

头孢菌素C对蔬菜种子萌发的毒理效应

周睫雅, 任爱玲, 刘宏博, 吴昊, 马双, 崔思嘉, 王旭明, 田书磊

引用本文:

周睫雅, 任爱玲, 刘宏博, 等. 头孢菌素C对蔬菜种子萌发的毒理效应[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2429–2436.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0427>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

东北设施叶菜类蔬菜镉铅污染安全生产分区研究

李想, 龙振华, 朱彦彦, 杨昶, 李明堂

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2239–2248 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0315>

京津冀地区设施土壤中不同蔬菜对镉的累积特征

高鑫, 颜蒙蒙, 曾希柏, 白玲玉, 王亚男, 陈清, 赵会薇, 苏世鸣

农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2541–2548 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0908>

施肥与填闲种植籽粒苋对油麦菜Cd和土壤Cd的影响

谷佳林, 苏世鸣, 陈延华, 赵同科, 魏丹, 杜连凤, 邹国元

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2198–2204 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0243>

无机三价砷对生菜的生态毒性及其生物积累

赖长鸿, 刘亚玲, 贺鸿志, 黎华寿, 陈桂葵

农业环境科学学报. 2015, 34(5): 831–836 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.05.003>

常用农药对赤子爱胜蚓急性毒性和抗氧化酶系的影响

姜锦林, 单正军, 周军英, 卜元卿, 田丰

农业环境科学学报. 2017, 36(3): 466–473 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1095>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

周捷雅, 任爱玲, 刘宏博, 等. 头孢菌素C对蔬菜种子萌发的毒理效应[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2429–2436.

ZHOU Jie-ya, REN Ai-ling, LIU Hong-bo, et al. Ecotoxicity of cephalosporin C on vegetable seed germination[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(10): 2429–2436.



开放科学 OSID

头孢菌素C对蔬菜种子萌发的毒理效应

周捷雅^{1,2}, 任爱玲¹, 刘宏博², 吴昊², 马双^{2,3}, 崔思嘉^{2,4}, 王旭明⁵, 田书磊^{2*}

(1. 河北科技大学环境科学与工程学院, 石家庄 050080; 2. 中国环境科学研究院固体废物污染控制技术研究所, 北京 100012; 3. 内蒙古大学生态与环境学院, 呼和浩特 010021; 4. 东北电力大学化学工程学院, 吉林 吉林 132012; 5. 北京市农林科学院北京农业生物技术研究中心, 北京 100097)

摘要:为探究头孢菌素菌渣无害化处置与肥料化利用过程中残留的头孢菌素C对蔬菜生长的毒理效应,通过恒温保湿培养法,采用生菜(*Lactuca sativa* Linn. var. *ramosa* Hort.)、油麦菜(*Lactuca sativa* var. *longifolia* Lam.)、白菜(*Brassica pekinensis* (Lour.) Rupr.)及油菜(*Brassica campestris* L.) 4种蔬菜种子为研究对象,以种子发芽率、幼苗的鲜质量、胚轴长、胚根长为毒性敏感指标,研究了7种浓度头孢菌素C溶液胁迫下4种蔬菜毒性的剂量-效应关系,比较了不同蔬菜在头孢菌素C毒害下的生态毒性差异和相对敏感的指标。结果表明:头孢菌素C溶液对4种蔬菜种子毒性敏感指标的影响程度依次为胚根>鲜质量>胚轴>发芽率;头孢菌素C溶液浓度与4种蔬菜胚根生长率呈显著的线性关系($P<0.01$);头孢菌素C对生菜、油麦菜、白菜以及油菜的最大无响应浓度(NOEC)分别为868.10、727.25、796.27 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和629.277 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,4种蔬菜对头孢菌素C的毒性敏感度依次为油菜>油麦菜>白菜>生菜,其中油菜 IC_{50} 值为1 538.36 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。研究表明,与油麦菜、白菜和生菜相比,油菜更适合作为后续实验的生态毒性指示植物。

关键词:头孢菌素C;生态毒性;发芽率;胚根长

中图分类号:X171.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2020)10-2429-08 **doi:**10.11654/jaes.2020-0427

Ecotoxicity of cephalosporin C on vegetable seed germination

ZHOU Jie-ya^{1,2}, REN Ai-ling¹, LIU Hong-bo², WU Hao², MA Shuang^{2,3}, CUI Si-jia^{2,4}, WANG Xu-ming⁵, TIAN Shu-lei^{2*}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science & Technology, Shijiazhuang 050080, China; 2. Research Institute of Solid Waste Management, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China; 4. College of Chemical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China; 5. Beijing Agro-biotechnology Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract: Four types of vegetables, including lettuce, leaf lettuce, pakchoi, and rape were selected as research objects to explore the ecotoxicity of cephalosporin C on vegetable growth in the harmless disposal process of cephalosporin residue and fertilizer utilization. The germination rate of seeds, the fresh weight of seedlings, and the hypocotyl and radicle lengths were used as toxicity sensitivity indicators. The dose-response relation between seven concentration levels of cephalosporin C solution and four different vegetables was studied using the moisturizing culture method, and differences in the ecotoxicity and relative sensitivity indexes of different vegetables under cephalosporin C stress were analyzed. The results placed the ecological sensitivity indicators of different vegetables in the following order: radicle > fresh weight > hypocotyl > germination rate, and there was a significant linear relationship between the concentration of the

收稿日期: 2020-04-16 录用日期: 2020-06-18

作者简介: 周捷雅(1995—),女,重庆荣昌人,硕士研究生,研究方向为抗生素菌渣无害化处置技术与环境风险评估研究。E-mail: 1429036569@qq.com

*通信作者: 田书磊 E-mail: tianslcras@126.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0801402)

Project supported: National Key R&D Program of China(2017YFD0801402)

cephalosporin C solution and the radicle growth rate of the four vegetables ($P<0.01$). The no observed effect concentrations (NOEC) of cephalosporin C for the four vegetables were $868.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $727.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $796.39 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and $629.27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The toxicity sensitivities of the four vegetables to cephalosporin C were ranked as follows: rape> leaf lettuce> pakchoi> lettuce, in which the IC_{50} value of rape was $1\,538.36 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The results indicate that rape is more suitable as a plant ecotoxicity indicator than leaf lettuce, pakchoi, and lettuce.

