

齐冰洁, 何竹青, 孙艳楠, 等. 燕麦不同锌效率品种苗期耐低锌胁迫的根系形态差异[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(5): 1119-1124.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2021.05.004

燕麦不同锌效率品种苗期耐低锌胁迫的根系形态差异

齐冰洁¹, 何竹青¹, 孙艳楠¹, 张智勇²

(1. 内蒙古农业大学农学院, 内蒙古 呼和浩特 010019; 2. 内蒙古农牧业科学院, 内蒙古 呼和浩特 010031)

摘要: 为了揭示燕麦耐低锌胁迫的根系形态响应, 以燕麦锌高效品种晋燕 2004 和锌低效品种 8202 为试验材料, 采用营养液培养方法, 设置正常供锌 (1×10^{-6} mol/L) 和低锌胁迫 (1×10^{-8} mol/L) 2 个供锌水平, 处理时间为 0 d、15 d、25 d、35 d, 测定不同锌效率燕麦品种苗期生长状况及根系形态指标。结果表明: 正常供锌和低锌处理 0 d、15 d, 两品种干物质质量、最大根长、根系总长、总根尖数、表面积、体积均无显著差异; 低锌处理 25 d 和 35 d 时, 锌高效品种晋燕 2004 地上部和根系干物质质量显著高于锌低效品种 8202, 锌高效品种晋燕 2004 的最大根长、根系总长、总根尖数、表面积、体积均显著高于锌低效品种 8202。说明锌高效品种受低锌胁迫的影响小于锌低效品种, 且随胁迫时间长短而表现不同差异。

关键词: 燕麦; 低锌胁迫; 锌效率; 根系形态

中图分类号: S512.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2021)05-1119-06

Morphological differences of root in oat cultivars with different zinc-efficiency under low zinc stress

QI Bing-jie¹, HE Zhu-qing¹, SUN Yan-nan¹, ZHANG Zhi-yong²

(1. College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China; 2. Inner Mongolia Academy of Agriculture and Animal Husbandry, Hohhot 010031, China)

Abstract: In order to reveal the response mechanism of oat resistant to low zinc stress, oat cultivars Jinyan 2004 (higher Zn efficiency) and 8202 (lower Zn efficiency) were selected as materials and treated at 0 d, 15 d, 25 d and 35 d under normal zinc supply (1×10^{-6} mol/L) and low zinc stress (1×10^{-8} mol/L), and the seedling growth status and root morphological indices were studied. The results showed that there was no significant difference in the amount of dry matter, maximum root length, root length, total root tip number, surface area and volume of oat between two varieties under normal zinc supply (1×10^{-6} mol/L) and low zinc stress (1×10^{-8} mol/L) at 0 d and 15 d. At 25 d and 35 d of low zinc treatment, the amount of dry matter, maximum root length, root length, total root tip number, surface area and volume of Jinyan 2004 were significantly higher than those of 8202. In short, the effect of low zinc stress on the higher Zn efficiency oat cultivars is less than that on lower Zn efficiency oat cultivars, and which is influenced by stress time.

Key words: oat; low zinc stress; zinc efficiency; root morphology

收稿日期: 2021-02-04

基金项目: 内蒙古自然科学基金项目 (2018MS03051); 国家自然科学基金项目 (31460328); 内蒙古科技计划项目 (2020GG0037)

作者简介: 齐冰洁 (1971-), 女, 内蒙古赤峰人, 博士, 副教授, 主要从事作物遗传育种、种质资源创新与改良研究。(E-mail) qbjzy@126.com

通讯作者: 张智勇, (E-mail) zhiyong70@126.com

锌在植物整个生命过程中起到至关重要的作用^[1], 参与植物蛋白质、叶绿素的合成, 与植物代谢、碳水化合物转化等生理过程密切相关^[2-3]。土壤锌元素缺乏一直以来都是制约中国农业发展的重要问题之一, 且可溶性锌在土壤锌形态中占比很小, 而其又是植物根系吸收锌元素的主要形式, 因此选育

