

# 氮锌配施促进小麦根系形态建成及其生理活性提高

梁振凯<sup>1</sup>, 郭聪颖<sup>2</sup>, 王彩芝<sup>3</sup>, 李友军<sup>1\*</sup>, 张均<sup>1\*</sup>

(1 河南科技大学农学院, 河南洛阳 471000; 2 河南省安阳市农业农村局, 河南安阳 455000;  
3 河南省舞阳县文峰乡政府, 河南舞阳 462400)

**摘要:**【目的】氮、锌营养均影响作物的生长、产量和品质。从小麦根系生长发育及生理活性角度, 研究氮锌配施提高小麦产量的机理。【方法】试验于 2016—2018 年在河南科技大学农场进行, 供试材料为‘洛麦 28’。采用 2 因素 3 水平完全随机设计, 氮 (N) 水平设置为 120 kg/hm<sup>2</sup> (N120)、180 kg/hm<sup>2</sup> (N180) 和 240 kg/hm<sup>2</sup> (N240), 锌 (ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O) 水平设置为 0 kg/hm<sup>2</sup> (Zn0)、20 kg/hm<sup>2</sup> (Zn20) 和 40 kg/hm<sup>2</sup> (Zn40)。在拔节期、孕穗期、灌浆期和成熟期采样, 挖长和宽均为 20 cm、深为 40 cm 的土块, 将根样冲洗干净, 测定小麦根干重、根长、根表面积、根系氮代谢相关酶活性、根系锌代谢相关酶活性、根系氮和锌含量。在成熟期测定产量及其构成因素。【结果】同一施氮水平下, 根干重、根长、根表面积、根系硝酸还原酶活性、根系谷氨酰胺合成酶活性、根系吡啶乙酸氧化酶活性、根系氮和锌含量均在 Zn20 处理下最高, 而其根系核糖核酸酶活性最低; 同一施锌水平下, 根长、根表面积、根系硝酸还原酶活性、根系谷氨酰胺合成酶活性、根系吡啶乙酸氧化酶活性、根系氮和锌含量均在 N180 处理下最高, 而其根系核糖核酸酶活性最低。氮锌互作显著影响小麦产量、根干重、根长、根表面积、根系硝酸还原酶活性、根系谷氨酰胺合成酶活性、根系吡啶乙酸氧化酶活性、根系氮和锌含量。与其他处理相比, N180Zn20 处理下小麦单位面积穗数、穗粒数以及千粒重均最高, 产量增幅为 3.5%~53.4% (2016—2017)、5.3%~54.5% (2017—2018)。相关分析表明, 在主要生育期, 小麦的根干重、根长、根表面积、根系硝酸还原酶活性、根系谷氨酰胺合成酶活性、根系吡啶乙酸氧化酶活性、根系氮含量和锌含量与产量存在显著或极显著的正相关关系, 根系核糖核酸酶活性与产量之间存在显著负相关关系。【结论】施氮和锌均显著影响小麦根干重、根长、根表面积、根系硝酸还原酶活性、根系谷氨酰胺合成酶活性、根系吡啶乙酸氧化酶活性、根系核糖核酸酶活性、根系氮和锌含量。适宜的氮锌配施具有良好的氮锌协同效应, 有利于根系良好形态的建成, 调节根系生理活性以及氮、锌养分的吸收利用, 从而促进小麦的高产稳产。综合分析可知, N180Zn20 处理为本试验条件下的最佳配施组合。

**关键词:** 小麦; 氮; 锌; 根系形态; 酶活性; 产量

## Synergistic effect of combined application of nitrogen and zinc on construction of good morphology and high physiological activities of wheat root

LIANG Zhen-kai<sup>1</sup>, GUO Cong-ying<sup>2</sup>, WANG Cai-zhi<sup>3</sup>, LI You-jun<sup>1\*</sup>, ZHANG Jun<sup>1\*</sup>

(1 Agricultural College, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471000, China; 2 Anyang Agriculture and Rural Affairs Bureau, Anyang, Henan 455000, China; 3 Wenfeng Township Government, Wuyang, Henan, 462400, China)

**Abstract:** 【Objectives】 Both nitrogen and zinc are essential nutrients for the growth, yield and quality of crops. We studied the root morphology and physiological characteristics of wheat under combined application of nitrogen and zinc, to deeply understand the mechanism of the yield and quality effects of N and Zn application.

【Methods】 Field experiments were conducted in the farm of Henan University of Science and Technology from 2016 to 2018, using wheat cultivar of ‘Luomai 28’ as tested materials. A complete design of 2 factors and three levels was used. The three N levels were N 120, 180 and 240 kg/hm<sup>2</sup> (expressed as N120, N180, N240), and those

收稿日期: 2019-07-19 接受日期: 2020-01-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31501258); 河南科技大学学科提升振兴 A 计划项目 (13660002)。

联系方式: 梁振凯 E-mail: lzhenkai1024@163.com

\* 通信作者 李友军 E-mail: hkdlyj@126.com; 张均 E-mail: zhangjun0105@126.com

for Zn ( $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) were 0, 20 and 40  $\text{kg}/\text{hm}^2$  in turn (expressed as Zn0, Zn20, Zn40). At the stages of jointing, booting, filling and maturity, soil pillars of 20 cm  $\times$  20 cm  $\times$  40 cm were dug up, and the roots inside were washed out for measurement of root dry weight, root length, root surface area, N metabolism related enzyme activities, and Zn and N contents. At maturity, yield and its components were investigated. **【 Results 】** In the same N application level, the root dry weight, the root length, the root surface area, and the activities of nitrate reductase, glutamine synthetase, indoleacetic acid oxidase and the concentrations of N and Zn at main growth stages were all highest under Zn application level of 20  $\text{kg}/\text{hm}^2$ , while ribonuclease activity was the lowest. In the same Zn application level, the root length, the root surface area, and the activities of nitrate reductase, glutamine synthetase, indoleacetic acid oxidase and the concentrations of N and Zn at main growth stages were all highest under the N application level of 180  $\text{kg}/\text{hm}^2$ , while ribonuclease activity was the lowest. N and Zn had significant synergistic effect on yield, root dry weight, root length, root surface area, nitrate reductase activity, glutamine synthetase activity, indoleacetic acid oxidase activity, N content and Zn content. In the treatment of middle N and Zn combination, the number of panicle per hectare, grains per panicle and 1000-grain weight of wheat were the highest, and the yield increased by 3.5%–53.4% (2016–2017), 5.3%–54.5% (2017–2018). The grain yield was positively correlated with the root dry weight, the root length, the root surface area, and the activities of nitrate reductase, glutamine synthetase, indoleacetic acid oxidase and the concentrations of N and Zn. And the grain yield was negatively correlated with the activity of ribonuclease. **【 Conclusions 】** N and Zn fertilizers significantly affect wheat root dry weight, root length, root surface area, nitrate reductase activity, glutamine synthetase activity, indoleacetate oxidase activity, ribonuclease activity, N and Zn contents. Appropriate levels of N and Zn fertilizer have synergistic effect in promoting the establishment of good root morphology, regulating the physiological activity of roots and the absorption of N and Zn nutrients, thus beneficial to the formation of high yield of wheat. The comprehensive analysis shows that the N180Zn20 treatment is the best combination under the experimental conditions.

**Key words:** wheat; nitrogen; zinc; root morphology; enzyme activity; yield

锌缺乏症是人类常见的营养障碍, 小麦是世界三大粮食作物之一, 是人体摄入微量营养元素的重要来源<sup>[1]</sup>。因此, 植物微量元素营养状况及其与人体健康的关系, 特别是禾谷类作物锌的生物强化已经受到越来越多研究者的关注<sup>[2-3]</sup>。实际生产中, 氮肥仍然被作为最主要的肥料来使用, 供氮量会影响作物对其他营养元素的吸收利用<sup>[4]</sup>。但是氮、锌配施下氮肥施用量的多少前人有不同的研究结果, 有研究者认为低氮和锌有协同效应, 低氮有利于植物对锌的吸收运转, 而高氮营养条件下容易造成缺锌<sup>[5]</sup>; 也有研究认为, 无论是低氮还是高氮, 氮、锌配施均具有协同效应<sup>[6]</sup>。施锌能显著提高土壤有效锌含量, 适宜浓度的氮、锌配施能改善作物的生长状况, 提高产量和品质<sup>[7-8]</sup>。

根系是作物吸收水分和养分的主要器官, 其生长具有可塑性<sup>[9]</sup>。长期缺肥会导致根系性状变差, 而施氮量偏高也不利于根系性状的改善<sup>[10]</sup>。根系与地上部进行物质互换和信息交流, 直接影响地上部的生长发育和产量的形成<sup>[11]</sup>。研究表明, 作物根系的大小和籽粒产量之间存在正相关关系<sup>[12]</sup>。根系功能的发挥

