

# 氯苯甲酸植物毒性实验中两类指标的比较研究

殷培杰<sup>1,2</sup>, 李培军<sup>1</sup>, 刘宛<sup>1</sup>, 张海蓉<sup>1</sup>

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100010)

**摘要:** 采用对氯苯甲酸敏感的 2 种白菜进行种子暴露试验, 研究表观性状指标与生物化学指标对 3 种氯苯甲酸的敏感程度, 以便更加全面地反映氯苯甲酸的植物毒性和筛选能指示氯苯甲酸的敏感因子。结果表明, 在 3 种氯苯甲酸对 2 种白菜根伸长 10% ~ 50% 抑制区间内, 氯苯甲酸剂量 - 发芽抑制率和氯苯甲酸剂量 - 根伸长抑制率均存在极显著的线性关系 ( $P < 0.01$ ), 从拟合方程的斜率可以看出, 3 种氯苯甲酸浓度的变化对 2 种白菜发芽率抑制的影响幅度大于对根伸长抑制的影响幅度。氯苯甲酸剂量 - SOD(超氧化物歧化酶)活性抑制率之间和氯苯甲酸剂量 - CAT(过氧化氢酶)活性抑制率之间均存在二项式关系 ( $P < 0.05$ ), 氯苯甲酸剂量 - POD(过氧化物酶)活性抑制率之间存在线性关系 ( $P < 0.05$ )。根据拟合方程求出相应的半效应浓度 ( $IC_{50}$ ), 3 种氯苯甲酸的 SOD 和 CAT 的半效应浓度均在试验区间之外, POD 的半效应浓度则在试验区间之内, 表明在试验区间内, SOD 和 CAT 活性不敏感, POD 是个有效指标, 且对于 3 - 氯苯甲酸和 4 - 氯苯甲酸的敏感程度高于发芽率和根伸长抑制率。拟合直线方程的斜率可考虑作为“辅助性指标”去评估植物毒性, 因为越大的斜率值意味着在试验过程中该指标的单位变化幅度越大, 也就越容易观察。

**关键词:** 氯苯甲酸; 抑制率; 抗氧化酶; 半效应浓度

中图分类号: S131 文献标识码: A 文章编号: 1672 - 2043(2005)01 - 0001 - 05

## Comparison on Two Kinds of Endpoints in the Phytotoxicity Test of Chlorobenzoic Acids

YIN Pei-jie<sup>1,2</sup>, LI Pei-jun<sup>1</sup>, LIU Wan<sup>1</sup>, ZHANG Hai-rong<sup>1</sup>

(1. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100010, China)

**Abstract:** Using one kind of indicator was not sufficient to understand the phytotoxicity of organic substance comprehensively, since the results were easily disturbed by the adverse surroundings. The indicator system composed of different kinds of indicators could overcome the shortage. The sensitive degrees to the three chlorobenzoic acids of the apparent property indicator and the biochemical indicator were compared for providing comprehensive information on the phytotoxicity of CBA and screening the more sensitive endpoint. Two terrestrial plant species in same category, Chinese cabbage (*Brassica pekinenses*) and Chinese white cabbage (*Brassica rapa L. Chinensis Group*), were exposed to different concentrations of CBA in the germination test. There existed very significant linear correlations between CBA dose with germination inhibition rate and root elongation inhibition in the inhibition range of root elongation 10% ~ 50% ( $P < 0.01$ ), and the dose differences had more influence on germination inhibition rate than on root elongation inhibition rate. The quadratic relationships between CBA dose with inhibition rate of the superoxide dismutase (SOD) activity and inhibition rate of the catalase (CAT) activity were also observed, while, the linear relationship between CBA dose and inhibition rate of the peroxidase (POD) activity was significant ( $P < 0.05$ ).  $IC_{50}$  of SOD and CAT were beyond the experimental dose range, but that of POD was in the range, which suggested that the inhibition degree of POD activity, not the inhibition degree of SOD and CAT activity, was invalid indicator could be considered as an effective indicator, more sensitive than the germination rate and root elongation rate for 3 - CBA and 4 - CBA. Furthermore, the slope of plotting equation should be regard as "assistant endpoints" to assess the phytotoxicity, since the bigger slope value meant the more obvious symptom and the endpoints could be discerned easily during the process.

