

拔节期土壤施锌对小麦籽粒中锌生物有效性影响评估^①

王张民^{1,2}, 潘斐¹, 刘琦¹, 袁林喜¹, 段增强², 尹雪斌^{*}

(1 江苏省晒生物工程技术研究中心, 江苏苏州 215123; 2 土壤与农业可持续发展国家重点实验室
(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

摘要: 本研究通过 2012—2013 及 2013—2014 两个年度的田间试验, 在小麦(扬麦-16)的拔节期土壤施加高用量的锌肥, 通过植酸/锌摩尔比法, 对小麦籽粒进行了锌生物有效性评价, 每公顷施 $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 的量达到 300 kg 能显著提高小麦籽粒锌含量, 小麦籽粒锌含量达到 60 mg/kg 以上, 小麦籽粒植酸/锌摩尔比显著降低, 植酸/锌摩尔比最大可降低至 15 以下, 表明小麦锌强化后籽粒中锌的生物有效性得到显著提高。

关键词: 小麦; 锌肥; 籽粒锌含量; 植酸/锌摩尔比; 生物有效性

中图分类号: S512; Q945.14; TS202.1 文献标识码: A

小麦籽粒中的锌等微量元素含量及其生物有效性与人体微量元素的摄入量有着密切的关系^[1-2]。在全球范围内, 小麦籽粒的锌含量介于 16 ~ 142 mg/kg 之间^[3]。在中国各个地区的小麦籽粒间, 含量也存在较大的差异。东北地区的小麦籽粒锌含量一般较高, 平均含量有 36.9 mg/kg, 西南以及华中地区的小麦籽粒平均锌含量为 31.5 mg/kg, 而华北以及华东地区的小麦籽粒锌含量次之, 平均为 29.5 mg/kg, 我国西北地区栽培出的小麦籽粒锌含量则最低, 平均锌含量仅为 27.1 mg/kg^[4]。小麦籽粒中的锌含量受到诸多因素的影响, 包括小麦基因型、土壤环境、气候等众多因素^[5-7], 这些因素直接或间接影响着植物对锌的吸收、转运以及再分配。

小麦籽粒中锌的生物有效性也是影响人类对锌摄入的一个重要因素。小麦籽粒中有一些物质能够促进人体对锌的吸收, 如一些含半胱氨酸的肽、维生素 A、胡萝卜素等能提高食品中锌的生物利用率^[8]。但是, 仍有大量的物质会降低食物中锌的生物有效性, 如植酸, 磷酸盐, 某些蛋白中的羧基、草酸、不溶性纤维以及一些重金属离子等^[9-11]。有研究发现, 白豆的白蛋白提取物会对锌的吸收存在抑制作用^[12]。植酸是环己六醇六磷酸酯, 小麦籽粒中的锌极易受到植酸的影响, 植酸分子中的磷酸基能与锌紧密结合, 从而降低锌的溶出率。而肌醇磷酸酯与锌的结合能力受到

磷酸基的数目的影响, 当磷酸基数目减少后, 这种结合力将被减弱。因此, 植酸与锌的摩尔比往往被用来评价食品中锌的生物有效性^[13-14]。一般认为, 影响锌吸收的植酸/锌摩尔比的临界值为 15^[15-17], 植酸/锌摩尔比超过 15 时, 锌的吸收将受到严重抑制, 低于 5 时则对锌的吸收完全没有影响^[18]。小麦籽粒中的植酸含量一般介于 6 ~ 10 g/kg 之间^[19], 而小麦籽粒中的植酸/锌摩尔比往往都超过 20^[20]。由此可见, 小麦籽粒中高的植酸含量和植酸/锌摩尔比是影响其中锌吸收利用的关键因素, 降低植酸含量并降低植酸/锌摩尔比是提高植物性食品锌生物有效性的可行性手段。

本文通过在小麦拔节期施用不同用量的锌肥研究小麦籽粒的锌强化效果, 同时测定了小麦籽粒的植酸含量, 并计算出植酸/锌摩尔比, 以此来评估锌强化后的小麦籽粒中锌的生物有效性特征, 为锌的农业生物营养强化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验田基本情况

田间试验在江苏省如皋市典型小麦种植区进行。如皋市地处江苏省中部偏东侧, 位于长江三角洲北翼, 属亚热带湿润气候区, 四季分明, 气候温和, 雨水充沛, 试验区长期实行一年两茬稻-麦轮作种植模

