

# 旱地高产小麦品种籽粒锌含量差异与氮磷钾吸收利用的关系

李莎莎<sup>1</sup>, 王朝辉<sup>1,2\*</sup>, 刁超朋<sup>1</sup>, 王森<sup>1</sup>, 刘璐<sup>1</sup>, 黄宁<sup>1</sup>

(1 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;

2 西北农林科技大学/旱区作物逆境生物学国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

**摘要:**【目的】明确旱地条件下高产小麦品种籽粒锌含量差异与氮磷钾吸收利用的关系, 为品种选育和科学施肥提供依据。【方法】于2013—2016年连续三年在黄土高原旱地进行田间试验, 试验采用裂区设计, 主处理为不施肥(CK)和施肥(NP), 副处理为来自我国主要麦区的123个品种。施肥处理为N 150 kg/hm<sup>2</sup>(尿素, 含N 46%)、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 100 kg/hm<sup>2</sup>(过磷酸钙, 含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 16%)。成熟期在每个品种中间2行随机抽取30穗小麦, 连根拔起后, 从根茎结合处剪断弃去根系, 分为茎、叶、颖壳(含穗轴)和籽粒, 称风干重。分析了样品中氮、磷、钾、锌含量, 计算了养分的吸收量及转移量。【结果】施肥条件下高产小麦品种籽粒锌含量存在显著差异, 高锌品种比低锌品种显著高54%。高锌品种的籽粒氮、磷含量分别比低锌品种显著高9%、7%, 钾含量无显著差异, 施肥使两组品种的氮含量显著提高, 磷钾含量降低。高产高锌品种具有更高的籽粒和地上部氮、磷吸收能力, 钾吸收能力与低锌品种相比无显著差异, 施肥可使高锌品种的氮磷钾吸收量增幅高于低锌品种; 两组品种间的氮、磷转移能力无显著差异, 而高锌品种的钾转移能力较低, 且两组品种的氮磷钾转移能力因施肥降低幅度一致。【结论】旱地条件下土壤养分供应充足时, 高产高锌小麦品种的氮磷吸收能力强, 钾转移能力弱, 籽粒氮磷含量高, 与低锌品种相比钾含量无显著差异。通过品种选育可同时提高旱地高产小麦籽粒锌和蛋白质含量, 并提高磷含量。考虑到磷含量高时会降低籽粒锌的生物有效性, 生产中通过施肥措施, 适当调控磷肥, 增加氮肥, 在提高小麦籽粒氮磷含量的同时提高籽粒锌的生物有效性。

**关键词:** 旱地; 小麦; 品种; 高产; 锌; 氮磷钾吸收利用

## Differences in grain zinc concentration and its relationship to NPK uptake and utilization for high-yielding wheat cultivars in dryland

LI Sha-sha<sup>1</sup>, WANG Zhao-hui<sup>1,2\*</sup>, DIAO Chao-peng<sup>1</sup>, WANG Sen<sup>1</sup>, LIU Lu<sup>1</sup>, HUANG Ning<sup>1</sup>

(1 Key Laboratory of Plant Nutrition and Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture/ College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 State Key Laboratory of Crop Stress Biology in Arid Areas, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** 【Objectives】The purpose of this study was to clarify the relationship between grain zinc concentration and nutrient N, P, K uptake and utilization, providing scientific information for new variety breeding and nutrient management. 【Methods】A split field experiment was conducted in the dryland area of the Loess Plateau from 2013 to 2016. The main factor was no fertilization control and fertilization of N 150 kg/hm<sup>2</sup> (urea, N 46%) and P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 100 kg/hm<sup>2</sup> (calcium superphosphate, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 16%), and the sub-factor was the 123 wheat cultivars, which were collected from the main wheat production areas in China. After harvest, 30 plants were chosen from the middle two rows of each cultivar, rooted out, and cut at the base joint of shoot and root. The roots were discarded, and the shoots were divided into stems, leaves, husks (including cobs) and grains, dried naturally and weighed. The contents of N, P, K and Zn in the samples were analyzed, and the uptake and reallocation of the nutrients were calculated. 【Results】Significant differences existed in grain Zn concentration among high-

收稿日期: 2018-01-02 接受日期: 2018-04-07

基金项目: 现代农业产业技术体系专项(CARS-3); 国家公益性行业(农业)科研专项(201303104)资助。

联系方式: 李莎莎 E-mail: lisasa0814@126.com; \*通信作者 王朝辉 E-mail: w-zhaohui@263.net

yielding wheat cultivars under fertilization treatment, grain Zn concentrations of high-Zn cultivars were 54% higher than those of low-Zn cultivars. Grain N and P concentrations of high-Zn cultivars were respectively 9% and 7% higher than those of low-Zn cultivars, no significant difference was observed for grain K concentration. Fertilization increased grain N concentrations, decreased grain P and K concentrations for two group cultivars. N and P uptake were higher in high-Zn cultivars, while K uptake was not significantly different from low-Zn cultivars. The increase of NPK uptake by fertilization in high-Zn cultivars was significantly more than that of low-Zn cultivars. No significant difference was found in N and P harvest indices between the two groups, while the K harvest indices of high-Zn cultivars were significantly lower than those of low-Zn cultivars. The decrease of NPK harvest indices of high-Zn cultivars by fertilization was similar to low-Zn cultivars. **【 Conclusions 】** Under sufficient nutrient supply in dryland, high-yielding and high-Zn cultivars had significantly higher grain N and P concentration, more NP uptake and lower K harvest index than low-Zn cultivars, but no significant difference in grain K concentrations between two groups of cultivars. This result indicates that breeding new high-yielding cultivars can increase grain Zn and protein content as well as P concentration of dryland wheat. Considering high P concentrations may decrease grain Zn bioavailability, fertilization practice should rationally control P use while increasing N supply to increase grain N, Zn concentrations and Zn bioavailability.

