

磷、锌供应对小麦、黑麦生长及养分吸收和分配的影响

杨习文,田霄鸿,陆欣春,曹玉贤,郭陶静,李 婕

(西北农林科技大学 资源环境学院,农业部黄土高原农业资源与环境修复重点开放实验室,陕西 杨凌 712100)

【摘要】【目的】探讨供 P 和 Zn 对小麦与黑麦 P—Zn 关系以及小麦籽粒中锌与植酸含量的影响,为通过农艺措施提高小麦籽粒 Zn 含量及其生物有效性提供理论依据。【方法】在螯合-缓冲营养液中分别添加 0.1、0.6、3.0、6.0 mmol/L P 及 0、3.0 μ mol/L Zn,采用营养液培养方法对小麦和黑麦进行了培养试验,分别在培养 72 和 45 d 收获小麦、黑麦,测定根部与地上部的干质量、P、Zn 含量以及小麦籽粒的植酸含量,研究 P 及 Zn 对小麦、黑麦生长及养分吸收、分配的影响。【结果】供 Zn 后,小麦籽粒 Zn 含量、Zn 吸收量分别是不供 Zn 处理的 2.74 和 3.64 倍,植酸含量及植酸与 Zn 物质的量比分别降低了 9.64% 和 68.19%,供 Zn 还增加了小麦籽粒干质量,提高了小麦籽粒中的 P 含量,促进了 P 向籽粒中转运,同时也提高了籽粒中 Zn 的分配率;供 Zn 与否对小麦生长和黑麦地上部生长没有显著影响,但供 Zn 显著抑制了黑麦根部的生长。小麦、黑麦根部存在明显的 P-Zn 拮抗作用,但在相同环境中,黑麦根部对 Zn 的摄取能力明显较小麦强。小麦籽粒中植酸含量随着 P 供应浓度的增大而增加;过量供 P 抑制了小麦和黑麦对 Zn 的吸收,阻碍了 Zn 向小麦籽粒中转运;小麦籽粒中 P 的分配率随着 P 供应浓度的增加而降低;过量供 P 明显抑制了小麦和黑麦的生长,苗期时黑麦根部所受影响较地上部明显,小麦成熟时地上部所受影响较明显,与根部和地上部相比,籽粒所受影响最为强烈。【结论】供 Zn 增加了小麦籽粒干质量及 P、Zn 含量,降低了植酸含量,提高了 Zn 的生物有效性。P-Zn 拮抗作用主要在小麦和黑麦根部发生,黑麦对 Zn 的吸收能力明显强于小麦,过量供 P 降低了小麦和黑麦对 Zn 的吸收量及 P、Zn 在小麦籽粒中的分配率。

【关键词】 小麦;黑麦;P;Zn;植酸;养分吸收;养分分配

【中图分类号】 S512.1⁺1;S512.5

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2010)10-0089-09

Effect of phosphorus and zinc application on growth and nutrients uptake and distribution of wheat and rye

YANG Xi-wen, TIAN Xiao-hong, LU Xin-chun,

CAO Yu-xian, GUO Tao-jing, LI jie

(College of Resources and Environment, Key Lab for Agricultural Resources and Environmental Remediation in Loess Plateau of Agriculture Ministry of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】In order to offer some theory to improve Zn concentration and its bioavailability of wheat grain through agronomy approach, the effects of Zn and P fertilization on the relationship of P and Zn of wheat and rye and on the concentration of phytic acid of wheat grain were investigated. 【Method】A culture experiment was conducted in chelater-buffered solution which was added 0.1, 0.6, 3.0, 6.0 mmol/L P and 0, 3.0 μ mol/L Zn; wheat and rye were harvested after 72 and 45 d, respectively; the dry weight and P and Zn concentration of roots and shoots of wheat and ray were investigated, and also the concentration of phytic acid of wheat grain was determined, the effects of P and Zn on the growth and nutrients uptake and

* [收稿日期] 2010-03-09

[基金项目] 国家自然科学基金重点项目(30230230);教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-06-0866)

[作者简介] 杨习文(1975—),男,湖南岳阳人,在读博士,主要从事植物营养调控研究。E-mail: yangxwemail@163.com

[通信作者] 田霄鸿(1967—),男,甘肃天水人,教授,博士,主要从事植物营养调控及循环农业研究。E-mail: txhong@hotmail.com

distribution of wheat and rye were studied. 【Result】 When supplying with Zn, the Zn concentration and content of wheat grain were 2.74 and 3.64 times to that of no Zn supplying, respectively. The concentration of phytic acid and the molar ratio of phytic acid to Zn of wheat grain decreased by 9.64% and 68.19% under Zn supply compared with no Zn supplying, respectively; In addition, the dry weight of wheat grain increased under Zn supplying, so did the concentration of P. The translocation of P and Zn to wheat grain also increased with Zn supplying; There were no significant effects of Zn supplying on the growth of wheat and the shoot of rye, but the roots of rye were affected by Zn application; There was obvious P-Zn antagonism in roots of wheat and rye, but the capacity of uptake to Zn of rye was much stronger than wheat in the same condition; The uptake of Zn to wheat and rye was depressed under excessive P supplying, and the translocation of Zn to wheat grain was inhibited too. Moreover, the apportionment ratio of P decreased with the elevation of P supply. The growth of wheat and ray were restrained obviously by excessive P supplying, and these phenomemons were observed mainly on the root of ray seedling and the shoot of mature wheat, especially on the wheat grain. 【Conclusion】 The dry weight and the concentration of P and Zn of wheat grain increased under Zn supplying, but the phytic acid concentration decreased, so the Zn bioavailability was improved. The P-Zn antagonism occurred mainly in the root of wheat and ray; and ray had stronger capacity to uptake compared with wheat; the Zn uptake of wheat and rye decreased under the condition of excessive P application, so did the concentration of Zn and P.