基金项目: 山西省农谷建设科研专项(SXNGJSKYZX201706)和山西省重点研发计划重点项目(201703D211001-01-02)资助。

* 通讯作者(xbyin@ustc.edu.cn)

作者简介: 王张民(1988—), 男, 江苏如皋人, 博士, 主要从事功能农业研究。E-mail: wzmwzm@mail.ustc.edu.cn

表 1 试验田基本理化性质
Table 1 Basic physiochemical properties of tested plot soil

年度	pH	有机质(g/kg)	有效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)	总锌(mg/kg)	有效锌(mg/kg)
2012—2013	7.0 ± 0.5	16.7 ± 3.4	16.5 ± 3.6	78.1 ± 8.3	65.4 ± 8.1	1.5 ± 0.4
2013—2014	7.1 ± 0.4	18.3 ± 2.2	17.4 ± 2.8	81.7 ± 5.9	62.9 ± 6.2	1.2 ± 0.2

式。试验区土壤基本理化性质参照《土壤农业化学分析方法》^[21]进行分析(表 1)。

1.2 试验方法与处理

试验于 2012 年 10 月至 2014 年 6 月在江苏省如皋市丁堰镇小麦试验田中进行,该地区采用稻麦轮作的栽培模式,供试小麦品种为春性中熟中筋品种“扬麦-16 号”,是江苏省苏中、苏北地区的推广使用品种。

2012—2013 年度,小麦播种前,大田施用 60 kg/hm² N(尿素)+60 kg/hm² P₂O₅(过磷酸钙)+120 kg/hm² K₂O(氯化钾)作为基肥。小麦于 2012 年 11 月 7 日播种,播种量为 187.5 ~ 195 kg/hm²,在小麦春后分蘖拔节期追施 120 kg/hm² N(尿素)。锌肥于 2013 年 3 月 10 日(拔节阶段)施用,设置 3 个处理梯度 T₁、T₂、T₃:分别施用 300、600、900 kg/hm² ZnSO₄·7H₂O(Zn 质量分数为 20%);施肥处理组外设置一个空白对照组(T₀),除不施用锌肥外,其余操作均等同施肥处理组。试验随机区组排列,小区面积 50 m²(1.25 m × 40 m),每个处理组 3 次重复。田间栽培管理按大田常规操作进行。

2013—2014 年度,小麦播种前,大田施用 60 kg/hm² N(尿素)+ 60 kg/hm² P₂O₅(过磷酸钙)+120 kg/hm² K₂O(氯化钾)作为基肥。小麦于 2013 年 10 月 28 日播种,播种量为 187.5 ~ 195 kg/hm²,在小麦春后分蘖拔节期追施 120 kg/hm² N(尿素)。锌肥于 2014 年 2 月 25 日(拔节阶段)施用,设置 5 个处理梯度 T₁、T₂、T₃、T₄、T₅:分别施用 300、600、900、1 200、1 500 kg/hm² ZnSO₄·7H₂O(Zn 质量分数为 20%);施肥处理组外设置一个空白对照组(T₀),除不施用锌肥外,其余操作均等同施肥处理组。试验随机区组排列,小区面积 50 m²(1.25 m × 40 m),每个处理组 3 次重复。田间栽培管理按大田常规操作进行。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 样品的采集 2012—2013 年度的小麦试验中,于 2013 年 6 月 2 日采集小麦籽粒样品;2013—2014 年度的小麦试验中,于 2014 年 5 月 29 日采集小麦籽粒样品。每个小区随机采集小麦成熟穗 50 个作为一个混合样,每个小区取 3 个平行样。样品采集后,将小麦籽粒从麦穗中分离,随后反复用清水洗净,

并用去离子水冲洗后,于 110 °C 杀青,60 °C 烘干 48 h 恒重后称干重。用不锈钢粉碎机粉碎后,过 60 目筛,密封、保存留待分析。

1.3.2 锌含量的测定 锌含量采用 HNO₃:HClO₄ (4:1)混酸-电热板消解,原子吸收光谱仪(PE Analyst 700)进行测定^[21]。样品检测过程以植物标样 GBW07603 (GSV-2)进行质量控制,相对标准偏差均小于 5%,方法回收率不低于 95%。

