

福建省 16 种蔬菜对锌毒害敏感性的研究

陈玉真, 张 娟, 黄玉芬, 郭成士, 陈春乐, 王 果*

(福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002)

摘 要:采用水培试验研究了福建省 16 种常见蔬菜幼苗对不同浓度锌(0.05、0.5、1、2、4、8、16 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 32 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的敏感性。结果表明,黄瓜和空心菜的锌毒害表现症状最为明显,在添加 Zn 后第 2 d 表现出严重的毒害症状,快白菜、早熟五号、莴笋、油麦菜、芥菜、胡萝卜症状表现最不明显,添加 Zn 最高浓度处理 32 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 11 d 左右才出现轻微黄化现象。各蔬菜的地上部鲜重和根鲜重随营养液中锌浓度基本呈现先增加后降低的趋势,且与锌浓度呈现显著相关(快白菜的根鲜重除外)。黄瓜和早熟五号地上部鲜重的降低最显著,而茼蒿、胡萝卜、芥菜、快白菜地上部鲜重的降低最不显著。在症状表现和地上部鲜重降低显著的蔬菜种类中,选择地上部鲜重降低最显著(EC_{20} 值最小)的蔬菜作为对锌毒害最敏感的蔬菜品种,据此确定黄瓜为对锌毒害最敏感品种。

关键词:锌;毒害;蔬菜;敏感性; EC_{20}

中图分类号:X503.231 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)11-2185-07

The Sensibility to Zinc Toxicity of 16 Vegetables Commonly Cultivated in Fujian Province, China

CHEN Yu-zhen, ZHANG Juan, HUANG Yu-fen, GUO Cheng-shi, CHEN Chun-le, WANG Guo*

(College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: A series of hydroponics experiments with different zinc concentrations (0.05, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and 32 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) using the seedlings of 16 vegetable species commonly cultivated in Fujian Province, southeast of China, were conducted in order to compare the sensibility of the vegetable species to zinc toxicity and to select the species with the highest sensibility to zinc-toxicity. The results showed that the zinc-toxic symptoms appeared more obviously on cucumber and water spinach than the others. The symptoms appeared on cucumber and water spinach as early as 2 days after Zn was added. On the contrary, cabbages (Fast cabbage, Prematurity No.5), asparagus lettuce, lettuce, mustard leaf and carrot did not show apparent zinc-toxic symptoms, suggesting that these vegetables were more tolerant to zinc toxicity. These vegetables cultured in the solutions with 32 $\text{Zn mg}\cdot\text{L}^{-1}$ appeared chlorosis phenomenon until 11 days after the zinc was added. The fresh weights of shoot and root of all the vegetables increased in the beginning, and then decreased with increasing zinc concentrations in the solutions and showed significant correlations with the zinc concentrations in the solution, except the fresh weight of Fast cabbage. The shoot fresh weights of cucumber and Prematurity No.5 decreased the most significantly while those of crown daisy, carrot, leaf mustard and Fast No.5 decreased the least. The vegetable that had the most obvious zinc toxic symptoms and the lowest EC_{20} value (the zinc concentration at which the fresh shoot weight decreased by 20%) was selected as the most zinc-toxic sensible vegetable. Therefore, the most zinc-toxic sensible vegetable species was cucumber because its EC_{20} was only 3.12 $\text{Zn mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

Keywords: zinc; toxicity; vegetable; sensibility; EC_{20}

锌是植物必需的微量营养元素。缺锌会直接影响植物的生长代谢,导致叶片黄化或白化、叶片短小、花

而不实等症^[1],锌过量则对植物产生毒害效应,产生叶片黄化、植株矮化、根系生长受抑等症状,使产量降低甚至绝产^[2-3]。土壤锌过量一方面会抑制植物的生长,另一方面会引起农产品锌超标,进而威胁人畜健康^[4]。研究土壤锌对作物的毒害临界值是建立土壤锌环境质量基准的重要依据。不同作物对锌毒害的敏感程度不同,因此在研究区域性土壤锌对作物的毒害临界值

收稿日期:2011-03-30

基金项目:中央环保专项基金资助项目(财建[2007]661号)

