



# 农业资源与环境学报

中文核心期刊  
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

## 施锌对不同品种小麦锌吸收分配的影响

李广鑫, 赵鹏, 睢福庆, 刘红恩, 高巍, 秦世玉, 李畅

引用本文:

李广鑫, 赵鹏, 睢福庆, 等. 施锌对不同品种小麦锌吸收分配的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(2): 216–225.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0294>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 不同有机物料与外源锌对土壤锌形态及生物有效性的影响

郝佳丽, 卜玉山, 贾峥嵘, 席吉龙, 姚景珍, 段超

农业资源与环境学报. 2015(3): 263–268 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0298>

### 土壤镉污染对小麦生长及镉吸收的影响

张婧, 李仁英, 徐向华, 谢晓金, ChambeEA

农业资源与环境学报. 2019, 36(4): 522–527 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0215>

### 遵义市土壤锌空间分布特征研究

赵建, 师华定, 吴啸, 韩小斌, 彭玉龙, 马瑾, 刘京

农业资源与环境学报. 2019, 36(3): 298–303 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0158>

### 沼液替代化肥氮对冬小麦产量、品质及生长发育的影响

王桂良, 张家宏, 王守红, 寇祥明, 徐荣, 韩光明, 唐鹤军, 朱凌宇, 毕建花, 吴雷明

农业资源与环境学报. 2018, 35(5): 467–475 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0001>

### 秸秆还田配施石灰对水田土壤铜、锌、铅、镉活性的影响

倪中应, 沈倩, 章明奎

农业资源与环境学报. 2017, 34(3): 215–225 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0305>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李广鑫, 赵 鹏, 睢福庆, 等. 施锌对不同品种小麦锌吸收分配的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(2): 216–225.

LI Guang-xin, ZHAO Peng, SUI Fu-qing, et al. Effects of zinc application on zinc uptake and distribution among different wheat cultivars[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(2): 216–225.

## 施锌对不同品种小麦锌吸收分配的影响

李广鑫<sup>1,2</sup>, 赵 鹏<sup>1,2</sup>, 睢福庆<sup>1,2</sup>, 刘红恩<sup>1,2</sup>, 高 巍<sup>1,2</sup>, 秦世玉<sup>1,2</sup>, 李 畅<sup>1,2\*</sup>

(1. 河南农业大学资源与环境学院, 郑州 450002; 2. 河南省土壤污染防治与修复重点实验室, 郑州 450002)

**摘 要:**为明确土壤施锌对不同品种小麦的生长发育以及养分吸收的影响, 选用河南省广泛种植的 10 个冬小麦品种, 采用盆栽试验, 设置 0 mg·kg<sup>-1</sup> (Zn0)、10 mg·kg<sup>-1</sup> (Zn10)、20 mg·kg<sup>-1</sup> (Zn20)、30 mg·kg<sup>-1</sup> (Zn30) 4 个施锌水平, 研究不同施锌量对冬小麦生长发育和锌吸收利用的影响。结果表明: 在北方石灰性潮土增施锌肥能够显著提高小麦籽粒锌含量, 但产量构成要素、干质量及锌效率等对施锌的响应因品种而异。施锌显著增加了供试小麦整株锌含量和累积量, 且在 Zn20 水平下增幅最大, 较 Zn0 处理分别提高了 41.4%~85.1% 和 19.9%~110.1%。“郑麦 379”“百农 207”“郑麦 0856”“周麦 22”的籽粒锌含量随锌浓度增加而增加, 在 Zn30 达到最高, 较 Zn0 提高了 43.5%、65.1%、68.2%、55.8%; “郑麦 366”和“周麦 27”的籽粒锌含量在锌肥 10~30 mg·kg<sup>-1</sup> 时无显著差异, 较 Zn0 处理增加了 40.6%~62.3%; 而其他品种小麦的籽粒锌含量在 Zn20 处理最高, 较 Zn0 处理增加 55.7%~92.2%。施锌后不同小麦各部位的锌累积量分配比例有明显差异, 籽粒、颖壳、茎秆、根部的锌累积量占比范围分别为 17.4%~49.9%、6.3%~16.0%、21.5%~46.1%、12.9%~28.7%。研究表明, “郑麦 379”和“矮抗 58”可作为锌高效品种; 土壤施锌 10~20 mg·kg<sup>-1</sup> 可以有效提高籽粒锌含量, 改善小麦锌营养品质。

**关键词:** 小麦品种; 锌效率; 吸收; 累积; 分配比例

中图分类号: S512.1+1; S143.7+2 文献标志码: A 文章编号: 2095-6819(2020)02-0216-10 doi: 10.13254/j.jare.2019.0294

### Effects of zinc application on zinc uptake and distribution among different wheat cultivars

LI Guang-xin<sup>1,2</sup>, ZHAO Peng<sup>1,2</sup>, SUI Fu-qing<sup>1,2</sup>, LIU Hong-en<sup>1,2</sup>, GAO Wei<sup>1,2</sup>, QIN Shi-yu<sup>1,2</sup>, LI Chang<sup>1,2\*</sup>

(1. College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China; 2. Henan Provincial Key Laboratory of Soil Pollution Control and Remediation, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** In order to clarify the effects of exogenous Zn application on the growth and Zn uptake of different wheat cultivars, 10 winter wheat cultivars widely cultivated in Henan Province were selected. Pot experiments were conducted with four Zn levels, namely 0 mg·kg<sup>-1</sup> (Zn0), 10 mg·kg<sup>-1</sup> (Zn10), 20 mg·kg<sup>-1</sup> (Zn20), and 30 mg·kg<sup>-1</sup> (Zn30). The effects of different Zn application rates on the growth, development, and Zn uptake and utilization of winter wheat were studied. The results showed that the application of Zn fertilizer on calcareous soil in northern China could significantly increase the wheat grain Zn concentration, but the yield components, dry matter, and Zn efficiency varied within cultivars upon Zn fertilization. The Zn concentration and accumulation in whole wheat plants increased upon Zn application and the increase rate was maximized at Zn20 level, which were 41.4%~85.1% and 19.9%~110.1% higher than those of the control, respectively. The grain Zn concentration of ZhengMai379, BaiNong207, ZhengMai0856, and ZhouMai22 increased as the Zn treatment increased and was maximized at Zn30, with concentrations 43.5%, 65.1%, 68.2%, and 55.8% higher than that of the control, respectively. The grain Zn concentration of ZhengMai366 and ZhouMai27 did not show an obvious difference under the Zn supply of 10~30 mg·kg<sup>-1</sup>, which was

收稿日期: 2019-05-30 录用日期: 2019-08-30

作者简介: 李广鑫 (1992—), 男, 河南商丘人, 硕士研究生, 从事锌高效营养分子机制研究。E-mail: zihuanliguangxin@163.com

\*通信作者: 李 畅 E-mail: 106lichang@163.com

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划项目 (2017YFD0201700); 河南省高等学校重点科研项目计划 (19A210015)

**Project supported:** The National Key R&D Program of the 13rd Five-Year Plan of China (2017YFD0201700); The Key Scientific Research Project for Higher Education of Henan Province (19A210015)

40.6%~62.3% higher than that of Zn0. The grain Zn concentration in the other wheat cultivars was maximized at Zn20, and ranged from 55.7% to 92.2% higher than that of the control. The Zn distribution ratio in different wheat organs varied significantly after Zn application, the proportion of Zn in the grains, glumes, stems, and roots was 17.4%~49.9%, 6.3%~16.0%, 21.5%~46.1%, and 12.9%~28.7%, respectively. Overall, ZhengMai379 and AiKang58 could be used as high-efficiency Zn cultivars, and Zn fertilization of 10~20 mg·kg<sup>-1</sup> could effectively increase the wheat grain Zn concentration and improve the Zn nutritional quality.