耐低锌品种十分必要^[4]。植物锌高效特性与其改变土壤锌有效性的能力及根系吸收锌的能力有紧密联系^[5]。植物在一定范围内的低锌胁迫可以通过改变自身根系的形态构型,如增加根系长度、吸收面积和根尖数等措施使根系与外界环境的接触面积增大,从而使根系对锌的吸收能力增强,保证植物在低锌胁迫下,依旧能维持相对正常的锌吸收效率,向地上部提供生长发育所需的锌^[6-7]。土壤中锌元素主要以扩散或质流的方式迁移至植物根系表面,若植物根系具有较大的有效吸收表面积,则土壤中养分只需迁移较短的距离即可到达根系表面的养分吸收点^[8],且锌高效品种的根系长度、根尖数量及根系活力等一系列表型值均要高于锌低效品种^[8-11]。

燕麦(*Avena sativa* L.)是一年生草本植物,是中国北方地区特色粮饲药兼用型作物,具有很高的营养价值,其在内蒙古的种植面积为全国之首^[12-14]。在燕麦的生态适应性、品种选育、抗逆性和保健功效等方面的研究较全面^[15],但有关燕麦对锌元素缺乏的适应性反应研究及燕麦耐低锌胁迫的根系形态特性研究较少,仅有孙艳楠等^[16]对 4 个燕麦品种在 6 个不同供锌水平下生长差异及锌积累特性的研究。本研究以燕麦不同锌效率品种为试验材料,采用营养液培养法,研究正常供锌和低锌胁迫对不同锌效率品种苗期根系形态的影响,明确燕麦适应低锌胁迫的根系形态响应,为燕麦锌高效品种选育提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

在课题组前期进行的燕麦锌效率评价基础上,选用燕麦锌高效品种晋燕 2004 和锌低效品种 8202 为试验材料。

1.2 方法

1.2.1 试验方法 试验材料培养按孙艳楠等^[16]的方法进行,选取饱满均匀的种子,用 9%次氯酸钠溶液浸泡消毒 15 min,蒸馏水冲洗 4 次,摆放在发芽盒内置于人工气候箱培养,光照 12 h、25 ℃ 和黑暗 12 h、20 ℃,定时补充无菌水。燕麦幼苗长至两叶一心时选择长势一致的幼苗移栽至营养液水培槽培养,氧气泵连续通气,5 d 换一次营养液。无锌营养液配方: 5.0×10^{-3} mol/L KNO_3 , 5.0×10^{-3} mol/L $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 2.0×10^{-3} mol/L $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 1.0×10^{-3} mol/L KH_2PO_4 , 4.5×10^{-5} mol/L H_3BO_3 ,

1.0×10^{-5} mol/L $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 3.0×10^{-4} mol/L $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 4.0×10^{-4} mol/L $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 2.0×10^{-5} mol/L FeEDTA 。锌以 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 的形式供给,设置正常供锌(1×10^{-6} mol/L)和低锌胁迫(1×10^{-8} mol/L)2 个处理,3 次重复,pH 值 6.2。移栽后第 0 d、15 d、25 d 和 35 d 取燕麦幼苗进行根系形态扫描和干物质量测定。

1.2.2 测量项目与方法 根系形态:根系用中晶 i800 plus 扫描仪扫描成像,用万深 LA-S 根系分析系统对其根系总长、最大根长、根系体积、根系表面积、根系总根尖数和平均直径进行测定。植株地上部和根系的干物质量:采用孙艳楠等^[16]的方法,植株用蒸馏水冲洗干净,将植株分成地上部和根系 2 部分,置于烘箱 105 ℃ 下杀青 30 min,70 ℃ 烘干至恒质量,称质量,测量其干物质量。