**Keywords:** chlorobenzoic acid; inhibition rate; oxidase; half effect concentration

收稿日期: 2004 - 05 - 21

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(20337010)

作者简介: 殷培杰(1972—), 男, 甘肃张掖人, 讲师, 在读博士, 现主要从事土壤有机污染控制研究。E-mail: yinpeijie@hotmail.com

氯苯甲酸是重要的精细有机化工产品,是染料、农药、医药等领域重要的中间体及分析试剂,广泛用于农药、医药、防腐剂及染料、涂料工业<sup>[1,2]</sup>,即氯苯甲酸主要通过工业产品及其生产过程进入环境。此外氯苯甲酸也可通过施用除草剂或多氯联苯被微生物部分代谢形成的中间产物进入环境,在持久性环境污染物 PCBs 降解过程中氯苯甲酸被认为是限速步骤<sup>[3-6]</sup>。由于易溶于水,氯代苯甲酸的生产和使用会使土壤和地下水体均遭受程度不同的污染<sup>[7]</sup>。国内外对氯苯甲酸的生物降解研究较多,但对其植物毒性的研究尚未见报道。

高等植物是生态系统的重要组成部分,可利用植物毒性试验来预测化合物的潜在毒性,并以这些植物为指示生物进行环境风险评价,常采用根伸长试验、种子发芽试验和植物幼苗早期生长试验,以发芽率、根伸长、植株干重、株高等植物表观性状指标的受抑制情况进行判断<sup>[8,9]</sup>。但这些指标均为植物的表观性状,易受受试植物种类和其生长环境的影响,测试结果的可比性差,存在一定的不足。酶是植物发芽过程中不可缺少的因子,很容易受到逆境的影响,抗氧化酶系统作为生物体内消除活性氧的主要保护机制,它们与植物抗逆境能力密切相关。已有研究表明,抗氧化酶的一个重要特征是其活性或含量可因为污染物的胁迫而发生改变,因此抗氧化酶活性的改变可以间接反映环境中有毒有害物质的存在<sup>[10]</sup>,即测定暴露植物的抗氧化酶活性可以从生理水平上指示化合物的环境风险。目前已有关于抗氧化酶作为有机污染的生物标志物或生物监测指标的研究,这些工作的重点在于有机污染作用下抗氧化酶系统的响应研究,以定性描述为主<sup>[11,12]</sup>,有机污染物剂量-抗氧化酶活性量化关系的探讨尚未见报道。

由于有机化合物在环境累积的绝对浓度都相对较低,因此在植物毒性实验中找到敏感植物、或敏感植物的敏感因子就显得非常重要。单一类型指标反映的有机化合物植物毒性信息是有限的,且容易受到逆境对实验造成的干扰,不同类型指标组成的指标体系可以克服上述缺点。本研究的目的在于从量化角度研究表观性状指标与生物化学指标对3种氯苯甲酸的敏感程度,以便更加全面地反映氯苯甲酸的植物毒性和筛选能指示氯苯甲酸的敏感因子。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试材料

(1)2-氯苯甲酸(上海试剂公司,化学纯),3-氯苯甲酸(德国 Fluka 公司,分析纯),4-氯苯甲酸(北京旭东化工厂,分析纯)。

(2)小白菜(*Brassica rapa L. Chinensis Group*)种子购自沈阳农业大学;大白菜(*Brassica campestris L. ssp*)抗病新三号,购自北京四季园艺研究所。

(3)恒温培养箱,冷冻离心机,紫外-可见分光光度计,硬质玻璃培养皿,无灰定性滤纸,石英砂,中性滤纸。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 发芽试验方法

