

# 缺锌对不同基因型玉米激素代谢的影响

王景安 柴 娜 梁晓华

(天津师范大学 天津 300387)

**摘要:** 为探索缺锌导致玉米生长受抑和体内激素代谢的关系,用溶液培养的方法研究不同供锌水平下,玉米体内的色氨酸、IAA、GA<sub>3</sub>、GA<sub>4</sub> 和 ABA 含量变化,并在缺锌处理一段时间后施用色氨酸或 IAA 检验其对缺锌症状的影响。结果表明,缺锌与低锌均使玉米体内的色氨酸和 IAA 含量降低,敏感基因型比非敏感基因型降低的更多,同时 IAA 由地上部向根部的运输受阻;缺锌早期非敏感基因型茎叶的 ABA 和 GA<sub>4</sub> 的含量升高,而敏感基因型则降低,这与调节它们的抗性大小和代偿性生长有关。在同一时期缺锌,不同基因型玉米 GA<sub>3</sub> 含量均升高;色氨酸与 IAA 对敏感基因型玉米的缺锌症状有一定的恢复作用,但对非敏感基因型玉米的缺锌则没有恢复作用。缺锌时玉米体内的 IAA、GA<sub>3</sub>、GA<sub>4</sub> 和 ABA 等激素水平与生长之间并非总是一致的相关关系,生长速率也会影响体内的激素水平,同时激素水平还参与植物的抗性调节。

**关键词:** 缺锌; 玉米; IAA; GA<sub>3</sub>; GA<sub>4</sub>; ABA

中图分类号: Q945.78; Q946.885 文献标识码: A 文章编号: 1000-7091(2010)03-0148-05

## Effects of the Hormone Metabolism of Different Maize Genotypes under Zinc Deficiency

WANG Jing-an ,CHAI Na ,LIANG Xiao-hua

(Tianjin Normal University ,Tianjin 300387 ,China)

**Abstract:** The relationship was investigated between hormone metabolism and growth inhibition of maize caused by zinc deficiency. Solution culture was used to study the changes of contents of tryptophan ,auxin ,gibberellin A<sub>3</sub> ,gibberellin A<sub>4</sub> and abscisic acid in maize under different levels of zinc. Tryptophan or auxin was added after zinc deficiency treatment in order to research the effects on maize under zinc deficiency. Both zinc deficiency and low-zinc resulted in the reduction of tryptophan and auxin ,the sensitive genotypes reduced much more than the insensitive genotypes ,also ,the transport of auxin from aerial parts to root was baffled. In the early stage of zinc deficiency ,the contents of abscisic acid and gibberellin A<sub>4</sub> in stems and leaves increased in the insensitive genotypes while decreased in the sensitive genotypes ,which maybe related to resistance and compensatory growth of plants. Meanwhile ,the contents of gibberellin A<sub>3</sub> increased in both two genotypes. The addition of both tryptophan and auxin could help the sensitive genotypes to recover from zinc deficiency ,but had no effect on the insensitive genotypes. There was no consistent cor-relativity between growth and contents of auxin ,gibberellin A<sub>3</sub> ,gibberellin A<sub>4</sub> and abscisic acid under zinc deficiency. The hormone levels which could be influenced by growth speed participated in the resistance regulation.

**Key words:** Zinc deficiency; Maize( *Zea mays* L. ) ; IAA; GA<sub>3</sub>; GA<sub>4</sub>; ABA

早在1948年崔徵<sup>[1]</sup>就指出,缺锌导致植物体内色氨酸含量降低,茎的生长速率减慢。因此,许多资料提出,色氨酸合成需要锌。但也有相反的报道,认为不是色氨酸合成需要锌,而是由色氨酸合成吲哚乙酸时需要锌,如,Takaki和Kushizaki<sup>[2]</sup>用玉米、番茄和大麦试验发现,在缺锌的叶片中色氨酸和色胺

的含量比正常叶片高得多,因而推断锌是从色氨酸通过色胺合成吲哚乙酸所必需的。Salaimi和Kene-fick<sup>[3]</sup>发现在缺锌的营养液中培养玉米,加锌或加色氨酸均能消除玉米的缺锌症状,因此锌的作用位点有待进一步研究。有人报道,植物体内ABA的主要功能是作为胁迫激素参与植物对外界胁迫条件的

