

氮磷钾肥施用对全球小麦籽粒锌浓度的影响

王义霞^{1,2}, 张伟^{3,4}

(¹中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨陵 712100; ²中国科学院大学, 北京 100049;

³西南大学资源环境学院, 重庆 400715; ⁴西南大学农业科学研究院, 重庆 400715)

摘要:提高小麦籽粒锌浓度是补充人体锌营养、降低锌缺乏的重要措施。定量化研究全球小麦籽粒锌浓度随时间变化,并评价施肥对籽粒锌浓度的影响,对指导当前农业生产的可持续发展具有重要意义。利用Web of Science、中国知网、万方数据库查阅了1980到2018年间与全球小麦籽粒锌营养相关的田间试验文献84篇,通过分析不同年代的籽粒锌浓度、氮磷钾肥施用量以及二者之间的关系,探讨氮磷钾肥施用对全球小麦籽粒锌浓度的影响。结果表明:从20世纪90年代(1981—1990)至今,全球小麦籽粒锌浓度从90年代的39.6 mg/kg下降至目前的29.1 mg/kg,下降幅度为26.5%。在小麦生产中,氮肥从1990s的84.1 kg/hm²增长至当前的166 kg/hm²,磷肥从2000s至今增加了127%,钾肥从2000s至今增加了19.8%。氮肥施用显著提高了小麦籽粒锌浓度,磷肥降低了籽粒锌浓度,而钾肥施用并没有影响籽粒锌浓度。因此,集约化农田中磷肥的大量施用可能对小麦籽粒锌浓度的降低影响最大,适当的磷肥施用量可以保证小麦籽粒高产、高籽粒锌营养。

关键词:小麦;籽粒锌浓度;施磷量;不同年份

中图分类号:S512.1

文献标志码:A

论文编号:casb18120074

NPK Fertilizer Application on Global Wheat Grain Zinc Concentration

Wang Yixia^{1,2}, Zhang Wei^{3,4}

(¹Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling Shaanxi 712100;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; ³College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715; ⁴Academy of Agricultural Sciences, Southwest University, Chongqing 400715)

Abstract: Improving grain Zn concentration of wheat could supply more Zn and reduce Zn deficiency in human body. To quantify the changes of global grain Zn concentration with time and analyze the relationship between grain Zn concentration and fertilization supply are significant to the sustainable development of agricultural production. The data were collected from Web of Science, CNKI and Wanfang database, which included 84 literatures related to grain Zn concentration from 1980 to 2018. The authors analyzed Zn concentration in grain, NPK application amount, and the relationship between the two to study the effect of NPK application on grain Zn concentration. The results showed that the global grain Zn concentration of wheat significantly decreased from 39.6 mg/kg in 1990s to 28.8 mg/kg at present with a decreasing rate of 26.5%. In wheat production, N fertilizer application increased from 84.1 kg/hm² in 1990s to 166 kg/hm², while P application increased by 127%, and K fertilizer increased by 19.8% from 2000s to now. N application increased grain Zn concentration of wheat, while P application significantly decreased grain Zn concentration and K fertilizer had no effect on grain Zn concentration. Therefore, large amount of P fertilizer application may reduce grain Zn concentration in intensive wheat production, and appropriate amount of P could guarantee the high yield and high Zn of wheat.

Keywords: wheat; grain zinc concentration; phosphorus application rate; various years

基金项目:中国博士后科学基金会第64批面上资助项目“紫色土上三种典型蔬菜磷高效利用的根际过程及调控机制”(2018M643394)。

第一作者简介:王义霞,女,1988年出生,山东潍坊人,博士,主要从事土壤-作物碳氮转化的研究。通信地址:400715 重庆市北碚区天生路2号 西南大学农业科学研究院, Tel:023-68251082, E-mail:wyixia@126.com。