**Key words:** dryland; wheat; cultivar; high-yielding; zinc; NPK uptake and utilization

锌是人和动植物必需的微量元素<sup>[1]</sup>。世界上约有 1/3 的人口面临缺锌引起的健康问题, 缺锌已成为影响人体健康的第五大因素<sup>[2]</sup>, 经济不发达的国家尤其严重<sup>[3-4]</sup>。人体缺锌主要是因为锌摄入量不足<sup>[5-6]</sup>。小麦是我国三大粮食作物之一, 在人体锌供给中所占比例超过 20%, 农村地区这一占比更高<sup>[7-8]</sup>。由于现阶段中国居民的膳食结构不尽合理, 锌营养元素含量不足所导致的营养不良状况还比较普遍<sup>[9]</sup>。调研结果表明, 我国北方小麦籽粒锌含量为 19.9~43.9 mg/kg, 98% 的小麦品种籽粒锌含量低于 40 mg/kg<sup>[10]</sup>, 与推荐含量 40~60 mg/kg 尚有较大差距<sup>[11]</sup>, 不能满足以小麦为主食人群的锌营养需求<sup>[12]</sup>。

我国北方地区居民主要以面食为主, 提高小麦产量和营养元素含量对日益增长的粮食需求及改善人们的营养状况至关重要<sup>[13]</sup>。氮磷钾是植物必需的大量元素, 其吸收积累和分配影响小麦的生长发育及产量和品质形成, 也与人类饮食健康密切相关<sup>[14-15]</sup>。目前, 小麦锌与氮磷钾营养方面的研究大部分集中于氮磷肥与锌肥配施, 或氮磷肥用量对作物锌的影响。田间试验表明, 对于供试小麦品种‘扬麦 16 号’, 氮锌配施可以显著增加其籽粒锌、氮含量及累积量<sup>[16]</sup>。2 个小麦品种的营养液培养试验表明, 锌和磷之间相互作用的大小程度和方式存在差异, 磷素水平在小麦磷锌营养平衡中起着决定性的作用<sup>[17]</sup>。氮肥用量的水培试验研究表明, 增施氮肥可促进根系对锌的吸收、锌由根部向地上部的转移及营养组织的锌向籽粒转移<sup>[18]</sup>。长期施用磷肥的定位试验表

明, 籽粒锌含量与磷含量呈极显著负相关<sup>[19]</sup>。关于不同小麦品种锌与氮磷钾营养关系的报道较少, 已有研究仅是籽粒养分含量或地点间差异的比较。对北方冬麦区 265 个小麦品种研究表明, 晋麦 26 同时具有高的籽粒锌、磷和钾含量, 河农 326 具有高的籽粒锌、磷含量<sup>[20]</sup>。欧洲 2 个地点的研究表明, 4 个小麦品种种植在 Donji Miholjac (奥西耶克) 时, 籽粒氮磷钾和锌含量均高于种植在 Kutjevo (库特耶沃)<sup>[21]</sup>。关于旱地条件下高产小麦品种籽粒锌含量差异与氮磷钾吸收转移利用的关系, 尤其与钾的关系, 还少有研究报道。

因此, 本文通过黄土高原典型旱地连续三年的田间定位试验, 以 123 个小麦品种为供试材料, 在不施肥和施肥条件下, 研究了旱地高产小麦品种籽粒锌含量差异及其与氮磷钾吸收转移利用的关系, 以期科学施用氮磷钾及锌肥、优化养分管理、改善小麦籽粒营养品质提供理论和技术依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

3 年定位试验于 2013—2016 年在陕西省永寿县御驾宫村 (东经 108°10′、北纬 34°43′) 进行。试验地海拔 972 m, 年均气温 10.5℃ 左右, 无霜期 210 d, 年均降雨量 600 mm 左右, 主要集中在 7~9 月。2013—2014、2014—2015 和 2015—2016 年降水和生育期降水分别为 583.3 和 266.6、541.9 和 313.6、

414.2 和 185.8 mm, 属典型的半湿润易旱区。小麦种植主要依赖天然降水。该区域土壤类型为土垫旱耕人为土, 试验开始前土壤 (0—20 cm) 基本理化性质: pH 8.40, 有机质含量 12.2 g/kg, 全氮含量 0.820 g/kg, 硝态氮含量 23.7 mg/kg, 铵态氮含量 4.50 mg/kg, 有效磷含量 14.1 mg/kg, 速效钾含量 116 mg/kg, 有效锌含量 (DTPA-Zn) 0.360 mg/kg。

## 1.2 试验材料和设计

试验采用裂区设计, 主处理为不施肥 (CK) 和施肥 (NP), 副处理为来自我国主要麦区的 123 个品种, 主处理 4 次重复。施肥处理中, 氮肥用量为 N 150 kg/hm<sup>2</sup> (尿素, 含 N 46%)、磷肥用量为 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 100 kg/hm<sup>2</sup> (过磷酸钙, 含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 16%), 因土壤不缺钾, 故没有施用钾肥。所有肥料均在播种前撒施并旋耕使与 0—20 cm 耕层土壤混匀。主区长 20 m、宽 12.5 m, 面积为 250 m<sup>2</sup>; 副区长 2 m、宽 0.8 m, 面积为 1.6 m<sup>2</sup>。采用常规平作, 人工点播, 每个品种种植 4 行, 每行均匀点播 72 粒, 行距 20 cm, 株距 2.5 cm。试验于 2013 年 9 月 28 日、2014 年 10 月 3 日和 2015 年 9 月 26 日播种, 在次年 6 月 18~20 日收获。整个生育期无灌溉, 小麦收获后进行夏季休闲, 田间管理与当地农户一致。

## 1.3 样品采集及测定

成熟期在每个品种中间 2 行随机抽取 30 穗小麦, 连根拔起后用不锈钢剪刀从根茎结合处剪断弃去根系。植株分为茎叶和穗, 作为分析样品分别装入标记好的网袋。样品自然风干, 称茎叶和穗的风干重。穗手工脱粒, 分为籽粒和颖壳 (含穗轴), 称量籽粒风干重, 并由差减法求得颖壳的风干重。分别取风干的茎叶 30 克、颖壳 30 克、籽粒 50 克, 用自来水和去离子水各快速清洗 3 次, 于 90℃ 预烘 30 min, 65~75℃ 烘干至恒重, 计算风干样品含水量。烘干样用碳化钨球磨仪 (Retsch MM400, 德国, 氧化锆罐) 粉碎, 密封保存, 备用。每个品种中间 2 行剩余的植株, 全部收割, 自然风干、脱粒, 称籽粒风干重, 然后加上随机抽样 30 穗小麦籽粒的风干重, 用于计算该品种的产量。产量以干重表示。