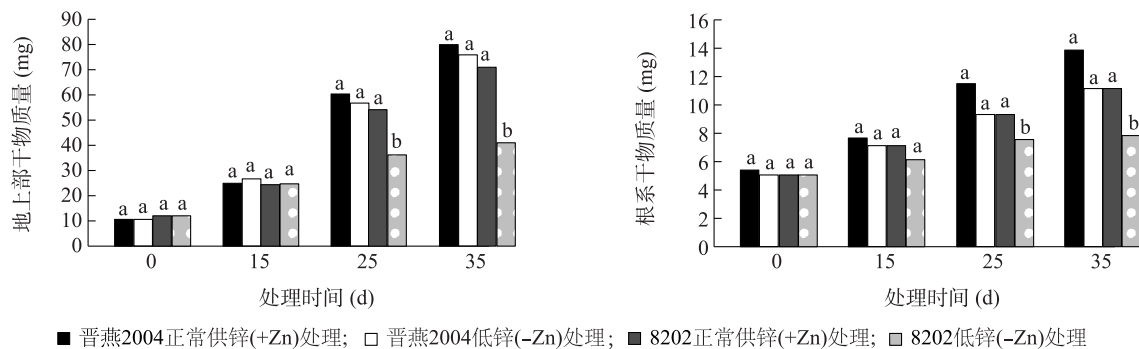
1.3 数据处理

采用 WPS 和 SPSS 17.0 软件进行数据处理及图表绘制。

2 结果与分析

2.1 不同供锌水平处理燕麦幼苗干物质量的差异

锌元素直接参与植物的生长代谢作用,低锌胁迫会导致植物营养生长受阻。由图 1 可知,在不同锌处理下,2 个品种燕麦幼苗地上部和根系干物质量均随着移栽天数的增加而增加。正常供锌(+Zn)处理 0 d、15 d、25 d、35 d 2 个不同锌效率品种地上部和根系干物质量无显著差异;低锌(-Zn)处理 0 d、15 d 2 个品种地上部和根系干物质量均无显著差异,表明短时间的低锌胁迫对 2 个品种干物质量无显著影响。但低锌处理 25 d 和 35 d,锌高效品种晋燕 2004 的地上部和根系干物质量显著高于锌低效品种 8202。低锌处理 25 d,晋燕 2004 的地上部干物质量较正常锌处理降低了 5.97%,根系干物质量增加 2.90%,低锌处理 8202 地上部和根系干物质量分别较正常锌处理降低 33.15% 和 18.93%。低锌处理 35 d,耐低锌品种晋燕 2004 地上部干物质量较正常锌处理降低了 4.97%,根系干物质量则增加了 1.20%,而 8202 地上部干物质量较正常锌处理降低了 42.18%,根系则降低了 29.85%。表明缺锌对锌高效燕麦品种植株干物质的形成影响较小,在低锌环境下仍能维持较正常的生长发育,锌高效燕麦品种有更强的适应低锌胁迫能力。



相同处理时间品种间不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

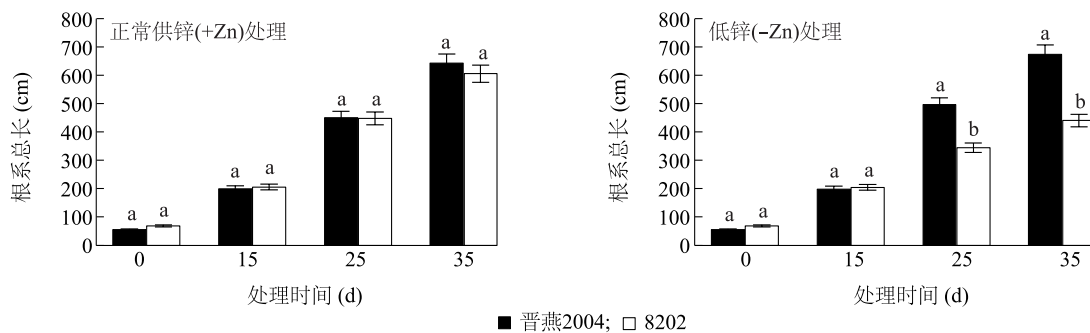
图1 不同供锌处理燕麦地上部和根系干物质质量的差异

Fig.1 Differences in dry matter weight in shoot and root parts of oat under different zinc treatments

