

结实期叶面施锌对小麦籽粒不同部位 锌生物有效性的影响

齐义涛, 周三妮, 张 庆, 杨连新, 王云霞*

(扬州大学 江苏省作物遗传生理重点实验室, 江苏 扬州 225009)

摘 要: 2011年在土培条件下,以扬麦16号、扬麦13号和扬辐麦2号为供试材料,于花后每隔一周分别喷施0.2%或0.4% ZnSO_4 3次,以喷施等量清水为对照,成熟期收获小麦籽粒并进一步区分为麸皮、次粉和面粉,测定各组分植酸浓度以及植酸与锌的摩尔比,明确结实期叶面施锌对小麦籽粒锌有效性的影响。结果表明:对照小麦籽粒麸皮、次粉和面粉植酸平均浓度分别为19.4、5.3、1.8 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,最高和最低浓度相差约11倍。0.2%、0.4% ZnSO_4 处理对小麦麸皮、次粉和面粉中的植酸浓度均无显著影响,小麦面粉部位植酸与锌摩尔比明显小于麸皮和次粉部位。0.2% ZnSO_4 处理使供试品种麸皮、次粉和面粉部位的植酸与锌摩尔比平均分别下降37%、44%和43%;0.4% ZnSO_4 处理使对应部位植酸与锌摩尔比平均分别减少54%、58%和54%,均达极显著水平。尽管籽粒各组分植酸浓度以及植酸与锌摩尔比多存在品种间差异,但品种与锌处理间未发现互作效应。结合该研究前报可知,小麦花后叶面施锌不仅大幅增加现代小麦品种籽粒不同组分的锌浓度,而且使锌的有效性明显增强,是一种快捷的生物强化手段。

关键词: 小麦;生物强化;植酸;锌生物有效性

中图分类号: S143.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2013)06-1085-07 **doi:** 10.11654/jaes.2013.06.001

The Effect of Foliar Zn Application at Grain Filling Stage on Zn Bioavailability in Grain Fractions of Modern Winter Wheat Cultivars

QI Yi-tao, ZHOU San-ni, ZHANG Qing, YANG Lian-xin, WANG Yun-xia*

(Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: Phytic acid is a chelating agent which binds minerals and makes them unavailable for dietary absorption. Zinc is an essential micronutrient for humans but its bioavailability in many cereal grains is low because of a high molar ratio of phytic acid to zinc, which is considered as an important parameter for evaluating zinc bioavailability in the human body. Phytate/zinc molar ratios above 15 are considered to indicate low bioavailability. In order to improve grain Zn bioavailability of local modern wheat, an experiment using foliar fertilizer application was conducted in Yangzhou, China. Winter wheat cultivar Yangmai 16, Yangmai 13 and Yangfuma 2, grown in a cement tank filled with clay loam soil, were treated by foliar Zn application at 3 rates of 0 (control), 0.2% and 0.4% of Zn as ZnSO_4 solution at grain filling stage. The first Zn treatment was applied at 1 week after flowering (WAF), the second and third application were at 2 and 3 WAF, respectively. The plants in control plots received clean water. The results showed without foliar Zn application, phytic acid (PA) concentrations in bran, shorts and flour of wheat grains were 19.4 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 5.3 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ and 1.8 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, respectively; Phytic acid concentration in bran was 11 times higher than in flour. Zinc application had no significant effect on PA concentration in different grain fractions. The Zn bioavailability indicator, the molar ratio of phytic acid to Zn (PA/Zn) showed that PA/Zn in flour was lower than that in shorts or bran. Compared with control treatment, 0.2% ZnSO_4 foliar application at grain filling stage decreased PA/Zn in bran, shorts and flour by 37%, 44% and 43%, respectively; 0.4% ZnSO_4 foliar application at grain filling stage decreased PA/Zn in bran, shorts and flour by 54%, 58% and 54%, respectively. Foliar Zn application after flower improved Zn bioavailability in different grain fractions through increasing Zn concentration in grains of modern wheat cultivars, which is a fast and effective biofortification approach to improve Zn nutrition in humans as well as animals.

Keywords: wheat; biofortification; phytic acid; Zn bioavailability

收稿日期: 2013-01-29

基金项目: 国家自然科学基金(31101101、31171460); 江苏省高校自然科学重大基础研究项目(11KJA210003) 2012年度省属高校聘请外国短期专家杰出青年教师培育聘专项目; 江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 齐义涛(1989—),男,安徽六安人,硕士生,主要从事作物逆境生理和生物强化方面的研究。E-mail: qiyitao614@126.com

* 通信作者: 王云霞 E-mail: yxwang@yzu.edu.cn

植酸(六磷酸肌醇)是小麦种子中磷的主要贮存形式,在种子发芽过程中发挥重要生理功能,但是作为粮食时高含量的植酸又是抗营养因子。植酸与种子中的 K-Mg 和 Ca-Mg 形成难溶的植酸盐,同时对 Zn 和 Fe 也具有强烈的亲和力^[1-2]。因此,植酸干扰矿物质元素特别是 Zn、Fe 和 Ca 在动物小肠中的吸收,进而引起缺少植酸酶的人或单胃动物相应营养元素的缺乏^[3-4]。