**Keywords:** wheat cultivars; zinc efficiency; uptake; accumulation; distribution ratio

锌(Zn)是动植物生长发育所必需的微量营养元素,作为多种酶的组分广泛地参与各种代谢活动<sup>[1-2]</sup>,全世界约有20%的人口面临着锌摄入量不足所导致的免疫功能障碍、性腺发育不良、认知功能障碍以及腹泻、肺炎等疾病的风险<sup>[3-4]</sup>。我国居民20%以上锌营养由小麦及其制品提供<sup>[5]</sup>。然而作为我国主要的粮食作物,小麦锌含量普遍偏低,尤其是在干旱半干旱地区,缺锌问题更加突出<sup>[6]</sup>。研究发现,我国有超过40%的土壤存在不同程度缺锌问题,在北方石灰性土壤中,全锌含量仅为78 mg·kg<sup>-1</sup>,有效锌含量常低于缺锌临界值(0.5 mg·kg<sup>-1</sup>)<sup>[7]</sup>,土壤中有效锌含量不足是导致小麦锌营养缺乏的主要原因。

研究表明,施用锌肥可以在短期内有效提高作物的籽粒锌含量和有效性<sup>[8-9]</sup>。在生产上,对缺锌土壤增施锌肥是目前改善作物锌营养状况最直接有效的措施<sup>[9-12]</sup>。冯绪猛等<sup>[13]</sup>研究发现,施用锌肥可显著提高水稻产量和籽粒锌含量。张勇强等<sup>[14]</sup>研究发现,施用锌肥可显著提高玉米的产量和籽粒蛋白质含量。国春慧等<sup>[15]</sup>研究发现施锌可增加小麦籽粒和秸秆锌含量,提高锌肥利用率。但不同麦类作物品种之间对缺锌的敏感性差异显著。Cakmak等<sup>[16]</sup>通过对825份野生二粒小麦的研究发现,籽粒锌含量表现出极大的差异性(含量范围为15~109 mg·kg<sup>-1</sup>),锌含量最高的品种甚至超过栽培小麦;王蔚华<sup>[17]</sup>发现,小麦籽粒铁、锌、铜含量存在显著的基因型差异,通过选育铁、锌、铜高效吸收的基因型品种能够明显改善籽粒养分积累状况。因此,筛选锌高效小麦品种、确定最佳的施锌浓度对于提高小麦籽粒锌营养品质、改善人体健康状况具有十分重要的意义。

河南作为全国小麦生产和调出第一大省<sup>[18]</sup>,其产量和品质对于保障国家粮食安全、提高人民生活水平具有重要作用。本文拟在盆栽试验条件下通过对不同品种小麦的产量构成因子及成熟期各器官锌含量、锌效率和锌累积量进行比较分析,评价不同品种小麦在产量、生物量、籽粒锌含量、锌效率以及锌的吸收、转运和再分配上的差异,并筛选锌高效品种,最终实

现石灰性潮土小麦产量、籽粒锌营养品质及锌效率的协同提升。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

选用河南省广泛种植的10个冬小麦品种:郑麦379(ZM379)、矮抗58(AK58)、济麦22(JM22)、百农207(BN207)、平安8号(PA8)、郑麦0856(ZM0856)、秋乐2122(QL2122)、郑麦366(ZM366)、周麦22(ZM22)和周麦27(ZM27)。

### 1.2 培养试验

试验于2017年10月—2018年6月在河南农业大学科教园区进行,供试土壤为北方石灰性潮土,其基本理化性质为有机质含量11.78 g·kg<sup>-1</sup>,碱解氮含量78.42 mg·kg<sup>-1</sup>,速效磷含量11.02 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾含量183.15 mg·kg<sup>-1</sup>,pH 7.34,DTPA-Zn含量1.48 mg·kg<sup>-1</sup>,属于中等缺锌水平(1.1~2.0 mg·kg<sup>-1</sup>)<sup>[7]</sup>。

以ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O作为锌源,试验共设置0、10、20 mg·kg<sup>-1</sup>和30 mg·kg<sup>-1</sup>四个施锌水平,分别用Zn0、Zn10、Zn20、Zn30表示。采集园区内未受污染的0~20 cm的耕层土,采用盆栽试验,塑料盆型号为直径310 mm×深度200 mm,土壤样品风干后除去砂砾及植物残体,过2 mm筛,每盆用土8 kg,按设计添加底肥,混匀后装盆,重复3次,共120盆。

于2017年10月15日播种小麦,出苗后每盆定苗5株。盆栽试验底肥用量均为每盆含纯N 3.43 g、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 2.30 g、K<sub>2</sub>O 1.28 g,分别以尿素、磷酸二氢钾和氯化钾作为底肥施入,并于拔节期追施1.72 g尿素。保持盆内土壤水分田间持水量60%~70%,平均每7 d浇一次水,每次每盆定量浇水1 L。

小麦成熟后整株收获,风干后考种,记录有效穗数、穗粒数和千粒重等产量构成要素,并将小麦植株分为籽粒、颖壳、茎秆和根系,60℃下烘干至恒定质量,记录各部位的干质量;粉碎,测定植株锌含量。

### 1.3 测定指标和方法

供试土壤的基本理化指标均按照鲍士旦<sup>[19]</sup>的方

法进行测定。

植株样品锌含量测定:将烘干后的样品粉碎,采用石墨炉消解法(浓 HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>, V/V=83:17)消煮样品后,用原子吸收分光光度法测定锌含量。

指标计算方法:

锌效率=不施锌时作物地上部干质量/施锌时地上部干质量×100%<sup>[20]</sup>

Zn 累积量分配比例=每盆各部位 Zn 累积量/每盆 Zn 总累积量×100%

#### 1.4 数据处理

所有试验数据均采用 DPS 7.05 进行统计分析,多重比较采用 LSD-test 法,采用 Excel 2016、Sigma-Plot 12.5 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 施锌对不同品种冬小麦产量构成要素的影响

小麦穗数体现了小麦的有效分蘖数,小麦穗粒数是决定产量的主要因素之一,而千粒重体现籽粒的饱满程度和籽粒的大小,千粒重越大籽粒越饱满则产量

越高。由表 1 可知,在不施锌(Zn0)处理下,穗粒数无显著变化,有效穗数和千粒重分别以“济麦 22”和“郑麦 0856”为最高,“周麦 22”“周麦 27”和“矮抗 58”最低。与不施锌处理相比,小麦的有效穗数和穗粒数随着施锌浓度的增加呈现不同的变化趋势,在三种施锌浓度下,“平安 8 号”的有效穗数和“周麦 27”的穗粒数表现出明显优势。整体来看,小麦千粒重随着施锌浓度的增加表现出明显的增加趋势,“济麦 22”“郑麦 366”“周麦 27”均在 Zn30 处理下达到最大值,较 Zn0 处理分别增加了 8.20%、8.04%、12.10%;“百农 207”“秋乐 2122”均在 Zn20 处理下达到最大值,较 Zn0 处理分别增加了 11.52%、12.30%;“矮抗 58”“郑麦 379”“周麦 22”在 Zn10 处理下达到最大值,较 Zn0 处理增加了 30.66%、1.19%、15.01%。结果表明不同的小麦品种对锌肥的敏感性不同,但在一定程度上增施锌肥均可提高小麦产量。

