

外源 Zn 对冬小麦生育后期 Zn 吸收积累的影响

姜丽娜, 吴珊珊, 祁诗月, 王珍珠, 孙伟胜, 李浩茹, 申泽龙

(河南师范大学生命科学学院, 河南新乡 453007)

摘要: 为探讨外源 Zn 对小麦植株生育后期 Zn 吸收积累的影响, 以河南省主要推广品种周麦 18 和矮抗 58 为材料, 于 2009—2010 年进行网室盆栽试验, 测定了不同浓度的 Zn(0、200、400 和 800 mg · kg⁻¹ 干土, 分别以 Zn0、Zn2、Zn4、Zn8 表示) 处理下, 小麦灌浆初期及成熟期植株叶片、茎鞘、穗部、籽粒及根等部位的 Zn 含量和干物质积累量, 分析了各部位的 Zn 积累量和分配比例。结果表明, 外源 Zn 处理下, 灌浆初期至成熟期, 小麦植株各部位 Zn 含量为 4.22~174.98 μg · g⁻¹, 以叶片 Zn 含量最高。Zn 含量的变异主要是外源 Zn 所导致, 品种及品种 × 外源 Zn 的互作对各部位 Zn 含量亦有不同程度的影响。随外源 Zn 水平的增加, 植株干物质积累量呈现先升后降趋势, 在 200 mg · kg⁻¹ 处理时, 植株干物质积累量最高。植株 Zn 积累总量亦随外源 Zn 处理浓度的增加而升高, 表现为 Zn8 > Zn4 > Zn2 > Zn0, 周麦 18 植株 Zn 积累量高于矮抗 58。灌浆初期, 植株 Zn 的主要积累部位是叶片, 至成熟期, 籽粒和根是 Zn 的主要积累部位, 植株 Zn 有 50% 左右分配至籽粒中。在 Zn2 处理下, 籽粒 Zn 的分配比例最高。土壤中施加适量 Zn 肥, 有利于植株干物质的积累和 Zn 的吸收积累。

关键词: 冬小麦; 外源 Zn; Zn 积累与分配

中图分类号: S512.1; S311

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2011)06-1099-08

Effects of Exogenous Zn on Zn Absorption and Accumulation of Winter Wheat at Later Growth Stage

JIANG Li-na, WU Shan-shan, QI Shi-yue, WANG Zhen-zhu,
SUN Wei-sheng, LI Hao-ru, SHEN Ze-long

(College of Life Sciences, Henan Normal University, Xinxiang, Henan 453007, China)

Abstract: In order to study the effects of exogenous Zn on Zn absorption and accumulation of winter wheat in later growth stage, pot experiments were arranged in green-house during 2009—2010 with experimental materials of Zhoumai-18 and Aikang-58, two popular wheat varieties at present in Henan. Zn concentrations in cultivating soils were 4 levels of 0, 200, 400 and 800 mg · kg⁻¹, and indicated as Zn0, Zn2, Zn4 and Zn8, respectively. Zn concentration and dry matter weight in different organs in early filling stage and mature stage were measured to calculate the Zn accumulation amount and distribution ratio. The results indicated that Zn concentration in wheat organs ranged from 4.22 to 174.98 μg · g⁻¹, and Zn concentration in leaves tended to be the highest among all the organs. The variation of Zn concentration in organs was mainly due to exogenous Zn treatment, while the effects of variety and the interaction of variety × exogenous Zn would not be neglected. Exogenous Zn application could enhance dry matter accumulation in wheat significantly. However, excess Zn fertilizer lowered dry matter accumulation. In this paper, Zn concentration of 200 mg · kg⁻¹ was the most appropriate level to the accumulation of dry matter. Total Zn accumulation amount in wheat enhanced with

* 收稿日期: 2011-04-19 修回日期: 2011-05-30

基金项目: 国家十二五科技支撑计划项目(2011BAD16B14); 河南省重大科技专项(081100110200); 河南师范大学大学生创新性实验计划项目(091047635)。

作者简介: 姜丽娜(1973—), 女, 博士, 副教授, 主要从事作物生理生态研究。E-mail: jln5094@yahoo.com.cn

the increase of exogenous Zn level, and the order of Zn accumulation could be described as $Zn_8 > Zn_4 > Zn_2 > Zn_0$. In this experiment, Zn accumulation in wheat of Zhoumai-18 was higher than that in Aikang-58. At early grain-filling stage, Zn accumulation in leaves was the highest. At mature stage, the main organs of higher Zn distribution ratio were grains and roots. And about 50% of Zn accumulation in wheat was distributed in grains, the distribution ratio of Zn in grains tended to be the highest under Zn_2 treatment. From the above, appropriate Zn application in soils could promote the accumulation of dry matter and Zn, and it was benefit for grain yield and quality of wheat.

