

土壤和叶面施锌对小麦农艺性状、籽粒产量和对锌、铁及硒微量元素浓度的影响

王 澜^{1,2}, 夏海勇^{1,2,3,4}, 孔玮琳², 贤伟华⁵, 马国兴⁶, 王子浩⁷,

张荣亭⁸, 李豪圣^{2,4}, 龚魁杰^{2,4}, 刘开昌^{2,3,4}

(¹山东师范大学生命科学学院, 济南 250014; ²山东省农业科学院作物研究所/

山东省作物遗传改良与生态生理重点实验室/小麦玉米国家工程实验室, 济南 250100;

³青岛农业大学农学院, 山东青岛 266109; ⁴山东省农业科学院(菏泽)小麦产业技术研究院, 济南 250100;

⁵东明县农业农村局, 山东东明 274500; ⁶东明县益康源食品有限公司, 山东东明 274507;

⁷中化农业(临沂)研发中心有限公司, 山东临沂 276000; ⁸济南市农业科学研究院, 济南 250316)

摘要: 锌(Zn)是动植物和人体必需的微量元素,能预防肺炎等疾病和提高人体免疫功能。小麦作为中国主要粮食作物,为满足人体对锌的营养需求,提高小麦籽粒锌含量十分必要。为给优质富锌小麦生产提供理论依据和技术支撑,通过在田间条件下进行土壤和叶面施锌试验,研究其对小麦农艺性状和籽粒产量的影响,尤其是对籽粒锌浓度的生物强化效果,以及对籽粒中其他2种有益微量元素(铁和硒)的影响规律。结果表明:土施锌肥使小麦穗数从447.0万穗/hm²增加到511.5万穗/hm²,增幅14.4%。土壤和叶面施Zn使得小麦籽粒产量从5419.5~6250.5 kg/hm²增加到6372.0~6811.5 kg/hm²,增幅5.2%~17.6%,对籽粒铁和硒浓度均无显著影响,有效提升籽粒Zn浓度,从34.0~39.6 mg/kg提高到44.6~46.6 mg/kg,增幅17.7%~32.9%,达到世界卫生组织等机构和科学家所推荐的生物强化目标值(40~50 mg/kg)。因此,土壤和叶面施Zn提高小麦产量的同时,可以提升籽粒锌营养品质,是实现小麦提质增效的有效途径,建议大面积推广应用。

关键词: 小麦;微量元素;施肥;营养强化;提质增效

中图分类号:S512.1

文献标志码:A

论文编号:casb2020-0206

Effects of Soil and Foliar Zinc Application on Agronomic Traits, Grain Yield and Grain Zinc, Iron and Selenium Concentration of Wheat

Wang Lan^{1,2}, Xia Haiyong^{1,2,3,4}, Kong Weilin², Xian Weihua⁵, Ma Guoxing⁶, Wang Zihao⁷,

Zhang Rongting⁸, Li Haosheng^{2,4}, Gong Kuijie^{2,4}, Liu Kaichang^{2,3,4}

(¹College of Life Sciences, Shandong Normal University, Jinan 250014, Shandong, China;

²Crop Research Institute, Shandong Academy of Agricultural Sciences/Shandong Provincial Key Laboratory of Crop Genetic Improvement, Ecology and Physiology/National Engineering Laboratory for Wheat and Maize, Jinan 250100, Shandong, China;

³College of Agronomy, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, Shandong, China;

⁴Wheat Industrial Technology Research Institute of Heze, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100,

基金项目: 山东省重点研发计划(公益性科技攻关类)项目“小麦籽粒锌营养强化肥料运筹技术与示范”(2018GNC111012);山东省农业科学院农业科技创新工程项目“主要农作物轮作制度关键技术”(CXGC2016B04);山东农业大学作物生物学国家重点实验室开放课题“叶面喷施铁锌微肥对小麦籽粒铁和锌浓度、化学形态和生物有效性的影响”(2016KF05);国家重点研发计划项目“黄淮海粮油作物间套作资源高效利用研究”(2016YFD0300202)。

第一作者简介: 王澜,女,1996年出生,山东济南人,在读硕士研究生,主要从事植物营养与生理生态研究。通信地址:250100 山东省济南市历城区工业北路202号 山东省农业科学院, Tel:0531-66659845, E-mail:878964372@qq.com。

