

23 种常见作物对镉毒害的敏感性差异

丁枫华^{1,2}, 刘术新³, 罗丹¹, 王果^{1*}

(1. 福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002; 2. 丽水学院, 丽水 323000; 3. 丽水职业技术学院, 丽水 323000)

摘要:通过水培苗期毒性试验,研究了 9 个科 23 种常见作物幼苗对镉毒害敏感性的差异. 结果表明,大部分供试植物在 0.1 ~ 0.25 mg·L⁻¹ 镉浓度条件下开始出现表现毒害症状. 不同种类作物所表现的毒害症状有较大的差异. 作物地上部鲜重对较低浓度镉(0.1 ~ 0.5 mg·L⁻¹) 胁迫的响应比其他生长性状指标更加敏感和稳定,可作为植物对镉敏感性的筛选指标. 不同种类作物 EC₂₀ 值(地上部生物量降低 20% 时培养液中 Cd 的浓度)的变化范围为 0.03 ~ 24.67 mg·L⁻¹. 根据表现毒性响应端点和 EC₂₀ 对作物镉毒害敏感性分别进行分类,2 种分类结果基本一致. 大白菜、油白菜、油麦菜、芥菜、小白菜属于镉敏感作物,可以作为确定土壤和植物中镉的毒害临界值的生态毒性受体以及土壤镉污染的监测植物. 黄瓜为镉抗性较强作物.

关键词: 镉; 作物; 毒害; 敏感性; EC₂₀

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)01-0277-07

Different Sensitivity of 23 Common Crop Species to Cadmium Toxicity

DING Feng-hua^{1,2}, LIU Shu-xin³, LUO Dan¹, WANG Guo¹

(1. College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Lishui University, Lishui 323000, China; 3. Lishui Vocational and Technical College, Lishui 323000, China)

Abstract: Cadmium toxicity to 23 kinds of commonly cultivated crops of 9 families was studied by solution culture with different cadmium concentrations. Most of the studied crop seedlings showed cadmium toxicity symptoms with 0.1-0.25 mg·L⁻¹. The toxic effects of cadmium on the crops were quite different. The effect of Cd on shoot biomass was more obvious and stable than the other parameters at low Cd concentrations (0.1-0.5 mg·L⁻¹). Therefore, shoot fresh weight was selected to be the indicator of plant sensitivity to Cd. The EC₂₀ (effective concentration causing a 20% inhibition of shoot biomass) values of Cd for the studied crops ranged from 0.03 to 24.67 mg·L⁻¹. The Cd sensitivity of the crops is classified according to the response endpoint of apparent symptoms and the EC₂₀ values. Chinese cabbage, brassica napus, youmai lettuce, mustard and pakchoi are sensitive species to Cd toxicity that can be used as ecological receptors to determine the critical value of the toxicity of soil Cd to crops or as monitoring crop species of soil Cd pollution. Cucumber is most tolerant to Cd toxicity among the studies crops.

Key words: cadmium; crop; toxicity; sensitivity; EC₂₀

土壤中的镉(Cd)通过在土壤-粮食和蔬菜-人食物链中的积累、迁移和传递,最终将给人体健康带来严重的威胁. 因此有必要研究镉对不同植物物种的毒性效应的差异,通过生态风险评估及控制,以减轻土壤中镉的影响和危害. 目前关于镉胁迫下植物的生理生化效应的报道较多,而在植物生物敏感性方面的研究相对缺乏^[1-6]. 宗良纲等^[1]通过土壤盆栽试验研究了镉对 3 种叶类蔬菜(青菜、白菜、菠菜)生长的影响. Metwally 等^[2]通过水培和砂培试验研究镉胁迫下 10 种豌豆基因型幼苗的毒害效应. Yu 等^[3]以盆栽试验研究了镉在 43 个水稻品种中的积累以及筛选水稻镉安全品种的可行性. 肖美秀等^[4]采用水培营养液加镉法,依据 0.2 mg·L⁻¹ 镉处理下水稻幼苗镉的耐性指数差异对 72 个水稻品种(系)进行不同抗性种质资源的筛选. 对于已有的报道^[1-6],由于毒性测试方法和目的的差异,结果间也不宜直接进行比较. 因此,研究在同一条件下镉对

不同植物物种的生物敏感性效应,并通过一定的指标筛选出镉敏感植物和耐性植物的工作将具有一定的意义.

本研究在 9 个植物科中选取 23 种人们日常食用量较大的作物作为试验材料,通过苗期水培毒理学试验,研究作物幼苗在镉胁迫下生长性状敏感性的差异. 筛选出的镉高敏感作物,可作为确定土壤和植物中镉的毒害临界值的生态毒性受体(ecological receptor),同时也可作为土壤镉污染监测植物.

