

阮思越, 何晓明, 张 玲, 等. 优化氮素调控对小麦锌积累与转运的影响[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(6): 1436-1442.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2021.06.010

优化氮素调控对小麦锌积累与转运的影响

阮思越¹, 何晓明¹, 张 玲², 梁政渊², 邹温馨¹, 王兴邦², 杨怀玉¹, 刘敦一¹,
张务帅¹, 陈新平¹

(1. 西南大学资源与环境学院, 重庆 400715; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100083)

摘要: 以小麦品种良星 99 为材料, 采用长期定位大田试验田研究了 5 个不同施氮水平下各个时期小麦植株的锌营养状况和氮素调控对植株锌转运与分配的影响。结果表明, 增加施氮量显著提高小麦植株在各生育期锌的含量和积累量, 在不同器官中锌含量和锌积累量均随施氮量的增加而提高。在收获期, 锌主要集中在籽粒中, 约占植株锌积累量的 70%, 茎和叶中比例依次下降。施氮量对锌的收获指数及开花后锌的转运量没有显著影响。在优化施氮水平处理下, 小麦籽粒锌含量超过 40 mg/kg, 达到了以小麦为主要粮食作物的人群锌营养和健康要求的范围。

关键词: 小麦; 锌; 养分优化管理模式; 氮锌协同

中图分类号: S512.1⁺10.62 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2021)06-1436-07

Effects of optimized nitrogen regulation on zinc accumulation and transport in wheat

RUAN Si-yue¹, HE Xiao-ming¹, ZHANG Ling², LIANG Zheng-yuan², ZOU Wen-xin¹,
WANG Xing-bang², YANG Huai-yu¹, LIU Dun-yi¹, ZHANG Wu-shuai¹, CHEN Xin-ping¹

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In the long-term field experiment, LX99 was used as the material to study the effects of under five zinc nutritional status and nitrogen regulation in wheat plants at different stages on zinc transport and distribution under five nitrogen levels. The results showed that zinc content and accumulation of wheat plants at all growth stages were significantly increased by increasing nitrogen application rate. The content and accumulation of zinc in different organs of wheat increased with the increase of nitrogen application rate. At the harvest stage, zinc was mainly concentrated in grains, accounting for about 70%, followed by stems and leaves. However, nitrogen application rate had no significant effect on zinc harvest index and zinc transport after flowering. The content of zinc in wheat grain under the optimal nitrogen application level was more than 40 mg/kg, which met the requirements of zinc nutrition and health for the population with wheat as the main food.

Key words: wheat; zinc; nutrient optimal management; nitrogen zinc coordination

收稿日期: 2021-03-06

基金项目: 国家玉米产业技术体系项目(CARS-02-15); 中央高校基本科研业务费项目(XDJK2020C069)

作者简介: 阮思越(1996-), 男, 浙江杭州人, 硕士, 主要从事植物营养生理研究, (E-mail) 15267199924@163.com

通讯作者: 陈新平, (E-mail) chenxp2017@swu.edu.cn

锌(Zn)是植物生长发育必需的 17 种营养元素之一, 也是人体正常生长发育所需的微量元素之一^[1-5]。锌作为多种酶的组分广泛地参与各种代谢活动, 锌营养不足会引起生长发育停滞、智力和免疫力下降等问题, 锌摄入量不足会导致免疫功能障碍、性腺发育不良、认知功能障碍以及腹泻、肺炎等疾病

病^[6-9]。小麦是中国的三大粮食作物之一,在中国居民日常所需的锌中 20% 以上由小麦及小麦制品提供^[4,10-12]。据有关研究结果,中国主要麦区的春、冬小麦籽粒锌平均含量仅约为 30 mg/kg,不足以满足人体正常的锌营养需求^[4,10-13]。