和对营养物质的吸收积累与根系形态和生理特性密切相关<sup>[9]</sup>。根系氮含量和氮累积量与总根体积、根表面积、总根长、分枝数等形态指标具有显著相关性<sup>[13]</sup>。另有研究表明, 根系对土壤营养环境的响应规律能够反映作物吸收和高效利用养分的生物学潜力<sup>[14]</sup>。作物对锌有特定的吸收分配机制, 根系吸收的锌经木质部和韧皮部运输富集到可食部位<sup>[15]</sup>。氮肥配施适量的锌肥能促进小麦幼苗根系生长, 提高根系活力和养分利用率<sup>[16]</sup>。氮、锌配施通过刺激作物根系发育, 进而促进作物对锌的吸收和利用<sup>[17]</sup>。目前, 氮、锌配施对小麦生长发育、产量形成影响的研究还不多, 尤其是氮、锌配施对根系生长发育的研究鲜见报道。因此, 本试验通过研究氮、锌肥配施对小麦根系生长发育、营养及生理性状的影响, 为小麦高产以及氮、锌肥在生产实践中的合理施用提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

于 2016—2018 年在河南科技大学农场进行, 两

年试验在不同地块上进行。供试材料为‘洛麦 28’。试验地年降水量 640 mm，年平均温度 15.1℃，年日照时数 2300~2600 h，年辐射量 491.5 kJ/cm<sup>2</sup>，气候属温带半湿润半干旱大陆性季风气候。2016—2017 年耕层土壤养分状况为：pH 8.1、有机质 15.9 g/kg、碱解氮 36.3 mg/kg、速效磷 21.0 mg/kg、速效钾 120 mg/kg、有效锌 (DTPA-Zn) 0.67 mg/kg。2017—2018 年耕层土壤养分状况为：pH 8.2、有机质 15.1 g/kg、碱解氮 36.8 mg/kg、速效磷 20.1 mg/kg、速效钾 123 mg/kg、DTPA-Zn 0.65 mg/kg。

本试验采用 2 因素 3 水平完全随机设计 (3 个供氮水平、3 个供锌水平)，施氮 (N) 水平设置为低氮 (120 kg/hm<sup>2</sup>, N120)、中氮 (180 kg/hm<sup>2</sup>, N180) 和高氮 (240 kg/hm<sup>2</sup>, N240)，施锌 (ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O) 水平设置为低锌 (0 kg/hm<sup>2</sup>, Zn0)、中锌 (20 kg/hm<sup>2</sup>, Zn20) 和高锌 (40 kg/hm<sup>2</sup>, Zn40)，共 9 个处理，3 次重复，共 27 个小区，随机区组排列。小区长为 10 m，每区 15 行，行距 0.2 m，小区面积 30 m<sup>2</sup>。翻地时施用 90 kg/hm<sup>2</sup> 磷肥 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 和 112 kg/hm<sup>2</sup> 钾肥 (K<sub>2</sub>O)。整地划小区后，50% 氮肥 (尿素，含 N 46%) 均匀撒施到土壤表面，锌肥 (ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O) 先和少量细土混合均匀后撒施到土壤表面，再人工翻入土壤中，另外 50% 氮肥 (尿素) 在拔节期追施。小麦于每年 10 月 15 日播种，基本苗为 180 万株/hm<sup>2</sup>，在分蘖期喷施除草剂除去田中杂草，在拔节期和孕穗期灌水保证土壤墒情，其它管理措施均同一般高产田。

## 1.2 测定项目及方法

1.2.1 根系取样和形态测定 分别于小麦拔节期、孕穗期、灌浆期和成熟期采用挖掘法取根。在每个处理中随机选择 3 处，在行内向下挖长宽均为 20 cm、深度 40 cm 的土块，于 70 目网袋中充分浸泡 0.5 h 后冲洗，洗根时先用流水缓慢冲洗，然后用农用压缩喷雾器冲洗干净。擦干后置于冰盒中用于根系形态测定。采用扫描仪 (Epson Expression 1680Scanner, Seiko Epson Corp, Japan) 扫描根系，WinRHIZO 根系分析系统 (Regent Instruments Inc, Quebec, Canada) 分析根系形态。

1.2.2 根干重、氮锌含量的测定 将根样置于 105℃ 的烘箱中杀青 30 min，于 70℃ 烘至恒重，称量根干重。样品粉碎后用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮，使用凯氏定氮仪 (海能 K9860) 测定样品溶液的总氮浓度。锌浓度的测定用 HClO<sub>4</sub>-HNO<sub>3</sub> 消煮，使用火焰原子吸收光谱仪 (Zeenit 700, Analytick Jena AG,

Germany) 测定。

1.2.3 根系氮代谢相关酶活性测定 硝酸还原酶 (nitrate reductase, NR) 活性测定参照离体法<sup>[18]</sup>、谷氨酰胺合成酶 (glutamine synthetase, GS) 活性测定参照马新明等<sup>[19]</sup>的方法。锌代谢相关酶：吲哚乙酸氧化酶 (indoleacetic acid oxidase, IAAO) 活性测定参照张志良等<sup>[20]</sup>的方法、核糖核酸酶 (ribonuclease, RNase) 活性测定参照龚宏伟<sup>[21]</sup>的方法。

1.2.4 测产 待小麦成熟后，每小区收获 1 m 双行植株，风干后脱粒，称重计产，重复 3 次。

## 1.3 数据处理

采用 SPSS 22.0 软件进行方差分析，用 Excel 2013 软件整理数据和制作图表。

## 2 结果与分析

### 2.1 氮锌配施对产量和主要根系性状的影响

由表 1 可知，在 2016—2017 和 2017—2018 年试验中，产量和主要根系性状在不同供氮水平和供锌水平间存在极显著差异 ( $P < 0.01$ )，氮肥与锌肥之间存在互作效应，主要指标年度间差异均不显著。这表明氮锌配施对小麦产量和根系特性的影响在年度间具有较好的重现性。

由表 1 可知，从氮效应来看，根干重表现为 N240 > N180 > N120，RNase 活性表现为 N180 < N240 < N120，产量和其他根系性状均表现为 N180 > N240 > N120，两两之间差异达显著水平 ( $P < 0.05$ )。从锌效应来看，RNase 活性表现为 Zn20 < Zn40 < Zn0，其他根系性状均表现为 Zn20 > Zn40 > Zn0，两两之间差异达显著水平；产量表现为 Zn20 和 Zn40 水平显著高于 Zn0 水平，但 Zn20 水平与 Zn40 水平之间差异不显著。

### 2.2 氮锌配施对小麦根干重和根系形态特征的影响

由表 2 可知，氮肥和锌肥对各生育期根干重的影响均达极显著水平。氮锌互作对拔节期、孕穗期根干重有显著影响。在同一供氮水平下，增施锌肥能使根干重显著增加。如在孕穗期，Zn20、Zn40 水平分别比 Zn0 水平增加 15.5%~25.8%、5.1%~14.7% (2016—2017) 和 13.8%~30.2%、4.6%~17.1% (2017—2018)。在同一供锌水平下，根干重随着施氮量的增加而增加，如在孕穗期，N180、N240 水平分别比 N120 水平增加 36.1%~48.2%、42.6%~55.6% (2016—2017) 和 32.6%~47.1%、36.2%~55.8%

表 1 氮锌配施处理小麦产量和主要根系性状

Table 1 Yield and main root traits of wheat under different nitrogen and zinc combined treatments

年度 Year	处理 Treatment	产量 Yield (kg/hm <sup>2</sup> )	根干重 RDW (g/hill)	根长 RL (m/hill)	根表面积 RSA (cm <sup>2</sup> /hill)	NR [μg/(g·h)]	GS [μmol/(g·h)]	IAAO [μg/(g·h)]	RNase (U/g)	N 含量 N content (g/kg)	Zn 含量 Zn content (mg/kg)
2016—2017	N120	4963.8 c	3.16 c	30.4 c	512.0 c	4.14 c	72.8 c	1256.3 b	0.80 a	18.4 c	32.9 c
	N180	6692.5 a	4.09 b	42.0 a	788.5 a	6.15 a	115.9 a	1768.5 a	0.43 c	24.4 a	58.9 a
	N240	6543.8 b	5.02 a	39.3 b	725.1 b	5.95 b	107.4 b	1739.6 a	0.66 b	22.7 b	49.1 b
	Zn0	5794.5 b	3.81 c	31.9 c	577.5 c	4.63 c	88.9 c	1461.6 c	0.69 a	20.2 c	33.5 c
	Zn20	6249.4 a	4.33 a	40.7 a	774.7 a	6.24 a	109.3 a	1703.7 a	0.56 c	23.3 a	56.9 a
	Zn40	6156.1 a	4.13 b	39.0 b	673.5 b	5.37 b	97.9 b	1599.1 b	0.64 b	22.0 b	50.5 b
2017—2018	N120	4971.3 c	3.23 c	30.5 c	508.0 c	4.14 c	73.8 c	1256.8 c	0.79 a	18.3 c	32.4 c
	N180	6773.1 a	4.10 b	41.9 a	783.9 a	6.18 a	116.7 a	1768.6 a	0.42 c	24.4 a	58.3 a
	N240	6521.2 b	5.01 a	39.3 b	723.7 b	5.95 b	108.0 b	1735.0 b	0.66 b	22.7 b	48.7 b
	Zn0	5797.6 b	3.84 c	31.9 c	573.6 c	4.64 c	89.6 c	1464.1 c	0.67 a	19.9 c	33.0 c
	Zn20	6282.4 a	4.36 a	40.8 a	770.1 a	6.25 a	110.1 a	1701.1 a	0.54 c	23.3 a	56.3 a
	Zn40	6185.6 a	4.14 b	39.0 b	671.9 b	5.38 b	98.9 b	1595.2 b	0.65 b	22.2 b	50.0 b
方差分析 Variance analysis											
年度 Year (Y)	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
N	655.8**	307.9**	149.3**	1409.0**	872.9**	780.0**	1699.9**	324.5**	174.8**	286.2**	
Zn	44.0**	79.4**	93.5**	674.8**	484.0**	162.0**	301.2**	43.2**	50.7**	257.3**	
Y × N	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Y × Zn	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
N × Zn	11.1**	5.2**	45.5**	124.8**	58.8**	17.9**	10.2**	4.7**	4.8**	6.2**	
Y × N × Zn	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

