

网络出版时间:2018-09-06 17:30

DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2019.03.010

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20180906.1723.020.html>

锌与农药配合喷施对小麦锌累积分配及转移的影响

陈娟,王少霞,田霄鸿,陈艳龙,朱文玲,李秀双,刘珂,杨畅

(西北农林科技大学 资源环境学院/农业部西北植物营养与农业环境重点实验室,陕西 杨凌 712100)

【摘要】【目的】探讨锌与农药配合喷施对小麦籽粒锌累积、分配及转移的影响,以期为简化小麦籽粒锌强化技术提供理论依据。【方法】采用盆栽试验,设置喷施锌和施农药 2 个因素,其中喷锌因子分为不喷锌(Zn0)和喷 4 g/L $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (Zn1)2 个水平,喷施农药因子分为不喷农药(NS)、喷三唑酮(Tr)和吡虫啉(Im)3 个水平,采用完全方案,共计 6 个处理。通过测定小麦籽粒全 Zn 含量,研究锌与农药配合喷施对小麦籽粒富锌效果的影响;测定小麦各营养器官(茎秆、叶片和颖壳)全 Zn 含量和不同形态(可溶和非可溶性)Zn 含量,并计算花前和花后 Zn 吸收量及其向籽粒的转移量,以探讨锌与农药配合喷施对 Zn 在小麦体内转移和分配的影响及机制。【结果】与不喷锌处理相比,无论单独喷锌(Zn1+NS)还是锌与农药配合喷施(Zn1+Tr 或 Zn1+Im),均能显著提高小麦籽粒干质量及全 Zn 含量。相较于单独喷锌处理(Zn1+NS),锌与农药配合喷施(Zn1+Tr 或 Zn1+Im)对籽粒全 Zn 含量无显著影响,但籽粒干质量均增加 17%以上,因而籽粒 Zn 携出量显著增加。与单独喷锌处理(Zn1+NS)相比,锌与农药配合喷施处理(Zn1+Tr 或 Zn1+Im)小麦茎秆、叶片和颖壳全 Zn 含量和 Zn 携出量均显著提高,其中叶片和颖壳增幅大于茎秆。此外,锌与农药配合喷施处理(Zn1+Tr 或 Zn1+Im)小麦花后 Zn 吸收量及其向籽粒的转移量均显著高于单独喷锌处理(Zn1+NS)。单独喷锌处理(Zn1+NS)颖壳可溶性 Zn 占全 Zn 的比例为 60.8%,而锌与农药配合喷施处理(Zn1+Tr 或 Zn1+Im)颖壳可溶性 Zn 占全 Zn 比例均达 70%以上。【结论】锌与农药配合喷施不会显著影响 Zn 肥的籽粒富锌效果,但能提高营养器官对 Zn 的吸收及有效增加 Zn 向籽粒的转移及累积。因此,锌与农药配合喷施可作为小麦籽粒锌强化的有效措施。

【关键词】 锌肥;锌累积;锌转移;小麦;叶面喷施

【中图分类号】 S143.7⁺2

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2019)03-0067-10

Effect of combined foliar application of zinc and pesticides on accumulation, distribution and transfer of zinc in wheat

CHEN Juan, WANG Shaoxia, TIAN Xiaohong, CHEN Yanlong, ZHU Wenlin,
LI Xiushuang, LIU Ke, YANG Chang

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University/Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-Environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】The effects of combined foliar application of Zn with pesticides on Zn accumulation, translocation, and distribution were investigated to provide basis for grain Zn fortification technology in wheat. 【Method】Soil culture experiment was conducted and winter wheat (*Triticum aestivum* L., Xiaoyan 22) was sprayed with two Zn levels of distilled water (Zn0) and 4 g/L $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (Zn1) with three pesticide types of distilled water (NS), triadimefon (Tr) and imidacloprid (Im). There were a total of 6 treatments. By analyzing grain total Zn concentration, the effect of combined foliar application of Zn with

【收稿日期】 2018-01-08

【基金项目】 国家自然科学基金项目(31662233, 1371288)

【作者简介】 陈娟(1993—),女,四川巴中人,硕士,主要从事谷类作物籽粒锌强化研究。E-mail: chenjuan_gloria@163.com

【通信作者】 田霄鸿(1967—),男,甘肃天水人,教授,博士生导师,主要从事养分调控和土壤质量提升研究。

E-mail: txhong@hotmail.com

pesticides on grain Zn bio-fortification was evaluated. The total Zn concentration and soluble Zn concentration in vegetative organs (stem, leaf and glume) were measured and the shoot Zn uptakes and Zn translocation to grain before and after anthesis were calculated. **【Result】** Compared with Zn0, Zn1 and Zn combined with pesticides (Zn1 + Tr or Zn1 + Im) significantly increased dry weight and total Zn concentration in grain. Compared with the Zn1 + NS treatment, combined applications had no significant effect on total Zn concentration in wheat grain, but dry weight of grain was increased by more than 17% and grain Zn content was increased significantly. Compared with Zn1 + NS, combined applications increased total Zn concentration and content in vegetative organs of wheat, and the increase in leaves and glumes was higher than in stems. The shoot Zn uptake and mobilization to grain after anthesis in Zn1 + Tr and Zn1 + Im treatments were higher than in Zn1 + NS treatment. The soluble Zn ratio to total Zn in Zn1 + NS treatment was 60.8%, while that in Zn1 + Tr and Zn1 + Im treatments were higher than 70%. **【Conclusion】** Combined foliar application of Zn with pesticides had no significant adverse impact on grain Zn, but enhanced Zn transfer to grain and grain Zn accumulation by increasing Zn uptake and availability in vegetative tissues. Therefore, combined foliar application of Zn with pesticides is an effective and simple measure to increase zinc bio-fortification in wheat grains.

