

五氯苯酚的生态毒性效应及其遗传毒性

张蕊媛, 杨竞, 刘欣*

辽宁师范大学城市与环境学院自然地理与空间信息科学重点实验室, 大连 116029

摘要: 为评价环境内分泌干扰物——五氯苯酚对土壤生态系统动植物的生态毒性效应, 检测了五氯苯酚对 8 种作物种子的萌发和根伸长的抑制作用以及对赤子爱胜蚓 (*Eisenia fetida*) 的急性毒性作用; 并运用小麦根尖细胞微核实验和赤子爱胜蚓体细胞核的彗星实验, 检测了五氯苯酚的遗传毒性效应。结果表明, 五氯苯酚在一定浓度范围内对作物种子的发芽率、发芽强度和根伸长均有较强的抑制作用, 抑制率表现出明显的浓度效应关系, 且五氯苯酚对小白菜、卷心莴苣和谷子体积较小的种子的抑制作用较为突出。五氯苯酚对赤子爱胜蚓在 24、48 和 72 h 的半致死浓度分别为 66.5、53.9 和 45.1 mg L⁻¹。浓度为 49.1 mg L⁻¹ 时, 五氯苯酚能够诱发小麦根尖细胞产生微核, 微核率为 6.91%; 浓度为 75 mg L⁻¹ 处理下发现双微核出现; 浓度为 40 mg L⁻¹ 的五氯苯酚处理后的赤子爱胜蚓, 体细胞核的彗尾率为 23.1%, 浓度为 80 mg L⁻¹ 的五氯苯酚处理后, 彗尾率为 42.8%。以上结果说明五氯苯酚在一定剂量下 (4.3—71.2 mg L⁻¹) 对植物和动物细胞具有一定的遗传毒性。

关键词: 五氯苯酚; 生态毒性; 微核试验; 赤子爱胜蚓; 彗星实验; 遗传毒性

文章编号: 1673-5897(2011)6-296-07 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Ecotoxicity and Genotoxicity Assessment of Pentachlorophenol

Zhang Ruiyuan, Yang Jing, Liu Xin*

Key Laboratory of Physical Geography and Spatial Information Science, College of Urban and Environmental Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

Received 23 February 2011 accepted 3 May 2011

Abstract: To evaluate the ecotoxicity effects of pentachlorophenol (PCP) which is an environmental endocrine disruptor, the inhibition effects of PCP on seed germination and root elongation of 8 kinds of crops and the acute toxicity of PCP to *Eisenia fetida* were examined in the study. The genotoxicity effects of PCP on crops and animals were also studied using the micronucleus test with root tip cells of wheat and the comet assay with *Eisenia fetida*. The results showed that PCP possessed strong inhibitory effects on seed germination and root elongation intensity of crops at a certain concentration range. The inhibitory rates showed significant concentration effect relationship and the inhibition is more prominent on smaller seeds such as cabbage, lettuce and millet than on those bigger ones. The 24, 48 and 72 h median lethal concentrations of PCP on *Eisenia fetida* were 66.5, 53.9 and 45.1 mg L⁻¹, respectively. Treated with 49.1 mg L⁻¹ of PCP, wheat root tip cells induced micronuclei and the micronucleus rate was 6.91%. Treated with 75 mg L⁻¹ of PCP, double micronuclei were induced. The rates of comet tail of somatic cell nuclei of *Eisenia fetida* treated with 40 and 80 mg L⁻¹ of PCP were 23.1% and 42.8%, respectively. These results proved that PCP (in a range of 4.3—71.2 mg L⁻¹) possesses genetic toxicity on cells of crops and animals.

Keywords: pentachlorophenol; ecotoxicity; micronucleus test; *Eisenia fetida*; comet assay; genetic toxicity

收稿日期: 2011-02-23 录用日期: 2011-05-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30970342); 国家教育部留学归国人员基金资助项目和辽宁省高校创新团队支持计划项目 (2006-R32)

作者简介: 张蕊媛 (1986-) 女, 环境科学硕士, 研究方向: 环境生物学, E-mail: zhangruiyuan5337@163.com * 通讯作者 (Corresponding author), E-mail: liuxin@lnnu.edu.cn

