

锌对不同基因型玉米幼苗碳氮代谢的影响

李佐同, 杨克军*, 王玉凤, 蔡鑫鑫, 张树远

黑龙江八一农垦大学农学院, 黑龙江大庆 163319

摘要: 选用不同耐锌玉米品种‘四单19’(低锌敏感型)和‘牡丹9’(低锌不敏感型), 采用营养液水培, 研究不同锌浓度对碳酸酐酶(CA)活性、光合特性、可溶性糖含量等的影响。结果表明: 玉米对锌具有选择运输的能力, 当锌浓度过大对幼苗造成伤害时, 根系吸收的锌向地上部运输的比例减少, 以减少过量的锌对地上部造成的伤害。锌与CA活性密切相关, 而CA活性与净光合速率的变化并非密切相关。低锌和高锌均显著增加了‘四单19’的可溶性糖含量, 而‘牡丹9’的可溶性糖含量在缺锌与低锌处理下增加幅度并不明显, 但在高锌处理下可溶性糖含量迅速增加。低锌和高锌处理都显著降低了‘四单19’叶片的蛋白质含量, 而‘牡丹9’低锌处理下叶片可溶性蛋白含量下降并不明显, 但在高锌处理下叶片可溶性蛋白含量大幅度下降。低锌处理下, ‘四单19’的蛋白质合成受到抑制, 而游离氨基酸大量积累, 明显抑制了植株的生长; ‘牡丹9’的蛋白质和氨基酸含量变化较小。

关键词: 玉米幼苗; 锌; 碳氮代谢

Effect of Zinc on C, N Metabolism of Different Varied Maize (*Zea mays* L.) Genotype Seedlings

LI Zuo-Tong, YANG Ke-Jun*, WANG Yu-Feng, CAI Xin-Xin, ZHANG Shu-Yuan

College of Agriculture, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319, China

Abstract: Two Zn-tolerant maize cultivars ‘Sidan 19’ (low zinc sensitive) and ‘Mudan 9’ (low zinc insensitive) were used as materials to investigate the effects of different Zn contents on CA activity, photosynthetic characteristics, soluble sugar content. The results showed that maize could transport zinc selectively. When zinc concentration was enough to damage seedlings, zinc absorbed by the roots reaching the above-ground decreased to reduce harm them. CA activity and zinc supply were closely related to each other, but CA activity and net photosynthesis, were not closely related to each other. Low zinc and high zinc promoted ‘Sidan 19’ soluble sugar content notably; for ‘Mudan 9’, the soluble sugar content under zinc deficiency and low zinc treatment did not increase significantly, while displayed a rapid increase in high-zinc processing. Under low zinc and high zinc treatment the blades protein content of ‘Sidan 19’ reduced significantly. The soluble protein content in blades of ‘Mudan 9’ reduced non-significantly under low zinc processing, and decreased sharply under high zinc processing. Under low zinc treatment, protein synthesis of ‘Sidan 19’ was suppressed with a large accumulation of free amino acids, which significantly inhibited the growth of the plants; while the protein and amino acid content of ‘Mudan 9’ altered a little.

Key words: maize seedlings; zinc; C, N metabolism

世界范围内土壤缺锌现象十分普遍(Kaya 和 Higgs 2002; Kaya 和 Higgs 2002), 作物因缺锌而造成减产面积广泛。锌具有重要的生理功能和营养作用。锌对生物体内 200 多种酶起调节、稳定和催化作用。在高等植物体内的酶促反应中, 锌既可作为酶的金属组分, 也可作为许多酶在功能、结构及调节方面的辅助因子, 是植物体内蛋白质、核酸、激素代谢、光合作用和呼吸作用所必需的(刘铮 1991; 张福锁 1993a)。玉米是对缺锌最为敏感

的作物之一(高质等 2001)。研究表明, 不同植物种类和同一物种不同基因型对锌的敏感程度不同(赵同科等 1997), 不同基因型玉米对缺锌反应差异很

收稿 2010-02-08 修定 2010-05-14

资助 国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAD02A11)、黑龙江省“十一五”科技攻关项目(GA07B101)和黑龙江省重点科技成果推广计划项目(TA09Q205)。