前人研究结果表明,氮肥用量显著影响小麦、玉米等作物对锌的吸收与累积^[14-21]。与不施氮或氮肥不足相比,增加氮肥用量不仅提高了小麦籽粒中的锌含量,而且降低了面粉中植酸和锌的摩尔比,提高了籽粒锌的生物有效性^[14-16]。有关锌在植株体内的分配和运转及氮肥的影响已有较多报道^[14-21],在氮锌协同转运方面也有一定的研究^[22-26],但是对于小麦灌浆期重要器官中锌转运以及氮肥水平的影响研究仍存在空白。本研究在高产高效养分优化管理模式下,进一步研究小麦锌吸收、分配和累积特性,分析开花后小麦旗叶、灌浆期穗中锌的变化动态,对小麦灌浆过程中锌的再转运进行观察,解析小麦不同生育期和器官的氮锌协同关系,以期优化高产高效小麦氮肥管理方案,提高小麦籽粒品质提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验设于河北省邯郸市曲周县(36.9°N, 115.0°E)的小麦-玉米氮肥用量长期定位试验地(始于2007年)上进行。试验于2018-2019年小麦季进行,小麦品种为黄淮平原普遍种植的半冬性中熟品种良星99(国审麦2006016),于2018年10月7日播种,播种量为210 kg/hm²,前茬玉米收获后秸秆全量粉碎还田。小麦季的氮肥用量分别为0 kg/hm²、112 kg/hm²、160 kg/hm²、208 kg/hm²和300 kg/hm²,分别记为N₀、N₁₁₂、N₁₆₀、N₂₀₈和N₃₀₀。其中,N₁₆₀为优化施氮处理,根据高产条件下小麦不同生育阶段氮素需求规律,通过土壤硝酸盐速测计算土壤的临界供氮能力,以此计算获得氮肥施用量;N₁₁₂和N₂₀₈相当于优化施氮处理(N₁₆₀)施氮量下调或上调30%。N₁₁₂、N₁₆₀和N₂₀₈处理中,18.8%的氮肥作为基肥,其余氮肥作为追肥在拔节期施用。N₃₀₀为农民习惯施肥量,50%作为基肥,50%在拔节期作为追肥。氮肥为尿素,基肥在播种前撒施后翻耕入土,追肥撒施后灌水。小麦季磷肥用量为P₂O₅ 120 kg/hm²(过磷酸钙),钾肥用量为K₂O 100 kg/hm²(硫酸钾),全部作基肥,撒施翻耕入土。所有处理

设4次重复,小区面积为20 m×15 m,共20个小区,采用完全随机区组排列。

试验地土壤为石灰土,小麦播种前取土分析,土壤pH值为8.3,有机质含量为12.60 g/kg,全氮含量为0.83 g/kg,速效磷、速效钾、速效锌含量分别为7.2 mg/kg、125.0 mg/kg、2.4 mg/kg。

1.2 取样与样品分析

分别于2019年3月8日、3月30日、5月1日和6月1日,即小麦返青期(GS25)、拔节期(GS31)、开花期(GS60)、成熟期(GS90),取小麦植株地上部样品。每小区,从0.3 m²(0.5 m×0.6 m)面积上获取地上部全株。成熟期样品分为穗、叶、茎和籽粒。小麦开花后1 d、10 d、15 d、24 d和31 d每小区随机选取50~60片旗叶,开花后15 d、24 d和31 d随机选取20个穗。其中开花后31 d样品为成熟期样品。植物样品用酒精和清水擦洗后,在烘箱中60℃烘干。所有样品用粉碎机粉碎,供养分测定。样品经微波消解(加入浓HNO₃ 5 ml),稀释定容后用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, iCAP7400, Thermo Scientific)测定锌含量。

1.3 统计分析

采用单因素方差分析检验氮素水平影响,采用Pearson相关分析检验小麦植株或器官中锌、氮含量的线性相关性,所有统计分析在Sigma-Plot12.5(Systat Software, Inc)内嵌统计软件上进行,采用LSD-test法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 小麦各生育时期全株锌营养变化

小麦植株锌含量随生育期进程而变化(表1),在GS25时期(返青期),植株的生物量较低,锌含量最高,拔节期至开花期逐渐降低,开花期至成熟期小麦地上部植株锌含量不再有明显变化。氮素水平对各生育时期小麦植株的锌含量有显著影响(表1),总体来看,随着氮素水平提升,植株锌含量显著增加。在所有生育期,N₃₀₀处理锌含量最高。N₁₆₀处理与N₃₀₀处理锌含量在营养生长期(GS25和GS31)有显著差异,而在开花期和收获期锌含量没有差异。N₂₀₈处理植株锌含量处于N₁₆₀处理与N₃₀₀处理之间,与二者都没有显著差异。除开花期N₁₁₂处理植株锌含量显著高于不施氮处理外,在所有其他时期都与不施氮肥处理水平相近,而显著低于其他施氮处理。相关分析结果