Key words: Zn fertilizer; Zn accumulation; Zn translocation; wheat; foliar spraying

据统计,全球二十多亿人的健康甚至生命遭受锌缺乏的困扰,而膳食途径锌摄入不足是导致人体锌缺乏的主要原因^[1],且这一情况在粮田土壤大面积缺锌或潜在缺锌的发展中国家尤为严重。在我国,小麦及其制品是众多居民的主食,更是日常锌摄入的主要来源^[2]。然而,我国小麦籽粒平均锌含量大多在 30 mg/kg 以下^[3],低于前人提出的满足人体健康需求的小麦籽粒锌含量水平(即小麦籽粒锌强化目标 50~60 mg/kg)^[4]。

叶面喷施锌肥能有效提高小麦籽粒锌含量,可基本实现小麦籽粒锌强化目标,从而满足以小麦为主食人群对锌的营养需求,被认为是小麦籽粒锌强化的重要农艺措施^[5-7]。研究表明,小麦生长后期,尤其是灌浆前期,喷施锌肥对籽粒锌含量的提升幅度最大^[8],被视为小麦的最佳喷锌时期;而 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 是目前最经济有效的锌源^[9]。此外,叶面喷施 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 的质量浓度在 3~5 g/L 时,小麦籽粒富锌效果最好^[3,10]。然而,无论采用何种喷锌技术,叶面喷施锌肥均需 2~3 次田间作业,费工费时,成本较高,且在我国潜在缺锌土壤上,其对小麦产量的提升效果并不显著^[11],这使得该项技术在实际生产中极难推广应用。因此,简化田间喷锌作业成为该项技术普及推广亟需解决的关键问题。目前,我国小麦生产中普遍采用“一喷三防”技术来防治病虫害、预防干热风影响和增强小麦抗倒伏性能等。为实现病虫害最佳防治效果和最优保产效果,其喷施时间多集中于小麦病虫害高发的生长中后期

(花前-灌浆前期)^[12-13]。鉴于农药的喷施时期与小麦喷锌最佳时期(灌浆前期)相吻合,将喷施锌肥与喷农药有效结合成为简化喷锌操作以实现小麦籽粒锌强化的最新探索。

目前,国际上已有少量关于锌与农药配合喷施的研究。Ram 等^[14]在中国、印度和巴基斯坦等 7 个国家 31 个试验区的田间试验表明,Zn 与当地常用农药配合喷施对小麦等粮食作物可食部分的锌强化效果不低于单独喷锌;本实验室前期研究也表明,Zn 与三唑酮配合喷施不会影响小麦籽粒锌含量^[15]。然而,这些研究主要是通过田间试验从富锌效果上进行的探索,并未进一步明确锌与农药配合喷施对小麦籽粒富锌效果的影响机制。叶面喷施的 Zn 被小麦营养器官(茎秆、叶片和颖壳)吸收后,能通过韧皮部转移到籽粒中^[16-17],而营养器官中锌含量及其占全锌比例的高低和向籽粒的转移能力能显著影响籽粒的锌累积量^[18]。目前,大量元素肥料与锌肥配合喷施对锌的吸收、转移和分配的影响已有一些报道,如氮锌肥配合喷施可以提高小麦各营养器官及籽粒锌含量,而磷锌配合喷施会降低小麦籽粒锌含量但不会影响 Zn 从叶片向籽粒的转移^[19-20]。然而,锌与农药配合喷施对小麦地上各部分锌含量、分配及转移的影响尚未见报道。此外,Zn 在植物体中常以自由态离子、低分子量有机复合态、贮存金属蛋白以及与细胞壁结合的非可溶形式存在,其中低分子量有机复合态是可溶性 Zn 的主要组成成分,具有较高的生物活性,且比全 Zn 更能

表征植物体中 Zn 的有效性(生理活性)^[21]。目前,可溶性 Zn 含量高低已被用于揭示氮肥对锌累积的影响机制^[22-23]。可见,为明确锌与农药配合喷施对 Zn 转移的影响机制,有必要深入研究农药对小麦地上部各器官可溶性 Zn 含量(有效性)及其占全 Zn 比例的影响。

综上,本研究选用“一喷三防”技术中所用的核心农药(三唑酮和吡虫啉)与锌肥配合喷施进行盆栽试验,通过测定小麦籽粒全 Zn 含量,查明锌与农药配合喷施对小麦籽粒全 Zn 含量及 Zn 携出量的影响;同时通过测定小麦各营养器官(茎秆、叶片和颖壳)全 Zn 含量和不同形态(可溶和非可溶性)Zn 含量,并计算小麦花前和花后 Zn 吸收量及其向籽粒的转移量,探讨锌与农药配合喷施对 Zn 在小麦体内转移和分配的影响及机制,以期简化小麦籽粒锌强化技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤采自西北农林科技大学农作一站(34°17'56" N, 108°4'7" E),采样深度为 0~20 cm 耕层,自然风干后去除杂质过 5 mm 筛备用。土壤理化性质为:pH 8.01(土水质量体积比为 1:5),有机质 12.41 g/kg,NO₃⁻-N 13.67 mg/kg,NH₄⁺-N 2.75 mg/kg,速效磷 17.94 mg/kg,速效钾 151 g/kg,Ca-CO₃ 67.83 g/kg,DTPA-Zn 0.81 mg/kg。供试小麦为“小偃 22”(Triticum aestivum L.)。

1.2 试验设计与方法

试验设置喷施锌和施农药 2 个研究因素,喷锌质量浓度根据前人研究结果^[3]确定,设置不喷锌(Zn0)和喷 4 g/L ZnSO₄·7H₂O(Zn1,相当于 0.09% Zn)2 个水平;农药设置不喷农药(NS)、喷三唑酮(15%三唑酮可湿性粉剂 500 倍稀释液,Tr)和喷吡虫啉(25%吡虫啉可湿性粉剂 4 000 倍稀释液,Im)3 个水平(农药用量均为厂家推荐喷施用量)。采用完全方案,共计 6 个处理,重复 4 次。

盆栽试验于 2016 年 10 月至 2017 年 6 月在西北农林科技大学资源环境学院旱棚进行,所用盆钵规格为 240 cm×360 cm。每盆装风干土 7.5 kg,底肥施用量(以干土计)为 N 0.15 g/kg、P₂O₅ 0.1 g/kg、K₂O 0.15 g/kg,分别以尿素、重钙和硫酸钾形式在播种前与供试土壤混匀施用。播种时间为 2016-10-29,每盆均匀播种 15 粒小麦种子,并于小麦四叶期定苗至 10 株。试验期间,根据作物生长需

要采用容量法进行人工灌水。

所有喷施液均用蒸馏水配制,并加入体积分数 0.02%吐温-20 作为表面活性剂^[3]。其中锌与农药配合喷施处理(Zn1+Tr 和 Zn1+Im)所用喷施液为 ZnSO₄·7H₂O 和相应农药的混合液,配制时先将农药用少量蒸馏水润湿,然后加入相应量的 ZnSO₄·7H₂O,混合均匀后再加入表面活性剂摇匀即可。喷施时间为小麦灌浆前期,每隔 7 d 喷施 1 次,连续喷施 2 次(第 1 次喷施时间为开花 1 周后,2017-04-22;第 2 次喷施时间为 2017-04-29)。为了防止喷施液掉落在盆中土壤上而被小麦根系吸收,喷施前先用塑料薄膜将盆口(包括盆口小麦植株间隙处)仔细覆盖;喷施后待薄膜上液体完全蒸发后再取下薄膜。此外,为了避免在高温及强光下喷施对小麦叶片造成伤害,每次喷施具体时间选定为傍晚(18:00—19:00)。