* 通讯作者(E-mail: byndykj@163.com; Tel: 0459-6819179)。

大(孙刚等 2007), 在小麦、水稻、大豆、鹰嘴豆、紫花苜蓿等作物上也发现了锌营养效率的基因型差异(Maqsood 等 2009; Quijano-Gurta 等 2002; Wang 等 2009; Genc 和 McDonal 2004; Grewal 和 Williams 1999)。为此我们选择两个对锌敏感性差异较大的玉米杂交种为试验材料, 采用水培方法, 研究不同锌浓度对玉米碳氮代谢的影响, 探讨玉米不同基因型对锌敏感性差异的内在机理。

材料与方 法

1 材料

以‘牡丹9’和‘四单19’两个不同基因型玉米(*Zey mays* L.)品种为试材, 经前期试验证明分别为低锌不敏感品种和低锌敏感型品种。

2 方法

营养液为 1/2 的 Hoagland 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 和 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 mol $\cdot\text{L}^{-1}$ NaOH 和 0.1 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。

收获后每盆取 10 株, 分别测量地上和地下部分鲜重, 在 105 $^{\circ}\text{C}$ 杀青 30 min 后于 80 $^{\circ}\text{C}$ 烘至恒重, 称干重。样品粉碎备用。

Zn 含量测定时将前面已烘干的材料粉碎, 60 $^{\circ}\text{C}$ 干燥 6 h, 精确称取 0.1000 g 粉末, 用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ (4:1) 混合液法消煮, 日立 Z5000 型原子吸收分光光度计测定。

碳酸酐酶(CA)活性采用郭敏亮等(1988)和 Rengel (1995)相结合的方法测定。可溶性糖含量采用蒽酮-硫酸法测定(张宪政 1992); 可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定(李合生

2000); 游离氨基酸含量用茚三酮显色法测定(李合生 2000); 采用磺基水杨酸法测定脯氨酸含量(邹琦 1995)。

光合特性测定时幼苗水培 28 d, 选取自下向上数第 3 片完全展开叶, 用美国 LI-COR 公司的 LI-6400 便携式光合测定系统, 设定光量子通量密度为 800 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 温度 25 $^{\circ}\text{C}$, 测定净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r), 每个处理各测定 10 株, 3 次重复, 每株重复测定 3 次。

实验结果

1 供锌水平对不同基因型玉米幼苗鲜重的影响

表 1 表明, 当锌浓度为 0.1 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时低锌不敏感型玉米‘牡丹9’地上部和根系鲜重显著增加, 当锌浓度大于 0.1 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 随锌浓度增加‘牡丹9’地上部和根系鲜重下降, 0 和 0.01 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理下‘牡丹9’地上部和根系鲜重差异未达显著水平, 高锌处理下(100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)‘牡丹9’地上部和根系鲜重显著下降, 分别为 0.1 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理的 48% 和 72%。对于低锌敏感型玉米‘四单19’以 1 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理时地上部和根系鲜重最高, 以 0.01 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理下‘四单19’地上部和根系鲜重显著下降, 地上部和根系分别为 1 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理的 49% 和 69%。

2 供锌水平对不同基因型玉米锌含量的影响

表 2 表明当锌浓度大于 0.1 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 随锌浓度增加, 不同锌敏感型玉米幼苗地上部和根系中锌含量均显著增加, 根系的增加幅度大于地上部。低锌不敏感型玉米‘牡丹9’当供锌水平从 0.1 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 地上部和根系锌含量分别增加了 33.3 和 44.9 倍。对于低锌敏感型玉米‘四单19’, 当供锌水平从 0.1 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 地上部和根系锌含量分别增加了 31.8 和 64.4 倍。

3 供锌水平对不同基因型玉米幼苗碳酸酐酶(CA)活性的影响

由图 1 可见, 锌浓度对玉米幼苗的 CA 活性有显著影响, 对于低锌不敏感品种‘牡丹9’, 随着锌浓度增加碳酸酐酶活性增加, 锌浓度从 0 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到 0.01 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, CA 活性变化并不明显(分别为 0.83 和 0.89 $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$), 当锌浓度增加到 0.1、

表1 锌浓度对不同基因型玉米地上部鲜重(g)的影响

Table 1 Effect of zinc concentration on fresh weight (g) of aboveground and root of different maize genotypes