收稿日期: 2010-04-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(30571109);天津师范大学开发基金项目(5RL002)

作者简介: 王景安(1957-),男,河北丰润人,教授,博士,主要从事植物营养生理研究。

适应<sup>[4]</sup>;在缺锌条件下,不同品种生长受抑程度存在着很大差异;一定的低锌比缺锌对玉米危害更大<sup>[5]</sup>,这些结果可能均与缺锌条件下植物体内的激素合成有关,但未见相关报道。因此,进行了本试验研究。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

本试验所用的玉米品种为对缺锌比较敏感的吉单 120 和对缺锌不甚敏感的辽单 22,分别由吉林省玉米工程中心和辽宁省玉米研究所提供。

### 1.2 材料培养

选择饱满一致的玉米种子,浸种 12 h 后,放在垫有浸湿滤纸的搪瓷盘中,上盖 2 层湿纱布,于 25℃ 培养箱中催芽 2 d 后挑选发芽一致的种子播于洗净的石英砂中,放在室温下发苗 6 d 后去掉胚乳,用去离子水冲洗干净,移栽到 1 L 盛有相应处理营养液的培养钵中,每钵 3 株,培养温度白天 25~28℃,晚上 20~23℃,每天光照 14 h,每隔 2 d 更换一次营养液,营养液配方为(μmol/L): K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.75 × 10<sup>3</sup>, MgSO<sub>4</sub> 0.65 × 10<sup>3</sup>, KCl 0.1 × 10<sup>3</sup>, Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 2 × 10<sup>3</sup>, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 0.25 × 10<sup>3</sup>, H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 1, MnSO<sub>4</sub> 1, CuSO<sub>4</sub> 0.1, (NH<sub>4</sub>) Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub> 5 × 10<sup>-3</sup>, FeEDTA 1 × 10<sup>2</sup>。本试验设置 8 个处理:①缺锌(即不供锌,代号为 0);②缺锌培养 8 d 后向营养液中加入 0.05 mg/L 的色氨酸(代号 0-S);③缺锌培养 8 d 后向营养液中加入 0.025 mg/L 的 IAA(代号 0-I);④低锌(供 0.01 μmol/L 锌,代号为 1);⑤低锌培养 8 d 后向营养液中加入 0.05 mg/L 色氨酸(代号 1-S);⑥低锌培养 8 d 后向营养液中加入 0.025 mg/L 的 IAA(代号 1-I);⑦正常供锌(供 1 μmol/L 锌,代号 2);⑧正常供锌 12 h 后再进行缺锌培养(代号 2-0)。锌以 ZnSO<sub>4</sub> 的形式供给。每个处理均为 5 次重复,共 15 株。营养液 pH 用 NaOH 或 HCl 调到(6.2 ± 0.1),用电动

泵连续通气供氧。缺锌、低锌和正常供锌处理的培养 8,13 d 时取样,测定 IAA 等植物激素的含量;其余处理培养 15 d 后,植株分地上部和地下部收获(此时供给 0.01 μmol/L 锌的吉单 120 玉米苗已出现枯死),然后分别烘干、称重、粉碎过筛,用于测定色氨酸等含量。

### 1.3 测定方法

1.3.1 色氨酸含量的测定 对二甲氨基苯甲醛显色法<sup>[6]</sup>。

1.3.2 生长素等激素含量的测定 称取玉米叶片或根 1 g 左右,液氮冷冻后 -20℃ 冰箱保存。激素提取时,加入 5 mL 80% 的甲醇(含二叔丁基对甲苯酚 1 mmol/L)在冰浴下研磨匀浆,于 4℃ 下提取 8 h,4 000 r/min 离心 15 min,沉淀用 80% 甲醇重复提取 3 次,合并上清液,过 C<sub>18</sub> 柱进一步纯化,氮气吹干,再用 pH7.5 的样品稀释液定容至 2 mL,采用酶联免疫的方法测定<sup>[7]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 缺锌与低锌对玉米体内色氨酸含量的影响