五氯苯酚 (Pentachlorophenol, PCP) 被广泛地用作除草剂、除海藻剂以及杀虫剂等的原料, 虽然毒性中等, 但由于难降解, 容易在动物体内富集, 因此会导致动物肺、肝、肾脏以及神经系统损伤^[1]。近年来, PCP 被鉴定为一种环境内分泌干扰物, 在世界范围内造成土壤和水体的污染。目前, 关于 PCP 的生态毒性测试已有相关报道, Stephenson 等^[2]对 3 种暴露在 PCP 环境下的水蚤 (*Daphnia magna*, *D. pulex* 和 *D. galeata mendotae*) 进行检测, 得到 48 h 的半致死浓度分别为 1.78、4.59 和 0.51 mg L⁻¹。李伟民等^[3]研究了 PCP 对鲫鱼肝脏的氧化损伤, 0.16 mg L 组 PCP 处理的鲫鱼第 13 天全部死亡。Zheng 等^[4]研究了 PCP 对斑马鱼胚胎 (*Brachydanio rerio*) 的毒性, 得出 48 h 急性毒性实验 LC₅₀ 为 0.83 mg L⁻¹。Song 等^[5]研究了 PCP 对 *Galba perversa*, *Tubifex sinicus* 和 *Chironomus plumosus* 幼虫的作用, 得出 24 h 半致死数分别为 0.293、0.977 和 0.302 mg L⁻¹。但在众多报道中, 指示生物多以水生生态系统中的鱼类和海藻为研究对象, 鲜有关于 PCP 对土壤生态系统的生产者和消费者的毒性效应报道。本文以 PCP 为研究对象, 检测了其对 8 种作物种子的萌发和根伸长的抑制作用以及对赤子爱胜蚓 (*Eisenia fetida*) 的急性毒性作用; 并运用小麦根尖细胞微核试验和赤子爱胜蚓体细胞核的彗星实验, 检测了 PCP 的遗传毒性效应。通过研究力图阐明 PCP 对土壤生态系统生产者、消费者和分解者的生态毒性, 评估其对土壤生态系统的危害程度, 并在生产实践上指导农户合理使用农药, 减小对生态环境的破坏。

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 实验材料、试剂与仪器

材料: 直根系作物种子绿豆 (*Vigna radiata*), 黄瓜 (*Cucumis sativus* Linn.), 小白菜 (*Brassica chinensis* Linn.), 卷心莴苣 (*Lactuca sativa* Linn.), 须根系种子小麦 (*Triticum aestivum* Linn.), 高粱 (*Sorghum bicolor* Moench), 谷子 (*Setaria italica*) 和玉米 (*Zea mays*) 均购自大连种子公司。实验选取颗粒饱满、形态大小均匀和出芽率较高的种子, 用 100 mL L⁻¹ 的双氧水浸泡 10 min 进行表面消毒。

赤子爱胜蚓 (*Eisenia fetida*) 购自沈阳尊龙生物技术有限公司。

主要试剂: 五氯苯酚 (北京化工厂), 吐温-80 (江苏省海安石油化工厂), Comet AssayTM Trevigen 试剂盒 (Trevigen, Inc, USA), 无水乙醇、冰乙酸、氯化钠

等化学试剂为国产分析纯试剂。

仪器: BY-117 光学显微镜 (上海蔡康光学仪器厂), XSZ090 型荧光显微镜 (北京桂光兴仪器有限公司), LG16-WA 型微量离心机 (北京京立离心机有限公司), 水平槽电泳系统 (北京君意东方电泳设备有限公司), DHP9272 电热恒温培养箱 (上海柏欣仪器设备有限公司)。

1.2 实验方法

1.2.1 五氯苯酚溶液的制备

称取不同质量的 PCP 加入 1 mL 乙醇中使 PCP 充分溶解, 制成不同浓度系列母液。使用时用配制好的 0.2% 吐温水溶液稀释 10 倍, 制得不同浓度的 PCP 工作溶液, 为使 PCP 充分溶解, 用磁力搅拌器充分搅拌 (PCP 容易光解, 所需溶液要使用棕色试剂瓶避光盛放, 现用现配)。

1.2.2 对作物种子的萌发及根伸长抑制实验

参考 Kępczynsk 等^[6]和 Ramakrishna 等^[7]的方法并有所改动 (以下实验均采用滤纸接触法)。根据 PCP 对不同作物种子萌发及根伸长的抑制作用预实验结果, 分别设置 4 个实验浓度梯度组和阴性对照组 (加有同 PCP 工作溶液等量乙醇的 0.2% 吐温水溶液)。把配制好的各浓度 PCP 分别注入铺有滤纸的培养皿中, 每个培养皿放入 20 粒种子, 然后用石蜡膜封口, 25℃ 恒温培养箱中避光培养 1—3 d 期间观察种子的发芽程度, 待对照实验组种子根长达 3 cm 左右时测量该组所有浓度下的种子根长, 每组实验重复 5 次。