基因型	取样部位	锌浓度/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$					
		0	0.01	0.1	1	10	100
‘牡丹9’	地上部	2.0300 \pm 0.22 ^c	1.9383 \pm 0.04 ^c	2.9300 \pm 0.14 ^a	2.4133 \pm 0.15 ^b	2.1483 \pm 0.09 ^c	1.4100 \pm 0.08 ^d
	根系	0.6451 \pm 0.03 ^b	0.6344 \pm 0.04 ^b	0.7534 \pm 0.07 ^a	0.7475 \pm 0.04 ^a	0.6681 \pm 0.02 ^b	0.5451 \pm 0.06 ^c
‘四单19’	地上部	1.8300 \pm 0.34 ^d	1.5067 \pm 0.01 ^e	2.1367 \pm 0.13 ^c	3.0667 \pm 0.13 ^a	2.7433 \pm 0.16 ^b	2.0050 \pm 0.01 ^c
	根系	0.6515 \pm 0.04 ^c	0.5505 \pm 0.03 ^d	0.7344 \pm 0.02 ^b	0.7970 \pm 0.01 ^a	0.6748 \pm 0.05 ^{bc}	0.6071 \pm 0.05 ^{cd}

表中数据为3个重复的平均值(\pm SE), 同行数字旁字母相同者表示差异不显著(0.05水平)。下同。

表2 锌浓度处理对不同基因型玉米幼苗Zn含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的影响Table 2 Effect of zinc concentration on Zn content ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) of different maize genotypes

基因型	取样部位	锌浓度/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$					
		0	0.01	0.1	1	10	100
‘牡丹9’	地上部	23.94 \pm 0.65 ^e	24.44 \pm 2.31 ^e	28.02 \pm 1.51 ^d	44.35 \pm 1.31 ^c	174.19 \pm 3.02 ^b	796.69 \pm 2.27 ^a
	根系	17.41 \pm 1.33 ^d	16.68 \pm 1.47 ^d	28.11 \pm 1.40 ^c	19.24 \pm 0.81 ^d	102.43 \pm 5.72 ^b	781.19 \pm 2.26 ^a
‘四单19’	地上部	22.00 \pm 1.09 ^d	20.02 \pm 1.25 ^e	24.22 \pm 1.63 ^d	39.67 \pm 1.57 ^c	194.80 \pm 3.11 ^b	770.04 \pm 2.10 ^a
	根系	20.55 \pm 0.97 ^c	11.00 \pm 0.71 ^e	11.83 \pm 0.79 ^e	16.28 \pm 0.8 ^d	70.55 \pm 1.96 ^b	761.65 \pm 3.74 ^a

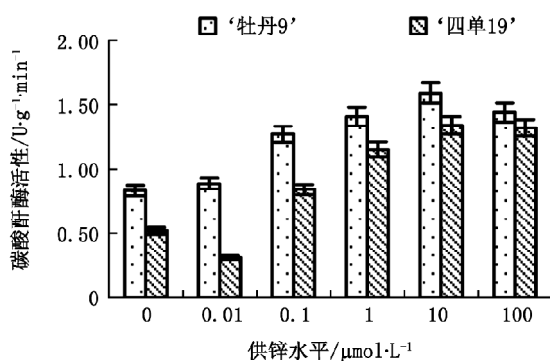


图1 供锌水平对玉米碳酸酐酶活性的影响

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

1、10、100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, CA 活性迅速增加, 分别为对照的 1.52、1.69、1.91 和 1.73 倍。当锌浓度从 0 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到 0.01 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 低锌敏感品种‘四单19’的CA活性迅速下降, 为对照的60%, 继续增加锌浓度, CA活性增加, 锌浓度为0.1、1、10、100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, CA活性迅速增加, 分别为对照的1.62、2.22、2.57和2.53倍。低锌敏感品种‘四单19’的CA活性始终低于低锌不敏感品种‘牡丹9’, 这是由品种特性决定的。‘牡丹9’在低锌处理下(0.01 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) CA活性与对照相比变化不大, 而‘四单19’的CA活性却显著降低, ‘牡丹

9’在低锌处理下仍能保持较高的CA活性, 可能是其较‘四单19’低锌不敏感的原因之一。

4 供锌水平对不同基因型玉米幼苗光合特性的影响

净光合速率的大小能直接反映植物的生长情况, 如图2所示, 不同供锌水平对不同基因型玉米幼苗的净光合速率影响不同。对于低锌不敏感玉米‘牡丹9’, 在锌浓度为0.01~0.1 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 随着锌浓度增加净光合速率迅速增加, 锌浓度为0.01和0.1 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时净光合速率分别为对照的1.17和2.46倍, 继续增大锌浓度, 光合速率下降, 锌浓度为1、10、100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时净光合速率分别为对照的192%、87%和76%。而低锌敏感品种‘四单19’的净光合速率变化与‘牡丹9’不同, 随锌浓度增加, ‘四单19’的净光合速率呈降-升-降的变化趋势, 锌浓度为0.01 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时净光合速率为对照的71%, 锌浓度为0.1和1 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时净光合速率分别为对照的1.00和1.94倍, 继续增加锌浓度净光合速率降低, 10、100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时净光合速率分别为对照的115%和83%。不同供锌水平下‘牡丹9’和‘四单19’的气孔导度和胞间 CO_2 浓度变化趋势与净光合速率变化趋势相似, ‘牡丹9’的气孔导度和胞间 CO_2 浓度分别在锌浓度为0.1 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 达到最大值, 而