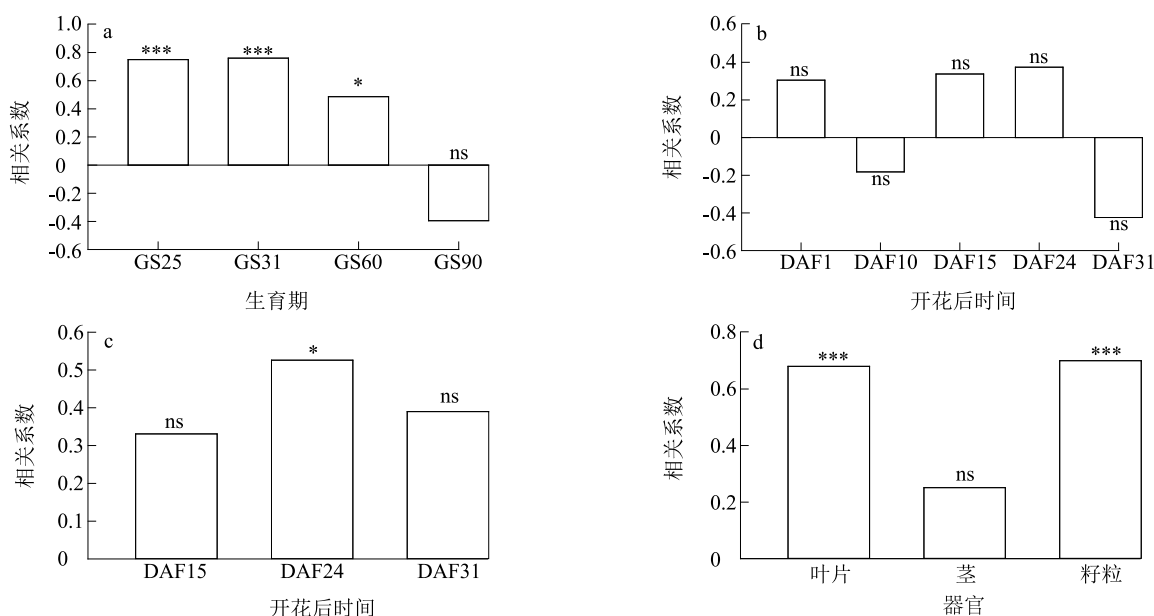
(图 1a)表明,在除成熟期外的其他生育期,小麦植株 锌含量和氮含量呈极显著或显著正相关关系。

表 1 不同生育期小麦植株锌含量 ($n=4$)

Table 1 Zinc content of wheat plant at different growth stages ($n=4$)

施氮水平 (kg/hm^2)	植株锌含量 (mg/kg)			
	返青期 (GS25)	拔节期 (GS31)	开花期 (GS60)	成熟期 (GS90)
0	$55.8 \pm 8.3\text{b}$	$32.0 \pm 4.1\text{c}$	$17.4 \pm 1.6\text{b}$	$18.9 \pm 1.8\text{b}$
112	$58.1 \pm 5.0\text{b}$	$31.8 \pm 4.0\text{c}$	$27.8 \pm 4.3\text{a}$	$21.5 \pm 2.4\text{b}$
160	$63.2 \pm 2.2\text{b}$	$40.1 \pm 3.5\text{b}$	$27.5 \pm 2.5\text{a}$	$29.5 \pm 2.6\text{a}$
208	$69.2 \pm 5.5\text{ab}$	$43.3 \pm 3.7\text{ab}$	$31.1 \pm 11.1\text{a}$	$29.1 \pm 5.2\text{a}$
300	$70.4 \pm 7.6\text{a}$	$49.2 \pm 9.9\text{a}$	$31.1 \pm 6.3\text{a}$	$32.6 \pm 3.7\text{a}$

同列数据后不同字母表示处理间差异显著。



GS25;返青期;GS31;拔节期;GS60;开花期;GS90;成熟期。DAF1、DAF10、DAF15、DAF24、DAF31;开花后 1 d、10 d、15 d、24 d、31 d。***、* 分别表示显著性达到 0.001、0.050 水平。ns 表示不显著 ($P>0.050$)。

图 1 小麦各生育期全株 (a)、旗叶 (b)、穗 (c) 以及收获期各器官 (d) 锌、氮含量线性相关系数 ($n=20$)

Fig.1 Pearson correlation coefficients between Zn content and nitrogen content in wheat plant (a), flag leaves (b), spikes (c) and different organs at harvest stage (d) ($n=20$)