### 2.2 施锌对不同品种冬小麦生长发育的影响

由表 2 可以看出,“矮抗 58”地上部干质量在 Zn0 处理下显著高于其他品种,并随锌浓度的提高逐渐降

表 1 不同施锌水平对冬小麦产量构成要素的影响

Table 1 The yield components of winter cultivars under different Zn levels

| 处理<br>Treatment | 品种<br>Cultivar | 有效穗数<br>Number of spikes | 穗粒数<br>Kernel per spike | 千粒重<br>1000-kernel weight/g | 处理<br>Treatment | 品种<br>Cultivar | 有效穗数<br>Number of spikes | 穗粒数<br>Kernel per spike | 千粒重<br>1000-kernel weight/g |
|-----------------|----------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------|----------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| Zn0             | ZM379          | 10.3ab                   | 20.2a                   | 38.40bc                     | Zn20            | ZM379          | 7.0e                     | 20.9b                   | 35.71de                     |
|                 | AK58           | 10.7ab                   | 20.3a                   | 31.20c                      |                 | AK58           | 9.3bcde                  | 19.5bc                  | 39.40bcde                   |
|                 | JM22           | 12.7a                    | 14.8a                   | 41.44ab                     |                 | JM22           | 8.3de                    | 15.1bc                  | 43.23abcd                   |
|                 | BN207          | 10.7ab                   | 21.0a                   | 40.80ab                     |                 | BN207          | 9.0cde                   | 16.5bc                  | 45.50abc                    |
|                 | PA8            | 10.7ab                   | 20.9a                   | 41.97ab                     |                 | PA8            | 13.3a                    | 15.9bc                  | 37.33de                     |
|                 | ZM0856         | 8.7b                     | 20.0a                   | 48.77a                      |                 | ZM0856         | 11.3abcd                 | 22.9b                   | 47.10ab                     |
|                 | QL2122         | 10.3ab                   | 14.0a                   | 43.19ab                     |                 | QL2122         | 12.3ab                   | 11.8c                   | 48.50a                      |
|                 | ZM366          | 10.3ab                   | 16.7a                   | 37.30bc                     |                 | ZM366          | 9.7bcde                  | 22.0b                   | 39.07bcde                   |
|                 | ZM27           | 8.0b                     | 22.0a                   | 36.93bc                     |                 | ZM27           | 8.0e                     | 36.8a                   | 38.73cde                    |
|                 | ZM22           | 8.0b                     | 17.2a                   | 38.60bc                     |                 | ZM22           | 11.7abc                  | 15.9bc                  | 34.40e                      |
| Zn10            | ZM379          | 10.7a                    | 15.9cd                  | 38.86a                      | Zn30            | ZM379          | 9.0bc                    | 18.6ab                  | 36.98de                     |
|                 | AK58           | 9.3a                     | 27.4abc                 | 40.77a                      |                 | AK58           | 11.0ab                   | 21.9ab                  | 34.57e                      |
|                 | JM22           | 10.7a                    | 20.7bcd                 | 41.57a                      |                 | JM22           | 7.7bc                    | 21.4ab                  | 44.83abc                    |
|                 | BN207          | 10.0a                    | 33.0a                   | 37.47a                      |                 | BN207          | 9.3bc                    | 23.6ab                  | 41.53bcd                    |
|                 | PA8            | 13.0a                    | 18.4bcd                 | 39.67a                      |                 | PA8            | 13.0a                    | 18.2ab                  | 39.29de                     |
|                 | ZM0856         | 10.0a                    | 24.0abcd                | 42.27a                      |                 | ZM0856         | 9.0bc                    | 23.7ab                  | 48.17a                      |
|                 | QL2122         | 9.7a                     | 18.9bcd                 | 44.90a                      |                 | QL2122         | 10.0abc                  | 16.3b                   | 45.80ab                     |
|                 | ZM366          | 10.0a                    | 13.9d                   | 39.69a                      |                 | ZM366          | 7.3c                     | 20.1ab                  | 40.30cd                     |
|                 | ZM27           | 9.3a                     | 29.8ab                  | 37.93a                      |                 | ZM27           | 8.3bc                    | 29.0a                   | 41.40bcd                    |
|                 | ZM22           | 10.3a                    | 21.7abcd                | 42.53a                      |                 | ZM22           | 10.0abc                  | 15.5b                   | 34.07e                      |

注:表中数据用平均值表示(n=3),同列同一施锌水平下不同小写字母表示品种间差异显著(P<0.05)。下同。

Note: The data are expressed as the means of three replicates. Different letters following the means within the same column for the same Zn level indicate significant difference(P<0.05). The same below.

低,“郑麦379”也表现出相似的趋势,“平安8号”“周麦22”“百农207”“郑麦366”和“秋乐2122”均在Zn10浓度下达到最高,而“周麦27”和“郑麦0856”在Zn20浓度下达到最高,表明“矮抗58”和“郑麦379”具有一定的耐缺锌能力,在不施锌时表现出较明显的生长优势,土壤中锌浓度升高时反而对其地上部生长不利。而对于根系干质量,不同品种之间对锌浓度的响应差异较大,其中“周麦22”在不同浓度锌处理下其根系干质量均达到最大。根冠比是衡量小麦养分吸收的敏感参数。与不施锌处理相比,小麦的根冠比随着施锌浓度的增加呈现出不同的变化趋势。“周麦22”和“周麦27”的根冠比在不施锌处理下高于其他品种。在Zn10和Zn20水平下,各品种根冠比均无显著差异。

### 2.3 不同品种冬小麦锌效率的比较

由图1可以看出,“郑麦379”和“矮抗58”的锌效率均随锌浓度的增加而升高,并且“郑麦379”在三种锌浓度处理下均显著高于其他品种,表明其具有较高的锌效率水平。从图1B和图1C中可以看出,“济麦22”“百农207”和“平安8号”在Zn30处理下锌效率低于Zn20处理,而其他品种表现出小幅增高或基本不变,表明适宜的锌浓度可提高小麦的锌效率,而锌浓度过高可能造成对小麦的毒害作用。

### 2.4 施锌对不同品种小麦锌含量和不同部位锌分配比例的影响

#### 2.4.1 施锌对籽粒、地上部和根系锌含量的影响

从籽粒锌含量可以看出不同品种小麦对不同施锌水平响应差异明显(图2)。与Zn0处理相比,外源施锌均不同程度增加了籽粒的锌含量,大部分品种在Zn20处理时锌含量达到最高。从图2可以看出,随着施锌浓度的增加,供试小麦品种“矮抗58”“济麦22”