首先进行预备试验,确定三种氯苯甲酸对2种白菜根伸长抑制率在10%~50%的浓度区间。白菜选30粒种子,3次重复。在温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、黑暗条件下于生化培养箱中进行培养。对照种子发芽率>65%(本试验发芽率>80%),根长度20mm时,试验结束,记录种子发芽数,测量根伸长,并计算种子发芽率、根伸长抑制率。确定根伸长抑制率达10%和50%的浓度区间后,开始正式试验。

根据预备试验结果,在根伸长抑制率达10%~50%范围内,设置6个不同处理浓度,每一浓度3个平行样。在与预备实验相同温度和水分条件下,进行正式试验。

#### 1.2.2 酶活性测定方法

(1)粗酶液制备。取材于预冷研钵中,加入pH7.8磷酸缓冲液( $0.05\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ),冰浴下研磨成匀浆, $12\ 000\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 低温离心20min,上清液即为所需酶液。

(2)SOD活性的测定。在盛有3mL反应混合液(在54mL $14.5\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  dl-甲硫氨酸中分别加入均以 $50\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  pH7.8磷酸缓冲液配制的 $3\text{ }\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  EDTA,  $2.25\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  NBT和 $60\text{ }\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 核黄素各2mL,各个溶液均在用前配制,避光放置)的试管中,加入适量的粗酶液,混合后放在透明试管架上,在光照培养箱内照光10min,取出试管,迅速测定OD560值,以不加酶液的照光管为对照<sup>[13]</sup>。

(3)POD活性的测定。采用愈创木酚法<sup>[14]</sup>,单位为 $\Delta A_{470} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW}$ 。取粗酶液1mL于比色杯中,加适量反应混合液(50mL $100\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  pH6.0的磷酸缓冲液中加愈创木酚 $28\text{ }\mu\text{L}$ ,30%过氧化氢 $19\text{ }\mu\text{L}$ ,保存于冰箱中待用),混匀立即用秒表记录时间。在470nm波长下测OD值,每隔1min读数1次,以反应混合液3mL中加 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 为空白对照。酶活性

以每分钟吸光度变化值表示。

(4) CAT 活性测定。采用陈利锋方法<sup>[15]</sup>,单位为  $\Delta A_{240} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$ 。提取后的粗酶液,在 25 °C 水浴中预热 10 min,逐管加入 0.3 mL 0.1 mol · L<sup>-1</sup> 的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,每加完 1 管立即计时并倒入石英比色杯中,240 nm 测定其吸光度的变化,每隔 1 min 读数 1 次,共测 4 min,以 1 min 内 A<sub>240</sub> 减少 0.1 的酶量为一个酶活单位(U)。

### 1.2.3 数据处理

根据氯苯甲酸剂量 - 各指标的抑制率之间数据,采用 SPSS 软件进行回归分析,并对拟合的模型进行显著性检验。对符合要求的模型,再令  $Y = 50$  (50% 抑制率)对  $X$  进行无偏点估计,在  $P < 0.05$  的显著性水平上结合植物生理及生化知识判定  $X$  的解 (有些解

应舍弃),即得到该氯苯甲酸对某种抗氧化酶的一半效应浓度。

## 2 结果与分析

### 2.1 氯苯甲酸剂量对表现性状指标影响的量化分析

从表 1 可以看出,3 种氯苯甲酸在各自作用区间内均对 2 种白菜发芽率和根伸长有明显抑制作用。剂量和发芽抑制率、根伸长抑制率之间存在显著的线性关系 ( $P < 0.01$ )。从斜率可以看出,剂量 - 发芽抑制率拟合方程的斜率明显大于剂量 - 根伸长抑制率拟合方程的斜率,说明氯苯甲酸浓度变化对发芽率抑制的影响幅度大于根伸长抑制率的影响幅度。

### 2.2 氯苯甲酸剂量对抗氧化酶指标影响的量化分析

植物在有机污染作用下会产生高度反应性的氧

表 1 氯苯甲酸剂量 - 表现性状抑制率之间的量化关系

Table 1 Relationships of chlorobenzoic acid dose and the inhibition rate of germination and root elongation