随着小麦生长和生物量累积,小麦地上部植株锌吸收量不断增加(表 2)。返青期小麦植株锌吸收量为 $23 \sim 125 \text{ g}/\text{hm}^2$,至成熟期时增加到 $60 \sim 479 \text{ g}/\text{hm}^2$,增加了 1.6~2.8 倍。小麦锌吸收量随着氮肥用量提高而显著增加(表 2), N_{160} 、 N_{208} 、 N_{300} 3 个处理小麦植株锌吸收量最高,返青期、拔节期、开花期分别为不施氮处理的 4.9~5.4 倍、5.9~7.2 倍和 7.0~8.2 倍,在这些生育期这 3 个处理之间锌吸收量没有显著差异; N_{112} 处理植株锌吸收量显著低于其他 3 个施氮水平处理,但显著高于不施氮对照,为不施氮对照的 2.6~5.2 倍。至成熟期, N_{300} 处理锌吸收量最高,约为不施氮处

理的 8 倍,并且显著高于 N_{160} 处理及以下水平施氮处理,整体而言,当施氮超过 $208 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 时,成熟期小麦植株锌总吸收量不再显著增加。

2.2 小麦生育后期旗叶和穗的锌营养变化

为了分析小麦在生育后期(生殖生长期)的锌营养变化特性,通过密集采样(间隔 7~10 d),从 GS60 至 GS90 期间采取了 5 次小麦旗叶样本。在此期间,旗叶的锌含量出现阶段性下降(表 3),在开花后第 10 d,锌含量小幅下降;开花后 24 d 至成熟期,旗叶的锌含量发生第 2 次下降;从开花初期至收获期,旗叶锌含量平均下降了一半左右。从旗叶锌含

量来看(图 2a), N_{160} 处理和 N_{112} 处理大约从开花后 24 d 开始下降,而施氮水平较高的 N_{208} 处理和 N_{300} 处理旗叶锌含量大约从开花后 15 d 开始下降,不施氮对照未见旗叶锌含量明显下降。施氮水平对旗叶锌含量的影响不显著(表 3),但是由于不同氮水

平对旗叶的生物量有显著影响,因此,旗叶中锌累积量在不同施氮水平之间有显著差异,在开花后不同时间都表现为 $N_{300} \geq N_{208} \geq N_{160} > N_{112} > N_0$ (图 2a)。对开花后不同时间旗叶锌含量和氮含量进行相关分析,发现二者之间无显著相关关系(图 1b)。

表 2 不同生育时期小麦植株锌吸收量 ($n=4$)

Table 2 Zinc absorption in wheat plants at different growth stages ($n=4$)

施氮水平 (kg/hm^2)	植株锌含量 (mg/kg)			
	返青期 (GS25)	拔节期 (GS31)	开花期 (GS60)	成熟期 (GS90)
0	$23.3 \pm 5.2\text{c}$	$25.9 \pm 5.2\text{c}$	$40.4 \pm 8.2\text{c}$	$60.1 \pm 5.8\text{d}$
112	$62.7 \pm 23.0\text{b}$	$67.1 \pm 11.9\text{b}$	$208.3 \pm 32.0\text{b}$	$210.4 \pm 14.4\text{c}$
160	$113.7 \pm 12.2\text{a}$	$145.3 \pm 15.0\text{ab}$	$284.7 \pm 37.6\text{ab}$	$399.3 \pm 22.6\text{b}$
208	$113.3 \pm 13.7\text{a}$	$153.2 \pm 20.2\text{a}$	$299.0 \pm 89.1\text{a}$	$411.2 \pm 101.3\text{ab}$
300	$124.7 \pm 25.4\text{a}$	$185.8 \pm 52.5\text{a}$	$329.7 \pm 71.4\text{a}$	$478.6 \pm 39.3\text{a}$