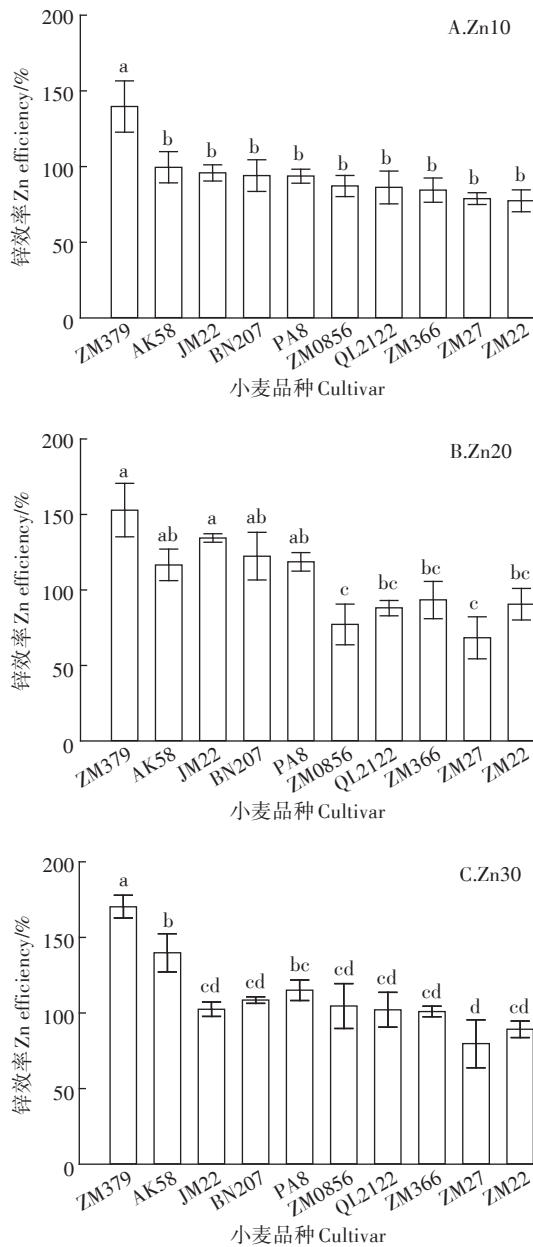
“平安8号”和“秋乐2122”籽粒锌含量呈先增加后下降的趋势,并在Zn20处理下达到最大,与不施锌(Zn0)处理相比分别增加了55.74%、61.29%、58.55%、92.19%,其中“秋乐2122”增幅最明显。“郑麦379”“百农207”“郑麦0856”和“周麦22”籽粒锌含量随施锌浓度的增加而持续增加,在Zn30处理时达到最高,较Zn0处理分别增加了43.47%、65.10%、68.19%、55.77%。而“郑麦366”和“周麦27”在三种施锌浓度下其籽粒锌含量差异不显著,说明外界低锌浓度条件下锌向籽粒中的转运效率较高。

由表3可以看出,施锌显著提高了小麦植株地上部和根系的锌含量。地上部锌含量除“矮抗58”“平安8号”“秋乐2122”和“周麦27”随着锌浓度的增加呈现先增后减的趋势外,其他品种均随着锌浓度的增加而增加,而根系锌含量除了“郑麦379”和“周麦22”外,其他品种也随锌浓度的增加持续增加。在缺锌(Zn0)处理下,“周麦22”地上部锌含量最高且显著高于其他小麦品种,而根系中,“矮抗58”锌含量最高,“秋乐2122”锌含量最低,其他品种差异不显著。Zn10处理下,“平安8号”地上部锌含量为40.64 mg·kg<sup>-1</sup>,显著低于其他品种,而“郑麦0856”根系锌含量显著高于其他品种;Zn20处理下,“济麦22”“百农207”和“周麦27”的地上部锌含量最低,“郑麦379”和“周麦22”的地上部锌含量最高,其他品种之间的锌含量差异不显著。而“周麦22”根系锌含量最高,是其他小麦品种的1.06~1.67倍;Zn30处理条件下,“周麦22”的地上部锌含量同样最高,达到65.81 mg·kg<sup>-1</sup>,是其他品种的1.04~1.38倍。从表3可知,随着施锌浓度的增加,“郑麦379”“济麦22”“百农207”“郑麦0856”“郑麦366”和“周麦22”地上部锌含量持续升

表2 不同施锌水平下各品种小麦的根系和地上部干质量及根冠比

Table 2 Root and shoot dry weight and root/shoot ratio of wheat cultivars under different Zn levels

| 品种<br>Cultivar | 地上部干质量 Shoot dry weight/g·pot <sup>-1</sup> |          |          |         | 根系干质量 Root dry weight/g·pot <sup>-1</sup> |        |       |        | 根冠比 Root/shoot ratio |        |        |         |
|----------------|---------------------------------------------|----------|----------|---------|-------------------------------------------|--------|-------|--------|----------------------|--------|--------|---------|
|                | Zn0                                         | Zn10     | Zn20     | Zn30    | Zn0                                       | Zn10   | Zn20  | Zn30   | Zn0                  | Zn10   | Zn20   | Zn30    |
| ZM379          | 26.72b                                      | 21.37c   | 20.34cd  | 19.45ab | 2.57b                                     | 2.52b  | 3.06a | 2.99ab | 0.111b               | 0.133a | 0.207a | 0.199ab |
| AK58           | 29.80a                                      | 25.47abc | 23.54abc | 21.03a  | 2.69b                                     | 2.60b  | 3.05a | 2.63b  | 0.113b               | 0.113a | 0.137a | 0.130b  |
| JM22           | 21.79cd                                     | 21.12c   | 17.27d   | 18.87ab | 3.63ab                                    | 3.06ab | 3.34a | 2.84ab | 0.162b               | 0.149a | 0.201a | 0.156ab |
| BN207          | 24.35bc                                     | 27.26a   | 21.41bcd | 21.44a  | 3.23ab                                    | 3.43ab | 3.04a | 3.61ab | 0.132b               | 0.132a | 0.152a | 0.164ab |
| PA8            | 23.97bc                                     | 28.05a   | 23.36abc | 17.81bc | 4.03ab                                    | 3.43ab | 3.80a | 3.42ab | 0.164b               | 0.135a | 0.166a | 0.192ab |
| ZM0856         | 17.85e                                      | 22.68bc  | 26.88a   | 21.87a  | 2.94ab                                    | 3.15ab | 3.71a | 2.90ab | 0.149b               | 0.139a | 0.142a | 0.141b  |
| QL2122         | 18.50e                                      | 28.14a   | 25.33ab  | 20.26ab | 3.25ab                                    | 3.70a  | 3.65a | 3.07ab | 0.160b               | 0.160a | 0.157a | 0.150ab |
| ZM366          | 18.85de                                     | 22.77bc  | 21.49bcd | 15.53c  | 2.73b                                     | 3.40ab | 2.58a | 3.35ab | 0.148b               | 0.159a | 0.129a | 0.219ab |
| ZM27           | 22.17c                                      | 27.01ab  | 27.49a   | 21.47a  | 3.46ab                                    | 2.95ab | 3.60a | 3.71ab | 0.209ab              | 0.129a | 0.133a | 0.179ab |
| ZM22           | 15.98e                                      | 24.09abc | 20.81bcd | 17.98bc | 4.71a                                     | 3.63a  | 3.84a | 4.35a  | 0.308a               | 0.165a | 0.242a | 0.235a  |



不同小写字母表示同一锌水平小麦品种间差异显著 ( $P < 0.05$ )  
Different letters indicate significant difference among cultivars for the same Zn level ( $P < 0.05$ )

图1 各施锌水平下不同品种小麦锌效率的差异

Figure 1 Differences in zinc efficiency of different wheat cultivars under different Zn levels

高,其他品种均在Zn20处理时达到最高;而根系锌含量除“郑麦379”和“周麦22”外,其他品种随锌浓度的增加锌含量持续升高。表明不同小麦品种不仅对锌的吸收能力不同,而且对锌的耐受程度差异显著。