收稿日期:2018-12-18, **修回日期:**2019-02-14。

0 引言

锌是人体和作物必须的微量营养元素之一,对人体发育和作物产量、品质具有重要作用^[1-2]。研究发现,人体最佳的锌摄入量为15 mg/d,但当前的数据表明,全球人均锌摄入量仅为0.8~3.6 mg/d,远低于标准值^[3]。据报道,全球至少1/3的人口正面临缺锌及潜在缺锌的困扰,而中国儿童锌缺乏率也高达30%~60%^[4]。造成人体锌缺乏的原因很多,禾谷类作物是人体补充锌的重要来源之一,尤其是在以谷物作物为主要膳食组成的发展中国家。例如,在中国,膳食锌的食物来源中约65%来自于植物性食物,30%来自于肉、鱼、禽类动物性食物,乳、蛋类食物仅提供约5%的锌^[5]。因此,关注谷类作物锌营养对降低人体锌缺乏问题至关重要。

小麦作为全球三大粮食作物之一,提供了人体所需的蛋白质和多种中微量元素^[6]。研究发现,全球小麦籽粒的平均锌浓度为27.3 mg/kg^[7],其远低于核心种质资源库中小麦籽粒锌浓度50.2 mg/kg^[8],也低于人体锌的强化目标值45 mg/kg^[9]。小麦生产中,肥料的施用显著增加了籽粒产量^[10],保证了人口增加对粮食的需求^[11-12],但同时过量施用化肥影响了小麦籽粒锌浓度^[13-14]。已有的研究表明,氮肥施用会通过增加根系形态(如根系长度、根系表面积、根系体积等)促进根系对土壤锌的吸收作用^[15-17];而磷肥施用显著降低了小麦根系形态及根系菌根侵染率进而影响根系对锌的吸收^[14,18-19]。有关肥料施用对籽粒锌浓度的影响的研究已经有报道,但是定量化的分析过去几十年间全球小麦籽粒锌浓度变化并分析肥料施用对其影响仍需要进一步研究。因此,本研究通过总结自20世纪90年代起全球小麦籽粒锌浓度、肥料施用量变化,分析氮磷钾肥施用对小麦锌浓度变化的影响,以期对小麦高产高锌的施肥措施提供依据。

1 材料与方法

本文通过利用 Web of Science、中国知网、万方数据库,查阅到1980到2018年间全球小麦籽粒锌浓度相关的田间试验有效文献84篇,文献涉及到的国家有25个:中国、印度、哈萨克斯坦、澳大利亚、埃及、孟加拉国、巴基斯坦、伊朗、美国、加拿大、土耳其、克罗地亚、匈牙利、英国、法国、德国、荷兰、希腊、波兰、意大利、塞尔维亚、墨西哥、肯尼亚、赞比亚、俄罗斯,所有文献均包括种植年代、小麦籽粒锌浓度、施氮量或施磷量或施钾量。通过文献共收集到860个数据,笔者将所有的数据按照时间进度划分成4组:1981—1990、1991—2000、2001—2010和2011—2018,其中在4个分组内的

籽粒锌浓度样本数分别有56、217、480、107个。本文所用的统计方法主要为方差分析和相关分析,方差分析采用SPSS软件(18.0.0版本)进行,所有图的表达均用Sigmaplot(12.5版本)和Excel呈现。

2 结果与分析

2.1 不同年份的全球小麦籽粒锌浓度变化

由图1所示,不同年份的小麦籽粒锌浓度表现出显著的差异:随着年份的增加,全球小麦籽粒锌浓度值呈现显著下降的趋势。小麦籽粒锌浓度在4个年份分组中的值分别为39.6 mg/kg(1981—1990年)、30.5 mg/kg(1991—2000年)、28.8 mg/kg(2001—2010年)和29.1 mg/kg(2011后)。与1981—1990年份相比较,1991—2000、2001—2010、2011年后的小麦籽粒锌浓度分别下降了23.0%、27.3%和26.5%。

