

供锌水平对寒地春玉米幼苗抗氧化酶活性等生理特性的影响

杨克军^{1,2,*}, 蔡鑫鑫², 张树远², 张崎峰², 王玉凤², 王庆祥¹

¹沈阳农业大学农学院, 沈阳 110161; ²黑龙江八一农垦大学农学院, 黑龙江大庆 163319

摘要: 本试验选用不同耐锌玉米品种, 采用营养液水培, 研究不同锌浓度对玉米株高、地上部干重、根干重及SOD、POD、TTC、硝酸还原酶活性、细胞膜透性的影响。结果表明: 耐锌品种‘牡单九’的适宜锌浓度为 $0.1 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 锌敏感品种‘四单十九’的适宜锌浓度为 $1 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。不同锌浓度对玉米生长的影响主要表现在地上部, 而对地下部生长影响较小。随着锌浓度的升高, SOD和POD的活性增大。当锌浓度为 $0.1 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时根系活力最高, 在锌浓度大于 $1 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 根系活力下降较明显。硝酸还原酶活性在锌浓度大于 $0.01 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 随着锌浓度升高而降低。在锌浓度为 $1 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 细胞膜透性最小, 低锌和高锌胁迫下细胞膜透性都有不同程度的增加。

关键词: 玉米幼苗; 锌水平; 保护酶活性; 硝酸还原酶

Effects of Zn on the Antioxidant Enzymes Activities and Physiological Characteristics in Spring Maize

YANG Ke-Jun^{1,2,*}, CAI Xin-Xin², ZHANG Shu-Yuan², ZHANG Qi-Feng², WANG Yu-Feng², WANG Qing-Xiang¹

¹College of Agronomy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China; ²College of Agronomy, Heilongjiang August First Land Reclamation University, Daqing, Heilongjiang 163319, China

Abstract: In order to investigate the effects of different zinc concentrations on physiological characteristics in maize, different Zn-tolerant maize cultivars were used as materials. Plant height, dry weights of root and shoot, root activity, cell membrane permeability, and activities of SOD, POD, TTC and NR were measured. The results showed that the optimal concentration of Zn in maize cultivar ‘Mudan 9’ and ‘Sidan 19’ were $0.1 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ and $1 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. Different Zn concentrations had more effects on aerial part than underground part. The activities of SOD and POD increased with the increasing of Zn concentration. The Zn concentration of the highest root activity was $0.1 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, and root activity decreased obviously when Zn concentration was more than $1 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$. When Zn concentration was more than $0.01 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, NR activity decreased with the increasing of Zn concentration. When Zn concentration was $1 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, cell membrane permeability was lowest. Cell membrane permeability increased under low or high Zn stress.

Key words: maize seedlings; Zn supply level; protective enzymes activities; NR

锌是植物必需的微量元素, 同时又是污染环境的重金属元素之一。在石灰性土壤中由于粘粒和碳酸钙对锌的吸附, 有效锌低而导致植物普遍缺锌(马斯纳 1991), 需施用锌肥。但长期或高剂量施用锌肥, 会引起土壤锌污染, 影响土壤中微生物的活动和作物的生长发育(杨志敏 1994), 产生植物锌中毒。锌在植物体内的代谢中起着重要作用(崔激 1994)。玉米是对缺锌最为敏感的作物之一, 玉米缺锌的情况在我国南北都有报道, 大多为石灰性土壤, 如东北、西北、山东等地(孙羲 1990)。缺锌时玉米的生长发育受到阻碍, 导致产量下降, 品质降低(刘国荣等 1996)。缺锌造成的玉米白花叶病, 是限制寒地春玉米产量提高的重要因素之一。玉

米白花叶病在寒地春玉米上不同年份均有发生, 一般减产 15% 左右, 严重的地块减产 30% 以上。1983 年黑龙江省中部、西部玉米白花叶病发生面积达 20 多万 hm^2 , 以后每年均在 10 多万 hm^2 , 对玉米的产量构成了严重威胁(徐伟钧 1991)。玉米不同基因型品种对缺锌反应差异很大(任军等 1995)。本试验以寒地春玉米为研究对象, 采用水培方法研究了不同 Zn 水平对不同锌敏感型玉米的生长、硝酸还原酶活性及叶片抗氧化系统的影响, 探讨了不同