污染物及作用区间/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	项目	拟合方程	决定系数 $r^2$	预测效果的方差分析
2 - 氯苯甲酸 (100 - 200)	剂量 - 小白菜发芽抑制率	$Y = 0.4151X - 9.0983$	$r^2 = 0.9894$	$F = 150.91 \quad P = 0.00016$
	剂量 - 大白菜发芽抑制率	$Y = 0.4688X - 5.5616$	$r^2 = 0.9722$	$F = 139.69 \quad P = 0.00029$
	剂量 - 小白菜根伸长抑制率	$Y = 0.3211X - 12.3273$	$r^2 = 0.9629$	$F = 103.78 \quad P = 0.00052$
	剂量 - 大白菜根伸长抑制率	$Y = 0.1622X + 22.6996$	$r^2 = 0.95$	$F = 75.97 \quad P = 0.00095$
4 - 氯苯甲酸 (10 - 100)	剂量 - 小白菜发芽抑制率	$Y = 0.6912X - 2.6560$	$r^2 = 0.9834$	$F = 237.65 \quad P = 0.0001$
	剂量 - 大白菜发芽抑制率	$Y = 0.6063X + 8.3975$	$r^2 = 0.9568$	$F = 88.64 \quad P = 0.00071$
	剂量 - 小白菜根伸长抑制率	$Y = 0.4974X - 5.4263$	$r^2 = 0.9684$	$F = 122.81 \quad P = 0.00038$
	剂量 - 大白菜根伸长抑制率	$Y = 0.4945X + 8.6789$	$r^2 = 0.8626$	$F = 25.12 \quad P = 0.0074$
3 - 氯苯甲酸 (10 - 100)	剂量 - 小白菜发芽抑制率	$Y = 0.7609X + 8.8634$	$r^2 = 0.9484$	$F = 73.58 \quad P = 0.0010$
	剂量 - 大白菜发芽抑制率	$Y = 0.6552X + 10.9948$	$r^2 = 0.9491$	$F = 74.62 \quad P = 0.00099$
	剂量 - 小白菜根伸长抑制率	$Y = 0.4144X + 11.408$	$r^2 = 0.9479$	$F = 72.84 \quad P = 0.0010$
	剂量 - 大白菜根伸长抑制率	$Y = 0.3587X + 12.428$	$r^2 = 0.9885$	$F = 345.085 \quad P = 0.000049$

自由基,氧自由基在细胞中引起生物膜的过氧化损伤,植物体可通过增加抗氧化酶的活性来避免这种伤害,这些抗氧化酶包括超氧化物歧化酶 (SOD, EC 1.15.1.1.)、过氧化物酶 (POD, EC 1.11.1.7.)、过氧化氢酶 (CAT, EC 1.11.1.6.), SOD 酶清除  $\cdot \text{O}_2^-$  将其歧化为  $\text{O}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}_2$ , POD、CAT 则催化  $\text{H}_2\text{O}_2$  形成  $\text{H}_2\text{O}$ , 这三种酶可有效减少  $\cdot \text{O}_2^-$  和  $\text{H}_2\text{O}_2$  的积累<sup>[16]</sup>。抗氧化酶系统这种变化在不同的污染物作用下,却表现出不同的响应方式。在镉的胁迫下,两种紫羊茅生长受到抑制,丙二醛和 POD 活性急速上升, CAT 和 SOD 活性降低,蛋白质含量下降<sup>[17]</sup>。久效磷对 3 种海洋微藻毒性机理的研究中, SOD 对两种藻类表现出下降的总趋势,另一种无规律, POD 则整体上表现出下降的趋势<sup>[18]</sup>。刘宛等人<sup>[11]</sup>在菲对大豆幼苗的胁迫研究中,发现大豆幼苗 SOD 活性变化的剂量 - 效应关系的作用形式比较复杂,胁迫 2 d 时为线性关系,胁迫 5 d 和 8 d