粉碎的植物样品, 称取籽粒样品 0.2000 g (2 次重复), 茎叶、颖壳各 0.2500 g, 用 HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 微波消解仪 (Anton-Paar, 奥地利) 消解, 用电感耦合等离子体质谱仪 (Thermo Fisher ICAP Q, 美国) 测定消解液中的锌含量; 称取籽粒样品 0.2000 g (2 次重复), 茎叶、颖壳各 0.2500 g, 用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (95%) -H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (优级

纯) 消解后, 全自动连续流动分析仪 (AA3, SEAL Analytical, Germany) 测定消解液中的氮磷含量, 火焰光度计测定消解液中的钾含量。消解过程中每批次加标准物质 (GBW10011-小麦) 进行校准, 小麦不同器官的养分含量均以烘干重为基数表示。

## 1.4 数据处理及分析

为了分析旱地条件下小麦品种籽粒锌含量的差异与氮磷钾吸收利用的关系, 首先将各个试验年份施肥条件下, 籽粒产量高于当年所有品种产量平均值的品种定义为高产品种, 再将每个试验年份的高产品种进一步按籽粒锌含量从高到低排序, 排在前十位的定义为高锌品种, 后十位的定义为低锌品种, 然后分析这两组品种在不同施肥条件下的相关特性。相关参数计算如下:

籽粒氮 (磷、钾) 吸收量 = 籽粒产量 × 籽粒氮 (磷、钾) 含量 / 1000

地上部氮 (磷、钾) 吸收量 = (籽粒产量 × 籽粒氮 (磷、钾) 含量 + 茎叶生物量 × 茎叶氮 (磷、钾) 含量 + 颖壳生物量 × 颖壳氮 (磷、钾) 含量) / 1000

氮 (磷、钾) 收获指数 = 籽粒氮 (磷、钾) 吸收量 / 地上部氮 (磷、钾) 吸收量 × 100%

式中: 产量和生物量的单位为 kg/hm<sup>2</sup>; 养分含量的单位为 g/kg; 养分吸收量的单位为 kg/hm<sup>2</sup>。

试验数据采用 Microsoft Excel 2016 进行初步计算和作图, 用 SPSS Statistics 22 软件进行方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同锌含量分组小麦品种的籽粒锌含量差异

对高产高锌和高产低锌两组小麦品种的籽粒锌含量分析表明 (图 1), 施肥时, 2014、2015 和 2016 年高锌品种籽粒锌含量分别为 24.3、18.7 和 17.1 mg/kg, 低锌品种分别为 14.7、11.5 和 13.0 mg/kg, 其中高锌品种各年份籽粒锌含量均显著高于低锌品种, 三年平均高 54%。不施肥时, 高锌品种籽粒锌含量分别为 19.2、18.5 和 18.5 mg/kg, 低锌品种分别为 17.0、16.0 和 16.9 mg/kg, 其中高锌品种籽粒锌含量三年平均比低锌品种高 12%, 其中 2014 年和 2016 年差异显著。高、低锌品种籽粒锌含量对施肥的响应不尽一致。与不施肥相比, 施肥时高锌品种籽粒锌含量在 2014 年显著提高, 达 27%, 三年平均提高 7%; 而低锌品种籽粒锌含量在施肥时各年份均显著降低, 三年平均降低 22%。说明不论施肥与否, 高锌品种籽粒锌含量均显著高于低锌品种, 且

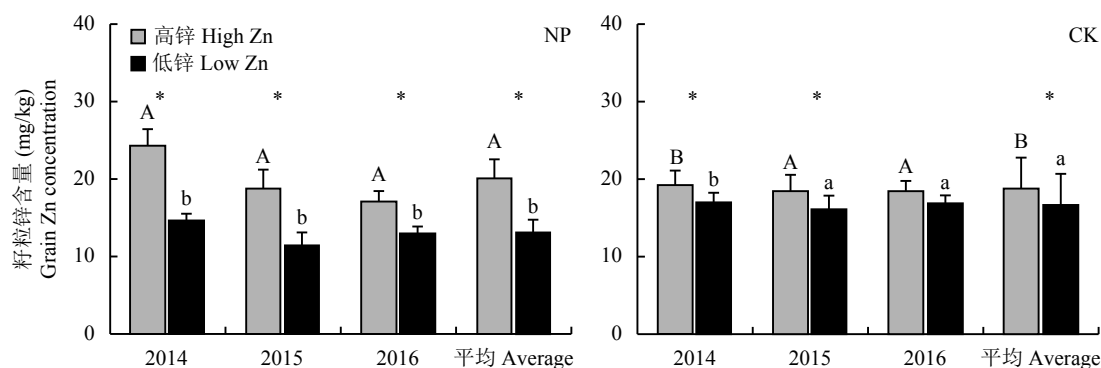


图 1 2014—2016 年高产小麦品种高锌组和低锌组籽粒锌含量

Fig. 1 Grain Zn concentration in the high and low Zn groups of high yielding wheat cultivars from 2014 to 2016

[注 (Note): 籽粒产量高于当年所有品种产量平均值的定义为高产品种, 其中含锌量排在前十位的定义为高锌品种, 后十位的定义为低锌品种; \*表示高锌和低锌组间差异达到 5% 显著水平; 柱上不同大、小写字母分别表示高锌组、低锌组内施肥与对照间差异达到 5% 显著水平。Cultivars with the yields higher than the average of all the tested ones were defined as high-yield cultivars, the cultivars whose grain Zn concentration was listed on the top ten of the high-yield cultivar group were defined as high-Zn cultivar, and the cultivars whose grain Zn concentration was listed on the last ten were defined as low-Zn cultivar. \* indicates significant difference between the high and low Zn groups at  $P < 0.05$ ; different uppercase and small letters above the bars indicate significant difference between CK and fertilization for the high and low Zn groups at  $P < 0.05$ .]