1 材料与方法

1.1 供试材料

收稿日期: 2010-06-23; 修订日期: 2010-08-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41071218)

作者简介: 丁枫华(1970 ~), 女, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为土壤环境化学和污染生态, E-mail: dfh0578@163.com

* 通讯联系人, E-mail: gwang572003@yahoo.com.cn

供试作物(种子源自福建省种子分公司蔬菜部和福建省金山种子分公司):禾本科:水稻(*Oryza sativa* 早稻、中稻、晚稻 1、晚稻 2);十字花科:大白菜(*Brassica pekinensis*)、青菜(*Brassica chinensis* 菜心、小白菜、油白菜)、芥菜(*Brassica juncea*)、甘蓝(*Brassica oleracea* 花椰菜、结球甘蓝)、萝卜(*Raphanus sativus* 白萝卜、红萝卜);茄科:番茄(*Lycopersicon esculentum*)、茄子(*Solanum melongena*)、辣椒(*Capsicum annuum*);菊科:茼蒿(*Lactuca sativa* 生菜、油麦菜);旋花科:蕹菜(*Ipomoea aquatica*);豆科:豇豆(*Vigna unguiculata* 红豇豆);伞形科:芹菜(*Apium graveolens*);苋科:苋菜(*Amaranthus mangostanus*);葫芦科:黄瓜(*Cucumis sativus*)。

供试试剂: $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5 \text{H}_2\text{O}$ (分析纯,国药集团化学试剂有限公司)。

1.2 实验方法

在参照世界标准化组织(ISO)根长试验(ISO 11269-1-1993)^[13]和新梢生长试验(ISO 11269-2-2005)^[14]的基础上,根据水培试验的特点适当调整。23 种供试植物分别选取子粒均匀、饱满的种子约 200 粒,依次用自来水清洗,1% 次氯酸钠消毒 20 min,去离子水清洗。取直径 10 cm 的玻璃培养皿,将适当浸泡的种子放入培养皿中。置于 HP400GS 型全智能人工植物气候箱($22^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, $45\% \pm 7\%$ RH, 避光)中催芽。待种子露白($\leq 2 \text{ mm}$)后挑选长势一致的植入直径为 5 cm 的沙穴盘内。自然光照,早晚间隔 12 h 两次浇 1/4 Hoagland 营养液($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 1 180.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 KNO_3 510.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 490.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 KH_2PO_4 136.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、Fe-EDTA 13.02 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 H_3BO_3 2.86 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 1.81 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.08 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.22 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{H}_2\text{MoO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 0.09 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。营养液用水为去离子水,各试剂均为分析纯。培养到 2 叶 1 心,再选择长势均匀的小苗移栽到装有 500 mL 1/4 Hoagland 营养液的 PVC 罐(高 14 cm,直径 7.5 cm,不透光)中,稳定 7 d 使幼苗适应水环境,再更换为全营养液培养 3 d,让幼苗适应全营养液环境,长势平稳,受外界影响较小,此时开始分别添加镉处理。

根据预试验结果及重金属毒性测试的相关标准^[12~15],镉处理浓度设为 0、0.1、0.25、0.5、1.0、3.0、5.0、10.0、20.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,每个处理设 3 个重

复,每 3 d 换一次营养液。营养液用 1 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaOH 或 HCl 溶液调节 pH 值至 5.8,植物在温室培养,温度 $22^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$,光源为自然光,所有水培罐每天随机排列,并每天通气一次,每次通气 10 min。培养期间所有试验条件保持一致。处理 2 周后收获^[7~11]。

添加镉处理后的培养期间,每天监测记录作物表观生物指标(根、茎、叶)变化。收获时量株高和根长,将植物地上部和根部分开,称地上部鲜重和根鲜重。置于烘箱 95°C 杀青 30 min, 65°C 烘干至恒重,分别称量烘干重。为确保试验结果的准确可靠,试验全过程处于质量受控状态。

1.3 样品分析

参考 USEPA 等的方法^[15~17],所受观察的响应端点(endpoint)包括:生长指标,如根伸长、株高、生物量以及死亡;表观生理指标,如生长须根,根和叶片颜色以及叶片脱落。考虑同一种植物具有多个响应端点,而这些响应端点的毒性阈值各不相同,因此可以从表观毒性相对最敏感的响应端点来判断植物对镉毒害的测试效应。

参考文献[18~20]的方法,以重金属对植物生长的抑制效应浓度(effective concentration, EC_x)来定量化的评价其受毒害状况。依据模拟曲线的置信区间及相关性对不同种类植物进行镉胁迫的剂量-效应较优模型拟合,依据各生长毒性效应指标对镉毒害的响应差异确定合理的 EC_x 。