注 (Note): 除产量外其余指标均为孕穗期测定 The data were determined at booting stage expect for yield; RDW—Root dry weight; RL—Root length; RSA—根表面积 Root surface area; NR—硝酸还原酶活性 Nitrate reductase activity; GS—谷氨酰胺合成酶活性 Glutamine synthetase activity; IAAO—吲哚乙酸氧化酶活性 IAA oxidase activity; RNase—核糖核酸酶活性 Ribonuclease activity. NS—不显著 Not significant; \*\*— $P < 0.01$ . hill—20 cm (长) × 20 cm (宽) × 40 cm (深) 土块 Soil sample volume of 20 cm (length) × 20 cm (width) × 40 cm (depth). 同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Values followed by different letters in a column mean significant difference among treatments ( $P < 0.05$ ).

(2017—2018)。中、高氮水平下配施锌肥处理的根干重显著高于单施氮肥的处理。

由表 3 可知, 小麦根长在孕穗期达最大值, 成熟期显著降低。氮肥和锌肥及氮锌互作对各生育期根长的影响均达极显著水平。在相同施氮量条件下, 各生育期根长在 Zn20 水平最大, 而且 Zn20 水平显著高于 Zn40 水平。这表明, 过量增施锌肥会降低对根生长的促进效果。3 个锌水平下, 增施氮肥对各生育期根长的影响不同: 在拔节期, 根长表现为 N240 和 N180 水平均显著高于 N120 水平; 在孕穗期至成熟期, Zn20 水平下根长表现为 N180 > N240 > N120, 差异显著。从以上分析可知, 增施氮

肥并适量配施锌肥对根生长有积极作用, 成熟期仍能保持较长的根长。

由表 4 可知, 除灌浆期外, 氮肥和锌肥及氮锌互作对根表面积的影响均达极显著水平。在同一施氮量条件下, 根表面积随着施锌量的增加呈先增大后减小趋势。如拔节期, 与 Zn0 水平相比, Zn20 和 Zn40 水平下根表面积的增幅分别为 23.7%~75.7%、20.1%~52.9% (2016—2017), 22.8%~75.0%、19.7%~52.2% (2017—2018)。在同一施锌量条件下, 拔节期根表面积随着氮肥施用量的增加而显著增加; 孕穗期至成熟期根表面积在 N180 水平下最大, 进一步增施氮肥根表面积反而减小。这表明重

表 2 氮锌配施处理小麦根干重 (g/hill)

Table 2 Root dry weight of wheat under different nitrogen and zinc combined treatments

处理 Treatment	2016—2017				2017—2018			
	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	灌浆期 Filling	成熟期 Maturity	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	灌浆期 Filling	成熟期 Maturity
N120Zn0	2.22 e	2.96 f	3.04 ef	2.39 f	2.20 e	3.04 g	2.98 g	2.39 e
N120Zn20	2.37 e	3.42 e	3.23 e	2.68 e	2.28 e	3.46 f	3.28 f	2.61 d
N120Zn40	2.35 e	3.11 f	2.92 f	2.50 ef	2.40 e	3.18 g	2.98 g	2.48 de
N180Zn0	3.00 d	4.03 d	4.03 d	3.35 d	2.96 d	4.03 e	4.09 e	3.40 c
N180Zn20	3.79 a	5.07 ab	4.78 a	3.76 ab	3.83 a	5.09 b	4.74 b	3.84 ab
N180Zn40	3.24 c	4.42 c	4.31 c	3.60 bc	3.19 bc	4.53 d	4.36 cd	3.63 b
N240Zn0	2.99 d	4.22 cd	4.20 cd	3.51 cd	3.08 cd	4.14 e	4.26 de	3.65 b
N240Zn20	3.63 b	5.16 a	4.95 a	3.89 a	3.69 a	5.39 a	5.07 a	3.87 a
N240Zn40	3.32 c	4.84 b	4.55 b	3.67 bc	3.33 b	4.85 c	4.60 bc	3.71 ab
方差分析 Variance analysis								
N	**	**	**	**	**	**	**	**
Zn	**	**	**	**	**	**	**	**
N × Zn	**	**	**	NS	**	*	NS	NS

注 (Note): hill—20 cm (长) × 20 cm (宽) × 40 cm (深) 土块 Soil sample volume of 20 cm (length) × 20 cm (width) × 40 cm (depth). 同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Values followed by different letters mean significant difference among treatments ( $P < 0.05$ ). NS—差异不显著 Not significant; \*— $P < 0.05$ ; \*\* — $P < 0.01$ .

表 3 氮锌配施处理小麦根长 (m/hill)

Table 3 Root length of wheat under different nitrogen and zinc combined treatments

处理 Treatment	2016—2017				2017—2018			
	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	灌浆期 Filling	成熟期 Maturity	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	灌浆期 Filling	成熟期 Maturity
N120Zn0	24.1 g	27.6 f	18.5 h	13.6 g	24.2 h	27.8 g	18.7 g	13.3 f
N120Zn20	35.2 d	32.6 d	25.3 f	15.6 d	35.2 e	33.1 d	25.0 e	15.2 d
N120Zn40	30.5 f	31.0 e	23.3 g	9.9 h	30.2 g	30.5 e	23.1 f	9.8 g
N180Zn0	32.7 e	29.0 f	26.5 e	13.2 g	32.4 f	28.7 f	26.4 d	13.1 f
N180Zn20	45.1 a	49.7 a	37.5 a	26.2 a	45.2 a	50.0 a	37.0 a	26.4 a
N180Zn40	40.8 b	47.3 b	30.8 c	15.0 e	40.5 c	47.1 b	30.2 c	14.6 de
N240Zn0	38.5 c	39.3 c	27.0 e	14.3 f	38.5 d	39.3 c	27.1 d	14.5 e
N240Zn20	45.0 a	39.8 c	32.1 b	22.2 b	45.3 a	39.3 c	32.2 b	22.0 b
N240Zn40	42.0 b	38.9 c	29.7 d	21.1 c	41.7 b	39.4 c	29.7 c	21.0 c
方差分析 Variance analysis								
N	**	**	**	**	**	**	**	**
Zn	**	**	**	**	**	**	**	**
N × Zn	**	**	**	**	**	**	**	**

注 (Note): hill—20 cm (长) × 20 cm (宽) × 40 cm (深) 土块 Soil sample volume of 20 cm (length) × 20 cm (width) × 40 cm (depth). 同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Values followed by different letters in a column mean significant difference among treatments ( $P < 0.05$ ). \*\* — $P < 0.01$ .



表 4 氮锌配施处理小麦根表面积 ( $\text{cm}^2/\text{hill}$ )

Table 4 Root surface area of wheat under different nitrogen and zinc combined treatments

处理 Treatment	2016—2017				2017—2018			
	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	灌浆期 Filling	成熟期 Maturity	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	灌浆期 Filling	成熟期 Maturity
N120Zn0	426.9 g	485.9 g	272.4 g	163.9 g	424.1 i	482.7 h	272.1 h	155.9 h
N120Zn20	528.0 f	536.4 ef	410.0 e	216.2 e	521.0 g	530.4 f	404.6 f	210.5 f
N120Zn40	512.7 f	513.5 fg	371.4 f	191.7 f	507.6 h	510.8 g	364.8 g	189.8 g
N180Zn0	538.5 f	695.5 d	453.3 d	230.1 de	536.0 f	690.0 d	448.3 d	225.8 e
N180Zn20	946.1 b	916.6 a	609.9 a	415.8 a	937.8 b	910.6 a	608.4 a	413.6 a
N180Zn40	823.4 d	753.5 c	572.8 b	364.5 b	815.7 d	751.1 c	569.3 b	360.3 b
N240Zn0	714.3 e	551.0 e	439.8 de	247.6 cd	712.4 e	548.0 e	433.6 e	242.1 d
N240Zn20	999.8 a	871.0 b	574.6 b	364.7 b	999.1 a	869.3 b	568.4 b	361.6 b
N240Zn40	900.8 c	753.4 c	498.6 c	253.8 c	896.1 c	753.7 c	496.3 c	250.8 c
方差分析 Variance analysis								
N	**	**	**	**	**	**	**	**
Zn	**	**	**	**	**	**	**	**
N × Zn	**	**	NS	**	**	**	NS	**

注 (Note): hill—20 cm (长) × 20 cm (宽) × 40 cm (深) 土块 Soil sample volume of 20 cm (length) × 20 cm (width) × 40 cm (depth). 同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Values followed by different letters in a column mean significant difference among treatments ( $P < 0.05$ ). NS—差异不显著 Not significant; \*\*— $P < 0.01$ .