Keywords: cephalosporin C; ecotoxicity; germination rate; radicle length

我国是抗生素原料药生产和使用大国,每年生产的抗生素超过 $2 \times 10^5 \text{ t}$,国内消耗量约占 75%,其中 β -内酰胺类抗生素使用量较大,占总使用量的 21%^[1-4],头孢菌素 C 是顶头孢霉菌产生的一种 β -内酰胺类抗生素,是需求量较大的大宗类抗生素。据统计,2013 年我国抗生素产量就已达到 24.8 万 t,依据生产 1 t 抗生素平均产生 30~40 t 湿菌渣估算,2013 年我国抗生素菌渣产生量约为 1 000 万 t^[4-6]。相关研究表明,在中国、美国和欧盟等多个国家的土壤^[7]、地表水^[8-9]、城市污水或废水^[10]、沿海城市近岸海域^[11]、蔬菜及肉食产品中^[12-13],均能检出各类抗生素。课题组前期调研发现,不同企业或不同生产工艺产出的菌渣残留的抗生素量不同,螺旋霉素残留量为 $750 \sim 800 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[14],头孢菌素 C 残留量为 $530 \sim 550 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。抗生素菌渣因残留抗生素,其进入环境后将促进耐药菌的发生和传播^[15],依据 2016 年新版《国家危险废物名录》,抗生素菌渣被纳入危险废物名录。

按照危废管理要求,目前菌渣的安全处理处置方式主要为填埋和焚烧,这两种方式不仅安全处置难度大,而且费用高,已严重制约了抗生素制药行业的健康发展。因此,亟待开发安全、有效、经济合理的利用处置技术。根据课题组前期测样发现,经无害化处理后,头孢菌渣的含水率由 90.68% 降至 2.76%,而有机质、总养分 ($\text{N} + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{K}_2\text{O}$) 含量分别为 89.00% 和 10.57%,均满足《有机肥料》(NY 515—2012) 要求。因此,肥料化是实现其资源化利用可行性较好的方式。抗生素菌渣因含有大量的粗蛋白、粗脂肪等有机物^[16],经无害化处理技术消除残留抗生素后,可作为有机肥料基料,但缺少相关技术规范和标准。目前,中国环境科学研究院和抗生素菌渣国家工程技术中心已向国家标准化委员会提出制订青霉素、头孢菌素以及红霉素等典型大宗抗生素菌渣作为有机肥基料进行无害化处置技术要求、环境风险评估方法等相关技术规范的立项需求,为抗生素菌渣肥料化利用奠定基础。

菌渣中残留抗生素对植物生长毒性的影响是抗

生素菌渣肥料化利用标准技术规范编制需解决问题之一。目前,国内外关于抗生素植物毒性的研究已有报道,主要通过种子发芽和幼苗生长发育实验来考察抗生素污染胁迫下植物种子发芽、生长等指标来综合评价其毒性。Hillis 等^[15]对磺胺类和大环内脂类等抗生素对莴苣的生态毒性进行研究,发现金霉素、左氧氟沙星和磺胺甲恶唑生态毒性最为显著。Wang 等^[16]采用水培法分别研究了土霉素和盐酸多西环素在 $0 \sim 90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、乳酸恩诺沙星在 $0 \sim 320 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 对油菜的生态毒性效应,发现在设定浓度范围内各种抗生素对根长的抑制作用均强于芽长。李萌等^[17]通过白菜种子发芽实验,发现抗生素浓度与白菜根长抑制率之间存在剂量-效应关系。邓世杰等^[18]研究发现,四环素对种子发芽率的最大无响应浓度 (NOEC) 为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,环丙沙星和磺胺嘧啶对黑麦草种子发芽率的 NOEC 为 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。课题组通过美国环境保护署 (US EPA) 毒性数据库和相关已发表的文献筛选收集了一部分 β -内酰胺类 (其中必须包括青霉素、头孢) 等的水生和陆生生物 (藻类、水生植物、鱼类、甲壳类和昆虫类等) 的急慢性毒性效应数据,发现有关头孢菌素类药物的生态毒理学数据还不足以论证其对环境的具体影响。

本研究以生菜、油麦菜、白菜和油菜为研究对象,开展了不同浓度梯度下头孢菌素 C 对 4 种常见蔬菜种子的发芽、鲜质量、胚轴长和胚根长的毒性效应研究,对其根长进行了剂量-效应关系拟合,推导不同蔬菜种子对头孢菌素 C 的响应敏感程度,以期头孢菌素类抗生素菌渣肥料化利用的环境基准生态阈值建立与生态风险评估提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

供试蔬菜种子:生菜 (*Lactuca sativa* Linn. var. *ramosa* Hort.), 油麦菜 (*Lactuca sativa* var. *longifolia* Lam), 白菜 (*Brassica pekinensis* (Lour.) Rupr.), 油菜 (*Brassica campestris* L.), 购于北京派得伟业科技发展有限公司。

供试头孢菌素 C(cephalosporin C)标准品,由伊犁川宁生物技术有限公司提供(从菌渣中提炼纯化),纯度大于 99%,分子式为 $C_{16}H_{21}N_3O_8S$,结构式如图 1。