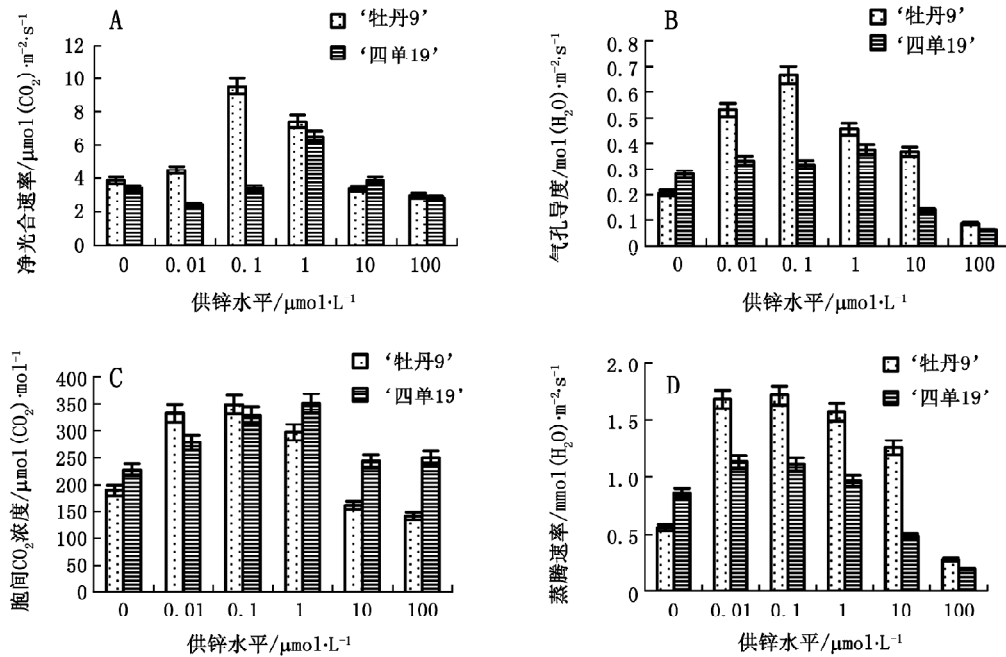


图2 供锌水平对玉米净光合速率(A)、气孔导度(B)、胞间CO₂浓度(C)和蒸腾速率(D)的影响
Fig.2 Effect of zinc supply level on net photosynthesis, stomatal conductance, intercellular CO₂ concentration, and transpiration rate in maize

‘四单19’的气孔导度和胞间CO₂浓度分别在锌浓度1 μmol·L⁻¹达到最大值, 锌浓度过高或过低气孔导度和胞间CO₂浓度值均有所降低。适宜的锌浓度同样可以提高玉米幼苗的蒸腾速率。上述结果可以看出在锌胁迫或过量的条件下气孔导度降低, 一方面可以减少叶片对外界CO₂的吸收, 致使细胞间隙CO₂浓度下降, 从而导致幼苗的光合能力降低, 光合产物输出减少, 最终幼苗生长发育迟缓, 产量降低; 另一方面也使水分通过气孔的扩散受阻, 从而降低叶片的蒸腾速率, 减少水分的散失。

5 供锌水平对不同基因型玉米可溶性糖含量的影响

图3显示, 在低锌和高锌处理的两个品种的叶片可溶性糖含量均有所增加。低锌敏感品种‘四单19’在锌浓度为1 μmol·L⁻¹时可溶性糖含量最低, 为33.3 μg·g⁻¹, 低锌处理(0.01 μmol·L⁻¹)的可溶性糖增加幅度大于高锌处理, 低锌处理下可溶性糖含量是锌浓度为1 μmol·L⁻¹时的1.65倍, 高锌处理下(100 μmol·L⁻¹)可溶性糖含量是1 μmol·L⁻¹时的1.41倍。与0.1 μmol·L⁻¹的供锌水平相比, 低锌不敏感品种‘牡丹9’的可溶性糖含量在缺锌与低锌处理下增加幅度并不明显, 缺锌处理下可溶性糖含量为锌