高锌品种籽粒锌含量可因施肥显著提高, 低锌品种却降低。

## 2.2 籽粒锌含量与氮磷钾含量

对籽粒氮磷钾含量 (表 1) 的分析表明, 高锌品种各年份籽粒氮含量均显著高于低锌品种, 施肥后, 三年平均高 9%, 不施肥平均高 8%, 其中在 2016 年差异显著。籽粒磷含量高锌品种施肥处理比低锌品种三年平均高 7%, 不施肥处理平均高 3%, 其中在 2014 年差异显著。籽粒钾含量, 除 2014 年不施肥处理组间差异显著外, 其余年份不论施肥与否, 两组品种均无显著差异。与不施肥相比, 施肥处理高、低锌品种各年份籽粒氮含量均显著提高, 三年平均分别提高 30% 和 29%; 高锌品种籽粒磷含量三年平均降低 6%, 在 2016 年差异显著, 低锌品种三年平均降低 9%, 在 2015 和 2016 年差异显著; 籽粒钾含量除 2014 年外, 其它两年高、低锌品种均显著降低, 三年平均分别降低 9%、7%。

秸秆氮磷钾含量的分析表明, 施肥时, 高锌品种秸秆氮、钾含量三年平均分别比低锌品种高 11%、17%, 且均在 2014 年差异显著; 而两组品种间秸秆磷含量无显著差异。不施肥时, 两组品种各年份及三年平均的秸秆氮磷钾含量均无显著差异。与不施肥相比, 施肥时两组品种在各年份秸秆氮磷钾含量均有不同程度的提高, 高锌品种三年平均分别提高 79%、38% 和 25%, 低锌品种分别提高 62%、38% 和 21%。

说明旱地条件下, 不论施肥与否, 高锌品种籽粒氮、磷含量高于低锌品种, 钾含量无显著差异; 施肥时秸秆氮、钾含量高于低锌品种, 磷含量无显著差异, 不施肥时氮磷钾含量均无显著差异。施肥可使两组品种的籽粒氮含量提高, 磷、钾含量降低, 秸秆氮磷钾含量均提高, 且籽粒氮磷钾对施肥的响应一致, 而高锌组秸秆氮含量提高的幅度更大。

## 2.3 籽粒锌含量与氮磷钾吸收

对籽粒氮磷钾吸收量的分析表明 (表 2), 施肥处理高锌品种籽粒氮吸收量比低锌品种三年平均高 8%, 其中在 2015 年差异显著; 磷吸收量平均高 4%, 其中在 2015 年差异显著; 钾吸收量无显著差异。不施肥处理高、低锌组各年份及三年平均的籽粒氮磷钾吸收量均无显著差异。与不施肥相比, 施肥时两组品种各年份的籽粒氮磷钾吸收量均显著提高, 高锌品种三年平均分别提高 104%、59% 和 51%, 低锌品种分别提高 85%、47% 和 46%。

地上部氮磷钾吸收量的变化与籽粒相一致。施肥时, 高锌品种地上部氮吸收量比低锌品种三年平均高 8%, 其中在 2015 年差异显著; 地上部磷吸收量比低锌品种三年平均高 5%, 且在各年份均有不同程度的提高; 地上部钾吸收量除 2014 年差异显著外, 其它两年及三年平均两组间均无显著差异。不施肥时, 两组品种各年份及三年平均的地上部氮磷钾吸收量均无显著差异。与不施肥相比, 施肥时两组品种各年份的地上部氮磷钾吸收量均显著提高,

表 1 2014—2016 年高锌低锌组小麦品种籽粒 NPK 含量 (g/kg)  
Table 1 NPK concentration of wheat cultivars in high and low Zn groups from 2014 to 2016

| 部位<br>Part  | 养分<br>Nutrient | 处理<br>Treatment | 2014          |              | 2015          |              | 2016          |              | 平均 Average    |              |
|-------------|----------------|-----------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|
|             |                |                 | 高锌<br>High Zn | 低锌<br>Low Zn | 高锌<br>High Zn | 低锌<br>Low Zn | 高锌<br>High Zn | 低锌<br>Low Zn | 高锌<br>High Zn | 低锌<br>Low Zn |
| 籽粒<br>Grain | N              | NP              | 24.8 a*       | 22.4 a       | 21.3 a*       | 19.3 a       | 22.1 a*       | 20.8 a       | 22.7 a*       | 20.8 a       |
|             |                | CK              | 22.4 b        | 21.3 b       | 15.5 b        | 14.0 b       | 14.3 b*       | 13.1 b       | 17.4 b*       | 16.1 b       |
|             | P              | NP              | 3.2 a*        | 3.0 a        | 3.2 a         | 3.1 b        | 2.9 b*        | 2.7 b        | 3.1 b*        | 2.9 b        |
|             |                | CK              | 3.3 a*        | 3.0 a        | 3.3 a         | 3.3 a        | 3.4 a         | 3.3 a        | 3.3 a*        | 3.2 a        |
|             | K              | NP              | 4.0 a         | 3.9 a        | 4.4 b         | 4.6 b        | 3.3 b         | 3.2 b        | 3.9 b         | 3.9 a        |
|             |                | CK              | 4.2 a*        | 3.9 a        | 4.8 a         | 5.0 a        | 3.9 a         | 3.8 a        | 4.3 a         | 4.2 a        |
| 秸秆<br>Straw | N              | NP              | 4.7 a*        | 4.0 a        | 6.9 a         | 6.1 a        | 3.9 a         | 4.2 a        | 5.2 a*        | 4.7 a        |
|             |                | CK              | 3.4 b         | 3.5 b        | 3.0 b         | 2.9 b        | 2.3 b         | 2.2 b        | 2.9 b         | 2.9 b        |
|             | P              | NP              | 0.4 a         | 0.3 a        | 0.7 a         | 0.6 a        | 0.3 a         | 0.3 a        | 0.4 a         | 0.4 a        |
|             |                | CK              | 0.3 b         | 0.2 b        | 0.4 b         | 0.4 b        | 0.3 a         | 0.3 a        | 0.3 b         | 0.3 b        |
|             | K              | NP              | 11.7 a*       | 10.0 a       | 9.3 a         | 9.1 a        | 9.0 a         | 8.3 a        | 10.0 a*       | 9.1 a        |
|             |                | CK              | 10.2 a        | 8.8 a        | 7.7 b         | 7.7 b        | 6.1 b         | 5.8 b        | 8.0 b         | 7.5 b        |

注 (Note): \*表示高、低锌组间差异达到 5% 显著水平; 同列不同小写字母表示同一指标施肥处理与对照间差异达 5% 显著水平  
\* indicates significant differences between the high and low Zn groups at the same year ( $P < 0.05$ ). Values followed by different small letters in the same column indicate significant differences between the NP and CK for the same item at  $P < 0.05$ .