收稿 2009-01-21 修定 2009-03-09

资助 国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAD02A11)和黑龙江省“十一五”科技攻关项目(GA07B101)。

* E-mail: byndykj@163.com; Tel: 0459-6819179

基因型玉米的耐锌机理,同时为寒地春玉米锌肥合理施用提供理论依据。

材料与方法

供试品种是试验前期通过水培试验从寒地大面积推广的玉米(*Zea mays* L.) 18个杂交种中筛选出耐低锌品种‘牡单九’和锌敏感型品种‘四单十九’。

试验采用水培方式进行,营养液为1/2Hoagland营养液,锌以EDTA-Zn的形式供给,设有6个锌浓度,分别为0、0.01、0.1、1、10、100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,以0 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的锌浓度为对照,每个处理3次重复。种子经10% NaClO消毒液浸泡5 min,迅速用流动的自来水冲洗数次,浸泡10 min再用去离子水冲洗5~6次,经30 $^{\circ}\text{C}$ 左右温水浸种12 h,催芽5 d(将种子等距排开,胚朝上,置于下面铺有双层滤纸,上面盖有双层纱布和一层滤纸的发芽盒内催芽),催芽温度25 $^{\circ}\text{C}$,其间及时补充水分。待芽长至5 cm左右时,选择饱满均一的种子去胚乳后,用去离子水冲洗干净,选取高度一致的幼苗分别进行不同浓度锌处理,每5 d换一次营养液,温室培养。用0.1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的NaOH和0.1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ HCl将pH调至6.8,电动泵连续供氧,培养28 d后进行测定。

收获后的植株分地上和地下部分,分别测量地上和地下部分的长度和鲜重,在105 $^{\circ}\text{C}$ 杀青30 min后于80 $^{\circ}\text{C}$ 烘至恒重,称干重。超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)的测定采用张宪政(1992)的方法,根系活力采用TTC法、硝酸还原酶(NR)活性用 α -萘胺法(李合生2000),细胞膜透性的测定采用电导率测定法(邹琦2000)。

实验结果

1 不同锌浓度对玉米株高的影响

如表1所示,不同锌浓度对不同基因型玉米株高的影响不同,耐低锌品种‘牡单九’在锌浓度为0~0.1 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时株高随着锌浓度的升高而逐渐增加,0.01和0.1 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 锌浓度下‘牡单九’的株高分别为对照的1.29和1.52倍,方差分析表明差异达显著水平。继续增加锌浓度,株高反而降低,在1、10和100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 锌浓度下,‘牡单九’的株高分别为0 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 锌浓度下株高的1.32、1.20和0.98倍。对于锌敏感品种‘四单十九’在锌浓度为1 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时植株长势最好,株高为对照的1.05倍,低锌(0.01 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 锌浓度)和高锌(10和100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)处理下株高均有所降低,低锌处理株高较对照低12.4 cm,仅为对照的72.3%。

表1 供锌水平对玉米株高的影响

Table 1 Effect of zinc supply level on plant height in maize

供锌水平/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	株高/cm	
	‘牡单九’	‘四单十九’
0	34.5 \pm 7.10 (100%) ^c	44.6 \pm 1.21 (100%) ^{ab}
0.01	44.4 \pm 4.01 (128.7%) ^b	32.2 \pm 2.89 (72.3%) ^d
0.1	52.3 \pm 1.51 (151.6%) ^a	41.4 \pm 2.97 (92.8%) ^{abc}
1	45.4 \pm 3.62 (131.6%) ^b	46.8 \pm 3.85 (104.9%) ^a
10	41.3 \pm 7.51 (119.8%) ^b	37.4 \pm 1.72 (83.9%) ^{cd}
100	33.9 \pm 0.70 (98.3%) ^c	39 \pm 2.60 (87.4%) ^{bcd}

同列数字旁不同小写字母表示处理之间在0.05水平上差异显著。下同。

2 不同锌浓度对玉米地上部干重的影响

不同锌浓度对耐低锌品种‘牡单九’和锌敏感型品种‘四单十九’的地上部干重影响较大。耐低锌品种‘牡单九’在锌浓度0~0.1 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时地上部干重随锌浓度增加而增加。0.01和0.1 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理干重分别为对照的1.70、2.07倍。当锌浓度大