时为抛物线型。

从上面的研究可以看出,抗氧化酶活性变化是植物对不利环境产生的一种抗逆反应,污染物、受试植物、作用时间和测试方法都会对酶的活性产生影响,但作为土壤有机污染的指示因子需要在某种测试条件下的稳定性,故应界定受试植物、污染物的作用区间、测试时间,再进行数量分析,以保证得出的结论就具有一定的可比性。本文在此方面进行了尝试,即采用对氯苯甲酸敏感的 2 种植物,在其根伸长受氯苯甲酸抑制 10% ~ 50% 区间内进行抗氧化酶活性分析。

从表 2 可以看出,氯苯甲酸剂量 - SOD 酶活性抑制率在各自试验区间内可以二项式曲线拟合,氯苯甲酸剂量 - POD 酶活性抑制率在各自实验区间内线性拟合良好,氯苯甲酸剂量 - CAT 酶活性抑制率在各自实验区间内以可以二项式曲线拟合 ( $P < 0.05$ )。3 种酶拟合方程的决定系数  $r^2$  都在 0.75 之上,表明酶活

性的抑制主要是氯苯甲酸剂量变化造成的,而非实验误差。经过显著性检验后,各拟合方程均有  $F > F_{0.05}$ , 可以判定这种拟合关系是有效的。

从表3可以看出,对SOD和CAT而言,3种氯苯甲酸剂量的半效应浓度均在试验区间之外,即在10%~50%的2种白菜根伸长抑制区间内,以SOD和CAT为判断指标不够敏感,缺乏有效性。对POD酶

而言,3种氯苯甲酸的半效应浓度均在试验区间之内,其中对于3-氯苯甲酸和4-氯苯甲酸,POD的 $IC_{50}$ 明显小于表观性状指标(发芽率和根伸长抑制率),但对于2-氯苯甲酸,POD与2种表观性指标值近似,表明在此区间内,以POD是一个有效指标,且对于3-氯苯甲酸和4-氯苯甲酸其敏感程度高于表观性状指标。

表2 氯苯甲酸剂量-抗氧化酶活性抑制率之间的量化关系 ( $F_{0.05(1,4)} = 7.71$ )

Table 2 Relationships of chlorobenzoic acid dose and the inhibition rate of oxidase activity