Key words: Winter wheat; Exogenous Zn; Zn accumulation and distribution

Zn 是植物生长发育必需的微量元素,也是人体内重要的微量元素之一,具有广泛的生理功能^[1-2]。目前,Zn 缺乏已成为世界上继 Fe 和 VitA 之后的第三大微营养缺乏症,有 30% 以上的人群表现出缺 Zn 症状^[3-4],也是困扰我国居民的首要营养问题^[5]。人体需要的 Zn 主要来自食物,通过农艺措施和遗传育种提高作物可食部分微营养元素的含量和有效利用率是解决 Zn 等微营养缺乏的有效途径^[6-7]。小麦是世界性的粮食作物,其产量和品质对保证粮食安全和膳食营养至关重要。研究表明,增施 Zn 肥有利于延长小麦生育后期的光合作用及籽粒灌浆时间,增加干物质积累量,并提高产量^[8-10]。Zn 在植物体内不同部位间的转运和分配存在较大的基因型差异,并且由于外源 Zn 供给方式的差异,Zn 在植物部位中分配和累积的研究结果也不尽相同^[11-13]。Erenoglu 等^[14]研究表明,小麦叶片吸收 Zn 的能力不受植株体内 Zn 含量的影响,但叶片吸收的 Zn 向其他部位转运则受到植株体内 Zn 含量的影响。党红凯等^[15]研究认为,高产冬小麦各部位生育前中期 Zn 含量和积累量较高,后期籽粒 Zn 的积累主要取决于各部位 Zn 的再分配。河南省是我国小麦主产区,小麦的高产生理及相应的栽培技术研究较多,有关植株微营养的研究相对较少。本研究以河南省大面积推广种植的 2 个小麦品种为材料,采用网室盆栽试验方法,研究土壤添加 Zn 对植株灌浆初期及成熟期各部位 Zn 含量和积累量的影响,以期外源 Zn 调控小麦籽粒的 Zn 微营养品质提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

以周麦 18(河南省周口市农业科学院提供)和矮抗 58(河南科技学院提供)为材料,于 2009—

2010 年在河南师范大学网室内进行盆栽试验。

试验采用二因素(品种及土壤 Zn 处理)随机区组设计。每盆(直径 28 cm,高 30 cm)装风干土 10 kg,设置 4 种外源 Zn 处理,以 $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ (AR)作为 Zn 源,Zn 处理浓度(以 Zn 计算)设置 0、200、400 和 800 $mg \cdot kg^{-1}$ 干土 4 个水平(分别以 Zn_0 、 Zn_2 、 Zn_4 和 Zn_8 表示)。除锌肥外,施尿素 0.182 $g \cdot kg^{-1}$ 干土、磷酸氢二铵 0.157 $g \cdot kg^{-1}$ 干土和氯化钾 0.094 $g \cdot kg^{-1}$ 干土,均于播种前与土壤充分混匀施入。2009 年 10 月 13 日播种,每盆点播 20 粒,4 次重复,三叶期定苗 10 株。2010 年 6 月 1 日成熟收获。

1.2 测定内容及方法

1.2.1 植株干物质积累量的测定

于灌浆初期(2010 年 5 月 1 日)和成熟期(2010 年 6 月 1 日)取各处理植株样品,2 次重复,将植株样品按叶片、茎鞘、穗部和根分离,其中叶片又分成旗叶、倒二叶、倒三叶和余叶,茎鞘分为穗下节+倒二茎鞘、余茎鞘,穗部分为穗轴+颖壳、籽粒,各部位用去离子水冲洗干净,105 °C 杀青 0.5 h,85 °C 烘干至恒重,记录其干物质质量。

1.2.2 植株 Zn 含量的测定

上述样品经 FZ102 微型植物试样粉碎机粉碎,ICP 法测定样品 Zn 含量^[16]。称取样品 0.5 g,加入混合酸液($HNO_3 : HClO_4 = 4 : 1$)10 mL,浸泡过夜,于 KXL-1010 型控温消煮炉上消煮至无色(或浅黄色)透明。溶液定容后,ICP (Optical 2100 DV)法进行测定。根据标准曲线计算溶液中 Zn 的含量,进而计算样品的 Zn 含量和积累量。

