

# 小麦/玉米苗期磷累积量对介质供磷水平反应的差异\*

华 瑞<sup>1,2</sup> 沈玉芳<sup>1</sup> 李世清<sup>1,2\*\*</sup> 张福锁<sup>3</sup>

(1. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室 杨凌 712100;  
2. 西北农林科技大学资源环境学院 杨凌 712100; 3. 中国农业大学资源环境学院 北京 100193)

**摘 要** 小麦和玉米苗期是磷素营养的关键期和敏感期,研究两种作物苗期对介质供磷反应,可为合理施用磷肥提供参考。试验设缺磷对照、低磷胁迫、中等磷胁迫和正常供磷( $P_2O_5$ 含量分别为 0、0.05  $mmol \cdot L^{-1}$ 、0.3  $mmol \cdot L^{-1}$ 和 0.5  $mmol \cdot L^{-1}$ ) 4种磷水平,选取小麦“小偃22号”、“兰考4号”和玉米“屯玉65号”、“户单4号”为指标作物,用营养液培养法研究小麦、玉米苗期磷累积量对介质不同供磷水平的反应差异。结果表明,不同介质供磷水平下,两种作物苗期磷累积量显著不同且因作物类型、基因型、器官及测定时期不同而异。总体而言,介质供磷后,苗期早期生长阶段(出苗后25 d以前),小麦的介质最佳供磷水平较玉米高;苗期后期(出苗后40~50 d),小麦和玉米最佳供磷水平一致。如果以低磷胁迫作为对比进行分析,玉米苗期整株磷累积量对介质供磷的敏感性比小麦强;从不同基因型来看:“兰考4号”对介质供磷的敏感性强于“小偃22号”,“屯玉65号”和“户单4号”基本一致。缺磷条件下小麦较玉米磷效率高,供磷条件下玉米较小麦高;但不同基因型间规律性较差。

**关键词** 小麦 玉米 介质供磷水平 苗期 磷累积量 磷效率

中图分类号: Q945.1; S311 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2009)03-0429-07

## Response of P accumulation in wheat and maize seedlings to different substrate P levels

HUA Rui<sup>1,2</sup>, SHEN Yu-Fang<sup>1</sup>, LI Shi-Qing<sup>1,2</sup>, ZHANG Fu-Suo<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;  
3. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract** Wheat (*Triticum aestivum* L.) and maize (*Zea mays* L.) are very sensitive to phosphorus at seedling stage. Two varieties of wheat (“Xiaoyan 22” and “Lankao 4”) and maize (“Tunyu 65” and “Hudan 4”) were grown in Hoagland solution under different phosphate concentrations [0, 0.05  $mmol (P_2O_5) \cdot L^{-1}$ , 0.3  $mmol (P_2O_5) \cdot L^{-1}$ , 0.5  $mmol (P_2O_5) \cdot L^{-1}$ ] to investigate the response of P accumulation in wheat and maize at seedling stage to P levels in substrate. The results show a significantly difference in P accumulation in two crops under different substrate P levels. Variation in P accumulation is dependent on crop genotype, organ and the measurement time. The optimal level of P in wheat substrate is higher than that in maize during early seedling stage (25 days after seed emergence). There is, however, no observable difference between the two crops during later seedling stage (40~50 days after seed emergence). When 0.05  $mmol \cdot L^{-1}$  treatment is used as the control, P accumulation in the entire plant of maize becomes more sensitive to substrate P level than in wheat. “Lankao 4” is more sensitive than “Xiaoyan 22” and there exists no observable difference between “Tunyu 65” and “Hudan 4”. P efficiency in wheat is higher than in maize under zero phosphate treatment, while the reverse is the case under phosphate treatment. There is no consistent relationship between different genotypes.

**Key words** Wheat (*Triticum aestivum* L.), Maize (*Zea mays* L.), Substrate phosphate concentration, Seedling stage, P accumulation, P efficiency

\* 国家自然科学基金项目(30571116, 30670326)和中国科学院西部之光联合学者项目(2006LH01)资助

\*\* 通讯作者: 李世清(1963~), 男, 汉族, 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  
华瑞(1973~), 女, 在读硕士, 主要进行植物磷素营养研究。E-mail: huarui504@126.com

收稿日期: 2008-02-05 接受日期: 2008-08-06

(Received Feb. 5, 2008; accepted Aug. 6, 2008)