1.3.3 植酸含量测定方法(火焰原子吸收测铁法) 植酸含量的测定原理是小麦籽粒中的植酸与 Fe³⁺ 结合生成沉淀,通过测定沉淀中的铁含量计算植酸含量。具体步骤为:准确称取 0.3 g 样品,置于 50 ml 塑料离心管内,加 10 ml 0.2 mol/L HCl,室温下震荡提取 2 h,10 000 r/min 离心 10 min 后取上清液;取 2.5 ml 上清液,加入 2 ml 0.2% 水合 FeCl₃ 溶液,沸水浴 30 min,冷却后 10 000 r/min 离心 10 min 后弃去上清液;用 5 ml 18.2 MΩ/cm 去离子水冲洗两次,加入 3 ml 1.5 mol/L NaOH 溶液,充分振荡 2 min,10 000 r/min 离心 10 min,弃去上清液;加入 3 ml 0.5 mol/L HCl 溶液,形成 FeCl₃ 溶液并定容至 25ml,用火焰原子吸收光谱仪(PE Analyst 700)测定铁浓度。每个样品平行测定 3 次,方法加标回收率为 95.6% ~ 104.3%。

1.4 数据分析

$$C_{PA} = \frac{660 \times V_1 \times V_2 \times C_{Fe}}{55.8 \times 4.2 \times 1000 \times V_3 \times m} \quad (1)$$

$$R_{PA/Zn} = \frac{65 \times 1000 \times C_{PA}}{660 \times C_{Zn}} \quad (2)$$

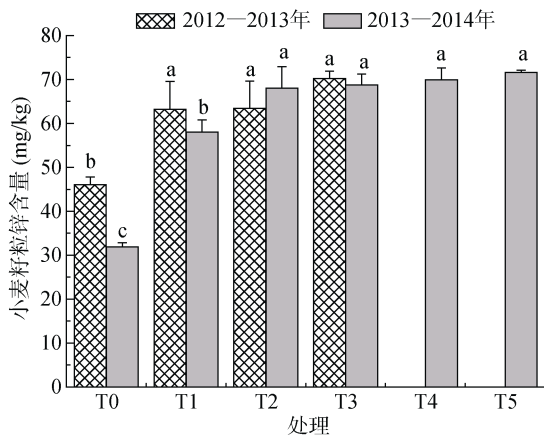
式中: C_{PA} 为小麦籽粒植酸含量(g/kg); V₁ 为 0.2 mol/L 的 HCl 加入体积 (10 ml); V₂ 为最终定容体积(25 ml); V₃ 为移取的上清液体积(2.5 ml); C_{Fe} 为上机检测的铁浓度(mg/L); m 为称取样品的重量(g); R_{PA/Zn} 为植酸/锌摩尔比; C_{Zn} 为小麦籽粒锌含量(mg/kg); 660、55.8 和 65 分别为植酸、铁和锌的摩尔质量; 4.2 为植酸与铁的结合系数; 1 000 为单位换算系数,

数据采用 SPSS 19.0 进行方差分析(多重比较采用 Duncan 法),采用 Origin 7.5 作图。

2 结果与分析

2.1 施锌对小麦籽粒锌含量的影响

拔节期施用不同用量锌肥处理,小麦籽粒中锌含量的分析结果见图 1。2012—2013 年度试验中,小麦成熟时籽粒的锌含量随着锌肥用量的提高而显著上升。未施加锌肥时(T0),小麦籽粒锌含量为 46.0 mg/kg;当施用 300 kg/hm² ZnSO₄·7H₂O 时(T1),锌含量显著上升至 63.2 mg/kg;进一步增加锌肥施用量至 600 kg/hm²(T2),其锌含量并没有得到提高,稳定在 63.4 mg/kg;而当施锌量提高至 900 kg/hm²时(T3),其锌含量继续上升至 70.2 mg/kg。



(T0、T1、T2、T3、T4、T5 分别对应文中 0、300、600、900、1 200、1 500 kg/hm² ZnSO₄·7H₂O 处理;同一年度小麦籽粒锌含量小写字母不同表示处理间差异显著(P<0.05),下同)