1.3 数据分析

试验结果用 Excel 和 SPSS 统计软件进行分析。

2 结果与分析

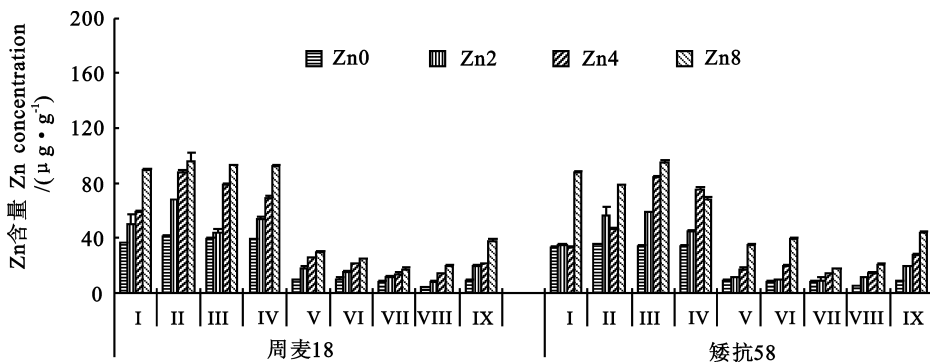
2.1 外源 Zn 对小麦植株不同部位 Zn 含量的影响

外源 Zn 处理下,小麦灌浆初期植株各部位 Zn 含量为 $4.22 \sim 95.74 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ (图 1),成熟期各部位 Zn 含量为 $7.67 \sim 174.98 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ (图 2),各部位之间 Zn 含量存在显著差异 ($P < 0.05$)。灌浆初期,Zn 含量表现为叶片 $>$ 根 $>$ 茎鞘 $>$ 穗轴 + 颖壳 \approx 籽粒;成熟期,Zn 含量表现为叶片 $>$ 根 $>$ 茎鞘 $>$ 籽粒 $>$ 穗轴 + 颖壳,两个时期均以叶片 Zn 含量表现最高。从叶片 Zn 含量来看,两个品种均以旗叶 Zn 含量表现最低。灌浆初期,周麦 18 倒二叶 Zn 含量较高,矮抗 58 倒三叶 Zn 含量较高;成熟期,周麦 18 叶片 Zn 含量以余叶表现较高,矮抗 58 以倒二叶、倒三叶 Zn 含量表现较高。从茎鞘 Zn 含量来看,灌浆初期,周麦 18 表现为穗下节 + 倒二茎鞘 $>$ 余茎鞘,矮抗 58 在 Zn₀、Zn₂ 处理下表现为穗下节 + 倒二茎鞘 $>$ 余茎鞘,在 Zn₄、Zn₈ 处理下则表现为穗下节 + 倒二茎鞘 $<$ 余茎鞘;成熟期,两品种在 Zn₀、Zn₂ 和 Zn₄ 处理下均表现为穗下节 + 倒二茎鞘 $<$ 余茎鞘,在 Zn₈ 处理下均表现为穗下节 + 倒二茎鞘 $>$ 余茎鞘。

植株各部位 Zn 含量在灌浆初期和成熟期存在差异。叶片(旗叶、倒二叶、倒三叶、余叶)和籽粒 Zn 含量以成熟期表现较高,其他部位 Zn 含量的变化在品种间及处理间存在差异,与灌浆初期相比,成熟期 Zn 含量变幅较小。

由图 1、图 2 可以看出,随外源 Zn 处理浓度

的增加,小麦植株各部位 Zn 含量亦呈升高趋势。方差分析结果(表 1)表明,外源 Zn 处理对灌浆初期和成熟期小麦各部位 Zn 含量的影响均达极显著水平 ($P < 0.01$)。从各变异来源占总变异的的比例来看,灌浆初期,外源 Zn 处理、品种及二者互作分别占部位 Zn 含量总变异的 67.75% ~ 97.45%、0.04% ~ 20.36% 和 0.54% ~ 10.82%,成熟期则分别为 82.00% ~ 99.55%、0.05% ~ 13.63% 和 0.03% ~ 6.84%。由此可见,小麦植株各部位 Zn 含量的变异主要是由外源 Zn 处理所导致的,品种及互作(品种 \times 外源 Zn 处理)对各部位 Zn 含量亦有不同程度的影响。灌浆初期,叶片(旗叶、倒二叶、倒三叶、余叶)以及根中 Zn 含量存在极显著的品种间差异 ($P < 0.01$),余茎鞘中 Zn 含量存在显著的品种间差异 ($P < 0.05$),品种 \times 外源 Zn 处理的互作对叶片(旗叶、倒二叶、倒三叶、余叶)、穗下节 + 倒二茎鞘及根中 Zn 含量影响极显著,对余茎鞘 Zn 含量影响显著。成熟期,旗叶、余叶、穗下节 + 倒二茎鞘、余茎鞘、根中 Zn 含量存在极显著的品种间差异,倒二叶 Zn 含量存在显著的品种间差异,品种 \times 外源 Zn 处理的互作对余叶、穗下节 + 倒二茎鞘、余茎鞘中 Zn 含量影响极显著,对倒二叶、根中 Zn 含量影响显著。从籽粒 Zn 含量来看,品种对籽粒 Zn 含量的影响达极显著水平,而品种 \times 外源 Zn 处理二者的交互作用对籽粒 Zn 含量影响不显著。灌浆初期,籽粒 Zn 含量表现为周麦 18 $<$ 矮抗 58,成熟期则表现为周麦 18 $>$ 矮抗 58。



I、II、III 和 IV 分别表示旗叶、倒二叶、倒三叶、余叶, V、VI 表示穗下节 + 倒二茎鞘、余茎鞘, VII 表示穗轴 + 颖壳, VIII 表示籽粒, IX 表示根。下同。

I, II, III and IV refer to flag leaves, the second leaves from top, the third leaves from top and other leaves, respectively. V refers to ear stem and the second stem from top, while VI refers to other stems. VII refers to rachis and glumes. VIII refers to grains. IX refers to roots. The same are as in following figures and tables.