于1 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时地上部干重随锌浓度增加而降低。1、10和100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理干重分别为对照的1.51、1.43和1.07倍。对锌敏感品种‘四单十九’在锌浓度0.01~1 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,随着锌浓度的增加干重增加,低锌处理(0.01 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)的地上部干重为对照的0.55倍。锌浓度在10和100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时的地

表2 供锌水平对玉米地上部干重的影响
Table 2 Effect of zinc supply level on the shoot dry weight in maize

供锌水平 / $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	地上部干重 / $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$	
	‘牡单九’	‘四单十九’
0	0.085 \pm 0.02 (100%) ^c	0.165 \pm 0.02 (100%) ^{ab}
0.01	0.145 \pm 0.03 (170.6%) ^{ab}	0.090 \pm 0.01 (54.5%) ^c
0.1	0.176 \pm 0.01 (207.2%) ^a	0.129 \pm 0.03 (78.2%) ^{bc}
1	0.129 \pm 0.02 (151.8%) ^{abc}	0.184 \pm 0.06 (111.5%) ^a
10	0.122 \pm 0.03 (143.5%) ^{bc}	0.120 \pm 0.03 (72.7%) ^c
100	0.091 \pm 0.01 (107.1%) ^c	0.098 \pm 0.01 (59.4%) ^c

上部干重逐渐下降。总之在这2个高锌浓度的胁迫下耐低锌品种‘牡单九’及锌敏感品种‘四单十九’的地上部干重均呈下降趋势,这说明在高锌胁迫下植株长势较弱,无论是锌敏感品种还是耐低锌品种都有伤害。

3 不同锌浓度对玉米根干重的影响

表3表明不同锌浓度对不同基因型玉米根系干重的影响较小,这与房蓓等(2003)的研究结果相一致。耐低锌品种‘牡单九’最适宜生长的锌浓度为 $0.1\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,锌敏感品种‘四单十九’适宜生长

表3 供锌水平对玉米根干重的影响
Table 3 Effect of zinc supply level on the root dry weight in maize

供锌水平 / $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	根干重 / $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$	
	‘牡单九’	‘四单十九’
0	0.047 \pm 0.016 (100%) ^{ab}	0.069 \pm 0.005 (100%) ^{ab}
0.01	0.061 \pm 0.027 (129.8%) ^{ab}	0.055 \pm 0.009 (79.7%) ^{ab}
0.1	0.073 \pm 0.024 (155.3%) ^a	0.062 \pm 0.006 (89.9%) ^{ab}
1	0.061 \pm 0.005 (129.8%) ^{ab}	0.084 \pm 0.032 (121.7%) ^a
10	0.049 \pm 0.006 (104.3%) ^{ab}	0.065 \pm 0.020 (94.2%) ^{ab}
100	0.038 \pm 0.005 (80.9%) ^b	0.048 \pm 0.010 (69.6%) ^b

的锌浓度为 $1\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,低锌和高锌均使根干重变小,但变化幅度较茎叶小,不同锌浓度下主要影响地上部生长,而对根影响要小得多。

4 不同锌浓度对玉米超氧化物歧化酶(SOD)的影响

由图1可知,随着营养液中锌浓度增加,不同耐锌性玉米SOD活性均增加,但不同耐锌性玉米SOD活性的变化趋势有所不同,锌敏感品种SOD活性增加幅度大于耐低锌品种。耐低锌品种‘牡单九’在锌浓度为 $0\sim 0.01\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时SOD活性变化不大,分别为 84.68 和 $84.76\ \text{U}\cdot\text{g}^{-1}$ (FW); $0.01\sim 0.1\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 阶段,SOD活性迅速增加,增幅为49.3%;锌浓度在 $0.1\sim 100\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内,SOD活性增长幅度较小。而对锌敏感品种‘四单十九’则是在锌浓度 $0\sim 10\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,随着锌浓度的升高而逐渐增加;在锌浓度为 $10\sim 100\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时出现急剧增长的趋势。