1.2.3 小麦根尖微核实验

参照 Kanaya 等^[8]的方法, 选取预萌动的小麦种子移入铺有滤纸的培养皿内 25℃ 避光培养 24 h 当幼根长到 1.0—1.5 cm 时, 选取籽粒大小和幼根长度近似的种子各 20 粒分别移入含 4 组试样 (PCP 溶液 2 个实验组浓度分别为根伸长半抑制浓度和高抑制浓度, 阳性对照组为 10 mg L⁻¹ 环磷酰胺溶液, 阴性对照组为双蒸水, 后两者加入与前者等量的乙醇和吐温) 的培养皿内 25℃ 避光培养 24 h 后取出, 用双蒸水洗涤 2 次, 再换用双蒸水恢复培养 24 h 切下根尖, 室温下用卡诺氏固定液 (甲醇: 冰乙酸 = 3:1) 固定 24 h (固定液的用量为材料体积的 20 倍以上) 取出根尖移入 3 mL 水解分离液中 (95% 甲醇: 盐酸 = 1:1) 室温下处理 30 min 倒去水解分离液, 换 3 mL 固定液处理 10 min。常规压片制片, 用改良苯酚品红染液染色 30 min 盖上盖玻片放到光

学显微镜上镜检,每个处理观察 1 000 多个细胞,记录观察的细胞总数和带有微核的细胞数。计算微核细胞作占的比例以千分率 (EMN/‰)表示。

1.2.4 赤子爱胜蚓的急性毒性试验

选择 1—2月龄,体重 300 mg左右的健康赤子爱胜蚓,实验前一天在培养皿内湿润滤纸上培养进行清肠处理。根据预试验结果确定 PCP浓度梯度为 15、30、45、60和 75 mg L⁻¹。每个培养皿注入 3 mL PCP溶液,加入 10条清肠后的赤子爱胜蚓,无光照培养 24、48和 72 h期间每 24 h观察赤子爱胜蚓的死亡数量,每个实验组和阴性对照组 (加有同 PCP工作溶液等量乙醇的 0.2%吐温水溶液)设置 5组重复试验。

1.2.5 彗星实验

彗星实验参照 Singh等^[9]方法,采用 Trevigen Comet AssayTM试剂盒 (Trevigen Inc, USA),根据厂商提供的实验步骤进行实验。实验分 3组,其中 2个染毒处理组。根据 24 h急性毒性实验结果确定 PCP浓度为 40和 80 mg L⁻¹,外加阴性对照组。

1.2.6 数据处理

五氯苯酚对各作物种子萌发的影响以相对发芽率 (RSG)和发芽指数 (GI)来描述;对种子的根伸长抑制作用以根伸长抑制率来描述。计算公式如下:

$$RSG(\%) = \frac{S_p}{S_c} \times 100\% \quad (1)$$

$$GI(\%) = \frac{RSG_p \times RI_c}{RSG_c \times RI_p} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{根伸长抑制率}(\%) = \frac{RI_c - RI_p}{RI_c} \times 100\% \quad (3)$$

RSG_p和 RSG_c分别是处理组和对照组的相对发芽率, S_p和 S_c分别是处理组和对照组的发芽数, RI_p和 RI_c分别是处理组和对照组的平均根长。用 EXCEL软件进行统计分析并拟合不同剂量 PCP与根伸长抑制率间的关系曲线,并根据曲线方程计算根伸长的半抑制浓度。

赤子爱胜蚓死亡率 (D_n),即死亡数占实验总数的百分比。

$$D_n = \frac{n}{N} \times 100\% \quad (4)$$

n、N分别是每一实验组的死亡数和该组的实验总数。用 EXCEL软件拟合不同剂量五氯苯酚分别在 24、48和 72 h与赤子爱胜蚓死亡率的曲线方程,并根据曲线方程计算在 24、48和 72 h赤子爱胜蚓的半致死浓度 (LC₅₀)。结果以平均值 ± SD表示。

2 结果 (Results)