图 1 施锌后小麦籽粒锌含量

Fig. 1 Zinc concentrations in wheat grains after zinc fertilization

2013—2014 年度试验中,小麦成熟时籽粒的锌含量随着锌肥用量的提高而显著上升。未施加锌肥时(T0),小麦籽粒锌含量为 31.9 mg/kg;当施用 300 kg/hm² ZnSO₄·7H₂O 时(T1),其锌含量显著上升至 58.0 mg/kg;进一步增加锌肥施用量至 600 kg/hm²时(T2),其锌含量进一步小幅提高至 68.0 mg/kg;而当施锌量继续提高时,小麦籽粒锌含量的提升幅度不明显,在施锌量达到 900、1 200 和 1 500 kg/hm²时(T3、T4、T5),其锌含量仅分别小幅上升至 68.7、69.9、71.6 mg/kg。

2.2 施锌对小麦籽粒植酸含量的影响

拔节期施用不同用量锌肥处理,小麦籽粒中植酸含量的分析结果见图 2。2012—2013 年度试验中,小麦成熟时籽粒的植酸含量随着锌肥用量的提高而呈现小幅下降的趋势。未施加锌肥时(T0),小麦籽粒植酸平均含量为 12.2 g/kg;当施用 300 kg/hm² ZnSO₄·7H₂O

时(T1),其植酸含量小幅下降至 11.1 g/kg;进一步增加锌肥施用量至 600 kg/hm²时(T2),其植酸含量并没有发生显著变化,为 11.4 g/kg;而继续提高施锌量至 900 kg/hm²(T3)后,小麦籽粒中植酸的含量又呈现小幅下降的趋势,为 10.9 g/kg。

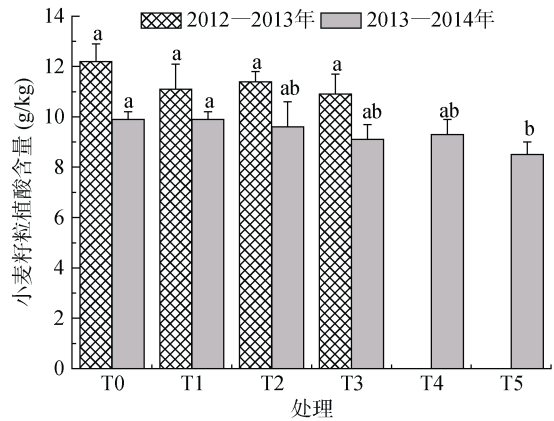


图 2 施锌后小麦籽粒植酸含量

Fig. 2 Phytic acid concentrations in wheat grains after zinc fertilization

2013—2014 年度试验中,小麦成熟时籽粒的植酸含量随着锌肥用量的提高同样呈现小幅下降的趋势。未施加锌肥时(T0),小麦籽粒植酸平均含量为 9.9 g/kg;当施用 300 kg/hm² ZnSO₄·7H₂O 时(T1),其植酸含量没有变化;而施加 600、900、1 200 kg/hm² 锌肥时(T2、T3、T4),其平均植酸含量分别下降至 9.6、9.1、9.3 g/kg;进一步增加锌肥施用量至 1 500 kg/hm²时(T5),其植酸的含量进一步显著下降,低至 8.5 g/kg。

2.3 施锌对小麦籽粒植酸/锌摩尔比的影响

拔节期施用不同用量锌肥处理,小麦籽粒中植酸/锌摩尔比的分析结果见图 3。2012—2013 年度试验中,整体表现为施用锌肥处理后,小麦籽粒的植酸/锌摩尔比呈下降趋势。未施加锌肥时,小麦籽粒中植酸与锌的摩尔比为 26.2,而施用 300 kg/hm² ZnSO₄·7H₂O 时(T1),其平均植酸/锌摩尔比大幅下降至 17.3;进一步增加锌肥施用量至 600 kg/hm²时,其植酸/锌摩尔比并没有显著变化;而当施锌量提高至 900 kg/hm²时(T3),其植酸/锌摩尔比进一步下降至 15.3。

2013—2014 年度试验中,随着施用锌肥量的增加,小麦籽粒的植酸/锌摩尔比呈下降趋势。未施加锌肥时,小麦籽粒中植酸与锌的摩尔比为 30.7;而施用 300 kg/hm² ZnSO₄·7H₂O 时(T1),其平均植酸/锌摩尔比大幅下降至 16.7;进一步增加锌肥施用量至 600 kg/hm²时,其平均植酸/锌摩尔比则下降至 14.0;当