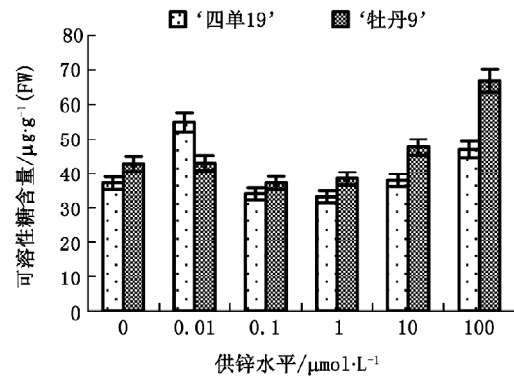


图3 供锌水平对玉米可溶性糖含量的影响
Fig.3 Effect of zinc supply level on sugar content in maize

浓度为0.1 μmol·L⁻¹处理的1.15倍, 而高锌处理下可溶性糖含量迅速增加, 为0.1 μmol·L⁻¹处理的1.79倍。

6 供锌水平对不同基因型玉米可溶性蛋白含量的影响

从图4可以看出, 低锌和高锌处理都显著降低了‘四单19’叶片的蛋白质含量, 低锌处理的降低幅度大于高锌处理, 适宜供锌可增加叶片中的可溶性蛋白含量, 锌浓度为1 μmol·L⁻¹的叶片可溶性蛋

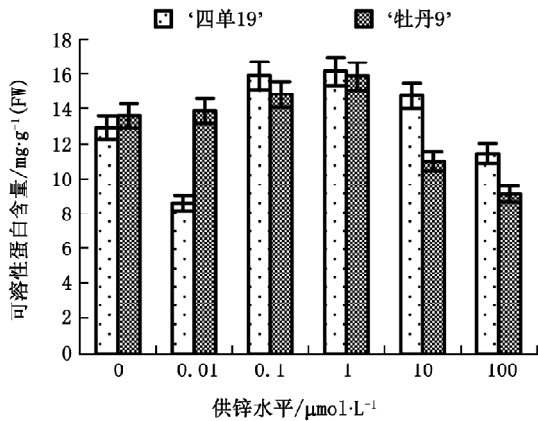


图4 供锌水平对玉米可溶性蛋白含量的影响
Fig.4 Effect of zinc supply level on soluble protein content in maize

白含量最高, 分别为 0.01 和 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理的 1.87 和 1.39 倍。对于低锌不敏感品种‘牡丹9’, 低锌处理下可溶性蛋白含量变化并不明显, 锌浓度为 1 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的叶片可溶性蛋白含量为对照的 1.17 倍, 而高锌处理下可溶性蛋白含量大幅度下降, 锌浓度为 1 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理叶片可溶性蛋白含量为锌浓度为 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理的 1.74 倍。说明两个品种对低锌敏感性与不同供锌水平下蛋白质的合成能力有关, 对于低锌敏感品种, 低锌比高锌处理对蛋白质合成的影响更大, 对于低锌不敏感品种‘牡丹9’, 低锌处理对蛋白质合成的影响明显小于高锌处理。

7 供锌水平对不同基因型玉米游离氨基酸含量的影响

图5 显示不同供锌水平对两品种的游离氨基

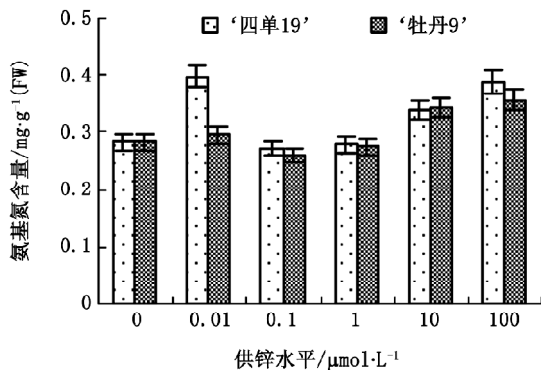


图5 供锌水平对玉米游离氨基酸含量的影响
Fig.5 Effect of zinc supply level on free amino acids content in maize