图 1 外源 Zn 对灌浆初期小麦各部位 Zn 含量的影响

Fig. 1 Effects of exogenous Zn on Zn content in different parts of wheat at early grain filling stage

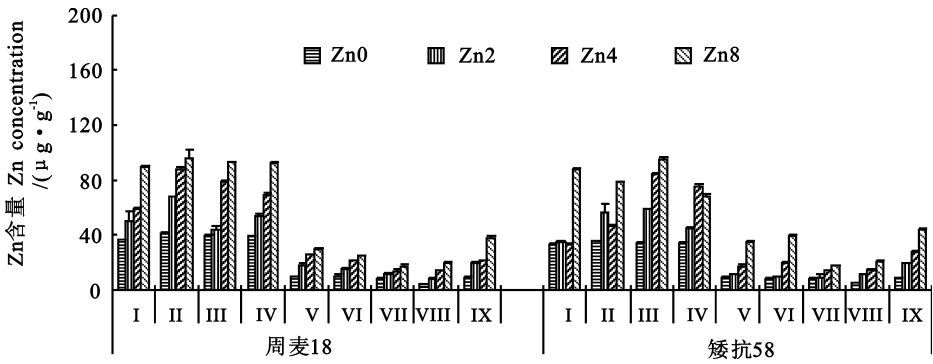


图 2 外源 Zn 处理对成熟期小麦各部位 Zn 含量的影响

Fig. 2 Effects of exogenous Zn on Zn content in different parts of wheat at mature stage

表 1 灌浆初期和成熟期小麦植株各部位 Zn 含量的方差分析

Table 1 Analysis of variance on Zn content in different parts at early filling stage and mature stage

部位 Parts	指标 Index	灌浆初期 Early grain-filling stage				成熟期 Mature stage			
		品种 Variety	处理 Treatment	品种×处理 Interaction	误差 Error	品种 Variety	处理 Treatment	品种×处理 Interaction	误差 Error
I	SS	535.77	7 086.17	393.88	63.21	480.64	15 536.48	212.96	109.83
	F	67.80**	298.92**	16.62**		35.01**	377.22**	5.17*	
II	SS	1 446.51	4 813.94	759.32	85.57	223.07	20 027.72	42.98	261.79
	F	135.24**	150.02**	23.66**		6.82*	204.01**	0.44	
III	SS	70.64	8 327.96	211.41	12.25	13.44	11 385.91	3.79	241.84
	F	46.141**	1813.20**	46.03**		0.44	125.54**	0.04	
IV	SS	268.66	4 816.48	518.93	11.34	2 122.95	12 772.77	522.44	158.06
	F	189.51**	1 132.51**	122.02**		107.45**	215.49**	8.81**	
V	SS	11.96	1 348.69	156.45	19.82	12.06	712.35	13.48	2.90
	F	4.83	181.47**	21.05**		33.27**	655.14**	12.40**	
VI	SS	75.52	1 242.92	170.39	85.35	12.59	350.60	26.87	2.65
	F	7.08*	38.83**	5.32*		38.08**	353.31**	27.08**	
VII	SS	0.08	179.17	2.16	12.16	0.16	303.63	2.68	2.93
	F	0.06	39.30**	0.47		0.45	276.53**	2.44	
VIII	SS	7.250	500.830	2.760	3.08	7.92	855.24	3.07	4.57
	F	18.85**	433.95**	2.39		13.86**	498.72**	1.79	
IX	SS	29.94	2 109.23	44.52	3.38	10.79	4 518.35	6.34	3.30
	F	70.92**	1 665.70**	35.15**		26.18**	3 654.78**	5.13*	

** 和 * 分别表示在 0.05 和 0.01 水平差异显著。

** and * indicated difference significant at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

2.2 外源 Zn 对小麦植株不同部位干物质积累量的影响

成熟期,小麦植株干物质积累总量高于灌浆初期。从灌浆初期到成熟期干物质积累增量来看,两个品种均以 Zn4 处理最高,周麦 18 干物质积累量增加了 0.752 g·茎⁻¹,矮抗 58 干物质积

累增加了 0.414 g·茎⁻¹。灌浆初期,外源 Zn 处理下两品种小麦植株干物质积累总量均表现为 Zn2>Zn4>Zn0>Zn8;成熟期,矮抗 58 各处理干物质积累总量表现为 Zn2>Zn4>Zn0>Zn8;周麦 18 则表现为 Zn4>Zn2>Zn0>Zn8。成熟期,在 Zn2 处理下,周麦 18 和矮抗 58 植株干物质积

累量与对照 (Zn0) 相比,分别增加了 11.14% 和 10.64%; Zn4 处理下,分别增加了 11.76% 和 5.90%; Zn8 处理下,则分别降低了 15.24% 和 2.21%。

从不同品种来看,灌浆初期和成熟期,在 Zn0、Zn2 和 Zn4 处理下,小麦植株干物质积累总

量均表现为周麦 18 > 矮抗 58, 而 Zn8 处理下,表现为周麦 18 < 矮抗 58。从植株地上部干物质积累量来看,灌浆初期,周麦 18 表现为 Zn2 > Zn4 > Zn0 > Zn8, 矮抗 58 表现为 Zn2 > Zn0 > Zn4 > Zn8; 成熟期,两个品种均表现为 Zn2 > Zn4 > Zn0 > Zn8。