根据对植物幼苗镉毒害效应(剂量-效应关系)的表观描述(endpoint)和数学描述(EC_x),从 2 个方面来判断植物对镉毒害的敏感性。

参考 Metwally 等^[2]的方法,将胁迫条件下生物各性状指标统一以耐性指数表示,计算方法如下:

$$\text{耐性指数} = (\text{处理}/\text{对照}) \times 100\%$$

试验数据的处理和分析采用 DPS 软件和 Maple 7.0 软件。

2 结果与讨论

2.1 镉对作物的毒害效应

2.1.1 镉对作物的表观毒害症状

在设定的镉胁迫浓度区间(0.1 ~ 20.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)内,不同种类作物或同一作物不同部位所表现出来的表观毒害症状和敏感性都存在较大区别。如在 0.1 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 镉处理 8 d 后大白菜、油白菜、蕹菜、萝卜、芥菜首先响应,表现出新叶黄化症状。在镉 0.25 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理下各作物对镉的毒性响应差

异较大(图 1),如十字花科的小白菜、花椰菜,菊科的油麦菜、生菜及禾本科的水稻等植物幼苗都先后开始出现不同程度的新叶黄化现象,但黄瓜、芹菜等没有异常症状,甚至长势比对照更好. 在镉($0.5 \sim 5.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)区间处理 7 d 后,随着镉胁迫浓度的增加和胁迫时间的延长,大多数作物长势受抑和新叶脉间失绿黄化的症状越来越严重,侧根须根亦明显增多,而主根生长显著受抑制. 因此 $0.1 \sim 0.25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 是在水培条件下大部分作物最敏感的反应端点. 有研究认为镉胁迫下植物体内细胞核、核仁遭受破坏,染色体的复制及 DNA 合成受阻,核酸代谢失调^[21~24]. 并且镉直接干扰叶绿素生物合成,破坏光合器官及色素蛋白复合物^[25,26]. 这些报道较好地解释了本研究中大部分作物在镉胁迫下叶片失绿

黄化,根系生长受抑制,生物量下降,植株矮小等毒害症状. 一般认为镉对植物直接的伤害首先表现在根部^[1,6],但测试结果表明植物地上部分的表观毒害响应相对根部更容易判断. 在试验中还发现茄科的辣椒和豆科的红豇豆在镉低浓度($0.1 \sim 0.25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)胁迫时症状并不显著,但在 $20.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 镉处理 2 d 后下部叶失水萎蔫,根部组织坏死并呈黑腐状,8 d 后整株死亡. 表现为其在镉高浓度($10.0 \sim 20.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)胁迫下毒害响应敏感度比其他科属的作物更高. 而黄瓜在整个镉胁迫浓度区间($0.1 \sim 20.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)内都表现为生长良好,表观抗耐性很强,各生物指标的响应端点都不明显. 这些结果表明不同种类作物的表观毒害响应端点可以作为初步筛选镉毒性测试效应的指标.

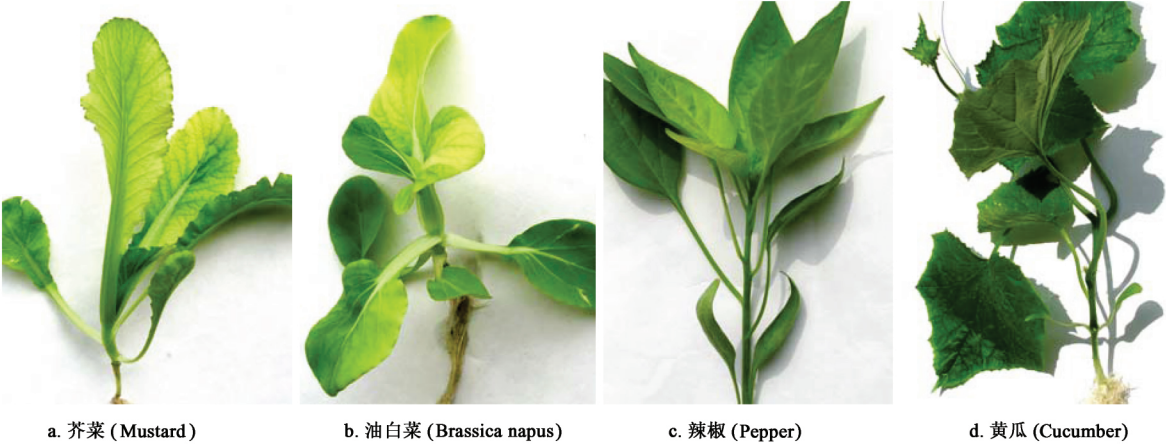


图 1 $0.25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 镉处理 15 d 的植株幼苗的毒害症状

Fig. 1 Cadmium toxicity symptoms of some seedlings after 15 days culture at $0.25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$