作者简介:陈玉真,山东人,硕士研究生,主要从事环境污染生态学研究。E-mail:taotaoyuzhen@163.com

* 通讯作者:王 果 E-mail:gwang572003@yahoo.com.cn

时有必要先筛选对锌毒害较为敏感的植物品种,作为研究制定土壤锌毒害临界值的受体植物。罗丹等^[5-6]在研究不同蔬菜对钴和镍的毒害敏感性的基础上,研究了土壤钴和镍对蔬菜的毒害临界值,丁枫华等^[7-8]在筛选蔬菜对镉和砷的毒害敏感性的基础上研究了土壤镉和砷对蔬菜的毒害临界值,刘术新等^[9]则研究了不同蔬菜对硼毒害的敏感性。尽管有不少关于锌对植物毒害效应的文献,但尚未见到关于锌对不同作物毒害效应的较系统的敏感性筛选研究^[10-15]。为此,本文拟对福建省常见 16 种蔬菜进行水培锌毒害试验,筛选对锌毒害的高敏感蔬菜,为研究建立区域性土壤锌的毒害临界值奠定基础。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试蔬菜为:黄瓜(*Cucumis sativus* L.)、大白菜(*B. campestris* L. ssp. *Pekinensis* (Lour.)Olsson, 早熟五号、快白菜)、白菜(*B. campestris* L. ssp. *Chinensis* (L.)Makino, 四九菜心、油麦菜)、茼蒿(*Amaranthus mangostanus* L.), 莴笋(*Lactuca sativa* L. var. *angustana* Irish)、豇豆(*V. unguiculata* W. ssp. *Unguiculata* W.), 玉豆(*Phaseolus vulgaris* L.), 茄子(*Solanum. melongena* L.), 胡萝卜(*Daucus carota* L. var. *sativa* DC.), 茎用芥菜(*Lactuca sativa* L. var. *angustana* Irish)、空心菜(*Lpomoea aquatica* Forsk.)、叶用芥菜(*B. juncea* Coss.)、茼蒿(*Chrysanthemum coronarium* L. var. *spatisum* Bailey)。

1.2 试验方法

1.2.1 种子处理

挑选健康均匀饱满的种子,用去离子水清洗,然后用 1%次氯酸钠消毒 20 min,再用去离子水冲洗,放入已消毒的培养皿中,移入 25℃气候箱,8 h 后清洗,培养皿附有两张分析滤纸,种子放在滤纸上,稍加去离子水,再放回气候箱,使种子萌发。

1.2.2 育苗、移苗

待种子胚根长至 0.5 cm 左右时,挑选均匀者 150 粒拨入处理好的河流沙培养基中。出苗后每日早晚两次浇 pH5.80 的 1/4 荷格伦特(Hoagland)营养液,保持沙子湿润,利于小苗成长。待小苗培养到 2 叶 1 心时,选择长势均匀、根长和叶片大小相近的 80 株移栽到装有 2 L 的 pH5.80 的 1/4 荷格伦特(Hoagland)营养液的小桶中(每桶可以种两株),培养 1 周使小苗适应水环境,再更换为全营养液培养 3 d,让小苗适应全营养液环境,然后挑选长势一致、根长和株高几乎无差

别的幼苗 48 株分别添加不同浓度的 Zn。

1.2.3 试验设计

各处理培养液中锌浓度(以 Zn 计)分别为:0.05、0.5、1、2、4、8、16 mg·L⁻¹ 和 32 mg·L⁻¹,共 8 个水平。锌是植物微量必需元素,Hoagland 全营养液中锌的浓度 0.05 mg·L⁻¹,因此选此浓度水平为锌水培毒害试验的对照。添加的含锌试剂为:ZnSO₄·7H₂O(分析纯);每个处理设 6 个重复,每 3 d 换 1 次营养液。植物在盆栽房培养,温度 25~35℃,光源为自然光,所有水培随机排列,并每日通气 1 次。

1.3 样品的采集与分析

按不同浓度梯度添加锌后,每日观察并记录蔬菜外部形态(根、茎、叶)变化。培养 14 d 后收获。收获时拍摄照片,测量植株的根长、株高,称量地上部和地下部的鲜重。所有样品置于烘干箱 95℃杀青 30 min,65℃烘干至恒重,分别称量烘干重。

1.4 数据处理

原始数据的分析处理采用 Excel 软件和 DPS7.05 软件。最终结果是分别根据地上部鲜重、根鲜重与营养液 Zn 浓度间的最优方程计算对应的 EC₂₀ 值(比对照降低 20%的蔬菜长度及产量)。