前面已报道<sup>[5]</sup>,吉单 120 玉米是对缺锌较为敏感的品种,而辽单 22 则对缺锌不甚敏感;由表 1 可以看出,缺锌与低锌使玉米茎叶的色氨酸含量降低,吉单 120 比辽单 22 降低的更多,说明不同玉米品种对缺锌的敏感性与缺锌时体内色氨酸的合成受阻程度密切相关;吉单 120 低锌时比缺锌降低的更多;但辽单 22 则不然,表明低锌对不同品种危害的机理亦有不同。根内色氨酸含量的变化与茎叶相似,低锌处理时根内色氨酸含量比缺锌时更低,这在二品种上表现出相同的规律。看来,低锌危害与其影响根内的色氨酸合成有关,敏感品种吉单 120 在完全缺锌时,根内色氨酸含量有所升高,抗性品种辽单 22 却降低,这可能是两品种缺锌敏感性不同的一个重要原因。

表 1 缺锌与低锌处理后玉米体内色氨酸含量

Tab. 1 The tryptophan content in maize of zinc deficiency and low-zinc treatments							%
品种 Cultivar	茎叶 Stalk leaf			根 Root			
	0	1	2	0	1	2	
吉单 120 Jidan120	0.304b	0.26c	0.401a	0.114a	0.091c	0.107ab	
辽单 22 Liaodan22	0.251c	0.267c	0.287bc	0.093c	0.077d	0.103b	

注:0. 缺锌;1. 低锌;2. 正常供锌;不同英文字母表示 5% 水平差异显著,以下同。  
Note:0. Meant zinc deficiency;1. Meant low-zinc;2. Meant normal-zinc;different letters indicated significant difference(P<0.05) the same as below.

### 2.2 缺锌与低锌对玉米体内 IAA 含量的影响

由表 2 可以看出,敏感品种吉单 120 在缺锌 8 d 时根、茎叶的 IAA 含量均降低,但根的降低幅度远大于茎叶;抗性品种辽单 22 茎叶的 IAA 含量没有

明显变化,只是根的 IAA 含量降低,这表明缺锌抑制了 IAA 的向下运输;地上部 IAA 合成对锌的要求,品种间存在着差异,敏感品种对供锌浓度的变化较敏感,缺锌时 IAA 合成受阻严重,生长受抑明显,

另外,正常供锌时吉单 120 的 IAA 含量比辽单 22 高,说明吉单 120 维持正常生长需要较高的 IAA 含量,可能这也是敏感品种易受缺锌危害的原因之一。低锌时两品种的 IAA 含量均提高,这表明 IAA 合成要求的锌供应量是很低的,低锌造成的生长受抑和危害,不是 IAA 合成受阻的结果,可能是因为低锌影响了蛋白质的合成等造成的。

缺锌与低锌处理 13 d 后 IAA 的测定结果表明,二品种茎叶的 IAA 含量都提高了,这是生长受抑产生的浓缩作用,也说明前期 IAA 含量的降低,只是个使生长受抑的启动信号,当生长受到抑制后,缺锌抑制生长产生的浓缩作用,比 IAA 合成的抑制作用更大,也说明缺锌抑制生长除 IAA 外还有其他原因。

表 2 缺锌与低锌处理后玉米体内 IAA 含量

Tab.2 The IAA content of zinc deficiency and low-zinc treatments in maize								ng/g
品种 Cultivar	处理天数/d Treatment day	茎叶 Stalk leaf			根 Root			
		0	1	2	0	1	2	
吉单 120 Jidan120	8	259.02c	413.23a	284.74b	68.26c	235.52a	162.94b	
	13	616.32b	1 290.50a	244.44de	160.65a	148.45a	77.07c	
辽单 22 Liaodan22	8	207.52d	262.24bc	206.43d	33.36d	133.77b	69.66c	
	13	276.87d	361.50c	207.56e	38.94d	98.34bc	103.95b	

注:处理相同时间、相同部位间比较的结果,以下同。  
Note: The results were comparisons of treatments after the same time in the same part ,the same as below.

2.3 缺锌与低锌对玉米体内 ABA 含量的影响

由表 3 可以看出,缺锌处理 8 d 后,敏感品种吉单 120 的根、茎叶 ABA 含量均降低,由于 ABA 有提高植物抗性的作用,所以这将使植物抗性降低,这是敏感品种吉单 120 缺锌后易于受害的原因之一;另外,ABA 含量降低有利于生长,这在缺锌条件下会相对加重缺锌危害。抗性品种辽单 22 缺锌后,虽然根的 ABA 含量降低,而地上部的 ABA 含量却升高,这有利于提高地上部的抗性,也有利于有机物向根部的运输,促进根的发育,因此,辽单 22 不易出现缺锌症状,表现为对缺锌抗性。缺锌处理 13 d 后吉单 120 根、茎叶的 ABA 含量都提高,这可能是生长受抑产生的浓缩作用与缺锌胁迫下 ABA 适应性合成的结果。辽单 22 的茎叶也有相同的趋势,但其根的 ABA 含量却显著降低,使得根的生长被促进。这表