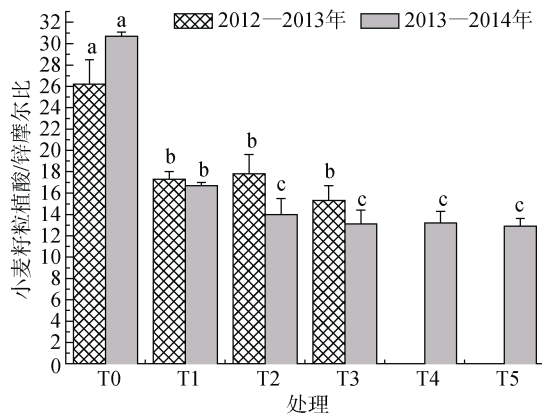


图 3 施锌后小麦籽粒植酸/锌摩尔比

Fig. 3 Molar ratios of phytic acid/zinc in wheat grains after zinc fertilization

施锌量提高至 900、1 200 kg/hm² 时(T3、T4), 小麦籽粒的植酸/锌摩尔比小幅下降, 分别降至 13.1、13.2; 而当施用 1 500 kg/hm² ZnSO₄·7H₂O 时(T5), 其植酸/锌摩尔比进一步下降至 12.9。

3 讨论

3.1 施锌对小麦籽粒锌含量的影响

在 2012—2013 年度试验中, 拔节期施锌量达 900 kg/hm² ZnSO₄·7H₂O 能使得小麦籽粒锌含量提高至 70.2 mg/kg。2013—2014 年度试验中, 锌肥施加量进一步提高, 最高仅能使得小麦籽粒锌含量提高至 71.6 mg/kg。从两期的试验中, 发现不同时期土施 300 ~ 1 500 kg/hm² ZnSO₄·7H₂O 均可使得小麦籽粒锌含量得到显著提升, 总体从约 30 ~ 45 mg/kg 提升至 60 mg/kg。目前, 有很多研究通过向土壤施加锌肥的农业锌强化方式来探究施锌对小麦籽粒锌的强化效果, 本研究结果与大量研究一致, 即土施锌肥能够显著提高小麦籽粒中的锌含量^[22-25]。虽然施锌可以提高小麦籽粒的锌含量, 但是在目前的研究中, 锌含量能提高的上限却是有限的。在 Wang 等人^[26]的研究中, 进行了为期两年的小麦锌强化研究, 在施加 50 kg/hm² 锌肥(ZnSO₄·7H₂O)的情况下, 小麦籽粒中的锌含量在第一年的试验中仅从 18.8 mg/kg 提高到 19.5 mg/kg, 而在第二年中, 从 23.1 mg/kg 提高到 29.1 mg/kg; 而在郭九信等人^[27]的试验中, 小麦田中锌肥的施加量被提高到 150 kg/hm², 在这样高的锌肥用量下, 小麦籽粒锌含量也没能超过 50 mg/kg。

然而, 小麦籽粒中的锌含量必须提高到 40 ~ 45 mg/kg 才能对人们的健康产生显著的影响^[28], 国际农业研究咨询小组(CGIAR)也建议需将小麦籽粒锌含量提升一倍^[29], 但 Cakmak^[23]认为小麦籽粒锌含

量只有强化到 60 mg/kg 以上时才能满足人们对于锌的需求。在本试验中, 我们设定了高于一般锌肥用量的高施锌梯度, 锌施加量的进一步提高也进一步提升了小麦籽粒的锌含量, 但最小的 300 kg/hm² ZnSO₄·7H₂O 的施锌量即可使得小麦籽粒锌含量提升至 60 mg/kg, 这个施肥量相比于试验中其他更高梯度的施肥量具有最大的经济效果。

3.2 施锌对小麦籽粒植酸含量和植酸/锌摩尔比的影响

2012—2013 年度的试验中, 拔节期土施 900 kg/hm² ZnSO₄·7H₂O 能使得小麦籽粒植酸含量下降至 10.9 g/kg。2013—2014 年度的试验中, 锌肥施加量进一步提高, 最高能使得小麦籽粒植酸含量下降至 8.5 mg/kg。从两期的试验结果来看, 土壤施锌均显著降低了小麦籽粒中的植酸含量, 这与 Erdal 等人^[30]的结果一致。小麦籽粒中 70% 的磷是以占据小麦籽粒重量 1% 的植酸盐的形式存在^[31]。Lolas 等人^[32]的研究发现, 小麦籽粒中的植酸含量和磷含量之间呈现极高的正相关关系, 两者之间的线性关系可通过下述方程表述:

$$\text{总磷含量}(\%, \text{干重}) = 0.096 + 0.3 \times \text{植酸含量}(\%, \text{干重}) \quad r = 0.9682$$