2.2 不同锌水平处理燕麦根系形态的差异

根系长度是反映根系生长状况的重要指标。由图2可知,正常供锌(+Zn)处理0 d、15 d、25 d、35 d品种间根系总长无显著差异。低锌(-Zn)处理0 d和15 d的两品种间根系总长无显著差异,表明较短时间的低锌胁迫对两个品种的幼苗根系总长无显著影响,但低锌胁迫25 d、35 d锌高效品种晋燕2004

根系总长显著高于锌低效品种8202。低锌处理与正常供锌相比,低锌处理25 d、35 d锌高效品种晋燕2004的根系总长较正常供锌分别增长9.15%和4.51%,而锌低效品种8202分别降低23.10%和27.27%。表明低锌胁迫能够促进锌高效品种的根系生长,而对锌低效品种的根系生长则有抑制作用。



相同处理时间品种间不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图2 不同供锌处理燕麦根系总长的差异

Fig.2 Differences in total root length of oat under different zinc treatments

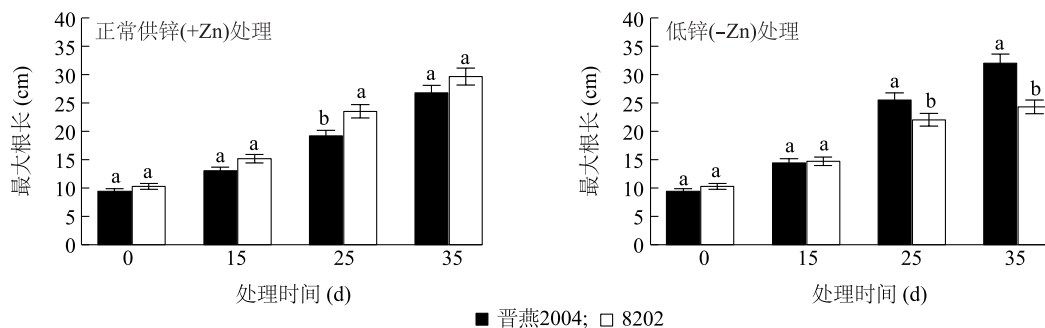
由图3可知,正常供锌(+Zn)处理0 d、15 d、35 d品种间根系最大根长无显著差异,正常供锌(+Zn)处理25 d锌高效品种晋燕2004的最大根长显著低于锌低效品种8202。低锌(-Zn)处理0 d和15 d最大根长在品种间无显著差异,表明较短时间的低锌胁迫,不同锌效率燕麦品种的幼苗最大根长无显著差异;低锌处理25 d、35 d,锌高效品种晋燕2004最大根长显著高于锌低效品种8202。与正常供锌相比,低锌处理25 d、35 d的锌高效品种晋燕2004幼苗根系最大根长分别增长24.7%和16.4%,锌低效品种8202分别降低6.37%和18.10%。表明

锌高效燕麦品种在低锌环境下能够通过最大根长的伸长来适应低锌环境,而锌低效燕麦品种在低锌环境下最大根长的伸长受到抑制。

植物根系的表面积越大,其能接触到的外界环境就越大,植物所能吸收的养分范围也就越广。由图4和图5可知,正常供锌(+Zn)处理0 d、15 d、25 d、35 d品种间根系表面积和根系体积无显著差异。低锌(-Zn)处理0 d和15 d两品种间根系表面积、总体积无显著差异,表明较短时间低锌胁迫对燕麦不同锌效率品种的幼苗根系表面积、总体积均无显著影响,低锌处理25 d和35 d时晋燕2004幼苗的根系体积和