通讯作者: 夏海勇,男,1983年出生,山东平邑人,副研究员,博士,主要从事耕作与农业生态、作物高产高效和植物营养与生理生态及作物微量元素营养强化研究。通信地址:250100 山东省济南市历城区工业北路202号 山东省农业科学院, Tel:0531-66659845, E-mail:haiyongxiasaas@163.com。

收稿日期: 2020-09-18, **修回日期:** 2020-11-24。

Shandong, China; ⁵*Dongming County Bureau of Agriculture and Rural Affairs*, Dongming 274500, Shandong, China;

⁶*Yikangyuan Food Co., Ltd.*, Dongming 274507, Shandong, China; ⁷*Sinochem Agriculture Linyi R&D Center Co., Ltd.*,

Linyi 276000, Shandong, China; ⁸*Jinan Academy of Agricultural Sciences*, Jinan 250316, Shandong, China)

Abstract: Zinc (Zn) is an essential micronutrient element for the growth and development of animals, plants and the human body, which can prevent pneumonia and other diseases and improve human immune function. Wheat (*Triticum aestivum* L.) is a major food crop in China, to meet the nutritional demand of human body for Zn, it is necessary to increase the Zn concentration in wheat grains. To provide a theoretical basis and technical support for the production of high quality wheat grains enriched with Zn, effects of soil and foliar Zn application on agronomic traits, grain yield, and the concentration of Zn (in particular) and also other two beneficial micronutrients including iron (Fe) and selenium (Se) in wheat grains were investigated under field condition. The results showed that the number of wheat ears of per hectare increased from 4470 thousand to 5115 thousand by soil Zn application, with an increase of 14.4%. Soil and foliar Zn application increased the grain yields of wheat from 5419.5–6250.5 kg/hm² to 6372.0–6811.5 kg/hm² with an increase rate of 5.2%–17.6%. Simultaneously, it had non-significant effect on the concentration of Fe and Se in grains, but effectively increased the Zn concentration from 34.0–39.6 mg/kg to 44.6–46.6 mg/kg with an increase rate of 17.7%–32.9%, achieving the target value of biofortification recommended by the World Health Organization and other institutions and scientists (40–50 mg/kg). Therefore, the application of Zn via soil and foliar spraying could improve the nutritional quality of grain Zn while increasing wheat yield, which is an effective way to improve the quality and efficiency of wheat production and is worth popularizing in large scale.

Keywords: Wheat; Micronutrient; Fertilization; Nutrition Fortification; Improve Quality and Efficiency

0 引言

锌(Zn)是植物、动物和人体生长发育不可或缺的微量元素。据报道,全球60亿人口中有30%以上出现缺锌症状,包括生长迟缓、厌食、味觉减退、腹泻、肺炎、妊娠问题和其他一些免疫功能降低和代谢紊乱慢性疾病,特别是在发展中国家和农村地区^[1-2]。在中国,至少有1亿人口,尤其是生活在农村地区的孕期妇女和5岁以下儿童,长期处于缺锌所导致的“隐性饥饿”状态^[3]。小麦是世界最主要的粮食作物之一,占人类每日能量摄取量的30%。据调查,中国小麦七个主产省份籽粒锌含量的平均值仅为23.3 mg/kg,黄淮海平原小麦种植区的43个小麦品种籽粒锌平均浓度仅为28.6 mg/kg,远低于世界卫生组织、联合国粮农组织和比尔及梅琳达·盖茨基金会 HarvestPlus 项目等机构和科学家所推荐的40~50 mg/kg的生物强化目标值^[4-7]。除小麦籽粒中锌浓度较低外,由于籽粒中一些植酸和酚类等抗营养化合物的存在,导致锌在人体消化道中的生物有效性较低。另外,在小麦磨粉加工过程中,由于去掉了锌含量较高的麸皮和糊粉层,进一步降低了锌的含量,其锌含量一般仅介于5~10 mg/kg,远远不能满足面粉中15~30 mg/kg人体膳食锌需求^[8]。考虑到小麦在中国消费量较大,且长期处于缺锌状况的人口众多,亟待通过提高小麦籽粒锌含量来有效解决人体