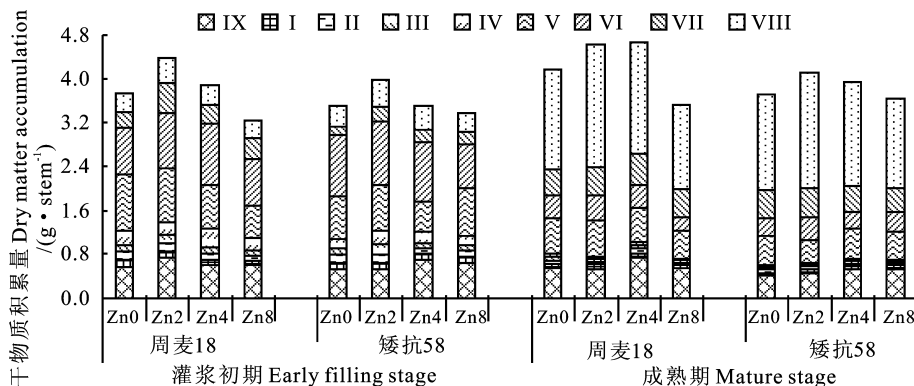


图 3 外源 Zn 处理对灌浆初期、成熟期小麦各部位干物质积累量的影响

Fig. 3 Effects of exogenous Zn on dry matter accumulation in different parts of wheat at early grain-filling and mature stages

表 2 外源 Zn 处理对灌浆初期和成熟期小麦各部位干物质分配比例的影响

Table 2 Effects of exogenous Zn on dry matter distribution ratio in different parts at early grain-filling and mature stages

时期 Stage	品种 Variety	处理 Treatments	部位 Parts								%
			IX	I	II	III	IV	V	VI	VII	
灌浆初期	周麦 18	Zn0	3.35	4.17	3.32	6.97	26.94	23.15	7.35	9.58	15.17
		Zn2	2.66	3.38	3.51	4.88	22.67	22.94	12.63	10.49	16.84
		Zn4	2.27	3.28	3.08	8.40	20.08	29.22	8.88	9.26	15.52
		Zn8	2.31	2.96	2.99	6.98	18.40	26.47	11.21	10.12	18.56
	矮抗 58	Zn0	3.13	3.96	3.36	4.53	22.29	31.83	4.65	10.68	15.57
		Zn2	2.76	3.45	4.88	6.29	21.22	28.55	6.70	12.43	13.73
		Zn4	3.04	2.85	2.97	5.69	15.58	30.36	6.93	12.67	19.92
		Zn8	3.17	3.51	2.95	5.25	25.59	23.56	7.15	9.68	19.14
成熟期	周麦 18	Zn0	1.54	1.65	1.59	1.30	15.65	9.72	12.05	43.14	13.38
		Zn2	1.45	1.31	1.31	0.76	14.16	9.74	11.38	48.12	11.78
		Zn4	1.57	1.62	1.62	1.16	13.40	9.27	11.94	43.32	16.10
		Zn8	1.50	1.35	1.35	0.84	14.31	7.02	14.59	43.42	15.63
	矮抗 58	Zn0	1.47	1.60	1.40	0.87	14.57	8.52	13.50	47.18	10.89
		Zn2	1.76	1.24	1.24	0.53	9.98	10.12	12.81	51.22	11.09
		Zn4	1.54	1.33	1.33	0.66	14.16	7.60	11.91	48.28	13.19
		Zn8	1.54	1.18	1.18	0.54	14.27	9.66	11.80	44.90	14.93

各部位干物质的积累和分配存在差异(图 3, 表 2)。灌浆初期,植株干物质积累量和分配比例

均表现为茎鞘 > 根 > 穗轴 + 颖壳, 籽粒 > 叶片; 成熟期,籽粒干物质积累量和分配比例最高,叶片最

低。与灌浆初期相比,成熟期叶片、茎鞘及根中干物质积累量均降低,而穗轴+颖壳和籽粒中干物质积累量增加。灌浆初期和成熟期,籽粒干物质积累量以及干物质增加量均表现为 $Zn_2 > Zn_4 > Zn_0 > Zn_8$ 。由此可以看出,外源 Zn 处理促进了籽粒干物质的积累。Zn0 处理下,灌浆初期,周麦 18 除余茎鞘和籽粒外,其他各部位干物质积累量均高于矮抗 58;成熟期,周麦 18 各部位干物质均高于矮抗 58。外源 Zn 处理下,成熟期,周麦 18 倒二叶、倒三叶、余叶、茎鞘及籽粒干物质积累量均高于矮抗 58。

2.3 外源 Zn 对小麦植株不同部位 Zn 积累量的影响

随外源 Zn 处理浓度的增加,植株 Zn 积累总量亦升高,表现为 $Zn_8 > Zn_4 > Zn_2 > Zn_0$ (图 4)。与灌浆初期相比,成熟期,植株 Zn 积累总量增加,旗叶、倒二叶、倒三叶、穗轴+颖壳中 Zn 的积累量均高于灌浆初期,说明灌浆期这些部位的 Zn 以积累为主;余叶及茎鞘中 Zn 的积累量低于灌浆初期,说明灌浆期这些部位的 Zn 以外运为主。从品种来看,周麦 18 植株 Zn 积累总量高于矮抗 58。