2 结果与分析

2.1 锌对蔬菜的毒害症状

2.1.1 锌对蔬菜叶片的毒害症状

不同种蔬菜对锌毒害的敏感程度不一样,且相同浓度下各种蔬菜的表现症状不同。在低锌条件下,有些蔬菜品种表现出毒害症状,有些品种则无明显症状、甚至表现出促进作用(图 1)。在最高锌浓度(32 mg·L⁻¹)条件下,不同蔬菜最早出现毒害症状的部位不同。随时间的推移,蔬菜出现毒害症状的最低锌浓度也不尽相同。由表 1 可知,多数蔬菜品种在最高锌浓度(32 mg·L⁻¹)条件下首先出现毒害症状;山西小白菜次高锌浓度(16 mg·L⁻¹)条件下首先出现毒害症状(图 2)。各种蔬菜在高锌浓度条件下的毒害症状可分为 3 类。

第一类:毒害症状首先出现在顶端叶心及新叶,有 4 种表现:(1)顶端叶心及新叶脉间失绿、黄化(山西小白菜、四九菜心、快白菜、胡萝卜),在水稻和小麦新叶上也观察到此类症状^[16-17];(2)前期顶端叶心及新叶黄化,逐渐转化为新叶白化、顶端叶心皱缩、卷曲,不能正常抽出新叶(莴笋、油麦菜);(3)前期顶端叶心及新叶黄化,逐渐表现为新叶枯斑、叶缘失水呈灼伤

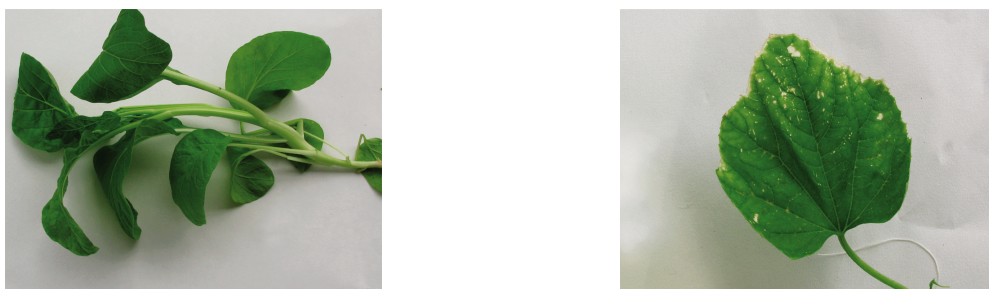
图 1 在 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 锌处理下四九菜心和黄瓜的症状表现Figure 1 The symptoms of *Brassica* and cucumber when exposed on $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ of Zn图 2 山西小白菜在 $16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 锌与 $32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 锌处理下症状表现Figure 2 The symptoms of cabbage when exposed on $16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ of Zn

表 1 各蔬菜对锌毒害的症状表现

Table 1 The symptoms of Zn toxicity of various vegetables

蔬菜种类	蔬菜品种	16、32 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理最早 出现毒害症状的时间/d	各浓度下植株最早 出现毒害症状部位	收获时植株受毒 害最严重的部位	收获时出现毒害的 最低浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
瓜类	黄瓜	2	整株死亡	基部老叶	2
	早熟五号	12	基部老叶	基部老叶	32
	山西小白菜	8	顶端新叶	基部老叶	4
	四九菜心	6	顶端叶心	顶端新叶	4
	快白菜	12	顶端新叶	顶端新叶	4
苋菜类	苋菜	4	基部老叶	顶端新叶	4
茼蒿类	茼蒿	11	顶端新叶	顶端新叶	4
	油麦菜	12	顶端新叶	顶端新叶	32
豆类	玉豆	3	茎基部	基部老叶	4
	豇豆	6	基部老叶	基部老叶	2
茄果类	茄子	9	基部老叶	基部老叶	4
根菜类	茎用芥菜	8	顶端新叶	顶端新叶	2
绿菜类	胡萝卜	10	顶端叶心	顶端叶片	16
	空心菜	2	基部老叶	中部叶片	2
	茼蒿	8	顶端叶心	顶端新叶	2
芥菜类	叶用芥菜	11	基部老叶	基部老叶	2

状、内卷干枯(茼蒿),在樟树、栎树幼苗上也观察到类似现象^[18];(4)新叶出现害症状的同时,基部老叶也出现枯斑、失水脱落现象(山西小白菜)。

第二类:症状首先出现在基部老叶,有两种表现:

(1)老叶有枯斑,叶缘失水呈灼伤状,叶片卷曲,干枯脱落(早熟五号、茄子、芥菜);(2)除老叶出现以上症状外,新叶也出现黄化或白化现象,伴有少量枯斑,叶心失水干枯(黄瓜、苋菜)。

第三类:症状最先出现在茎基部,茎基部呈现黑褐色,逐渐向上推移,老叶黄化,叶片有枯斑,叶缘失水,干枯,最后整叶脱落(玉豆、豇豆)。

2.1.2 锌对蔬菜株高的影响

锌对大部分蔬菜生长的影响表现为低浓度促进,高浓度抑制。胡萝卜、茄子、苋菜、黄瓜的最适生长浓度是 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,茼蒿、大白菜、豇豆、王妃的最适生长浓度是 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,山西小白菜、榨菜、油麦菜的最适生长浓度是 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,芥菜、空心菜、四九菜心、玉豆的最适生长浓度是 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。由表 2 可以看出,大部分蔬菜在高浓度锌条件下植株变矮,低浓度与高浓度间株高差异显著,像茄子、山西小白菜、茼蒿、黄瓜、菜心等。但也有部分蔬菜在高浓度锌条件下株高没有明显下降,胡萝卜在锌浓度 $8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 株高反而明显增加,空心菜则表现出先降低再升高再降低的趋势,榨菜、玉豆前 6 个浓度株高差异不显著,无明显促进增长现象,浓度为 $16, 32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时株高迅速降低。

2.1.3 锌对蔬菜根部的影响

根对锌毒害的响应程度较慢,不如地上部反应灵敏。一般在培养后期,才会有明显症状。部分蔬菜在高锌浓度下根部呈黑褐色。收获时,最高浓度 $32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 培养的蔬菜,侧根数量锐减,根部严重变黑,甚至出现

腐烂(图 3)。部分蔬菜根部无明显颜色变化,仅在高锌浓度条件下出现少量根毛,到收获时低锌浓度培养的蔬菜也出现根毛,但根毛数量要多于高浓度锌培养的蔬菜。高锌浓度条件下的根系生物量比对照小得多(表 3)。

在不同浓度的锌浓度条件下,大部分蔬菜根长呈现出低浓度促进、高浓度抑制的现象,但各处理间未能达到显著性水平,这是由于蔬菜幼苗初期的大部分营养是由胚乳供给的,加上种子个体之间又存在着差异。这也可能掩盖了锌毒害带来的影响。大部分蔬菜品种在最高锌浓度 $32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下根长大幅度下降,如芥菜、茼蒿、黄瓜、苋菜等,而茄子和茼蒿的根长无明显变化。

2.2 锌毒害敏感蔬菜的筛选

2.2.1 根据锌对蔬菜毒害的表观症状筛选

根据水培期各蔬菜对锌毒害的表观症状严重程度、出现毒害症状的最低浓度和最早时间,可将蔬菜对锌毒害的敏感程度分为 4 类(表 4)。

2.2.2 根据锌毒害蔬菜的 EC_{20} 值筛选

蔬菜的生产量主要用地上部鲜重或根鲜重来衡量。这两个指标与锌添加浓度之间的最优回归方程及相应的 EC_{20} 值见表 5。

表 2 各类蔬菜不同锌浓度下株高的比较

Table 2 Comparison of the stem lengths of the vegetables treated with different Zn concentrations

蔬菜品种	不同锌浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)处理下株高/cm							
	0.05	0.5	1	2	4	8	16	32
胡萝卜	20.93cd	27.28a	21.63bcd	25.40ab	22.58bcd	24.30abc	18.99d	20.40cd
芥菜	28.23a	29.84a	29.60a	32.81a	30.34a	28.39a	29.24a	26.12a
茄子	18.78abcd	20.62a	20.30ab	18.45abc	18.23bcd	17.53cd	17.05d	17.28d
山西小白菜	22.53a	21.63a	23.30a	22.05a	21.70a	18.33b	18.28b	16.82b
茼蒿	31.77a	32.17a	29.43ab	32.26a	29.20ab	26.82bc	28.60a	24.62c
茼蒿	19.57abc	18.67abc	21.53ab	19.83abc	23.17a	17.13bc	19.8abc	14.93c
油麦菜	27.04b	26.18bc	31.28a	28.50b	23.63d	23.40d	23.72cd	23.40d
榨菜	22.03a	22.40a	23.55a	23.55a	22.67a	21.68a	17.14b	16.26b
大白菜	22.33a	19.83ab	20.67ab	20.57ab	19.27b	16.10c	18.73b	15.33c
豇豆	54.17a	46.97ab	47.25ab	46.25ab	41.00ab	28.57b	30.67b	35.50ab
苋菜	31.03bc	45.00a	35.97ab	30.17bcd	20.27de	24.43cd	22.50cd	10.60e
黄瓜	65.33a	71.63a	71.33a	60.67a	48.63b	41.60b	18.33c	19.60c
空心菜	124.08ab	114.13abc	98.13abcd	134.70a	87.50bcd	96.30abcd	83.75cd	61.53d
四九菜心	30.83a	31.27a	29.60a	32.53a	28.68ab	25.13bc	26.47bc	22.87c
王妃	20.20a	20.12a	19.80ab	19.88ab	19.14ab	19.44ab	18.40b	16.00c
玉豆	134.30a	129.88a	132.48a	137.13a	134.38a	124.38ab	96.00ab	67.25b