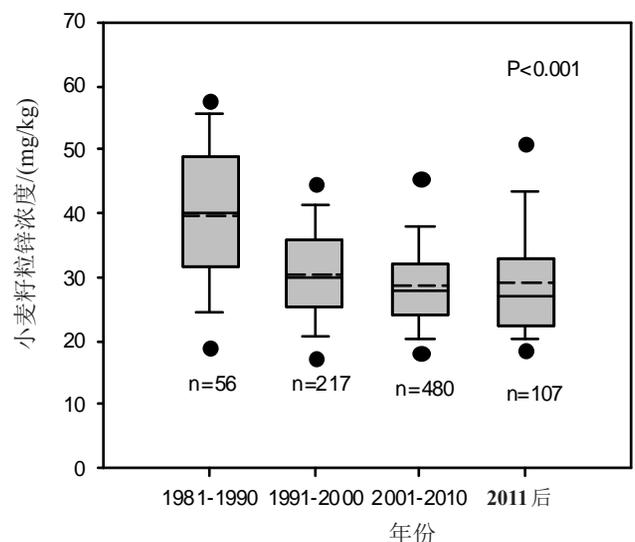


图1 不同年份小麦籽粒锌浓度变化

2.2 不同年份的氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)肥施用量变化

图2a显示,从1981年至今,氮肥施用量呈现增加的趋势。氮肥施用量在4个时间段的值分别为85.0 kg/hm²(1981—1990年)、99.6 kg/hm²(1991—2000年)、148.6 kg/hm²(2001—2010年)、166.5 kg/hm²(2011后)。与1981—1990年份相比较,其氮肥施用量的增加比例分别为17.2%、74.8%和95.9%。磷肥施用量在不同年份间也表现出不同的差异(图2b):磷肥投入量在4个时间段的值分别为95.2 kg/hm²(1981—1990年)、51.7 kg/hm²(1991—2000年)、87.7 kg/hm²(2001—2010年)、118.2 kg/hm²(2011后)。在第一个时间段内,较高的磷肥施用量可能与较少的数据样本量有关。与1991—2000年份相比较,其后两段时间内的磷肥投入量的增加比例分别为69.6%和128.6%。同样,钾肥的施用量随年份的增加也表现

出了增长的趋势(除了第一阶段缺乏数据以外,图2c):钾肥投入量在3个时间段内的值分别为66.3 kg/hm²(1991—2000年)、77.5 kg/hm²(2001—2010年)、79.6 kg/hm²(2011后)。与1991—2000年份相比较,其后两段时间内的钾肥投入量的增加比例分别为16.9%和20.1%。