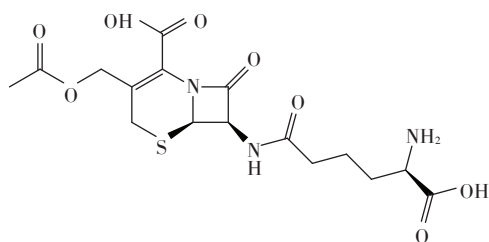


图 1 头孢菌素 C 的结构式

Figure 1 Constitutional formula of cephalosporin C

1.2 实验方法

参考国际种子检验协会(ISTA)的种子监测标准^[19],采用保湿培养法进行试验。

用体积分数为 10% 的 H_2O_2 溶液对种子消毒 15 min,再用去离子水冲洗 3 遍,滤干,于直径 90 mm 无菌培养皿中放置 1 张滤纸,将 15 粒种子均匀排列在培养皿中,向培养皿中加入 3 mL 不同浓度梯度的头孢菌素 C 溶液,浓度梯度设定为:10、100、500、1 000、1 500、2 000 $mg \cdot L^{-1}$,以加入等量的去离子水为对照,试验设 3 组平行。将培养皿置于 $(25 \pm 1)^\circ C$ 智能型光照培养箱(GXZ-280,宁波江南仪器厂)中黑暗培养,试验周期 4 d。每日定时记录种子发芽数,通过恒质量法保持滤纸和种子湿润。试验期间,直到对照组的发芽率趋于稳定不变(发芽率 $\geq 85\%$);当对照组胚根长 > 20 mm 时,结束培养并测定幼苗鲜质量,胚根长和轴长。

1.3 数据处理

1.3.1 发芽率、胚根生长率的计算

发芽率和根生长率的计算公式如下:

$$GR = \frac{n}{N} \times 100\%$$

$$RLR = \frac{RL_t - RL_0}{RL_0} \times 100\%$$

式中:GR 为发芽率,%;n 为发芽种子数,个;N 为供试种子数,个;RLR 为胚根生长率,%; RL_0 为对照组胚根长,mm; RL_t 为处理组胚根长,mm。

1.3.2 最大无响应浓度(NOEC)及半抑制浓度(IC₅₀)的计算

建立以头孢菌素 C 浓度与根生长率的剂量-效应关系图,并进行拟合。当根生长率为 0 时,对应的头孢菌素 C 浓度即为该种抗生素的 NOEC 值;当根生长率为 -50% 时,对应的头孢菌素 C 浓度即为该种抗生素的 IC₅₀ 值。

1.3.3 统计分析

采用 IBM SPSS Statistics 25 统计分析软件对数据进行单因素(One-way ANOVA)方差分析和差异显著性检验, $P=0.05$ 为显著性指标,用 Origin 2019 对实验数据进行作图。图表中各指标的数据为 3 组平行实验的平均值,或平均值 $\pm$ 标准差。

2 结果与分析

2.1 不同浓度头孢菌素 C 胁迫下对种子发芽率的影响

如表 1 所示,头孢菌素 C 处理下生菜、油麦菜、白菜及油菜种子的发芽率与对照组相比无显著差异($P>0.05$),即在本试验浓度范围内,头孢菌素 C 对供试的 4 种蔬菜种子的萌发无明显抑制或促进作用。这与 Derek 等^[20]进行的 10 种抗生素对苦菊、莴苣、紫花苜及胡萝卜的植物毒性试验的结果相似。其主要原因,一是种子发芽期较短,抗生素还未对种子产生明显影响就已经萌发,在种子萌发初期,植物幼嫩细胞中未形成液泡,根也还未破皮而出,此时种子对水分的吸

表 1 不同浓度头孢菌素 C 处理下蔬菜种子的发芽率

Table 1 Germination rate of seeds under cephalosporin C stress

浓度 Concentration/ $(mg \cdot L^{-1})$	发芽率 Germination rate/%			
	生菜	油麦菜	白菜	油菜
0(CK)	95.55 $\pm$ 3.85a	95.55 $\pm$ 3.85a	100.00 $\pm$ 0.00a	100.00 $\pm$ 0.00a
10	95.55 $\pm$ 3.85a	97.78 $\pm$ 3.85a	94.45 $\pm$ 4.81a	94.87 $\pm$ 4.44a
100	95.56 $\pm$ 7.70a	86.67 $\pm$ 6.67a	97.22 $\pm$ 4.81a	89.75 $\pm$ 7.70a
500	91.11 $\pm$ 7.70a	93.33 $\pm$ 0.00a	97.22 $\pm$ 4.81a	92.31 $\pm$ 0.00a
1 000	95.55 $\pm$ 3.85a	93.33 $\pm$ 6.67a	95.56 $\pm$ 7.70a	95.55 $\pm$ 3.85a
1 500	95.55 $\pm$ 3.85a	91.11 $\pm$ 7.70a	100.00 $\pm$ 0.00a	95.55 $\pm$ 3.85a
2 000	91.11 $\pm$ 7.70a	88.89 $\pm$ 3.85a	97.78 $\pm$ 3.85a	95.16 $\pm$ 4.28a

注:同列相同字母表示在 $P>0.05$ 水平上差异不显著。

Note: Values with same letters in the same column represent no significance at a level of 0.05.