表 2 2014—2016 年高、低锌组中小麦品种氮磷钾吸收量 (kg/hm<sup>2</sup>)  
Table 2 NPK uptake of wheat cultivars in high and low Zn groups from 2014 to 2016

| 部位<br>Part   | 养分<br>Nutrient | 处理<br>Treatment | 2014          |              | 2015          |              | 2016          |              | 平均 Average    |              |
|--------------|----------------|-----------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|
|              |                |                 | 高锌<br>High Zn | 低锌<br>Low Zn | 高锌<br>High Zn | 低锌<br>Low Zn | 高锌<br>High Zn | 低锌<br>Low Zn | 高锌<br>High Zn | 低锌<br>Low Zn |
| 籽粒<br>Grain  | N              | NP              | 171.1 a       | 161.3 a      | 160.6 a*      | 141.1 a      | 136.2 a       | 132.7 a      | 155.9 a*      | 145.0 a      |
|              |                | CK              | 126.7 b       | 141.9 b      | 73.9 b        | 66.9 b       | 29.2 b        | 26.4 b       | 76.6 b        | 78.4 b       |
|              | P              | NP              | 22.0 a        | 21.6 a       | 24.0 a*       | 22.7 a       | 18.1 a        | 17.2 a       | 21.4 a*       | 20.5 a       |
|              |                | CK              | 18.4 b        | 19.9 b       | 15.3 b        | 15.3 b       | 6.9 b         | 6.6 b        | 13.5 b        | 13.9 b       |
|              | K              | NP              | 27.8 a        | 27.9 a       | 32.9 a        | 33.3 a       | 20.7 a        | 20.8 a       | 27.1 a        | 27.3 a       |
|              |                | CK              | 23.2 b        | 25.4 b       | 22.4 b        | 23.0 b       | 8.0 b         | 7.7 b        | 17.9 b        | 18.7 b       |
| 地上部<br>Shoot | N              | NP              | 209.5 a       | 192.1 a      | 220.5 a*      | 193.1 a      | 166.1 a       | 166.0 a      | 198.7 a*      | 183.7 a      |
|              |                | CK              | 151.4 b       | 167.5 b      | 91.6 b        | 83.9 b       | 37.0 b        | 33.8 b       | 93.3 b        | 95.1 b       |
|              | P              | NP              | 24.8 a        | 23.9 a       | 30.0 a        | 28.2 a       | 20.5 a        | 19.6 a       | 25.1 a*       | 23.9 a       |
|              |                | CK              | 20.5 b        | 21.8 b       | 17.4 b        | 17.4 b       | 8.0 b         | 7.5 b        | 15.3 b        | 15.6 b       |
|              | K              | NP              | 121.2 a*      | 104.8 a      | 113.0 a       | 110.2 a      | 89.1 a        | 86.3 a       | 107.8 a       | 100.4 a      |
|              |                | CK              | 97.1 b        | 89.1 b       | 68.1 b        | 68.4 b       | 28.2 b        | 27.5 b       | 64.5 b        | 61.7 b       |

注 (Note): \*表示高、低锌组间差异达到 5% 显著水平; 同列不同小写字母表示同一指标施肥处理与对照间差异达 5% 显著水平  
\* indicates significant differences between the high and low Zn groups at the same year ( $P < 0.05$ ). Values followed by different small letters in the same column indicate significant differences between the NP and CK for the same item at  $P < 0.05$ .

高锌品种三年平均分别提高 113%、64% 和 67%，低锌品种分别提高 93%、53% 和 63%。

说明在旱地条件下，土壤养分供应充足时，高锌品种具有更高的籽粒和地上部氮、磷吸收能力，



钾吸收能力与低锌品种相比无显著差异。施肥可使两组品种的籽粒和地上部氮磷钾吸收量均显著提高,且高锌品种提高的幅度更大。

## 2.4 籽粒锌含量与氮磷钾转移

氮磷钾收获指数的分析表明(表3),氮、磷收获指数与钾收获指数的变化不一致。无论施肥与否,两组品种氮、磷收获指数在各年份及三年平均均无显著差异。而施肥时,高锌品种钾收获指数三年平均比低锌品种低7%,其中2014年差异显著;不施肥时,除2014年差异显著外,其它两年及三年平均两组品种间无显著差异。与不施肥相比,施肥时两组品种的氮磷钾收获指数三年间均有不同程度的降低,且高、低锌品种三年平均的降幅相同,均降低2%、2%和10%。说明在旱地条件下,土壤养分供应充足时,高低锌品种向籽粒转移氮、磷的能力无显著差异,而高锌品种向籽粒转移钾的能力较低。施肥时,两组品种向籽粒转移氮磷钾的能力均降低。

## 3 讨论

### 3.1 高产小麦品种籽粒锌含量差异与氮磷钾含量的关系

本研究结果表明,在旱地条件下,土壤养分供应充足时,高锌小麦品种的籽粒氮、磷含量显著高于低锌品种,籽粒钾含量无显著差异。波兰32个小麦品种的研究发现,籽粒锌含量高的一粒小麦和二粒小麦,磷含量也均显著高于常规品种<sup>[22]</sup>。匈牙利4个小麦品种的研究表明,合理施肥条件下,与普通小麦品种相比,斯卑尔脱小麦籽粒锌含量高,其氮