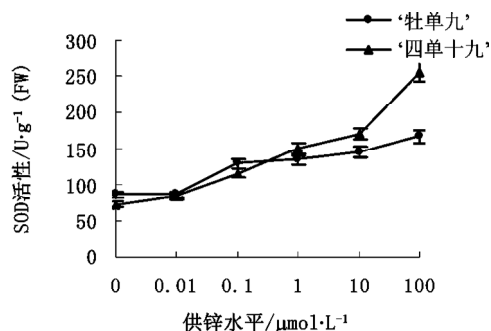


图1 供锌水平对玉米SOD活性的影响

Fig.1 Effect of zinc supply level on SOD activity in maize

势。表明随着锌浓度的增加,SOD活性升高以清除 O_2^- 从而使幼苗免遭伤害。

5 不同锌浓度对玉米过氧化物酶(POD)的影响

如图2所示,耐锌品种及锌敏感品种POD的活

性都是随着锌浓度的增加而增加,但耐低锌品种‘牡单九’增加的幅度较锌敏感品种‘四单十九’要大,二者在锌浓度为 $0\sim 0.01\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时均迅速增长,锌浓度为 $0\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时‘牡单九’和‘四单十九’的POD的活性分别为 $1.65\ \text{OD}_{470}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $2.49\ \text{OD}_{470}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$,当锌浓度达到 $0.01\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时‘牡单九’和‘四单十九’的POD的活性分别为 $9.12\ \text{OD}_{470}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $5.35\ \text{OD}_{470}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$,分别增加了4.53倍和2.15倍。锌浓度在 $0.01\sim 10\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内时POD的活性随锌浓度增加而增加,但在锌浓度由 $10\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 升高到 $100\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时又呈快速增长的态势,‘牡单九’的POD活性由 $15.20\ \text{OD}_{470}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 升高至 $20.68\ \text{OD}_{470}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$,而‘四单十九’的POD活性由 $10.46\ \text{OD}_{470}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 升高至 $15.03\ \text{OD}_{470}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 。虽然锌敏感品种‘四单十九’的POD活性比耐低锌品种‘牡单九’的活性低,在锌浓度由 $0\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 升高到 $10\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,POD活性的增加量也没有‘牡单九’大,但其在高锌阶段的涨幅高于‘牡单九’,究其原因可能是2种基因型玉米对缺锌敏感性不同的重要机制。

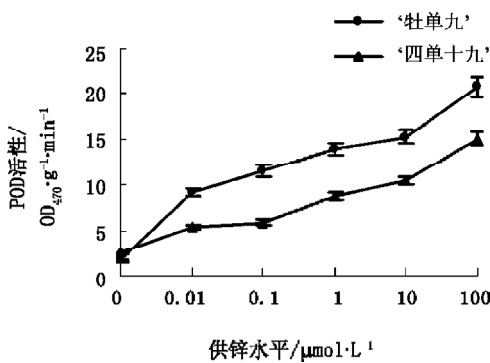


图2 供锌水平对玉米POD活性的影响

Fig.2 Effect of zinc supply level on POD activity in maize

6 不同锌浓度对玉米根系活力(TTC)的影响

根系活力的大小影响根系对营养物质的吸收及有效物质的形成,是一种较客观地反应根系生命活动的生理指标。由图3可知,无论是锌敏感品种‘四单十九’还是耐低锌品种‘牡单九’,当锌浓度为 $0.1\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时根系活力最高,当锌浓度大于 $1\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,根系活力明显下降,表明在锌浓度为 $0.1\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时根系的吸收能力最强。

7 不同锌浓度对玉米硝酸还原酶的影响

硝酸还原酶活性高低与植物的抗性有关。硝

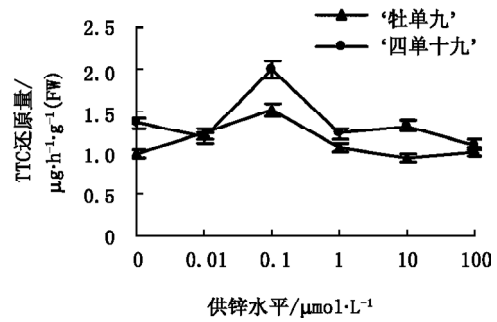


图3 供锌水平对玉米根系活力的影响

Fig.3 Effect of zinc supply level on root activity in maize

酸还原酶是植物体内硝酸盐同化过程中的限速酶,在氮代谢中起重要作用。由于硝酸还原酶的激活需要 NO_3^- 诱导,因而硝酸还原酶活性与植物硝态氮含量有一定的联系。由图4可以看出,硝酸还原酶的活性在锌浓度为 $0\sim 0.01\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时逐渐升高,而在锌浓度超过 $0.01\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时随着锌浓度的升高而下降,表明随 Zn^{2+} 浓度的增大,玉米叶片对 NO_3^- -N的还原能力均减弱。