2. 1. 2 镉对作物生长状况的影响

对比不同浓度镉胁迫下不同作物的株高、根长、地上部生物量(鲜重、干重)和根部生物量(鲜重、干重)6 个生长效应指标的耐性指数并作相关分析. 发现低浓度的镉($0.1 \sim 0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)对部分作物如黄瓜、萝卜等的生长有一定的促进作用. 但随着镉处理浓度的进一步升高,作物株高、根长以及生物量的受抑程度也逐渐增大,但影响程度因作物种类不同而异. 如表 1 所示,结球甘蓝根鲜重耐性指数在 $139.18\% \sim 48.05\%$ 之间变化,而芥菜根鲜重耐性指数的变幅为 $104.20\% \sim 17.65\%$,显然芥菜受抑比较明显. 辣椒、芥菜、早稻的地上部鲜重与镉处理浓度间的模拟关系曲线也显示了不同种类作物对镉的毒害响应机制的差异(图 2). 而同种作物不同的生长指标对镉的毒害响应亦各不相同.

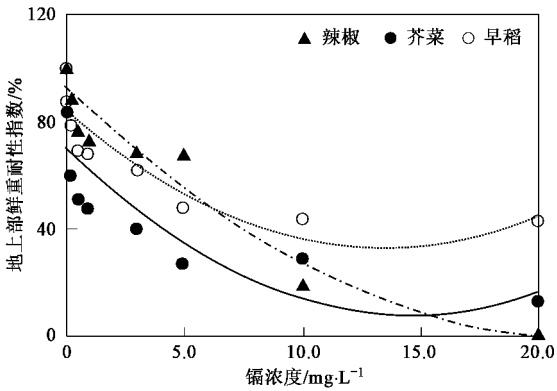


图 2 作物地上部鲜重耐性指数与镉的关系

Fig. 2 Relationships between the tolerance index of shoot fresh weight of crops and cadmium concentration

如在 $0.1 \sim 20.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 镉处理下,芥菜株高、根长、

表 1 不同镉处理浓度下芥菜和结球甘蓝的耐性指数/%

Table 1 Tolerance index to cadmium toxicity for mustard (*Brassica juncea*) and cabbage (*Brassica oleracea*)/%

c(Cd) /mg·L ⁻¹	芥菜				结球甘蓝			
	株高	地上部鲜重	根长	根鲜重	株高	地上部鲜重	根长	根鲜重
0	100.00 ± 4.54a	100.00 ± 9.34a	100.00 ± 11.16a	100.00 ± 7.37a	100.00 ± 6.99a	100.00 ± 8.29a	100.00 ± 13.54a	100.00 ± 5.95a
0.1	98.42 ± 4.86a	93.32 ± 2.79a	93.93 ± 3.88a	104.20 ± 12.79a	89.87 ± 3.96a	90.72 ± 10.81a	105.70 ± 15.27a	139.18 ± 12.04b
0.25	84.01 ± 8.84b	59.53 ± 11.53b	81.65 ± 10.90a	84.45 ± 11.53b	89.87 ± 3.08a	97.88 ± 5.32a	107.02 ± 3.92a	130.72 ± 12.91b
0.5	79.44 ± 5.48b	50.61 ± 12.27b	86.72 ± 0.73a	48.86 ± 12.27c	88.11 ± 3.50a	82.09 ± 7.59b	94.09 ± 10.52b	117.23 ± 4.33c
1.0	72.94 ± 6.54b	47.26 ± 8.52b	71.40 ± 6.84b	43.61 ± 13.52c	83.11 ± 4.63a	74.33 ± 7.56b	93.55 ± 11.45b	91.84 ± 4.71d
3.0	69.14 ± 9.65b	38.96 ± 3.74b	70.64 ± 13.22b	41.73 ± 8.59c	84.97 ± 11.36a	80.93 ± 2.79b	90.58 ± 12.95b	92.69 ± 10.69d
5.0	56.59 ± 7.01c	26.71 ± 5.79c	75.39 ± 12.98b	37.21 ± 5.79c	82.16 ± 4.59a	81.78 ± 12.39b	75.90 ± 8.39c	81.75 ± 8.97d
10.0	50.62 ± 2.29c	28.35 ± 5.05c	65.45 ± 2.99b	36.74 ± 5.05c	69.16 ± 4.04b	55.71 ± 10.52c	75.33 ± 8.81c	56.45 ± 4.05e
20.0	41.13 ± 2.11c	12.62 ± 1.01d	61.65 ± 2.95b	17.65 ± 1.01d	41.85 ± 2.33c	14.05 ± 6.14d	67.16 ± 3.35c	38.05 ± 0.61f

地上部鲜重、根鲜重的耐性指数变幅分别为 98.42% ~ 41.13%、93.93% ~ 61.65%、93.32% ~ 12.62%、104.20% ~ 17.65%。可见作物生物量对镉毒害的敏感性要相对高于株高和根长。