酶	污染物及作用区间/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	项目	拟合方程	决定系数 $r^2$	预测效果的方差分析
SOD	2-氯苯甲酸(100-200)	剂量-小白菜SOD抑制率	$Y = 0.0104X^2 - 3.3203X + 255.55$	$r^2 = 0.8954$	$F = 12.84 \quad P = 0.034$
		剂量-大白菜SOD抑制率	$Y = 0.0076X^2 - 2.5812X + 206.46$	$r^2 = 0.8982$	$F = 120.37 \quad P = 0.0014$
	4-氯苯甲酸(10-100)	剂量-小白菜SOD抑制率	$Y = 0.008X^2 - 1.0243X + 35.692$	$r^2 = 0.8982$	$F = 12.24 \quad P = 0.033$
		剂量-大白菜SOD抑制率	$Y = 0.0066X^2 - 0.4873X + 13.91$	$r^2 = 0.9265$	$F = 18.89 \quad P = 0.02$
	3-氯苯甲酸(10-100)	剂量-小白菜SOD抑制率	$Y = 0.0088X^2 - 1.1206X + 26.58$	$r^2 = 0.9068$	$F = 15.16 \quad P = 0.027$
		剂量-大白菜SOD抑制率	$Y = 0.0054X^2 - 0.4703X + 16.599$	$r^2 = 0.8727$	$F = 10.28 \quad P = 0.045$
POD	2-氯苯甲酸(100-200)	剂量-小白菜POD抑制率	$Y = -13.4984 + 0.38354X$	$r^2 = 0.9451$	$F = 68.88 \quad P = 0.0011$
		剂量-大白菜POD抑制率	$Y = -13.9401 + 0.3545X$	$r^2 = 0.8351$	$F = 20.27 \quad P = 0.011$
	4-氯苯甲酸(10-100)	剂量-小白菜POD抑制率	$Y = 19.8105 + 0.7184X$	$r^2 = 0.9258$	$F = 49.88 \quad P = 0.002$
		剂量-大白菜POD抑制率	$Y = 20.2829 + 0.7575X$	$r^2 = 0.90356$	$F = 37.47 \quad P = 0.0036$
	3-氯苯甲酸(10-100)	剂量-小白菜POD抑制率	$Y = 6.9350 + 1.0921X$	$r^2 = 0.8638$	$F = 25.38 \quad P = 0.0073$
		剂量-大白菜POD抑制率	$Y = -4.5882 + 1.1667X$	$r^2 = 0.9216$	$F = 47.027 \quad P = 0.0024$
CAT	2-氯苯甲酸(100-1000)	剂量-小白菜CAT抑制率	$Y = 0.0042X^2 - 1.1057X + 157.18$	$r^2 = 0.8799$	$F = 10.99 \quad P = 0.042$
		剂量-大白菜CAT抑制率	$Y = 0.0096X^2 - 2.9949X + 247.65$	$r^2 = 0.9854$	$F = 101.42 \quad P = 0.0018$
	4-氯苯甲酸(10-100)	剂量-小白菜CAT抑制率	$Y = 0.008X^2 - 0.8809X + 29.0488$	$r^2 = 0.9164$	$F = 16.44 \quad P = 0.024$
		剂量-大白菜CAT抑制率	$Y = 0.0085X^2 - 0.8146X + 31.062$	$r^2 = 0.9366$	$F = 22.174 \quad P = 0.0159$
	3-氯苯甲酸(10-100)	剂量-小白菜CAT抑制率	$Y = 0.0092X^2 - 0.8724X + 33.315$	$r^2 = 0.8852$	$F = 11.56 \quad P = 0.039$
		剂量-大白菜CAT抑制率	$Y = 0.0079X^2 - 0.5652X + 17.232$	$r^2 = 0.8999$	$F = 13.49 \quad P = 0.032$

表3 各指标对应的半效应浓度

Table 3  $IC_{50}$  of indicators in the root elongation test for two Chinese cabbages

生物指标	2-氯苯甲酸 - $IC_{50}/\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$		4-氯苯甲酸 - $IC_{50}/\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$		3-氯苯甲酸 - $IC_{50}/\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	
	小白菜	大白菜	小白菜	大白菜	小白菜	大白菜
种子发芽	142	119	72	69	53	60
根伸长	194	168	111	84	93	105
SOD	235	261	141	119	146	133
POD	137	102	42	39	39	47
CAT	261	217	118	115	108	109

### 3 结论

在3种氯苯甲酸对2种白菜根伸长10%~50%抑制区间内,氯苯甲酸剂量-发芽抑制率和氯苯甲酸剂量-根伸长抑制率均存在极显著的线性关系 ( $P < 0.01$ ),从拟合方程的斜率可以看出,3种氯苯甲酸浓度的变化对2种白菜发芽率抑制的影响幅度大于对根伸长抑制的影响幅度。氯苯甲酸剂量-SOD酶活性抑制率之间和氯苯甲酸剂量-CAT酶活性抑制率之间均存在二项式关系 ( $P < 0.05$ ),氯苯甲酸剂量

-POD酶活性抑制率之间存在线性关系 ( $P < 0.05$ )。根据拟合方程求出相应的半效应浓度 ( $IC_{50}$ ),3种氯苯甲酸的SOD和CAT的半效应浓度均在试验区间之外,POD的半效应浓度则在实验区间之内,表明在实验区间内,SOD和CAT活性不敏感,POD是个有效指标,且对于3-氯苯甲酸和4-氯苯甲酸的敏感程度高于发芽率和根伸长抑制率。此外拟合直线方程的斜率可考虑作为“辅助性指标”去评估植物毒性,因为越大的斜率值意味着在试验过程中该指标的单位变化幅度越大,也就越容易观察。