大量研究证明<sup>[1-4]</sup>遗传特性的差异导致作物对缺磷胁迫适应机制明显不同,因此磷素利用效率也存在显著差异,这种差异不仅表现在不同植物间,而且也表现在同一植物不同基因型间。小麦和玉米是我国主要粮食作物,筛选“磷高效”种质,提高小麦、玉米对介质磷素吸收利用能力,具有重要的科学和实践意义。关于小麦和玉米对低磷胁迫的适应性反应已有大量研究<sup>[5-11]</sup>。与所谓“喜磷”的豆科作物相比,小麦对磷肥反应并不逊色<sup>[7]</sup>;玉米是对低磷敏感的作物,但对低磷胁迫反应在不同基因型间是否存在显著差异<sup>[12,13]</sup>,仍存在一定争论。过去对冬小麦、玉米磷营养的研究往往集中在相同作物不同基因型间的比较,由于生长期差异,缺乏冬小麦和玉米对磷素反应差异性的比较性研究。基于此,本研究以具有不同分蘖特性的冬小麦基因型(多分蘖品种“小偃 22 号”和少分蘖品种“兰考 4 号”)和不同产量潜力玉米基因型(高产品种“屯玉 65 号”和低产品种“户单 4 号”)为供试材料,在相同环境下通过水培试验,比较冬小麦和玉米苗期磷积累量对介质供磷水平反应的差异,以期为合理施用磷肥提供一定依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试小麦和玉米

试验以具有不同分蘖特性的冬小麦及不同产量潜力的玉米为材料,供试小麦(*Triticum aestivum* L.)品种为“小偃 22 号”和“兰考 4 号”,玉米(*Zea mays* L.)品种为“屯玉 65 号”和“户单 4 号”,“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”产量一般为 12 000 kg·hm<sup>-2</sup>,“户单 4 号”产量一般为 11 000 kg·hm<sup>-2</sup>。不同供试材料的籽粒供磷量见表 1。

表 1 不同品种小麦和玉米籽粒供磷量  
Tab. 1 P supplied by grain of different varieties of wheat and maize

作物 Crop	品种 Variety	含磷量 P content (mg·g <sup>-1</sup> )	单粒重 Grain weight (mg)	单粒供磷量 P supplied by grain (mg·grain <sup>-1</sup> )
冬小麦 Wheat	小偃 22 号 Xiaoyan 22	5.91	39.4	0.233
	兰考 4 号 Lankao 4	3.73	50.6	0.189
玉米 Maize	屯玉 65 号 Tunyu 65	3.06	306.2	0.937
	户单 4 号 Hudan 4	5.37	237.3	1.274

### 1.2 营养液

水培用营养液组分为: 5 mmol·L<sup>-1</sup> Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O、5 mmol·L<sup>-1</sup> KNO<sub>3</sub>、2 mmol·L<sup>-1</sup> MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O、1 mmol·L<sup>-1</sup> KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>、0.005 g·L<sup>-1</sup> Fe-EDTA (Na<sub>2</sub>-EDTA 和 FeSO<sub>4</sub>), 以及阿农微量元素混合液 (2.86 g·L<sup>-1</sup> H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>、1.81 g·L<sup>-1</sup> MnCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O、0.22 g·L<sup>-1</sup> ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O、0.08 g·L<sup>-1</sup> CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O、0.025 g·L<sup>-1</sup> Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O)。

### 1.3 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实验场移动式透光防雨棚内进行。为保证试验结果的可靠性和验证试验结果的重现性,试验共进行两期,1 期于 2006 年 8~10 月进行,作物生长期晴天(包括晴间多云)占 2/5,棚下温度变化在 12~21 °C; 2 期于 2007 年 3~5 月进行,作物生长期晴、阴天各占 2/5,阴雨天占 1/5,棚下温度 13~25 °C。

冬小麦种子在 0~7 °C 下春化处理 15 d 后,将饱满一致、无病虫害的供试小麦和玉米种子籽粒用体积分数 10% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 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)后,将种籽播于石英砂盘,上覆干净湿滤纸置于植物恒温智能培养箱中培养育苗,育苗设定温度 25 °C,湿度 60%,照度 0 级。每天喷适量水以保持石英砂一定湿度,待根长至 2~4 cm 时,用海绵将所选幼苗固定在带孔塑料泡沫板上后移植于盛蒸馏水的不透光培养钵中,每天换水 1 次并通气。经过 3~4 d 根系伸长达 5~7 cm 后(即 10 d 苗龄时)进行营养液培养。培养定植时选取长势一致幼苗移栽入内径 10.3 cm、深 22.0 cm、容积约 1.8 L 的灰色 PVC 盆钵中,用海绵固定植株,在移动式透光防雨棚下用配好的不同磷水平 Hoagland 营养液进行正式水培试验。玉米每钵定植 4 株,小麦定植 6 株。每天用气泵通气 2 次,每次 2 h; 培养期间,每天加去离子水补充损失水分以维持原有液面;每周更换 1 次营养液。为防止作物缺铁,隔天每盆补充 1.5 mL 0.005 g·L<sup>-1</sup> Fe-EDTA。试验设 4 种介质磷浓度(以 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 表示): 0(P0)、0.05 mmol·L<sup>-1</sup>(P1)、0.3 mmol·L<sup>-1</sup>(P2)和 0.5 mmol·L<sup>-1</sup>(P3),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不足 K<sup>+</sup>由 KCl 补充,使其 K<sup>+</sup>与标准处理中 K<sup>+</sup>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 3 次重复(相当