1.3 样品采集及项目测定

喷施处理液前,每个处理随机收获(地上部)1 盆,小麦成熟后全部收获。为避免叶面喷施的 Zn 在植株表面残留,而影响后续各项指标的测定,将收获后的植物样品先后用大量自来水和蒸馏水反复冲洗,随后晾干。将其分为茎秆、叶片(叶和叶鞘)、颖壳和籽粒 4 部分,105 °C 杀青 15 min,60 °C 烘干称质量。各部分样品分别用高通量组织研磨仪粉碎(北京鼎昊源科技有限公司,TL2020),储存备用。

全 Zn 含量测定:称取 0.5 g 样品至坩埚中,碳化后于马弗炉中 600 °C 灰化 6 h,用 5 mL HNO₃ 溶解灰分(灰分与 HNO₃ 质量体积比为 1:1),并转移至 50 mL 容量瓶中定容,然后用 AAS 原子吸收分光光度计测定锌含量^[24]。

可溶性 Zn 含量测定:称取适量样品(籽粒和茎秆 0.1 g、叶片和颖壳 0.07 g),用 50 mmol/L Tris-HCl 缓冲液(pH 7.5)浸提(37 °C 120 r/min 振荡浸提 18 h),13 °C 15 000 r/min 离心 10 min 后过滤(0.2 μm 一次性无菌针头过滤器),再采用 AAS 原子吸收分光光度计(上海分析仪器总厂,AAS 320 CRT)测定锌含量^[22,25]。各部分全 Zn 含量减去可溶性 Zn 含量即为非可溶性 Zn 含量。

各指标计算公式参考文献[26],具体如下:

地上部各器官全 Zn 携出量(mg/盆)=各器官干质量×各器官全 Zn 含量;

花前 Zn 吸收量(mg/盆)=开花期地上部 Zn 携出量;

花前累积 Zn 对成熟期总 Zn 贡献率(%)=花

前 Zn 吸收量/成熟期地上部 Zn 携出量×100；

花前累积 Zn 向籽粒转移量(mg/盆)=花前 Zn 吸收量－成熟期秸秆 Zn 携出量；

花前累积 Zn 再转运率(%)=花前累积 Zn 向籽粒转移量/花前 Zn 吸收量×100；

花前累积 Zn 对籽粒 Zn 累积表观贡献率(%)=花前累积 Zn 向籽粒再转移量/籽粒 Zn 携出量×100；

花后 Zn 吸收量(mg/盆)=成熟期地上部 Zn 携出量－花前 Zn 吸收量，

花后累积 Zn 对成熟期总 Zn 贡献率(%)=花后 Zn 吸收量/成熟期地上部 Zn 携出量×100，

花后累积 Zn 向籽粒转移量(mg/盆)=籽粒 Zn 携出量－花前累积 Zn 向籽粒转移量，

花后累积 Zn 对籽粒 Zn 累积表观贡献率(%)=花后累积 Zn 向籽粒转移量/籽粒 Zn 携出量×100。

其中花前指喷施处理液之前，花后指首次喷施处理液至小麦成熟期；因喷施处理液前所有试验条件一致，所以取各处理花前 Zn 吸收量的平均值作为基础进行计算。

表 1 锌与农药配合喷施对小麦地上部干质量的影响

处理 Treatment		干质量/(g·盆 ⁻¹) Dry weight			
锌 Zn	农药 Pesticide	籽粒 Grain	茎秆 Stem	叶片 Leaf	颖壳 Glume
Zn0	NS	31.37 c	15.48 b	17.94 a	10.80 a
	Tr	39.68 a	17.97 a	18.19 a	11.04 a
	Im	40.79 a	16.12 ab	15.39 b	10.56 a
Zn1	NS	34.81 b	17.82 ab	15.47 b	10.81 a
	Tr	40.80 a	15.77 ab	15.31 b	10.74 a
	Im	41.56 a	17.23 ab	15.67 b	11.01 a
差异显著性 Significance of variation					
锌 Zn (a)		* *	ns	* * *	ns
农药 Pesticide (b)		* * *	ns	* * *	ns
a×b		ns	* *	* *	ns

注:同列数据后标不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$),ns 代表差异不显著($P\geq0.05$);*,*,*,* * * 分别表示在 $P<0.05$, $P<0.01$, $P<0.001$ 水平下差异显著。下表同。

Note:Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$) among treatments. ns means insignificant ($P\geq0.05$); *, *, *, * * * and * * * represent significant difference at $P<0.05$, $P<0.01$ and $P<0.001$, respectively. The same below.

2.2 锌与农药配合喷施对小麦地上部全 Zn 含量及 Zn 携出量的影响

表 2 显示,喷施锌肥会显著增加小麦籽粒全 Zn 含量,提高幅度近 1 倍;农药与锌肥的交互作用对籽粒全 Zn 含量无显著影响。锌与三唑酮配合喷施(Zn1+Tr)或锌与吡虫啉配合喷施(Zn1+Im)后,籽粒全 Zn 含量均达 54 mg/kg 以上,且与单独喷锌处理(Zn1+NS)相比无显著差异。锌与农药的交互作

1.4 数据处理

试验数据均用 Microsoft Excel 2013 和 DPS 7.05 统计软件进行作图、方差分析和多重比较。

2 结果与分析

2.1 锌与农药配合喷施对小麦地上部干质量的影响

表 1 显示,锌与农药交互作用对小麦籽粒干质量无显著影响,但喷施锌肥或农药均会显著提高籽粒干质量。其中,与单独喷锌处理(Zn1+NS)相比,锌与吡虫啉配合喷施处理(Zn1+Im)的籽粒干质量增幅为 19.4%,略高于锌与三唑酮配合喷施处理(Zn1+Tr)籽粒干质量增幅(17.2%)。锌与农药交互作用对小麦茎秆和叶片的干质量影响显著,但对小麦颖壳干质量的影响不显著。在不喷锌水平(Zn0)下,小麦茎秆干质量在喷三唑酮(Tr)或喷吡虫啉(Im)后均有所提高,而叶片干质量在喷三唑酮(Tr)后无显著变化,在喷吡虫啉(Im)后显著降低;相较于单独喷锌处理(Zn1+NS),锌与农药配合喷施(Zn1+Tr 或 Zn1+Im)对小麦茎秆和叶片干质量均无显著影响。无论是喷锌还是喷农药,对小麦颖壳的干质量均无显著影响。

用对茎秆、叶片和颖壳全 Zn 含量均有极显著影响,与不喷锌(Zn0)相比,喷锌(Zn1)显著提高茎秆、叶片和颖壳全 Zn 含量;在 Zn0 水平下,喷施农药(Tr 或 Im)不会影响茎秆和颖壳全 Zn 含量,但会提高叶片全 Zn 含量;相较于单独喷锌处理(Zn1+NS),锌与三唑酮配合喷施(Zn1+Tr)或锌与吡虫啉配合喷施(Zn1+Im)均能显著提高茎秆、叶片和颖壳全 Zn 含量,且各营养器官全 Zn 含量由高到低均表现为