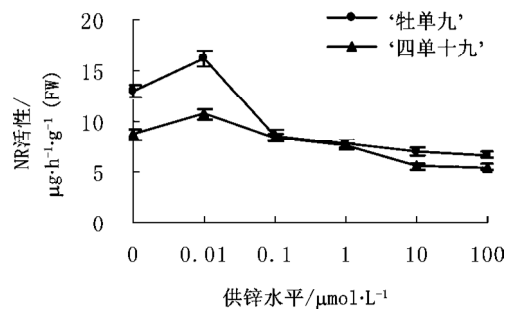


图4 供锌水平对玉米硝酸还原酶活性的影响

Fig.4 Effect of zinc supply level on NR activity in maize

8 不同锌浓度对玉米细胞膜透性的影响

植物组织受到逆境伤害时,由于膜的功能受损或结构破坏而使其透性增大,可以反应出质膜的伤害程度和植物抗逆性的大小。如图5所示,耐锌品种‘牡单九’及锌敏感型品种‘四单十九’叶片的相对电导度均表现为在锌浓度为 $1\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,细胞膜透性最小,低锌和高锌胁迫下细胞膜透性都有不同程度的增加,细胞膜受损加剧。

讨 论

锌在植物体内的生理作用非常重要,缺锌时,植物体内吲哚乙酸的含量下降,同时锌影响植物光合作用和蛋白质合成(Welch 1995)。研究表明,不同

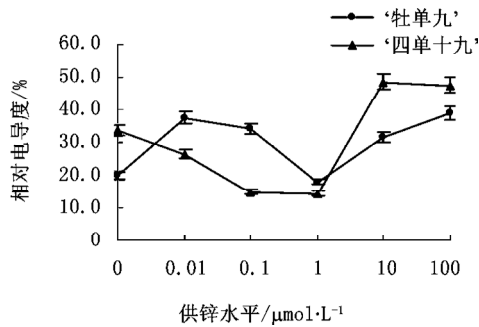


图5 供锌水平对玉米细胞膜透性的影响
Fig.5 Effect of zinc supply level on electrolyte leakage in maize

锌离子浓度处理对玉米幼苗的生长有明显的影。耐低锌品种‘牡单九’最适宜生长的锌浓度为 $0.1 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 锌敏感品种‘四单十九’最适宜生长的锌浓度为 $1 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。施锌对玉米的茎和叶片生长促进作用更为明显, 根系生长受到的促进作用相对较小。对根生长影响的“原初反应”是由于营养液的影响还是由茎叶传导的机理尚未得出结论, 有待进一步研究。缺锌($0 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)和高锌($100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)胁迫对玉米的生长均产生抑制作用。有研究认为对于一定的低锌比缺锌对玉米的为害更大(王景安和张福锁2002)。而本研究认为对于锌敏感品种来说一定的低锌比缺锌对玉米的为害更大, 同时锌敏感品种比较耐高锌, 而对于耐低锌品种来说低锌为害并不明显, 相反高锌危害大于低锌危害。

近来研究表明, 植物生长发育受阻与缺锌条件下植物体内活性氧代谢失调有十分密切关系(Cakmak 2000)。缺锌导致植物体内SOD和POD酶活性下降, 随着锌浓度增加, SOD和POD酶活性均增加。锌对SOD活性有直接的调控作用, 因为锌是植物体内CuZn-SOD酶组分之一, 供锌可提高植物体内SOD酶活性, 减少和消除体内活性氧(Cakmak和Marschner 1988)。研究结果表明缺锌严重抑制了POD活性, 供锌显著提高了玉米叶片的POD活性。而锌对不同基因型玉米的SOD和POD酶活性调控有所不同, 锌敏感品种SOD活性增加幅度大于耐低锌品种, POD活性则是耐低锌品种的增加的幅度大于锌敏感品种。本研究表明当锌浓度超过 $0.01 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 随着 Zn^{2+} 浓度的提高, 不同基因型玉米的硝酸还原酶活性降低。Martinoia等(1981)认为, 细胞质内 NO_3^- 含量是体内硝酸还原酶