锌营养不良的问题,市场需求空间巨大^[9]。

山东省土壤类型大部分为碱性钙质土,土壤中的有效锌含量普遍较低^[10-11]。据全国第二次土壤调查结果表明,山东省一半以上的土壤缺锌,从而限制小麦产量和籽粒锌含量。山东省内诸多以往研究表明,通过土壤和叶面施肥管理措施可以有效改善小麦缺锌症状,提高籽粒产量,而对锌浓度是否达到生物强化目标值关注较少,即以往研究更多停留在施锌矫正缺素症状和保证产量方面,而从人体锌营养健康角度,对籽粒锌营养品质的研究相对缺乏^[12-13]。随着中国社会由温饱向全面小康阶段的转变,吃得好,吃得健康,提高小麦籽粒锌含量使其达到生物强化目标值将越来越受到重视,人们对优质普惠农产品的需求愈加迫切^[14]。

山东省科技主管部门和诸多农业企业已经开始意识到发展优质富锌小麦的重要性和广阔前景。比如,2019年山东省农业良种工程“优质专用小麦突破性新品种选育”申报指南中,明确提出选育富含铁锌的小麦新品种;2019年山东种业集团与德州市合作大力推动实施营养型农业产业化项目,以作物营养强化技术体系为核心,致力于提高粮食等作物中的人体必需微量元素、健康功能因子的含量,通过在新品种育种、绿色农艺与加工等方面进行全产业链融合,建设33333.3 hm²营养强化作物种植推广基地;山东玉杰面

粉有限公司正在建设山东全谷物营养健康食品科技产业园,开发、推广种植糊粉层含量高、富锌、适合高糖人群食用的功能型小麦新品种及功能型面制品。

与锌类似,铁(Fe)也是动植物和人体必需的微量元素,其生物强化研究与应用越来越受到重视^[15]。硒在预防艾滋病、增强抗癌能力和提高人体免疫功能等方面有显著作用,常被称作“生命的火种”,增加小麦籽粒特别是面粉中的硒含量是人体补硒的有效策略^[16]。我们前期研究发现,叶面喷锌在提高玉米籽粒锌浓度的同时,对籽粒铁含量也有一定增加作用^[17]。

本研究通过在田间条件下进行土壤和叶面施锌,研究其对小麦农艺性状和籽粒产量的影响,尤其是对籽粒锌浓度的生物强化效果,以及对籽粒中其他2种有益微量元素(铁和硒)的影响,为优质富锌小麦生产提供理论依据和技术支撑,助力作物绿色高质高效行动;这方面的研究对于保障粮食安全和改善山东省乃至全国以小麦为主食的人群微量元素缺乏现状,具有重要的理论和应用价值。

1 材料与方法

1.1 田间试验

土施锌肥试验于2018—2019年在菏泽市东明县麦丰小麦种植专业合作社进行,供试品种为优质强筋型‘济麦44’。共设2个处理(表1),对照为不施锌肥,另一处理底施30 kg ZnSO₄·7H₂O/hm²,各处理种植小麦面积为3.3 hm²。播种前底施复合肥(N-P₂O₅-K₂O, 15-15-15) 750 kg/hm²,拔节期追施尿素300 kg/hm²,其余管理措施同一般大田。成熟收获时,每个处理随机选取3个1 m²的样点,即3次重复,测定小麦籽粒产量及其构成因素。

叶面喷锌试验于2017—2018年在山东省农业科学院济阳试验示范基地进行,供试品种为高产广适型‘济麦22’。共设3种处理(表1),除对照不喷外,其余2个处理用背负式喷雾器人工大面积连片喷洒,25 mL/m²,每个处理喷0.53 hm²;在小麦开花后,分别于2018年5月8日、5月17日、5月25日和5月31日各喷一次,共计喷4次。播种前底施复合肥(N-P₂O₅-K₂O, 15-15-15) 750 kg/hm²,拔节期追施尿素300 kg/hm²,其余管理措施同一般大田。成熟收获时,每个处理随机选取5个1 m²的样点,即5次重复,测定小麦籽粒产量及其构成因素。

1.2 锌、铁和硒微量元素含量的测定

将籽粒样品于65~70℃烘干72 h,然后用不锈钢研磨机(RT-02B,中国台湾)粉磨。粉磨后的样品经微波消解后,锌和铁根据GB 5009.268—2016第二法,用电感耦合等离子体发射光谱仪分析测定,硒根据GB 5009.268—2016第一法,用电感耦合等离子体质谱仪分析测定。