锌与三唑酮配合喷施处理(Zn1+Tr) > 锌与吡虫啉配合喷施处理(Zn1+Im)。

表 2 还表明, 锌与农药交互作用对小麦籽粒 Zn 携出量的影响不显著, 但喷锌或喷农药均会显著提高籽粒 Zn 携出量。与单独喷锌处理(Zn1+NS)相比, 锌与三唑酮配合喷施(Zn1+Tr)或锌与吡虫啉配合喷施(Zn1+Im)处理籽粒 Zn 携出量分别增加 17.2% 和 18.9%。喷锌对小麦地上部各营养器官 Zn 携出量的影响与全 Zn 含量类似, 表现为茎秆、叶

片和颖壳 Zn 携出量均显著增加。在 Zn0 水平下, 喷农药(Tr 或 Im)不会影响茎秆、叶片和颖壳 Zn 携出量。与单独喷锌处理(Zn1+NS)相比, 锌与农药配合喷施(Zn1+Tr 或 Zn1+Im)会显著提高小麦地上部各营养器官 Zn 携出量, 且增幅表现为锌与三唑酮配合喷施处理(Zn1+Tr) > 锌与吡虫啉配合喷施处理(Zn1+Im), 这与两者配合喷施对各营养器官全 Zn 含量的影响一致。

表 2 锌与农药配合喷施对小麦地上部全 Zn 含量及 Zn 携出量的影响

Table 2 Effect of zinc foliar application combined with pesticides on total Zn concentration and Zn content of above-ground organs of wheat

处理 Treatment		全 Zn 含量/(mg · kg ⁻¹) Total Zn concentration				Zn 携出量/(mg · 盆 ⁻¹) Zn content			
锌 Zn	农药 Pesticide	籽粒 Grain	茎秆 Stem	叶片 Leaf	颖壳 Glume	籽粒 Grain	茎秆 Stem	叶片 Leaf	颖壳 Glume
Zn0	NS	28.14 b	8.92 d	5.88 e	13.86 c	0.88 d	0.14 c	0.11 d	0.15 c
	Tr	28.27 b	8.97 d	6.26 de	13.59 c	1.12 c	0.16 c	0.11 d	0.15 c
	Im	27.97 b	8.49 d	6.61 d	13.83 c	1.14 c	0.14 c	0.10 d	0.15 c
Zn1	NS	54.92 a	16.10 c	55.02 c	43.62 b	1.91 b	0.29 b	0.85 c	0.47 b
	Tr	54.91 a	20.63 a	64.46 a	48.79 a	2.24 a	0.33 a	0.99 a	0.52 a
	Im	54.64 a	18.94 b	58.08 b	48.68 a	2.27 a	0.33 a	0.91 b	0.54 a
差异显著性 Significance of variation									
锌 Zn (a)		** *	** *	** *	** *	** *	** *	** *	** *
农药 Pesticide (b)		ns	** *	** *	** *	** *	*	** *	ns
a × b		ns	** *	** *	** *	ns	ns	** *	ns

2.3 锌与农药配合喷施对小麦地上部 Zn 分配的影响

图 1 显示, 在所有处理中, 籽粒 Zn 携出量占总 Zn 携出量的百分比(Zn 分配比)最大。不喷锌(Zn0)水平下, 籽粒 Zn 分配比平均高于 70%, 叶面喷施锌肥后籽粒 Zn 分配比平均为 55%; 与单独喷锌处理(Zn1+NS)相比, 锌与农药配合喷施(Zn1+

Tr 或 Zn1+Im)对籽粒 Zn 分配比无显著影响。喷施锌肥会明显提高颖壳和叶片的 Zn 分配比, 且叶片 Zn 分配比的增幅(217.6%)大于颖壳(27.4%); 喷施锌肥对茎秆 Zn 分配比无明显影响。与单独喷锌处理(Zn1+NS)相比, 锌与三唑酮配合喷施(Zn1+Tr)或锌与吡虫啉配合喷施(Zn1+Im)对茎秆、叶片和颖壳 Zn 分配比均无明显影响。

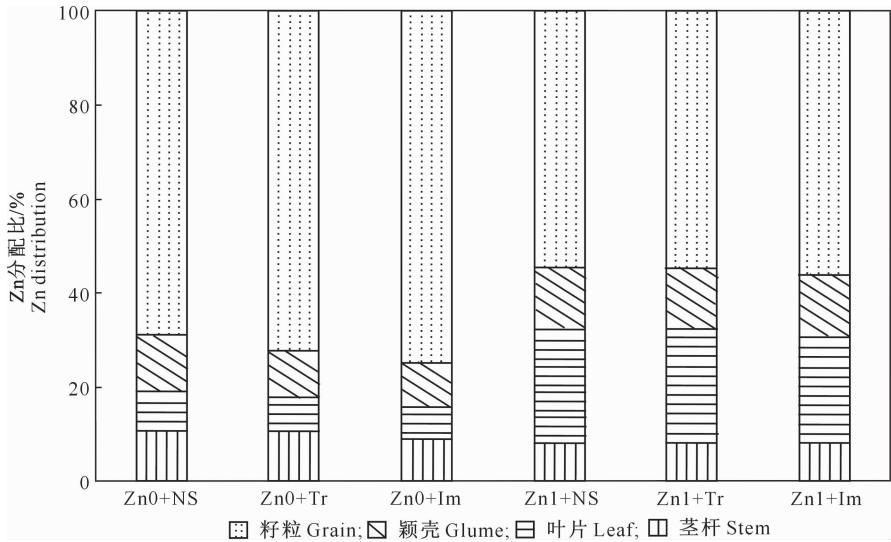


图 1 锌与农药配合喷施对小麦地上部 Zn 分配的影响

Fig. 1 Effect of zinc foliar application combined with pesticides on relative distribution of Zn in over-ground organs of wheat

2.4 锌与农药配合喷施对小麦花前和花后 Zn 分配比及籽粒 Zn 累积表现贡献率的影响

由表 3 可知,不喷锌(Zn0)时,花前 Zn 吸收量及花前累积 Zn 对成熟期总 Zn 贡献率均高于花后,但花前 Zn 吸收量向籽粒转移量及其对籽粒 Zn 累积表现贡献率均低于花后;而喷锌(Zn1)后,花后 Zn 吸收量、累积 Zn 对成熟期总 Zn 贡献率、累积 Zn 向籽粒转移量及累积 Zn 对籽粒 Zn 累积表现贡献率均显著高于花前,其中花后 Zn 吸收量为 2.72~