酸含量的影响, 低锌与高锌处理下低锌敏感品种‘四单19’的游离氨基酸增加幅度均高于低锌不敏感品种‘牡丹9’。氨基酸在细胞内的代谢有多种途径。一种是经过生物合成蛋白质, 一种是进行分解代谢。目前, 尽管人们对逆境条件下植物体内游离氨基酸来源的机制不太清楚, 但游离氨基酸与氮代谢密切相关, 逆境胁迫可以导致游离氨基酸含量增加(曹让等 2004)。目前认为, 胁迫条件下产生的游离氨基酸可能起着维持细胞水势、消除物质毒害和储存氮素的功能(Shen 等 1990)。

8 供锌水平对不同基因型玉米脯氨酸含量的影响

图6 表明, 低锌处理下, ‘四单19’的脯氨酸含量明显增加, 锌浓度为 0.01 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理的脯氨酸含量为锌浓度为 1 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理的 1.45 倍。锌浓度为 0、0.1 和 1 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的处理间并无明显差异, 当供锌水平继续增加时, 脯氨酸含量迅速增加, 但仍低于低锌处理。对于低锌不敏感品种‘牡丹9’, 在低锌处理下脯氨酸变化并不明显, 但高锌处理下脯氨酸含量大幅度增加, 锌浓度为 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时脯氨酸含量为 1 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理的 1.61 倍。在低锌和正常供锌条件下, ‘四单19’的脯氨酸含量高于‘牡丹9’, 在高锌处理下(10 和 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) ‘牡丹9’的脯氨酸含量高于‘四单19’。

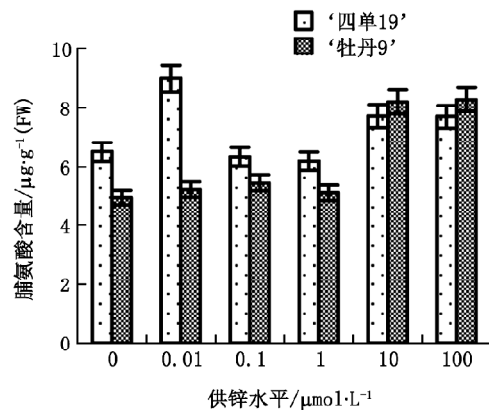


图6 供锌水平对玉米脯氨酸含量的影响
Fig.6 Effect of zinc supply level on the proline content in maize

9 供锌水平对不同基因型玉米硝态氮含量的影响

硝态氮是植物最重要的氮源, 测定植物体内的硝态氮含量可以反应植物的氮营养状况。图7 显

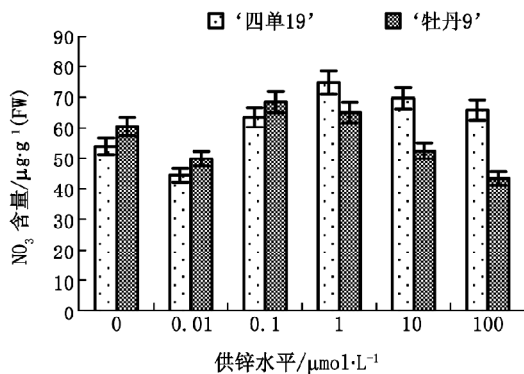


图7 供锌水平对玉米硝态氮含量的影响

Fig.7 Effect of zinc supply level on NO₃-N content in maize

示, 与 1 μmol·L⁻¹ 供锌相比, 低锌明显降低了两品种硝态氮含量。1 μmol·L⁻¹ 锌处理的‘四单19’硝态氮含量为低锌处理的 1.68 倍。‘牡丹9’低锌处理(0.01 μmol·L⁻¹)的 NO₃⁻ 含量为 0.1 μmol·L⁻¹ 锌处理的 72%, 高锌处理下‘牡丹9’的硝态氮含量下降较明显, 10 和 100 μmol·L⁻¹ 锌处理的硝态氮含量分别为 0.1 μmol·L⁻¹ 锌处理的 81% 和 67%。

讨 论

王景安和张福锁(2002)研究认为对于一定的低锌比缺锌对玉米的危害更大, 本研究中对于低锌敏感型玉米‘四单19’来说一定的低锌比缺锌对玉米的危害更大, 而对于低锌不敏感型玉米‘牡丹9’来说低锌危害并不明显, 而高锌处理明显抑制了作物的生长。植物体内的锌含量是由品种特性决定的, 不同基因型玉米体内的锌含量差别很大, 这种锌含量的差异与对锌的敏感性无相关性(王景安和张福锁 2002)。锌利用效率与水稻植物根的形态, 显微结构和抗氧化酶活性相关(Chen 等 2009)。随锌浓度增加, 地上部和根系的锌含量明显增加, 且根系增加幅度大于地上部, 说明玉米幼苗具有选择运输的能力, 当锌浓度过大对幼苗造成伤害时, 根系吸收的锌向地上部运输的比例减少, 以减少过量的锌对玉米造成的伤害。