锌是人体必需的微量元素,人体内有多种酶结构的完整性及催化作用需要锌的参与^[5]。锌也是人体较易缺乏的微量元素之一,据估计全球范围内约有三分之一的人口缺锌^[6]。饮食结构单一,以含锌较低的粮食为主要食物来源是人类缺锌的主要原因。此外,这些主食中锌的生物有效性较低也是人类缺锌的另一重要原因。粮食中锌的生物有效性通常以[植酸]/[Zn²⁺]摩尔比值来表示^[7-9]。据 WHO^[10]标准,摩尔比大于 15 时锌的生物有效性较低,只有 10%~15%;摩尔比为 5~15 时,生物有效性中等,为 30%~35%;而摩尔比小于 5 时,生物有效性较高,可达 45%~55%。因此,降低食物中植酸含量,从而降低该比值,能缓解植酸对锌吸收的抑制作用。

增加主要粮食作物籽粒特别是胚乳部位锌的浓度及其生物有效性是当前生物强化领域的一个重要挑战^[11-12]。小麦是人类重要的粮食来源,一般认为其食用部位的锌浓度较低而锌营养限制物质植酸含量较高^[9]。前人研究表明,施用锌肥可以增加小麦籽粒锌含量,但其对籽粒锌生物有效性的影响常与锌肥施用策略和种植品种等因素有关:土施锌肥效果较小甚至没有效应,而叶面施肥或土施结合叶施的效果明显,可以较大幅度提高籽粒锌的生物有效性^[8,13-15]。但前人研究绝大多数针对整个籽粒锌的生物有效性,而对籽粒不同部位特别是人类直接食用的胚乳部分(面粉)锌的生物有效性研究甚少^[15]。我们前期报道了小麦花后叶面施锌对成熟籽粒不同组分锌含量的影响,结果发现于花后每隔一周喷施 0.2%或 0.4% ZnSO₄ 3 次使麸皮锌浓度分别增加 64%、117%,次粉锌浓度分别增加 54%、110%,面粉锌浓度分别增加 37%、92%^[16],说明结实早期叶面施锌可以有效提高现代小麦品种面粉的锌营养水平。但这是否影响籽粒的植酸水平和反应锌生物有效性的[植酸]/[Zn²⁺]摩尔比值?这种影响是否因不同品种而异?籽粒的不同部位有没有差异?本文将重点报道这方面的试验结果,以探寻经济有效地提高小麦籽粒锌含量和生物有效性的途径。

1 材料与方法

1.1 实验设计

试验于 2011—2012 年在扬州大学网室土培池中进行(32°23.3'N, 119°25.0'E),每个土培池长 3.8 m、宽 1.3 m、深 0.45 m、面积 5.1 m²。当地年平均气温为 14.8℃,年日照 2140 h,年平均降水量 1020 mm。供试土壤为粘质壤土,主要理化性状见文献^[16]。供试品种为当地高产冬小麦品种扬麦 16 号、扬麦 13 号和扬辐麦 2 号。试验设对照、0.2%和 0.4%(以溶液 Zn²⁺浓度计)锌肥 3 个处理,分别表示低、中、高 3 个锌水平。试验共用 6 个土培池,每个池子均种植 3 个品种,其中 3 个池子为对照(不施锌),另外 3 个池子为施锌处理,从中间割出一条分界沟,中锌和高锌喷施处理时用隔板沿沟隔开避免污染。锌肥以硫酸锌溶液形式叶面施用(600 L·hm⁻²,加入 0.01%的 Tween),对照喷等量清水。0.2% Zn 处理每次喷锌为 1.2 kg·hm⁻²,3 次共 3.6 kg·hm⁻²;0.4% Zn 处理每次喷锌为 2.4 kg·hm⁻²,3 次共 7.2 kg·hm⁻²。处理始于小麦开花一周,每隔一周喷施 1 次,共 3 次。每处理 3 次重复。

1.2 材料培育

小麦采用条播方式,11 月 3 日播种。氮肥(尿素)施用量为 225 kg·hm⁻²,氮肥施用时期及比例分别为:11 月 3 日施基肥,占总施氮量的 50%,2012 年 3 月 10 日施壮蘖肥,占总施氮量的 10%,4 月 5 日施孕穗肥,占总施氮量的 40%。磷肥(过磷酸钙)和钾肥(氯化钾)施用量分别为 75 kg·hm⁻² P₂O₅ 和 75 kg·hm⁻² K₂O,且均作为基肥施用。适时进行病虫草害防治及生育后期水分管理,保证小麦正常生长发育。

1.3 测定内容与方法

于小麦成熟期收获地上部分,每个处理重复随机选取 10 个代表性单茎,手工脱粒,60℃烘干至恒重后称重。烘干后的籽粒用 Sedimat Laboratory Mill (Brabender™ GmbH&Co, Germany)磨粉,重复操作 2 次,将麸皮等部位过 40 目和 100 目筛。留在 40 目筛上部分的作为麸皮回收,通过 100 目筛的部分和筒内面粉合并作为面粉回收,介于 40 目和 100 目筛之间的作为次粉回收。

