张丽梅, 贺立源, 龚阳敏, 等. 不同耐低磷玉米自交系生长发育特征研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(1): 56-62.

Zhang L M, He L Y, Gong Y M, et al. Characteristic of growth and development of maize inbred with different phosphorus efficiency under low-P stress [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(1): 56-62. (in Chinese)

[18] 王荣萍, 王 艳, 黄建国. 低磷胁迫对不同基因型玉米产量性状的影响 [J]. 西南农业大学学报: 自然科学版, 2004, 26(3): 715-722.

Wang R P, Wang Y, Huang J G. Effect of low-phosphorus stress on yield-contributing characters of different maize genotypes [J]. Journal of Southwest Agricultural University: Natural Science Edition, 2004, 26(3): 715-722. (in Chinese)

[19] 何念祖, 孟赐福. 植物营养原理 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1987: 125-159.

He N Z, Meng C F. Principle of plant nutrition [M]. Shanghai: Science and Technology Publishing Company, 1987: 125-159. (in Chinese)

[20] 邱化蛟, 许秀美, 冷寿慈, 等. 植物磷素利用效率 [J]. 莱阳农学院学报, 2001, 18(2): 116-120.

Qiu H J, Xu X M, Leng S C, et al. Phosphorus use efficiency of plant [J]. Journal of Laiyang agricultural college, 2001, 18(2): 116-120. (in Chinese)