Key words: wheat; rye; P; Zn; phytic acid; nutrient uptake; nutrient distribution

农作物生长发育过程中对养分的需求存在着动态平衡,这种平衡涉及到大量元素与微量元素之间的关系。由于磷肥当季平均利用率不足 20%^[1-2],为了获得高产,人们逐年加大磷肥的投入,这一方面造成资源浪费,加大环境风险,如从 1980 年到 2003 年,我国主要农田土壤累积磷盈余约为 392 kg/hm²^[3];另一方面影响了农作物对 Zn 等微量元素的吸收。目前,全世界约有 50% 种植禾谷类作物的土壤中有有效 Zn 含量较低^[4-5],在我国约有 40% 的土壤缺 Zn^[6]。近年来,微肥使用已被高度重视^[7],其中 Zn 肥已被人们逐渐认识和普遍使用。众所周知,P、Zn 之间的关系非常复杂,二者使用不当除引起环境污染外,还会造成农作物减产,同时会降低粮食作物可食部分的 Zn 含量。植酸是粮食作物籽粒中 P 的主要储存形式,占全 P 的 65%~85%^[8],植酸含量高低会直接影响人体对 Zn 的吸收。因此,粮食作物籽粒中植酸和 Zn 含量与其品质有关,这些品质最终会通过食物链直接或间接影响到以粮食作物为主要锌营养来源的人群的健康,对欠发达地区的妇女和儿童的影响尤其值得关注^[9-10]。因此,重视粮食作物中 P 与 Zn 的关系以及籽粒中 Zn 和植酸含量的研究,对于合理施肥和提高粮食作物品质,以及农业可持续发展均具有重要的现实意义。

P 和 Zn 在作物生长过程中具有特殊的生理功效,其中 P 是核酸的构成成分,在生殖生长中发挥关

键作用;Zn 既是蛋白质合成的关键元素,又是调节作物发育的生长素成分^[11],P 和 Zn 在土壤中和植物体内均存在着较为复杂的相互关系。国内外研究者在作物 P—Zn 关系上做了大量研究,施 P 过量会引起作物缺 Zn,而且加大施 P 量或者提高营养液中 P 的供应浓度会加剧作物缺 Zn 症状^[12]。此外,缺 Zn 也会引起 P 中毒,对于单子叶禾本科植物,供 Zn 不足可导致植物组织 P 含量增加,甚至引起 P 中毒^[13];而高浓度 P 处理使细胞质中的 Zn 含量降低,抑制 Zn 由根系向地上部的转运,且叶片中大部分 Zn 被结合在细胞壁中^[14-15]。还有研究者报道,小麦籽粒中 P、Zn 之间存在着明显的正相关,籽粒中的 P 和 Zn 含量受多组基因控制^[16]。

本研究以小麦和黑麦为材料,研究了 P、Zn 供应对其 P—Zn 关系以及小麦籽粒中植酸含量的影响,以期通过农艺措施提高小麦籽粒中 Zn 的生物有效性提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

营养液培养试验于 2008-03-06 在西北农林科技大学资源环境学院水培室中进行。供试材料为小麦(郑麦 9023)和黑麦(冬牧 70)。试验中 P 设 4 个水平:0.1 mmol/L(P1)、0.6 mmol/L(P2,正常供 P)、3.0 mmol/L(P3)、6.0 mmol/L(P4),Zn 设 2 个

水平:0 $\mu\text{mol/L}$ (Zn1)和 3.0 $\mu\text{mol/L}$ (Zn2);采用完全设计,共 8 个处理,重复 3 次。试验采用螯合-缓冲营养液,基本配方^[17]为:KNO₃ 1 500 $\mu\text{mol/L}$, Ca(NO₃)₂ · 4H₂O 1 000 $\mu\text{mol/L}$,MgSO₄ · 7H₂O 250 $\mu\text{mol/L}$, H₃BO₃ 12.5 $\mu\text{mol/L}$, C₆H₅O₇Fe · 5H₂O 30 $\mu\text{mol/L}$, H₆Mo₇O₂₄ 0.1 $\mu\text{mol/L}$, CuSO₄ · 5H₂O 2.8 $\mu\text{mol/L}$, MnSO₄ · H₂O 3 $\mu\text{mol/L}$, NiCl₆ · 6H₂O 0.1 $\mu\text{mol/L}$, MES 2 000 $\mu\text{mol/L}$, K₃-HEDTA 50 $\mu\text{mol/L}$, P、Zn 分别以 KH₂PO₄ 和 ZnSO₄ · 7H₂O 的形式,按照试验设计的用量加入营养液中。

1.2 试验方法

将精选后的小麦和黑麦种子,分别在 55 ℃温水中浸泡 15 min,将浸泡后的种子用体积分数 3% H₂O₂ 溶液消毒 10 min,然后用蒸馏水洗去残留在种子表面的 H₂O₂,再将种子放入蒸馏水中,在室温下浸泡 3 h。将蒸馏水浸泡后的种子平铺在放有纱布的塑料盘中,用蒸馏水喷湿纱布以保证适宜的水分条件,室内避光保存。待小麦萌芽后,再用湿纱布盖住塑料盘,移入冰柜中,在 2 ℃下人工春化 20 d,春化完成后进行砂培,待小麦长到 2 叶期时,选择长势、大小一致的幼苗移栽于试盆中,试盆采用体积 1.2 L 的塑料桶(内盛 1 L 的营养液),用塑料泡沫板做试盆的盖子,上有 4 个小孔,其中 3 个孔每孔用棉花固定 1 株小麦幼苗,另外 1 个小孔用于通气。小麦幼苗移栽后,先用 1/2 螯合-缓冲营养液培养 5 d,再用螯合-缓冲全营养液培养 10 d,2008-04-08 开始进行 P、Zn 处理,每隔 3 d 更换 1 次营养液,每天采用自动通气装置充气 10 h。