相关分析表明,所有受测试作物的地上部鲜重以及 95.65% 的作物株高和地上部干重与镉处理浓度间呈显著 ($p < 0.05$) 或极显著 ($p < 0.01$) 的负相关。而分别有 17.39%、26.09%、37.38% 的作物根部指标(根长、根鲜重、根干重)没有与镉处理表现出显著的相关性。这可能与根系在水环境中更容易受到如空间、水溶态氧等不稳定因素的干扰有关。因此采用地上部生物量作为判断植物镉毒害效应的指标比根部生物量更加合理。

比较不同浓度镉胁迫下作物的根冠比(根干重/地上部干重),发现在不同镉处理浓度区间,不同种类作物的响应情况有较大差异(图 3)。当镉处理浓度低于 0.5 mg·L⁻¹时,供试的所有作物的根冠比随镉处理浓度的升高而升高。说明较低浓度的镉对作物地上部生物量的影响要比根部显著。这可能是因为较低浓度镉胁迫下根系活力降低,抑制了营养物质向地上部的输送,而另一方面根部的生长点受毒害被抑制的同时反而刺激了须根侧根的生长;当镉浓度在 0.5 ~ 5.0 mg·L⁻¹区间时,大部分植物的根冠比随处理浓度的升高而出现不同程度的降低。说明在较高浓度的镉胁迫下作物根部受毒害的情况比地上部更加严重。当镉处理浓度超过 5.0 mg·L⁻¹时,不同作物种类的毒害响应出现了分化。水稻、芹菜、苋菜、蕹菜、黄瓜等的根冠比继续随镉处理浓度的升高而平缓降低,表现了高浓度镉胁迫下较强的抗耐性。芥菜、大白菜等十字花科的植株幼苗根冠比大都升高,表明地上部受害更加严重,对高浓度镉表现的比较敏感。红豇豆、辣椒等的根冠比随镉处理浓度升高而出现大幅度升高,表明它

们对高浓度的镉非常敏感。考虑土壤中的镉污染通常处于较低区间,低浓度的镉对植物地上部生物量的影响较根部明显,而在实际农业生产中地上部鲜重比干重更具意义,因此确定以地上部鲜重作为判断植物对镉毒害敏感性的首选指标。

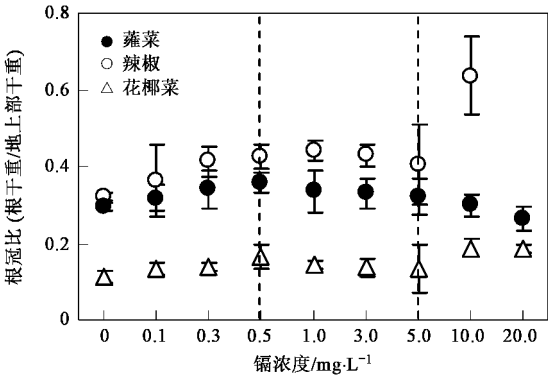


图 3 植物根冠比与镉处理浓度的关系
Fig. 3 Correlations between root-shoot ratios and cadmium concentrations

2.2 作物镉毒害的效应浓度

由于不同作物不同的生长指标对重金属的毒性响应端点各不相同,基于保护生态的目的,原则上最敏感的响应端点即为该作物重金属的毒害阈值。有不少研究者以重金属对植物生长的抑制效应浓度(EC_x)来判断其受毒害状况^[7-11,18-20]。如 Rooney 等^[20]分别以引起大麦根伸长率和番茄地上部生物量降低 50% (EC₅₀) 时土壤中镍的含量作为毒害衡量指标。罗丹等^[9,10]以土培条件下蕹菜和黄瓜地上部分生物量减少 10% (EC₁₀) 时的土壤镍、钴浓度作为其毒害临界值。通常采用的作物生态效应法即以农作物产量减少 10% (EC₁₀) 的土壤有害物质的浓度作为其在土壤中的最大允许浓度。考虑本试验研究的是基于水培条件下镉对植物幼苗的毒害敏感

性差异,镉低浓度胁迫时,大白菜、油麦菜、芥菜等较敏感的作物幼苗已明显受到毒害,生物量减少就可达 10% 以上,若采用 EC_{10} 将由于浓度过低而使研究结果的可靠性大为降低. 因此选定除黄瓜之外的其余 22 种试验作物地上部鲜重的 EC_{20} 和 EC_{50} 作比较(图 4),地上部鲜重的 EC_{20} 阈值变化区间为 $0.08 \sim 3.19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,阈值的差异度为 $3.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,中值为 $0.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 而 EC_{50} 的阈值变化区间则为 $0.68 \sim 20.66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,差异幅度达 $19.98 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,中值是 $4.90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 并且不少作物地上部生物量减少 50% 时,镉的毒害已经十分严重,显然选择 EC_{20} 作为水培测试中植物镉毒害的衡量指标比 EC_{50} 更合适. 同样比较 22 种作物株高和地上部鲜重的 EC_{20} 值(图 5),作物株高 EC_{20} 的阈值变化区间为