磷含量也较高<sup>[23]</sup>。土耳其5个小麦品种温室试验研究表明,籽粒锌含量高的‘Gediz-75’小麦品种,其氮和钾含量也较高<sup>[24]</sup>。31个小麦品种的调研结果表明,品种高原602不仅籽粒锌含量高,而且籽粒磷、钾含量也高<sup>[25]</sup>。综合本研究结果表明,在施肥等外界条件一致的情况下,存在锌、氮、磷、钾含量均较高的小麦品种。同时,也有大量研究表明,籽粒锌含量与氮含量呈显著正相关,但与磷含量呈显著负相关<sup>[26-27]</sup>。这可能与磷的施用量有关,锌与磷相互作用的研究发现,锌与磷之间的拮抗作用并非绝对。两者供应适宜时,锌与磷之间可以呈现协同作用<sup>[28]</sup>。说明旱地条件下施磷合理时,籽粒锌、磷含量可同步提高。

本研究结果还表明,施肥使两组小麦品种籽粒氮含量均显著提高,磷、钾含量却降低。原因主要在于两组品种的籽粒产量和养分吸收量对施肥的响应不一致。施肥时高锌品种籽粒产量提高67%,籽粒氮、磷和钾吸收量分别提高104%、59%和51%;低锌品种在施肥时籽粒产量提高56%,氮、磷和钾吸收量分别提高85%、47%和46%。可见,籽粒氮吸收量提高的幅度高于产量提高的幅度而产生浓缩效应引起籽粒氮含量提高,籽粒磷、钾吸收量提高的幅度低于产量提高的幅度而产生稀释效应引起籽粒磷、钾含量下降。前人也有类似的研究结果,产量对于养分含量的浓缩和稀释效应普遍存在。在美国,氮肥用量对玉米养分影响的研究表明,施氮肥(N 16 kg/hm<sup>2</sup>)与不施氮相比,籽粒氮含量显著提高33%,而磷、钾含量显著降低21%、22%<sup>[29]</sup>。瑞典氮肥用量的研究表明,小麦籽粒锌、氮含量随施氮量

表3 2014—2016年高、低锌组中小麦品种氮磷钾收获指数

Table 3 NPK harvest indices of wheat cultivars in high and low Zn groups from 2014 to 2016

| 养分<br>Nutrient | 处理<br>Treatment | 2014          |              | 2015          |              | 2016          |              | 平均 Average    |              |
|----------------|-----------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|
|                |                 | 高锌<br>High Zn | 低锌<br>Low Zn | 高锌<br>High Zn | 低锌<br>Low Zn | 高锌<br>High Zn | 低锌<br>Low Zn | 高锌<br>High Zn | 低锌<br>Low Zn |
| N              | NP              | 82 a          | 84 a         | 73 b          | 74 b         | 82 a          | 80 a         | 79 b          | 79 b         |
|                | CK              | 84 a          | 85 a         | 80 a          | 79 a         | 79 b          | 78 a         | 81 a          | 81 a         |
| P              | NP              | 89 a          | 90 a         | 80 b          | 82 b         | 89 a          | 88 a         | 86 b          | 87 b         |
|                | CK              | 90 a          | 91 a         | 87 a          | 88 a         | 87 a          | 87 a         | 88 a          | 89 a         |
| K              | NP              | 24 a*         | 27 a         | 29 b          | 31 b         | 24 b          | 25 b         | 26 b*         | 28 b         |
|                | CK              | 25 a*         | 29 a         | 33 a          | 34 a         | 29 a          | 28 a         | 29 a          | 31 a         |

注 (Note): \*表示高、低锌组间差异达到5%显著水平;同列不同小写字母表示同一指标施肥处理与对照间差异达5%显著水平  
\* indicates significant differences between the high and low Zn groups at the same year ( $P < 0.05$ ). Values followed by different small letters in the same column indicate significant differences between the NP and CK for the same item at  $P < 0.05$ .

的增加而显著提高, 磷、钾含量却随之降低<sup>[30]</sup>。陕西关中氮磷肥配施的研究也表明, 氮磷肥配施 (N 240 kg/hm<sup>2</sup> 和 P 100 kg/hm<sup>2</sup>) 与不施肥相比, 籽粒锌、氮含量分别显著提高 26%、21%, 而磷含量却降低 17%<sup>[31]</sup>。

### 3.2 高产小麦品种籽粒锌含量差异与氮磷钾吸收转移的关系

本研究发现, 旱地条件下, 土壤养分供应充足时, 高锌品种籽粒和地上部氮、磷吸收能力显著高于低锌品种, 钾吸收能力无显著差异。河北 2 个小麦品种的研究也表明, 合理施肥条件下, 与低锌品种相比, 高锌品种的籽粒、地上部氮吸收量分别高 10%、7%, 钾吸收量分别高 36%、7%<sup>[32]</sup>。土耳其硬粒小麦温室试验研究表明, 籽粒中锌与氮的吸收具有协同作用, 高锌品种的籽粒氮吸收量也高<sup>[33]</sup>。4 个小麦品种磷钾配施的研究表明, 不同品种对于磷、钾的需求不同, 高锌小麦品种对磷的需求较高<sup>[34]</sup>。这些研究结果均说明, 土壤养分供应充足时, 高锌品种具有更高的氮磷吸收能力。这可能与氮累积多时有利于促进参与锌吸收与转移的蛋白合成及其活性提高有关<sup>[35-36]</sup>。同时, 小麦籽粒中锌主要以植酸锌的形式存在, 籽粒中的磷增加会促进植酸形成, 从而增加锌在籽粒中累积, 尽管这种增加不利于改善籽粒锌的生物有效性<sup>[37]</sup>。本研究还发现, 通过施肥, 两组品种的籽粒和地上部氮磷钾吸收量均显著提高, 且高锌品种提高的幅度更大。不少研究表明, 合理施用氮磷钾肥, 保证土壤氮磷钾供应可使小麦植株形成适宜的根系形态和大小, 改善根际环境, 增强氮磷钾吸收能力<sup>[38-40]</sup>。但关于不同籽粒锌含量品种的氮磷钾吸收对施肥的响应, 还未见其他报道。