#### 2.4.2 施锌对不同品种小麦Zn累积量分配比例的影响

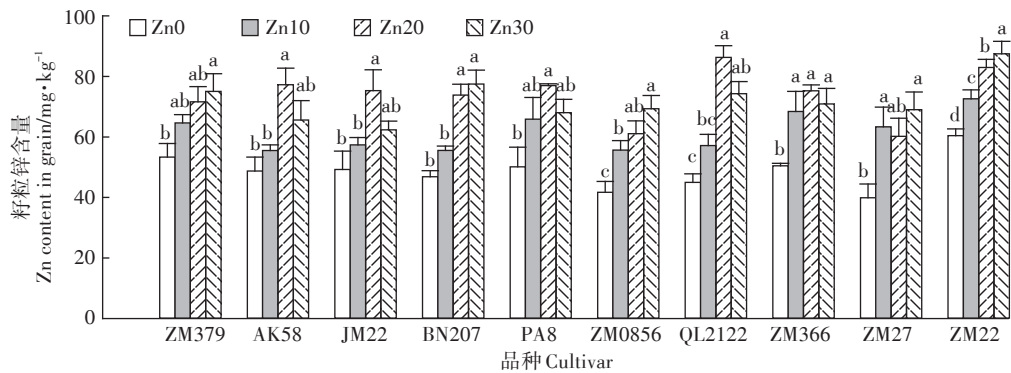
由图3A可知,在Zn0处理下,“矮抗58”“郑麦366”“周麦22”和“周麦27”各部位锌累积量占比均表

现为茎秆>籽粒>根部>颖壳,其他品种各部位锌累积量占比均表现为籽粒>茎秆>根部>颖壳;随着施锌浓度的增加,不同品种小麦各部位锌累积量分配比例差异较大。随着外源施锌浓度的增加,不同品种小麦籽粒和茎秆锌累积量所占比例均有不同程度增加,颖壳和根部变化不大;其中“平安8号”籽粒锌累积量占比表现出明显的先增加后下降的趋势,在Zn10处理时达到最大,而在Zn30处理时,其籽粒锌累积量占比不足20%,远远低于其他处理及品种,表明施锌对“平安8号”锌向籽粒中的分配影响显著。具体来看,与不施锌相比,Zn10处理时,籽粒锌累积量增加了19.45%~137.94%，“百农207”“济麦22”“平安8号”“周麦22”和“周麦27”籽粒锌累积量占比增加显著,其中平安8号颖壳、茎秆、根部锌累积量占比分别降低了7.64%、34.39%和7.41%(图3B)。Zn20处理时,与Zn10处理相比除“矮抗58”和“郑麦366”籽粒锌累积量占比有一定升高外,其他品种均表现出不同程度的降低趋势(图3C)。Zn30处理时,与Zn20相比“矮抗58”“济麦22”“平安8号”和“郑麦366”籽粒锌累积量占比进一步降低,而“郑麦0856”在Zn30处理时其籽粒锌累积量占比达到最大,表明其对外界较高的锌浓度有较强的适应性(图3D)。其中“秋乐2122”“周麦22”和“周麦27”在外源施加不同浓度锌时,其籽粒锌累积量占比变化不大,均维持在40%左右,受外界锌浓度变化影响较小。整体来看,正常施锌能够增加冬小麦籽粒和茎秆的锌累积量占比,在Zn10、Zn20处理下,各品种小麦的籽粒锌累积量占比达到最大。

### 3 讨论

#### 3.1 施锌对不同品种小麦产量及生物量的影响

试验期间所有供试小麦均未表现出明显的缺锌症状,目前国内外对土施锌肥与小麦产量关系的研究并不十分明确。韩金玲等<sup>[21]</sup>研究表明,适量施锌能够减轻干旱对小麦的影响,并增加产量;汪明云等<sup>[22]</sup>研究发现向砂姜黑土(DTPA-Zn为0.86~0.91 mg·kg<sup>-1</sup>)施锌肥15~60 kg·hm<sup>-2</sup>可使小麦平均增产2.26%~7.13%。但也有研究表明,土施锌肥对产量并无明显影响<sup>[10,23-24]</sup>。本试验中,供试小麦在土壤增施锌肥后有一定的增产效果(表1),这与前人研究结果相一致<sup>[25-26]</sup>,主要体现在小麦穗粒数和千粒重的提高,且在施锌10 mg·kg<sup>-1</sup>和20 mg·kg<sup>-1</sup>时增幅最大,在30 mg·kg<sup>-1</sup>时其增产效果出现一定程度降低。可能是由于本试验土壤本身有效锌水平较高,相对增加适量的锌



不同小写字母表示同一品种各锌浓度处理间差异显著 ( $P<0.05$ )  
Different letters indicate significant difference among Zn levels for the same cultivar ( $P<0.05$ )

图2 不同品种小麦锌处理下籽粒锌含量的差异

Figure 2 Differences of grain zinc content for different varieties under different Zn levels

表3 施锌对不同品种小麦根系及地上部锌含量的影响

Table 3 Content of zinc in the root and shoot of wheat cultivars under different Zn levels

| 品种<br>Cultivar | 地上部 Zn 含量 Zn content of shoot/mg·kg <sup>-1</sup> |         |          |          | 根系 Zn 含量 Zn content of root/mg·kg <sup>-1</sup> |         |           |          |
|----------------|---------------------------------------------------|---------|----------|----------|-------------------------------------------------|---------|-----------|----------|
|                | Zn0                                               | Zn10    | Zn20     | Zn30     | Zn0                                             | Zn10    | Zn20      | Zn30     |
| ZM379          | 39.13bc                                           | 50.71ab | 62.04ab  | 63.48a   | 56.09ab                                         | 71.30ab | 100.41ab  | 82.61ab  |
| AK58           | 42.25b                                            | 43.77cd | 58.08abc | 54.29bcd | 58.49a                                          | 70.58ab | 81.12abcd | 112.75ab |
| JM22           | 36.01c                                            | 44.11cd | 51.78bc  | 57.19abc | 46.91ab                                         | 60.57b  | 68.87cd   | 79.46ab  |
| BN207          | 35.97c                                            | 46.44bc | 52.78bc  | 61.48ab  | 53.57ab                                         | 58.30b  | 63.84d    | 72.58b   |
| PA8            | 41.69b                                            | 40.64d  | 61.52abc | 52.21cd  | 54.19ab                                         | 59.05b  | 76.39bcd  | 78.99ab  |
| ZM0856         | 36.36c                                            | 42.90cd | 52.89abc | 54.26bcd | 55.26ab                                         | 79.99a  | 94.28abc  | 106.54ab |
| QL2122         | 28.30d                                            | 42.58cd | 56.13abc | 51.94cd  | 42.39b                                          | 65.02ab | 77.62bcd  | 83.47ab  |
| ZM366          | 37.11c                                            | 46.52bc | 57.89abc | 58.77abc | 48.10ab                                         | 65.08ab | 80.42bcd  | 119.11a  |
| ZM27           | 29.44d                                            | 52.18a  | 50.49c   | 47.65d   | 49.69ab                                         | 63.56ab | 80.51bcd  | 92.24ab  |
| ZM22           | 52.71a                                            | 53.14a  | 63.83a   | 65.81a   | 47.78ab                                         | 65.02ab | 106.56a   | 85.99ab  |

肥,进一步提高了土壤有效锌的含量,从而增加了穗粒数和千粒重;也可能由于锌作为多种酶的组分,参与了生长素、叶绿素的合成以及碳水化合物的转化,能够促进植物的光合作用,提高光合效率,并最终影响作物的生长及产量的提高<sup>[20,27]</sup>。说明由于气候因素、土壤状况以及小麦品种的差异,导致土施锌肥对小麦产量的影响可能存在不确定性。