2.1 五氯苯酚对作物种子萌发的抑制作用

实验选择不同浓度 PCP溶液培养几种常见作物种子,各种作物种子的发芽率和发芽指数见表 1。由表 1可见,在所设置的浓度梯度实验组中,直根系作物绿豆和黄瓜的发芽率虽没受到抑制,但发芽指数分别在 PCP浓度为 150和 25 mg L⁻¹时表现出较强的阻害;小白菜和卷心莴苣在 PCP浓度为 15 mg L⁻¹时发芽率就产生 10%以上的抑制,且发芽指数分别为 44.73%和 38.25%,受阻害明显,随 PCP浓度升高而受阻害明显加大。须根系作物中,在 PCP浓度为 50 mg L⁻¹时,发芽率受阻害的程度由低到高的顺序为:高粱>玉米>小麦>谷子,发芽强度相应的顺序为:玉米>小麦>高粱>谷子。总体看,不同作物的发芽率对于 PCP的敏感性明显表现出须根系作物的敏感性大于直根系作物;不同作物的发芽指数具有相同的浓度梯度效应,即随 PCP浓度的升高,受抑制作用越强;而且,在两类根系作物中都表现出体积大的种子 (直根系的绿豆和黄瓜以及须根系的玉米和小麦)发芽强度高于体积小的种子 (直根系的小白菜和卷心莴苣以及须根系的高粱和谷子)。

2.2 五氯苯酚对作物种子根伸长的抑制作用

五氯苯酚对作物种子根伸长的抑制作用结果见图 1和图 2。由图可见,不同浓度 PCP对 8种作物根伸长的抑制作用符合二级动力学方程,表现出明显的浓度效应关系。数据统计计算得到,PCP对作物种子根伸长 EC₅₀值从高到低依次为:玉米, 167.8 mg L⁻¹;绿豆, 147.7 mg L⁻¹;小麦, 49.1 mg L⁻¹;高粱, 37.1 mg L⁻¹;黄瓜, 28.5 mg L⁻¹;谷子, 15.3 mg L⁻¹;小白菜, 13.8 mg L⁻¹;卷心莴苣, 11.1 mg L⁻¹。PCP对作物种子根伸长出现抑制的效应浓度 EC₂₀值从高到低依次为:玉米, 71.2 mg L⁻¹;绿豆, 50.1 mg L⁻¹;小麦, 12.3 mg L⁻¹;高粱, 9.8 mg L⁻¹;黄瓜, 7.6 mg L⁻¹;谷子, 6.2 mg L⁻¹;小白菜, 5.2 mg L⁻¹;卷心莴苣, 4.3 mg L⁻¹。以上结果说明,PCP对谷子、小白菜和卷心莴苣等体积较小的种子的根伸长抑制作用较为突出。

2.3 小麦根尖微核实验结果

小麦根尖微核实验结果见图 3。图 3A为阴性对照,从图中可见没有出现微核现象,细胞质内代谢滞留物不明显;图 3B和 3C分别为 PCP浓度为 49.1和 75 mg L⁻¹条件下处理后的结果,可以看出两图中的细胞染色体均出现了微核染色体畸变 (微核率

表 1 不同浓度 PCP 处理对作物种子发芽和发芽指数的影响

Table 1 Effects of the different PCP concentrations on seed germination and germination indexes of crops

实验作物	浓度 / (mg L ⁻¹)	相对发芽率 / RSG±SD%	发芽指数 / GI±SD%	实验作物	浓度 / (mg L ⁻¹)	相对发芽率 / RSG±SD%	发芽指数 / GI±SD%
直根系作物	0	100.00±0.00	100.0±0.00	小白菜	0	100.00±0.00	100.00±0.00
	50	100.00±0.00	84.28±2.74		15	88.00±2.74	44.69±1.19
	100	100.00±0.00	61.94±1.31		30	83.00±6.71	20.78±0.77
	150	100.00±0.00	50.14±2.53		45	83.00±4.47	16.35±1.21
	200	100.00±0.00	38.1±3.34		60	80.00±7.91	11.24±0.74
	0	100.00±0.00	100.00±0.00		0	100.00±0.00	100.00±0.00
	25	100.00±0.00	50.23±2.54		15	89.00±6.52	38.00±1.07
	50	100.00±0.00	30.89±2.01		30	86.00±4.18	15.97±1.42
	75	100.00±0.00	22.66±1.12		45	78.00±5.70	9.54±0.75
	100	100.00±0.00	16.70±0.74		60	74.00±6.52	8.75±0.71
须根系作物	0	100.00±0.00	100.00±0.00	0	100.00±0.00	100.00±0.00	
	25	85.00±5.00	57.23±1.49	10	83.00±5.70	61.87±1.97	
	50	77.00±5.70	44.10±1.11	20	74.00±4.18	38.03±1.84	
	75	73.00±2.74	26.25±0.95	30	69.00±4.18	23.81±1.11	
	100	68.00±5.70	21.88±0.78	40	65.00±3.54	6.75±0.41	
	0	100.00±0.00	100.00±0.00	0	100.00±0.00	100.00±0.00	
	25	92.00±2.74	60.83±1.14	50	83.00±7.58	81.20±1.41	
	50	90.00±5.00	31.51±1.43	100	67.00±5.70	47.79±1.00	
	75	87.00±4.47	19.40±0.55	150	43.00±7.58	20.51±2.31	
	100	73.00±5.70	11.61±0.94	200	30.00±7.90	12.75±1.41	