表面积均显著高于 8202。与正常供锌相比,低锌处理 25 d、35 d 的锌高效品种晋燕 2004 的根系表面积分别增加 6.14% 和 4.32%,根系体积分别增加 11.89% 和 5.63%;而锌低效品种 8202 的根系表面积则分别降低

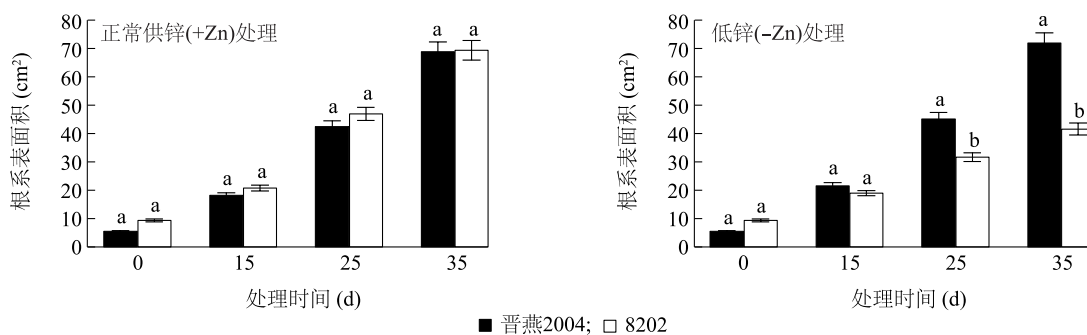
了 32.53% 和 40.04%,根系体积分别降低 37.11% 和 43.35%。表明锌高效燕麦品种在低锌胁迫下可以通过根系表面积、根系体积的增大,吸收更多外界环境中的锌元素以适应低锌环境。



相同处理时间品种间不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 3 不同供锌处理燕麦最大根长的差异

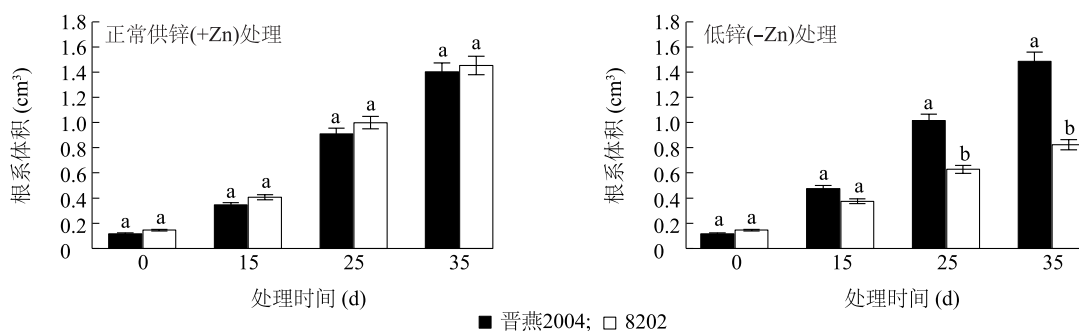
Fig.3 Differences in maximum root length of oat under different zinc treatments



相同处理时间品种间不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 4 不同处理燕麦根系表面积的差异

Fig.4 Differences in root surface area of oat under different zinc treatments



相同处理时间品种间不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 5 不同供锌处理燕麦根系体积的差异