施氮肥在生育中后期并不能持续改善根表面积。

### 2.3 氮锌配施对小麦根系氮代谢相关酶活性的影响

图 1 表明, 随着生育时期的推进, NR 活性先升高后降低, 在孕穗期达到峰值。氮肥和锌肥及氮锌互作对各生育期 NR 活性的影响均达显著水平。与 Zn0 水平相比, Zn20 水平各生育期 NR 活性均为最高。如孕穗期, Zn20 处理根系 NR 活性在 3 个氮水平下增幅分别为 64.2%、27.7% 和 25.9% (2016—2017), 64.9%、27.4% 和 25.7% (2017—2018); 而 Zn40 处理根系 NR 活性在 N120 和 N240 水平下的增幅分别为 55.4% 和 15.9% (2016—2017), 55.1% 和 16.3% (2017—2018), Zn40 水平在 N180 水平下 NR 活性下降。不同施氮量对根系 NR 活性的影响不同: 在 Zn0 和 Zn20 水平下各生育期 NR 活性表现为 N180 > N240 > N120; 而在 Zn40 水平下, 在拔节期至灌浆期, 根系的 NR 活性随着施氮量的增加而升高。分析可知, 适量施用氮肥和锌肥可以发挥氮锌协同效应, 提高根系 NR 活性。

图 2 表明, GS 活性在孕穗期达最大值。除拔节期外, 氮肥和锌肥及氮锌互作对 GS 活性的影响达显

著水平。在相同施氮量条件下, 与 Zn0 水平相比, 增施锌肥 GS 活性显著提高, 如孕穗期, Zn20 和 Zn40 水平下 GS 活性增加幅度分别为 15.0%~35.9%、6.95%~15.8% (2016—2017), 15.5%~36.8%、6.2%~16.9% (2017—2018)。在相同施锌量条件下, 在 4 个生育期内 GS 活性随着施氮量的增加先升高后降低。由分析可知, 氮锌配施比单施氮肥效果更好, 中氮中锌配施有利于保持较高的 GS 活性。

### 2.4 氮锌配施对小麦根系锌代谢相关酶活性的影响

从图 3 可知, IAAO 活性随着生育进程的推进呈逐渐降低趋势。氮肥和锌肥对 IAAO 活性的影响达显著水平。2016—2017 年, 氮锌互作对 IAAO 活性的影响只在成熟期达到显著水平, 而在 2017—2018 年 4 个生育期均达显著水平。在相同的施氮量条件下, 增施锌肥在 4 个生育期均显著提高根系 IAAO 活性, Zn20 对 IAAO 活性影响最大。在相同的施锌量条件下, 根系 IAAO 活性随着施氮量的增加在不同生育期表现不一: 在孕穗期和灌浆期, Zn0 水平下 IAAO 活性随着施氮量的增加而升高, Zn20 和 Zn40 水平下 IAAO 活性随施氮量增加呈先升高后降低, 但 N180 与 N240 水平间差异不显著;

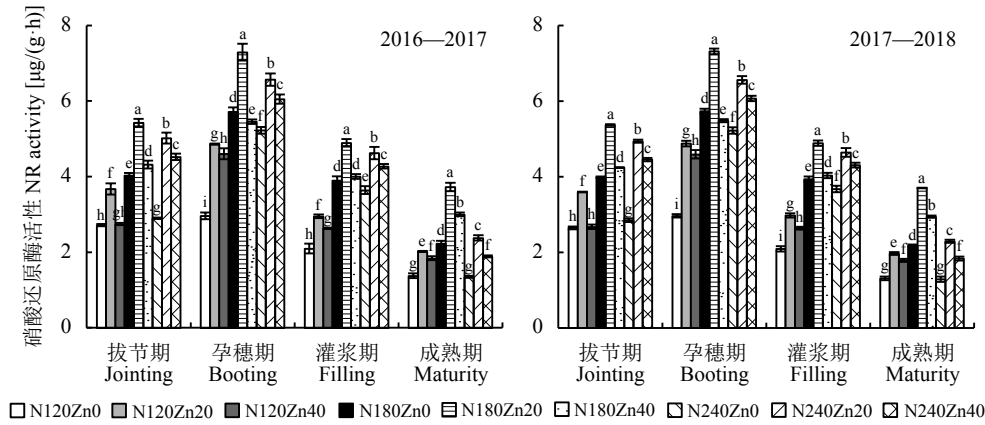


图 1 氮锌配施对小麦根系硝酸还原酶活性的影响

Fig. 1 Effects of nitrogen and zinc combined application on NR activity in wheat roots

[注 (Note) : 柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )

Different lowercase letters above the bars mean significant difference among different treatments ( $P < 0.05$ .)

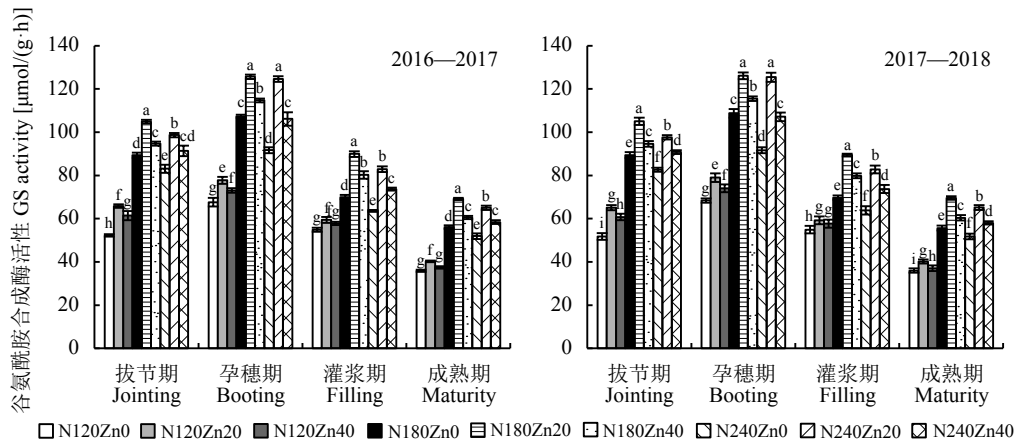


图 2 氮锌配施对小麦根系谷氨酰胺合成酶活性的影响

Fig. 2 Effects of nitrogen and zinc combined application on GS activity in wheat roots

[注 (Note) : 柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )

Different lowercase letters above the bars mean significant difference among different treatments ( $P < 0.05$ .)

在拔节期和成熟期 IAAO 活性在 3 个锌水平下均表现为  $N180 > N240 > N120$ 。在所有处理中, 以  $N180Zn20$  处理的 IAAO 活性最高。

由图 4 可知, RNase 活性随着生育进程表现为逐渐升高的趋势。氮肥和锌肥对 RNase 活性的影响达显著水平, 而氮锌互作对 RNase 活性的影响不显著。在相同施氮水平下, 与  $Zn0$  水平相比, 各生育期  $Zn20$  水平下的 RNase 活性显著降低。如孕穗期, 降幅为 11.4%~28.9% (2016—2017), 11.1%~30.7% (2017—2018);  $Zn40$  水平下 RNase 活性的降幅小于  $Zn20$  水平下。表明  $Zn20$  水平可以有效调节 RNase 活性, 供锌过量调节效果降低。在相同施锌水平下,  $N180$  水平下的 RNase 活性显著低于  $N120$  和  $N240$  水平。所有处理中, 各生育期均以

$N180Zn20$  处理的 RNase 活性最低。

## 2.5 氮锌配施对小麦根系氮、锌含量的影响

由表 5 可知, 在不同生育期, 氮肥和锌肥对根系氮含量有极显著影响, 氮锌互作对孕穗期和灌浆期的根系氮含量有显著影响。氮含量随生育进程的推进呈先升高后降低趋势, 在孕穗期达到最大。在相同施氮水平下, 各生育期根系氮含量表现为  $Zn20$  和  $Zn40$  水平显著高于  $Zn0$  水平。在相同的施锌水平下, 各生育期根系氮含量在  $N180$  水平下最高, 进一步增施氮肥反而导致根系氮含量下降。 $N180Zn20$  处理 4 个生育期的根系氮含量均显著高于其他处理。这表明合理的氮锌配施有利于根系保持较高的氮含量。

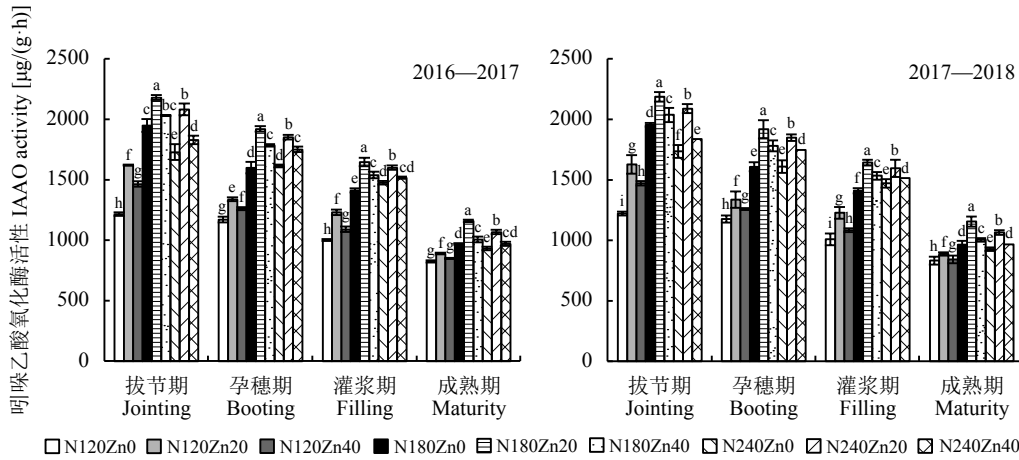


图 3 氮锌配施对小麦根系吲哚乙酸氧化酶活性的影响

Fig. 3 Effects of nitrogen and zinc combined application on IAAO activity in wheat roots

[注 (Note) : 柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )

Different lowercase letters above the bars mean significant difference among different treatments ( $P < 0.05$ .)