由此可见, 小麦籽粒中的磷和植酸含量之间可以通过上述方程进行换算。因此, 我们也推测, 在本试验中, 小麦籽粒中的磷含量也随着施锌量的增加而显著降低。

Erdal 等人^[30]在缺锌土壤上进行的早期试验中, 选择了 20 个小麦品种(系)用来进行锌强化试验, 当施加 23 kg/hm² Zn 后, 小麦籽粒中的磷和锌含量都受到锌肥施加量的影响而显著下降, 小麦籽粒中磷含量从 3.9 g/kg 下降至 3.5 g/kg, 而植酸含量则从 10.7 g/kg 下降至 9.1 g/kg, 这被认为是由于施锌带来的增产而导致的稀释效应引起的。在严重缺锌的土壤上, 锌的缺乏导致植物吸收更多的锌, 从而可以导致植酸含量的上升^[33-34]。但是, 在潜在缺锌土壤上土施 50 kg/hm² ZnSO₄·7H₂O(23% Zn)却并没有导致小麦籽粒中磷和植酸含量的下降^[35], 这可能是由于土壤本底有效锌含量还不是很低, 而施加的锌的量也不是很高或是被土壤有机质、Mg²⁺、HCO₃⁻和 Na⁺ 固定或影响^[36-37], 以至于施加到土壤中的锌无法显著提高土壤有效锌含量。

由此看来, 土壤施锌对小麦籽粒中的磷和植酸含量的影响不但受到土壤有效锌背景值的影响, 还和锌的施加量有关。也就是说, 在严重缺锌的土壤上, 施

加锌肥可导致小麦籽粒中磷和植酸含量的显著下降；而在潜在缺锌的土壤上，施加小用量的锌肥并不能对小麦籽粒中的磷和植酸含量产生显著影响。而在本试验更高的土壤有效锌含量的土壤中，施加更高用量的锌肥同样可以显著降低小麦籽粒的磷和植酸含量。施锌对小麦籽粒中磷和植酸含量的影响也归因于产量增加带来的稀释效应以及土壤缺锌刺激植物对磷的吸收作用；此外，在锌的胁迫下，小麦植株或许还有其独特的调节磷和植酸的方法，土壤中磷被土施的过量锌盐固定而造成磷无法被植物吸收也可能是造成小麦籽粒磷和植酸含量下降的原因。

植酸/锌摩尔比常常被用来衡量植酸对锌的影响程度，小麦籽粒中过高的植酸/锌摩尔比会抑制小麦籽粒中锌的生物有效性。小麦籽粒中的植酸/锌摩尔比往往都超过 20^[20]。而一般认为，影响锌吸收的植酸/锌摩尔比的临界值为 15^[15-17]，植酸/锌摩尔比超过 15 时，锌的吸收将受到严重抑制，低于 5 时则对锌的吸收完全没有影响^[18]。

在本试验的对照组小麦籽粒中，植酸/锌摩尔比达到了 26.2 和 30.7，小麦籽粒中锌的生物有效性将严重受到植酸的影响。而施锌后，小麦籽粒中的植酸/锌摩尔比均随着施锌量呈现显著下降的趋势。在拔节期施加锌肥后，当施锌量不超过 300 kg/hm² ZnSO₄·7H₂O 时，小麦籽粒的植酸/锌摩尔比高于 15；而提高锌施用量后，小麦籽粒的植酸/锌摩尔比继续下降，但最终均高于 13，可见拔节期继续提高施锌量并不能显著提高小麦籽粒中锌的生物有效性。

在较低的锌肥施用量下，小麦籽粒中锌的生物有效性仍然较低，而更高的锌肥施用量能显著提高小麦籽粒中锌的生物有效性。虽然植酸/锌摩尔比被广泛用于评价作物籽粒中锌的生物可利用性，但从营养学研究的角度来看，这个指标仅仅是从膳食营养的角度评价籽粒的锌供给能力，不足以直观反映营养物质被机体吸收利用的情况，这就需要具体的动物试验来验证。