3.27 mg/盆,对成熟期总 Zn 贡献率达 77% 以上。锌与农药配合喷施处理(Zn1+Tr 或 Zn1+Im)花后 Zn 吸收量、对成熟期总 Zn 贡献率以及向籽粒转移量都高于单独喷锌处理(Zn1+NS)。与单独喷锌处理(Zn1+NS)相比,锌与三唑酮配合喷施处理(Zn1+Tr)花后 Zn 吸收量、对成熟期总 Zn 贡献率及向籽粒转移量增加幅度依次为 20.3%,4.0%和 17.2%;而锌与吡虫啉配合喷施处理(Zn1+Im)的增幅依次为 19.2%,3.8%和 18.9%。

表 3 锌与农药配合喷施对小麦花前和花后 Zn 吸收量及籽粒 Zn 累积表现贡献率的影响
Table 3 Effects of Zn uptakes before and after anthesis of winter wheat on apparent contribution of Zn accumulation in grains at maturing stage

时期 Stage	指标 Index	Zn0			Zn1		
		NS	Tr	Im	NS	Tr	Im
花前 Before anthesis	Zn 吸收量/(mg·盆 ⁻¹) Zn uptake	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
	累积 Zn 对成熟期总 Zn 贡献率/% Contribution to total Zn	62.88	51.81	52.55	22.75	19.66	19.81
	累积 Zn 向籽粒转移量/(mg·盆 ⁻¹) Mobilization to the grain	0.41	0.38	0.42	0	0	0
	累积 Zn 再转运率/% Remobilization efficiency	50.92	46.95	52.05	0	0	0
	累积 Zn 对籽粒 Zn 累积表现贡献率/% Contribution to grain Zn	46.31	33.54	36.57	0	0	0
花后 After anthesis	Zn 吸收量/(mg·盆 ⁻¹) Zn uptake	0.47	0.75	0.72	2.72	3.27	3.24
	累积 Zn 对成熟期总 Zn 贡献率/% Contribution to total Zn	37.09	48.19	47.44	77.25	80.33	80.16
	累积 Zn 向籽粒转移量/(mg·盆 ⁻¹) Mobilization to the grain	0.47	0.75	0.72	1.91	2.24	2.27
	累积 Zn 对籽粒 Zn 累积表现贡献率/% Contribution to grain Zn	53.69	66.46	63.43	100.00	100.00	100.00

2.5 锌与农药配合喷施对小麦地上部可溶性 Zn 和非可溶性 Zn 含量的影响

锌与农药配合喷施处理对小麦地上部可溶性 Zn 和非可溶性 Zn 含量的影响如表 4 所示。由表 4

可知,喷锌能显著提高小麦籽粒可溶性 Zn 含量。相较于单独喷锌处理(Zn1+NS),锌与农药配合喷施(Zn1+Tr,Zn1+Im)均不会显著影响小麦籽粒可溶性 Zn 含量。

表 4 锌与农药配合喷施对小麦地上部可溶性 Zn 和非可溶性 Zn 含量的影响
Table 4 Effect of zinc foliar application combined with pesticides on soluble and insoluble Zn concentrations in grain,stem,leaf and glume of wheat

处理 Treatment		可溶性 Zn 含量/(mg·kg ⁻¹) Soluble Zn concentration				非可溶性 Zn 含量/(mg·kg ⁻¹) Insoluble Zn concentration			
		籽粒 Grain	茎秆 Stem	叶片 Leaf	颖壳 Glume	籽粒 Grain	茎秆 Stem	叶片 Leaf	颖壳 Glume
Zn0	NS	7.84 c	4.59 c	3.75 c	4.27 d	20.30 b	4.33 c	2.13 d	9.59 d
	Tr	7.48 c	4.87 c	3.65 c	4.04 d	20.79 b	4.10 c	2.61 d	9.54 d
	Im	8.09 c	4.66 c	3.72 c	3.51 e	19.89 b	3.82 c	2.89 d	10.32 d
Zn1	NS	17.22 ab	11.92 b	45.78 a	26.52 c	37.70 a	4.18 c	9.24 c	17.10 a
	Tr	17.60 a	12.96 a	44.78 a	37.53 a	37.31 a	7.67 a	19.68 a	11.26 c
	Im	16.58 b	12.50 b	42.23 b	34.76 b	38.06 a	6.44 b	15.84 b	13.92 b
差异显著性 Significance of variation									
锌 Zn (a)		***	***	***	***	***	***	***	***
农药 Pesticide (b)		ns	*	*	***	ns	***	***	***
a×b		ns	*	*	***	ns	***	***	***

由表 4 还可知,农药与锌交互作用对小麦茎秆、叶片和颖壳可溶性 Zn 含量均有显著影响。喷施锌肥显著增加茎秆、叶片和颖壳可溶性 Zn 含量,增幅表现为叶片>颖壳>茎秆。与单独喷锌处理(Zn1+

NS)相比,锌与农药配合喷施(Zn1+Tr,Zn1+Im)会提高茎秆和颖壳的可溶性 Zn 含量,其中颖壳的增幅分别为 41.6%和 31.1%,茎秆的增幅分别为 8.7%和 4.9%;而叶片可溶性 Zn 含量虽有所降低,但降低幅度较小,分别为 2.2%和 7.7%。此外,锌与三唑酮配合喷施处理(Zn1+Tr)茎秆、叶片和颖壳可溶性 Zn 含量均显著高于锌与吡虫啉配合喷施处理(Zn1+Im)。

表 4 还显示,锌与农药交互作用对籽粒非可溶性 Zn 含量无显著影响,但喷锌会显著提高籽粒非可溶性 Zn 含量。此外,无论喷锌与否,喷施农药均不会影响籽粒中非可溶性 Zn 含量。在不喷锌(Zn0)时,喷施农药对各营养器官非可溶性 Zn 含量均无显著影响。与单独喷锌处理(Zn1+NS)相比,锌与农药配合喷施(Zn1+Tr 或 Zn1+Im)会显著降低颖壳非可溶性 Zn 含量,降幅为 18.6%~34.2%;却显著提高茎秆和叶片非可溶性 Zn 含量,其中锌与三唑酮(Zn1+Tr)和锌与吡虫啉(Zn1+Im)配合喷施处理小麦茎秆非可溶性 Zn 含量分别提高 83.6%和 54.1%,叶片非可溶性 Zn 含量分别提高 113.1%和 71.5%。