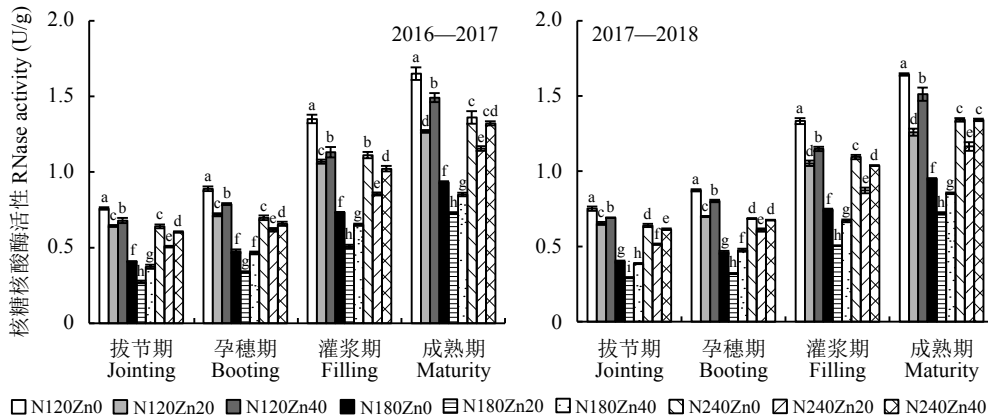


图 4 氮锌配施对小麦根系核糖核酸酶活性的影响

Fig. 4 Effects of nitrogen and zinc combined application on RNase activity in wheat roots

[注 (Note) : 柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )

Different lowercase letters above the bars mean significant difference among different treatments ( $P < 0.05$ .)

由表 6 可知, 小麦根系锌含量随生育期推进呈逐渐降低趋势。除孕穗期和成熟期外, 氮肥和锌肥及氮锌互作对根系锌含量有显著影响。在相同施氮量水平下, 根系锌含量随着施锌量的增加先升高后降低, 但 Zn20 和 Zn40 水平锌含量均显著高于 Zn0 水平。在相同施锌量水平下, 根系锌含量在 N180 水平下最高, 说明重施氮肥并不能持续提高根系锌含量。N180Zn20 处理根系锌含量在各生育期均显著高于其他处理。N180Zn20 处理在拔节期到孕穗期根系锌含量的下降量为 8.78 mg/kg (2016—2017)、8.15 mg/kg (2017—2018), 在孕穗期到灌浆期的下降量为 7.58 mg/kg (2016—2017)、7.51 mg/kg (2017—2018), 均显著高于其他组合处理。这表明 N180Zn20 处理有利于提高根系锌含量和锌转运量。

### 2.6 氮锌配施对小麦产量及产量构成因素的影响

由表 7 可知, 氮肥和锌肥及氮锌配施对小麦产量的影响均达极显著水平。在 N120 水平下, Zn40 处理产量显著高于 Zn0 和 Zn20 处理; 而 N180 和 N240 水平下, Zn20 处理产量显著高于 Zn0 和 Zn40 处理。在同一施锌量水平下, 小麦产量表现为 N180 > N240 > N120, N180 和 N240 水平均显著高于 N120 水平, 但在 Zn0 和 Zn40 水平下, N240 与 N180 之间差异不显著。N180Zn20 处理下产量最高, 表明在中氮中锌条件下氮、锌较好地发挥了协同效应, 有利于产量提高。

氮肥和锌肥对产量构成要素均产生显著影响, 而氮锌配施对产量构成因素的影响不尽相同, 仅在 2016—2017 年对单位面积穗数有显著影响。在



表 5 氮锌配施处理小麦根系氮含量 (g/kg)

Table 5 Nitrogen content in wheat roots under different nitrogen and zinc combined treatments

处理 Treatment	2016—2017				2017—2018			
	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	灌浆期 Filling	成熟期 Maturity	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	灌浆期 Filling	成熟期 Maturity
N120Zn0	13.45 f	16.00 f	11.37 f	8.60 h	13.14 g	15.66 g	10.89 h	8.19 g
N120Zn20	14.95 e	19.81 e	13.16 e	9.97 g	14.85 f	19.61 f	13.42 g	10.16 e
N120Zn40	14.50 e	19.25 e	12.80 e	8.58 h	14.50 f	19.48 f	12.90 g	8.88 f
N180Zn0	19.23 cd	22.49 cd	16.46 cd	12.05 d	18.96 d	22.15 e	16.09 e	11.43 d
N180Zn20	21.17 a	26.55 a	20.20 a	14.60 a	21.28 a	26.75 a	20.46 a	14.66 a
N180Zn40	19.67 bc	24.27 b	17.83 b	12.80 c	19.68 bc	24.18 b	17.93 c	12.90 c
N240Zn0	18.77 d	21.98 d	15.70 d	11.11 f	18.39 e	21.79 e	15.06 f	10.62 e
N240Zn20	20.10 b	23.50 bc	18.52 b	13.82 b	20.19 b	23.46 c	18.74 b	14.00 b
N240Zn40	19.33 c	22.64 cd	17.01 c	11.66 e	19.47 c	22.87 d	17.16 d	11.78 d
方差分析 Variance analysis								
N	**	**	**	**	**	**	**	**
Zn	**	**	**	**	**	**	**	**
N × Zn	NS	NS	*	NS	NS	**	*	NS

注 (Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Values followed by different small letters in a column mean significant difference among treatments ( $P < 0.05$ ). NS—差异不显著 No significant difference; \*— $P < 0.05$ ; \*\*— $P < 0.01$ .

N120 和 N240 水平下配施锌肥, 穗粒数和千粒重高于单施氮肥, 但差异不显著。N180 水平下配施锌肥穗粒数和千粒重显著高于单施氮肥。施锌条件下, 单位面积穗数、穗粒数和千粒重在 N180 水平下最高。与其他处理相比, N180Zn20 处理下小麦单位面积穗数、穗粒数和千粒重均为最高, 因而表现为产量最高, 产量增幅为 3.5%~53.4% (2016—2017)、5.3%~54.5% (2017—2018)。

## 2.7 不同时期根系性状与产量的相关分析

由表 8 可知, 小麦根系形态以及生理指标与产量之间存在一定的相关关系。小麦根干重、根长、根表面积、硝酸还原酶活性、谷氨酰胺合成酶活性、吡哆乙酸氧化酶活性以及氮、锌含量与产量之间存在显著 ( $P < 0.05$ ) 或极显著 ( $P < 0.01$ ) 正相关关系, 核糖核酸酶活性与产量之间存在显著负相关关系。这表明小麦主要生育期根系形态及生理指标与产量之间关系密切。

## 3 讨论

### 3.1 氮锌配施对小麦根系形态特征的影响

合理的肥料用量有利于提高作物产量, 改善农产品质量。根系的形态与养分的高效利用密切相

关, 究竟什么样的根系形态特征符合高效低耗栽培目标, 一直是小麦根系研究的热点。有研究表明, 低氮条件能促进根系生长和形态发育, 随着氮素水平的进一步提高, 反而会抑制根系的生长发育<sup>[9,22]</sup>。本试验结果表明, 中氮条件有利于获得较大的根系, 高氮条件下根长和根表面积显著低于中氮条件下。因为适宜的氮肥有利于根系纵向生长, 表现为总根长、总表面积显著增加<sup>[22]</sup>。适宜的氮水平下, 增施适量锌肥能促进小麦根系和幼苗地上部生长<sup>[14,23]</sup>。王佳等<sup>[24]</sup>研究表明, 增施锌肥, 冬小麦根干重、根长、根体积、分根数 (可以反映侧根生长发育状况)、根尖数均显著增加。本试验结果表明, 增施锌肥后根长和表面积显著增加, 中锌处理显著高于高锌处理。这是因为施锌有利于次生根的发生和生长<sup>[2]</sup>。锌是色氨酸合成酶的组分, 而色氨酸是合成 IAA 的前体物质, IAA 对根系生长特别是根系的构型有调控作用。而且适量供锌可以优化地上部和根系的物质循环体系<sup>[24]</sup>。Nie 等<sup>[25]</sup>研究表明, 中氮高锌配施可以通过增加根干重、根长度和根表面积来促进根系发育。本试验结果表明, 与单施氮肥相比, 氮锌配施处理显著提高了根干重、根长和根表面积, 改善了根系形态。氮锌配施是通过改善根际环境或改善