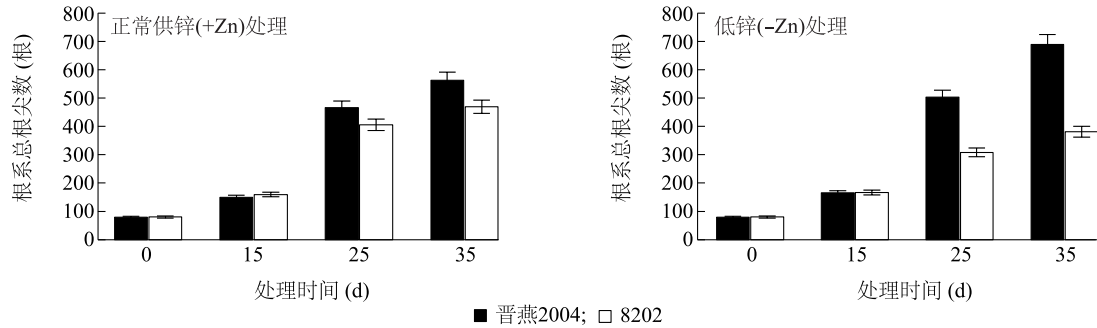
Fig.5 Differences in root volume of oat under different zinc treatments

由图 6 可知,随着移栽后天数的增加,不同锌处理下 2 个锌效率燕麦品种的幼苗根系总根尖数均逐渐增加,正常供锌 (+Zn) 处理 0 d、15 d、25 d、35 d 2 个品种的根系总根尖数无显著差异,低锌 (-Zn) 处理 0 d、15 d 的根系总根尖数品种间无显著差异,表

明较短时间的低锌胁迫对燕麦不同锌效率品种的根系总根尖数无显著影响;低锌处理 25 d 和 35 d 时晋燕 2004 幼苗根系总根尖数显著高于 8202。与正常供锌相比,低锌处理 25 d、35 d 时锌高效品种晋燕 2004 根系总根尖数分别增长 7.35% 和 18.36%, 锌

低效品种 8202 分别降低 24.14% 和 18.74%, 表明低锌胁迫下燕麦锌高效品种能够通过幼苗根系总根尖

数的增加, 以适应低锌环境, 而燕麦锌低效品种幼苗根系总根尖数受到抑制。



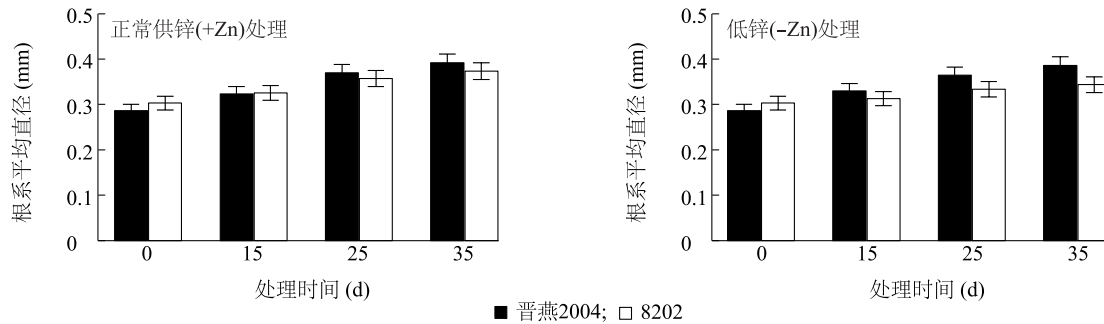
相同处理时间品种间不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 6 不同供锌处理燕麦根系总根尖数的差异

Fig.6 Differences in total root tip number of oat under different zinc treatments

由图 7 可知, 低锌胁迫 15 d 锌高效品种晋燕 2004 的根系平均直径较正常供锌处理增加 1.94%, 锌低效品种 8202 降低 3.90%; 胁迫 25 d, 锌高效品种晋燕 2004 和锌低效品种 8202 根系平均直径较正常供锌处理分别降低 1.62% 和 6.44%; 胁迫 35 d, 低锌处理与正常供锌处理相比, 晋燕 2004 与 8202 根

系平均直径分别降低 1.53% 和 8.04%。但正常供锌和低锌处理下, 燕麦幼苗根系平均直径在品种间均无显著差异, 表明低锌胁迫对燕麦不同锌效率燕麦品种的根系平均直径无显著影响, 原因可能是根系平均直径大小受低锌胁迫影响较小。