灌浆初期,各部位 Zn 积累量表现为叶片 > 茎鞘 > 根 > 穗轴+颖壳及籽粒,其中叶片 Zn 积累量以余叶表现较高,旗叶表现较低(图 4,表 3)。与对照(Zn0)相比,外源 Zn 处理,促进了各部位 Zn 积累。对于周麦 18 而言,旗叶、穗轴+颖壳、根中 Zn 积累量表现为 $Zn_8 > Zn_2 > Zn_4 > Zn_0$,倒二叶表现为 $Zn_4 > Zn_2 > Zn_8 > Zn_0$,倒三叶、余

叶、穗下节+倒二茎鞘、余茎鞘表现为 $Zn_4 > Zn_8 > Zn_2 > Zn_0$,籽粒 Zn 积累量表现为 $Zn_8 > Zn_4 > Zn_2 > Zn_0$ 。对于矮抗 58 而言,旗叶、倒二叶、Zn 积累量表现为 $Zn_8 > Zn_2 > Zn_0 > Zn_4$,倒三叶表现为 $Zn_2 > Zn_8 > Zn_4 > Zn_0$,余叶表现为 $Zn_4 > Zn_8 > Zn_2 > Zn_0$,穗下节+倒二茎鞘表现为 $Zn_8 > Zn_2 > Zn_4 > Zn_0$,余茎鞘、穗轴+颖壳、籽粒及根则表现为 $Zn_8 > Zn_4 > Zn_2 > Zn_0$ 。

成熟期,各部位 Zn 积累量以籽粒最高,其次是根(图 4,表 3)。对于周麦 18,旗叶、倒二叶、倒三叶 Zn 积累量表现为 $Zn_4 > Zn_8 > Zn_2 > Zn_0$,余叶 Zn 积累量表现为 $Zn_4 > Zn_8 > Zn_0 > Zn_2$,穗下节+倒二茎鞘、穗轴+颖壳、籽粒及根中 Zn 积累量表现为 $Zn_8 > Zn_4 > Zn_2 > Zn_0$,余茎鞘为 $Zn_4 > Zn_2 > Zn_8 > Zn_0$ 。对于矮抗 58,旗叶、穗下节+倒二茎鞘、籽粒及根 Zn 积累量表现为 $Zn_8 > Zn_4 > Zn_2 > Zn_0$,倒二叶、倒三叶表现为 $Zn_4 > Zn_8 > Zn_2 > Zn_0$,余叶表现为 $Zn_4 > Zn_8 > Zn_0 > Zn_2$,余茎鞘、穗轴+颖壳表现为 $Zn_8 > Zn_2 > Zn_4 > Zn_0$ 。其中,两品种籽粒及根 Zn 积累量均随外源 Zn 施加浓度的增加而升高。

灌浆初期,籽粒 Zn 积累量占全株的 2.81% ~ 7.38%,成熟期,其分配比例为 40.87% ~ 53.68%。灌浆初期,周麦 18 籽粒 Zn 分配比例表现为 $Zn_8 > Zn_4 > Zn_2 > Zn_0$,矮抗 58 表现为 $Zn_2 > Zn_4 > Zn_8 > Zn_0$;成熟期,周麦 18 和矮抗 58 籽粒 Zn 分配比例表现为 $Zn_2 > Zn_0 > Zn_4 > Zn_8$ 。

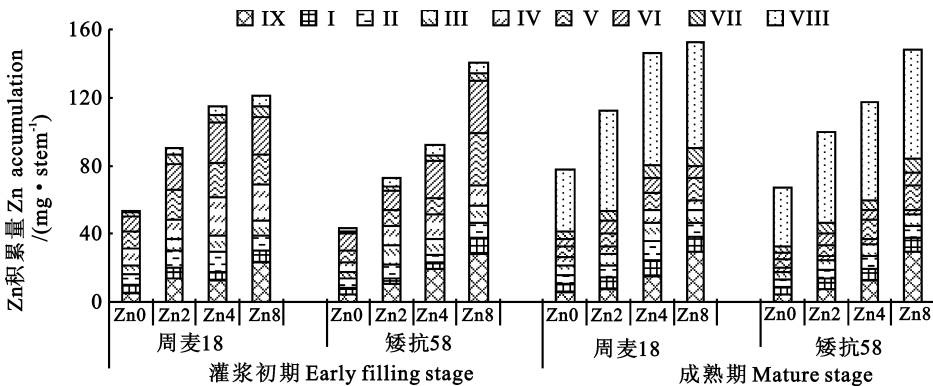


图 4 外源 Zn 处理对灌浆初期和成熟期小麦各部位 Zn 积累量的影响

Fig. 4 Effects of exogenous Zn on Zn accumulation in different parts at early grain-filling and mature stages

表 3 外源 Zn 处理对灌浆初期和成熟期小麦各部位 Zn 分配比例的影响

Table 3 Effects of exogenous Zn on Zn distribution ratio in different parts at early grain-filling and mature stages %