植酸测定方法参照 Vaintraub 和 Lapteva^[17],但是实验条件经过改进,具体步骤如下:

(1)溶液配制:植酸标准溶液用植酸钠试剂配制(植酸钠含 9 个结晶水,植酸的质量分数为 60.8%),显色剂为 18 mg FeCl₃ 和 300 mg 5-磺基水杨酸溶解

于 100 mL 去离子水。(2)样品制备:称取 0.25 g 左右烘干样品(麸皮 0.1 g 左右),用 5 mL 0.7% HCl 提取(25 ℃ 150 r·min⁻¹ 1 h),离心(4000 r·min⁻¹ 15 min)后,吸取 0.4 mL 上清液(麸皮 0.1 mL)于 10 mL 离心管中。在离心管中加入 2.6 mL 去离子水(麸皮 2.9 mL)和 1 mL 显色剂,漩涡仪上振荡均匀后离心(3400 r·min⁻¹ 10 min),上清液用分光光度计比色(500 nm)。根据标准曲线计算样品植酸含量。

养分元素的测定:称取 0.1 g 左右样品置于马弗炉内灰化(480 ℃ 18 h),待灰化冷却后用 2 mL 1:3(V/V)HNO₃ 溶解,静置 1 h 加入 8 mL 超纯水稀释后过滤,然后用 IRIS 电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP,Thermo Elemental, 美国)测定滤液中 Zn、Cu、Fe、Mn、Mg、K、Ca、P 元素的浓度,每个样品 3 次重复。

1.4 数据分析

所有数据经 Excel 处理和绘制图表,用 SPSS (V19.0) 进行统计分析。多重比较采用 SPSS 提供的 LSD 法(α=0.05)。

2 结果与分析

2.1 植酸浓度

结实期锌处理对小麦成熟籽粒植酸浓度的影响示于图 1。由图可知,在不施锌的条件下,扬麦 16 号、扬麦 13 号、扬辐麦 2 号籽粒植酸浓度分别为 7.91、8.07、8.32 mg·g⁻¹,无显著差异。与对照相比,0.2%、0.4% ZnSO₄ 处理使供试品种籽粒植酸浓度平均减少 3%和 6%,未达显著水平。供试品种中以扬辐麦 2 号籽粒植酸浓度降幅最大,0.2%、0.4% ZnSO₄ 处理分别下降 10%、11%。方差分析表明,锌处理及其与品种的互作对小麦籽粒植酸浓度的影响均未达显著水平(表 1)。

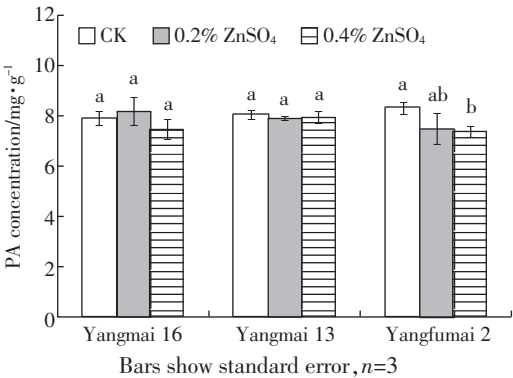


图 1 结实期叶面施锌对供试小麦整个籽粒植酸浓度的影响
Figure 1 Effect of foliar application of ZnSO₄ on phytic acid (PA) concentration of whole grain of three wheat cultivars

表 1 结实期锌处理对小麦成熟期籽粒不同部位植酸浓度以及植酸与锌摩尔比影响的方差分析结果
Table 1 Results of ANOVA showing the significance(P value) of Zn treatment, cultivar, and their interactions on phytic acid (PA) concentration, the molar ratio of PA to Zn in different parts of grains at maturity

项目	锌处理	品种	锌处理×品种
籽粒植酸浓度	0.243 5	0.698 4	0.497 2
麸皮植酸浓度	0.052 4	0.010 5	0.703 6
次粉植酸浓度	0.187 5	0.315 5	0.376 2
面粉植酸浓度	0.368 2	0.013 5	0.987 4
籽粒 PA/Zn 比值	<0.001	0.025 8	0.111 6
麸皮 PA/Zn 比值	<0.001	0.057 8	0.178 4
次粉 PA/Zn 比值	<0.001	0.175 8	0.219 9
面粉 PA/Zn 比值	<0.001	0.001 5	0.449 8