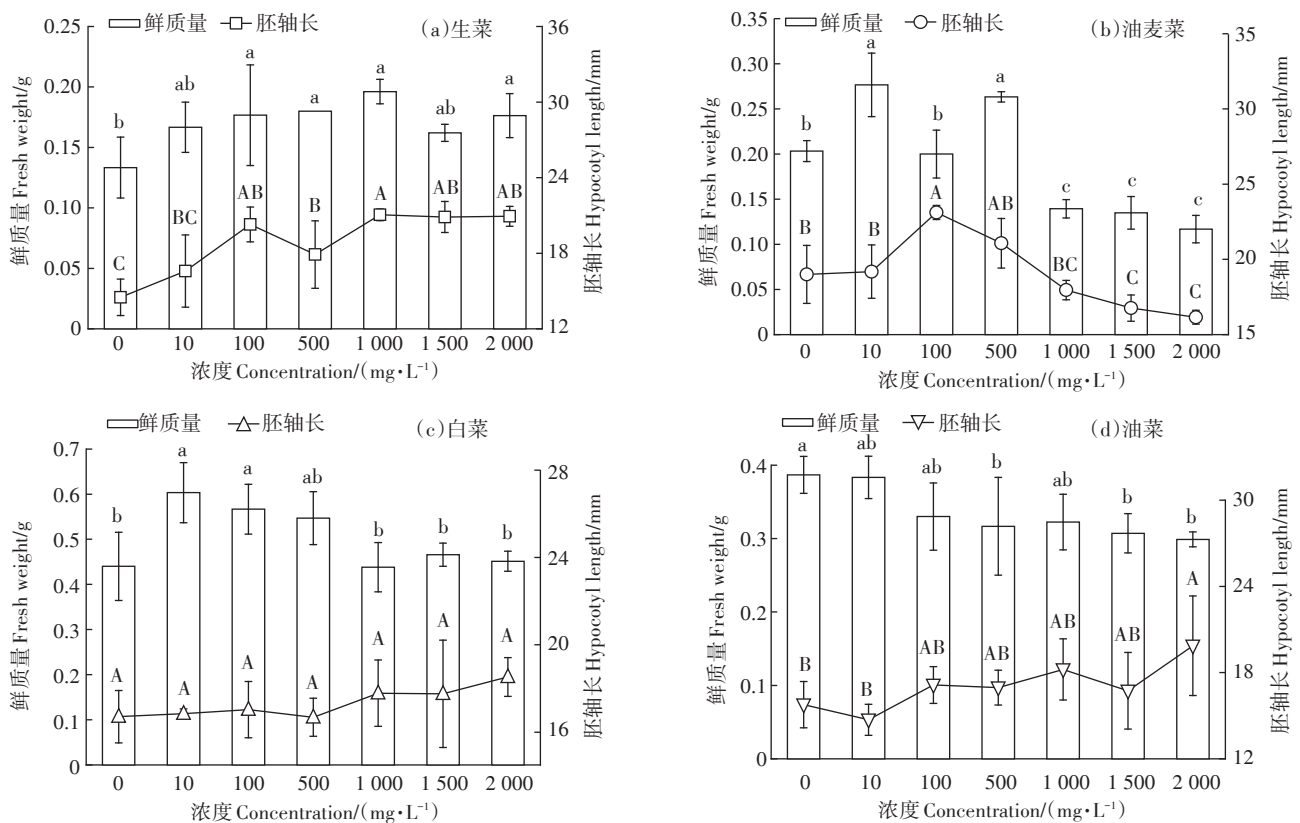
收是沿着水势梯度进行的吸胀吸水物理过程;二是种皮的保护作用,抗生素吸附在种皮表面,阻碍了胚根与外界环境直接接触,使得种子萌发过程受到的侵害较不明显^[21]。种子萌发是种子从吸水到胚根突破种皮期间一系列酶催化的生理生化过程。种子内各类参与萌发的酶在此阶段激活,并作用于种子子叶储存的淀粉、蛋白质和脂肪的分解活动,为后期幼苗植物细胞的合成提供能量来源。这就意味着,从表观上看种子正常发芽,但并不能断定抗生素的胁迫对植物细胞无毒性效应^[22]。

2.2 不同浓度头孢菌素C胁迫下对幼苗胚轴和鲜质量的影响

由图2可见,处理组生菜的胚轴长均高于对照组,而油麦菜胚轴长则随着头孢菌素C浓度的增加呈现先增长后下降的趋势。油菜的胚轴长与头孢菌素C浓度 $\leq 1\,500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,与对照差别不大,当浓度为 $2\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,则略高于对照。而白菜的胚轴长在

不同浓度之间差异不显著。相对于胚轴长,头孢菌素C对4种蔬菜幼苗鲜质量的影响更为明显,但也存在一定的差异。不同浓度头孢菌素C溶液胁迫下,生菜及白菜的鲜质量均高于对照组,油菜则低于对照组,油麦菜鲜质量在头孢菌素C浓度 $\geq 1\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,也低于对照组。随着头孢菌素C的浓度提高,4种蔬菜幼苗的鲜质量均呈现不同程度下降趋势,尤其是白菜和油麦菜,而生菜和油菜则不太显著。当浓度为 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,白菜鲜质量最高,比对照组高37.11%;当浓度为 $1\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,生菜鲜质量最高,比对照组高47.04%。当头孢菌素C浓度为 $1\,000\sim 2\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,油麦菜鲜质量则显著低于对照。

与发芽率和幼苗胚轴相比较,生菜、油麦菜、白菜及油菜幼苗鲜质量对头孢菌素C的胁迫敏感性更显著,其原因是在胚根向胚轴传递运输过程中,头孢菌素C的浓度沿水势方向递减,使得在幼苗生长发育过程中,胚轴与头孢菌素C溶液接触的浓度较低,受到



同种蔬菜不同小写字母表示鲜质量差异显著 ($P < 0.05$); 同种蔬菜不同大写字母表示胚轴长差异显著 ($P < 0.05$)