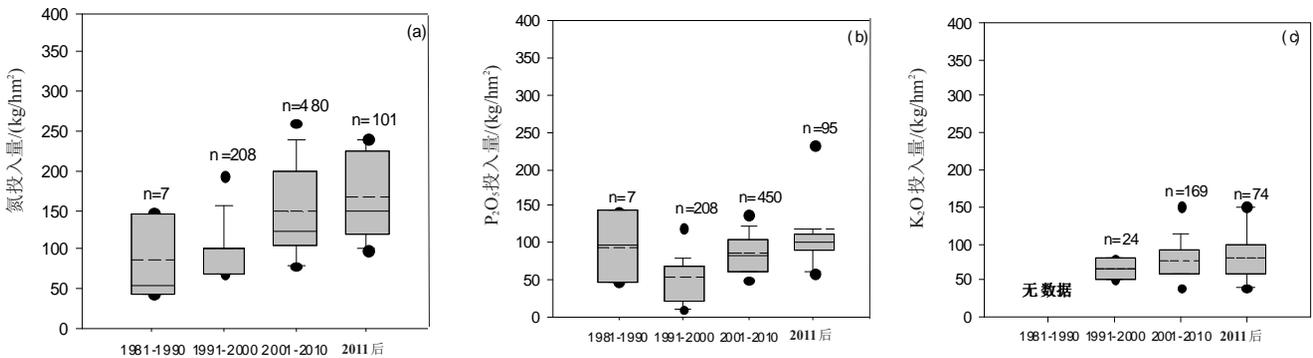


图2 不同年份氮磷钾肥施用量变化

随着籽粒氮的累积而增加,但过量施用氮肥并没有继续增加籽粒锌浓度。相反,随着磷肥施用量的增加,籽粒锌浓度呈现显著下降的趋势(图4)。由方程式可见,P₂O₅每增加10 kg/hm²,籽粒锌浓度下降0.1 mg/kg。由图5可得,钾肥施用量并没有影响籽粒锌浓度。

3 结论

在过去的40年间,全球小麦籽粒锌浓度随年份的增加呈现显著下降的趋势。与1990s相比较,2000s、2010s和2011年后的小麦籽粒锌浓度分别下降了23.0%、27.3%和26.5%。同时在此期间,小麦施氮量较1990s分别增加了17.2%、74.8%和95.9%。与2000s相

2.3 氮磷钾肥施用对小麦籽粒锌浓度的影响

如图3所示,氮肥施用量与小麦籽粒锌浓度呈现一元二次方程的关系($Y=-0.0002X^2+0.089X+24.1$):即随着施氮量的增加,籽粒锌浓度先快速增加后趋于稳定。这说明施氮量从缺乏到适宜过程中,籽粒锌的浓度

比,2010s和2011年后的小麦施磷量分别增加了69.6%和128.6%;钾肥施用量在2010s和2011年后分别增加了16.9%和20.1%。氮肥的施用对小麦籽粒锌浓度的影响呈现先增加后趋于稳定的趋势,磷肥显著降低了籽粒锌浓度,但钾肥对籽粒锌浓度并没有影响。综上,施肥量的增加可能潜在的降低了小麦籽粒锌浓度,尤其是磷肥的大量施用。