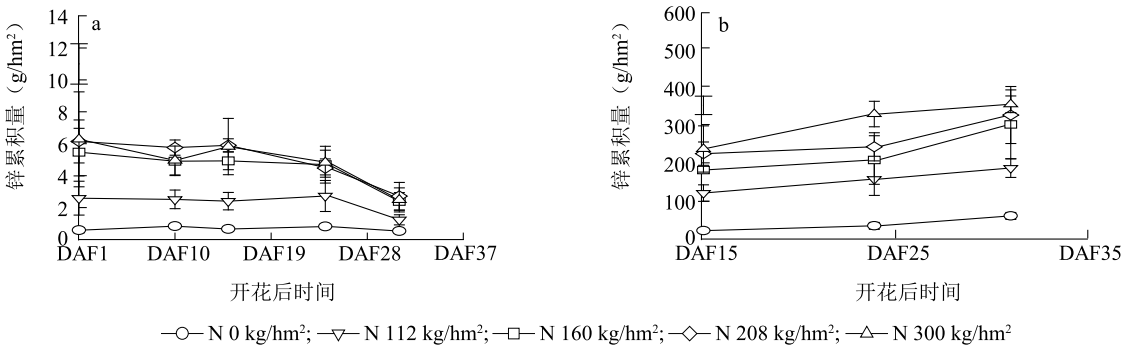
同列数据后不同字母表示处理间差异显著。

表 3 开花后不同时间小麦旗叶锌含量

Table 3 Zinc content in flag leaves of wheat at different days after anthesis

施氮水平 (kg/hm^2)	锌含量 (mg/kg)				
	DAF1	DAF10	DAF15	DAF24	DAF31
0	$26.0 \pm 5.3\text{a}$	$24.4 \pm 5.5\text{a}$	$17.9 \pm 2.1\text{b}$	$22.7 \pm 2.0\text{a}$	$15.9 \pm 2.9\text{a}$
112	$30.4 \pm 1.9\text{a}$	$21.3 \pm 3.2\text{a}$	$19.3 \pm 2.8\text{b}$	$24.0 \pm 8.3\text{a}$	$15.3 \pm 3.4\text{a}$
160	$32.1 \pm 2.9\text{a}$	$24.5 \pm 4.0\text{a}$	$23.5 \pm 0.7\text{a}$	$25.7 \pm 5.5\text{a}$	$13.4 \pm 1.2\text{a}$
208	$32.6 \pm 5.5\text{a}$	$22.2 \pm 0.9\text{a}$	$21.5 \pm 0.7\text{ab}$	$20.0 \pm 1.6\text{a}$	$14.3 \pm 0.9\text{a}$
300	$29.9 \pm 4.3\text{a}$	$21.9 \pm 2.7\text{a}$	$23.9 \pm 1.6\text{a}$	$21.8 \pm 2.5\text{a}$	$12.7 \pm 0.9\text{a}$

DAF1、DAF10、DAF15、DAF24、DAF31 见图 1 注。同列数据后不同字母表示处理间差异显著。



DAF1、DAF10、DAF15、DAF19、DAF25、DAF28、DAF35、DAF37; 开花后 1 d、10 d、15 d、19 d、25 d、28 d、35 d、37 d。

图 2 开花后不同时间小麦旗叶 (a) 和穗 (b) 中锌累积量

Fig.2 Zinc accumulation in flag leaves and spikes of wheat at different days after anthesis

以开花后 15 d (灌浆 50%) 作为起始节点至成熟期 3 次取穗样品,分析小麦穗锌营养变化情况。在此期间,穗中锌含量灌浆中后期 (DAF24) 有所下降,但至成熟期重新回升(表 4)。施氮水平对 DAF15 和 DAF24 时穗中锌含量有显著影响,随着施

氮水平提高而增加(表 4),但对成熟期穗中锌含量没有显著影响。相关分析结果表明,DAF24 时穗中锌、氮含量呈显著正相关关系(图 1c)。灌浆过程中,穗中锌含量持续增加,同时受施氮水平的影响,表现为随着施氮水平提高而显著增加(图 2b)。

表 4 开花后不同时间小麦穗中的锌含量 ($n=4$)Table 4 Zinc content in spikes of wheat at different days after anthesis ($n=4$)

施氮水平 (kg/hm ²)	DAF15 锌含量 (mg/kg)	DAF24 锌含量 (mg/kg)	DAF31 锌含量 (mg/kg)
0	25.0±2.2b	19.3±2.2c	30.1±4.5a
112	29.0±2.6b	23.5±2.3bc	29.0±4.3a
160	39.2±3.9a	29.3±8.7ab	34.6±8.6a
208	40.4±1.6a	26.5±1.2b	37.4±5.9a
300	42.5±6.5a	34.3±2.8a	38.2±4.0a