表 1 P、Zn 供应对小麦、黑麦不同生长期干物质积累的影响

Table 1 Effects of supplying P and Zn on the accumulation of dry matter of wheat and rye						g/盆
因素 Factor	小麦 Wheat			黑麦 Rye		
	根 Root	地上部 Shoot	籽粒 Grain	根 Root	地上部 Shoot	
P1	2.32 b	23.49 a	7.53 a	2.97 a	12.63 b	
P2	2.50 ab	20.90 b	4.50 b	2.93 a	13.92 a	
P3	2.41 ab	16.25 c	2.29 c	2.23 b	13.73 ab	
P4	2.83 a	12.45 d	0.82 d	1.79 c	9.98 c	
Zn1	2.65 a	17.69 a	3.35 b	2.95 a	12.98 a	
Zn2	2.38 a	18.85 a	4.22 a	2.01 b	12.15 a	
P	2.53	4.19	138.73**	29.96**	18.38**	
Zn	3.66	0.23	12.13**	82.34**	3.90	
P×Zn	5.93**	11.63**	1.51	3.23	3.59*	

注:多重比较分别在同列中 4 个磷水平或 2 个锌水平间进行,同列数据后标不同字母者表示差异显著 ($P<0.05$);“*”和“**”表示差异显著水平分别为 5%和 1%。表中后 3 行分别表示 P、Zn 以及 P 与 Zn 交互作用的 F 值。下表同。

Note:The multiple comparisons were conducted among different levels of zinc and phosphorus supply within the same column,respectively the different letters within each column indicate significantly difference at 5 % level. “*”and “**” indicate the significance of 5% and 1%, respectively;The last 3 rows in the table indicated F value of P and Zn and interaction of P and Zn. The same as following tables.

从表 1 可以看出,小麦成熟(处理 72 d)时,与正常供 P(P2)相比,过量供 P 对根部生长无明显影响,但地上部(包含籽粒)干质量随 P 供应浓度的增加而显著减少,其中 P4 处理地上部干质量较正常供 P 时下降 40.00%,籽粒干质量则下降 81.78%。黑麦处理 45 d 后,与正常供 P(P2)相比,根和地上部干质量均随供 P 浓度的增加而减少,其中 P4 处理根和地上部的干质量比正常供 P 处理分别下降了 38.91%和 25.08%。可知过量供 P 明显抑制了小麦和黑麦的生长,在苗期时黑麦根部所受影响较地上部明显,但小麦成熟主要表现在地上部,且籽粒受影响最显著。从供 Zn 情况看,在小麦成熟(72 d)和黑麦处理 45 d 后,供 Zn 与否对小麦生长和黑麦地上部生长没有显著影响,但 Zn 的供应显著增加了小麦籽粒的干质量,可见供 Zn 促进了小麦籽粒干物质的积累。

从表 1 还可知,小麦成熟时,明显受 P、Zn 交互作用(P×Zn)的影响,且地上部所受影响更显著;黑麦培养 45 d 后,其生长受 P、Zn 交互作用的影响相对较小,小麦、黑麦之间的这种差异可能与二者的遗传特性及 Zn 效率有关。

2.2 P、Zn 供应对小麦和黑麦 P 营养状况的影响

表 2 表明,随着 P 供应浓度的增加,小麦和黑麦各部位 P 含量均随之增加;小麦成熟时(处理 72 d),与不供 Zn 相比,供 Zn 后,根部 P 含量显著降低了 17.27%,但整个地上部 P 含量变化不显著,而籽粒

中的 P 浓度却增加了 8.28%;黑麦处理 45 d 后,与不供 Zn 相比,供 Zn 后根部 P 含量下降了 11.76%,而地上部 P 含量没有显著变化。可见,无论小麦还是黑麦,供 Zn 均显著降低了二者根部的 P 含量,且小麦反应更为强烈,但供 Zn 显著增加了小麦籽粒的 P 含量。

表 2 还表明,在 P 吸收量上,随着 P 供应浓度的增加,小麦和黑麦根部和整个地上部的 P 吸收量也随之增加,但在小麦成熟时(72 d),其籽粒 P 吸收量随 P 浓度的增加而减少,可见过量供 P 阻碍了 P 向小麦籽粒中的转运。与不供 Zn 相比,供 Zn 后黑麦根和地上部 P 吸收量分别下降 41.20%和 12.50%,而小麦供 Zn 后,根和地上部 P 吸收量分别下降了 23.88%和 23.05%,但籽粒中 P 吸收量增加了 34.90%。可见供 Zn 抑制了小麦和黑麦对 P 的吸收,而黑麦在苗期根部所受抑制程度较地上部更为显著;但 Zn 的供应促进了 P 向小麦籽粒的转运。

从表 2 还可以看出,P、Zn 供应均影响了小麦和黑麦的 P 含量,但供 P 本身起决定性作用;P、Zn 交互作用主要影响了小麦和黑麦根部的 P 含量。在对 P 吸收量的影响中,对于小麦,P 的作用明显大于 Zn;对于黑麦,其根部受 Zn 的影响较大,而地上部则受 P 的影响更大。小麦 P 的吸收明显受到 P、Zn 交互作用的影响;而对于黑麦,P、Zn 交互作用主要影响根部对 P 的吸收。

表 2 P、Zn 供应对小麦和黑麦 P 含量及 P 吸收量的影响

Table 2 Effects of supplying P and Zn on the concentration and content of P of wheat and rye

因素 Factor	P 含量/(mg·g ⁻¹) Concentration					P 吸收量/(mg·盆 ⁻¹) Content				
	小麦 Wheat			黑麦 Rye		小麦 Wheat			黑麦 Rye	
	根 Root	地上部 Shoot	籽粒 Grain	根 Root	地上部 Shoot	根 Root	地上部 Shoot	籽粒 Grain	根 Root	地上部 Shoot
P1	0.62 d	0.79 d	1.30 b	1.02 d	0.81 d	1.42 d	18.17 d	9.67 a	2.96 b	10.16 c
P2	3.50 c	1.44 c	1.42 b	2.51 c	1.86 c	8.58 c	29.79 c	6.43 b	7.28 a	25.72 b
P3	4.82 b	2.24 b	1.45 b	3.73 b	3.06 b	11.70 b	36.25 b	3.37 c	8.44 a	42.07 a
P4	5.24 a	3.56 a	1.88 a	4.26 a	4.04 a	14.81 a	45.25 a	1.53 d	8.22 a	40.59 a
Zn1	3.88 b	2.22 a	1.45 b	3.06 a	2.48 a	9.13 a	36.58 a	4.47 b	8.47 a	31.61 a
Zn2	3.21 a	1.80 a	1.57 a	2.70 b	2.40 a	6.95 b	28.15 b	6.03 a	4.98 b	27.66 a
P	248.08**	216.06**	20.80**	214.57**	148.91**	89.89**	2.78	217.25**	38.83**	61.17**
Zn	25.40**	26.73**	4.96*	14.03**	0.41	0.00	1.52	41.74**	72.36**	4.28
P×Zn	10.72**	3.90*	0.84*	22.17**	1.24	15.34**	18.33**	3.25	22.79**	2.32