1.3 数据分析

数据采用SAS 8.0进行单因素方差分析(ANOVA)和差异显著性检验(LSD 0.05)。

2 结果与分析

2.1 土壤施锌对小麦农艺性状的影响

产量三要素分别为穗数、穗粒数和千粒重,这三者对产量的形成至关重要。从表2看出,土施Zn肥对小麦穗粒数、千粒重和收获指数均无显著影响,而使得穗数由447.0万穗/hm²显著增加至511.5万穗/hm²,籽粒产量也从5419.5 kg/hm²显著增加至6372.0 kg/hm²,增幅分别达到14.4%和17.6%。因此,土施Zn肥通过增

表1 田间试验处理

试验名称	试验处理	肥料用量或叶面喷施溶液组成
土施Zn肥	CK-不施Zn	0
	土施Zn肥	30 kg ZnSO ₄ ·7H ₂ O/hm ²
叶面喷Zn	CK	对照
	叶面喷Zn	ZnSO ₄ ·7H ₂ O (0.4%, w/v)+吐温20 (0.01%, v/v)
	叶面喷Zn和蔗糖	ZnSO ₄ ·7H ₂ O (0.4%, w/v)+蔗糖(2.0%, w/v)+吐温20 (0.01%, v/v)

表2 不同土壤处理对小麦考种性状、籽粒产量和收获指数的影响

试验处理	穗数/(万穗/hm ²)	穗粒数	千粒重/g	籽粒产量/(kg/hm ²)	收获指数
CK-不施Zn	447.0b	32.9a	45.3a	5419.5b	0.53a
土施Zn肥	511.5a	32.9a	44.1a	6372.0a	0.54a

注:同一列不同小写字母表示不同处理间差异显著(最小显著性差异法LSD 0.05水平),下同。

加穗数,可以有效提高小麦籽粒产量。

2.2 土壤施锌对小麦籽粒锌、铁和硒微量元素浓度的影响

土施 Zn 肥对小麦籽粒铁和硒浓度无显著影响(表 3)。对照中的籽粒锌浓度为 39.6 mg/kg,在土施 Zn 肥后显著提高至 46.6 mg/kg,增幅达 17.7%,达到了世界卫生组织、联合国粮农组织和比尔及梅琳达·盖茨基金会 HarvestPlus 项目等机构和科学家所推荐的 40~50 mg/kg 的生物强化目标值。由此证明,土施 Zn 肥可以有效提高籽粒锌营养品质。

表 3 不同土壤处理对小麦籽粒锌、铁和硒微量元素浓度的影响

试验处理	锌/(mg/kg)	铁/(mg/kg)	硒/(μg/kg)
CK-不施 Zn	39.6b	20.5a	29.7a
土施 Zn 肥	46.6a	18.8a	31.2a

表 4 不同叶面喷施处理对小麦考种性状、籽粒产量和收获指数的影响

试验处理	穗数/(万穗/hm ²)	穗粒数	千粒重/g	籽粒产量/(kg/hm ²)	收获指数
CK	546.0a	36.9a	37.8a	6250.5b	0.53a
叶面喷 Zn	556.5a	37.7a	40.2a	6811.5a	0.52a
叶面喷 Zn 和蔗糖	570.0a	36.6a	38.9a	6574.5a	0.53a

表 5 不同叶面喷施处理对小麦籽粒锌、铁和硒微量元素浓度的影响

试验处理	锌/(mg/kg)	铁/(mg/kg)	硒/(μg/kg)
CK	34.0b	37.8a	16.0a
叶面喷 Zn	44.6a	38.9a	15.5a
叶面喷 Zn 和蔗糖	45.2a	35.3a	14.0a

其增加至 45.2 mg/kg,增幅分别达 31.2%和 32.9%。叶面喷施处理均能使籽粒锌浓度达到世卫组织等机构和科学家所推荐的生物强化目标值(40~50 mg/kg),由此证明,叶面喷 Zn 同样可以有效提高籽粒锌营养品质。