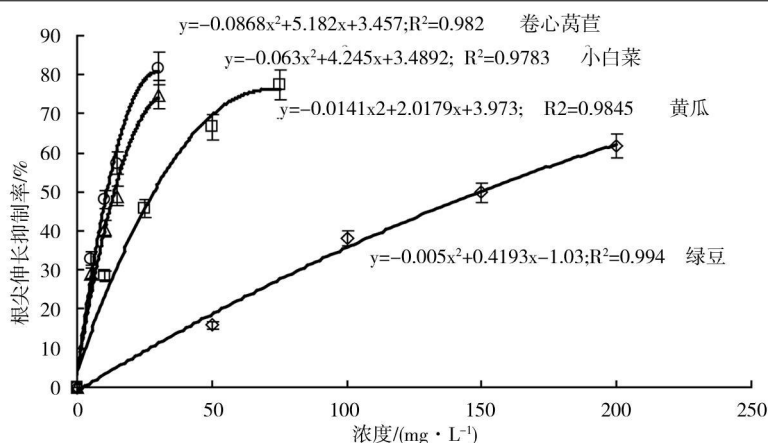


图 1 不同浓度 PCP 对直根系作物根伸长抑制作用

Fig 1 Inhibition effects of PCP with different concentrations on the root elongation of tap root crops

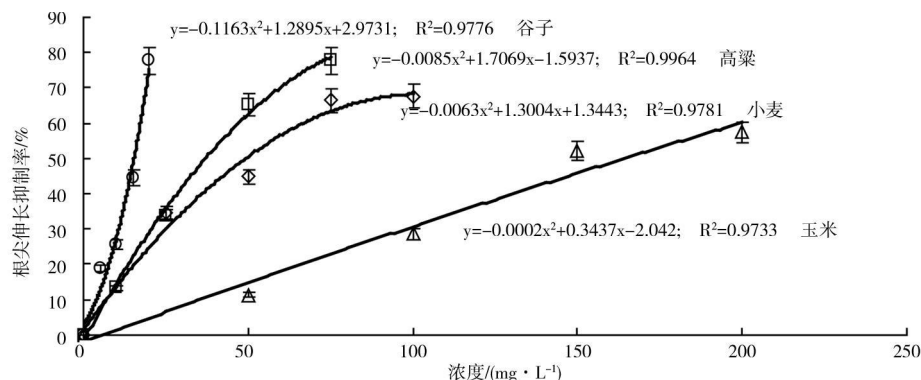


图 2 不同浓度 PCP 对须根系作物根伸长抑制作用

Fig 2 Inhibition effects of PCP with different concentrations on the root elongation of fibrous root crops

分别为 6.91%和 8.62%)以及细胞质中代谢滞留物质增多等生理损害,高剂量 PCP浓度处理的细胞中滞留物质明显多于较低浓度处理的根尖细胞,并且细胞中少数具有 2 个微核。

2.4 五氯苯酚对赤子爱胜蚓的急性毒性效应

在室温下,PCP浓度为 15和 30 mg L⁻¹时,72 h 内对赤子爱胜蚓不产生明显毒性效应,赤子爱胜蚓死亡率与阴性对照无差别。由图 4 可见,PCP浓度在

45.60和 75 mg L⁻¹时,死亡率依次上升。以赤子爱胜蚓死亡率对 PCP浓度作图,进行回归分析,其浓度效应关系符合二级动力学方程。根据方程式计算,PCP对赤子爱胜蚓在 24.48和 72 h的半致死浓度分别为 66.5.53.9和 45.1 mg L⁻¹,为中等毒性。72与 24 h实验结果相比较可以看出,对 PCP低浓度(45-60 mg L⁻¹)的处理组而言,染毒处理时间是赤子爱胜蚓死亡率增大的决定因素,且浓度越低,表现越显著。