4 讨论

通过对过去40年的田间试验数据的分析,发现全球小麦籽粒锌浓度呈现逐年下降的趋势,这与之前的研究结果是相似的^[20-21]。品种的改变、产量增加、收获指数提

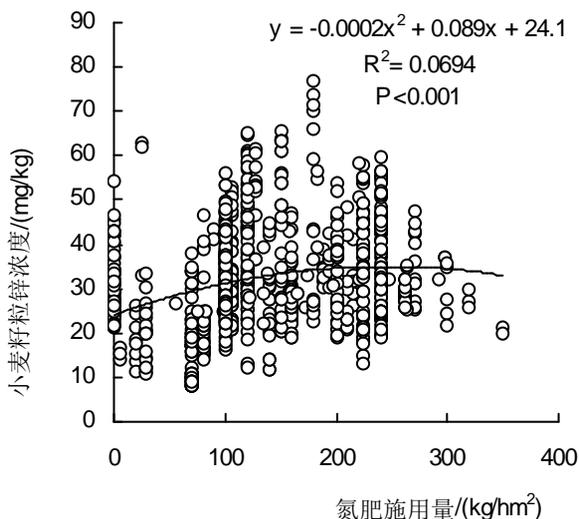


图3 氮肥施用量对小麦籽粒锌浓度的影响

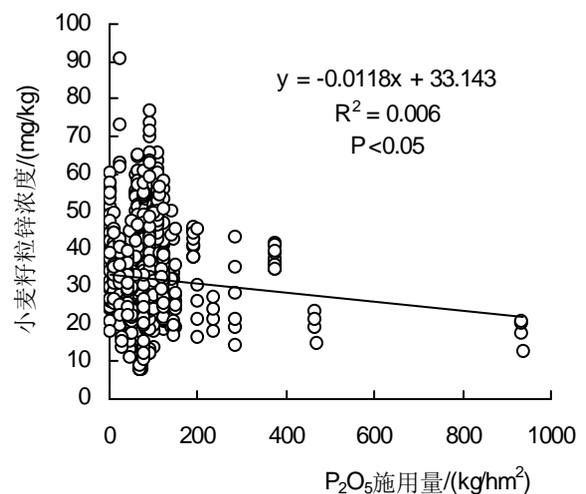


图4 P₂O₅施用量对小麦籽粒锌浓度的影响

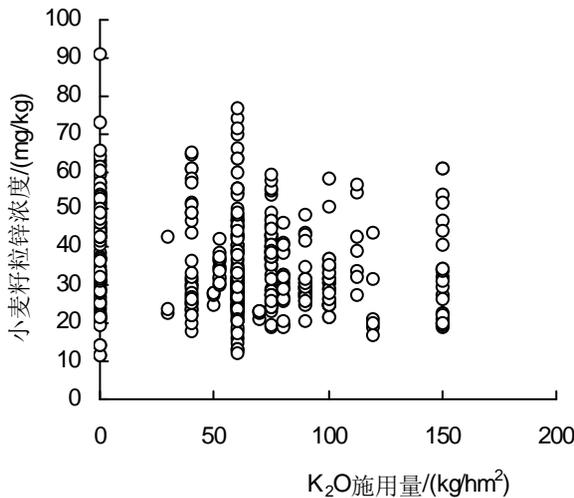


图5 K₂O 施用量对小麦籽粒锌浓度的影响

高以及大量肥料的施用可能造成了当前籽粒锌浓度呈现下降的趋势^[7,20,22]。按照人体强化的籽粒锌的目标值需达到45 mg/kg,当前的小麦籽粒锌浓度(28.8 mg/kg)远低于该目标值。本研究进一步定量化的指出,从1980年开始,全球小麦籽粒锌浓度每隔十年平均下降2.7 mg/kg,这样的结果表明当前的小麦生产需要及时加强农业管理方式^[11],提高小麦籽粒锌浓度才能更好的保证人体对锌的需求。

在籽粒锌浓度发生变化的几十年里,影响籽粒锌浓度的肥料施用量也发生了显著的变化。氮磷钾肥的施用量呈现逐渐递增的趋势,这之前报道的结果是相似的^[23]。这表明在集约化农业高产生体系中,尽管肥料贡献了30%~50%作物产量^[24-25],但农民当前的施肥理念普遍存在着“肥料越多,产量越高”的误区,导致大量氮磷钾肥料投入到土壤中,不仅潜在的对环境造成影响^[26],还可能降低农产品的品质^[27]。

本研究指出肥料的施用显著影响了小麦籽粒锌浓度。氮肥施用增加了籽粒锌浓度,这之前的研究是一致的^[28-30]。研究表明,当氮肥用量不超过320 kg/hm²时,小麦籽粒锌含量和地上部锌吸收量与施氮量呈极显著的正相关关系,施氮量每增加100 kg/hm²,籽粒锌含量平均提高4.0 mg/kg,地上部锌吸收量平均提高36.4 g/hm²^[13]。已有的研究表明施氮会显著促进根系干重、根长密度、根表面积和根体积^[31],同时大量施氮会促进植物根系向地上部转运锌的数量^[32-33]以及锌从营养器官向籽粒的再转移^[34]。本研究发现施磷量与小麦籽粒锌浓度之间呈现显著的负相关关系,这在小麦作物上已经被大量报道过^[14,35-36]。小麦施磷量的结果表明,根系对锌吸收能力的下降是高磷降低锌浓度的

重要原因之一;其机制可解释为磷肥施用显著降低根系的菌根侵染率,而菌根侵染率对锌的吸收具有促进作用^[37-38]。本研究大样本的数据显示施钾与否并不会影响籽粒锌浓度,这与之前的报道是一致的^[39]。