DAF15、DAF24、DAF31 见图 1 注。同列数据后不同字母表示处理间差异显著。

2.3 收获期锌在小麦不同器官中的分布

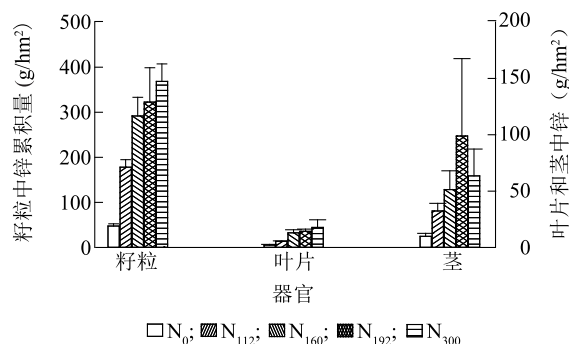
在收获期,小麦植株各部位锌含量表现为籽粒>叶≈茎秆(表 5)。收获期不同器官锌含量与施氮水平有着较为密切的关系,随着施氮水平的提高而增加,这在籽粒中特别明显。籽粒锌含量以 N_{300} 处理最高,显著高于 N_{160} 处理及以下施氮水平处理; N_{112} 处理与 N_0 对照的籽粒锌含量没有差异,但显著低于 N_{160} 处理。施氮水平对成熟期叶锌含量也有显著影响,但对茎锌含量影响不显著(表 5)。相关分析结果表明,成熟期籽粒和叶锌、氮含量呈极显著正相关关系。从锌吸收的分布来看,小麦植株中锌主要分布在籽粒中(图 3)。籽粒中锌累积量在不同施氮水平处理间存在极显著差异, N_{300} 、 N_{208} 、 N_{160} 处理显著高于 N_{112} 处理,后者又显著高于 N_0 对照(图 3)。在所有施氮水平中,锌的收获指数都超过了 70%(表 6),但施氮水平处理间无显著差异。施氮水平同样显著影响叶和茎中的锌含量(图 3)。

表 5 收获期小麦不同器官锌含量 ($n=4$)Table 5 Zinc content in different organs of wheat at harvest stage ($n=4$)

施氮水平 (kg/hm ²)	锌含量 (mg/kg)		
	籽粒	叶	茎
0	33.7±3.7c	9.6±2.6b	6.9±2.2a
112	36.2±2.9c	9.7±0.8b	7.6±1.4a
160	44.9±3.7b	12.4±1.1a	8.7±3.4a
208	48.7±9.6ab	14.5±1.9a	14.2±8.2a
300	53.6±4.9a	15.4±3.8a	9.3±2.6a

同列数据后不同字母表示处理间差异显著。

假设植株的锌都来自土壤且在此过程没有损失,根据收获期和开花期小麦植株锌吸收的差值,可以估算小麦开花以后锌的吸收量,以此为基础,



N_0 、 N_{112} 、 N_{160} 、 N_{208} 、 N_{300} 分别表示施氮水平 0 kg/hm²、112 kg/hm²、160 kg/hm²、208 kg/hm²、300 kg/hm²。

图 3 收获期籽粒、叶和茎中锌累积量

Fig.3 Zinc accumulation content in grains, leaves and stems of wheat at harvest stage

假设所有再利用的锌都转向了籽粒,从而估算锌从其他组织向籽粒的再运输。结果表明,开花前和开花后锌的吸收量占总吸收量比例分别为 67.2%~71.3%和 28.7%~32.8%,施氮水平对此无显著影响。花后通过再运输进入籽粒的锌为 27.6~219.6 g/hm²,随施氮水平的提高而显著增加;再运输锌对籽粒锌的贡献率为 58.4%~60.7%,但施氮水平之间差异很小(表 6)。

3 讨论

3.1 小麦不同生育期锌吸收积累规律

锌被小麦植株根系吸收后,转移到木质部运输至地上部,营养器官中锌能够通过韧皮部再转运至籽粒中累积起来^[24-26]。在本试验中,不同施氮水平的小麦植株均没有出现缺锌症状。在 GS25、GS31、GS60、GS90 这 4 个生育期中,间隔时间为 30 d 左右。从吸收积累的日速率变化来看,植株营养生长期锌积累主要发生在拔节至开花阶段,各施氮肥处理单位面积日吸收累积速率 4.65~4.86 g/(hm²·d),远高于返青-拔节阶段的日累积速率[1.05~2.04 g/(hm²·d)],略高于开花-成熟阶段的日累积速率[(3.74~4.96 g/(hm²·d))。植株另一个锌吸收的高峰期则是在生殖生长期,此时植株吸收的锌主要贡献给了籽粒,约占籽粒锌吸收累积量的 40%,占全生育期植株地上部总吸收累积量的 30%。小麦开花前、后锌吸收积累分配比例(分别为 70%和 30%)与其他研究结果相近,与其他作物如玉米(63%、37%)也十分接近^[3,19-21,25-26]。