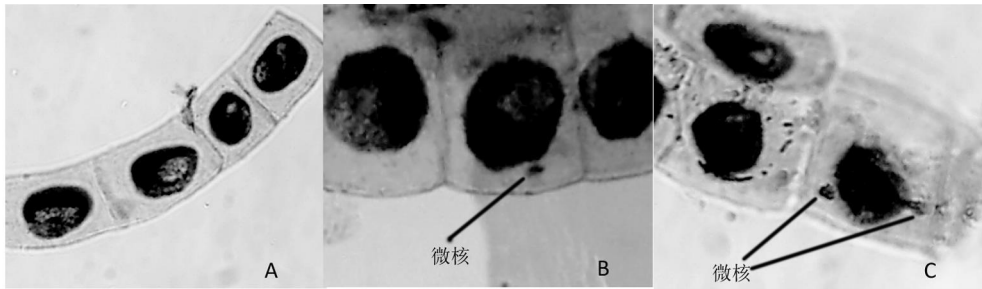


图 3 五氯苯酚对小麦种子幼根细胞的致微核试验

A 阴性对照; B PCP浓度为 49.1 mg L⁻¹; C PCP浓度为 75 mg L⁻¹

Fig. 3 Pentachlorophenol induced micronucleus of radicle cells of wheat seeds

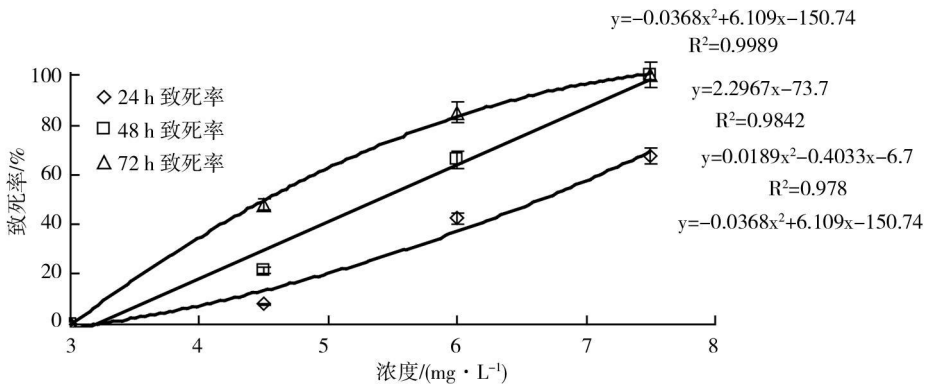


图 4 不同浓度 PCP对赤子爱胜蚓的致死率的影响

Fig. 4 Effect of PCP with different concentrations of on the mortality rates of Eisenia fetida

2.5 五氯苯酚对赤子爱胜蚓细胞 DNA的损伤作用

从表 2可见,PCP在较低浓度(40 mg L⁻¹)时,赤

注: *与 0 mg L⁻¹(对照)组比, P<0.01.

子爱胜蚓体细胞核就出现了明显的彗星现象,与阴性对照相比,细胞拖尾率和拖尾细胞平均尾长明显增加,差异具有统计学意义(P<0.01),随着染毒浓度的增加,细胞拖尾率和拖尾细胞平均尾长都增加,呈明显的浓度效应关系。这说明 PCP对赤子爱胜蚓并且体细胞有明显的 DNA损伤作用。

表 2 PCP对赤子爱胜蚓细胞 DNA的损伤结果 (n=100)

Table 2 Pentachlorophenol induced DNA damage of Eisenia fetida cells (n=100)

剂量/(mg L ⁻¹)	细胞拖尾率/%	尾长/(x±s) (μm)
0	5.125	3.58±0.42
40	23.096*	8.73±1.96*
80	42.805*	11.66±2.33*

3 讨论 (Discussion)

3.1 五氯苯酚对作物种子萌发的抑制作用

种子萌发实验是评价环境中化学物质生态毒性的主要方法之一,发芽率、发芽指数及根伸长抑制率

是对植物生态毒性评价的主要指标,在有机污染物的生态毒性评价中具有广泛应用^[10-11]。根据实验结果可知,PCP对不同作物种子的毒性具有差异性,

PCP对于不同作物的发芽率敏感性和根伸长抑制作用是不同的,但是具有相同的浓度梯度效应,即随着PCP浓度的升高,作物种子的发芽和根伸长状况会受到阻碍,PCP对绿豆和玉米根伸长半抑制浓度相对较大,而小白菜、卷心莴苣、谷子对PCP的敏感度比较高,这也许是和种子的大小有关。