注:粗体数据表示达显著或极显著水平。

利用磨粉机将籽粒进一步区分为麸皮、次粉和面粉,各组分植酸浓度的测定结果见图 2。不同部位植酸浓度相比,均为麸皮最高(平均 19.4 mg·g⁻¹),面粉

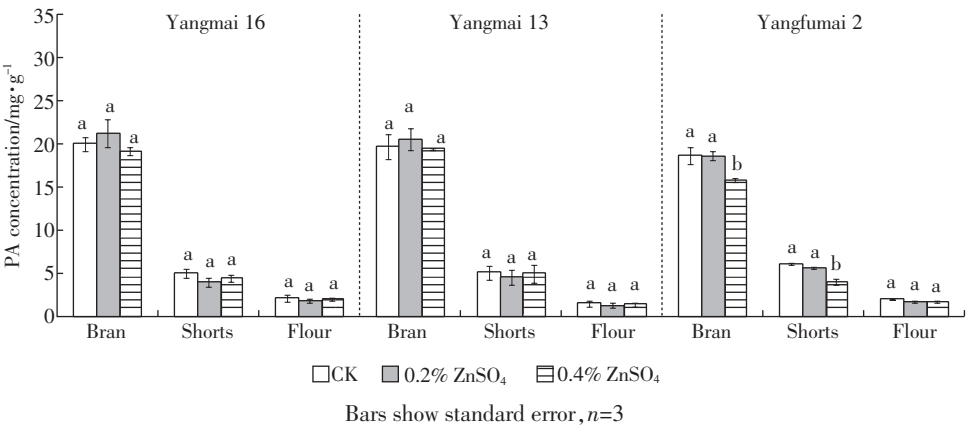


图 2 结实期叶面施锌对供试小麦麸皮、次粉和面粉植酸浓度的影响

Figure 2 Effect of foliar application of ZnSO₄ on phytic acid (PA) concentration of bran, shorts and flour at maturity of three wheat cultivars

最低($1.8 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$),次粉居中($5.3 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$),最高浓度约是最低浓度的11倍。不同品种次粉部分植酸浓度差异相对较小,但麸皮和面粉部位品种间的差异均达显著水平,其中麸皮部位以扬辐麦2号植酸浓度最低,比另两个品种低10%左右,面粉部位则以扬麦13最低,较其他品种低30%~45%。与对照相比,0.2% ZnSO_4 处理没有显著改变供试品种各部位植酸浓度;0.4% ZnSO_4 处理使扬辐麦2号麸皮和次粉植酸浓度显著下降,但未显著改变其面粉及其他两品种各部位植酸浓度。锌处理及其与品种的互作对籽粒各组分植酸浓度没有影响(表1)。

2.2 植酸与锌摩尔比

结实期锌处理对小麦成熟期籽粒植酸和锌摩尔比的影响见图3。由图可知,在不施锌的条件下,扬麦16号、扬麦13号、扬辐麦2号籽粒植酸和锌摩尔比分别为24.6、19.7、24.7,扬麦13号明显低于另外两个品种。与对照相比,0.2%、0.4% ZnSO_4 处理使供试品

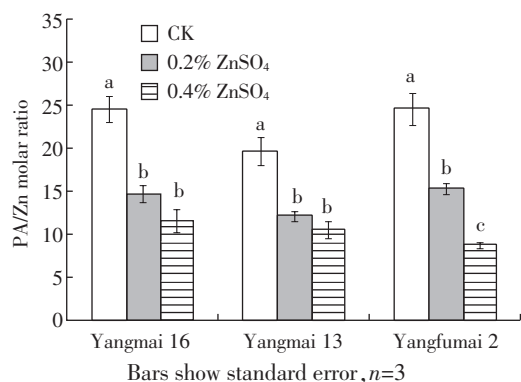


图3 结实期叶面施锌对供试小麦品种成熟籽粒植酸与锌摩尔比的影响

Figure 3 Effect of foliar application of ZnSO_4 on the molar ratio of phytic acid to Zn (PA/Zn) of whole grain of three wheat cultivars at maturity

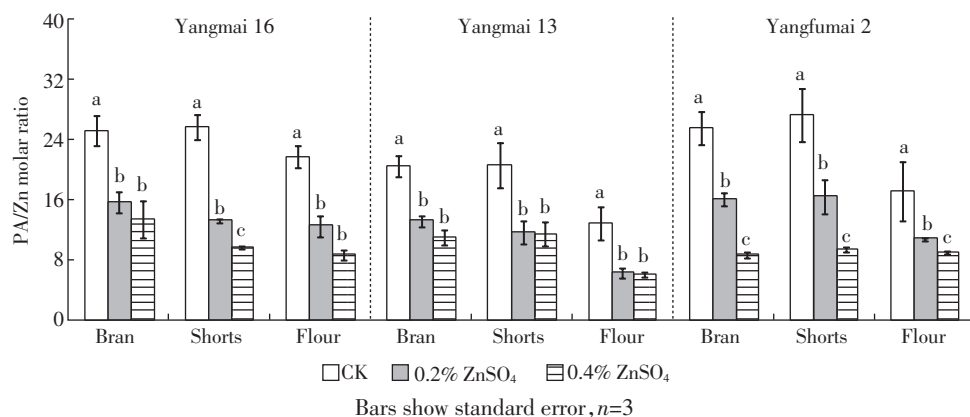


图4 结实期叶面施锌对供试小麦品种成熟籽粒不同组分植酸与锌摩尔比的影响

Figure 4 Effect of foliar application of ZnSO_4 on phytic acid to Zn molar ratio in grain fractions at maturity of three wheat cultivars

种籽粒的植酸和锌摩尔比平均减少39%和55%,其中扬麦16号分别减少40%、53%,扬麦13号分别减少39%和47%,扬辐麦2号分别减少38%、64%,均达极显著水平。锌处理对籽粒植酸和锌摩尔比的影响达极显著水平,但锌与品种间无互作效应(表1),说明结实期叶面施锌使小麦籽粒植酸和锌摩尔比大幅下降,不同品种趋势一致。