研究认为锌的缺乏将会影响光的利用效率, 以及叶片的最大光合效率(Gianquinto 2000; Tavallali 等 2009)。本研究结果表明, 适宜的锌供应可以改善光合性能。高锌和低锌胁迫下, 不同基因型玉米幼苗光合能力减弱。结合对CA活性的研究可以看

出, 在高锌处理下CA活性明显增加, 而净光合速率却迅速下降, 说明CA活性与净光合速率的变化并非密切相关。马斯纳(1991)认为只有在CA活性很低时, 单位叶面积CO₂同化作用才受到影响。在严重缺锌时, CA失去活性。但即使在CA活性不高时也可获得最大的净光合作用。因此看来作物一般都含有大大过量的CA。本研究中当锌浓度在 0.01~10 μmol·L⁻¹ 之间时, CA活性大幅度增加, 说明在一定锌浓度范围内, 锌与CA活性密切相关。至于除了增大CO₂贮存库外, 该酶是否还有其他功能, 仍是一个未解决的问题(马斯纳 1991)。这说明缺锌和高锌导致玉米净光合速率下降, 不仅仅是由于某些组织中的酶活性下降引起的, 而是由十分复杂的代谢变化所引起的。

低锌和高锌均显著增加了‘四单19’可溶性糖含量, ‘牡丹9’的可溶性糖含量在缺锌与低锌处理下增加幅度并不明显, 而高锌处理下可溶性糖含量迅速增加。表明锌对不同敏感型玉米的调控机制有所不同。糖分积累是在生长停止情况下发生的(张福锁1993b), 缺锌提高植物体内的碳水化合物含量是由于生长受阻引起的浓度效应(马斯纳 1991), 说明高锌和低锌处理抑制了植株生长, 导致植株体内糖分积累。

低锌和高锌处理都显著降低了‘四单19’叶片的蛋白质含量。对于低锌不敏感品种‘牡丹9’, 高锌处理下可溶性蛋白含量下降幅度大于低锌处理。说明两个品种对低锌敏感性与不同供锌水平下蛋白质的合成能力有关, 对于低锌敏感品种, 低锌比高锌蛋白质合成量更少, 对于低锌不敏感品种‘牡丹9’, 低锌处理下对蛋白质的合成并无太大的影响, 而高锌处理明显抑制了蛋白质的合成。

在本研究中低锌与高锌处理下低锌敏感品种‘四单19’的游离氨基酸增加幅度均高于低锌不敏感品种‘牡丹9’。从蛋白质的变化可知, 氨基酸的积累与蛋白质合成受抑制密切相关。低锌处理下, 低锌敏感品种‘四单19’的蛋白质合成受到抑制, 而氨基酸大量积累, 明显抑制了植株的生长; 低锌不敏感品种‘牡丹9’蛋白质和氨基酸含量变化较小, 说明在低锌处理下, ‘牡丹9’的自我调节能力比较强, 氨基酸的合成与蛋白质的合成能够同时进行, 避免了氨基酸的无效积累, 所以生长受影响程度小。

而高锌处理下两个品种的蛋白质合成均受到抑制, 游离氨基酸积累, 导致生长受到抑制。

脯氨酸的变化趋势与游离氨基酸类似, 植物在正常生长条件下, 脯氨酸的含量低, 但在逆境时, 脯氨酸在细胞质中会大量积累, 有关脯氨酸在玉米高锌和低锌胁迫下的作用少见报道, 从本研究结果看, 脯氨酸在锌胁迫中的增加可能是作为氨基酸组分之一, 由于蛋白质合成受到抑制而导致的增加, 另外, 在锌胁迫下脯氨酸的增加是否有其特殊的作用值得我们进一步研究。