4 结论

在两期的试验中，通过土施 300 ~ 1 500 kg/hm² ZnSO₄·7H₂O (Zn 的质量分数为 20%)，小麦籽粒中的锌含量得到显著的提高，与施锌量之间总体呈显著的正相关关系；小麦籽粒的锌含量总体从对照组的约 30 ~ 45 mg/kg 提升至 60 mg/kg。小麦经过锌的农业生物营养强化后，其籽粒中植酸和植酸/锌摩尔比与锌肥的施加量之间均呈现显著的负相关关系。小麦籽

粒中的植酸含量最多可从对照组的 9.9 ~ 12.2 g/kg 下降至 8.5 g/kg。对照组中，植酸/锌摩尔比达到了 26.2、30.7，大大超过了严重影响锌吸收性的临界值 15；而拔节期施锌肥能使植酸/锌摩尔比最低下降至 13，小麦籽粒中锌的生物有效性得到提高。从本研究的各个方面综合考虑，通过土壤施加锌肥的方式来提高小麦籽粒的锌含量是一套可行的锌的农业营养强化策略，对于锌缺乏人群通过食物补锌具有重要作用，也对其其他作物中锌的农业生物营养强化具有指导意义。

参考文献：

- [1] Wessells K R, Brown K H. Estimating the global prevalence of zinc deficiency: Results based on zinc availability in national food supplies and the prevalence of stunting[J]. *Plos One*, 2012, 7(8): e50568
- [2] Wang Z M, Liu Q, Pan F, et al. Effects of increasing rates of zinc fertilization on phytic acid and phytic acid/zinc molar ratio in zinc bio-fortified wheat[J]. *Field Crops Research*, 2015, 184: 58-64
- [3] Monasterio I, Graham R D. Breeding for trace minerals in wheat[J]. *Food and Nutrition Bulletin*, 2000, 21: 393-396
- [4] Liu H, Wang Z H, Li F C, et al. Grain iron and zinc concentrations of wheat and their relationships to yield in major wheat production areas in China[J]. *Field Crops Research*, 2014, 156: 151-160
- [5] Wissuwa M, Ismail A M, Graham R D. Rice grain zinc concentrations as affected by genotype, native soil-zinc availability, and zinc fertilization[J]. *Plant and Soil*, 2008, 306(1/2): 37-48
- [6] Hajiboland R, Beiramzadeh N. Rhizosphere properties of rice genotypes as influenced by anoxia and availability of zinc and iron[J]. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 2008, 43(5): 613-622
- [7] Prasad B, Kumar M, Prasad J. Direct and residual effect of organic wastes and zinc-sulfate on zinc availability under cropping sequence of wheat (*triticum-aestivum* Rice (*Oryza-Sativa*) in calcareous soil[J]. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 1989, 59(5): 300-305
- [8] White P J, Broadley M R. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets - iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine[J]. *New Phytologist*, 2009, 182: 49-84
- [9] Lott J N A, Ockenden I, Raboy V, et al. Phytic acid and phosphorus in crop seeds and fruits: A global estimate[J]. *Seed Science Research*, 2000, 10(1): 11-33
- [10] Schlegel P, Nys Y, Jondreville C. Zinc availability and digestive zinc solubility in piglets and broilers fed diets varying in their phytate contents, phytase activity and supplemented zinc source[J]. *Animal*, 2010, 4(2): 200-209
- [11] 李秀丽. 供锌对小麦籽粒不同脱皮组分中锌生物有效性的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2011