于3盆),进行相关指标测定。在两期试验中,冬小麦和玉米同时栽培、同时采样,以消除因试验条件不同而影响两种作物对介质供磷水平反应差异的比较。为使试验结果更加可靠,本文所列数据为两期试验结果平均值。

#### 1.4 测定项目与方法

采样时将植株按茎叶(冠层)、根系分开,在鼓风干燥恒温箱中于105℃杀青30min后,在80℃下烘干至恒重,用1/10000电子天平称重。将地上部和根系烘干、粉碎后,用浓 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮,钒钼黄比色法测定含磷量<sup>[14]</sup>。各部分含磷量与其相应干物重相乘计算磷累积量。

#### 1.5 统计方法

试验数据采用Microsoft Excel 2003和SAS8.1软件处理,同时用DUNCAN进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 小麦/玉米苗期含磷量对介质供磷水平反应的差异

植株含磷量在一定程度上能够反映介质供磷及植株从介质中获取磷的能力<sup>[15]</sup>。表2表明,介质供磷水平对作物含磷量的影响因生长期而异。出苗后25d,小麦和玉米冠层含磷量在不同介质供磷水平间存在显著差异。与P0处理相比,P1、P2和P3处理小麦冠层含磷量分别增加11.1倍、12.9倍和13.9倍,玉米分别增加2.7倍、4.6倍和4.6倍;此时期小麦冠层含磷量对介质磷水平的反应强于玉米,玉米冠层含磷量在介质供磷水平为 $0.3\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (P2)后基本稳定,小麦在 $0.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (P3)时最大。40d时,小麦、玉米冠层含磷量对介质供磷水平的反应程度相近。与P0处理相比,P1、P2和P3处理小麦冠层含磷量分别增加1.9倍、4.4倍和3.8倍,玉米分别增加1.2倍、3.9倍和5.2倍。50d时,小麦对介质供磷的反应又显著强于玉米,介质供磷后小麦冠层含磷量平均增加5.5倍,而玉米平均仅增加2.3倍。

与低磷胁迫P1相比,两作物出苗后25d、40d和50d,随介质供磷水平增加,冠层含磷量显著增加;但两种作物对介质供磷水平增加的反应存在明显差异,同种作物不同基因型对介质磷水平的反应也不尽一致。从平均值看,与P0处理相比,25d时介质供磷后,小麦“小偃22号”和“兰考4号”冠层含磷量分别平均增加12.7倍和12.4倍;40d时,“小偃22号”增加较多,平均增加4.2倍,“兰考4号”平均仅增加2.8倍;50d时,“小偃22号”和“兰考4号”均增加5.6倍。与P1处理比较,25d、40d

和50d时,介质供磷增加后“小偃22号”分别平均增加0.3倍、0.6倍和0.2倍,“兰考4号”分别平均增加0.1倍、0.9倍和1.1倍。说明与P0处理相比,“兰考4号”与“小偃22号”间缺乏规律性差异;但与P1处理相比,“兰考4号”冠层磷含量在苗后期对介质供磷的反应较“小偃22号”敏感。与P0处理相比,在25d、40d和50d时,玉米“屯玉65号”冠层含磷量分别平均增加4.6倍、4.4倍和2.7倍,“户单4号”平均分别增加3.5倍、2.6倍和1.9倍。与P1处理相比,在25d、40d和50d时,“屯玉65号”分别平均增加0.5倍、1.6倍和2.6倍,“户单4号”平均分别增加0.5倍、1.5倍和1.7倍。以上说明,与P0处理相比,“屯玉65号”对介质供磷的反应普遍高于“户单4号”;但与P1处理相比,则表现为在25d时二者相近,而在40d和50d时“屯玉65号”对介质供磷的反应高于“户单4号”。总体看“屯玉65号”冠层含磷量对介质供磷的反应高于“户单4号”。

分析介质供磷水平对两种作物苗期根系含磷量的影响可以看出,出苗后25d,小麦、玉米根系含磷量在介质不同供磷水平间存在显著差异。与P0处理相比,P1、P2和P3处理小麦根系含磷量分别增加3.1倍、4.1倍和4.4倍,玉米分别增加0.9倍、2.9倍和2.7倍。此时期玉米根系含磷量在介质供磷水平为 $0.3\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时最大,小麦则在 $0.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时最大。40d时,小麦根系含磷量对介质供磷水平的反应依然强于玉米,与P0处理相比,P1、P2和P3处理小麦根系含磷量分别增加1.8倍、5.4倍和7.3倍,玉米分别增加0.7倍、2.3倍和4.7倍,两种作物根系含磷量在介质供磷水平为 $0.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时最大。50d时,介质供磷后,小麦根系含磷量平均增加4.8倍,玉米平均增加1.4倍,均在介质供磷水平为 $0.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时最大。与P1处理相比,在25d、40d和50d时,小麦和玉米根系含磷量均随介质供磷水平增加而增加,且玉米的反应强于小麦。