植物体内的硝态氮在氨基酸和其他含氮有机化合物的合成过程中, 必须首先进行还原作用, 硝酸还原酶首先使硝酸盐还原成亚硝酸盐, 亚硝酸盐在亚硝酸还原酶的作用下还原成氨(马斯纳1991)。结合本研究中对硝酸还原酶的测定(杨克军等2009)可以推测, ‘四单19’中硝态氮的积累是由于硝酸还原酶活性的降低而导致的, 而低锌不敏感品种‘牡丹9’对高锌比较敏感, 可能是高锌处理影响了根系对硝态氮的吸收。可以推测锌对不同基因型玉米氮的吸收转运与还原的影响机制不同, 低锌主要影响的是硝态氮的还原, 而高锌处理下主要影响的是吸收, 其机理有待于进一步研究。

参考文献

- 曹让, 梁宗锁, 武永军(2004). 分根交替渗透胁迫下玉米幼苗叶片中游离氨基酸的变化. 干旱地区农业研究, 22 (1): 49~54
- 高质, 林葆, 周卫(2001). 锌素营养对春玉米内源激素与氧自由基代谢的影响. 植物营养与肥料学报, 7 (4): 424~428
- 郭敏亮, 高煜珠, 王忠(1988). 用酸度计测定植物碳酸酐酶活性. 植物生理学通讯, (6): 59~61
- 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
- 刘铮(1991). 微量元素的农业化学. 北京: 农业出版社, 62~86
- 马斯纳 H 著(1991). 高等植物的矿质营养, 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. 北京: 北京农业大学出版社, 182~189
- 孙刚, 杨习文, 田霄鸿, 曹翠玲, 李生秀(2007). 不同玉米基因型幼苗缺锌敏感性评价. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 35 (3): 166~171
- 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
- 杨克军, 蔡鑫鑫, 张树远, 张崎峰, 王玉凤, 王庆祥(2009). 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. 植物生理学通讯, 45 (4): 379~384
- 张福锁(1993a). 锌在植物细胞原生质膜稳定性方面的作用. 土壤学报, 30 (增刊): 104~110
- 张福锁(1993b). 植物营养、生态生理学和遗传学. 北京: 中国科学技术出版社, 106~109
- 张宪政(1992). 作物生理研究法. 北京: 农业出版社
- 赵同科, 曹云者, 王运华, 孙祖琰(1997). 锌胁迫下玉米基因型与根分泌物变化. 华中农业大学学报, 16 (2): 146~150
- 邹琦主编(1995). 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业出版社
- Chen WR, He ZL, Yang XE, Feng Y (2009). Zinc efficiency is correlated with root morphology, ultrastructure, and antioxidative enzymes in rice. J Plant Nutr, 32 (2): 287~305
- Genc Y, McDonal GK (2004). The potential of synthetic hexaploid wheats to improve zinc efficiency in modern bread wheat. Plant Soil, 262: 23~32
- Gianquinto G, Abu-Rayyan A, Di Tola L, Piccotino D, Pezzarossa B (2000). Interaction effects of phosphorus and zinc on photosynthesis, growth and yield of dwarf bean grown in two environments. Plant Soil, 220: 219~228
- Grewal HS, Williams R (1999). Alfalfa genotypes differ in their ability to tolerate zinc deficiency. Plant Soil, 214: 39~48
- Kaya C, Higgs D (2002). Response of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) cultivars to foliar application of zinc when grown in sand culture at low zinc. Sci Hortic, 93 (1): 53~64
- Maqsood MA, Rahmatullah AM, Hussain M (2009). Differential growth response and zinc utilization efficiency of wheat genotypes in chelator buffered nutrient solution. Soil Environ, 28 (2): 174~178
- Quijano-Guerta C; Kirk GJD, Portugal AM, Bartolome VI, McLaren GC (2002). Tolerance of rice germ-plasm to zinc deficiency. Field Crops Res, 76: 123~130
- Rengel Z (1995). Carbonic anhydrase activity in leaves of wheat genotypes differing in Zn efficiency. Plant Physiol, 147: 251~256
- Shen LM, David M, Joyce GF (1990). Influence of drought on the concentration and distribution of 2,4-diaminobutyric acid and other free amino acids in tissues of flatpea (*Lathyrus sylvestris* L.). Environ Expt Bot, 30 (4): 497~504
- Tavallali V, Rahemi M, Maftoun M, Panahi B, Karimi S, Ramezani A, Vaezpour M (2009). Zinc influence and salt stress on photosynthesis, water relations, and carbonic anhydrase activity in pistachio. Sci Hortic, 123 (2): 272~279
- Wang RM, Chen CC, Yang XE, Zhang YX (2009). Growth responses to varying zinc activities in rice genotypes differing in Zn efficiency and Zn density. J Plant Nutr, 32 (4): 681~693