施锌对小麦根、茎和叶的生长有一定的促进作用<sup>[28]</sup>。本试验研究发现,缺锌条件下“矮抗 58”地上部干质量显著高于其他小麦品种(表 2),并在所有处理下均为最高;随着施锌水平的增加,“矮抗 58”“济麦 22”和“郑麦 379”地上部干质量逐渐降低,分别下降了 14.5%~29.4%、3.1%~13.4% 和 20.0%~27.2%;同时这三个小麦品种具有较高的锌效率(图 1),这与 Zhang 等<sup>[29]</sup>研究结果一致,即缺锌条件下小麦的干质量与锌效率一致,表明不施锌肥时地上部干质量可以

作为小麦锌耐受品种选择的一个重要参数<sup>[29-30]</sup>。同时,表 2 还表明,与不施锌(Zn0)处理相比,不同品种小麦的根冠比随着锌水平的变化存在较大的差异性,说明作为衡量养分吸收分配的重要参数,根冠比主要受不同小麦基因型的控制。

3.2 施锌对不同品种小麦锌效率和籽粒锌含量的影响

不同基因型作物锌效率存在着巨大的差异<sup>[31-32]</sup>,其生理机制涉及根系形态学、根系分泌物对锌的活化、根系对锌的吸收、锌由根系向地上部的转运、细胞水平上锌的生理有效性以及锌的再利用等方面。有研究表明,具有较高锌效率的面包型小麦其根系所释放的高铁载体对锌的吸收有一定帮助<sup>[33]</sup>。陈自惠等<sup>[34]</sup>研究发现,锌效率最高的两个小麦品种对锌的响应存在明显差异。在本试验中,随着施锌水平的提高,供试小麦品种的锌效率均呈现不同程度的增加(图 1),在施锌 20 mg·kg<sup>-1</sup>时,“郑麦 379”“矮抗 58”

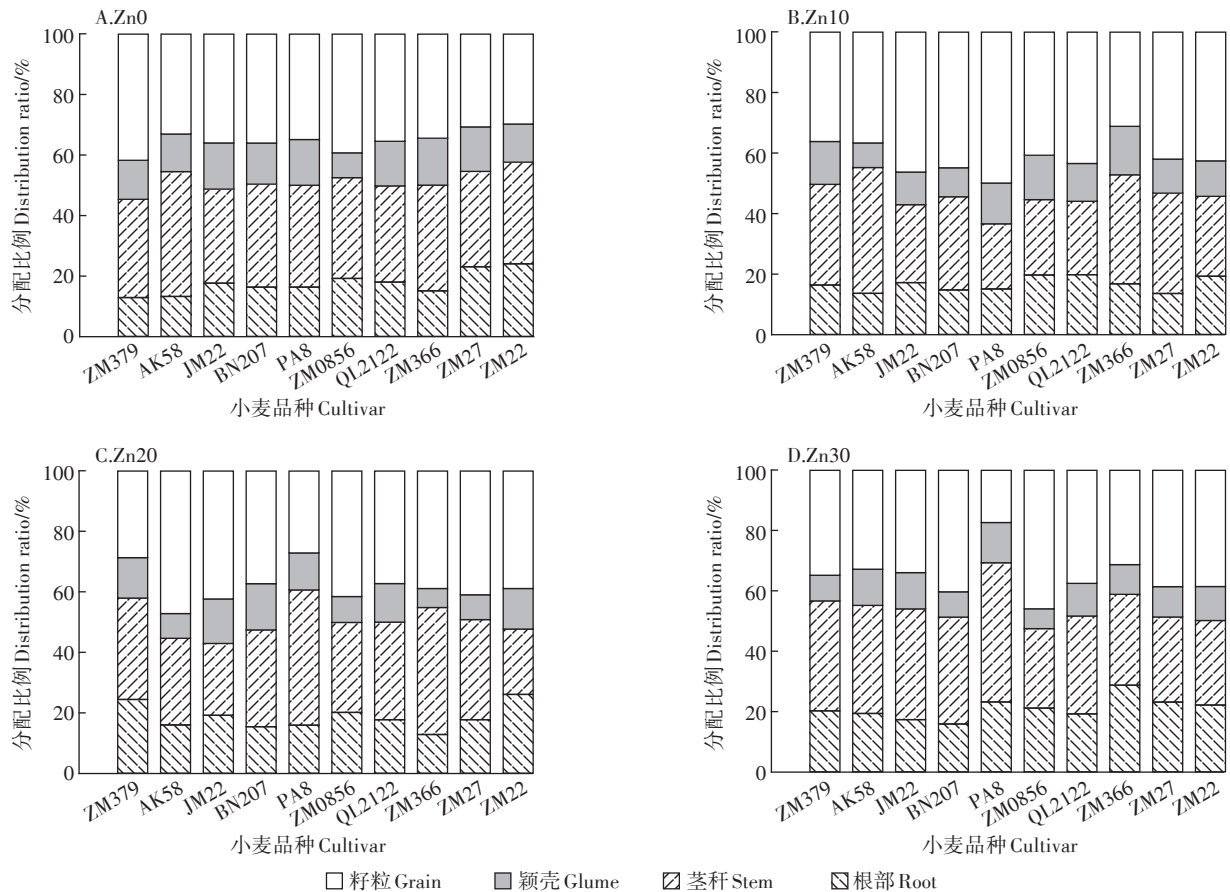


图3 施锌对不同品种小麦各部位锌累积量分配比例的影响

Figure 3 Distribution ratio of zinc accumulation in each parts of wheat cultivars under different Zn levels

“济麦22”“百农207”和“平安8号”的锌效率及其增幅明显高于其他品种;当施锌  $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,10种供试小麦的锌效率小幅增加或基本不变。这与前人的研究结果<sup>[33,35]</sup>一致,可能是由于锌高效小麦品种在缺锌条件下积累了更多干质量,从土壤中吸收了更多的锌<sup>[34]</sup>。然而,不同小麦锌效率的差异不能完全由吸收能力来解释,还可能存在着其他机理<sup>[36]</sup>。

刘铮<sup>[7]</sup>研究发现,当土壤潜在性缺锌(DTPA-Zn为  $0.5 \sim 1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )或严重缺锌(DTPA-Zn  $< 0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )时,施锌可以明显改善作物的锌营养状况。在严重缺锌的土壤上施锌有较好的增产增质作用,并且小麦籽粒锌含量能够增加2倍左右<sup>[37]</sup>。李孟华等<sup>[38]</sup>研究发现在西北旱地(DTPA-Zn为  $0.37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )施锌,两季小麦籽粒锌含量较不施锌提高了32%和44%。在本试验中,施锌提高了小麦的籽粒锌含量(图2),且“郑麦379”“百农207”“郑麦0856”和“周麦22”在Zn30处理下,籽粒锌含量达到最高,与锌水平表现出良好的相关性和耐性。有许多研究通过向土壤施锌来探讨强化小麦籽粒锌的效果,本研究与众多研究结

果一致,即土壤施锌能够显著提高小麦籽粒中的锌含量<sup>[9,11-12]</sup>。对于现代高产小麦品种来说,其籽粒锌含量明显低于早期的小麦品种,可能是由高产带来的锌稀释效应,而这种现象恰恰说明现代高产品种栽培更需要补充锌肥<sup>[39-40]</sup>。但是,施锌对于籽粒锌含量的提高却是有限的,因为土壤施锌条件下,锌的移动性较差,与根系分布的空间匹配不好,而且锌从土壤到植株体内的移动、转运与再转运是一个很复杂的过程,受到许多因素的限制与影响<sup>[41-42]</sup>。