Different lowercase letters of the same vegetable indicate significant difference in fresh weight ($P < 0.05$); Different capital letters of the same vegetable indicate significant difference in hypocotyl length ($P < 0.05$)

图2 不同浓度头孢菌素C溶液对4种蔬菜幼苗胚轴和鲜质量的影响

Figure 2 Effects of cephalosporin C on fresh weight and hypocotyl of different seedlings

的影响小。

2.3 不同浓度头孢菌素C胁迫下对幼苗胚根的影响

胚根是种子萌发后首先出现的器官,具有固着、贮存合成氨基酸和植物激素等有机物质的作用,其主要功能是吸收环境中水分及养分,并通过维管组织输送给茎。幼苗生长过程根尖与抗生素溶液接触非常紧密,对其中的抗生素响应较为显著。Alessandro等^[23]研究了4种抗生素(氯霉素、螺旋霉素、大观霉素及万古霉素)对番茄种子萌发过程中根系发育的影响,证明了4种抗生素对番茄顶端根系细胞分裂造成明显损害。

由图3可知,随着溶液中头孢菌素C浓度的提高,4种蔬菜胚根长整体呈现出先促进后抑制的现象,当浓度为 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,基本均达到生长峰值。随着头孢菌素C浓度逐渐增大,其对胚根长的抑制作用越趋明显。4种蔬菜对头孢菌素C的响应程度各不同,但趋势相似。与发芽率、幼苗鲜质量及胚轴长相比,胚根对头孢菌素C胁迫的敏感性最为显著,选取胚根长作为4种蔬菜受损程度的判断指标。葛成军等^[24]在进行四环素类抗生素对白菜种子发芽实验时也得出了类似结论,试供作物对金霉素和土霉素的生态敏感性表现为:根伸长>轴伸长>发芽率。张乙涵等^[25]也报道根长可作为诊断抗生素植物毒性的敏感指标。

3 讨论

3.1 不同毒性指标与头孢菌素C之间的关系

对发芽率、幼苗鲜质量、胚轴长及胚根和头孢菌素C浓度及蔬菜种类进行了主成分分析(PCA),见图4。方差贡献率第一主成分为38.0%,第二主成分

为29.6%,累计方差贡献率为67.6%,共同解释所有样品的差异。第一主成分的特征指标有发芽率、鲜质量和胚根,其中头孢菌素C浓度对胚根长呈负相关,说明头孢浓度变化会影响胚根的生长状态。根是蔬菜主要的吸收和代谢器官,同时也是最容易受毒物分子影响的部位,且与头孢菌素C直接接触,通过影响蔬菜根部的抗氧化防御系统和细胞分裂来影响根长^[26-27],也有研究指出,种子萌发发生在植物暗生芽期,此时胚根是快速生长的器官,对抗生素敏感^[27],使胚根长在头孢菌素C存在下受到显著抑制($P<0.05$)。第二主成分的特征指标是发芽率和鲜质量,种子发芽率与鲜质量呈正相关,种子的发芽数,直接对幼苗鲜质量产生影响。

由图4可见,生菜组与油麦菜组之间的样品相似性高,且有部分重叠,油菜和白菜之间也有相同的规律。本试验的供试蔬菜中,油麦菜和生菜均属于菊科莴苣属,油菜和白菜均属于十字花科芸薹属,造成不同属蔬菜在头孢菌素C溶液胁迫下呈现出不同的聚集状态,这可能与蔬菜中营养物质的储存状态有关^[28]。与莴苣属蔬菜相比,芸薹属蔬菜种子中不具有淀粉粒,使得抗生素作用在不同属蔬菜中的靶分子不同^[29],但其具体机制还需进一步研究。

不同浓度头孢菌素C处理下,发芽率、鲜质量、胚轴及胚根毒性指标都会受到不同程度的影响。图4的相关性分析可见头孢菌素C浓度对胚根的影响最为显著,其次是鲜质量和胚轴,影响最不显著的是发芽率。抗生素对胚轴的作用机制主要是种子胚根与抗生素接触后,将吸收抗生素并沿着胚轴向上输送,所以与其他部位相比,根中抗生素累积量最多^[30],多位学者的研究结果^[31-33]指出,随抗生素浓度的升高,

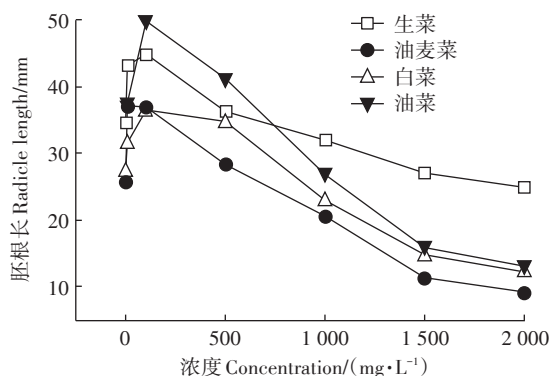


图3 不同浓度头孢菌素C溶液对胚根影响

Figure 3 Effects of cephalosporin C on radicle length under stress

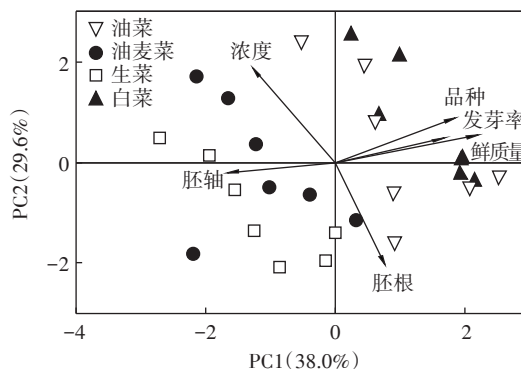


图4 不同毒性指标与头孢菌素C浓度之间的关系

Figure 4 The principal components analysis between different toxicity indexes and cephalosporin C