针对本研究氮磷钾肥对籽粒锌浓度的影响结果,农业生产上合理控制施肥量是保证籽粒锌营养的关键^[12,40]。磷肥施用量应在保证籽粒产量的条件下尽可能的降低磷肥投入^[41];氮肥施用也应保证控制在优化水平,过高的氮肥并没有继续增加籽粒锌浓度。

参考文献

- [1] Khoshgoftarmansh A H, Afyuni M, Norouzi M, et al. Fractionation and bioavailability of zinc (Zn) in the rhizosphere of two wheat cultivars with different Zn deficiency tolerance[J].*Geoderma*,2018, 309:1-6.
- [2] Cakmak I, Mclaughlin M J, White P. Zinc for better crop production and human health[J].*Plant and Soil*,2016:1-4.
- [3] Hotz C, Brown K H. Assessment of the risk of zinc deficiency in populations and options for its control[M].*International nutrition foundation: for UNU*,2004.
- [4] 兰晓霞. 锌缺乏与婴幼儿健康[J]. *国外医学·妇幼保健分册*,2003 (01):49-51.
- [5] 耿国柱, 窦丽霞, 袁伟, 等. 锌与幼儿生长发育的关系[J]. *微量元素与健康研究*,2004(06):18-22.
- [6] Shewry P R. Wheat[J].*Journal of Experimental Botany*,2009,60(6): 1537-1553.
- [7] Chen X, Zhang Y, Tong Y, et al. Harvesting more grain zinc of wheat for human health[J].*Scientific Reports*,2017,7(1).
- [8] 石荣丽, 邹春琴, 芮玉奎, 等. ICP-AES 测定中国小麦微核心种质库籽粒矿质养分含量[J]. *光谱学与光谱分析*,2009,29(4):1104-1107.
- [9] 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(3):293-307.
- [10] 车升国, 袁亮, 李燕婷, 等. 我国主要麦区小麦产量形成对磷素的需求[J]. *植物营养与肥料学报*,2016,22(4):869-876.
- [11] 黄立梅, 黄绍文, 韩宝文. 冬小麦-夏玉米适宜氮磷用量和平衡施肥效应[J]. *中国土壤与肥料*,2010,2010(5):38-44.
- [12] 张文英, 张庆江. 冬小麦高产稳产的适宜氮磷营养基础及合理施肥技术[J]. *华北农学报*,1993(03):76-81.
- [13] 靳静静, 王朝辉, 戴健, 等. 长期不同氮、磷用量对冬小麦籽粒锌含量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*,2014(06):1358-1367.
- [14] 武际, 尹恩, 郭熙盛. 不同磷钾组合对小麦磷锌含量、积累与分配的影响[J]. *土壤通报*,2010(06):1444-1448.
- [15] 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.
- [16] Kirmani H F, Hussain M, Ahmad F, et al. Impact of zinc uptake on morphology, physiology and yield attributes of wheat in Pakistan[J]. *Cercetari Agronomice in Moldova*,2018,51(1).