3.2 五氯苯酚对小麦根尖细胞的影响

根尖微核技术自1982年由DeGrass等^[12]建立以来,广泛应用于对水源、土壤和大气等环境中化学有毒物质和环境污染物的致突变性检测。朱志梅^[13]、何俊瑜^[14]和范雪涛^[15]等人通过实验,分别证实了微核实验可以检测环境污染物对细胞的遗传毒性。根据实验结果可知,暴露在PCP环境中的小麦根尖细胞质中代谢滞留物质明显增多,PCP半抑制浓度处理下能够诱发小麦根尖细胞产生微核,高抑制浓度处理下细胞甚至出现双微核。这种现象说明PCP对作物种子具有一定的遗传毒性,PCP剂量加大,对小麦根尖细胞的毒性也随之变大。PCP是氧化磷酸化过程强大的解偶联剂,能抑制ATP的形成,从而使细胞不能提供正常活动所需要的能量^[16];而植物细胞内大分子物质及次生代谢产物的跨膜转运是依赖消耗ATP的ABC转运蛋白的运输完成的^[17],因此本研究所发现的细胞代谢滞留物增多现象可能是PCP阻断氧化磷酸化合成ATP过程,进而抑制ABC转运蛋白活性的结果。植物根尖微核试验表明PCP的遗传毒性作用可通过植物根尖细胞出现微核来反映,这对评估环境激素类化合物对植物的生长、发育和致畸方面具有实际意义。

3.3 五氯苯酚对赤子爱胜蚓的急性毒性效应

选取蚯蚓作为研究对象来评价五氯苯酚的生态毒性,可以反映进入环境中的五氯苯酚对土壤生态系统中的消费者和分解者的影响。根据实验结果可知,在同样的暴露时间下,PCP的浓度与赤子爱胜蚓的死亡率呈正相关,而暴露在相同浓度PCP环境中,随着时间的延长,毒性变大,这说明PCP在生物体内具有一定的积累作用。可见,蚯蚓致死主要是由PCP的浓度和暴露时间决定的。以往有研究表明,PCP对蚯蚓的毒性随着土壤有机质的增加而减小^[18]。本实验采用的是滤纸接触法,得到的半致死浓度可能比用自然土壤法研究得到的浓度要大。

3.4 五氯苯酚对赤子爱胜蚓细胞DNA的损伤

自从Ostlin^[19]和Johanson^[19]提出彗星实验技术以来,经过多年的改进和完善以后,该技术已经成为在单细胞水平上检测DNA损伤与修复的行之有效的方法。Morin^[20]和Quejsser^[21]分别对有机物和重金属等物质进行彗星实验,再次证实了该实验的可靠性。根据本实验结果可知,PCP对赤子爱胜蚓具有遗传毒性,较低浓度的PCP即可引起DNA损伤,在不致死的浓度下,赤子爱胜蚓的各项生理机能有明显损伤,活性降低。

综上所述,PCP对土壤生态系统生产者、消费者和分解者在个体、细胞和分子水平方面均有一定的毒性,对植物种子的萌发、植物和土壤动物的生长和遗传均有潜在的影响,因此PCP对土壤生态系统的危害程度不可忽视,应在农业生产上指导农户合理使用含PCP的农药,不可追求高药效而盲目增大施用浓度和施用量,以避免对生态环境构成破坏。

致谢:感谢辽宁师范大学城市与环境学院乔广浩和张娜同学的帮助和支持。

通讯作者简介:刘欣(1964—),男,教授,主要从事环境生物学方面的研究,近年来在国内外核心期刊上发表论文60余篇。

参考文献:

- [1] James W B, Curtis D K. Effects of molybdate and Pentachlorophenol on the sulfation of dehydroepiandrosterone [J]. *Toxicology and Applied Pharmacology* 1998, 151(1): 105-109
- [2] Stephenson G L, Kaushik N K, Solomon K R. Acute toxicity of pure pentachlorophenol and a technical formulation to three species of *Daphnia* [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 1994, 20(1): 73-80
- [3] 李伟民,尹大强,周岩,等.五氯酚对鲫鱼肝脏的氧化损伤[J]. *农村生态环境*, 2003, 19(1): 40-42
Li W M, Yin D Q, Zhou Y, et al. Pentachlorophenol induced oxidative stress in liver of crucian carp [J]. *Rural Eco-Environment* 2003, 19(1): 40-42 (in Chinese)
- [4] 郑敏,朱琳.五氯酚对斑马鱼胚胎的毒性效应研究[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(10): 1967-1971
Zheng M, Zhu L. Toxicity effects of pentachlorophenol on *Brachydanio rerio* [J]. *Applied Ecology* 2005, 16(10): 1967-1971 (in Chinese)
- [5] Song Z H. Effects of Pentachlorophenol on *Gambusia affinis* and *Chironomus plumosus* larvae [J]. *Bulletin of Environment Contamination and Toxicology*