从不同基因型看,在相同介质供磷水平下,与P0处理相比,25d时,供磷后“小偃22号”根系含磷量平均增加4.7倍,“兰考4号”平均增加3.1倍;40d时,“小偃22号”平均增加5.5倍,“兰考4号”平均增加4.3倍;50d时,“小偃22号”和“兰考4号”分别平均增加3.4倍和7.5倍。与P1处理比较,25d、40d和50d时,“小偃22号”分别平均增加0.4倍、2.2倍和2.4倍,“兰考4号”分别平均增加0.2倍、1.2倍和3.0倍,可见,无论与P0处理相比还是与P1处理相比,25d和40d时,“小偃22号”根系含磷量对介质供磷的反应显著高于

表 2 介质不同供磷水平下小麦/玉米苗期含磷量  
Tab.2 Effects of substrate P levels on P content in wheat and maize seedlings  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$

作物 Crop	部位 Part	苗龄 Days after emergence (d)											
		25				40				50			
		P0	P1	P2	P3	P0	P1	P2	P3	P0	P1	P2	P3
小偃 22 Xiaoyan22	冠层 Shoot	0.80c	8.97b	10.78b	12.93a	1.28d	4.80c	8.29a	7.02b	1.03b	5.86a	7.17a	7.26a
	根系 Root	1.73c	7.97b	10.63a	11.19a	1.57c	4.17c	10.97b	15.28a	2.24c	3.78c	9.77b	16.09a
兰考 4 号 Lankao 4	冠层 Shoot	0.83b	10.57a	11.70a	11.21a	1.88c	4.44b	8.88a	8.01a	0.94c	3.53b	7.67a	7.39a
	根系 Root	1.88c	6.71b	7.92a	8.32a	1.56d	4.68c	9.16b	10.88a	1.12d	3.17c	8.57b	16.82a
小麦平均 Wheat average	冠层 Shoot	0.81c	9.77b	11.24ab	12.07a	1.58d	4.62c	8.58a	7.51b	0.99c	4.69b	7.42a	7.33a
	根系 Root	1.81c	7.34b	9.27a	9.76a	1.57d	4.43c	10.07b	13.08a	1.68d	3.47c	9.17b	16.45a
屯玉 65 号 Tunyu 65	冠层 Shoot	1.39c	5.82b	8.76a	8.57a	1.06d	2.78c	6.25b	8.26a	1.34b	1.81b	5.96a	6.91a
	根系 Root	1.82c	4.46b	9.98a	8.05a	1.48c	3.18c	5.70b	8.56a	2.22c	1.49c	5.90b	9.01a
户单 4 号 Hudan4	冠层 Shoot	1.68c	5.52b	8.38a	8.53a	1.31d	2.38c	5.36b	6.55a	1.34b	1.87b	4.64a	5.30a
	根系 Root	2.70d	4.27c	7.66b	8.87a	1.96c	2.61c	5.63b	10.86a	2.17c	1.58c	5.08b	8.21a
玉米平均 Maize average	冠层 Shoot	1.54c	5.67b	8.57a	8.55a	1.19d	2.58c	5.80b	7.40a	1.34b	1.84b	5.30a	6.10a
	根系 Root	2.26c	4.36b	8.82a	8.46a	1.72c	2.90c	5.67b	9.71a	2.20c	1.53c	5.49b	8.61a

相同测定时间同行不同字母表示差异达 0.05 显著水平。下表同。The different letters in one line of one measure time indicate significant difference at the 0.05 level. The following table are the same.

“兰考 4 号”，但在苗期后期，即 50 d 时，“兰考 4 号”反应强于“小偃 22 号”。对玉米，与 P0 处理相比，“屯玉 65 号”根系含磷量平均增加 2.5 倍，“户单 4 号”平均增加 1.7 倍。与 P1 处理相比，“屯玉 65 号”和“户单 4 号”均平均增加 2.1 倍。

因此从含磷量看，无论是冠层还是根系，由于生物量差异产生的稀释效应，难以准确判断小麦和玉米苗期对介质供磷反应敏感性的差异，也无法说明同种作物不同基因型对介质供磷反应的敏感性，因此必须考虑生物量的差异。

## 2.2 小麦/玉米苗期磷积累量对介质供磷水平反应的差异

植株养分含量仅为相对值，是强度指标，其大小与植株部位生物量大小有关，一般情况下生物量高，由于稀释效应可能会导致养分含量减少。而养分积累量是二者的乘积，它将养分含量与生物量相结合，可真实反映植株不同部位养分积累的容量指标。