2.6 锌与农药配合喷施对小麦地上部可溶和非可溶性 Zn 含量占全 Zn 比例的影响

图 2 显示,籽粒可溶性 Zn 占全 Zn 的比例为 26%~33%,而茎秆、叶片和颖壳可溶性 Zn 占全 Zn 的比例均较高,分别为 51%~75%,56%~84%和 25%~77%。喷锌会明显提高地上部各器官可溶性 Zn 占全 Zn 的比例,且提高幅度表现为颖壳>茎秆>叶片>籽粒,而对非可溶性 Zn 占全 Zn 比例的影响正好相反。与单独喷锌处理(Zn1+NS)相比,锌与农药配合喷施(Zn1+Tr 或 Zn1+Im)对籽粒可溶与非可溶性 Zn 占全 Zn 比例的影响均不明显,但对茎秆、叶片和颖壳可溶及非可溶性 Zn 占全 Zn 的比例有明显影响。与单独喷锌处理(Zn1+NS)相比,锌与三唑酮(Zn1+Tr)或锌与吡虫啉(Zn1+Im)配合喷施处理茎秆可溶性 Zn 占全 Zn 的比例分别降低了 15.3%和 11.0%,叶片可溶性 Zn 占全 Zn 的比例分别降低了 16.5%和 12.6%,而颖壳可溶性 Zn 占全 Zn 的比例分别提高了 26.5%和 17.5%。锌与农药配合喷施(Zn1+Tr 或 Zn1+Im)对茎秆、叶片和颖壳中非可溶性 Zn 占全 Zn 比例的影响与可溶性 Zn 占全 Zn 比例的影响相反。

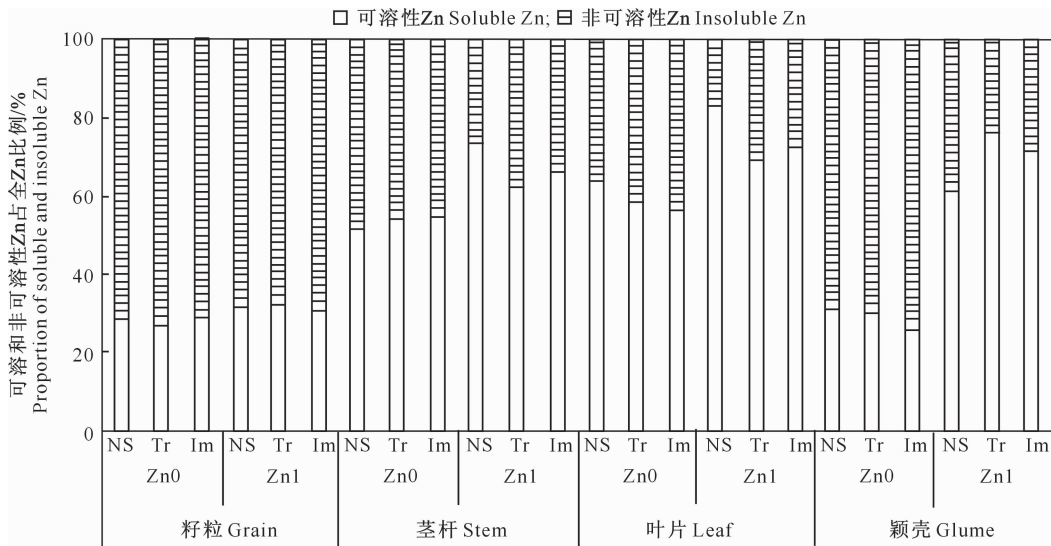


图 2 锌与农药配合喷施对小麦地上部可溶和非可溶性 Zn 占全 Zn 比例的影响

Fig. 2 Effect of zinc foliar application combined with pesticides on ratios of soluble and insoluble Zn in grain, leaf, stem, and glume of wheat

3 讨 论

3.1 锌与农药配合喷施对籽粒富锌效果的影响

Cakmak^[4]认为,小麦籽粒锌含量达到 50~60 mg/kg 才能满足以小麦为主食人群对锌的日常营养需求,并将此作为小麦籽粒锌生物强化的目标值。

在本研究中,与单独喷锌处理相比,锌与三唑酮或吡虫啉配合喷施后籽粒全 Zn 含量无显著变化,分别为 54.91 和 54.64 mg/kg,已达到改善人体锌营养状况的籽粒锌强化目标,这与 Ram 等^[14]和刘珂等^[15]的研究结果一致。此外,与单独喷锌相比,锌与三唑酮或锌与吡虫啉配合喷施后籽粒 Zn 携出量

均明显增加,说明锌与农药配合喷施可以提高 Zn 在小麦籽粒中的累积。将锌肥与农药配合喷施省时省力,且相较于单独喷施农药,能明显提高农民的净收入,有利于该措施被农民认可并大力推广^[27]。可见,单就籽粒富锌效果而言,锌肥与农药配合喷施可作为小麦籽粒锌强化的有效措施。然而,要实现锌与农药配合喷施的推广应用,还需要进一步研究本试验中所采用的锌与农药混合喷施液的配制方法对农药分散性、附着性等的影响,以及两者配合喷施对农药病虫害防治效果的影响,以便深入探讨锌与农药配合喷施的可行性。

3.2 农药对 Zn 转移和分配的影响

叶片和颖壳被认为是小麦体内的重要“锌库”,由于 Zn 在韧皮部移动性较强,喷施的 Zn 被叶片和颖壳吸收后,迅速向籽粒转移并累积在籽粒中^[28]。三唑酮或吡虫啉与锌肥配合喷施后小麦茎秆、叶片和颖壳全 Zn 含量均明显高于单独喷施锌肥,说明三唑酮和吡虫啉有利于小麦各营养器官对 Zn 的吸收。众所周知,农药助剂中含有大量的表面活性剂(如展着剂、湿润剂、乳化剂等),有利于农药稀释液在植物体表的润湿、展布以及附着^[29];而叶面喷锌时,添加表面活性剂可提高小麦各营养器官锌含量^[30]。因此,农药与锌肥混合后喷施,可以促进茎秆、叶片和颖壳对 Zn 的吸收,进而提高小麦籽粒 Zn 累积。此外,锌与吡虫啉配合喷施处理叶片和茎秆中全 Zn 含量及叶片 Zn 分配比均明显低于锌与三唑酮配合喷施处理,这可能是由三唑酮和吡虫啉两种农药被小麦吸收及其在体内的作用机制不同所致^[31-32]。

小麦籽粒中累积的 Zn 一部分来源于开花后根系所吸收 Zn 的直接分配,另一部分来源于开花前叶片等营养器官累积的 Zn 通过韧皮部再转运^[33]。Wang 等^[20]通过大田试验得出,灌浆前期喷施锌肥向小麦地上部提供足量的 Zn 后,籽粒中 Zn 主要来源于花后营养器官的吸收,而花前累积 Zn 对籽粒 Zn 累积表观贡献率为 0。本研究中,锌与三唑酮或吡虫啉配合喷施后,花后累积 Zn 对籽粒 Zn 累积表观贡献率均为 100.00%,与单独喷锌处理一致。然而,与单独喷锌处理相比,锌与农药配合喷施处理花后 Zn 吸收量及其对成熟期总 Zn 贡献率和向籽粒转移量均有所提高,这也进一步说明,锌与农药配合喷施能提高小麦营养器官中累积的 Zn 向籽粒的转移,进而增强籽粒富锌效果。