蔬菜胚轴长和胚根长生长逐渐受到抑制,且受抑制程度胚根长>胚轴长。

3.2 基于胚根长的不同蔬菜敏感程度分析

试验胚根长为重要毒性指标,以头孢菌素 C 浓度为自变量,根生长率为因变量,建立了根生长率与头孢菌素 C 溶液浓度响应曲线(图 5a),获得回归方程(表 2)。从表 2 可知,4 种蔬菜根的生长率与头孢菌素 C 浓度间均呈现出极显著的线性关系($P<0.01$)。由图 5b 及表 2 可知,生菜、油麦菜、白菜和油菜的 NOEC 分别为 868.10、727.25、796.27 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 629.27 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。当头孢菌素 C 浓度小于不同蔬菜各自对应的 NOEC 时,头孢菌素 C 对 4 种蔬菜胚根的伸长具有明显的促进作用,当浓度超出了幼苗耐受范围,则出现了抑制效应,但根伸长抑制率存在差异。刘娣^[34]进行的小白菜水培实验,同样发现低浓度四环素类抗生素促进了小白菜种子根的伸长,而高浓度的四环素类抗生素则抑制了根伸长。蔡嘉颖等^[35]也发现,土霉素在低浓度($\leq 5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)对苦菊根伸长有促进作用,高浓度($\geq 10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)时抑制。这说明抗生素类物质对试验幼苗生长具有双向调节功能,其主要原因可能与植物的逆境生理相关^[36],当抗生素浓度在幼苗体内超出其生理承受范围,胚根就受到影响,同时高浓度抗生素会阻止抗氧化酶系统的信号传递^[37],使植物正常代谢受到影响。

目前,常用植物的 IC_{50} 值来评价污染物的生态毒性强弱^[38]。 IC_{50} 值与植物对头孢菌素 C 的敏感程度负相关。从图 5b 可见,头孢菌素 C 对 4 种蔬菜的敏感度依次为:油菜>油麦菜>白菜>生菜。Pan 等^[39]通过小油菜、番茄、胡萝卜和黄瓜的根伸长试验评价四环素(TC)、磺胺甲噁啉(SMZ)、诺氟沙星(NOR)、红霉素(ERY)和氯霉素(CAP)的毒性,得到上述抗生素对小油菜的 IC_{50} 值分别为 14.4、157、49.4、68.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 204 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均小于本研究头孢菌素 C 对油菜的 IC_{50} 值,即 1 538.36 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。头孢菌素 C 对小油菜的毒性远小于上述抗生素,这主要是由于抗生素毒性与其分子结构及其稳定性具有相关性,头孢菌素类分子具有不稳定、高应变和反应性的 β -内酰胺键,易于水解,半衰期较短,因此对胚根毒性影响相对较小。由此可见,针对不同种类的蔬菜对头孢菌素 C 的耐受程度各不相同,头孢菌渣的肥料化利用过程,应充分考虑菌渣中头孢菌素 C 的残留情况,合理种植蔬菜,保证农产品安全,减少头孢菌素 C 沿食物链进入人体的风险。

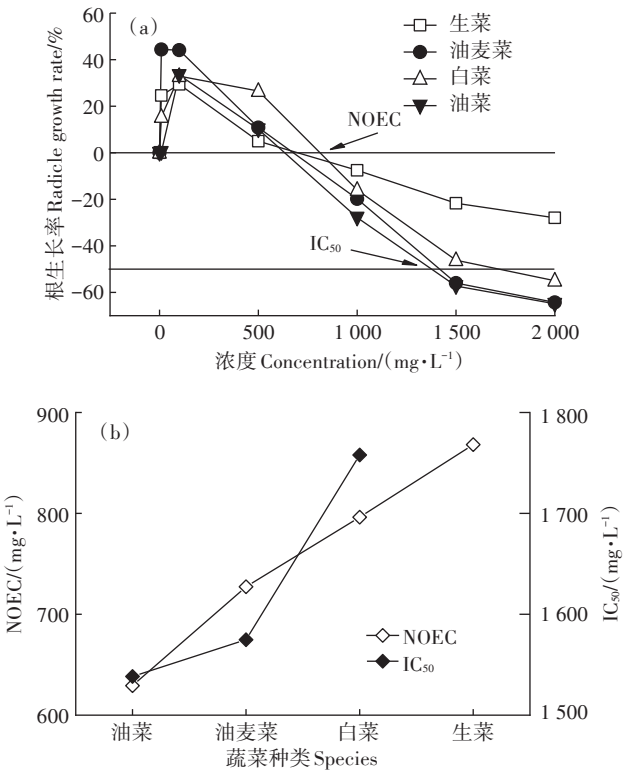


图 5 浓度-根生长率的剂量-效应曲线

Figure 5 Dose-response curve of concentration-radicle growth rate

表 2 头孢菌素 C 与根生长率的相关性

Table 2 Correlation between cephalosporin C and radicle growth rate

蔬菜种类 species	根生长率线性回归方程 Liner regression equation for radicle growth rate	浓度区间 Concentration range/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	R^2	P
生菜	$Y=-0.029x+25.18$	100~2 000	0.94	**
油麦菜	$Y=-0.059x+42.91$	100~2 000	0.96	**
白菜	$Y=-0.052x+41.41$	100~2 000	0.95	**
油菜	$Y=-0.055x+34.61$	100~2 000	0.96	**

4 结论

(1)4 种蔬菜种子的毒性指标对头孢菌素 C 的生态敏感性均表现为:胚根>鲜质量>胚轴>发芽率。胚根长作为诊断头孢菌素 C 生态毒性的敏感指标,可较好反映头孢菌素 C 的污染状况。