### 2.2.1 苗期冠层磷积累量对介质供磷水平反应的差异

不同作物磷积累量对介质供磷水平的反应与作物生长阶段有关(图 1)。从表 3 可知，出苗后 25 d, P1、P2 和 P3 处理小麦冠层磷积累量分别比 P0 增加  $69.5 \text{ mg} \cdot \text{株}^{-1}$ 、 $80.7 \text{ mg} \cdot \text{株}^{-1}$ 、 $81.7 \text{ mg} \cdot \text{株}^{-1}$ ，平均增加 10.7 倍( $P < 0.01$ )；玉米分别增加  $118.9 \text{ mg} \cdot \text{株}^{-1}$ 、 $214.0 \text{ mg} \cdot \text{株}^{-1}$ 、 $183.9 \text{ mg} \cdot \text{株}^{-1}$ ，平均增长 5.1 倍( $P < 0.05$ )；但两种作物在供磷处理间均无显著差异( $P > 0.05$ )。介质供磷水平为  $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $0.3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时，小麦和玉米冠层磷积累量分别达到峰值。

40 d 时，玉米对介质供磷的反应强于小麦。与 P0 处理相比，供磷处理小麦冠层磷积累量平均增加 8.1 倍，玉米增加 13.4 倍，差异均达极显著水平( $P < 0.01$ )；小麦冠层磷积累量在介质供磷水平为  $0.3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时基本稳定，玉米在介质供磷水平为  $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时最大。50 d 时，小麦对介质供磷的反应又显著强于玉米，介质供磷后，小麦冠层磷积累量平均增加 26.9 倍( $P < 0.01$ )，玉米冠层磷积累量平均仅增加 9.9 倍( $P < 0.01$ )。此时期依然表现为小麦冠层磷积累量在介质供磷水平为  $0.3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时最大，玉米在介质供磷水平为  $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时最大。与 P1 处理相比，两种作物对进一步增加介质供磷水平反应的差异减小，在 3 个测定时期，小麦冠层磷积累量分别平均增加 0.2 倍、1.0 倍和 1.4 倍，玉米分别平均增加 0.5 倍、2.7 倍和 1.9 倍，均表现为玉米的反应略强于小麦。以上结果表明，与无磷处理 P0 相比，苗期前期和后期小麦冠层磷积累量对介质供磷水平的反应强于玉米；而在苗期中期，玉米对介质供磷的反应又显著强于小麦；与低磷处理 P1 相比，整个测定期均表现为玉米的反应强于小麦。

同种作物不同基因型对介质供磷水平的反应也不相同(图 1)。从小麦平均值看，与 P0 处理相比，25 d 时，介质供磷后，“小偃 22 号”冠层磷积累量平均增加 9.3 倍( $P < 0.01$ )，“兰考 4 号”平均增加 12.5 倍( $P < 0.01$ )；40 d 时，“小偃 22 号”平均增加 6.4 倍( $P < 0.01$ )，“兰考 4 号”平均增加 10.7 倍( $P < 0.01$ )；50 d 时，“小偃 22 号”和“兰考 4 号”分别平均增加 18.9 倍和 44.2 倍( $P < 0.01$ )。与 P1 处理相比，25 d、