3.3 农药对 Zn 转移和分配影响的可能机制

早期研究表明,常温常压下, Zn^{2+} 等金属离子

能与含有极性基团(如-COOH、-NH₂ 等)的有机小分子形成复合物,且这类复合物具有较大的水溶解度^[34-35]。作为“一喷三防”核心农药的三唑酮和吡虫啉,其有效成分(三唑酮和吡虫啉)含有多个极性基团,且相对分子质量分别为 255.7 和 293.7,属小分子有机化合物。因此本研究认为,当其与锌肥($Zn \cdot SO_4 \cdot 7H_2O$)混合后,可能会形成水可溶性低分子质量复合物^[36]。具有较强活性且能较好地反映植物体中 Zn 有效性的可溶性 Zn 主要以与低分子质量化合物配合的形式存在^[21,37],因此本研究通过可溶与非可溶性 Zn 的含量及其占全 Zn 的比例来进一步揭示锌与农药配合喷施对小麦籽粒 Zn 累积的影响机制。

本研究结果表明,与单独喷锌处理相比,锌与农药配合喷施后颖壳可溶性 Zn 含量明显增加,非可溶性 Zn 含量明显降低,同时颖壳可溶性 Zn 占全 Zn 的比例也明显提高。这说明锌与农药配合喷施后,主要通过增强 Zn 在颖壳中的生理活性促进了 Zn 向籽粒的转移,进而增加籽粒 Zn 的累积。此外,锌与三唑酮配合喷施处理颖壳可溶性 Zn 含量及其占全 Zn 的比例均明显高于锌与吡虫啉配合喷施处理,这与锌与三唑酮配合喷施后籽粒 Zn 携出量高于锌与吡虫啉配合喷施的结果相符。叶面喷施时,处理液最先在小麦叶片及颖壳上附着并随之被小麦吸收到体内,但本研究中锌与农药配合喷施对叶片和颖壳中可溶与非可溶性 Zn 含量及其占全 Zn 比例的影响并不一致。究其原因,可能是因为在本研究三唑酮和吡虫啉所针对的病虫害(白粉病和麦蚜虫)主要集中于小麦叶片,锌与农药混合后所形成的 Zn-农药复合物中的 Zn,随农药有效成分在病害部位发生作用后被释放并形成新的化合物^[38],而这一类化合物有可能属于非可溶性锌。

4 结 论

与不喷锌处理相比,无论单独喷锌还是锌与农药配合喷施,均明显提高了小麦籽粒及各营养器官全 Zn 含量。相较于单独喷锌,锌与农药配合喷施对小麦籽粒全 Zn 含量虽无明显影响,但籽粒干质量增加明显,因而籽粒 Zn 携出量明显增加。锌与农药配合喷施促进了小麦各营养器官对 Zn 的吸收,同时提高了花后 Zn 吸收量及其向籽粒的转移量,进而增加了籽粒中 Zn 的累积。此外,与单独喷锌相比,锌与农药配合喷施会提高颖壳和茎秆中可溶性 Zn 含量,其中颖壳可溶性 Zn 含量及其占全 Zn

的比例提高明显;而叶片可溶性 Zn 含量虽有所降低,但降低幅度相对较小。综上所述,锌与农药配合喷施非但不影响锌肥的籽粒富锌效果,还能通过提高营养器官对 Zn 的吸收及 Zn 的有效性增加 Zn 向籽粒的转移及累积。因此,锌与农药配合喷施可作为小麦籽粒锌强化的有效措施。

[参考文献]

- [1] Stein A J, Cakmak I. Global impacts of human mineral malnutrition [J]. *Plant and Soil*, 2010, 335: 133-154.
- [2] Wang Y H, Zou C Q, Mirza Z, et al. Cost of agronomic biofortification of wheat with zinc in China [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2016, 36(3): 44.
- [3] 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): 1-7.
- [4] Cakmak I. Enrichment of cereal grains with zinc: agronomic or genetic biofortification [J]. *Plant and Soil*, 2008, 302: 1-17.
- [5] Zhang Y Q, Shi R L, Rezaul K M, et al. Iron and zinc concentrations in grain and flour of winter wheat as affected by foliar application [J]. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 2010, 58: 12268-12274.
- [6] Cakmak I, Kalayci M, Kaya Y, et al. Biofortification and localization of zinc in wheat grain [J]. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 2010, 58: 9092-9102.
- [7] Zou C Q, Zhang Y Q, Rashid A, et al. Biofortification of wheat with zinc through zinc fertilization in seven countries [J]. *Plant and Soil*, 2012, 361: 119-130.
- [8] Li M, Yang X W, Tian X H, et al. Effect of nitrogen fertilizer and foliar zinc application at different growth stages on zinc translocation and utilization efficiency in winter wheat [J]. *Cereal Research Communications*, 2014, 42(1): 81-90.
- [9] Ghasemi S, Khoshgoftarmansh A H, Afyuni M, et al. The effectiveness of foliar applications of synthesized zinc-amino acid chelates in comparison with zinc sulfate to increase yield and grain nutritional quality of wheat [J]. *European Journal of Agronomy*, 2013, 45: 68-74.
- [10] Yang X W, Tian X H, Gale W J, et al. Effect of soil and foliar zinc application on zinc concentration and bioavailability in wheat grain grown on potentially zinc-deficient soil [J]. *Cereal Research Communications*, 2011a, 39: 535-543.
- [11] 杨月娥, 王森, 王朝辉, 等. 我国主要麦区小麦籽粒锌含量对叶喷锌肥的响应 [J]. *植物营养与肥科学报*, 2016, 22(3): 579-589.
- Yang Y E, Wang S, Wang Z H, et al. Response of wheat grain Zn concentration to foliar sprayed Zn in main wheat production regions of China [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2016, 22(3): 579-589.
- [12] 赵广才, 常旭虹, 王德梅, 等. 小麦一喷三防技术 [J]. *作物杂志*, 2013(2): 120-122.
- Zhao G C, Chang X H, Wang D M, et al. The spray for three defense techniques of wheat [J]. *Crops*, 2013(2): 120-122.
- [13] 贾育恒, 郑峰, 张亚素, 等. “一喷三防”施药时间对小麦病害的防治效果 [J]. *西北农业学报*, 2015, 24(7): 131-135.
- Jia Y H, Zheng F, Zhang Y S, et al. Effects of spraying time of several control measures on control of wheat diseases and pests [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2015, 24(7): 131-135.
- [14] Ram H, Rashid A, Zhang W, et al. Biofortification of wheat, rice and common bean by applying foliar zinc fertilizer along with pesticides in seven countries [J]. *Plant and Soil*, 2016, 403(1): 1-13.
- [15] 刘珂, 赵吉红, 王少霞, 等. 锌肥与三唑酮配合喷施对冬小麦锌营养品质的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(4): 28-32.
- Liu K, Zhao J H, Wang S X, et al. Effects of combined foliar Zn application with triadimefon on Zn nutritional quality of winter wheat [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(4): 28-32.
- [16] Erenoglu B, Nikolic M, Römhelt V, et al. Uptake and transport of foliar applied zinc (^{65}Zn) in bread and durum wheat cultivars differing in zinc efficiency [J]. *Plant and Soil*, 2002, 241: 251-257.
- [17] Hambidge K M, Miller L V, Westcott J E, et al. Zinc bioavailability and homeostasis [J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2010, 91: 1478-1483.
- [18] 党红凯, 李瑞奇, 孙亚辉, 等. 高产冬小麦对锌的吸收、积累与分配 [J]. *中国农业科学*, 2010, 43(9): 1791-1799.
- Dang H K, Li R Q, Sun Y H, et al. Absorption, accumulation and distribution of zinc in high-yielding winter wheat [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(9): 1791-1799.
- [19] 李宏云, 王少霞, 李萌, 等. 不同水氮管理下锌与氮磷肥配合喷施对冬小麦锌营养品质的影响 [J]. *中国农业科学*, 2014, 47(20): 4016-4026.
- Li H Y, Wang S X, Li M, et al. Effects of combined foliar Zn application with N or P under different water and nitrogen managements on Zn nutritional quality of winter wheat [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(20): 4016-4026.
- [20] Wang S X, Li Meng, Tian X H, et al. Foliar zinc, nitrogen, and phosphorus application effects on micronutrient concentrations in winter wheat [J]. *Agronomy Journal*, 2015, 107(1): 61-70.
- [21] 汪洪, 金继运. 植物对锌吸收运输及积累的生理与分子机制 [J]. *植物营养与肥科学报*, 2009, 15(1): 225-235.
- Wang H, Jin J Y. The physiological and molecular mechanisms of zinc uptake, transport, and hyperaccumulation in plants: a review [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(1): 225-235.
- [22] Xue Y F, Eagling T, He J B, et al. Effects of nitrogen on the distribution and chemical speciation of iron and zinc in pearling fractions of wheat grain [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62: 4738-4746.
- [23] 薛艳芳. 氮肥管理对高产小麦和玉米锌吸收、转移与累积的影