注:同行数值间不同字母表明 LSD's 多重比较差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: The different letters in the same line show the significant differences of LSD's multiple comparisons($P < 0.05$). The Same below.

由表 5 可以看出,地上部鲜重与根鲜重对锌毒害的反应并不一致。黄瓜、早熟五号、山西小白菜、豇豆等的根鲜重的 EC_{20} 值显著小于地上部的 EC_{20} 值,而莴笋、玉豆、茼蒿等的根鲜重又普遍大于地上部的 EC_{20} 值,苋菜、芥菜类用两种指标计算出的 EC_{20} 值相差不大。由于在植物幼苗时期主要是以地上部鲜重来衡量蔬菜产量的,且地上部鲜重与营养液中添加锌的浓度相关性较好,故采用地上部鲜重作为蔬菜减产指标。根据地上部 EC_{20} 值将蔬菜对锌的敏感程度进行分类,见表 6。

由表 4 和表 6 可以看出,根据表观症状和生物量降低得出的敏感性不完全一样。四九菜心在症状表现上属于较敏感品种,而在地上部鲜重减产上则属于较不敏感品种;山西小白菜、莴笋在症状表现上属于较不敏感品种,但在地上部鲜重减产上则属于敏感品种。空心菜在表观症状上属于敏感品种,而在地上部鲜重减产上则属于较不敏感品种。根据各蔬菜对锌毒害的两方面的表现,确定黄瓜为对锌毒害的敏感蔬菜,胡萝卜、芥菜和快白菜为对锌毒害不敏感蔬菜。



图 3 对照与 $32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 锌处理下的根比较(左为玉豆,右为空心菜)

Figure 3 The comparison of the roots of bean and water spinach between the treatments of CK and $32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ of Zn

表 3 各类蔬菜不同锌浓度下根长的比较

Table 3 Root length of the vegetables treated with different Zn concentrations

蔬菜品种	不同 Zn 浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)处理下根长/cm							
	0.05	0.5	1	2	4	8	16	32
胡萝卜	21.43ab	31.08a	26.33ab	27.28ab	29.78a	25.48ab	22.03ab	19.45b
芥菜	14.88ab	15.66a	16.64a	15.26ab	13.90bc	14.01bc	13.86bc	12.68c
茄子	8.73a	13.25a	11.80a	13.40a	15.61a	13.58a	9.97a	10.13a
山西小白菜	31.50ab	30.30ab	33.50a	35.18a	34.97a	31.92a	26.05ab	22.66b
莴笋	21.22a	22.22a	20.80a	20.56a	21.87a	19.47a	21.93a	13.65b
茼蒿	27.23a	21.33a	26.33a	22.34a	23.17a	25.07a	24.67a	17.20a
油麦菜	17.96bc	18.38bc	21.40ab	20.45ab	22.28a	15.12cd	17.15bcd	13.58d
榨菜	30.80a	31.18a	29.80ab	33.28a	33.78a	29.83ab	22.94c	25.00bc
大白菜	20.50a	20.33a	17.17ab	13.93b	14.83ab	13.33b	16.83ab	13.50b
豇豆	19.83a	18.50ab	18.25ab	21.83a	15.67ab	17.83ab	20.17a	12.13b
苋菜	25.90ab	27.07ab	26.47ab	31.00a	25.97ab	20.27bc	21.03abc	10.50c
黄瓜	28.52a	30.83a	28.27a	28.33a	29.43a	28.00a	25.33a	15.00b
空心菜	24.48bc	30.98ab	30.65ab	34.40a	30.53ab	30.95ab	24.03bc	16.35c
四九菜心	25.67a	18.70b	26.10a	25.40ab	24.47ab	23.05ab	24.40ab	21.50ab
王妃	27.98ab	31.41a	24.24b	26.38b	24.84b	27.56ab	25.73b	28.10ab
玉豆	25.28bc	30.70a	26.58b	31.38a	29.03ab	29.23ab	25.75b	21.38c