本研究还表明, 土壤养分供应充足时, 高、低锌品种向籽粒转移氮、磷的能力无显著差异, 高锌品种向籽粒转移钾的能力较低; 施肥时两组品种向籽粒转移氮磷钾的能力均降低, 且降幅一致。氮肥用量的研究表明, 施氮量从 0 增加至 240 kg/hm<sup>2</sup> 时, 籽粒锌含量显著提高 25%, 氮和钾收获指数分别显著降低 4% 和 19%<sup>[30, 41]</sup>。30 个小麦品种磷吸收转移差异的研究表明, 高肥力条件下所有品种的磷收获指数比低肥力时显著降低 2.7%<sup>[42]</sup>。说明在土壤氮磷钾养分供应充足的条件下, 小麦从地上部向籽粒转移氮磷钾的能力会降低, 原因可能是由于土壤供应超过了籽粒对这些养分的需求, 作物吸收的养分不能有效地转运到籽粒, 而使其在营养器官茎叶的累积增加<sup>[43]</sup>。土壤养分供应充足时, 高籽粒锌含量的品种向籽粒转移钾能力较低的原因, 可能与较低的

钾转移能力降低了碳水化合物向籽粒的转移<sup>[28]</sup>, 从而使金属离子如锌在籽粒的累积相对增强有关。目前尚缺乏不同籽粒锌含量品种的氮磷钾转移对施肥响应的研究, 相关问题有待进一步深入探究。

## 4 结论

通过在旱地条件下连续三年的田间定位试验研究发现, 土壤养分供应充足时高产小麦品种的籽粒锌含量存在显著差异, 高锌品种比低锌品种显著高 54%。高锌品种的籽粒氮、磷含量分别比低锌品种显著高 9%、7%, 钾含量无显著差异, 施肥可使两组品种的氮含量显著提高, 磷、钾含量降低。高产高锌品种具有更高的籽粒和地上部氮、磷吸收能力, 钾吸收能力与低锌品种相比无显著差异, 施肥可使两组品种的氮磷钾吸收能力均显著提高, 且高锌品种提高幅度更大; 两组品种间的氮、磷转移能力无显著差异, 而钾转移能力较低, 且两组品种的氮磷钾转移能力均因施肥降低, 且降幅一致。可见, 旱地条件下土壤养分供应充足时, 高产高锌品种的氮磷吸收能力强, 钾转移能力弱, 籽粒氮磷含量高, 钾含量与低锌品种无显著差异。表明通过品种选育可同时提高旱地高产小麦籽粒锌和蛋白质含量, 也会提高磷的含量。考虑到磷含量高时会降低籽粒锌的生物有效性, 生产中通过施肥措施, 适当调控磷肥、增加氮肥, 在提高小麦籽粒氮锌含量的同时提高籽粒锌的生物有效性。

### 参 考 文 献:

- [1] Hotz C, Brown K H. Assessment of the risk of zinc deficiency in populations and options for its control[J]. Food and Nutrition Bulletin, 2004, 25: 91-204.
- [2] Anthony R, Patrick V, Thomson P, *et al.* The world health report 2002: Reducing risks, promoting healthy life[M]. Geneva: World Health Organization, 2002.162-163.
- [3] Black R E, Allen L H, Bhutta Z A, *et al.* Maternal and child undernutrition: global and regional exposures and health consequences[J]. *Lancet*, 2008, 371: 243-260.
- [4] 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(1): 49.
- [5] Bouis H E, Hotz C, McClafferty B, *et al.* Biofortification: a new tool to reduce micronutrient malnutrition[J]. Food and Nutrition Bulletin, 2011, 32(Supp. 1): S31-S40.
- [6] 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.