表 6 氮锌配施处理小麦根系锌含量 (mg/kg)

Table 6 Zinc content in wheat roots under different nitrogen and zinc combined treatments

处理 Treatment	2016—2017				2017—2018			
	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	灌浆期 Filling	成熟期 Maturity	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	灌浆期 Filling	成熟期 Maturity
N120Zn0	25.47 h	21.73 g	18.94 h	18.88 g	24.76 h	21.49 h	18.72 h	18.71 h
N120Zn20	42.37 f	40.93 e	35.44 f	31.28 e	41.06 f	40.39 e	34.72 f	31.54 f
N120Zn40	39.33 g	35.99 f	30.95 g	29.17 f	38.54 g	35.41 g	30.56 g	28.44 g
N180Zn0	46.17 e	40.76 e	38.07 e	36.07 d	45.98 e	40.14 e	37.25 e	35.79 e
N180Zn20	79.41 a	70.63 a	63.05 a	50.00 a	78.48 a	70.33 a	62.82 a	49.78 a
N180Zn40	69.16 b	65.37 b	60.09 b	48.78 a	68.95 b	64.38 b	59.97 b	48.18 b
N240Zn0	43.27 f	38.03 ef	35.42 f	32.00 e	42.13 f	37.38 f	34.52 f	31.42 f
N240Zn20	65.45 c	59.00 c	56.94 c	45.40 b	64.51 c	58.23 c	56.25 c	45.31 c
N240Zn40	61.28 d	50.14 d	47.04 d	38.23 c	60.11 d	50.36 d	46.65 d	37.73 d
方差分析 Variance analysis								
N	**	**	**	**	**	**	**	**
Zn	**	**	**	**	**	**	**	**
N × Zn	**	NS	*	NS	**	*	*	NS

注 (Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Values followed by different small letters in a column mean significant difference among treatments ( $P < 0.05$ ). NS—差异不显著 No significant difference; \*— $P < 0.05$ ; \*\*— $P < 0.01$ .

表 7 氮锌配施处理小麦产量及产量构成因素

Table 7 Wheat yield and yield components under different nitrogen and zinc combined treatments

处理 Treatment	2016—2017				2017—2018			
	穗数 Panicles ( $\times 10^4/\text{hm}^2$ )	穗粒数 Grains per panicle	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )	穗数 Panicles ( $\times 10^4/\text{hm}^2$ )	穗粒数 Grains per panicle	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )
N120Zn0	427.2 d	25.60 d	42.0 e	4564.20 g	430.3 e	25.20 f	42.0 e	4601.66 g
N120Zn20	427.2 d	27.26 d	42.9 de	4977.85 f	432.5 de	26.50 ef	43.0 de	4990.50 f
N120Zn40	448.0 b	27.53 d	43.6 cde	5349.30 e	440.1 de	27.10 e	43.9 d	5321.71 e
N180Zn0	443.2 bc	30.57 c	44.5 bcde	6454.55 cd	450.7 cd	31.60 d	44.6 cd	6490.44 d
N180Zn20	480.0 a	35.20 a	47.2 a	7002.15 a	481.4 a	36.00 a	47.5 a	7108.68 a
N180Zn40	448.0 b	33.75 ab	46.2 ab	6620.65 bc	460.0 bc	33.70 bc	46.9 ab	6720.12 bc
N240Zn0	468.8 a	31.60 bc	44.7 abcd	6364.90 d	470.0 ab	32.33 cd	44.7 cd	6300.70 d
N240Zn20	480.0 a	34.17 ab	45.9 abc	6768.15 b	479.3 a	34.78 ab	45.6 bc	6748.02 b
N240Zn40	432.0 cd	33.50 abc	46.0 abc	6498.35 cd	468.9 abc	32.94 cd	46.1 abc	6514.90 cd
方差分析 Variance analysis								
N	**	**	**	**	**	**	**	**
Zn	**	**	NS	**	NS	**	**	**
N × Zn	**	NS	NS	**	NS	NS	NS	**

注 (Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Values followed by different small letters in a column mean significant difference among treatments ( $P < 0.05$ ). NS—差异不显著 No significant difference; \*\*— $P < 0.01$ .

表 8 不同生育期根系形态及生理指标与产量的相关分析

Table 8 Correlation analysis of root morphological and physiological indexes and yield of wheat at different growth stages

根系性状 Root characteristics	2016—2017				2017—2018			
	拔节期	孕穗期	灌浆期	成熟期	拔节期	孕穗期	灌浆期	成熟期
	Jointing	Booting	Filling	Maturity	Jointing	Booting	Filling	Maturity
根干重 Root dry weight	0.90**	0.86**	0.87**	0.92**	0.90**	0.82**	0.87**	0.92**
根长 Root length	0.73*	0.57	0.78**	0.38	0.71*	0.57	0.81**	0.41
根表面积 Root surface area	0.72*	0.74*	0.83**	0.67*	0.72*	0.77**	0.85**	0.70*
硝酸还原酶活性 NR activity	0.59	0.81**	0.92**	0.39	0.63	0.81**	0.92**	0.43
谷氨酰胺合成酶活性 GS activity	0.96**	0.89**	0.79**	0.92**	0.97**	0.90**	0.83**	0.93**
吡啶乙酸氧化酶活性 IAAO activity	0.87**	0.93**	0.92**	0.77*	0.89**	0.94**	0.92**	0.78**
核糖核酸酶活性 RNase activity	-0.68*	-0.68*	-0.65*	-0.59	-0.68*	-0.69*	-0.68*	-0.62
氮含量 N content	0.97**	0.89**	0.93**	0.83**	0.98**	0.90**	0.91**	0.82**
锌含量 Zn content	0.74*	0.67*	0.73*	0.78**	0.78**	0.71*	0.76*	0.79**

注 (Note) : \*— $P < 0.05$ ; \*\*— $P < 0.01$ .

根系形态来促进植物对锌的吸收<sup>[26]</sup>。整体来看,本试验的中氮中锌配施对根系形态的调控效果最好。这与 Nie 等<sup>[25]</sup>的试验结果不同,其原因可能是本试验是在大田土壤条件下,这与水培条件下小麦根际的锌营养动态不同。在孕穗期和灌浆期,中氮水平下进一步增施氮肥,根长和根表面积显著降低,根干重显著增加,这可能是由于中氮下小麦次生根新生的细长分支较多。在拔节期高氮水平根长和根表面积高于中氮水平,可能是由于拔节期追施氮肥而引起的短期变化。相关分析表明,小麦的根干重、根长、根表面积与产量之间存在显著或极显著正相关关系,在生产实践中,可以通过适宜的氮肥与锌肥配施,改善根系形态,增加根干重,提高小麦产量。

### 3.2 氮锌配施对小麦根系氮、锌代谢相关酶活性的影响

作物对氮素的吸收与同化必须经过一系列氮代谢酶的参与,小麦吸收的铵态氮和硝态氮必须进行快速的转化,否则就会产生毒害。根系吸收的  $\text{NO}_3^-$  在 NR 及亚硝酸还原酶 (NiR) 的作用下被还原为  $\text{NH}_4^+$ , 再经谷氨酸合成酶 (GOGAT) 及 GS 等酶的作用后被同化为酰胺态氮<sup>[19,24]</sup>。增施氮肥能有效提高小麦根系 NR 和 GS 活性,促进植株体内的氮素同化,但氮肥用量过多,小麦根系酶活性反而会受到抑制<sup>[27]</sup>。而且适当施用锌肥能增强冬小麦 NR 和 GS 活性<sup>[28]</sup>。本研究结果表明,根系的 NR 和 GS 活性在主要生育期表现为中氮 > 高氮 > 低氮,中锌 > 高锌 > 低锌,这与前人<sup>[24,27]</sup>的研究结果一致。氮锌配施与单

施氮肥相比,显著提高了根系的 NR 和 GS 活性,而中氮中锌配施效果最好。这可能是由于适宜的氮肥和锌肥改善了土壤养分状况和理化性质,提高了根系活力,增强根系对养分的吸收、同化和转运能力,从而改善和维持氮代谢酶活性。相关分析也表明,根系氮代谢酶活性与产量之间存在显著或极显著的正相关。这说明氮锌配施促进了小麦植株内氮素的同化和转运速率,从而促进根系的生长发育,有利于小麦产量的形成。

植物组织器官中 RNase 活性的高低影响 RNA 和可溶性蛋白质的含量,进而影响植物体的新陈代谢<sup>[21]</sup>。IAAO 能降解内源吡啶乙酸 (IAA),通过调节植物体内 IAA 水平,影响植物的生长发育<sup>[29]</sup>。缺锌时,植物体内的生长素含量显著下降<sup>[30]</sup>。本试验研究表明,在同一氮水平下中锌处理以及同一锌水平下中氮处理 RNase 活性显著降低,而 IAAO 活性显著升高。缺锌导致植物体内 RNase 活性升高,同时核糖核酸和蛋白质含量减少,锌浓度、核糖核酸含量与 RNase 活性之间有显著负相关性<sup>[14,31]</sup>。植物不定根发生过程分为诱导期、启动期和表达期,在植物不定根发生过程中的诱导期 (不定根起源细胞响应内外信号调节碳水化合物代谢),IAAO 活性较低,IAAO 通过调节 IAA 水平,促进不定根的生长;在植物不定根发生过程中的表达期,较高活性的 IAAO 有利于根的伸长<sup>[32]</sup>。相关分析表明, RNase 活性与产量呈负相关关系, IAAO 活性与产量呈正相关关系,说明同一生育期较低的 RNase 活性有利于小麦根系的新