3 结论

(1)蔬菜对锌毒害的症状表现可分为 3 类:第一类症状首先出现在顶端叶心及新叶,随时间推移表现为新叶白化、顶端叶心皱缩卷曲、不能正常抽出新叶、基部老叶出现枯斑和失水脱落现象;第二类症状首先出现在基部老叶,老叶有枯斑、叶缘失水灼伤、叶片卷曲、干枯、脱落;第三类症状最先出现在茎基部,茎基部慢慢呈现黑褐色,随时间推移黑褐色开始慢慢向上

推移,同时伴有老叶黄化,叶片有枯斑、叶缘失水、干枯,最后整片叶片脱落。

(2)锌毒害对大部分蔬菜株高的影响为低浓度促进、高浓度抑制,锌添加浓度与根长之间无显著相关。

(3)根据蔬菜对锌毒害的表观症状将其分为 4 类,其中黄瓜和空心菜为敏感品种。又根据地上部鲜重的 EC_{20} 值将蔬菜分为 4 类,其中黄瓜和早熟 5 号为敏感品种。综合考虑两方面影响,最终确定黄瓜为锌毒害的敏感蔬菜。

表 4 根据表观症状对蔬菜对锌的敏感性进行分类

Table 4 The classification of the sensibility to Zn toxicity of the vegetables based on toxic symptoms

类别	蔬菜品种	表观症状
敏感	黄瓜、空心菜	黄瓜添加毒害第 2 d $32\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理便有 1 株死亡,两株萎蔫。空心菜添加毒害第 2 d $32\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理的大部分植株基部老叶就开始出现大量枯斑。空心菜、黄瓜出现毒害症状的最低浓度都 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。两种蔬菜对锌毒害主要症状表现为:老叶布有枯斑,培养后期老叶失水干枯脱落,新叶黄化,最高浓度生长停滞甚至死亡,根部有腐烂现象。
较敏感	苋菜、玉豆、豇豆、四九菜心	这几种蔬菜出现毒害症状是在添加毒害 4 d 左右,苋菜、玉豆、四九菜心出现毒害症状的最低浓度 $4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,豇豆为 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。豆类的症状表现为:茎基部呈黑褐色,老叶前期布有枯斑,后期叶缘卷曲,失水,干枯,生长抑制。苋菜的症状表现为:新叶首先表现为黄花,后期表现为白化现象,叶缘卷曲,叶心不能正常抽出新叶。四九菜心症状表现为:新叶及叶心失绿黄化,生长受阻。
较不敏感	山西小白菜、茄子、榨菜、茼蒿	这几种蔬菜出现毒害症状是在添加毒害 8 d 左右,茼蒿、榨菜出现毒害症状的最低浓度为 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,山西小白菜、茄子出现毒害症状的最低浓度为 $4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。山西小白菜、茄子、榨菜的主要症状表现为:培养前期新叶黄化,后期老叶有少量枯斑,有少量叶片枯萎脱落。茼蒿的症状表现为:培养前期新叶黄化,后期新叶布有枯斑,叶尖失水枯萎卷曲。

表 5 各蔬菜与锌添加浓度的回归方程及相应的 EC_{20} 值

Table 5 The regression equations between the shoot fresh weight, root fresh weight and Zn concentrations in the solutions and the EC_{20} values