相同处理时间品种间不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 7 不同供锌处理燕麦根系平均直径的差异

Fig.7 Differences in root mean diameter of oat under different zinc treatments

3 讨论

锌缺乏对植物的生长发育有不利影响, 因此正常锌和低锌条件下植物的生理性状会产生较大差异, 从而引起吸收和利用锌的能力不同^[17-18]。本研究发现短时间的低锌胁迫对燕麦生物量无显著影响, 但随着胁迫时间的增加, 锌高效品种地上部和根系的干物质量显著高于锌低效品种, 说明锌低效品种在低锌胁迫下生长发育受到较大抑制, 从而影响干物质量积累。燕麦锌高效品种在低锌胁迫条件下受影响较小, 仍表现较强的生长能力。郭俊云^[19]、

胡学玉等^[20]对不同锌效率基因型油菜、白菜的研究中发现耐低锌品种在低锌水平下植株干物质量及锌元素含量均明显高于锌低效品种。

根系形态在植物对营养元素的吸收上起着至关重要的作用, 根系形态构型决定根系在土壤中吸收养分的范围及吸收速率, 对植物是否能高效吸收利用土壤中的养分有重要意义^[20-21]。根系形态构型在不同物种间及相同物种不同基因型间都存在较大差异, 因此对锌的吸收利用也存在较大差异^[7]。植物锌高效品种通常表现根系长及密度大, 吸收能力强等特点, 在低锌胁迫下能吸收更多的锌^[7, 22-26]。

本研究结果表明,低锌胁迫 25 d 以上,锌高效品种的最大根长、根系总长、总根尖数、根系表面积和体积均显著高于锌低效品种,锌高效品种在低锌胁迫下通过适应性反应来增加其对锌元素的吸收。徐群等^[9]也发现,不同基因型水稻抗低锌能力与其根系形态构型变化有关,在低锌胁迫下,锌高效品种的根长显著增长,锌高效品种通过增大根长和扩大根系表面积吸收更多营养元素。胡学玉^[27]研究认为在低锌胁迫下,白菜锌高效品种的根系长度、根尖数和根冠比均显著高于锌低效品种,品种间根系形态的不同就体现了吸收积累锌元素能力的差异。王金花^[28]在苹果砧木根系对低锌胁迫的生理响应研究中发现,胁迫初期,根系可以通过增大根系长度、根系密度、根系表面积等方法使根系具有更强的锌吸收能力。低锌胁迫下锌高效品种较锌低效品种具有更强大的调控补偿机制,在低锌环境下以此来维持植株相对正常的生长发育。

参考文献:

- [1] 陆景陵. 植物营养学[M]. 2 版. 北京:中国农业出版社, 2003.
- [2] 徐晓燕,杨肖娥,杨玉爱. 锌在植物中的形态及生理作用机理研究进展[J]. 广东微量元素科学, 1999, 6(11): 1-6.
- [3] ÇAKMAK S, GÜLÜT K Y, MARSCHNER H, et al. Effect of zinc and iron deficiency on phytohormone release in wheat genotypes differing in zinc efficiency[J]. Journal of Plant Nutrition, 1994, 17(1): 1-17.
- [4] 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.
- [5] DONG B, RENGEL Z, GRAHAM R D G. Effects of herbicide chlorsulfuron on growth and nutrient uptake parameters of wheat genotypes differing in Zn-efficiency[J]. Plant and Soil, 1995, 173(2): 275-282.
- [6] 王金花,刘 飞,付春霞,等. 缺锌胁迫对苹果砧木幼苗形态及其锌积累的影响[J]. 园艺学报, 2012, 39(4): 613-620.
- [7] CHEN W R, HE Z L, YANG X E, et al. Zinc efficiency is correlated with root morphology, ultrastructure, and antioxidative enzymes in rice[J]. Journal of Plant Nutrition, 2009, 32(2): 287-305.
- [8] GRAHAM R D, RENGEL Z. Genotypic variation in zinc uptake and utilization by plant in zinc in soil and plants[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993.
- [9] 徐 群,王人民,张永鑫. 锌离子活度对籽粒富锌基因型水稻农艺特性的影响[J]. 浙江农业学报, 2006, 18(6): 425-428.
- [10] YANG X, RÖMHELD V, MARSCHNER H. Effect of bicarbonate on root growth and accumulation of organic acids in Zn-inefficient and Zn-efficient rice cultivars (*Oryza sativa* L.) [J]. Plant and Soil, 1994, 164(1): 1-7.
- [11] YANG X, RÖMHELD V, MARSCHNER H. Effect of bicarbonate and root zone temperature on uptake of Zn, Fe, Mn and Cu by different rice cultivars (*Oryza sativa* L.) grown in calcareous soil[J]. Plant and Soil, 1993, 155/156(1): 441-444.
- [12] 刘克礼. 作物栽培学[M]. 北京:中国农业出版社, 2008.
- [13] 苏日娜. 中国燕麦产业发展研究——以内蒙古为例[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2013.
- [14] 穆志新,刘龙龙,张丽君,等. 燕麦资源生物学性状多样性分析[J]. 山西农业科学, 2016, 56(12): 1751-1754.
- [15] 龚 海,李成雄,王雁丽. 燕麦品种资源品质分析[J]. 山西农业科学, 1999, 27(2): 16-19.
- [16] 孙艳楠,齐冰洁,贺 鑫,等. 供锌水平对不同燕麦品种生长及锌积累的影响[J]. 北方农业学报, 2019, 47(4): 15-21.
- [17] 赵同科,曹云者,马丽敏,等. 不同玉米基因型缺锌胁迫适应性研究[J]. 华北农学报, 2000, 15(S1): 64-68.
- [18] 王景安,张福锁. 供锌水平对玉米幼苗生长发育及锌含量的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2000, 22(1): 69-72.
- [19] 郭俊云. 低锌胁迫下油菜锌吸收的基因型差异及机理[D]. 重庆:西南大学, 2008.
- [20] 胡学玉,李学垣,谢振翅. 青菜品种锌效率特性研究[J]. 中国农业科学, 2001, 34(2): 227-231.
- [21] RICHARD O, PINEAU C, LOUBET S, et al. Diversity analysis of the response to Zn within the *Arabidopsis thaliana* species revealed a low contribution of Zn translocation to Zn tolerance and a new role for Zn in lateral root development[J]. Plant Cell and Environment, 2011, 34(7): 1065-1078.
- [22] MARTINEZ C E, MOTTO H L. Solubility of lead, zinc and copper added to mineral soils[J]. Environmental Pollution, 2000, 107(1): 153-158.
- [23] 汪 洪,金继运,山内章. 以盒维数法分析水稻根系形态特征及初探其与锌吸收积累的关系[J]. 作物学报, 2008, 34(9): 1637-1643.
- [24] 周 斌,张金尧,乙 引,等. 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.
- [25] RENGEL Z, GRAHAM R D. Wheat genotypes differ in Zn efficiency when grown in chelate-buffered nutrient solution[J]. Plant and Soil, 1995, 176(2): 317-324.
- [26] GRAHAM R D, ASCHER J S, HYNES S C. Selecting Zn-efficient cereal genotypes for soils of low zinc status[J]. Plant and Soil, 1992, 146(1): 241-250.
- [27] 胡学玉. 不同青菜品种吸收利用土壤锌能力的差异与机制[D]. 武汉:华中农业大学, 2001.
- [28] 王金花. 缺锌胁迫下苹果砧木幼苗的形态与生理响应及 IAA 对其根系生长的调控[D]. 泰安:山东农业大学, 2012.

(责任编辑:张震林)