陈代谢活动, 而较高的 IAAO 活性有利于不定根的发育和根系的伸长生长。在生产实践中, 可以通过氮锌配施来调节根系中酶的生理活性, 促进根系发育, 进而提高小麦产量。

### 3.3 氮锌配施对小麦根系氮、锌含量的影响

根系中的全氮含量是衡量根系氮代谢的重要指标之一。施用氮肥不足或过多, 根系氮代谢会受到影响, 导致根系生长不良或出现早衰<sup>[22]</sup>。在高氮供应情况下, 根系生物量减少, 同时其向深层土壤穿插的能力也减弱, 从而降低对氮素的吸收利用能力<sup>[33]</sup>。本试验结果表明, 无论施锌与否, 增施氮肥有利于根系对氮素营养的吸收, 一旦超出了根系对氮素的固持能力, 继续施氮并不能起到促进根系吸收氮的作用, 这与王树起等<sup>[34]</sup>对大豆根系的研究结果类似。韩金玲等<sup>[2]</sup>的研究结果表明, 适量施锌能提高小麦对氮的吸收, 施锌后小麦各器官中氮、磷、钾、锌的积累量及开花后向籽粒的转运量增加, 但施锌量过大, 这些营养元素的吸收、积累和转运反而受到一定程度的抑制。本试验结果表明, 在 3 种供氮水平下, 根系氮含量均表现为中锌 > 高锌 > 低锌, 差异显著。与单施氮肥相比, 氮锌配施显著提高根系氮含量, 原因是适宜供锌条件下, 植株体内和锌相关的蛋白酶、RNA 聚合酶等同工酶的活性提高, 合成增多, 对锌大量吸收的同时增加了对氮的吸收<sup>[35]</sup>; 也有可能是氮锌配施促进次生根的发育, 从而提高对氮素的吸收<sup>[36]</sup>。

本试验研究表明, 无论施锌与否, 中氮和高氮处理均显著提高小麦根系锌含量且中氮 > 高氮 > 低氮处理, 表明过量施用氮肥会降低冬小麦根系的锌含量, 这与 Alloway<sup>[37]</sup>的研究结果相近, 由于增施氮肥促进小麦生长发育而产生稀释效应, 使锌含量降低。本试验研究表明, 相同施氮量条件下, 增施锌肥显著提高根系锌含量且中锌 > 高锌处理。氮锌配施显著提高了根系锌含量, 这与黄文川等<sup>[36]</sup>研究结果一致。原因可能是: 1) 氮锌配施提高了土壤锌的有效性, 进而促进作物根系对锌的吸收及向植株地上部的转运<sup>[38-39]</sup>; 2) 施肥可促进冬小麦生长发育进而提高根系对锌的吸收能力<sup>[40]</sup>; 3) 冬小麦体内的氮含量和锌含量存在显著的正相关关系, 根系氮含量影响锌的吸收和向地上部的迁移<sup>[3,15,41]</sup>。

### 3.4 氮锌配施对小麦产量及产量构成因素的影响

本试验所用的土壤为石灰性土壤, 有效锌 (DTPA-Zn) 含量为 0.67 mg/kg (2016—2017)、0.65 mg/kg (2017—2018), 施用锌肥可增产增效<sup>[42]</sup>。在潜

在性缺锌土壤上作物产量很低, 单施氮肥和锌肥有一定的增产效应, 氮锌配施能取得较好的效果<sup>[4]</sup>。常红等<sup>[43]</sup>研究表明, 单施氮肥和锌肥以及氮锌配施均能显著增加小麦籽粒产量。Kutman 等<sup>[35]</sup>研究表明, 锌对于提高籽粒生物量比提高秸秆生物量具有更加积极的作用, 但氮肥和锌肥的过量施用或不合理施用均会影响产量形成<sup>[3]</sup>。黄文川等<sup>[36]</sup>研究表明, 氮锌配施提高了小麦的单位面积穗数、穗粒数和千粒重, 进而提高了产量。本试验结果表明, 同一供氮条件下, 施锌后穗粒数和千粒重均高于不施锌; 在缺锌条件下, 产量构成因素随着施氮量增加而增大; 在施锌条件下, 产量构成因素在中氮水平最大; 中氮中锌配施产量最高。适宜施氮量显著提高土壤脲酶和蔗糖酶活性, 促进小麦根系生长和后期氮素吸收转运进而提高产量<sup>[27,33,44]</sup>。施用锌肥能提高根系活力, 改善根系构型和相关酶活性, 促进养分吸收转运, 进而提高产量<sup>[2,24]</sup>。但也有研究表明, 在低锌旱地施锌对小麦产量无明显影响<sup>[45]</sup>。原因可能是, 本试验在小麦生育期进行了多次灌水保证土壤墒情, 水分促进土壤中氮、锌元素向根际迁移, 灌溉模式与氮锌肥耦合对小麦根系及产量的影响机制有待进一步研究。

## 4 结论

氮锌配施显著影响小麦的根系形态和生理活性, 氮和锌之间存在互作效应。中氮中锌配施处理 (N180Zn20) 小麦具有较大的根干重、根长和根表面积, 根系硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶、吲哚乙酸氧化酶活性以及根系氮、锌含量都较高, 并且保持较低的根核糖核酸酶活性。小麦产量与根干重、根长、根表面积、根硝酸还原酶活性、根谷氨酰胺合成酶活性、根吲哚乙酸氧化酶活性、根氮含量以及锌含量之间存在显著或极显著正相关关系, 与根核糖核酸酶活性存在显著负相关关系。

### 参 考 文 献:

- [1] Cakmak I. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification?[J]. *Plant and Soil*, 2008, 302(1/2): 1-17.
- [2] 韩金玲, 李雁鸣, 马春英, 王文颇. 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.
- [3] Han J L, Li Y M, Ma C Y, Wang W P. 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.
- [3] 冯绪猛, 郭九信, 高丽敏, 等. 氮锌配施对水稻锌的吸收、累积与分