时期 Stage	品种 Variety	处理 Treatments	部位 Parts								
			IX	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
灌浆初期	周麦 18	Zn0	8.55aA	11.92aA	9.05aA	18.98aA	18.32aA	15.87bB	4.36bA	2.81cB	10.14cC
		Zn2	6.46bAB	11.08bA	7.48bB	12.75cC	18.91aA	16.67bAB	6.55aA	4.25bA	15.84bB
		Zn4	4.58cB	9.84cB	8.23abAB	19.61aA	17.45abA	20.85aA	3.97bA	4.27bA	11.20cC
		Zn8	5.58bcB	7.61dC	7.49bB	17.41bB	14.67bA	17.92bAB	5.05abA	5.23aA	19.03aA
	矮抗 58	Zn0	8.49aA	11.44aA	9.36bB	12.62cB	16.84bB	22.64aA	3.01aA	4.51bB	11.08cC
		Zn2	5.22cC	10.47aA	15.59aA	15.26bA	13.00cC	15.44bB	3.46aA	7.38aA	14.18bB
		Zn4	3.87dD	5.09cB	9.61bB	16.41aA	10.20dD	23.14aA	3.66aA	6.75aA	21.27aA
		Zn8	6.70bB	6.61bB	6.66cC	8.49dC	21.78aA	21.97aA	2.96aA	4.80bB	20.03aA
成熟期	周麦 18	Zn0	6.10bAB	6.72abAB	7.28aA	6.10aA	8.10abAB	5.77bB	5.58bB	46.64bB	7.71cC
		Zn2	6.27abA	6.07bAB	5.95bAB	4.05cB	6.66cB	6.98aA	5.06bB	51.99aA	6.97cC
		Zn4	6.32aA	7.72aA	6.91abA	5.45bA	7.06bB	5.89bB	5.05bB	45.00cB	10.59bB
		Zn8	5.84cB	5.36cB	4.94cB	3.38dB	9.04aA	4.35cC	6.80aA	40.87dC	19.42aA
	矮抗 58	Zn0	5.98bAB	6.57aA	6.53aA	3.95aA	7.60bB	5.11bAB	5.72abA	51.52aAB	7.02cC
		Zn2	6.57aA	5.22bB	5.59bB	2.04cC	6.38cC	6.87aA	6.28aA	53.68aA	7.35cC
		Zn4	6.06bAB	6.32aA	5.88bB	2.83bB	9.24aA	5.16bAB	5.04bA	48.70bB	10.76bB
		Zn8	5.61bB	4.74bB	4.53cC	1.92cC	9.67aA	4.90bB	5.79abA	42.97cC	19.88aA

同列数据后大小写字母不同表示同一品种内不同处理间差异显著。

The different capital and small letters after the values in a same column mean difference significant among treatments at the 0.01 and 0.05 levels, respectively.

3 讨论

Zn 是植物正常生长发育所必需的微量元素之一,与小麦籽粒品质和人类饮食健康密切相关。有研究表明,增施 Zn 肥可提高小麦植株中的 Zn 含量,促进 Zn 在植株中的积累,为生育后期 Zn 向籽粒中转运创造条件^[13,17]。小麦籽粒 Zn 含量与土壤有效 Zn 含量呈正相关^[18]。郝明德研究认为,增施 Zn 肥后明显促进小麦植株对 Zn 的吸收,籽粒 Zn 含量增加了 18.8%^[19]。也有研究认为,在缺 Zn 土壤上施入 Zn 肥对籽粒 Zn 含量影响较小^[20]。本研究认为,土壤中添加外源 Zn 处理下,小麦植株灌浆初期及成熟期,各部位 Zn 含量为 4.22~174.98 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,外源 Zn 能显著提高小麦植株各部位的 Zn 含量,同时品种及品种 × 外源 Zn 的互作对各部位 Zn 含量亦有不同程度的影响。灌浆初期和成熟期,植株各部位 Zn 含量均以叶片表现最高,这与杨建堂^[21]的研究结果相似,与我们前期的研究结果^[11]不完全一致。我们前期的研究认为,常规田间种植条件下,小麦植株地上部各部位 Zn 含量均在部位形成初期较

高,随生育期的推进部位 Zn 含量呈下降趋势^[11]。Zn 作为微量元素,对植物的生长具有“双刃剑”的功能,过多的外源 Zn 会抑制植物的生长,对植株产生毒害。本研究是在盆栽条件下施加外源 Zn 进行的,环境条件的差异及品种特性可能是造成研究结果差异的原因。

韩金玲等^[22]研究表明,旱地施用锌肥使小麦干物质积累量显著增多,但施锌肥过量,干物质积累量减少。本研究亦表明,外源 Zn 处理下,小麦植株成熟期干物质积累总量增加。Zn2 和 Zn4 处理下,小麦植株干物质积累量均高于对照,而 Zn8 处理则低于对照。由此可见,一定浓度的外源 Zn (如 Zn2、Zn4)有利于植株在灌浆期进行干物质的积累,但过高浓度的外源 Zn(如 Zn8 处理)则抑制了植株干物质的积累。因此,在农业生产中应严格控制 Zn 肥的用量。