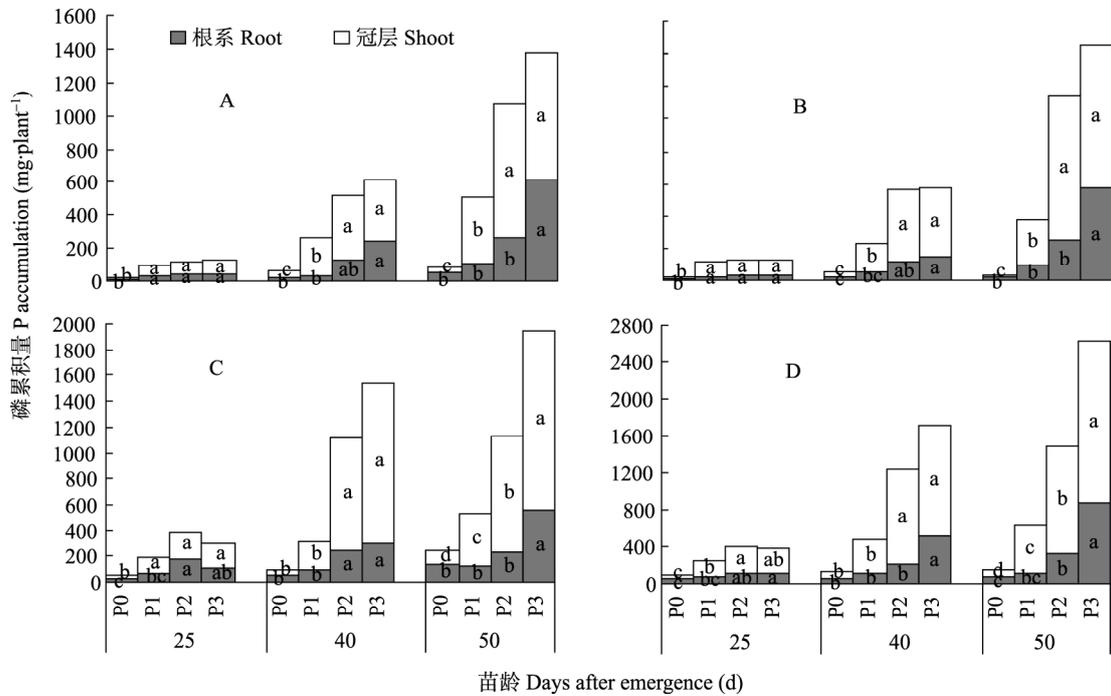


图 1 供磷水平对小麦“小偃 22 号”(A)、“兰考 4 号”(B)和玉米“屯玉 65 号”(C)、“户单 4 号”(D)苗期冠层和根系磷累积量的影响

Fig.1 Effects of substrate P levels on P accumulation of shoot and root in seedlings of wheat cultivars “Xiaoyan 22”(A), “Lankao 4”(B) and maize cultivars “Tunyu 65”(C), “Hudan 4”(D)

表 3 介质不同供磷水平对小麦/玉米苗期磷累积量影响的差异  
Tab.3 Effects of substrate P levels on P accumulation of wheat and maize seedlings

作物 Crop	部位 Part	苗龄 Days after emergence (d)											
		25				40				50			
		P0	P1	P2	P3	P0	P1	P2	P3	P0	P1	P2	P3
小麦 Wheat	冠层 Shoot	7.2b	76.7a	87.9a	88.9a	37.3c	202.2b	417.8a	398.8a	23.9c	340.6b	843.6a	816.6a
	根系 Root	10.2b	26.0a	33.4a	37.6a	19.8c	41.5bc	124.5ab	195.0a	36.4d	99.4c	259.1b	599.2a
	整株 Plant	17.4b	102.7a	121.3a	126.5a	57.1c	243.7b	542.3a	593.8a	60.3d	440.0c	1 102.7b	1 415.8a
玉米 Maize	冠层 Shoot	33.7b	152.6ab	247.7a	217.6a	56.9d	293.3c	942.8b	1 223.0a	93.4c	455.3c	1 033.7b	1 572.6a
	根系 Root	42.4c	69.3bc	141.6a	114.7ab	55.9b	100.4b	228.9ab	409.5a	103.4b	119.8b	277.4b	715.6a
	整株 Plant	76.1c	221.9b	389.3a	332.3a	112.8d	393.7c	1 171.7b	1 632.5a	196.8c	575.1bc	1 311.1b	2 288.2a

40 d 和 50 d 时, “小偃 22 号”平均磷累积量分别增加 28.3%、66.0%和 96.1%, “兰考 4 号”平均分别增加 5.7%、148.3%和 210.4%。从玉米平均值看, 与 P0 处理相比, 25 d、40 d 和 50 d 时“屯玉 65 号”冠层磷累积量分别平均增加 6.1 倍、17.7 倍和 7.4 倍 ( $P < 0.01$ ), “户单 4 号”分别平均增加 4.6 倍、11.0 倍和 13.3 倍 ( $P < 0.01$ ); 与 P1 处理相比, 25 d、40 d 和 50 d 时“屯玉 65 号”分别平均增加 0.6 倍、3.8 倍和 1.8 倍, “户单 4 号”分别平均增加 0.5 倍、2.0 倍和 1.9 倍。可见, 无论与 P0 处理相比, 还是与 P1 处理相比, “兰考 4 号”冠层磷累积量对介质供磷的反应显著高于“小偃 22 号”, 而“屯玉 65 号”和“户单 4 号”冠层磷累积量的反应总体上一致。

### 2.2.2 苗期根系磷累积量对介质供磷水平反应的差异

图 1 表明, 两种作物苗期根系磷累积量对介质供磷水平的反应依然受生长期影响。从平均值看(表 3), 出苗后 25 d, 小麦根系磷累积量在无磷与供磷处理间存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 但供磷处理间差异不显著 ( $P > 0.05$ ); 而玉米根系磷累积量在供磷处理间表现出明显差异 ( $P < 0.05$ ); 介质供磷水平为  $0.3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时玉米根系磷累积量最大, 介质供磷水平为  $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时小麦根系磷累积量最大。40 d 时, 小麦和玉米根系磷累积量在不同供磷水平间均存在显著差异, 与 P0 处理相比, P1、P2 和 P3 处理小麦根系磷累积量分别增加 1.1 倍 ( $P > 0.05$ )、5.3 倍 ( $P < 0.05$ ) 和 8.9 倍 ( $P < 0.05$ ); 玉米根系磷累积量分别增

加 0.8 倍 ( $P > 0.05$ )、3.1 倍 ( $P > 0.05$ ) 和 6.3 倍 ( $P < 0.05$ )，两种作物根系磷累积量均随介质供磷水平提高而增加，在介质供磷水平为  $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时最大。50 d 时，小麦和玉米根系磷累积量在供磷后分别平均增加 7.8 倍和 2.6 倍，且根系磷累积量均以介质供磷  $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时最大。可见，与 P0 处理相比，3 个测定期小麦根系磷累积量对介质不同供磷水平的反应均强于玉米。但与 P1 处理相比，二者缺乏规律性差异。