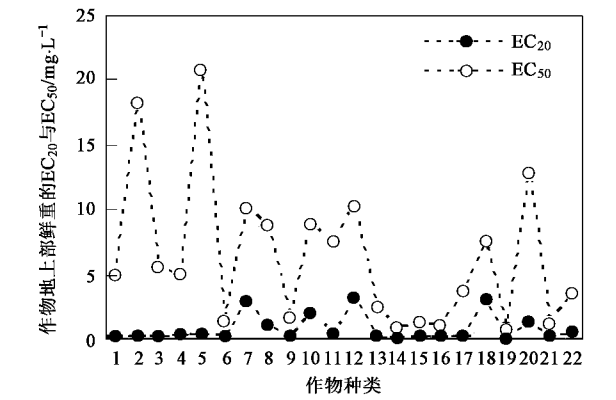


图 4 不同作物地上部鲜重对镉毒害的 EC_{20} 和 EC_{50}

Fig. 4 EC_{20} and EC_{50} for the shoot fresh weight of crops to cadmium toxicity

$0.31 \sim 7.27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 差异幅度达 $6.69 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 中值为 $0.63 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 大多数作物株高的 EC_{20} 要大于地上部鲜重的 EC_{20} , 这进一步证实了作物地上部鲜重对镉的毒性响应比株高更加敏感. 综合以上分析确定选用作物地上部鲜重的 EC_{20} 值做为镉敏感作物的筛选指标.

2.3 镉敏感作物种类的分类

2.3.1 依据表观毒害响应端点对作物镉敏感性的分类

根据水培期间各种作物在镉胁迫下出现表观毒害的响应端点,将作物对镉毒害的敏感性进行了分类,大致分为 4 类:镉敏感作物、镉较敏感作物、镉较不敏感作物、镉不敏感作物(表 2).

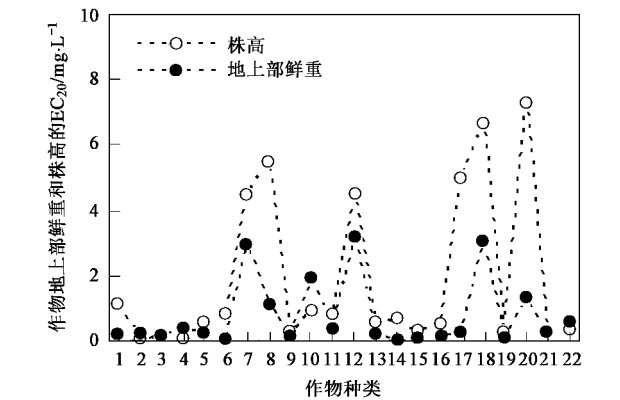


图 5 不同作物地上部鲜重和株高对镉毒害的 EC_{20}

Fig. 5 EC_{20} for the shoot fresh weight and plant height of crops to cadmium toxicity

表 2 根据表观毒害响应端点对作物镉敏感性的分类

Table 2 Classification of cadmium sensitivity to crops according to the response endpoint of toxicity symptoms

分类	作物种类	表观毒害响应端点
镉敏感作物	大白菜、油白菜、蕹菜、油麦菜、芥菜、小白菜	毒害响应的最低浓度为 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 处理 7 d 新叶失绿黄化, $0.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 镉处理 7 d 长势开始受抑, 侧根须根增多
镉较敏感作物	番茄、茄子、生菜、菜心、花椰菜、早稻、中稻、晚稻 1、晚稻 2、红豇豆	毒害响应的最低浓度为 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 处理 7 d 新叶开始黄化, 侧根须根增多; $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 镉处理 4 d 长势开始受抑
镉较不敏感作物	结球甘蓝、萝卜、红萝卜、辣椒、苋菜	毒害响应的最低浓度为 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 处理 7 d 新叶开始黄化; $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理 7 d 长势开始受抑; $20.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上处理 10 d 下部叶枯萎或整株死亡
镉不敏感作物	芹菜、黄瓜	毒害响应的最低浓度为 $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 处理 7 d 新叶开始黄化, 侧根须根增多; $10.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理 7 d 长势开始受抑制

2.3.2 依据地上部鲜重的 EC_{20} 值对作物镉敏感性的分类

在对各作物地上部鲜重耐性指数进行一致性检验及处理间差异显著性分析的基础上,以模拟曲线 95% 的置信区间拟合镉和作物间剂量-效应的相关模型. 不同种类作物对镉毒害响应的差异也造成了

拟合方程的不一致. 通过回归方程分别计算各种作物地上部鲜重减少 20% 时培养液中镉的浓度 (EC_{20}), 并对 23 种植物的 EC_{20} 值进行多目标聚类(表 3). 结果表明,油麦菜、大白菜、茄子、芥菜、油白菜、小白菜为镉敏感作物,黄瓜为镉不敏感作物. 大部分作物的分析结果与表 2 分类基本一致.