- 响 [D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- Xue Y F. Effects of nitrogen management on zinc uptake, translocation and allocation in high-yielding wheat (*Triticum aestivum* L.) and maize (*Zea mays* L.) cropping system [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2013.
- Bao S D. Soil agro-chemical analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2013.
- [25] Eagling T, Neal A L, Mcgrath S P, et al. Distribution and speciation of iron and zinc in grain of two wheat genotypes [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62: 708-716.
- [26] Xue Y F, Yue S C, Zhang Y Q, et al. Grain and shoot zinc accumulation in winter wheat affected by nitrogen management [J]. Plant and Soil, 2012, 361: 153-163.
- [27] Wang X Z, Liu D Y, Zhang W, et al. An effective strategy to improve grain zinc concentration of winter wheat, aphids prevention and farmers' income [J]. Field Crops Research, 2015, 184: 74-79.
- [28] Pearson J N, Jenner C F, Rengel Z, et al. Differential transport of Zn, Mn and sucrose along the longitudinal axis of developing wheat grains [J]. Physiologia Plantarum, 1996, 97: 332-338.
- [29] 付 颖, 叶 非, 王常波. 助剂在农药中的应用 [J]. 农药科学与管理, 2001, 22(1): 40-41.
- Fu Y, Ye F, Wang C B. The use of adjuvants for pesticide [J]. Pesticide Science and Administration, 2001, 22(1): 40-41.
- [30] 刘会华. 锌肥助剂对小麦吸收锌素及锌肥肥效的影响 [D]. 河南洛阳: 河南科技大学, 2015.
- Li H H. Effects of zinc fertilizer and Zn fertilizer plus additives on wheat absorption of Zn [D]. Luoyang, Henan: Henan University of Science and Technology, 2015.
- [31] 姚安庆, 杨 健. 农药在植物体内的传导方式和农药传导生物学 [J]. 中国植保导刊, 2012, 32(10): 14-18.
- Yao A Q, Yang J. Conduction mode of pesticides in plant and pesticide-conduction biology [J]. China Plant Protection, 2012, 32(10): 14-18.
- [32] 姚安庆, 杨 健. 基于农药穿透生物学的杀菌剂生物测定 [J]. 中国植保导刊, 2010, 30(11): 13-17.
- Yao A Q, Yang J. Fungicide bioassay based on pesticide penetration biology [J]. China Plant Protection, 2010, 30(11): 13-17.
- [33] Kutman U B, Kutman B Y, Ceylan Y, et al. Contributions of root uptake and remobilization to grain zinc accumulation in wheat depending on post-anthesis zinc availability and nitrogen nutrition [J]. Plant and Soil, 2012, 361: 177-187.
- [34] 张培志, 吴 军, 龚钰秋, 等. 三唑酮氯化锌配合物的合成和晶体结构研究 [J]. 无机化学学报, 2003, 19(7): 753-756.
- Zhang P Z, Wu J, Gong Y Q, et al. Synthesis and crystal structure of the complex of triadimefon and zinc chloride [J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 2003, 19(7): 753-756.
- [35] 卢家烂, 袁自强. 有机-锌络合物稳定性的实验研究 [J]. 地球化学, 1986(1): 66-77.
- Lu J L, Yuan Z Q. Experimental study on the stability of organic zinc complex [J]. Geochimica, 1986(1): 66-77.
- [36] 熊 辉. 三唑类手性农药过渡金属配合物的合成与抑菌活性研究 [D]. 江西南昌: 江西农业大学, 2013.
- Xiong H. Syntheses and antimicrobial activities of transition metal compounds with triazole derivatives chiral pesticide as ligands [D]. Nanchang, Jiangxi: Jiangxi Agricultural University, 2013.
- [37] 赵同科. 植物锌营养研究综述与展望 [J]. 河北农业大学学报, 1996, 19(1): 102-107.
- Zhao T K. The review and prospect of plant zinc nutrition [J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 1996, 19(1): 102-107.
- [38] Han Y, Jin H S, Guo W, et al. Translocation and distribution of imidacloprid in tobacco with two application methods [J]. Agricultural Science and Technology, 2017, 18(2): 344-346.