结实期锌处理对小麦麸皮、次粉和面粉植酸与锌摩尔比的影响示于图4。供试品种麸皮、次粉和面粉部位植酸与锌摩尔比平均分别为16.6、16.2和11.7,面粉部位明显小于其他两个部位。籽粒同一部位植酸与锌摩尔比品种间存在一定差异:扬麦13号各部位植酸与锌摩尔比均小于另外两个品种对应部位的值。与对照相比,0.2% ZnSO_4 处理使供试品种麸皮、次粉和面粉部位植酸与锌摩尔比平均分别下降37%、44%和43%,其中扬麦16号对应部位分别下降38%、49%和43%,扬麦13号分别下降36%、43%和52%,扬辐麦2号分别下降37%、40%和37%,均达极显著水平。0.4% ZnSO_4 处理使供试品种麸皮、次粉和面粉的植酸与锌摩尔比平均分别下降54%、58%和54%,其中扬麦16号对应部位分别下降47%、62%和60%,扬麦13号分别下降46%、44%和53%,扬辐麦2号分别下降66%、66%和48%,均达显著或极显著水平。方差分析表明,锌处理对籽粒各组分植酸和锌摩尔比的影响均达极显著水平,但锌处理与品种间没有互作效应(表1),说明结实期叶面施锌使籽粒不同组分植酸和锌摩尔比显著下降,不同品种趋势一致。

2.3 植酸与8种元素浓度的相关性

不同品种及其与锌处理的互作对小麦籽粒不同部位植酸浓度及元素浓度影响均未达显著水平,因此

对所有供试品种植酸和元素浓度进行相关分析,结果列于表 2 和图 5、图 6。随着次粉中植酸浓度的增加,对应部位 Zn、Fe、Ca、K、Mg、Mn 和 P 浓度均呈增加趋势(表 2),其中 Mn(图 5a)、Mg(图 5b)、K(图 5c)和 P 浓度(图 5d)与植酸浓度关系比较密切,相关系数为 0.570~0.663($n=24$),均达极显著水平。面粉中植酸与元素浓度的相关性与次粉部位趋势基本一致,面粉部位植酸浓度与 Mn(图 6a)、Mg(图 6b)、K(图 6c)和 P 浓度(图 6d)均呈极显著线性正相关,相关系数为 0.570~0.700($n=24$)。与此不同,麸皮中植酸浓度与所有测定元素的浓度相关性均不密切(表 2)。

3 讨论

据 WHO^[10]设定的标准,当 PA/Zn 摩尔比大于 15

时锌的生物有效性较低。本试验选用本地高产小麦品种扬麦 16 号、扬麦 13 号和扬辐麦 2 号为供试材料,这 3 个供试小麦品种在对照条件下籽粒 PA/Zn 摩尔比均在 20 左右(扬麦 13 为 19.7),其中扬麦 16 号和扬辐麦 2 号籽粒 PA/Zn 摩尔比更是高达 25(图 3),说明正常条件下供试品种籽粒锌的生物有效性均较低,花后叶面施锌使籽粒锌的生物有效性大幅提高,0.2%、0.4% ZnSO_4 使供试品种 PA/Zn 摩尔比下降至 9~15,降幅达 40%~65%(图 3)。这一结果与 Zhang 等^[15]报道的部分品种对叶面施锌的响应相似,即花后叶面施锌能使籽粒 PA/Zn 摩尔比下降到 15 以下。但是叶面施锌降低 PA/Zn 的程度还取决于品种和环境条件,如果在对照条件下品种 PA/Zn 摩尔比很高,喷施锌肥虽然可以降低 PA/Zn,但还是高于 20 就难以切

表 2 小麦籽粒麸皮、次粉和面粉各部位植酸浓度与对应部位 Zn、Cu、Fe、Mn、Mg、K、Ca、P 元素浓度之间的相关性

Table 2 Correlation coefficients of phytic acid concentration(PA) with Zn, Cu, Fe, Mn, Mg, K, Ca and P concentration in grain fractions at maturity of three wheat cultivars

相关性 P 值	Zn	Cu	Fe	Mn	Mg	K	Ca	P
麸皮植酸	-0.228 ^{ns}	0.025 ^{ns}	-0.019 ^{ns}	-0.139 ^{ns}	-0.050 ^{ns}	-0.014 ^{ns}	0.003 ^{ns}	0.096 ^{ns}
次粉植酸	0.133 ^{ns}	-0.048 ^{ns}	0.203 ^{ns}	0.663 ^{**}	0.570 ^{**}	0.579 ^{**}	0.269 ^{ns}	0.595 ^{**}
面粉植酸	0.018 ^{ns}	-0.32 ^{ns}	0.344 ^{ns}	0.670 ^{**}	0.724 ^{**}	0.700 ^{**}	-0.007 ^{ns}	0.591 ^{**}