蔬菜品种	地上部方程	$EC_{20}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	地下部方程	$EC_{20}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
黄瓜	$Y^{**}=0.989e^{-0.068X}$	3.12	$Y^{**}=0.770e^{-0.057X}$	0.67
早熟五号	$Y^{**}=0.01X^2-0.052X+0.959$	3.26	$Y^{**}=0.820e^{-0.024X}$	1.03
山西小白菜	$Y^{**}=0.949e^{-0.041X}$	4.17	$Y^{**}=0.830e^{-0.033X}$	1.12
苋菜	$Y^{**}=1.009e^{-0.052X}$	4.46	$Y^{**}=0.992e^{-0.039X}$	5.52
茼蒿	$Y^{**}=0.001X^2-0.038X+0.953$	4.58	$Y^{**}=1.047e^{-0.029X}$	9.28
玉豆	$Y^{**}=0.966e^{-0.035X}$	5.39	$Y^{**}=1.020e^{-0.032X}$	7.59
豇豆	$Y^{**}=0.001X^2-0.039X+0.993$	5.82	$Y^{**}=-0.113\ln(X)+0.732$	1.83
四九菜心	$Y^{**}=0.971e^{-0.024X}$	8.07	$Y^{**}=0.785e^{-0.021X}$	0.90
茄子	$Y^{**}=0.966e^{-0.022X}$	8.57	$Y^{**}=1.176e^{-0.026X}$	14.82
油麦菜	$Y^{**}=0.951e^{-0.020X}$	8.65	$Y^{**}=0.981e^{-0.032X}$	6.37
榨菜	$Y^{**}=0.001X^2-0.055X+1.244$	9.83	$Y^{**}=-0.104\ln(X)+0.754$	1.56
空心菜	$Y^{**}=1.183e^{-0.036X}$	10.87	$Y^{**}=-0.003X^2-0.061X+1.350$	6.77
茼蒿	$Y^{**}=1.078e^{-0.024X}$	12.43	$Y^{**}=1.0283e^{-0.022X}$	21.47
胡萝卜	$Y^{**}=1.132e^{-0.027X}$	12.86	$Y^{**}=1.240e^{-0.041X}$	10.69
芥菜	$Y^{**}=1.176e^{-0.026X}$	14.82	$Y^{**}=1.086e^{-0.021X}$	14.55
快白菜	$Y^{**}=1.056e^{-0.017X}$	16.33	$Y=-0.002X^2-0.051X+1.064$	7.22

表 6 根据地上部 EC_{20} 值将蔬菜对锌的敏感性进行分类

Table 6 The classification of the sensibility to Zn toxicity of the vegetables based on EC_{20}

敏感品种	较敏感品种	较不敏感品种	不敏感品种
黄瓜、早熟五号	山西小白菜、苋菜、茼蒿、玉豆、豇豆	四九菜心、茄子、油麦菜、榨菜、空心菜	茼蒿、胡萝卜、芥菜、快白菜

参考文献:

- [1] 周青, 黄晓华, 张一. 镉对种子萌发的影响[J]. 农业环境保护, 2000, 19(3): 156-158.
ZHOU Qing, HUANG Xiao-hua, ZHANG Yi. Effect of cadmium on seeds germination[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2000, 19(3): 156-158.
- [2] 戴亨林, 徐卫红, 熊治廷, 等. 锌胁迫对大白菜养分含量及锌积累的影响[J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2006, 28(3): 410-413.
DAI Heng-lin, XU Wei-hong, XIONG Zhi-ting, et al. Effects of Zn stress on NPK uptake and Zn accumulation in 4 varieties of Chinese cabbage[J]. *Journal of Southwest Agricultural University(Natural Science)*, 2006, 28(3): 410-413.
- [3] 李文一, 徐卫红, 胡小凤, 等. Zn胁迫对黑麦草幼苗生长、生理生化及Zn吸收的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 190-194.
LI Wen-yi, XU Wei-hong, HU Xiao-feng, et al. Effects of Zinc stress on growth, physiological and biochemical and Zn uptake of Ryegrass (*Lolium perenne* L.)[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(5): 190-194.
- [4] 林君峰, 高树芳, 陈伟平, 等. 蔬菜对土壤镉铅锌富集能力的研究[J]. 土壤与环境, 2002, 11(3): 248-251.
LIN Jun-feng, GAO Shu-fang, CHEN Wei-ping, et al. Study on the concentrating characteristics of vegetables for Cd, Cu and Zn[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2002, 11(3): 248-251.
- [5] 罗丹, 胡欣欣, 郑海锋, 等. 钴对蔬菜毒害的临界值[J]. 生态杂志, 2010, 29(6): 1114-1120.
LUO Dan, HU Xin-xin, ZHENG Hai-feng, et al. Threshold values of cobalt toxicity to vegetables[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(6): 1114-1120.
- [6] 罗丹, 胡欣欣, 郑海锋, 等. 镍对蔬菜毒害临界值的研究[J]. 环境科学, 2010, 19(3): 584-589.
LUO Dan, HU Xin-xin, ZHENG Hai-feng, et al. Threshold values of nickel toxicity to vegetables [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(3): 584-589.
- [7] 丁枫华, 刘术新, 罗丹, 等. 23种常见作物对镉毒害的敏感性差异[J]. 环境科学, 2011, 32(1): 243-249.
DING Feng-hua, LIU Shu-xin, LUO Dan, et al. Different sensitivity of 23 common crop species to cadmium toxicity[J]. *Environmental Sciences*, 2011, 32(1): 243-249.
- [8] 丁枫华, 刘术新, 罗丹, 等. 基于水培毒性测试的砷对19种常见蔬菜的毒性[J]. 环境化学, 2010, 29(3): 439-443.
DING Feng-hua, LIU Shu-xin, LUO Dan, et al. Arsenic toxicity to nineteen vegetable species in solution culture[J]. *Environmental Chemistry*, 2010, 29(3): 439-443.
- [9] 刘术新, 郑海峰, 丁枫华, 等. 18种蔬菜品种对砷毒害敏感性的研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(10): 2017-2022.
LIU Shu-xin, ZHENG Hai-feng, DING Feng-hua, et al. The sensibility of 18 vegetable species to boron toxicity [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(10): 2017-2022.
- [10] 任继凯, 陈清朗, 陈灵芝, 等. 土壤中镉、铅、锌及其相互作用对作物的影响[J]. 植物生态学与地植物学丛刊, 1982, 6(4): 320-329.
REN Ji-kai, CHEN Qing-lang, CHEN Ling-zhi, et al. The effect of cadmium, lead, zinc in soil and their interaction on crop plants[J]. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1982, 6(4): 320-329.
- [11] 李惠英, 陈素英, 王翥. 铜、锌对土壤-植物系统的生态效应及临界含量[J]. 农村生态环境, 1994, 10(2): 22-24.
LI Hui-ying, CHEN Su-ying, WANG Huo, et al. Study on the fates of Cu and Zn in soil-plant system as well as their critical contents[J]. *Rural Eco-Environment*, 1994, 10(2): 22-24.
- [12] 杨红飞, 严密, 姚婧, 等. 铜、锌污染对油菜生长和土壤酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(7): 1484-1490.
YANG Hong-fei, YAN Mi, YAO Jing, et al. Impact of Cu and Zn pollution on rape growth and soil enzyme activity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(7): 1484-1490.
- [13] 徐卫红. 锌胁迫下不同植物品种及根际效应及锌机理研究[D]. 武汉: 武汉大学博士论文, 2005.
XU Wei-hong. Effects of Zn stress on rhizospheric mechanism and Zn accumulation in different species and varieties of plant[D]. Wuhan: Wuhan University, 2005.
- [14] Li T Q, Yang X E. Zinc adsorption and desorption characteristics in root cell wall involving zinc hyperaccumulation in *Sedum alfredii* hance[J]. *Zhejiang Univ Sci B*, 2007, 8(2): 111-115.
- [15] Wang H, Jin J Y. Effects of zinc deficiency and drought on plant growth and metabolism of reactive oxygen species in Maize (*Zea mays* L.)[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2007, 6(8): 988-999.
- [16] 韩金玲, 李雁鸣, 马春英. 锌对作物生长发育及产量的影响[J]. 河北科技师范学院学报, 2004, 18(4): 72-75.
HAN Jin-ling, LI Yan-ming, MA Chun-ying. The effect of zinc on crop growth and yield[J]. *Journal of Hebei Normal University of Science & Technology*, 2004, 18(4): 72-75.
- [17] 郑小林, 赖雨玲. 水培浓度对水稻生长发育的影响[J]. 湛江师范学院学报(自然科学版), 1999, 20(1): 61-64.
ZHENG Xiao-lin, LAI Yu-ling. Effects of Zn concentration in solution culture on the growth and development of rice[J]. *Journal of Zhanjiang Normal College(Natural Science)*, 1999, 20(1): 61-64.
- [18] 王利宝, 张宁华, 鄂建华. Pb、Zn等重金属对樟树、栎树幼苗生长的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(2): 44-47.
WANG Li-bao, ZHANG Ning-hua, E Jian-hua, et al. Effects of heavy metals lead, zinc and copper on young seedling growth of *Cinnamomum camphora* and *Koeleria paniculata*[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2010, 30(2): 44-47.