- [17] Ma X, Luo W, Li J, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi increase both concentrations and bioavailability of Zn in wheat (*Triticum Aestivum* L) grain on Zn-spiked soils[J]. *Applied Soil Ecology*, 2018: 1-7.
- [18] 赵荣芳, 邹春琴, 张福锁. 长期施用磷肥对冬小麦根际磷、锌有效性及其作物磷锌营养的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007(03):368-372.
- [19] Naeem A, Aslam M, Lodhi A. Improved potassium nutrition retrieves phosphorus induced decrease in uptake and grain zinc concentration of wheat[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(11):4351-4356.
- [20] Fan M, Zhao F, Fairweather-Tait S J, et al. Evidence of decreasing mineral density in wheat grain over the last 160 years[J]. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2008, 22(4):315-324.
- [21] Defries R, Fanzo J, Remans R, et al. Metrics for land- scarce agriculture[J]. *Science*, 2015, 349(6245):238-240.
- [22] Cakmak I, Kutman U B. Agronomic biofortification of cereals with zinc: A review[J]. *European Journal of Soil Science*, 2017:1-9.
- [23] Vitousek P M, Naylor R, Crews T, et al. Nutrient imbalances in agricultural development[J]. *Science*, 2009, 324(5934):1519-1520.
- [24] Nacry P. A Role for auxin redistribution in the responses of the root system architecture to phosphate starvation in arabidopsis[J]. *Plant Physiology*, 2005, 138(4):2061-2074.
- [25] Cordell D, Drangert J, White S. The story of phosphorus: global food security and food for thought[J]. *Global Environmental Change*, 2009, 19(2):292-305.
- [26] 鲁如坤. 土壤磷素水平和水体环境保护[J]. *磷肥与复肥*, 2003(01): 4-8.
- [27] 王庆仁, 李继云. 论合理施肥与土壤环境的可持续性发展[J]. *环境科学进展*, 1999(02):117-125.
- [28] Chauhan S K, Singh S K, Goyal V. Effect of nitrogen, phosphorus and zinc on yield, quality and nutrient uptake of wheat[J]. *Annals of Agricultural Research*, 2014(35):21-25.
- [29] Erenoglu E B, Kutman U B, Ceylan Y, et al. Improved nitrogen nutrition enhances root uptake, root- to- shoot translocation and remobilization of zinc (^{65}Zn) in Wheat[J]. *New Phytologist*, 2011, 189 (2):438-448.
- [30] 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(1-2):177-187.
- [31] Xue Y, Zhang W, Liu D, et al. Effects of nitrogen management on root morphology and zinc translocation from root to shoot of winter wheat in the field[J]. *Field Crops Research*, 2014, 161:38-45.
- [32] 黄德明, 徐秋明, 李亚星, 等. 土壤氮、磷营养过剩对微量元素锌、锰、铁、铜有效性及植株中含量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007(05):966-970.
- [33] Abu-Elsaoud A M, Nafady N A, Abdel-Azeem A M. Arbuscular mycorrhizal strategy for zinc mycoremediation and diminished translocation to shoots and grains in wheat[J]. *Plos One*, 2017, 12(11): e188220.
- [34] Xue Y, Zou C, Yue S, et al. Grain and shoot zinc accumulation in winter wheat affected by nitrogen management[J]. *Plant and Soil*, 2012, 361(1):153-163.
- [35] 买文选, 田霄鸿, 陆欣春. 小麦不同生育期磷-锌关系研究[J]. *华北农学报*, 2011(05):205-213.
- [36] 刘世亮, 刘忠珍, 刘芳, 等. 石灰性土壤中磷锌对小麦生长及锌吸收分配的影响[J]. *生态环境*, 2008(01):363-367.
- [37] Zhang W, Liu D, Liu Y, et al. Zinc uptake and accumulation in winter wheat relative to changes in root morphology and mycorrhizal colonization following varying phosphorus application on calcareous soil[J]. *Field Crops Research*, 2016, 197:74-82.
- [38] Ercoli L, Schüßler A, Arduini I, et al. Strong increase of durum wheat iron and zinc content by field- inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi at different soil nitrogen availabilities[J]. *Plant and Soil*, 2017:153-167.
- [39] 俄胜哲, 袁继超, 丁志勇, 等. 氮磷钾肥对稻米铁、锌、铜、锰、镁、钙含量和产量的影响[J]. *中国水稻科学*, 2005(05):434-440.
- [40] 王焘宽, 郭全为, 马秀忠, 等. 冬小麦氮磷营养的综合诊断[J]. *中国农业科学*, 1986(05):38-44.
- [41] 王庆仁, 李继云, 李振声. 磷高效基因型小麦对缺磷胁迫的根际适应性反应[J]. *西北植物学报*, 2000(01):1-7.