注:ns 表示 non-significance; ** 表示 $P<0.01$ 。

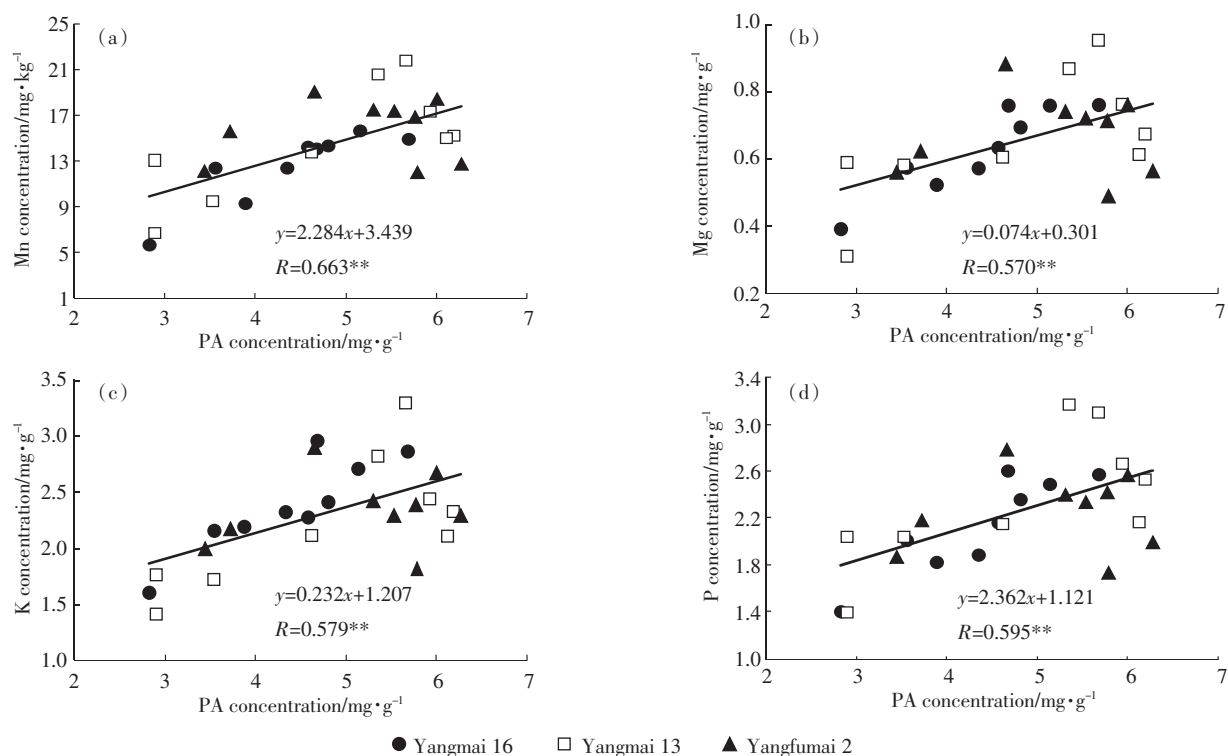


图 5 小麦次粉中植酸浓度与 Mn、Mg、K 和 P 元素浓度之间的关系

Figure 5 Relationship between concentrations of phytic acid and four elements(Mn, Mg, K and P) in shorts of three wheat cultivars($n=24$)