- 配的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2015, 38(2): 279–287.
- Feng X M, Guo J X, Gao L M, *et al.* Effects of combination use of N and Zn fertilizers on absorption, accumulation and distribution of zinc in rice crop[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2015, 38(2): 279–287.
- [4] 陆欣春, 田霄鸿, 杨习文, 等. 氮锌配施对不同冬小麦品种产量及锌营养的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(5): 923–928.
- Lu X C, Tian X H, Yang X W, *et al.* Effect of combination use of Zn and N fertilizers on yield and Zn content in winter wheat[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(5): 923–928.
- [5] 康利, 马政华, 李红英, 等. 氮锌配施对玉米干物质积累及产量效应的研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2011, (1): 34–38.
- Kang L, Ma Z H, Li H Y, *et al.* Effect of application of nitrogen and zinc fertilizers on dry material accumulation and yield in maize[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2011, (1): 34–38.
- [6] 何忠俊, 洪常青, 梁社往, 等. 氮锌复合作用对黑麦草生长和生理生化特性影响的研究[J]. *土壤通报*, 2005, 36(5): 726–730.
- He Z J, Hong C Q, Liang S W, *et al.* Compound effects of N and Zn on physiological-biochemical characteristics of ryegrass[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(5): 726–730.
- [7] 刘娟花, 国春慧, 陈艳龙, 等. 锌肥种类和施用方式对土壤锌形态及有效性的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(4): 149–156.
- Liu J H, Guo C H, Chen Y L, *et al.* Effect of source and application method on Zn form and availability in soil[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2017, 45(4): 149–156.
- [8] 薛启, 王康才, 梁永富, 等. 氮锌互作对藜香生长、产量及有效成分的影响[J]. *中国中药杂志*, 2018, 43(13): 2654–2663.
- Xue Q, Wang K C, Liang Y F, *et al.* Effects of N and Zn interaction on growth, yield and active components of *Agastache rugosa*[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2018, 43(13): 2654–2663.
- [9] 臧贺藏, 王言景, 张均, 等. 冬小麦初生根与次生根形态、生理性状差异分析[J]. *河南农业科学*, 2018, 47(6): 18–23.
- Zang H C, Wang Y J, Zhang J, *et al.* Difference analysis in morphological and physiological characteristics between seminal and nodal roots of winter wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2018, 47(6): 18–23.
- [10] 张向前, 曹承富, 陈欢, 等. 长期定位施肥对砂姜黑土小麦根系性状和根冠比的影响[J]. *麦类作物学报*, 2017, 37(3): 382–389.
- Zhang X Q, Cao C F, Chen H, *et al.* Effect of long-term fertilization on root traits and root-shoot ratio of wheat in lime concretion black soil[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(3): 382–389.
- [11] Paezgarciya A, Motes C M, Scheible W, *et al.* Root traits and phenotyping strategies for plant improvement[J]. *Plants*, 2015, 4(2): 334–355.
- [12] Chloupek O, Dostál V, Streda T, *et al.* Drought tolerance of barley varieties in relation to their root system size[J]. *Plant Breeding*, 2010, 129(6): 630–636.
- [13] 陈晨, 龚海青, 张敬智, 等. 不同基因型水稻苗期氮营养特性差异及综合评价[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(10): 1347–1355.
- Chen C, Gong H Q, Zhang J Z, *et al.* Evaluation of nitrogen nutrition characteristics of different rice cultivars at seedling stage[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(10): 1347–1355.
- [14] 张均, 马超, 王贺正, 等. 氮、锌肥对作物根系生长发育调控的研究进展[J]. *湖北农业科学*, 2017, 56(5): 801–804.
- Zhang J, Ma C, Wang H Z, *et al.* Study progress of crop root growth and regulation through nitrogen and zinc[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2017, 56(5): 801–804.
- [15] Garcia-Bañuelos M L, Sida-Arreola J P, Sánchez E. Biofortification-promising approach to increasing the content of iron and zinc in staple food crops[J]. *Journal of Elementology*, 2014, 19(3): 865–888.
- [16] 姜丽娜, 侯飞, 蒿宝珍, 等. Zn<sup>2+</sup>对小麦幼苗干物质及 Zn 积累的影响[J]. *麦类作物学报*, 2008, 28(6): 1005–1010.
- Jiang L N, Hou F, Hao B Z, *et al.* Effect of Zn<sup>2+</sup> on dry matter and zinc accumulation in wheat seedling[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2008, 28(6): 1005–1010.
- [17] Zhao P, Yang F, Sui F Q, *et al.* Effect of nitrogen fertilizers on zinc absorption and translocation in winter wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2016, 39(9): 1311–1318.
- [18] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. 125–127.
- Li H S. Principles and techniques of plant physiological and biochemical experiments[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. 125–127.
- [19] 马新明, 李琳, 赵鹏, 等. 土壤水分对强筋小麦‘豫麦34’氮素同化酶活性和籽粒品质的影响[J]. *植物生态学报*, 2005, 29(1): 48–53.
- Ma X M, Li L, Zhao P, *et al.* Effect of water control on activities of nitrogen assimilation enzymes and grain quality in winter wheat[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(1): 48–53.
- [20] 张志良, 瞿伟菁, 李小方. 植物生理学实验指导(第4版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009. 100–228.
- Zhang Z L, Qu W J, Li X F. Plant physiology experiment guidance (4th Edition)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009. 100–228.
- [21] 龚宏伟. 小麦雄性不育系花粉发育过程中核糖核酸酶活性的变化[J]. *江苏农业科学*, 2013, 41(9): 63–65.
- Gong H W. Changes of ribonuclease activity during pollen development of male sterile lines in wheat[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2013, 41(9): 63–65.
- [22] 姜琳琳, 韩立思, 韩晓日, 等. 氮素对玉米幼苗生长、根系形态及氮素吸收利用效率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(1): 247–253.
- Jiang L L, Han L S, Han X R, *et al.* Effect of nitrogen on growth, root morphology traits, nitrogen uptake and utilization efficiency of maize seedlings[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2011, 17(1): 247–253.
- [23] 孙刚, 杨习文, 田霄鸿, 李生秀. 不同基因型冬小麦幼苗对缺锌的敏感性反应[J]. *华北农学报*, 2009, 24(6): 54–59.
- Sun G, Yang X W, Tian X H, Li S X. Response of zinc on wheat seedling of different sensitivity under zinc deficiency[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2009, 24(6): 54–59.
- [24] 王佳, 聂兆君, 扶海超, 等. 外源 Zn<sup>2+</sup>对冬小麦幼苗根系生长及部分氮代谢关键酶的影响[J]. *河南农业大学学报*, 2018, 52(3): 307–312.
- Wang J, Nie Z J, Fu H C, *et al.* Effects of exogenous Zn<sup>2+</sup> on root growth and some key enzymes in nitrogen metabolism in winter wheat seedlings[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2018, 52(3): 307–312.
- [25] Nie Z J, Zhao P, Wang J, *et al.* Absorption kinetics and subcellular fractionation of zinc in winter wheat in response to nitrogen supply[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 1–10.



- [26] Alloway B J. Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2009, 31(5): 537–548.
- [27] Améziane R E, Deleens E, Noctor G, *et al.* Stage of development is an important determinant in the effect of nitrate on photoassimilate ( $^{13}\text{C}$ ) partitioning in chicory (*Cichorium intybus*)[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1997, 48(306): 25–33.
- [28] Liu H E, Wang Q Y, Rengel Z, *et al.* Zinc fertilization alters flour protein composition of winter wheat genotypes varying in gluten content[J]. *Plant Soil and Environment*, 2015, 61(5): 195–200.
- [29] Devi S R, Prasad M N V. Ferulic acid mediated changes in oxidative enzymes of maize seedlings: implications in growth[J]. *Biologia Plantarum*, 1996, 38(3): 387–395.
- [30] 周斌, 张金尧, 乙引, 汪洪. 缺锌对玉米根系发育、生长素含量及生长素转运基因表达的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(5): 1352–1358.
- Zhou B, Zhang J Y, Yi Y, Wang H. Effects of zinc deficiency on root growth, endogenous auxin content and key auxin transport genes expressions in maize roots[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(5): 1352–1358.
- [31] Naik M S, Asana R D. Effect of zinc deficiency on the synthesis of protein, mineral uptake and ribonuclease activity in the cotton plant[J]. *Indian Journal of Plant Physiology*, 1961, 4: 103–108.
- [32] Nag S, Saha K, Choudhuri M A. Role of auxin and polyamines in adventitious root formation in relation to changes in compounds involved in rooting[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2001, 20(2): 182–194.
- [33] 邱喜阳, 王晨阳, 王彦丽, 等. 施氮量对冬小麦根系生长分布及产量的影响[J]. *西北农业学报*, 2012, 21(1): 53–58.
- Qiu X Y, Wang C Y, Wang Y L, *et al.* Effects of nitrogen application rate on root system distribution and grain yield of winter wheat cultivars[J]. *Acta Agricultura Boreali-Occidentalis Sinica*, 2012, 21(1): 53–58.
- [34] 王树起, 韩晓增, 乔云发, 等. 施氮对大豆根系形态和氮素吸收积累的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(6): 1069–1073.
- Wang S Q, Han X Z, Qiao Y F, *et al.* Root morphology and nitrogen accumulation in soybean (*Glycine max L.*) under different nitrogen application levels[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(6): 1069–1073.
- [35] 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.
- [36] 黄文川, 李录久, 李文高, 等. 小麦氮锌配施效应及增产机理研究[J]. *核农学报*, 2000, 14(4): 225–229.
- Huang W C, Li L J, Li W G, *et al.* Effect of applying nitrogen combined with zinc on wheat yield[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Science*, 2000, 14(4): 225–229.
- [37] Alloway B J. Zinc in soils and crop nutrition (2nd Edition)[M]. Brussels and Paris: IZA and IFA, 2008.
- [38] 聂兆君, 赵鹏, 秦世玉, 等. 氮锌配施对冬小麦根土界面锌有效性及形态分级的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(5): 1185–1193.
- Nie Z J, Zhao P, Qin S Y, *et al.* Effects of combined application of nitrogen and zinc on the availability and fraction of zinc in root-soil interface of winter wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(5): 1185–1193.
- [39] 李秋杰, 贺德先, 周苏玫, 等. 氮锌配施对小麦不同生育期 Zn 含量变化的影响[J]. *山东农业科学*, 2018, 50(11): 76–82.
- Li Q J, He D X, Zhou S M, *et al.* Effect of combined application of nitrogen and zinc on content variation of Zn in wheat at different growth stages[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2018, 50(11): 76–82.
- [40] Aciksoz S B, Yazici A, Ozturk L, *et al.* Biofortification of wheat with iron through soil and foliar application of nitrogen and iron fertilizers[J]. *Plant and Soil*, 2011, 349(1–2): 215–225.
- [41] Xue Y F, Zhang W, Liu D Y, *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.
- [42] 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 Z. The distribution of zinc content in soil in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1994, 27(1): 30–37.
- [43] 常红, 周鑫斌, 于淑慧, 等. 小麦氮锌配施效应研究[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2013, 35(11): 49–53.
- Chang H, Zhou X B, Yu S H, *et al.* Study of the effect of combined application of nitrogen and zinc on wheat[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2013, 35(11): 49–53.
- [44] 安婷婷, 侯小畔, 周亚男, 等. 氮肥用量对小麦开花后根际土壤特性和产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(17): 3352–3364.
- An T T, Hou X P, Zhou Y N, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer rates on rhizosphere soil characteristics and yield after anthesis of wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(17): 3352–3364.
- [45] 李孟华, 王朝辉, 王建伟, 等. 低锌旱地施锌方式对小麦产量和锌利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(6): 1346–1355.
- Li M H, Wang Z H, Wang J W, *et al.* Effect of Zn application methods on wheat grain yield and Zn utilization in Zn-deficient soils of dryland[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(6): 1346–1355.