表 6 开花后小麦植株锌吸收量和不同器官锌转运量

Table 6 Zinc uptake and zinc transport in different organs of wheat after anthesis

施氮水平 (kg/hm ²)	开花后 锌吸收量 (g/hm ²)	开花前锌吸收量 占总吸收量 比例(%)	开花后锌吸收量 占总吸收量 比例(%)	开花后吸收的 锌对籽粒锌 累积贡献率(%)	再转运至 籽粒的锌 (g/hm ²)	再运输锌对籽粒 锌累积贡献率 (%)	锌收获指数
0	19.7±7.7b	67.2	32.8	41.6	27.6	58.4	0.79±0.04
160	114.7±33.8a	71.3	28.7	39.3	177.1	60.7	0.73±0.09
300	148.8±59.8a	68.9	31.1	40.4	219.6	59.6	0.77±0.05

同列数据后不同字母表示处理间显著差异。

3.2 小麦锌向籽粒的分配与转移

提高小麦籽粒锌含量对补充人体锌营养有重要意义。研究发现,从 20 世纪 90 年代至今,全球小麦籽粒锌含量平均从 39.6 mg/kg 下降至 29.1 mg/kg。不同小麦品种间籽粒锌含量存在较大差异。目前,中国主要麦区春、冬小麦籽粒锌含量平均约为 30 mg/kg。Cakmak 等认为,小麦籽粒锌含量为 40~60 mg/kg 时,才能保障以小麦为主要粮食作物人群的锌营养和健康^[6-8]。本研究中,小麦籽粒锌含量达到了 33.7~53.6 mg/kg,其中优化施氮处理(N₁₆₀)及以上施氮水平时籽粒锌含量都超过了 40 mg/kg。作物籽粒中的锌有 2 大来源,一是花前营养器官累积的锌在灌浆时期通过韧皮部再转运到籽粒,另一部分是开花后根系吸收的锌分配至籽粒。本研究结果表明,锌收获指数为 0.73~0.79,接近于前人结果^[13-14]。再利用锌对籽粒锌的贡献率达到了 60% 左右,该比例接近于前人高产小麦研究报道的 58%~60%^[9];但是,要低于同一试验地早期研究报道的 59%~100%^[13-14],这可能是由于不同小麦品种和土壤有效锌含量变化等所引起。Kutman 等研究结果表明灌浆期间再利用锌对籽粒锌的贡献与供锌水平有较大关系^[26]。有研究结果表明,小麦灌浆时期通过叶面喷施锌肥可以显著增加籽粒锌含量^[27-28]。

3.3 氮锌协同效应影响小麦的锌营养状况

本研究结果表明,随着氮肥用量增加,小麦植株和籽粒的锌吸收累积量同步增加,同时营养生长期小麦植株的氮、锌含量有着显著的相关性。说明提高氮素水平促进了小麦根系对锌的吸收^[18-21,24,26,29]。灌浆期(DAF24)穗中氮、锌含量、成熟期籽粒和叶中氮、锌含量同样都存在显著正相关关系,说明锌和氮(含氮代谢物如氨基酸、烟碱等)在再利用的长距离运输过程中可能也存在着协同作用^[29]。有关研究结果表明,叶面喷施氨基酸锌的籽粒吸收利用效率显著高于硫酸锌^[30-31]。从旗叶锌含量和累积量变化来看,较高

施氮水平下从开花后 15 d(约为灌浆结束前的 14 d)开始发生锌的转移,此阶段也正是穗中锌因生长而稀释的时期(含量降低,但累积量却持续增加),从而弥补了对穗的供锌能力,促使锌含量和累积量同步提升;而施氮水平较低处理的锌再利用集中在开花后 24 d(灌浆的最后 7 d),推测是由于供氮充足小麦旗叶在后期仍保持较高的活力,有利于碳氮同化物和锌向籽粒的运输,或者在供氮水平较低的叶片中为了保持基本营养功能,需要保持一定量的锌,从而延迟了锌的运出。锌收获指数、开花前吸收锌再利用和开花后锌吸收对籽粒锌的贡献在不同施氮水平之间没有显著差异,说明锌向籽粒的分配比例并没有受到施氮水平的影响。

本研究结果表明,提高氮肥用量可以显著促进小麦植株锌吸收,增加籽粒锌含量。优化施氮水平(160 kg/hm²)显著提升小麦的氮素利用效率,此时籽粒锌含量为 44.9 mg/kg,达到了以小麦为主要粮食作物的人群锌营养和健康要求的范围(40~60 mg/kg)^[6-8]。小麦拔节后生长明显加快,对氮素的需求增强,是小麦氮素需求的高峰期,是小麦氮肥追肥的重要时间点,此时追施氮肥不仅促进小麦生长,同时也是增强锌吸收的重要措施。因此,小麦氮素养分优化管理不仅提升了氮素养管理效率,同时也能够使籽粒保持较高的锌含量,满足人体健康膳食要求。

致谢: 感谢中国农业科学院茶叶研究所方丽老师帮助分析测定锌含量和中国农业大学曲周试验站刘永亮同志在田间试验过程中的帮助!