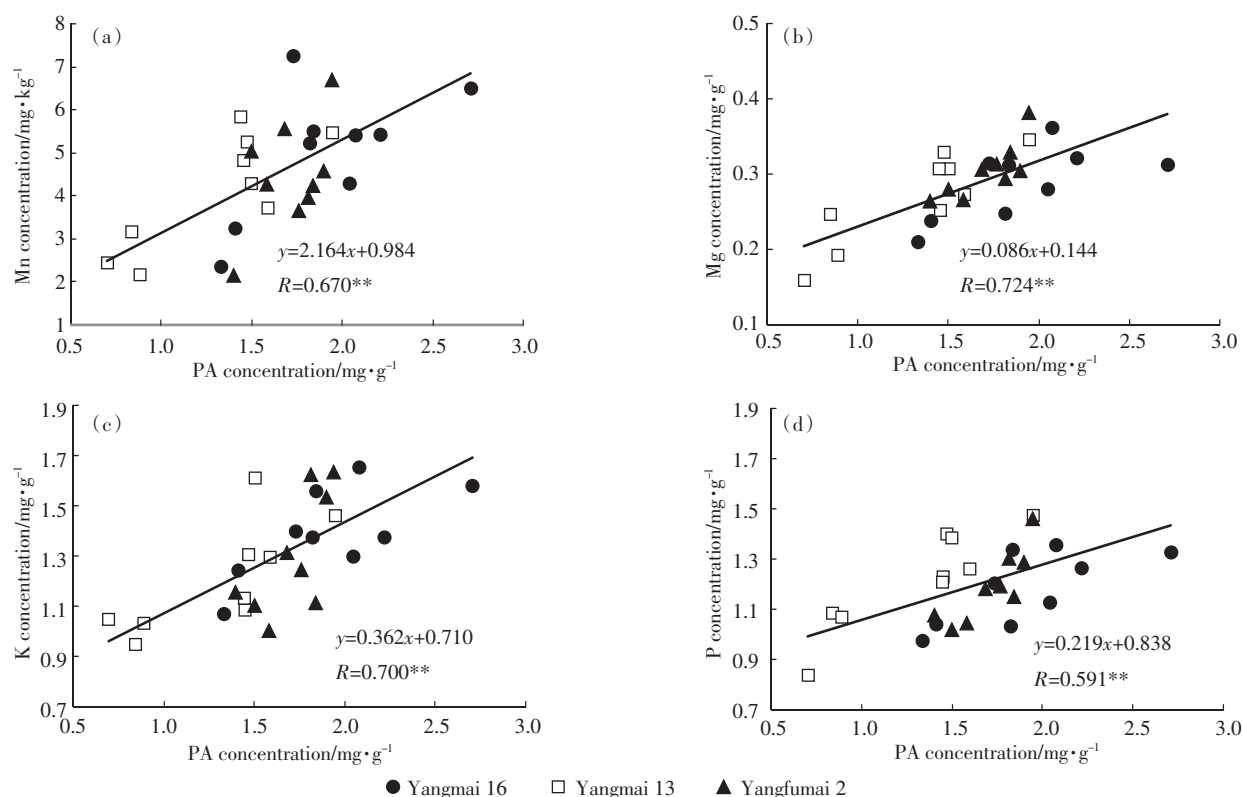


图6 小麦面粉中植酸浓度与Mn、Mg、K和P元素浓度之间的关系

Figure 6 Relationship between concentrations of phytic acid and four elements (Mn, Mg, K and P) in flour of three wheat cultivars ($n=24$)

实提高锌的有效性^[8,15]。因为花后叶面施锌并未显著改变籽粒植酸的含量(图1),所以PA/Zn摩尔比的降低是由于籽粒中锌含量的上升造成的^[16]。这一结果表明,通过花后叶面施锌进入到籽粒中的锌有可能都是生物可利用的锌。

虽然前人在如何增加小麦籽粒锌有效性方面做了大量探索,但是对籽粒不同部位锌生物有效性的研究甚少。Zhang等^[15]大田试验对面粉部位PA/Zn摩尔比进行了观察,结果表明0.4% ZnSO_4 叶面施用使小麦面粉中的PA/Zn摩尔比最大降低到50%。本研究利用磨粉机 Sedimat Laboratory Mill 将小麦成熟籽粒区分为麸皮、次粉和面粉,结果表明花后叶面施锌使所有品种籽粒各部位锌的有效性均大幅度提高,且各部位提高幅度相近。例如0.2% ZnSO_4 处理籽粒各部位PA/Zn摩尔比的降幅均为40%左右,0.4% ZnSO_4 处理这3部位的降幅均为55%左右(图4)。本试验供试品种间的差异主要体现在对高浓度锌处理的响应上:扬麦16和扬辐麦2号在锌施用浓度从0.2%增加到0.4%时,籽粒不同部位PA/Zn摩尔比进一步下降(降幅增加约10%~25%),而扬麦13号籽粒各部位植酸锌摩尔比变化很小(图4)。这种品种间的差异说明在生产

上不同品种所适宜的施锌量可能不同,因此有必要在增加供锌水平的基础上进一步开展多年多品种试验以明确不同类型小麦品种的最佳施锌水平。

在小麦籽粒中,植酸是P存在的主要形式,与K、Mg和Ca等矿质元素以植酸盐的形式主要分布在富含糊粉层的麸皮中,面粉中含量较低。本试验对照小麦籽粒麸皮、次粉和面粉植酸平均浓度分别为19.4、5.3、1.8 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,最高和最低浓度相差约11倍(图2),这一分布规律与籽粒中主要矿质元素的分布规律基本一致^[18-21]。由于成熟小麦籽粒锌浓度的空间分布差异更为明显^[18-19],小麦面粉部位植酸与锌摩尔比明显小于麸皮和次粉部位(图4)。不同作物种子植酸螯合的主要矿质元素可能有所不同,Persson等^[22]发现在大麦种子中,Fe是植酸螯合的主要金属元素,而Zn主要与蛋白和多肽结合。另外,同一作物种子的不同部位,植酸螯合的主要元素也有可能不同。本研究发现,在麸皮中,植酸与8种元素浓度的相关性均不显著,但是在次粉和面粉中植酸浓度与元素K、Mn、Mg和P浓度呈极显著正相关,而与Zn、Cu、Fe、Ca相关性不显著(表2,图5~图6),说明在各种矿质元素含量都较高的麸皮中,植酸螯合元素时可能不存在主次之

分。但在次粉和面粉中,植酸主要与 K、Mg 和 Mn 形成植酸盐,即次粉和面粉中与植酸螯合的矿质元素主要为 K、Mg 和 Mn,而花后通过叶面吸收并进入到籽粒中的锌元素可能主要以非植酸盐形态存在。这一结果可能也进一步解释了锌有效性增加的原因。