- 2007 79(3): 278—282
- [6] Kłoczyński J, Kłoczyńska E. Reversing the inhibitory effect of paclobutrazol on seed germination of *Amaranthus paniculatus* by GA₃ ethephon or ACC[J]. *Plant Growth Regulation* 1988 7(1): 47—52
- [7] Ramakrishna V, Rao P R. Effect of in vivo administered plant growth hormones on the development of amylase and protease during germination of indian bean (*Dolichos lablab* L. var. *ignosus*) seeds[J]. *Acta Physiologica Plantarum* 2006 28(3): 245—250
- [8] Kanaya N, Gill S, Grover I S, et al. *Vicia faba* chromosomal aberration assays[J]. *Mutation Research* 1994 310(2): 231—247
- [9] Singh N P, McCoy M T, Tice R R, et al. A simple technique for quantitation of low levels of DNA damage in individual cells[J]. *Experimental Cell Research* 1988 175(1): 184—191
- [10] 苏君梅, 王丹丹, 张琦. 土壤中葱、菲、芘对小麦种子的生态毒性效应[J]. *山西化工*, 2008 28(1): 13—15
- Sue J M, Wang D D, Zhang Q. Ecotoxicological effects of anthracene, phenanthrene, pyrene in soils on the inhibition of seed germination and elongation of wheat[J]. *Shangxi Chemical Industry* 2008 28(1): 13—15 (in Chinese)
- [11] Ramirez W A, Domene X, Andes P, et al. Phytotoxic effects of sewage sludge extracts on the germination of three plant species[J]. *Ecotoxicology* 2008 17(8): 834—844
- [12] Degrossi F, Rizzoni M. Micronucleus test in *Vicia faba* root tips to detect mutagen damage in freshwater pollution[J]. *Mutation Research* 1982 97(1): 19—33
- [13] 朱志梅, 侯昭华, 刘康, 等. Hg²⁺对蚕豆根尖细胞的微核效应[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2008 38(1): 96—98
- Zhu Z M, Hou Z H, Liu K, et al. MCN effect of Hg²⁺ on the root cells of *vicia faba*[J]. *Journal of Northwest University(Natural Science Edition)*, 2008 38(1): 96—98 (in Chinese)
- [14] 何俊瑜, 任艳芳, 王阳阳, 等. 镉对小麦根尖细胞的遗传损伤效应[J]. *生态环境学报*, 2009 18(3): 830—834
- He J Y, Ren Y F, Wang Y Y, et al. Genotoxicity of cadmium on root tips cells of wheat[J]. *Ecology and Environmental Sciences* 2009 18(3): 830—834 (in Chinese)
- [15] 范雪涛, 马丹炜, 刘爽, 等. 蚕豆根尖微核试验在辣子草化感作用研究中的应用[J]. *生态环境*, 2008 17(1): 323—326
- Fan X T, Ma D W, Liu S, et al. Assessment of alleopathy of *Galinsoga parviflora* Cav. using *Vicia* micronucleus test[J]. *Ecology and Environment* 2008 17(1): 323—326 (in Chinese)
- [16] Jorens P G, Schepens P J C. Human pentachlorophenol poisoning[J]. *Human and Experimental Toxicology* 1993 12(6): 479—495
- [17] Yazaki K. Transporters of secondary metabolites[J]. *Current Opinion Plant Biology* 2005 8(3): 301—307
- [18] Van G C A, Ma W C. Toxicity and bioaccumulation of chlorophenols in earthworm in relation to bioavailability in soil[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 1998 15(3): 289—297
- [19] Ostling Q, Johanson K J. Microelectrophoretic study of radiation induced DNA damage in individual mammalian cells[J]. *Biochemical Biophysical Research Communications* 1984 123(1): 291—298
- [20] Morin B, Filatreau J, Viquejlin L, et al. Detection of DNA damage in yolk-sac larvae of the Japanese Medaka *Oryzias latipes* by the comet assay[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 2011 399(6): 2235—2242
- [21] Queisser N, Oeiza P, I. Sopper H, et al. Aldosterone induces oxidative stress, oxidative DNA damage and NF- κ B activation in kidney tubule cells[J]. *Molecular Carcinogenesis* 2010 50(2): 123—135