表 3 缺锌与低锌处理后玉米体内 ABA 含量

Tab.3 The ABA content of zinc deficiency and low-zinc treatments in maize								ng/g
品种 Cultivar	处理天数/d Treatment day	茎叶 Stalk leaf			根 Root			
		0	1	2	0	1	2	
吉单 120 Jidan120	8	60.35c	95.42a	96.65a	12.27d	32.35a	24.96b	
	13	255.17b	284.00a	92.05de	28.95a	20.79c	8.48d	
辽单 22 Liaodan22	8	100.25a	85.52b	64.58c	10.32e	13.52cd	15.82c	
	13	125.23d	167.67c	62.95e	9.76d	22.33b	21.87bc	

2.4 缺锌与低锌对玉米体内 GA<sub>3</sub> 含量的影响

从表 4 可以看出,缺锌处理 8 d 时二品种根的 GA<sub>3</sub> 含量均提高,而到缺锌处理 13 d 时又都降低,

缺锌处理 13 d 后,两品种根的 IAA 含量变化较大,吉单 120 的 IAA 含量升高,这主要是根生长受抑产生的浓缩作用,而辽单 22 的 IAA 含量降低,与其根生长被促进产生的稀释作用有关。根的生长量与 IAA 含量呈负相关,表明影响根生长的原因不是其 IAA 刺激所致。可能是其他原因,如影响了蛋白合成等。低锌处理使二品种的 IAA 含量均提高,特别是缺锌敏感品种吉单 120 提高的更为显著。由此看来,低锌对玉米生长的抑制及危害与缺锌有着很大的不同,可能与 IAA 合成的关系并不密切。这里需要指出的是,敏感品种吉单 120 在缺锌处理 8 d 前,与对照间看不出任何区别,但处理 12 ~ 13 d 时,缺、低锌处理就会出现明显的受害症状。

明缺锌首先是使敏感品种地上部的 ABA 合成受阻(缺锌 8 d 时),植物抗性降低,因此较快地出现缺锌症状,而抗性品种缺锌却能刺激 ABA 的合成,使其抗性提高。

低锌对 ABA 合成的影响因不同品种而异,敏感品种吉单 120 低锌处理 8 d 时对茎叶的 ABA 含量没有显著影响,但使根内 ABA 的含量增加,这样虽然可提高其抗性,但试验证明却不利于根系的生长发育;低锌处理 13 d 时根、茎叶的 ABA 的含量均提高,这乃生长受抑之故。辽单 22 低锌处理 8 d 时,促进其茎叶的 ABA 合成,但抑制根的 ABA 合成,这对根的发育和锌的吸收是有利的,可能这是抗性品种抗缺锌能力强的一个重要机制。低锌处理 13 d 时使抗性品种辽单 22 茎叶的 ABA 含量提高,但对其根的 ABA 含量没有明显影响。

可能与调节根的代偿性生长有关,但缺锌时间过长超过植物自身的调节能力,则使 GA<sub>3</sub> 的含量降低;茎叶的 GA<sub>3</sub> 含量两个时期均是缺锌比正常供锌的

显著提高,说明缺锌抑制生长与 GA<sub>3</sub> 合成过程的关系并不密切;低锌对 GA<sub>3</sub> 含量的影响,在品种间表现出较大的差异,吉单 120 除了处理 13 d 时根的含量没有显著变化外,根、茎叶的 GA<sub>3</sub> 含量均显著提高;而低

锌则使辽单 22 根、茎叶的 GA<sub>3</sub> 含量显著降低,只有在处理 8 d 时有较明显提高;这可能是吉单 120 在低锌时生长严重受抑后产生的浓缩作用所致,说明 GA<sub>3</sub> 含量与生长量之间并非总是呈正相关关系。