(2)生菜、油麦菜、白菜及油菜胚根的 NOEC 分别为 868.10、727.25、796.27 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 629.27 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。NOEC 可为头孢菌渣残留量的环境安全阈值的设定提供基础数据。

(3)4 种蔬菜对头孢菌素 C 的敏感分布顺序为:油

菜>油菜>白菜>生菜。结果表明,油菜在所测试的蔬菜中是最为敏感的,其 IC_{50} 为 $1\,538.36\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。油菜将作为后续探究施用头孢菌渣肥对土壤抗性基因及微生物群落影响较为理想的毒性指示作物。

参考文献:

- [1] 方媛媛, 丁慧君. 抗生素的生态毒性效应研究进展[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(5): 102-110.
FANG Yuan-yuan, DING Hui-jun. Advance in ecological toxicity of antibiotics[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(5): 102-110.
- [2] 徐永刚, 宇万太, 马强, 等. 环境中抗生素及生态毒性效应研究进展[J]. 生态毒理学报, 2015, 10(3): 11-17.
XU Yong-gang, YU Wan-tai, MA Qiang, et al. The antibiotic in environment and its ecotoxicity: A review[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2015, 10(3): 11-17.
- [3] 陈立文, 方森海, 王明兹. 抗生素发酵废菌渣的无害化及资源再利用研究进展[J]. 生物技术通报, 2015, 31(5): 13-19.
CHEN Li-wen, FANG Sen-hai, WANG Ming-zi. Research progress on the harmless treatment and resource reuse of antibiotic bacteria residues[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2015, 31(5): 13-19.
- [4] 隋倩雯, 张俊亚, 魏源送, 等. 畜禽养殖过程中抗生素使用与耐药病原菌及其抗性基因赋存的研究进展[J]. 生态毒理学报, 2015, 10(5): 20-34.
SUI Qian-wen, ZHANG Jun-ya, WEI Yuan-song, et al. Veterinary antibiotics use, occurrence of antibiotic resistance pathogen and its antibiotic resistance genes in animal production: An overview[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2015, 10(5): 20-34.
- [5] 李再兴, 田宝阔, 左剑恶, 等. 抗生素菌渣处理处置技术进展[J]. 环境工程, 2012, 30(2): 72-75.
LI Zai-xing, TIAN Bao-kuo, ZUO Jian-e, et al. Progress in treatment and disposal technology of antibiotic bacterial residues[J]. *Environmental Engineering*, 2012, 30(2): 72-75.
- [6] 刘园园. 我国抗生素菌渣处理处置技术现状[J]. 聚焦固废处理与处置, 2017, 8: 66-68.
LIU Yuan-yuan. Technical status of antibiotic bacterium dregs disposal[J]. *Focus on Treatment and Disposal of Solid Wastes*, 2017, 8: 66-68.
- [7] Pan M, Chu L M. Fate of antibiotics in soil and their uptake by edible crops[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 599: 500-512.
- [8] Silvia G A, Luis M M, Sara E, et al. Occurrence of pharmaceutical, recreational and psychotropic drug residues in surface water on the northern Antarctic Peninsula region[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 229: 241-254.
- [9] Yao L L, Wang Y X, Tong L, et al. Occurrence and risk assessment of antibiotics in surface water and groundwater from different depths of aquifers: A case study at Jiangnan Plain, central China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 135: 236-242.
- [10] Malek H, Saulo V D G, Fatma A, et al. Analysis of multiclass antibiotic residues in urban wastewater in Tunisia[J]. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 2018, 10: 163-170.
- [11] Franz Z V, Wildor Gt A. Occurrence of antibiotics residues in the marine environment[J]. *Examines in Marine Biology & Oceanography*, 2018, 2(2): 1-3.
- [12] Hu X G, Zhou Q X, Luo Y. Occurrence and source analysis of typical veterinary antibiotics in manure, soil, vegetables and groundwater from organic vegetable bases, northern China[J]. *Environment Pollution*, 2010, 158: 2992-2998.
- [13] Zhao F K, Yang L, Chen L D, et al. Bioaccumulation of antibiotics in crops under long-term manure application: Occurrence, biomass response and human exposure[J]. *Chemosphere*, 2019, 219: 882-895.
- [14] 平然, 任爱玲, 田书磊, 等. 两种抗生素菌渣经SEA-CBS技术处理后的肥料特性[J]. 环境科学研究, 2019, 32(11): 1945-1951.
PING Ran, REN Ai-ling, TIAN Shu-lei, et al. Fertilizer characteristics of two kinds of antibiotic bacterial residues treated by SEA-CBS technology[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(11): 1945-1951.
- [15] Hillis D G, Fletcher J, Solomon K R, et al. Effects of ten antibiotics on seed germination and root elongation in three plant species[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2011, 60(2): 220-232.
- [16] Wang R, Wang J, Wang J H, et al. Growth inhibiting effects of four antibiotics on cucumber, rape and Chinese cabbage[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2019, 103(1): 187-192.
- [17] 李萌, 杨磊, 季剑南, 等. 3种抗生素对白菜种子萌发的影响[J]. 种子, 2017, 36(3): 102-105.
LI Meng, YANG Lei, JI Jian-nan, et al. Effect of three kinds of antibiotics on the germination of Chinese cabbage seeds[J]. *Seed*, 2017, 36(3): 102-105.
- [18] 邓世杰, 马辰宇, 严岩, 等. 3种抗生素对黑麦草种子萌发的生态毒性效应[J]. 生态毒理学报, 2019, 14(3): 279-285.
DENG Shi-jie, MA Chen-yu, YAN Yan, et al. Ecotoxicological effects of three antibiotics on seed germination of *Lolium perenne*[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2019, 14(3): 279-285.
- [19] ISTA (International Seed Testing Association). International rules for seed testing: Annexes[J]. *Seed Science and Technology*, 1985, 13: 356-513.
- [20] Derk G, James F, Keith R, et al. Effects of ten antibiotics on seed elongation in three plants species[J]. *Arch Environ Contam Toxicol*, 2011, 60: 220-232.
- [21] 肖明月, 安婧, 纪占华, 等. 六种常见抗生素对小白菜种子萌发及生理特征的影响[J]. 生态学杂志, 2014, 33(10): 2775-2781.
XIAO Ming-yue, AN Jing, JI Zhan-hua, et al. Toxic effects of six typical antibiotics on seed germination and physiological characteristics[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(10): 2775-2781.
- [22] Chon S, Nelson C J, Coutts J H. Osmotic and autotoxic effects of leaf extracts on germination and seedling growth of Alfalfa[J]. *Agronomy Journal*, 2004, 96: 1673-1679.
- [23] Alessandro B, Giusy L, Maurizio G R, et al. Antibiotic effects on seed germination and root development of tomato (*Solanum lycopersicum* L.)[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 148: 135-141.
- [24] 葛成军, 俞花美, 焦鹏. 两种四环素类兽药抗生素对白菜种子发芽