参考文献:

[1] STEIN A J. Global impacts of human mineral malnutrition [J]. Plant & Soil, 2010, 335(1/2): 133-154.
[2] 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.
- [3] 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.
 - [4] 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.
 - [5] PALMGREN M G, CLEMENS S, WILLIAMS L E, et al. Zinc bio-fortification of cereals; Problems and solutions[J]. Trends in Plant Science, 2008, 13(9): 464-473.
 - [6] CAKMAK I, MCLAUGHLIN M J, WHITE P. Zinc for better crop production and human health[J]. Plant and Soil, 2017, 411: 1-4.
 - [7] 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.
 - [8] CAKMAK I. Enrichment of cereal grains with zinc; Agronomic or genetic biofortification? [J]. Plant & Soil, 2008, 302(1/2): 1-17.
 - [9] GIBSON R S. Zinc deficiency and human health: Etiology, health consequences, and future solutions[J]. Plant and Soil, 2012, 361: 291-299.
 - [10] DANG H K, LI R Q, SUN Y H, et al. Absorption, accumulation and distribution of zinc in highly-yielding winter wheat[J]. Agricultural Sciences in China, 2010, 9(7): 965-973.
 - [11] LIU H, WANG Z H, LI F C, et al. Grain iron and zinc concentrations of wheat and their relationships to yield in major wheat production areas in China[J]. Field Crops Research, 2014, 156: 151-160.
 - [12] 刘 慧. 我国主要麦区小麦籽粒产量和关键营养元素含量评价及调控[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
 - [13] 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相关性分析[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1871-1876.
 - [14] 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.
 - [15] XUE Y F, ZHANG W, LIU D Y, et al. Nutritional composition of iron, zinc, calcium, and phosphorus in wheat grain milling fractions as affected by fertilizer nitrogen supply[J]. Cereal Chemistry, 2016, 93: 543-549.
 - [16] SHI R L, ZHANG Y Q, CHEN X P, et al. Influence of long-term nitrogen fertilization on micronutrient density in grain of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Journal of Cereal Science, 2010, 51: 165-170.
 - [17] 王 澜, 乔月彤, 孔玮琳, 等. 小麦籽粒锌营养研究进展[J]. 山东农业科学, 2019, 51(10): 158-166, 152.
 - [18] 王义霞, 张 伟. 氮磷钾肥施用对全球小麦籽粒锌浓度的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(12): 13-17.
 - [19] 常 红, 周鑫斌, 于淑慧, 等. 小麦氮磷钾配施效应研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(11): 49-53.
 - [20] 杨习文, 宋 森, 李秋杰, 等. 氮磷钾配施对小麦锌转运、分配与累积的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(1): 148-156.
 - [21] 王少霞, 李 萌, 田霄鸿, 等. 锌与氮磷钾配合喷施对小麦锌累积、分配及转移的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(2): 296-305.
 - [22] 王 佳. 施锌对冬小麦氮素吸收代谢关键化合物和酶的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2018.
 - [23] 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.
 - [24] GENC 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.
 - [25] HACISALIHOGU 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.
 - [26] 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.
 - [27] LIU D Y, ZHANG W, PANG L L, et al. Effects of zinc application rate and zinc distribution relative to root distribution on grain yield and grain Zn concentration in wheat[J]. Plant and Soil, 2017, 411: 167-178.
 - [28] 李宏云, 王少霞, 李 萌, 等. 不同水氮管理下锌与氮磷钾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.
 - [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 Phytol, 2011, 189(2): 438-448.
 - [30] GUPTA N, RAM H, KUMAR B. Mechanism of zinc absorption in plants: uptake, transport, translocation and accumulation [J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2016, 15(1): 89-109.
 - [31] GHASEMI S, KHOSHGOFTARMANESH 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]. Eur J Agron, 2013, 45: 68-74.

(责任编辑: 张震林)