- [7] 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.
- [8] Velu G, Ortiz-Monasterio I, Cakmak I, *et al.* Biofortification strategies to increase grain zinc and iron concentrations in wheat[J]. *Journal of Cereal Science*, 2014, 59(3): 365–372.
- [9] 张勇, 郝元峰, 张艳, 等. 小麦营养和健康品质研究进展[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(22): 4284–4298.  
Zhang Y, Hao Y F, Zhang Y, *et al.* Progress in research on genetic improvement of nutrition and health qualities in wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(22): 4284–4298.
- [10] 张勇, 王德森, 张艳, 等. 北方冬麦区小麦品种籽粒主要矿物质元素含量分布及其相关性分析[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(9): 1871–1876.  
Zhang Y, Wang D S, Zhang Y, *et al.* Variation of major mineral elements concentration and their relationships in grain of Chinese wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(9): 1871–1876.
- [11] Cakmak I. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification?[J]. *Plant and Soil*, 2008, 302(1): 1–17.
- [12] Sharma P, Aggarwal P, Kaur A. Biofortification: A new approach to eradicate hidden hunger[J]. *Food Reviews International*, 2016, 33(1): 1–21.
- [13] 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*, 2011, 39(4): 535–543.
- [14] Trethowan R M, Reynolds M, Sayre K, *et al.* Adapting wheat cultivars to resource conserving farming practices and human nutritional needs[J]. *Annals of Applied Biology*, 2005, 146: 405–413.
- [15] Drinkwater L E, Snapp S S. Nutrients in agroecosystems: rethinking the management paradigm[J]. *Advances in Agronomy*, 2007, 92(4): 163–186.
- [16] 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.  
Guo J X, Liao W Q, Ling N, *et al.* Effects of combination use of N and Zn fertilizers on the yield and N, Zn concentrations in wheat[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2013, 36(2): 77–82.
- [17] 买文选, 田霄鸿, 保琼莉, 等. 利用螯合-缓冲营养液对小麦苗期磷-锌关系的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(6): 1056–1063.  
Mai W X, Tian X H, Bao Q L, *et al.* Study on P-Zn interaction of wheat using chelator-buffer solution culture technique[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(6): 1056–1063.
- [18] Erenoglu E B, Kutman U B, Ceylan Y, *et al.* Improved nitrogen nutrition enhances root uptake, root-to-shoot translocation and remobilization of zinc ( $^{65}\text{Zn}$ ) in wheat[J]. *New Phytologist*, 2011, 189(2): 438.
- [19] 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, 13(3): 368–372.  
Zhao R F, Zou C Q, Zhang F S. Effects of long-term P fertilization on P and Zn availability in winter wheat rhizosphere and their nutrition[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(3): 368–372.
- [20] Yong Z, Song Q, Yan J, *et al.* Mineral element concentrations in grains of Chinese wheat cultivars[J]. *Euphytica*, 2010, 174(3): 303–313.
- [21] Sabo M, Ugarčić-Hardi Ž. Concentration of macro- and microelements in grain of some new winter wheat genotypes (*Triticum aestivum* L.)[J]. *Acta Alimentaria*, 2002, 31(3): 235–242.
- [22] Suchowilska E, Wiwart M, Kandler W, *et al.* A comparison of macro- and microelement concentrations in the whole grain of four *Triticum* species[J]. *Plant Soil and Environment*, 2012, 58(3): 141–147.
- [23] Katalin B, Livia S S, István R, *et al.* Comparison of protein quality and mineral element concentrations in grain of spelt (*Triticum spelta* L.) and common wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2001, 47(5–6): 389–398.
- [24] Hakki E E, Dograr N, Pandey A, *et al.* Molecular and elemental characterization of selected Turkish durum wheat varieties[J]. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 2014, 42(2): 431–439.
- [25] 曹玉贤, 田霄鸿, 杨习文, 等. 小麦和小黑麦籽粒的营养品质及其相关性分析[J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2010, 38(1): 104–110.  
Cao Y X, Tian X H, Yang X W, *et al.* Variation of nutritional quality and their relationships in wheat and triticale grain[J]. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry(Natural Science Edition)*, 2010, 38(1): 104–110.
- [26] Zheng Y, Lewis R W, Gethin D T. The reduction in zinc concentration of wheat grain upon increased phosphorus-fertilization and its mitigation by foliar zinc application[J]. *Plant and Soil*, 2012, 361(1–2): 143–152.
- [27] 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(1): 1–8.
- [28] Pachauri S P. Effect of zinc application methods on apparent utilization efficiency of zinc and potassium fertilizers under rice-wheat rotation[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2014, 60(1): 33–48.
- [29] Riedell W E. Mineral-nutrient synergism and dilution responses to nitrogen fertilizer in field-grown maize[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2010, 173(6): 869–874.
- [30] Hammér K, Weih M, Eriksson J, *et al.* Influence of nitrogen supply on macro- and micronutrient accumulation during growth of winter wheat[J]. *Field Crops Research*, 2017, 213: 118–129.
- [31] 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.
- [32] 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 J L, Li Y M, Ma C Y, *et al.* Effect of zinc fertilization on accumulation and transportation of N, P, K and Zn after anthesis of wheat[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(3): 313–320.



- 313–320.
- [33] Kutman U B, YiLdiZ B, Ozturk L, *et al.* Biofortification of durum wheat with zinc through soil and foliar applications of nitrogen[J]. *Cereal Chemistry*, 2010, 87(1): 1–9.
- [34] Khan W D, Faheem M, Khan M Y, *et al.* Zinc requirement for optimum grain yield and zinc biofortification depends on phosphorus application to wheat cultivars[J]. *Romanian Agricultural Research*, 2015, 32: 155–163.
- [35] Martre P, Porter J R, Jamieson P D, *et al.* Modeling grain nitrogen accumulation and protein composition to understand the sink/source regulations of nitrogen remobilization for wheat[J]. *Plant Physiology*, 2003, 133(4): 1959–1967.
- [36] Ozturk L, Yazici M A, Yucel C, *et al.* Concentration and localization of zinc during seed development and germination in wheat[J]. *Physiologia Plantarum*, 2006, 128(1): 144–152.
- [37] 买文选, 田霄鸿, 陆欣春, 等. 磷锌肥配施对冬小麦籽粒锌生物有效性的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(6): 1243–1249.
- Mai W X, Tian X H, Lu X C, *et al.* Effect of Zn and P supply on grain Zn bioavailability in wheat[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(6): 1243–1249.
- [38] 于振文, 张炜, 余松烈. 钾营养对冬小麦养分吸收分配、产量形成和品质的影响[J]. *作物学报*, 1996, 22(4): 442–447.
- Yu Z W, Zhang W, Yu S L. The effects of potassium nutrition on absorption and distribution of nutrient, yield formation and grain quality in winter wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1996, 22(4): 442–447.
- [39] Wissuwa M, Gamat G, Ismail A M. Is root growth under phosphorus deficiency affected by source or sink limitations?[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2005, 56(417): 1943.
- [40] 张定一, 张永清, 杨武德, 等. 不同基因型小麦对低氮胁迫的生物学响应[J]. *作物学报*, 2006, 32(1): 1349–1354.
- Zhang D Y, Zhang Y Q, Yang W D, *et al.* Biological response of roots in different spring wheat genotypes to low nitrogen stress[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(1): 1349–1354.
- [41] 李华, 王朝辉, 李生秀. 地表覆盖和施氮对冬小麦干物质和氮素积累与转移的影响[J]. *植物营养与肥科学报*, 2008, 14(6): 1027–1034.
- Li H, Wang Z H, Li S X. Effect of soil surface mulching and N rate on dry matter and nitrogen accumulation and translocation of winter wheat[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(6): 1027–1034.
- [42] 王树亮, 田奇卓, 李娜娜, 等. 不同小麦品种对磷素吸收利用的差异[J]. *麦类作物学报*, 2008, 28(3): 476–483.
- Wang S L, Tian Q Z, Li N N, *et al.* Differences of phosphorus utilization efficiency among different wheat varieties[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2008, 28(3): 476–483.
- [43] 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]. *植物营养与肥科学报*, 2016, 22(4): 869–876.
- Che S G, Yuan L, Li Y T, *et al.* Phosphorous requirement for yield formation of wheat in main wheat production regions of China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(4): 869–876.