表 4 缺锌与低锌处理后玉米体内 GA<sub>3</sub> 含量

Tab. 4 The GA <sub>3</sub> content in maize of zinc deficiency and low-zinc treatments								ng/g
品种 Cultivar	处理天数/d Treatment day	茎叶 Stalk leaf			根 Root			
		0	1	2	0	1	2	
吉单 120 Jidan120	8	65.10ab	54.85c	21.85e	19.74b	19.73b	4.11d	
	13	145.78a	133.06b	31.82d	25.31d	34.14bc	36.72ab	
辽单 22 Liaodan22	8	92.41a	46.13d	51.16cd	26.18a	30.46a	14.70c	
	13	76.00c	21.22e	29.94d	19.93e	33.46c	39.47a	

2.5 缺锌与低锌对玉米体内 GA<sub>4</sub> 含量的影响

表 5 表明,缺锌 8 d 后吉单 120 根、茎叶的 GA<sub>4</sub> 含量均降低,而辽单 22 的根、茎叶 GA<sub>4</sub> 含量却都升高,这可能是辽单 22 抗缺锌能力强、缺锌时生长受抑小的一个重要机制;低锌时吉单 120 根的 GA<sub>4</sub> 含量提高,茎叶却降低;而辽单 22 正好相反,根的 GA<sub>4</sub> 含量降低,茎叶的含量升高。这种 GA<sub>4</sub> 含量上的变化与品种对缺锌敏感性的关系如此密切,说明 GA<sub>4</sub> 在不同品种的耐缺锌机理方面发挥着重要作用,其详细机制有待进一步研究。

缺锌处理 13 d 后,吉单 120 根的 GA<sub>4</sub> 含量仍比正常供锌的低,而茎叶的 GA<sub>4</sub> 含量已明显高于正常供锌;辽单 22 根的 GA<sub>4</sub> 含量也已明显低于正常供锌,证明对缺锌不敏感基因与 GA<sub>4</sub> 合成受抑较慢有着密切的关系。吉单 120 缺锌 8 d 后即出现生长受抑,而辽单 22 缺锌 13 d 后才有轻微受抑,此时辽单 22 茎叶的 GA<sub>4</sub> 含量虽比正常供锌的高,若再延长处理时间估计也会降低。这表明,缺锌抑制了 GA<sub>4</sub> 的合成,抑制程度与品种的缺锌敏感性具有很好的相关性。低锌处理也有同样的规律。

表 5 缺锌与低锌处理后玉米体内 GA<sub>4</sub> 含量

Tab. 5 The GA <sub>4</sub> content in maize of zinc deficiency and low-zinc treatments								ng/g
品种 Cultivar	处理天数/d Treatment day	茎叶 Stalk leaf			根 Root			
		0	1	2	0	1	2	
吉单 120 Jidan120	8	110.86d	122.35c	160.96b	30.36d	75.44a	59.58b	
	13	238.30a	244.34a	123.79d	24.68d	66.09b	50.77c	
辽单 22 Liaodan22	8	138.07bc	214.04a	75.48e	68.50b	24.95e	45.88c	
	13	156.51b	142.12c	95.45e	13.07e	46.46c	93.58a	

2.6 施用 IAA 和色氨酸对玉米缺锌的恢复效果

2.6.1 对植株生长的恢复作用 由表 6 可以看出,就株高而言,吉单 120 缺锌后施用色氨酸和 IAA 均有一定的恢复作用,而低锌处理后则无效果;辽单

22 缺锌与低锌处理后用色氨酸和 IAA 均无明显的恢复作用,而且低锌处理后的株高比缺锌更低。由此进一步证明,缺锌对吉单 120 体内色氨酸和 IAA 合成的影响比辽单 22 更明显。

表 6 IAA 和色氨酸对缺锌与低锌处理后株高的影响

Tab. 6 Effects of IAA and tryptophan on plant height after zinc deficiency and low-zinc treatments								cm
	处理 Treatment							
	0	0-S	0-I	1	1-S	1-I	2	
吉单 120 Jidan120	20.292d	21.375c	23.083b	20.458cd	19.833d	20.792cd	49.667a	
辽单 22 Liaodan22	26.542bc	27.667b	26.417bc	24.792c	23.917c	25.042bc	55.417a	

注:0-S 0-(1-S 1-I) 为缺锌(低锌)处理 8 d 后添加 0.05 mg/L 色氨酸或 0.025 mg/L IAA,下同。  
Note:0-S 0-(1-S 1-I) mant 0.05 mg/L tryptophan of 0.025 mg/L IAA was added after zine deficiency( low-zine) treatment 8 days,the same as below.