2.3 P、Zn 供应对小麦与黑麦 Zn 营养状况的影响

表 3 表明,在小麦成熟时(72 d)和黑麦生长 45 d 后,与正常供 P(0.6 mmol/L)相比,在 P4 处理时二者根部 Zn 含量分别下降了 49.28%和 29.23%,而其地上部 Zn 含量则显著增加。与不供 Zn 相比,供 Zn 后,小麦成熟时根部、地上部及籽粒的 Zn 含

量分别增加了 113.62%,186.33%和 174.06%,黑麦处理 45 d 后根部、地上部 Zn 含量分别增加了 119.05%和 71.93%。可见,供 Zn 明显提高了小麦和黑麦植株的 Zn 含量,过量供磷明显降低了小麦和黑麦根部的 Zn 含量。

表 3 还表明,在小麦成熟时和黑麦生长 45 d 以

后,与正常供 P 相比,P4 处理小麦根部、地上部以及籽粒的 Zn 吸收量分别下降 43.83%,24.17% 和 75.38%,黑麦根部、地上部分别下降 60.56% 和 18.81%。可见,过量供 P 抑制了小麦和黑麦对 Zn 的吸收,其中对二者根部 Zn 吸收影响较强烈,同时过量的 P 也阻碍了小麦植株体内 Zn 向籽粒中转运。与不供 Zn 相比,供 Zn 后,小麦成熟时根部、地上部以及籽粒中 Zn 吸收量分别增加了 137.85%,187.26% 和 264.26%;黑麦在处理 45 d 后根部和地上部 Zn 吸收量分别增加 48.08% 和 61.46%,可见,供 Zn 明显增加了小麦和黑麦对 Zn 的吸收量。黑麦

处理 45 d 后,其不供 Zn 处理根部的 Zn 吸收量是小麦成熟时的 2.08 倍;供 Zn 后,黑麦根部的 Zn 吸收量为小麦的 1.56 倍。由此可知,黑麦根部从生长介质中获取 Zn 的能力明显强于小麦。

由表 3 还可知,对于小麦,P、Zn 供应及其交互作用显著影响了小麦 Zn 含量及其吸收量,但 Zn 的影响占主导地位,其中 P、Zn 交互作用对籽粒 Zn 含量的影响比对营养器官大;处理 45 d 后,黑麦根部 Zn 吸收量受 P、Zn 的影响几乎相当,但地上部受 Zn 的影响明显高于 P 的影响,进一步说明黑麦根部比小麦具有较强的 Zn 摄取能力。

表 3 P、Zn 供应对小麦和黑麦 Zn 含量及 Zn 吸收量的影响

因素 Factor	Zn 含量(mg · kg ⁻¹) Concentration					Zn 吸收量(μg · 盆 ⁻¹) Content				
	小麦 Wheat			黑麦 Rye		小麦 Wheat			黑麦 Rye	
	根 Root	地上部 Shoot	籽粒 Grain	根 Root	地上部 Shoot	根 Root	地上部 Shoot	籽粒 Grain	根 Root	地上部 Shoot
P1	36.06 a	33.18 b	38.06 c	53.66 ab	54.81 b	83.76 a	808.04 a	296.75 a	154.08 a	697.88 ab
P2	34.01 a	33.65 b	42.57 bc	61.37 a	55.72 b	83.13 a	714.36 b	199.87 b	165.51 a	759.84 a
P3	23.70 b	34.78 b	46.33 b	42.16 c	54.45 b	59.11 b	581.30 c	118.17 c	88.28 b	731.88 a
P4	17.25 c	48.74 a	58.81 a	43.43 bc	62.85 a	46.69 b	541.50 c	49.20 d	65.28 c	616.91 b
Zn1	17.70 b	19.46 b	24.83 b	31.44 b	41.89 b	45.77 b	341.53 b	71.51 b	95.36 b	536.71 b
Zn2	37.81 a	55.72 a	68.05 a	68.87 a	72.02 a	90.58 a	981.07 a	260.48 a	141.21 a	866.55 a
P	35.03**	27.69**	19.15**	7.03**	4.77*	16.06**	24.36**	371.10**	53.17**	4.18*
Zn	180.91**	652.97**	450.00**	119.47**	275.52**	95.74**	662.82**	1 163.39**	46.44**	118.71**
P×Zn	13.10**	14.27**	7.26**	0.83	4.33*	15.41**	17.60**	106.29**	4.61*	2.39

2.4 P、Zn 供应对小麦和黑麦 P 与 Zn 含量之比 (P/Zn)的影响

从表 4 可以看出,随着供 P 量的增加,小麦与黑麦的 P/Zn 明显增加,供 Zn 则显著降低了其 P/Zn,

这是因为增加 Zn 和 P 的供应浓度,可以分别提高小麦、黑麦植株 Zn 和 P 的含量及吸收量,因此小麦、黑麦不同器官的 P/Zn 也随着 P、Zn 供应浓度的变化而变化。