在连续施 Zn 处理下,各生育期 Zn 在叶片中的分配比率最高^[23]。杨建堂^[21]研究认为,在冬小麦各生育时期,Zn 在各部位中的分配率以叶片最高,成熟时穗内 Zn 分配率相对较高。本研究表明,随外源 Zn 处理浓度的增加,植株 Zn 积累量

升高。随灌浆期的推进,植株 Zn 积累总量增加。成熟期,周麦 18 植株 Zn 积累量高于矮抗 58。灌浆初期,植株 Zn 的主要积累部位是叶片,成熟期,籽粒和根是 Zn 主要的积累部位,且其积累量随外源 Zn 处理浓度的增加而增加。成熟期,植株 Zn 有 50% 左右分配在籽粒中,Zn₂ 处理下籽粒 Zn 的分配比例较高。综上,土壤中施加适量的外源 Zn,能够促进冬小麦生育后期各部位干物质的积累量,提高籽粒 Zn 的含量和积累量,改善籽粒的微营养品质。小麦各部位 Zn 含量和积累量除与品种自身的特性有关外,还受多种环境条件的影响,其积累分配机制还有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] Cakmak I, Marschner H, Bangerth F. Effects of zinc nutritional status on growth, protein metabolism and levels of indole-3-acetic acid and other phytohormones in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1989, 40: 405-412.
- [2] Welch R M, Graham R D. Breeding for micronutrients in staple food crops from a human nutrition perspective [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 55(396): 353-364.
- [3] Hambidge M. Human zinc deficiency [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2000, 130: 13448-13498.
- [4] Cakmak I, Pfeiffer W H, McClafferty B. Biofortification of durum wheat with zinc and iron [J]. *Cereal Chemistry*, 2010, 87: 10-20.
- [5] 刘正辉, 刘大钧. 小麦铁锌营养品质研究进展 [J]. *麦类作物学报*, 2007, 27(1): 172-175.
- [6] Welch R M, Graham R D. A new paradigm for world agriculture: meeting human needs, productive, sustainable, nutritious [J]. *Field Crops Research*, 1999, 60: 1-10.
- [7] Bouis H E. Micronutrient fortification of plants through plant breeding: can it improve nutrition in man at low cost [J]. *Proceedings of the Nutrition Society*, 2003, 62: 403-411.
- [8] 汪洪, 刘新保, 褚天铎, 等. 锌肥对作物产量、籽粒锌及土壤有效锌含量的后效 [J]. *土壤肥料*, 2003(1): 3-6, 9.
- [9] 杨晴, 李彦生. 旱地施用锌肥对冬小麦旗叶光合及衰老特性的影响 [J]. *麦类作物学报*, 2011, 31(1): 133-138.
- [10] 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.
- [11] 姜丽娜, 张黛静, 蒿宝珍, 等. Zn 在不同品种小麦植株地上部的积累和分配研究 [J]. *华北农学报*, 2010, 25(5): 187-192.
- [12] Rengel Z, Batten G D, Crowley D E. Agronomic approaches for improving the micronutrient density in edible portions of field crops [J]. *Field Crops Research*, 1999, 60: 27-40.
- [13] Welch R M, House W A, Ortiz-Monasterio I, et al. Potential for improving bioavailable zinc in wheat grain (*Triticum species*) through plant breeding [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2005, 53: 2176-2180.
- [14] Erenoglu B, Nikolic M, Romheld V, et al. Uptake and transport of foliar applied zinc (⁶⁵Zn) in bread and durum wheat cultivars differing in zinc efficiency [J]. *Plant Soil*, 2002, 241: 251-257.
- [15] 党红凯, 李瑞厅, 孙亚辉, 等. 高产冬小麦对锌的吸收、积累与分配 [J]. *中国农业科学*, 2010, 43(9): 1791-1799.
- [16] 赵杰文, 孙永海. 现代食品检测技术 [M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2005: 156-158.
- [17] Welch R M, Graham R D. Breeding crops for enhanced micronutrient content [J]. *Plant and Soil*, 2002, 245: 205-214.
- [18] Rengel Z, Graham R D. Importance of seed Zn content for wheat growth on Zn-deficient soil. II. Grain yield [J]. *Plant Soil*, 1995, 173: 267-274.
- [19] 郝明德, 魏孝荣, 党廷辉. 旱地小麦长期施用锌肥的增产作用及土壤效应 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(3): 377-380.
- [20] Cakmak I. Plant nutrition research: priorities to meet human needs for food in sustainable ways [J]. *Plant Soil*, 2002, 247: 3-4.
- [21] 杨建堂, 王文亮, 王岩, 等. 高产冬小麦锌素吸收分配特点的研究 [J]. *土壤通报*, 1997, 28(3): 124-126.
- [22] 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.
- [23] 魏孝荣, 郝明德, 张春霞, 等. 长期施锌条件下土壤-植物系统植物营养元素的分布特征 [J]. *西北植物学报*, 2003, 23(8): 1438-1441.