### 3.3 施锌对不同品种小麦各营养器官锌累积量分配比例的影响

锌的累积量分配比例可以反映出锌从土壤到籽粒的转运情况<sup>[43]</sup>。颖壳和茎叶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,增施锌肥会使得Zn向地上部转移,并累积在籽粒中<sup>[44]</sup>。而籽粒中的锌来自不同的锌库,且与源、库的锌活性有关<sup>[45-46]</sup>,当植株生长环境锌源充足时,籽粒中锌积累主要来自灌浆期根系对锌的吸收,而从其他部位转移的锌很少;当锌源缺乏时,从其他部位重新分配则成

为籽粒锌源的主要途径。当增施不同浓度锌肥时,各营养器官锌累积量的分配比例表现出不同程度的波动(图3),且锌累积量主要分布在茎秆和籽粒中;当增施较低浓度的锌肥时,籽粒中锌累积量的分配比例显著增加,但增施锌肥至  $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,大部分小麦的籽粒锌累积量分配比例并未提高甚至有降低趋势。

本试验结果发现,施锌显著提高了小麦籽粒、地上部和根系的锌含量(图2和表3)。当施锌肥  $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,不同品种小麦籽粒、地上部和根系的锌含量分别是不施锌处理( $\text{Zn0}$ )的  $1.04 \sim 1.92$ 、 $1.21 \sim 1.98$  倍和  $1.19 \sim 2.23$  倍,而这种差异主要取决于植株本身对土壤锌的吸收能力、锌向地上部分分配的比例以及植株本身对锌的利用率。这一结论与李志刚等<sup>[47]</sup>对水稻的研究和杨习文<sup>[48]</sup>对小麦的研究结果一致,锌在植物体内各器官中的分布因品种而异,尤其是在籽粒锌含量上的差异。然而,Safaya等<sup>[49]</sup>研究发现植物体内锌含量随施锌量的增加而增加,当锌肥供给达到毒害水平时,根部可以继续吸收,地上部则保持稳定水平,不再积累。

与锌低效品种相比,锌高效品种在缺锌水平能够更好地生长且有较强的锌吸收能力。由于小麦锌的转运主要在籽粒灌浆期,通过韧皮部从老叶中运输、分配到新叶、穗、籽粒和根中(图3),导致不同品种小麦各营养器官在施锌后对锌的转运分配有较大差异。而从人体锌营养健康的籽粒强化目标值( $40 \sim 60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )<sup>[9]</sup>来讲,提高小麦籽粒锌含量显得更为重要。在小麦生产中锌肥施用量一般在  $15 \sim 30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ <sup>[13,15,21,23]</sup>。综合本研究不同品种小麦产量和籽粒锌营养的协同高效,锌肥最优施用量为  $10 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。综合考虑石灰性土壤的特性以及前人研究结果,适当增施锌肥对冬小麦的增产以及提高籽粒锌营养是十分必要的,但关于锌肥最优施用量,还应根据土壤的有效锌含量和作物品种类型来确定。

#### 4 结论

(1)在中等缺锌水平的北方石灰性潮土上,施用适中浓度的锌肥对促进小麦的生长发育、提高小麦的产量有一定的积极作用。

(2)外源增施锌肥  $10 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  可以一定程度提高小麦的籽粒锌含量和锌利用效率,有效地改善小麦的锌营养品质。

(3)小麦基因特性的不同和对锌敏感性的差异,导致不同品种小麦对锌的响应以及向地上部转运和

分配的能力具有一定的差异。“郑麦379”和“矮抗58”可作为锌高效品种。

#### 参考文献:

- [1] Stein A J. Global impacts of human mineral malnutrition[J]. *Plant & Soil*, 2010, 335(1/2):133-154.
- [2] Brown K H, Rivera J A, Bhutta Z, et al. International zinc nutrition consultative group (IZiNCG) technical document #1. Assessment of the risk of zinc deficiency in populations and options for its control[J]. *Food & Nutrition Bulletin*, 2004, 25(2):216.
- [3] Muller O, Krawinkel M. Malnutrition and health in developing countries[J]. *Canadian Medical Association Journal*, 2005, 173(3):279-286.
- [4] Kumssa D B, Joy E J, Ander E L, et al. Dietary calcium and zinc deficiency risks are decreasing but remain prevalent[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5:10974.
- [5] Ma G S, Jin Y, Li Y P, et al. Iron and zinc deficiencies in China: What is a feasible and cost-effective strategy? [J]. *Public Health Nutrition*, 2008, 11(6):632-638.
- [6] Cakmak I, Kutman U B. Agronomic biofortification of cereals with zinc: A review: Agronomic zinc biofortification[J]. *European Journal of Soil Science*, 2017, 69(1):172-180.
- [7] 刘 铮. 我国土壤中锌含量的分布规律[J]. 中国农业科学, 1994, 27(1):30-37.  
LIU Zheng. Regularities of content and distribution of zinc in soils of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1994, 27(1):30-37.
- [8] 惠晓丽, 王朝辉, 罗来超, 等. 长期施用氮磷肥对旱地冬小麦籽粒产量和锌含量的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(16):3175-3185.  
HUI Xiao-li, WANG Zhao-hui, LUO Lai-chao, et al. Winter wheat grain yield and zinc concentration affected by long-term N and P application in dryland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(16):3175-3185.
- [9] Cakmak I. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification? [J]. *Plant & Soil*, 2008, 302(1/2):1-17.
- [10] Peck A W, McDonald G K, Graham R D. Zinc nutrition influences the protein composition of flour in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Journal of Cereal Science*, 2008, 47(2):266-274.
- [11] Cakmak I, Pfeiffer W H, McClafferty B. Biofortification of durum wheat with zinc and iron[J]. *Cereal Chemistry*, 2010, 87(1):10-20.
- [12] 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(16):9092-9102.
- [13] 冯绪猛, 郭九信, 王玉雯, 等. 锌肥品种与施用方法对水稻产量和锌含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5):1329-1338.  
FENG Xu-meng, GUO Jiu-xin, WANG Yu-wen, et al. Effects of Zn fertilizer types and application methods on grain yield and Zn concentration of rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(5):1329-1338.
- [14] 张勇强, 宋 航, 薛志伟, 等. 施用锌肥和硼肥对玉米穗粒性状和品质的影响[J]. 核农学报, 2017, 31(2):371-378.