表 4 P、Zn 供应对小麦、黑麦不同时期 P/Zn 的影响

因素 Factor	小麦 Wheat			黑麦 Rye	
	根 Root	地上部 Shoot	籽粒 Grain	根 Root	地上部 Shoot
P1	18.79 c	27.52 c	40.82 bc	20.06 c	14.94 c
P2	106.99 b	63.16 b	49.75 a	47.12 b	35.58 b
P3	375.94 a	98.52 a	45.84 ab	109.29 a	65.65 a
P4	324.60 a	101.78 a	35.32 c	132.94 a	69.73 a
Zn1	288.60 a	114.91 a	62.64 a	112.42 a	60.45 a
Zn2	124.57 b	30.58 b	23.23 b	42.29 b	32.50 b
P	100.91**	604.31**	420.72**	65.60**	112.91**
Zn	92.77**	103.24**	10.59**	36.93**	97.44**
P×Zn	41.82**	47.33**	15.42**	13.91**	18.67**

从表 4 还可以看出,供 P 浓度分别为 3.0、6.0 mmol/L 时,小麦、黑麦各器官(小麦籽粒除外)的 P/Zn 无显著差异,说明当供 P 量超过 3.0 mmol/L 时,P 对小麦与黑麦 P/Zn 的改变不明显。从 P/Zn 的变化范围看,在不同供 P 水平下,小麦、黑麦 P/Zn 分别为 18.79~375.94 和 14.94~132.94;不同供 Zn 水平下,小麦与黑麦 P/Zn 分别为 23.23~

288.60和32.50~112.42,其最大值分别是最小值的 12.42倍和 4.45 倍。可知供 P 和 Zn 对小麦 P/Zn 的影响要比黑麦明显;P 对二者 P/Zn 变化范围的影响要比 Zn 更显著;说明无论是小麦还是黑麦,P 对 Zn 的影响较 Zn 对 P 的影响明显,而且小麦对 P、Zn 供应的反应较黑麦强烈。

2.5 P、Zn 供应对小麦籽粒中 P 和 Zn 分配率的影响

为了进一步明确本试验中 P、Zn 供应对小麦籽粒中 P、Zn 吸收的影响,用 P、Zn 分配率进一步考察籽粒中 P、Zn 吸收量变化。从图 1a 可以看出,小麦籽粒中 P 的分配率随着供 P 量的增加而降低,而供 Zn 后则提高了 P 分配率。说明缺 P 时,P 的供应优

先满足生殖生长;过量供 P 时,大部分 P 储存在营养器官中,而 Zn 的供应可促进 P 向籽粒中转运。

图 1b 表明,与不供 Zn 相比,供 Zn 后提高了小麦籽粒 Zn 分配率,而随着 P 供应量的增加,Zn 分配率却随之下降。可见供 Zn 有利于 Zn 向籽粒中转运,而 P 的供应抑制了 Zn 向籽粒中的转运。

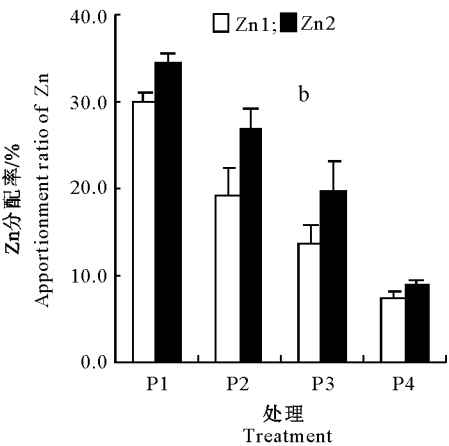
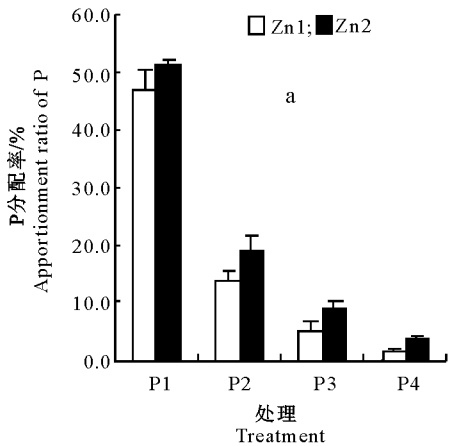


图 1 P、Zn 供应对小麦籽粒中 P(a)、Zn(b)分配率的影响

Fig. 1 Effects of supplying P and Zn on the apportionment ratio of P(a) and Zn(a) to wheat grain

2.6 P、Zn 供应对小麦籽粒中植酸含量的影响

由图 2 可知,不论 P 供应量如何变化,供 Zn 后均降低了其籽粒中植酸的含量。与不供 Zn 相比,在供 P 浓度为 0.1,0.6,3.0,6.0 mmol/L 时,供 Zn 后植酸含量分别下降了 10.86%,4.30%,10.64%和 12.01%,平均降幅为 9.45%。无论供 Zn 与否,随着 P 供应量的增加,小麦籽粒中植酸含量也随之增加。可见虽然 P 供应增加了小麦籽粒中的植酸含

量,但供 Zn 却抑制了小麦籽粒中植酸的形成。

2.7 P、Zn 供应对小麦籽粒中植酸与 Zn 物质的量比的影响

P、Zn 供应对小麦籽粒中植酸与 Zn 物质的量比的影响见图 3。计算可知,不供 Zn 时,小麦籽粒中植酸与 Zn 物质的量比平均值为 51.52,供 Zn 后则为 16.39,不供 Zn 时植酸与 Zn 物质的量比是供 Zn 时的 3.14 倍。