同种作物不同基因型根系磷累积量对介质供磷的反应亦不同(图 1)。从小麦平均值看，与 P0 处理相比，25 d 时供磷后“小偃 22 号”根系磷累积量增加 3.1 倍 ( $P < 0.01$ )，“兰考 4 号”平均增加 1.5 倍 ( $P < 0.05$ )。40 d 时“小偃 22 号”平均增加 6.0 倍，“兰考 4 号”平均增加 4.2 倍。50 d 时，“小偃 22 号”增长 5.3 倍，“兰考 4 号”增长达 14.1 倍。与 P1 处理比较，25 d、40 d 和 50 d 时，“小偃 22 号”分别平均增加 0.5 倍、4.8 倍和 3.1 倍，“兰考 4 号”分别平均增加 0.2 倍、1.6 倍和 3.6 倍。可见，无论与

P0 处理相比，还是与 P1 处理相比，25 d 和 40 d 时，“小偃 22 号”对介质供磷的反应显著高于“兰考 4 号”；但在 50 d 时，“兰考 4 号”反而高于“小偃 22 号”。对玉米，与 P0 处理相比，在 25 d、40 d 和 50 d 时，“屯玉 65 号”根系磷累积量分别平均增加 2.5 倍、3.2 倍和 1.2 倍；“户单 4 号”分别平均增加 1.0 倍、3.6 倍和 5.6 倍。与 P1 处理相比，在 25 d、40 d 和 50 d 时，“屯玉 65 号”分别平均增加 1.2 倍、1.9 倍和 2.2 倍；“户单 4 号”分别平均增加 0.6 倍、2.4 倍和 4.1 倍。说明 25 d 时“屯玉 65 号”对介质供磷的反应显著高于“户单 4 号”；而在 40 d 和 50 d 时“户单 4 号”则高于“屯玉 65 号”。

### 2.2.3 苗期整株磷累积量对介质供磷水平反应的差异

介质不同供磷水平下小麦/玉米苗期不同基因型整株生物量、磷累积量及磷效率见表 4。从小麦生物量来看，无论与 P0 处理还是与 P1 处理相比，苗期中后期“兰考 4 号”整株生物量对介质供磷的反应显著高于“小偃 22 号”；但对玉米来说，不同基

表 4 不同供磷水平对小麦/玉米苗期不同基因型整株生物量、磷累积量及磷效率的影响  
Tab.4 Effects of substrate P levels on biomass, P accumulation and P efficiency of wheat and maize seedlings

项目 Item	品种 Variety	苗龄 Days after emergence (d)												
		25				40				50				
		P0	P1	P2	P3	P0	P1	P2	P3	P0	P1	P2	P3	
生物量 Biomass ( $\text{mg} \cdot \text{plant}^{-1}$ )	小偃 22 Xiaoyan22	145.0	115.0	112.0	110.0	473.0	621.0	633.0	688.0	550.0	1 596.0	1 664.0	1 936.0	
	兰考 4 号 Lankao 4	144.0	132.0	128.0	129.0	289.0	637.0	635.0	665.0	342.0	1 396.0	1 755.0	1 832.0	
	小麦平均 Average	144.5	123.5	120.0	119.5	381.0	629.0	634.0	676.5	446.0	1 496.0	1 709.5	1 884.0	
	屯玉 65 号 Tunyu 65	268.0	267.0	372.0	282.0	735.0	1 495.0	2 083.0	1 983.0	1 433.0	3 697.0	2 887.0	3 375.0	
	户单 4 号 Hudan4	224.0	611.0	506.0	451.0	861.0	2 108.0	2 419.0	2 182.0	906.0	3 704.0	3 759.0	5 019.0	
	玉米平均 Average	246.0	439.0	439.0	366.5	798.0	1 801.5	2 251.0	2 082.5	1 169.5	3 700.5	3 323.0	4 197.0	
	磷累积量 P accumulation ( $\text{mg} \cdot \text{plant}^{-1}$ )	小偃 22 Xiaoyan22	16.3	91.8	119.2	128.5	64.0	260.2	517.8	612.7	85.1	505.2	1 068.7	1 377.6
		兰考 4 号 Lankao 4	18.4	113.6	123.3	124.6	50.2	227.3	566.7	574.8	35.4	374.8	1 136.7	1 454.0
		小麦平均 Average	17.4	102.7	121.3	126.6	57.1	243.8	542.3	593.8	60.3	440.0	1 102.7	1 415.8
		屯玉 65 号 Tunyu 65	57.6	190.4	379.0	293.0	92.3	314.7	1 113.0	1 543.6	247.1	526.4	1 129.8	1 947.3
户单 4 号 Hudan4		94.6	253.3	399.7	371.5	133.3	472.9	1 230.5	1 721.4	146.5	623.7	1 492.3	2 629.1	
玉米平均 Average		76.1	221.9	389.4	332.3	112.8	393.8	1 171.8	1 632.5	196.8	575.1	1 311.1	2 288.2	
磷效率 P efficiency		小偃 22 Xiaoyan22	8.9	1.3	0.9	0.9	7.4	2.4	1.2	1.1	6.5	3.2	1.6	1.4
		兰考 4 号 Lankao 4	7.8	1.2	1.0	1.0	5.8	2.8	1.1	1.2	10.0	3.7	1.5	1.3
		小麦平均 Average	8.4	1.2	1.0	0.9	6.6	2.6	1.2	1.1	8.1	3.4	1.6	1.3
		屯玉 65 号 Tunyu 65	4.7	1.4	1.0	1.0	8.0	4.8	1.9	1.3	5.8	7.0	2.6	1.7
	户单 4 号 Hudan4	2.4	2.4	1.3	1.2	6.5	4.5	2.0	1.3	6.2	5.9	2.5	1.9	
	玉米平均 Average	2.4	2.4	1.3	1.2	6.5	4.5	2.0	1.3	6.2	5.9	2.5	1.9	