- ZHANG Yong-qiang, SONG Hang, XUE Zhi-wei, et al. Effects of zinc and boron rate on ear-kernel traits and grain quality in maize[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, 31(2):371-378.
- [15] 国春慧, 赵爱青, 陈艳龙, 等. 锌肥种类和施用方式对小麦生育期内土壤不同形态 Zn 含量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(7):185-191.
- GUO Chun-hui, ZHAO Ai-qing, CHEN Yan-long, et al. Effects of Zn source and application method on contents of different Zn forms during wheat growth[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2015, 43(7):185-191.
- [16] Cakmak I, Torun A, Millet E, et al. *Triticum dicoccoides*: An important genetic resource for increasing zinc and iron concentration in modern cultivated wheat[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2004, 50(7):1047-1054.
- [17] 王蔚华. 小麦金属元素吸收分配特性及胁迫生理效应研究[D]. 扬州:扬州大学, 2004.
- WANG Wei-hua. Metal elements absorption and distribution characteristics and stress physiology in wheat[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2004.
- [18] 李向东, 王绍中, 田云峰, 等. 河南省小麦生产现状与发展对策[J]. 中国农业信息, 2008(12):42-45.
- LI Xiang-dong, WANG Shao-zhong, TIAN Yun-feng, et al. Current status and development countermeasures of wheat production in Henan Province[J]. *China Agricultural Information*, 2008(12):42-45.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社, 2000:30-33.
- BAO Shi-dan. Soil agro-chemical analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000:30-33.
- [20] Torun B, Bozday G, Gultekin I, et al. Differences in shoot growth and zinc concentration of 164 bread wheat genotypes in a zinc-deficient calcareous soil[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2000, 23(9):1251-1265.
- [21] 韩金玲, 杨 晴, 周印富, 等. 旱地施用锌肥对冬小麦干物质积累和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(2):358-361.
- HAN Jin-ling, YANG Qing, ZHOU Yin-fu, et al. Effect of zinc fertilizer on the accumulation of dry matter and yield of winter wheat in dry land[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(2):358-361.
- [22] 汪明云, 李录久, 吴萍萍, 等. 淮北砂姜黑土小麦高效锌肥施用效应[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(2):138-140.
- WANG Ming-yun, LI Lu-jiu, WU Ping-ping, et al. High efficiency zinc fertilizer application benefit of wheat in Huaibei lime concretion soil[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, 47(2):138-140.
- [23] 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]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2010, 16(6):1394-1401.
- [24] Lu X C, Cui J, Tian X H, et al. Effects of zinc fertilization on zinc dynamics in potentially zinc-deficient calcareous soil[J]. *Agronomy Journal*, 2012, 104(4):963-969.
- [25] 沈 嵘, 刘晓宇, 张红晓, 等.  $Zn^{2+}$ 对高盐和紫外线胁迫条件下水稻根尖细胞程序性死亡的影响[J]. 南京农业大学学报, 2010, 33(2):13-18.
- SHEN Rong, LIU Xiao-yu, ZHANG Hong-xiao, et al. Effects of  $Zn^{2+}$  on rice root tip cells programmed cell death under high salt stress or UV-induced[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2010, 33(2):13-18.
- [26] Li T Q, Yang X E, He Z L, et al. Root morphology and  $Zn^{2+}$  uptake kinetics of the zinc hyperaccumulator of *Sedum alfredii* Hance[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2010, 47(8):927-934.
- [27] 韩金玲, 李雁鸣, 马春英. 锌对作物生长发育及产量的影响(综述)[J]. 河北科技师范学院学报, 2004, 18(4):72-75.
- HAN Jin-ling, LI Yan-ming, MA Chun-ying. The effect of zinc on crop growth and yield(Summary)[J]. *Journal of Hebei Normal University of Science & Technology*, 2004, 18(4):72-75.
- [28] 韩金玲, 李雁鸣, 马春英, 等. 施锌对小麦开花后氮、磷、钾、锌积累和运转的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(3):313-320.
- HAN Jin-ling, LI Yan-ming, MA Chun-ying, et al. Effect of zinc fertilization on accumulation and transportation of N, P, K and Zn after anthesis of wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2006, 12(3):313-320.
- [29] Zhang Y Q, Yazici M A, Gokmen O O, et al. Comparison of winter wheat genotypes differing in zinc efficiency and origin: The zinc uptake and enzyme activity[J]. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 2013, 44(19):2875-2883.
- [30] Gene Y, McDonald G K, Graham R D. Contribution of different mechanisms to zinc efficiency in bread wheat during early vegetative stage[J]. *Plant & Soil*, 2006, 281(1/2):353-367.
- [31] 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.
- [32] Rengel Z, Romheld V. Root exudation and Fe uptake and transport in wheat genotypes differing in tolerance to Zn deficiency[J]. *Plant and Soil*, 2000, 222(1/2):25-34.
- [33] Cakmak O, Ozturk L, Karanlik S, et al. Tolerance of 65 durum wheat genotypes to Zn deficiency in a calcareous soil[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2001, 24(11):1831-1847.
- [34] 陈自惠, 田霄鸿, 王晓峰, 等. 螯合-缓冲营养液培养条件下不同小麦品种的锌效率比较[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(6):65-72.
- CHEN Zi-hui, TIAN Xiao-hong, WANG Xiao-feng, et al. Study on zinc efficiency of different wheat cultivars under the chelator-buffered nutrient solution culture conditions[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2009, 37(6):65-72.
- [35] Hacısalihoglu G. High- and low-affinity zinc transport systems and their possible role in zinc efficiency in bread wheat[J]. *Plant Physiology*, 2001, 125(1):456-463.
- [36] Marschner P. Mineral nutrition of higher plants[M]. 2nd Edition. Elsevier/Academic Press, 2012.
- [37] Erenoglu B, Cakmak I, Romheld V, et al. Uptake of zinc by rye, bread

- wheat and durum wheat cultivars differing in zinc efficiency[J]. *Plant and Soil*, 1999, 209(2):245-252.
- [38] 李孟华, 王朝辉, 李 强, 等. 低锌旱地土施锌肥对小麦产量和锌利用的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(11):2168-2174.
- LI Meng-hua, WANG Zhao-hui, LI Qiang, et al. Effects of soil zinc application on grain yield and zinc utilization of wheat in zinc-deficient dryland soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(11):2168-2174.
- [39] Zhao F J, Su Y H, Dunham S J, et al. Variation in mineral micronutrient concentrations in grain of wheat lines of diverse origin[J]. *Journal of Cereal Science*, 2009, 49(2):290-295.
- [40] Joshi A K, Crossa J, Arun B, et al. Genotype environment interaction for zinc and iron concentration of wheat grain in eastern gangetic plains of India[J]. *Field Crops Research*, 2010, 116(3):268-277.
- [41] Kashem M A, Singh B R. Metal availability in contaminated soils. Effects of flooding and organic matter on changes in Eh, pH and solubility of Cd, Ni and Zn[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2001, 61(3):247-255.
- [42] Palmgren M G, Clemens S, Williams L E, et al. Zinc biofortification of cereals: Problems and solutions[J]. *Trends in Plant Science*, 2008, 13(9):464-473.
- [43] 闫 佳, 张 均, 马 超, 等. 氮素水平对冬小麦地上部分锌积累和转运的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(5):102-106.
- YAN Jia, ZHANG Jun, MA Chao, et al. Effects of nitrogen levels on accumulation and transport of zinc in aerial parts of winter wheat[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2016, 44(5):102-106.
- [44] 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*, 2008, 97(2):332-338.
- [45] Pearson J N, Rengel Z, Jenner C F, et al. Transport of Zn and manganese to developing wheat grains[J]. *Physiologia Plantarum*, 2006, 95(3):449-455.
- [46] Pearson J N, Rengel Z, Jenner C, et al. Manipulation of xylem transport affects Zn and Mn transport into developing wheat grains of cultured ears[J]. *Physiologia Plantarum*, 2008, 98(2):229-234.
- [47] 李志刚, 叶正钱, 方云英, 等. 供锌水平对水稻生长和锌积累和分配的影响[J]. 中国水稻科学, 2003, 17(1):61-66.
- LI Zhi-gang, YE Zheng-qian, FANG Yun-ying, et al. Effect of Zn on plant growth and Zn partitioning in rice plant[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2003, 17(1):61-66.
- [48] 杨习文. 石灰性土壤上小麦不同基因型对锌肥及锌铁肥的反应[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2007.
- YANG Xi-wen. Response of wheat genotype growing on calcareous soil to zinc or zinc and iron fertilization[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2007.
- [49] Safaya N M, Malakondaiah N. Responses of some crop species to applied and residual levels of Zn[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1981, 3(1/2/3/4):483-492.