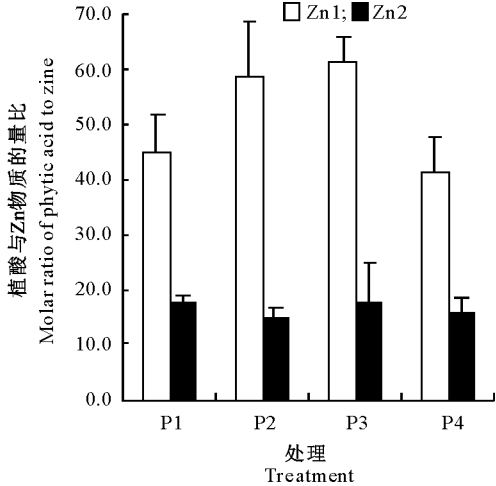
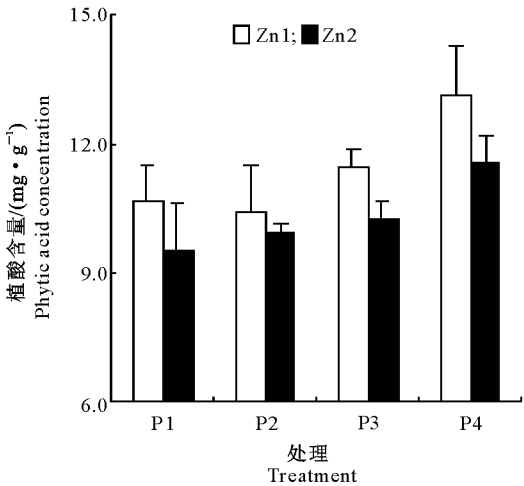


图 2 P、Zn 供应对小麦籽粒中植酸含量的影响

Fig. 2 Effects of supplying P and Zn on the concentration of phytic acid of wheat grain

图 3 P、Zn 供应对小麦籽粒植酸与 Zn 物质的量比的影响

Fig. 3 Effects of supplying P and Zn on the molar ratio of phytic acid to zinc of wheat grain

图 3 表明,不论供 P 水平如何变化,供 Zn 均不

同程度降低了小麦籽粒中植酸与 Zn 物质的量比,

供 P 水平为 0.1, 0.6, 3.0, 6.0 mmol/L 时, 不供 Zn 时植酸与 Zn 物质的量比分别是供 Zn 时的 2.56, 3.98, 3.56 和 2.57 倍。可见, 供 Zn 明显降低了小麦籽粒植酸与 Zn 物质的量比, 从而提高了 Zn 的生物有效性。

3 讨 论

养分供应直接影响到作物生长, 在作物生长过程中, 营养元素间处于动态平衡中。据报道, 在小麦苗期, 正常供 P 促进了小麦生长, 但过量供 P 则会抑制其生长^[20], 而且供 Zn 后表现更加明显^[21]。本试验中, 过量供 P 抑制了小麦与黑麦的生长, 在苗期黑麦根部所受影响更明显, 而在成熟时小麦地上部所受抑制程度更大; 这可能是由于根部和地上部在生长过程中双向互动所致^[22]。本研究中, 在小麦成熟时(72 d)和黑麦生长 45 d 后, 供 Zn 与不供 Zn 时二者地上部干物质质量无显著差异。这可能是由于小麦与黑麦的生长对 Zn 的需求较少, 而本试验前期小麦与黑麦在全营养液中能正常生长, 体内储存的 Zn 能基本维持其生长所致。

P、Zn 养分供给的变化不仅会影响植物的干物质质量, 同时还会引起植株体内 P、Zn 含量及其吸收量的变化。Parker 等^[12]报道, P 施用量增加时, 在植物根部会发生 P-Zn 拮抗作用。本研究结果表明, 在小麦成熟(72 d)和黑麦处理 45 d 时, 过量供 P 降低了二者根部 Zn 含量及 Zn 吸收量, 此时与不供 Zn 相比, 供 Zn 后小麦和黑麦根部的 P 含量和 P 吸收量均显著降低, 表明二者在根部发生了 P-Zn 拮抗作用。Muhammad^[23]报道, 过量 P 会抑制 Zn 的吸收, 首先是因为过量 P 降低了 Zn 的转运率, 其次是减少了 Zn 的吸收率。有研究表明, Zn 浓度和 Zn 吸收量的增加或减少与作物的生长反应有密切联系, 根部构型以及吸收表面积也影响养分的吸收^[24]。本试验中, 与正常供 P 相比, 过量供 P 情况下, 小麦成熟时根部生长未受到明显影响, 黑麦处理 45 d 后根部生长明显受到抑制, 因此小麦和黑麦根部 Zn 含量减少并非稀释所致。可见, 小麦与黑麦根部对 P 和 Zn 的吸收存在着竞争关系。对于 P-Zn 关系, 有研究报道, 施 P 量过大会对 Zn 产生一种生理抑制作用, 即使将 Zn 吸入根内也运输不到作物的地上部^[25], 但本研究在整个试验过程中未发现小麦和黑麦出现直观的缺 Zn 现象, 也未看到 P 中毒现象, 究其原因可能是前期培养是在全营养液环境中进行的。事实上, P-Zn 关系较为复杂, 在植物体内 P、

Zn 交互作用可以发生在生理进程中, 包括离子的吸收、转运、分配、生理代谢等, 也可以发生于植物组织不同的层次上, 如整株、器官、细胞、亚细胞、分子水平上^[26]; 而且不同作物间的 P-Zn 关系也不尽相同, 作物对 Zn 的吸收能力和 Zn 效率也会影响 P-Zn 关系。本试验中, 在相同的培养环境中, 黑麦对 Zn 的吸收能力较小麦强, 因此通过基因工程来培育富 Zn 小麦基因型完全有可能。

在植物体内必需营养元素之间存在着相互作用^[27], P 与 Zn 间也会彼此影响, P/Zn 既反映了植株体内 P、Zn 含量的变化, 也间接地反映了 P、Zn 间相互作用的大小。本试验结果表明, 无论是小麦还是黑麦, 从 P/Zn 值变化范围中的最大值与最小值差异可以看出, P/Zn 受供 P 的影响较供 Zn 明显, 说明在 P、Zn 相互作用中, P 对 Zn 的作用占主导地位, 供 P 水平在小麦与黑麦的 P、Zn 营养平衡中起决定性作用。从小麦与黑麦 P/Zn 的变化范围看, 黑麦在 P、Zn 影响下的最大值与最小值的差异明显小于小麦, 这可能是由于黑麦 Zn 效率较高所致^[28]。