表 3 不同种类作物地上部鲜重耐性指数与镉浓度间关系及相应的 EC₂₀ 分类¹⁾

Table 3 Correlations between different crop species of shoot fresh weight tolerance index and cadmium concentration and corresponding EC ₂₀				
分类	植物	拟合方程	R ²	EC ₂₀ /mg·L ⁻¹
镉敏感植物	油麦菜	$y^{**} = -0.092 \ln(x) + 0.478$	0.837	0.03
	茄子	$y^{**} = -0.134 \ln(x) + 0.449$	0.949	0.07
	油白菜	$y^{**} = -0.107 \ln(x) + 0.531$	0.751	0.08
	大白菜	$y^{**} = -0.111 \ln(x) + 0.522$	0.837	0.08
	芥菜	$y^{**} = -0.127 \ln(x) + 0.501$	0.905	0.10
	小白菜	$y^{**} = -0.123 \ln(x) + 0.556$	0.794	0.14
镉较敏感植物	晚稻 1	$y^{**} = -0.086 \ln(x) + 0.647$	0.903	0.17
	生菜	$y^{**} = -0.118 \ln(x) + 0.601$	0.918	0.18
	早稻	$y^{**} = -0.093 \ln(x) + 0.648$	0.954	0.20
	红豇豆	$y^{**} = -0.196 \ln(x) + 0.507$	0.994	0.22
	中稻	$y^{**} = -0.069 \ln(x) + 0.670$	0.893	0.23
	花椰菜	$y^{**} = -0.109 \ln(x) + 0.639$	0.865	0.23
	番茄	$y^{**} = -0.067 \ln(x) + 0.704$	0.734	0.24
	晚稻 2	$y^{**} = -0.113 \ln(x) + 0.677$	0.862	0.34
	蕹菜	$y^{**} = -0.103 \ln(x) + 0.706$	0.827	0.39
	苋菜	$y^{**} = -0.160 \ln(x) + 0.699$	0.933	0.53
镉较不敏感植物	红萝卜	$y^{**} = 0.0006x^2 - 0.045x + 0.849$	0.937	1.09
	芹菜	$y^{**} = 0.845e^{-0.041x}$	0.860	1.31
	菜心	$y^{**} = -0.198 \ln(x) + 0.928$	0.769	1.91
	萝卜	$y^{**} = 0.0006x^2 - 0.050x + 0.943$	0.975	2.94
	辣椒	$y^{**} = -0.0076x^2 + 0.014x + 0.828$	0.824	3.03
	结球甘蓝	$y^{**} = 0.0007x^2 - 0.052x + 0.960$	0.965	3.19
镉不敏感植物	黄瓜	$y^{**} = 1.057e^{-0.011x}$	0.651	24.67

1) x 添加镉浓度/mg·L⁻¹, y 为地上部鲜重耐性指数/%; y^{**} 表示达 1% 极显著水平, $n = 9$

但由于 2 种分类依据有区别,其结果亦存在一些差异,如苋菜所受观察的表观毒害症状并不显著,而其地上部生物量受镉的影响却比较明显。

3 结论

(1)通过水培苗期毒性测试,发现不同作物种类在不同浓度镉胁迫下的表观症状及毒害响应敏感度有较大的差异。主要症状是生长受抑,表现为根伸长受抑制,生物量降低;生理毒害,表现为新叶黄化,根部侧根须根增生,严重时根发褐发黑甚至腐烂。其中大白菜、油白菜、蕹菜、油麦菜、芥菜、小白菜在镉毒害条件下的表观毒害响应比较显著。这些植物受镉毒害的表观响应端点可以作为初步筛选测试终点的指标。

(2)通过剂量-效应模型拟合,分析比较株高、根长、地上部生物量(鲜重、干重)和根生物量(鲜重、干重)6 个生长毒性效应指标的耐性指数和基于这些效应指标的 EC₂₀ 值,结果表明低浓度镉处理下作物地上部生物量的毒性响应较根部敏感,其中作物地上部鲜重对镉胁迫的响应比其他指标更加敏感,性状更稳定,可作为作物对镉毒害敏感性的筛选指标。不同种类作物地上部鲜重的 EC₂₀ 值变化范围

为 0.03 ~ 24.67 mg·L⁻¹。

(3)根据表观毒害响应端点对植物镉毒害敏感性的分类结果与 EC₂₀ 值分析结果基本一致。综合 2 种分类结果,大白菜、油白菜、油麦菜、芥菜、小白菜为镉敏感植物,可以作为进一步确定土壤和植物中镉的毒害临界值的生态毒性受体以及土壤镉污染的监测植物。而黄瓜则确定为镉抗性较强植物,可另外设置更大的浓度区间进行镉的毒性测试。

参考文献:

[1] 宗良纲, 孙静克, 沈倩宇. Cd、Pb 污染对几种叶类蔬菜生长的影响及其毒害症状[J]. 生态毒理学报, 2007, 2(1): 63-69.