2.6.2 对地上部干质量的恢复效果 由表 7 可以看出,各处理对茎叶干质量的影响与对株高的影响具有相同的趋势,只是影响程度更大,如,吉单 120 缺锌后施用色氨酸和 IAA,茎叶干质量增加的比例比株高更大。低锌处理后施用色氨酸和 IAA 对两个品种均无恢复作用,表明低锌处理已造成了不可逆的伤害。辽单 22 缺锌后用 IAA 恢复甚至还有副作用,可能的原因是,缺锌时体内 IAA 的合成减慢,

使生长减缓,这是对缺锌的一种适应,外加 IAA 会破坏这种适应机制,使植物受害更大,但也说明辽单 22 自身对缺锌的调节能力较强。一定时间的供锌后再缺锌(2-0)比一直缺锌生长更差,这在辽单 22 的茎叶干质量上表现更为突出,已达显著水平,证明供给一定的锌诱导植物对锌的需求,此时如遇缺锌会对植物产生更大的危害。

表 7 IAA 和色氨酸对缺锌与低锌处理后地上部干质量的恢复效果

Tab.7 Effects of IAA and tryptophan on dry weight of aerial parts after zinc deficiency and low-zinc treatments

	g/plant							
	处理 Treatment							
	0	0-S	0-I	1	1-S	1-I	2	2-0
吉单 120 Jidan120	0.205c	0.248b	0.267b	0.206c	0.191c	0.202c	0.827a	0.195c
辽单 22 Liaodan22	0.537b	0.491bc	0.448c	0.356d	0.357d	0.418cd	1.131a	0.329d

注: 2-0 为正常供锌 12 h 后再进行缺锌培养。  
Note: 2-0 meant cultivation under zine deficiency after normal-zinc 12 hours.

3 讨论

缺锌会使玉米体内的色氨酸等含量降低,但有时这种降低并不明显,甚至提高,这是由于缺锌时抑制生长产生的浓缩作用所致;缺锌对不同玉米品种激素含量的影响,取决于对生长抑制产生的浓缩作用与对激素合成抑制作用的综合结果。研究缺锌条件下植物激素与生长的因果关系一定要在处理足够时间后、未出现生长受抑前取样,当出现生长受抑后取样,要考虑生长受抑产生的浓缩作用。短期缺锌会使敏感品种的 ABA 含量降低,抗性品种的 ABA 含量升高,这可能是不同品种缺锌受害程度不同的重要原因,这一结果与前人的报道一致<sup>[4]</sup>。缺锌与低锌会使两品种玉米的 GA<sub>3</sub> 含量升高,但对 GA<sub>4</sub> 含量的影响,却因不同品种而异,缺锌使敏感品种的 GA<sub>4</sub> 含量降低,而使抗性品种的含量升高,这可能是不同品种缺锌时生长受抑程度不同的重要机制,但具体影响 GA<sub>4</sub> 合成的机理与步骤还有待进一步研究。缺锌后,敏感品种吉单 120 施用色氨酸和 IAA 均有恢复作用,但抗性品种辽单 22 缺锌后施用色氨

酸和 IAA 不但没有恢复作用甚至还有副作用,其机理有待进一步试验研究。

参考文献:

[1] Tsui C(崔微). The role of zinc in auxin synthesis in the tomato plant [J]. Amer Jour Bot, 1948, 35: 172-179.  
[2] Takaki H, Kushizaki M. Accumulation of free tryptophan and tryptamine in zinc-deficient maize seedlings [J]. Plant Cell Physiol, 1970, 11: 793-804.  
[3] Salami A U, Kenefick D G. Stimulation of growth in Zinc-deficient corn seedlings by the addition of tryptophan [J]. Crop Sci, 1970, 10: 291-294.  
[4] 吴耀荣, 谢旗. ABA 与植物胁迫抗性 [J]. 植物学通报, 2006, 23(5): 511-518.  
[5] 王景安, 张福锁. 一定的低锌比缺锌对玉米危害更大 [J]. 自然科学进展, 2002(2): 205-207.  
[6] 于自然, 黄熙泰, 李翠凤. 生物化学习题及实验技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 239.  
[7] 李宗庭, 周燮. 植物激素及其免疫检测技术 [M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1996: 114-203.