- 与根伸长抑制的毒性效应[J]. 生态环境学报, 2012, 21(6): 1143-1148.
- GE Cheng-jun, YU Hua-mei, JIAO Peng. Toxicological effects of two tetracycline antibiotics on the inhibition of seed germination and root elongation of Chinese cabbages[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(6): 1143-1148.
- [25] 张乙涵, 伍钧, 陈莉, 等. 基于植物根伸长终点测试四环素对植物的毒性阈值及其敏感性分步(SSD)[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(2): 243-249.
- ZHANG Yi-han, WU Jun, CHEN Li, et al. Toxicity thresholds of tetracycline to plants as determined by root elongation and its species sensitivity distributions[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(2): 243-249.
- [26] Steffens B, Rasmussen A. The physiology of adventitious roots[J]. *Plant Physiology*, 2016, 170(2): 603-617.
- [27] Migliore L, Cibitareale C, Cozzolino S, et al. Laboratory models to evaluate phytotoxicity of sulphadimethoxine on terrestrial plants[J]. *Chemosphere*, 1998, 37(14/15): 2957-2961.
- [28] Luo Y, Liang J, Zeng G M, et al. Responses of seeds of typical *Brassica* crops to tetracycline stress: Sensitivity difference and source analysis[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 184: 109597.
- [29] 王磊, 王金花, 王军, 等. 四种抗生素对小麦玉米高粱三种作物种子芽与根伸长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(2): 216-222.
- WANG Lei, WANG Jin-hua, WANG Jun, et al. Effects of four antibiotics on seed germination and root elongation of wheat, maize and sorghum[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(2): 216-222.
- [30] Herklotz P A, Gurung P, Heubel B V, et al. Uptake of human pharmaceuticals by plants grown under hydroponic conditions[J]. *Chemosphere*, 2010, 78(11): 1416-1421.
- [31] 宫晓双, 安婧, 张立娜, 等. 典型抗生素复合污染对小白菜生长发育的毒理效应[J]. 生态学杂志, 2019, 38(2): 541-547.
- GONG Xiao-shuang, AN Jing, ZHANG Li-na, et al. Toxicological effects of combined pollution of typical antibiotics on the development of Chinese white cabbage (*Brassica rapa*) seedlings[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(2): 541-547.
- [32] 王盼亮, 张昊, 王瑞飞, 等. 抗生素暴露对小白菜幼苗生长及内生细菌的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9): 1734-1740.
- WANG Pan-liang, ZHANG Hao, WANG Rui-fei, et al. Effects of antibiotic exposure on the growth and endophytic bacterial community of Chinese cabbage seedlings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(9): 1734-1740.
- [33] Migliore L, Godeas F, Filippis S P, et al. Hormetic effect(s) of tetracyclines as environmental contaminant on *Zea mays*[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(1): 129-134.
- [34] 刘娣. 土壤-蔬菜系统中四环素类抗生素迁移积累与污染的细胞诊断方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- LIU Ti. Tetracyclines transformation, accumulation and in vitro diagnosis model in soil-vegetable system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [35] 蔡嘉颖, 朱梦琴, 张浩, 等. 三种抗生素对波斯菊和苦菊种子萌发的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2019(5): 45-49.
- CAI Jia-ying, ZHU Meng-qin, ZHANG Hao, et al. Effects of three antibiotics on seed germination of coreopsis and bitter chrysanthemum [J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2019(5): 45-49.
- [36] 陈永快, 王涛, 廖水兰, 等. 逆境及生长调节剂对作物抗逆性的影响综述[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(23): 68-72.
- CHEN Yong-kuai, WANG Tao, LIAO Shui-lan, et al. A review of the effects of stress and growth regulators on crop stress resistance[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(23): 68-72.
- [37] Marcelo P, Vinicius S, Elisa M, et al. Effects of ciprofloxacin and roundup on seed germination and root development of maize[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 2671-2678.
- [38] 周启星, 王美娥. 土壤生态毒理学研究进展与展望[J]. 生态毒理学报, 2006, 1(1): 1-11.
- ZHOU Qi-xing, WANG Mei-e. Researching advancement and prospect of soil ecotoxicology[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2006, 1(1): 1-11.
- [39] Pan M, Chu L M. Phytotoxicity of veterinary antibiotics to seed germination and elongation of crops[J]. *Ecotoxicology and Environmental safety*, 2017, 599: 500-512.