3 讨论与结论

本研究中,土壤和叶面施 Zn 均能一定程度增加小麦籽粒产量,增幅介于 5.2%~14.4%(表 2 和表 4),这可能与试验土壤中本底有效态 Zn 含量较低有关。周伟^[18]研究表明,缺 Zn 土壤施用锌肥后,小麦籽粒产量提高。郝明德等^[19]通过在黄土高原长达 18 年的锌肥定位试验研究发现,锌肥施入后,小麦年均增产 99.5 kg/hm²。而在陕西关中地区的试验表明,土壤 DTPA-Zn 含量在 0.65~0.67 mg/kg 时,土施 Zn 肥对产量无明显影响^[20]。此外,绝大多数田间试验表明,作物

2.3 叶面喷锌对小麦农艺性状的影响

由表 4 得出,小麦穗数、穗粒数、千粒重和收获指数基本不受叶面喷施的影响。不同的是,叶面喷 Zn 后,籽粒产量由 6250.5 kg/hm² 显著增加至 6811.5 kg/hm²,增幅达 9.0%;叶面混合喷 Zn 和蔗糖同样起到了提高籽粒产量的效果,使其显著增加至 6574.5 kg/hm²,增幅 5.2%,但其增产效果不及单独叶面喷 Zn。由此证明,通过叶面施肥管理措施可以一定程度提高籽粒产量,但对与产量相关的其他农艺指标影响较小。

2.4 叶面喷锌对小麦籽粒锌、铁和硒微量元素浓度的影响

小麦籽粒铁和硒浓度均不受叶面喷 Zn、叶面混合喷 Zn 和蔗糖的影响(表 5)。单独喷 Zn 会使籽粒锌浓度显著提高,由对照的 34.0 mg/kg 增加至 44.6 mg/kg,蔗糖与 Zn 混合喷施对提高籽粒锌浓度的效果更佳,使

产量不会因叶面喷 Zn 而提高^[2,5]。Zn 喷施浓度过高(0.5%以上,w/v)会造成叶片灼烧,导致产量降低^[21]。总之,土壤和叶面施 Zn 一般不会对小麦产量造成负面影响,在土壤和植株处于缺锌状况时则会表现出明显增产作用,是避免出现缺 Zn 症状、保证和提高小麦产量的有效途径。

不施 Zn 情况下,优质强筋小麦‘济麦 44’籽粒锌含量高于高产广适型‘济麦 22’,不同品种之间存在差异;本研究通过大面积田间试验示范证实,土施 Zn 肥和叶面喷锌均使得供试小麦品种籽粒锌含量超过 40 mg/kg,即有效达到世卫组织等推荐的生物强化目标值^[4-7]。我们前期研究表明,土壤施 Zn 的同时结合叶面喷锌,能够使得小麦籽粒锌浓度接近或达到 60.0 mg/kg^[2],锌生物有效性也大幅提高,进一步凸显了这两种技术措施在籽粒锌营养强化方面的效果,可用来生产优质富锌功能食品(面粉、面条和面包等)。

玉米上的研究表明,叶面喷锌能够同时提高籽粒铁含量,起到“一石二鸟”的作用^[17]。本研究发现,不论土壤或叶面施 Zn,对小麦籽粒铁和硒含量均无显著影响,即元素间不存在拮抗或协同增效作用。谭德水等^[22]对山东省 248 户农民施肥情况调查表明,单独施用中微量元素肥料的户数不到 10%,且近年来单独施

用微量元素肥料的农户一直在减少。因此,通过在尿素、复混肥和缓/控释肥中添加微量元素,将有助于微肥的大范围应用。此外,叶面喷 Zn 的效果与喷施时期、浓度、次数和品种以及当地土壤和气候环境条件等有关^[21,23-25],通过研发新型叶面锌肥并借助无人机喷施技术大面积应用,提高喷施效率,将有助于节本增效。

综上,土壤和叶面施 Zn 使得小麦籽粒产量从 5419.5~6250.5 kg/hm² 增加到 6372.0~6811.5 kg/hm²,增幅 5.2%~17.6%,与此同时,有效提升籽粒 Zn 浓度,从 34.0~39.6 mg/kg 提高到 44.6~46.6 mg/kg,增幅达 17.7%~32.9%,达到世卫组织等机构和科学家所推荐的生物强化目标值(40~50 mg/kg)。因此,土壤和叶面施 Zn 提高小麦产量的同时,可以提升籽粒锌营养品质,是实现小麦提质增效的有效途径,可用来生产优质富锌功能食品(面粉、面条和面包等),增加麦制品附加值,带动种植户和加工企业增收,建议大面积推广应用。