活性的主要限制因子。维持叶片内高水平硝酸还原酶则依赖于根部 NO_3^- 不断的供应(Udayakumar等1981)。可以推测, 玉米幼苗在高锌胁迫下根部 NO_3^- 吸收受阻, 叶片NR活性下降, 对玉米氮素同化抑制作用进一步加剧。每种作物都有其正常生长相对稳定的养分平衡, 当生长环境中的养分平衡不合作物的营养特征时, 作物就会自身调节, 以维持体内有一个相对稳定的养分含量和比例(张富仓等2005)。有关锌对玉米氮素的吸收与同化作用影响的生理机制, 我们将在以后的试验中进一步研究。在 $0.1 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 锌浓度时, 耐低锌品种‘牡单九’和锌敏感型品种‘四单十九’的根系活力最高, 随着 Zn^{2+} 浓度的增加根系活力下降明显, 当锌浓度大于 $1 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 根系活力降低明显, 即低浓度锌处理时玉米幼苗根系活力有所增强, 表明玉米在此浓度范围内具有抗锌胁迫的能力, 但随着锌浓度的增加, 其不足以抵抗锌毒害, 所以根系活力降低。耐锌品种‘牡单九’及锌敏感型品种‘四单十九’叶片的相对电导度均表现为在锌浓度为 $1 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 细胞膜透性最小, 表明锌在维持细胞膜的完整性中起重要作用。

参考文献

- 崔激(1994). 锌和生长素在植物里的分布和对生长的关系. 植物学报, 3 (1): 31~36
- 房蓓, 武泰存, 王景安(2003). 低锌和缺锌对玉米生长发育的影响. 生命科学研究, 7 (3): 255~261
- 李合生主编(2000). 植物生理和生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社
- 刘国荣, 李秀芹, 赵义, 王忠志, 张淑琴, 赵祥林(1996). 玉米花白叶病与锌. 农业与技术, 3: 29~32
- 马斯纳H著. 曹一平, 陆景陵, 张福锁, 毛达如, 易小琳, 张承东, 王兴仁, 郭延亮, 李晓琳, 张淑民等译(1991). 高等植物的矿质营养. 北京: 北京农业大学出版社, 182~189
- 任军, 袁震霖, 张淑芬, 杨生财(1995). 玉米锌素营养基因型差异及遗传特性初探. 玉米科学, 3 (2): 68~70
- 孙羲主编(1990). 作物营养与施肥. 北京: 农业出版社, 402~403
- 王景安, 张福锁(2002). 一定的低锌比缺锌对玉米危害更大. 自然科学进展, 12 (2): 205~207
- 徐伟钧(1991). 寒地春玉米锌肥施用技术. 中国农学通报, 7 (4): 39
- 杨志敏(1994). 锌污染对小麦萌发期生长和某些生理生化特性的影响. 农业环境保护, 13 (3): 121~123
- 张富仓, 康绍忠, 龚道枝, 李志军(2005). 不同磷浓度对玉米生长及磷、锌吸收的影响. 应用生态学报, 16 (5): 903~906
- 张宪政(1992). 作物生理研究法. 农业出版社
- 邹琦主编(2000). 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业出版社,

- 159~160
- Cakmak I (2000). Possible roles of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species. *New Phytol*, 146: 185~205
- Cakmak I, Marschner H (1988). Enhanced superoxide radical production in roots of zinc-deficient plants. *J Exp Bot*, 39: 1449~1460
- Martinoia E, Heck U, Wiemken A (1981). Vacuoles as storage compartments for nitrate in barley leaves. *Nature*, 289: 292~294
- Udayakumar M, Devendra R, Sreenivasa Reddy V, Krishna Sastry KS (1981). Nitrate availability under low irradiance and its effect on the nitrate reductase activity. *New Phytol*, 88: 290~297
- Welch RM (1995). Micronutrient nutrition of plants. *Crit Rev Plant Sci*, 4: 49~82