[2] Metwally A, Safronova V I, Belimov A A, et al. Genotypic variation of the response to cadmium toxicity in *Pisum sativum* L. [J]. Journal of Experimental Botany, 2005, 56(409): 167-178.

[3] Yu H, Wang J L, Fang W, et al. Cadmium accumulation in different rice cultivars and screening for pollution-safe cultivars of rice[J]. Science of the Total Environment, 2006, 370: 302-309.

[4] 肖美秀, 林文雄, 陈冬梅, 等. 耐 Cd 水稻种质资源的筛选[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2006, 35(2): 117-122.

[5] 林君峰, 高树芳, 陈伟平, 等. 蔬菜对土壤镉铜锌富集能力的研究[J]. 土壤与环境科学报, 2002, 4(1): 248-251.

- [6] 黄运湘, 廖柏寒, 肖浪涛, 等. 镉处理对大豆幼苗生长及激素含量的影响[J]. 环境科学, 2006, **27**(7):1398-1401.
- [7] 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.
- [8] 刘术新, 郑海锋, 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.
- [9] 罗丹, 胡欣欣, 郑海锋, 等. 镍对蔬菜毒害临界值的研究[J]. 生态环境学报, 2010, **19**(3):584-589.
- [10] 罗丹, 胡欣欣, 郑海锋, 等. 钴对蔬菜毒害的临界值[J], 生态学杂志, 2010, **29**(6): 1-7.
- [11] 叶云山. 铜对蔬菜的毒害效应及土壤毒害临界值研究[D]. 福州:福建农林大学, 2009.
- [12] OPPTS 850- 4230, Ecological effects test guidelines, early seedling growth toxicity test [S]. Washington, DC: USEPA; 1996.
- [13] ISO 11269- 1: 1993 (E), Soil quality—Determination of the effects of pollutants on soil flora—Part 1: Method for the measurement of inhibition of root growth [S]. International Organization for Standardization, 1993.
- [14] ISO 11269- 2: 2005 (E), Soil quality—Determination of the effects of pollutants on soil flora—Part 2: Effects of chemicals on the emergence and growth of higher plants [S]. International Organization for Standardization, 2005.
- [15] USEPA. Generic ecological assessment endpoints (GEAEs) for ecological risk assessment [S]. Risk Assessment Forum. Washington, DC: USEPA; 2003.
- [16] Carlon C. Derivation methods of soil screening values in Europe. A review and evaluation of national procedures towards harmonization [R]. European Commission, Joint Research Centre, Ispra, UR 22805-EN, 2007. 10-25.
- [17] Greenslade P, Vaughan G T. A comparison of Collembola species for toxicity testing of Australian soils[J]. Pedobiologia, 2003, **47**:171-179.
- [18] Anderson R H, Basta N T, Lanno R P. Partitioning species variability from soil property effects on phytotoxicity: EC_x normalization using a plant contaminant sensitivity index [J]. Journal of Environmental Quality, 2008, **37**:1701-1709.
- [19] Kapustka L A, Eskew D, Yocum J M. Plant toxicity testing to derive ecological soil screening levels for cobalt and nickel[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2006, **25**(3): 865-874.
- [20] Rooney C P, Zhao F J, McGrath S P. Phytotoxicity of nickel in a range of European soils: Influence of soil properties, Ni solubility and speciation[J]. Environmental Pollution, 2007, **145**: 596-605.
- [21] 孙约兵, 周启星, 王林, 等. 三叶鬼针草幼苗对镉污染的耐性及其吸收积累特征研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(10): 3028-3035.
- [22] 由淑贞, 杨洪强, 张龙, 等. 镉胁迫对平邑甜茶脂肪酸构成及脂质过氧化的影响[J]. 应用生态学报, 2009, **20**(8): 2032-2037.
- [23] Maria R S, Maria C R P, Diana M P, *et al.* Cellular response of pea plants to cadmium toxicity: cross talk between reactive oxygen species, nitric oxide, and calcium[J]. Plant Physiology, 2009, **150**(5): 229-243.
- [24] Sanseverino J, Eldridge M L, Layton A C, *et al.* Screening of potentially hormonally active chemicals using bioluminescent yeast bioreporters[J]. Toxicological Sciences, 2009, **107**(1): 2-134.
- [25] 慈敦伟, 姜东, 戴廷波, 等. 镉毒害对小麦幼苗光合及叶绿素荧光特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2005, **25**(5): 88-91.
- [26] 张旭红, 林爱军, 苏玉红, 等. 镉引起蚕豆 (*Vicia faba*) 叶片 DNA 损伤和细胞凋亡研究[J]. 环境科学, 2006, **27**(4): 787-793.