参考文献

- [1] Xia H, Xue Y, Kong W, et al. Effects of source/sink manipulation on grain zinc accumulation by winter wheat genotypes[J]. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 2018, 78(1): 117-125.
- [2] Xia H, Xue Y, Liu D, et al. Rational application of fertilizer nitrogen to soil in combination with foliar Zn spraying improved Zn nutritional quality of wheat grains[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 677.
- [3] Ma G, Jin Y, Piao J, et al. Phytate, calcium, iron, and zinc contents and their molar ratios in foods commonly consumed in China[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2005, 53(26): 10285-10290.
- [4] Tang J, Zou C, He Z, et al. Mineral element distributions in milling fractions of Chinese wheats[J]. *Journal of Cereal Science*, 2008, 48(3): 821-828.
- [5] Wang J, Mao H, Zhao H, 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.
- [6] 郝元峰, 张勇, 何中虎. 作物锌生物强化研究进展[J]. *生命科学*, 2015, 27(8): 1047-1054.
- [7] Chen X P, Zhang Y Q, Tong Y P, et al. Harvesting more grain zinc of wheat for human health[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 7016.
- [8] Cakmak I, Kutman U B. Agronomic biofortification of cereals with zinc: a review[J]. *European Journal of Soil Science*, 2018, 69(1): 172-180.
- [9] 王澜, 乔月彤, 孔玮琳, 等. 小麦籽粒锌营养研究进展[J]. *山东农业科学*, 2019, 51(10): 158-166.
- [10] 谢骏. 山东省土壤微量元素建库及空间变异分析[D]. 济南: 山东大学, 2005.
- [11] 吴建明, 高贤彪, 高弼模, 等. 山东省土壤供锌状况及对锌的吸附[J]. *土壤学报*, 1991, 28(4): 452-456.
- [12] Xia H Y, Wang L, Qiao Y T, et al. Elucidating the source - sink relationships of zinc biofortification in wheat grains: A review[J]. *Food and Energy Security*, 2020, 00: e243.
- [13] Zhang W, Xue Y F, Chen X P, et al. Zinc nutrition for high productivity and human health in intensive production of wheat[J]. *ScienceDirect*, 2020, 163: 179-217.
- [14] Zhang X. Zinc in Wheat Grain, Processing, and Food[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2020, 7.
- [15] Singh D, Prasanna R. Potential of microbes in the biofortification of Zn and Fe in dietary food grains. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2020, 40: 15.
- [16] 于丽敏, 薛艳芳, 高华鑫, 等. 小麦富硒研究进展[J]. *山东农业科学*, 2015, 47(6): 137-144.
- [17] Xia H, Kong W, Wang L, et al. Foliar Zn spraying simultaneously improved concentrations and bioavailability of Zn and Fe in maize grains irrespective of foliar sucrose supply[J]. *Agronomy- Basel*, 2019, 9: 386.
- [18] 周伟. 不同施锌方法对小麦含锌量及产量影响的研究[J]. *生态农业研究*, 1995, 3(1): 34-38.
- [19] 郝明德, 魏孝荣, 党廷辉. 旱地小麦长期施用锌肥的增产作用及土壤效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(3): 377-380.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 谭德水, 刘兆辉, 江丽华. 中国冬小麦施肥历史演变及阶段特征研究进展[J]. *中国农学通报*, 2016, 32(12): 13-19.
- [23] Liu D, Liu Y, Zhang W, et al. Agronomic approach of zinc biofortification can increase zinc bioavailability in wheat flour and thereby reduce zinc deficiency in humans[J]. *Nutrients*, 2017, 9: 465.
- [24] Cakmak I, Pfeiffer W H, McClafferty B. Biofortification of durum wheat with zinc and iron[J]. *Cereal Chemistry*, 2010, 87(1): 10-20.
- [25] Fernández V, Brown P H. From plant surface to plant metabolism: The uncertain fate of foliar-applied nutrients[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2013, 4: 289.