- [12] Carnovale E, Lugaro E, Lombardi-Boecia G, et al. Phytic acid in faba bean and pea: Effect on protein availability[J]. *Cereal Chemistry*, 1998, 65: 114–117
- [13] 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
- [14] Kwun I S, Kwon C S. Dietary molar ratios of phytate: Zinc and millimolar ratios of phytate:calcium: Zinc in South Koreans[J]. *Biological Trace Element Research*, 2000, 75: 29–41
- [15] Turnlund J R, King J C, Keyes W R, et al. A stable isotope study of zinc absorption in young men: Effects on phytate and R-cellulose[J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 1984, 40: 1071–1077
- [16] Gargari B P, Mahboob S, Razavieh S V. Content of phytic acid and its mole ratio to zinc in flour and breads consumed in Tabriz Iran[J]. *Food Chemistry*, 2007, 100: 1115–1119
- [17] Ryan M H, McInerney J K, Record I 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
- [18] 韩宗辉, 王振林. 可利用锌的摄入量与食物中植酸含量的关系[J]. *国外医学地理分册*, 2006, 27(1): 28–29, 48
- [19] Febles C, Arias A, Hardisson A, et al. Phytic acid level in wheat flours[J]. *Journal of Cereal Science*, 2002, 36(1): 19–23
- [20] 曹玉贤, 田霄鸿, 杨习文, 等. 土施和喷施锌肥对冬小麦子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
- [21] 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
- [22] 郝明德, 魏孝荣, 党廷辉, 等. 旱地长期施用锌肥对小麦吸锌及产量的影响[J]. *生态环境*, 2003, 12(1): 46–48
- [23] Cakmak I. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification? [J]. *Plant Soil*, 2008, 302: 1–17
- [24] Cakmak I. Biofortification of cereal grains with zinc through fertilizer strategy[J]. *Annals of Nutrition and Metabolism*, 2009, 55: 377
- [25] Cakmak I. Enrichment of fertilizers with zinc: An excellent investment for humanity and crop production in India[J]. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2009, 23: 281–289
- [26] Wang J W, Mao H, Zhao H B, et al. Different increases in maize and wheat grain zinc concentrations caused by soil and foliar applications of zinc in Loess Plateau, China[J]. *Field Crops Research*, 2012, 135: 89–96
- [27] 郭九信, 廖文强, 凌宁, 等. 氮锌配施对小麦产量及氮锌含量的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2013, 36(2): 77–82
- [28] Ortiz-Monasterio J I, Palacios-Rojas N, Meng E, et al. Enhancing the mineral and vitamin content of wheat and maize through plant breeding[J]. *Journal of Cereal Science*, 2007, 46: 293–307
- [29] Bouis H E, Graham R D, Welch R M. The Consultative group on international agricultural research (CGIAR) micronutrients project: Justification and objectives[J]. *Food and Nutrition Bulletin*, 2000, 21(4): 374–381
- [30] 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*, 2002, 25(1): 113–127
- [31] Lott J N A. Accumulation of seed reserves of phosphorus and other minerals // Murray D R. *Seed physiology*[M]. Sydney, Australia: Academic Press, 1984, 1: 154–196
- [32] Lolos G M, Palamidis N, Markakis P. The phytic acid-total phosphorus relationship in barley, oats, soybeans, and wheat[J]. *Cereal Chemistry*, 1976, 53(6): 867–871
- [33] Cakmak I, Marschner H. Mechanism of phosphorus induced zinc deficiency in cotton. I. Zinc deficiency-enhanced uptake rate of phosphorus[J]. *Physiologia Plantarum*, 1986, 68: 483–490
- [34] Loneragan J F, Grunes D L, Welch R M, et al. Phosphorus accumulation and toxicity in leaves in relation to zinc supply[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, 46: 345–352
- [35] 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
- [36] 陆欣春, 邹文秀, 韩晓增, 等. 黑土锌有效度的物理化学研究法[J]. *土壤学报*, 2016, 53(4): 985–994
- [37] 杨思存, 霍琳, 王成宝, 等. 绿洲盐化潮土有效锌含量与盐分离子的相关性及其通径分析[J]. *土壤*, 2017, 49(3): 550–557

Effect of Zinc Application at Jointing Stage on Zinc Bioavailability in Wheat Grain

WANG Zhangmin^{1,2}, PAN Fei¹, LIU Qi¹, YUAN Linxi¹, DUAN Zengqiang², YIN Xuebin^{1*}

(1 *Jiangsu Bio-Engineering Research Center for Selenium, Suzhou, Jiangsu 215123, China*; 2 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*)

Abstract: In this study, a two-year field experiment was conducted and the molar ratio of phytic acid/zinc was used to explore and assess the effects of zinc (Zn) fertilization on Zn bioavailability in wheat grains (*Triticum Aestivum* Linn. cv. Yang Mai 16) by applying increasing rates of Zn fertilizers during the jointing stage. The results showed that Zn concentration in wheat grains was significantly increased while the molar ratio of phytic acid/Zn was significantly decreased with increasing rate of Zn fertilizer. Under 300 kg/hm² of ZnSO₄·7H₂O, Zn concentration in wheat grains was increased to over 60 mg/kg and the molar ratio of phytic acid/Zn decreased to below 15. It indicated that Zn bioavailability in wheat grains is significantly improved when wheat is fortified with Zn.

Key words: Wheat; Zinc fertilizer; Zinc concentration in wheat grains; Molar ratio of phytic acid/zinc; Bioavailability