4 结论

本研究对 3 个现代小麦品种的定量研究表明,花后每隔一周喷施 0.2%或 0.4% ZnSO_4 3 次,对小麦籽粒麸皮、次粉和面粉部位的植酸浓度没有影响,但使籽粒不同部位植酸与锌摩尔比大幅下降(40%~60%),说明小麦灌浆早期叶面喷施锌肥可使锌的生物有效性明显增强,是一种快捷高效的面粉锌生物强化手段。

参考文献:

- [1] Loennerdal B. Phytic acid-trace element (Zn, Cu, Mn) interactions[J]. *Food Science and Technology International*, 2002, 37:749-758.
- [2] Schlemmer U. Phytate in foods and significance for humans: Food sources, intake, processing, bioavailability, protective role and analysis [J]. *Molecular Nutrition and Food Research*, 2009, 53:330-375.
- [3] Welch R M, House W A, Allaway W H. Availability of zinc from pea seeds to rats[J]. *Journal of Nutrition*, 1974, 104:733-740.
- [4] Kumar V, Sinha A K, Becher K, et al. Dietary roles of phytate and phytase in human nutrition: A review[J]. *Food Chemistry*, 2010, 120:945-959.
- [5] Coleman J E. Zinc enzymes[J]. *Current Opinion in Chemical Biology*, 1998, 2:222-234.
- [6] Hotz C, Brown K H. Assessment of the risk of zinc deficiency in populations and options for its control[J]. *Food and Nutrition Bulletin*, 2004, 25:94-204.
- [7] Morris E R, Ellis R. Usefulness of the dietary phytic acid/zinc molar ratio as an index of zinc bioavailability to rats and humans[J]. *Biological Trace Element Research*, 1989, 19:107-117.
- [8] 曹玉贤,田霄鸿,杨习文,等. 土施和喷施锌肥对冬小麦籽粒锌含量及生物有效性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(6):1394-1401.
- CAO Yu-xian, TIAN Xiao-hong, YANG Xi-wen, et al. Effects of soil and foliar applications of Zn on winter wheat grain Zn concentration and bioavailability[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(6):1394-1401.
- [9] Cakmak I, Pfeiffer W H, McClafferty B. Biofortification of durum wheat with zinc and iron[J]. *Cereal Chemistry*, 2010, 87:10-20.
- [10] World Health Organization. Trace element in human nutrition and health[R]. Geneva, 1996.
- [11] Cakmak I. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification?[J]. *Plant Soil*, 2008, 302:1-17.
- [12] Zhao F J, McGrath S P. Biofortification and phytoremediation[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2009, 12:373-380.
- [13] Erdal I, Yilmaz A, Taban S. Phytic acid and phosphorus concentrations in seeds of wheat cultivars grown with and without zinc fertilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2002, 25:113-127.
- [14] Cakmak I, Kalayci M, Kaya Y, et al. Biofortification and localization of zinc in wheat grain[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58:9092-9102.
- [15] Zhang Y Q, Sun Y X, Ye Y L, et al. Zinc biofortification of wheat through fertilizer applications in different locations of China[J]. *Field Crops Research*, 2012, 125:1-7.
- [16] 齐义涛,张庆,王云霞,等. 结实期叶面施锌对扬麦 16 号和扬辐麦 2 号籽粒不同部位锌含量的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(4):675-680.
- QI Yi-tao, ZHANG Qing, WANG Yun-xia, et al. The effect of foliar Zn application at grain filling stage on Zn content in grain fractions of winter wheat Yangmai 16 and Yangfuma 2[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(4):675-680.
- [17] Lapteva N A. Colorimetric determination of phytate in unpurified extracts of seeds and the products of their processing[J]. *Analytical Biochemistry*, 1988, 175:227-230.
- [18] Wang Y X, Specht A, Horst W J. Stable isotope labelling and zinc distribution in grains studied by laser ablation ICP-MS in an ear culture system reveals zinc transport barriers during grain filling in wheat[J]. *New Phytologist*, 2011, 189:428-437.
- [19] 王云霞,杨连新,Horst W J. 激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪 (LA-ICP-MS)定量分析小麦籽粒锌元素的空间分布[J]. *南京农业大学学报*, 2011, 34:18-22.
- WANG Yun-xia, YANG Lian-xin, Horst W J. Quantification and spatial distribution of zinc in wheat grains by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS)[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2011, 34:18-22.
- [20] 王云霞,杨连新,Horst W J. 用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱研究小麦籽粒元素的共分布[J]. *作物学报*, 2012, 38:514-521.
- WANG Yun-xia, YANG Lian-xin, Horst W J. Element colocalization in wheat seed revealed by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS)[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(3):514-521.
- [21] 王云霞,杨连新,Horst W J. 重金属复合处理对小麦铜锌镍镉积累和分布的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(11):2145-2151.
- WANG Yun-xia, YANG Lian-xin, Horst W J. The accumulation pattern of Zn, Cu, Ni, Cd in wheat grown in heavy-metal enriched substrate[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11):2145-2151.
- [22] Persson D P, Hansen T H, Laursen K H, et al. Simultaneous iron, zinc, sulfur and phosphorus speciation analysis of barley grain tissues using SEC-ICP-MS and IP-ICP-MS[J]. *Metallomics*, 2009, 5:418-426.