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。整株(冠层+根系)磷累积量是根系对磷素吸收和转移的综合结果,最能说明作物对介质供磷反应的差异。表4表明,两种作物整株磷累积量对介质供磷水平的反应与冠层对介质供磷反应规律类似。与P1处理相比,两种作物整株磷累积量对介质供磷反应及规律性较好,在整个测定期内均表现为玉米强于小麦;与P0处理相比,小麦又大于玉米。同种作物不同基因型对介质供磷水平反应综合评价,“兰考4号”对介质供磷的敏感性较“小偃22号”强,玉米两基因型对介质供磷的敏感性基本一致。磷效率计算结果表明,缺磷条件下,小麦磷效率较玉米高;但在供磷条件下玉米磷效率均较小麦高。

### 3 讨论

反映植物营养状况和养分需要量的植物组织中养分含量与养分积累量,与介质养分供应直接相关<sup>[16]</sup>。缺磷条件下,植物磷高效特征表现为对磷素的高效吸收和利用<sup>[17]</sup>。作物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磷胁迫的敏感程度也不同。但总体上,大多数作物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占全生育期2/3以上,后期主要为体内磷的再转移和重复利用。增加介质供磷量,植株含磷量增加。研究表明,苗期小麦和玉米在不同介质供磷水平时的磷累积量不同,且磷累积量因作物基因型、器官及测定时期不同而异。在不同阶段,它们对介质最佳磷浓度需求不同。在苗期早期(出苗后25d以前),小麦对介质磷的最佳需要量较玉米高,在苗期后期(出苗后40~50d),小麦和玉米的最佳需磷量一致。与低磷胁迫相比,小麦和玉米整株磷累积量对介质供磷水平反应规律性较好,在整个测定期内均表现为玉米强于小麦;与P0处理相比,小麦又大于玉米;揭示了当介质供应一定磷时,如果进一步增加供磷水平,更有利于玉米对磷的累积;而当介质完全缺磷时,小麦对介质供磷的反应更加敏感。产生这种现象的原因可能在于玉米籽粒能够提供较多的磷营养(表1)。从生产实际考虑,以P1处理作为对照进行比较更加科学(因为作物不可能生长在完全无磷环境中)。同时研究结果也表明,不同作物或者相同作物的不同基因型,对介质供磷的反应也会因测定时期不同而出现差异,因此在研究作物,特别是苗期对介质供磷反应时,需考虑不同测定时期,通过对几次测定结果的综合分析予以判断,如果仅靠1

次测定数据,可能会获得完全不同的结果;同时也揭示了如果比较的基础不同(如缺磷或者低磷胁迫),所获得的结果也会不同。

本研究仅进行了作物苗期对介质供磷反应的差异探讨,对整个生长期的影响还需进一步研究。由于小麦和玉米对磷素需要的关键期在苗期,因此,对理解这两种作物对磷素营养反应的差异,仍具有一定参考价值。

### 参考文献

- [1] 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
- [2] 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
- [3] 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
- [4] 石秋梅, 林文雄, 陈芳育, 等. 水稻苗期耐低磷基因型差异研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(1): 36-39
- [5] 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
- [6] 刘建玲, 杨福存, 李仁岗. 长期肥料定位试验栗钙土中磷肥在莜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
- [7] 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(S): 74-78
- [8] 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
- [9] 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
- [10] 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
- [11] 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
- [12] 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
- [13] 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
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 268-270
- [15] Baker D. E., Jarrell A. E., Marshall L. E., et al. Phosphorus uptake from soils by corn hybrids selected for high and low phosphorus accumulation [J]. Agron. J., 1970, 62: 103-106
- [16] Silva A. E. D., Gabelman W. H. Screening maize inbred lines for tolerance to low-P stress condition [J]. Plant and Soil, 1992, 146: 181-187
- [17] 王艳, 李晓林. 不同基因型植物低磷胁迫适应机理的研究进展[J]. 生态农业研究, 2000, 8(4): 34-36