P、Zn 供应既然会引起 P-Zn 关系的变化, 而植酸又是 P 在小麦籽粒中的主要存在形式^[8], 因此, P、Zn 供应也会引起小麦籽粒中植酸含量的变化。植酸可以与 Zn^{2+} 等阳离子结合形成难溶性的植酸盐^[29]。植酸锌很难被人体吸收, 因此植酸含量的高低直接影响小麦籽粒中 Zn 的生物有效性。若以植酸与 Zn 物质的量比作为判断指标, 在日常饮食中, 该比值小于 5 时, 50% 的 Zn 可以被吸收; 该比值为 5~15 时, Zn 的吸收率则为 30%~35%; 当该比值大于 15 时, Zn 的吸收率仅为 15%^[30]。可见, 植酸与 Zn 物质的量比越低越有利于人体对 Zn 的吸收。本试验结果表明, 虽然小麦籽粒中植酸含量随供 P 量的增加而增加, 但 Zn 的供应在提高小麦籽粒 Zn 含量的同时还降低了植酸含量, 因此供 Zn 降低了植酸与 Zn 物质的量比。可见在植物营养学领域, 通过施肥等农艺措施可提高小麦籽粒 Zn 营养品质, 供 Zn 不仅提高了小麦籽粒 Zn 含量, 而且还提高了 Zn 的生物有效性。在提高小麦 Zn 生物有效性方面, 很多研究者都试图通过基因工程来培育富 Zn 品种和低植酸基因型, 但培育一个好的品种却需要较长时间, 而且新品种对 Zn 的吸收在很大程度上依赖于土壤提供有效 Zn 的能力。对于大部分禾谷类作物生长的地区, 因为各种物理和化学因素的影响, 明显降低了植物吸收转化土壤有效态 Zn 的能力, 在此环境中, Zn 高效品种从土壤中吸收更多

Zn 的遗传能力得不到充分发挥。在发展中国家,由于粮食作物中的微量元素营养含量较低,导致主要依靠粮食作物生存的人群出现的缺 Zn 病症日益显现。因此,有必要通过短期的途径来提高禾谷类作物籽粒的 Zn 含量,而施用 Zn 肥或者富含 Zn 的 NPK 肥则可迅速解决该问题。总之,相对遗传育种手段,通过施肥等农艺措施合理供应 P、Zn 以提高小麦籽粒 Zn 含量及其生物有效性,是其有效的补充方式^[31]。本试验是在水培条件下进行的,在潜在缺 Zn 的石灰性土壤中如何合理施用 P 肥和 Zn 肥以及采用何种施 Zn 方式,以最大限度地提高小麦籽粒 Zn 含量及其生物有效性,还有待进一步研究。

4 结 论

与不供 Zn 相比,供 Zn 增加了小麦籽粒 Zn 含量和 Zn 吸收量,降低了小麦籽粒植酸含量及植酸与 Zn 物质的量比,提高了小麦籽粒 Zn 生物有效性,增加了小麦籽粒干质量,提高了小麦籽粒中的 P 含量,促进了 P 向籽粒中转运,同时也提高籽粒中 Zn 的分配率;随着 P 供应量的增加,小麦籽粒中的植酸含量逐渐提高;过量供 P 抑制了小麦和黑麦对 Zn 的吸收,阻碍了 Zn 向小麦籽粒中转运;而且小麦籽粒中 P 的分配率随着 P 供应量的增加而降低。小麦与黑麦根部存在明显 P-Zn 拮抗作用,但在相同环境中,黑麦根部对 Zn 的摄取能力明显比小麦强。

[参考文献]

- [1] 孙克君,赵冰,卢其明,等.活化磷肥的磷素释放特性、肥效及活化机理研究[J].中国农业科学,2007,40(8):1722-1729.
Su K J, Zhao B, Lu Q M, et al. Study on release characteristics, fertilizer effect and activated mechanism of activated phosphoric fertilizers[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(8): 1722-1729. (in Chinese)
- [2] 高静,徐明岗,张文菊,等.长期施肥对我国 6 种旱地小麦磷肥回收率的影响[J].植物营养与肥科学报,2009,15(3):584-592.
Gao J, Xu M G, Zhang W J, et al. Influences of long-term fertilizations on phosphorus recovery efficiency of wheat in six dry upland soils of China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(3): 584-592. (in Chinese)
- [3] 曹宁,陈新平,张福锁,等.从土壤肥力变化预测中国未来磷肥需求[J].土壤学报,2007,44(3):537-543.
Cao N, Chen X P, Zhang F S, et al. Prediction of phosphate fertilizer demand in China based on change in soil phosphorus fertilizer[J]. Acta Pedol Sin, 2007, 44(3): 537-543. (in Chinese)
- [4] Ozturk L, Yazici M A, Yucel C, et al. Concentration and localization of zinc during seed development and germination in wheat[J]. Physiologia Plantarum, 2006, 128: 144-152.
- [5] Cakmak I, Kalayci M, Ekiz H, et al. Zinc deficiency as an actual problem in plant and human nutrition in Turkey: a NATO-Science for stability project[J]. Field Crops Research, 1999, 60: 175-188.
- [6] 刘铮.我国土壤中锌含量的分布规律[J].中国农业科学,1994,27(1):30-37.
Liu Z. Regularities of content and distribution of zinc in soil of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1994, 27(1): 30-37. (in Chinese)
- [7] 郝明德,魏孝荣,党廷辉.旱地小麦长期使用锌肥的增长作用和土壤效应[J].植物营养与肥科学报,2003,9(3):377-380.
Hao M D, Wei X R, Dang T H. Effect of long-term applying zinc fertilizer on wheat yield and content of zinc in dryland[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2003, 9(3): 377-380. (in Chinese)
- [8] 袁凤杰,舒庆尧,朱丹华.大豆低植酸育种研究进展[J].中国农学通报,2006,22(6):173-176.
Yuan F J, Shu Q Y, Zhu D H. Review for study of low phytic acid breeding in soybean[J]. Chinese Agriculture Science Bulletin, 2006, 22(6): 173-176. (in Chinese)
- [9] Welch R M, Graham R D. Agriculture: the real nexus for enhancing bioavailable micronutrients in food crops[J]. Trace Elem Med Biol, 2005, 18: 299-307.
- [10] Caballero B. Impact of micronutrient deficiencies on growth: The stunting syndrome[J]. Annuals of Nutrition and Metabolism, 2002, 46: 8-17.
- [11] You J, Cynthia A G, Loraine D B. Growth and nutrient of flax and durum wheat to phosphorus and zinc fertilizer[J]. Canadian Journal of Plant Science, 2007, 87: 461-470.
- [12] Parker D R, Aguilera J J, Thomason D N. Zinc-phosphorus interactions in two cultivars of tomato (*Lycopersicon esculentum*) grown in chelator-buffered nutrient solutions[J]. Plant and Soil, 1992, 143: 163-177.
- [13] Webb M J, Loneragan J F. Effect of zinc deficiency on growth, phosphorus concentration, and phosphorus toxicity of wheat plants[J]. Soil Sci Soc Am, 1988, 52: 1676-1680.
- [14] 杨志敏,郑绍建,胡霭堂,等. P、Zn 在小麦细胞内的积累、分布及交互作用的研究[J].应用生态学报,1999,10(5):593-595.
Yang Z M, Zheng S J, Hu A T, et al. Accumulation distribution and interaction of phosphorus and zinc in wheat cells[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1999, 10(5): 593-595. (in Chinese)
- [15] 郑绍建,杨志敏,胡霭堂.玉米、小麦细胞磷、锌营养及交互作用的研究[J].植物营养与肥科学报,1999,5(2):150-155.
Zheng S J, Yang Z M, Hu A T. Study on the cell nutrition of phosphorus and zinc interaction in corn and wheat[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1999, 5(2): 150-155. (in Chinese)
- [16] Shi R L, Li H M, Tong Y P, et al. Identification of quantitative trait of zinc and phosphorus density in wheat (*Triticum aestivum*) grain[J]. Plant and Soil, 2008, 306: 95-104.