用单一类型的指标指示有机化合物的植物毒性是不够准确的,因为自然界的逆境同样对植物会造成伤害。目前在个体水平有体现植物表观性状变化的发芽率、根伸长抑制率等指标,在生理水平有体现植物代谢变化的水解酶、氧化还原酶等指标,在分子水平有体现植物遗传过程受阻的染色体、DNA 受损的生物标记物等指标,这些指标都能在不同层面一定程度上反映植物受到污染物的影响。但这些指标不应该是割裂的,应该存在某种联系,如何将这些不同层次的指标组成一个有效的指标体系来评判一些危险化合物的环境风险是今后值得探讨的问题。

#### 参考文献:

- [1] 刘诗飞,刘德岭,郝军峰. 邻氯甲苯光氯化合成邻氯苯甲酸[J]. 精细石油化工, 2003, (4): 9 - 12.
- [2] 张永华. 对氯苯甲酸的合成[J]. 天津大学学报, 2001, 34(3): 389 - 391.
- [3] Hartmann J, Reineke W and Knackmuss H J. Metabolism of 3 - chloro - , 4 - chloro - and 3, 5 - dichloro - benzoate by a pseudomonad[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1979, 37(2): 421 - 428.
- [4] Parsons J R, Sijm D T H M, van Laar A and Hutzinger O. Biodegradation of chlorinated biphenyls and benzoic acids by a Pseudomonas strain[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1988, 29(1), 81 - 84.
- [5] Stratford J, Wright MA, Reineke W, et al. Influence of chlorobenzoates on the utilisation of chlorobiphenyls and chlorobenzoate mixtures by chlorobiphenyl/chlorobenzoate - mineralising hybrid bacterial strains [J]. *Arch Microbiol*, 1996, 165(3): 213 - 218.
- [6] Wataru Kitagawa, Keisuke Miyauchi, Eiji Masai and Masao Fukuda. Cloning and Characterization of Benzoate Catabolic Genes in the Gram - Positive Polychlorinated Biphenyl Degrader Rhodococcus sp. Strain RHA1[J]. *Journal of Bacteriology*, 2001, 183(22): 6598 - 6606.
- [7] 王世明,施汉昌,钱易. 几种氯代苯甲酸的生物可降解性及其动力学[J]. 环境科学, 2000, 21(4): 86 - 89.
- [8] OECD(Organization for Economic Cooperation and Development). OECD guidelines for test of chemicals, No. 208, Terrestrial Plants, Growth Test, Paris, France, April 1984.
- [9] 孙铁珩,宋玉芳. 土壤污染的生态毒理诊断[J]. 环境科学学报, 2002, 22: 689 - 695.
- [10] Banerjee B D, Seth V, Bhattacharya A. Biochemical effects of some pesticides on lipid peroxidation and free - radical scavengers[J]. *Toxicol Letters*, 1999, 107: 33 - 47.
- [11] 刘宛,李培军,周启星,等. 短期菲胁迫对大豆幼苗超氧化物歧化酶活性及丙二醛含量的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(4): 581 - 584.
- [12] 刘红玉,周朴华,杨仁斌,等. 非离子型表面活性剂 AE 对大藻损伤程度的酶学诊断[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(5): 416 - 419.
- [13] 上海市植物生理协会. 现代植物生理学实验指南[M]. 北京:科学出版社, 1999. 314 - 315.
- [14] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社, 1990. 88 - 91.
- [15] 陈利锋,宁玉立,等. 抗感赤霉病小麦品种超氧化物歧化酶和过氧化酶的活性比较[J]. 植物病理学报, 1997, 27(3): 209 - 213.
- [16] G Bartosz Oxidative stress in plants[J]. *Acta Physiol Plant*, 1997, 19(1): 47 - 64.
- [17] 黄玉山,罗广华,关荣文. 镉诱导植物自由基的过氧化损伤[J]. 植物学报, 1997, 39(6): 522 - 526.
- [18] 唐学玺,李永祺. 久效磷对海洋微藻毒性机理的初步研究Ⅲ. 一超氧化物歧化酶和过氧化物酶活性的变化[J]. 环境科学学报, 1998, 18(2): 204 - 207.