- [17] Degryse F, Smolders E, Parker D R. Metal complexes increase uptake of Zn and Cu by plants; implications for uptake and deficiency studies in chelator-buffered solutions [J]. *Plant and Soil*, 2006, 289: 171-185.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2002: 263-285.
- Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd edition. Beijing: China Agricultural Press, 2002: 263-285. (in Chinese)
- [19] 刘胜杰, 曲 宁, 元晓梅, 等. 植物性食品中植酸的测定 [J]. 世界标准信息, 2003(2): 287-290.
- Liu S J, Qu N, Yuan X M, et al. Determination of phytic acid in vegetable foods [J]. *World Standards News*, 2003(2): 287-290. (in Chinese)
- [20] 赵秀兰, 胡蔼堂, 郑绍建. 磷锌拮抗作用机制研究 [J]. 西南农业大学学报, 1998, 20(2): 162-164.
- Zhao X L, Hu A T, Zheng S J. Study on the mechanism of phosphorus and zinc antagonism [J]. *Journal of Southwest Agricultural University*, 1998, 20(2): 162-164. (in Chinese)
- [21] 买文选, 田霄鸿, 保琼莉, 等. 利用螯合-缓冲营养液对小麦苗期 P-Zn 关系的研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(6): 1056-1063.
- Mai W X, Tian X H, Bao Q L, et al. Study on P-Zn interaction of wheat using chelator-buffer solution culture technique [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(6): 1056-1063. (in Chinese)
- [22] Streeter T C, Rengel Z, Graham R D. Genotypic differences in Zn efficiency of *Medicago species* [J]. *Euphytica*, 2001, 120: 281-290.
- [23] Muhammad I. Zinc tolerance in wheat cultivars as affected by varying levels of phosphorus [J]. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 2006, 37: 1689-1702.
- [24] 刘 灵, 廖 红, 王秀荣, 等. 不同根构型大豆对低磷的适应性变化及其与磷效率的关系 [J]. 中国农业科学, 2008, 41(4): 1089-1099.
- Liu L, Liao H, Wang X R, et al. Adaptive changes of soybean genotypes with different root architectures to low phosphorus availability as related to phosphorus efficiency [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(4): 1089-1099. (in Chinese)
- [25] 张富仓, 康绍忠, 龚道枝, 等. 不同磷浓度对玉米生长及磷、锌吸收的影响 [J]. 应用生态学报, 2005, 16(5): 903-906.
- Zhang F C, Kang S Z, Gong D Z, et al. Maize growth and phosphorous and zinc uptake under different phosphorous supply levels [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(5): 903-906. (in Chinese)
- [26] 杨志敏, 郑绍建, 胡蔼堂. 植物体内磷与重金属元素锌、镉交互作用的研究进展 [J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(4): 366-376.
- Yang Z M, Zheng S J, Hu A T. Advances on the study of interactions of phosphorus with zinc and cadmium in plants [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1999, 5(4): 366-376. (in Chinese)
- [27] 吴兆明, 焦根林. 小麦种子中磷锌比与对缺磷敏感性关系的研究 [J]. 作物学报, 1998, 24(6): 723-730.
- Wu Z M, Jiao G L. Studies on the relationship between the P/Zn ratio in the seeds and phosphate deficiency sensitivity of wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1998, 24(6): 723-730. (in Chinese)
- [28] Erenoglu B, Cakmak I, Römhild V, et al. Uptake of zinc by rye, bread wheat and durum wheat cultivars differing in zinc efficiency [J]. *Plant and Soil*, 1999, 209: 245-252.
- [29] 任学良, 舒庆尧. 低植酸作物的研究进展及展望 [J]. 核农学报, 2004, 18(6): 438-442.
- Ren X L, Shu Q Y. Research progress and prospects of low phytic acid crops [J]. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2004, 18(6): 438-442. (in Chinese)
- [30] Megan H R, Jennifer K M, Lan R R, et al. Zinc bioavailability in wheat grain in relation to phosphorus fertilizer, crop sequence and mycorrhizal fungi [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2008, 88: 1208-1216.
- [31] Cakmak I. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification? [J]. *Plant and Soil*, 2008, 302: 1-7.