

杀虫双对杜氏盐藻生长和生理生化的影响

蔡 马¹, 姜建国², 贺立红¹, 余土元¹

(1 仲恺农业工程学院 生命科学学院, 广东 广州 510225; 2 华南理工大学 轻工与食品工程学院, 广东 广州 510640)

摘要:以一种具有环境耐性的单细胞绿藻杜氏盐藻 *Dunaliella salina* 作为受试生物, 检测一种杀虫剂杀虫双的毒性作用, 试验中检测了杀虫双对杜氏盐藻细胞生长、单细胞 β 胡萝卜素质量、细胞形态变化及超氧化物歧化酶 (Superoxide dismutase, SOD) 和过氧化氢酶 (Catalase, CAT) 活性的影响. 结果表明, 当杀虫双质量浓度小于 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 细胞的毒性响应与对照的变化趋势类似. 当使用 $1.0 \sim 4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 杀虫双处理盐藻, 处理初期细胞生长缓慢和单细胞 β 胡萝卜素质量降低, 一段时间后恢复. 当杀虫双质量浓度大于 $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 细胞生长速度和单细胞 β 胡萝卜素质量都会一直降低直至检测不到. 杀虫双对杜氏盐藻的 10 d IC_{50} 为 $32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 试验发现在低浓度下杀虫双会刺激 CAT 活性的增长.

关键词:杜氏盐藻; 毒性; 杀虫双

中图分类号: Q945.78

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2013)01-0067-05

Effects of Chemical Pesticide Dimehypo on Growth, Physiological and Biochemical Characteristics of *Dunaliella salina*

CAI Ma¹, JIANG Jianguo², HE Lihong¹, YU Tuyuan¹

(1 College of Life Sciences, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China;

2 College of Food and Bioengineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: *Dunaliella salina*, a unicellular green alga with environmental tolerance, was employed as test organism to investigate the toxicity effects of a pesticide dimehypo. The influences of dimehypo on cell growth, single cell β -carotene level, cell morphology changes, and activities of superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT) were investigated. At the mass concentrations less than $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ dimehypo, cell responses were similar to control. When treated with $1.0 - 4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ dimehypo, cell growth and single cell β -carotene levels declined at first and then revived. When mass concentrations were higher than $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ dimehypo, both cell growth and single cell β -carotene levels decreased until they were undetectable. The 10 d IC_{50} of dimehypo on *D. salina* was $32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Dimehypo could stimulate the increase of CAT activity at a low concentration.

Key words: *Dunaliella salina*; toxicity; dimehypo

杀虫双(2-二甲氨基-1,3-双硫代磷酸钠基丙烷)是一种应用于水稻和其他农作物的有机氮杀虫剂,与沙蚕毒素有类似结构,在中国作为六六六(Benzene hexachloride, BHC)的替代物^[1]. 由于水生

生物能够在体内积累杀虫剂等化学物质,杀虫剂的使用会对水生生物包括藻类和它的生物化学系统造成危害^[2]. 因此,寻找检测和监测水生环境中农业化学污染物的有效方法是十分有意义的. 藻类是初级

收稿日期: 2012-02-21 网络出版时间: 2013-01-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20130111.0927.014.html>

作者简介: 蔡 马(1965—), 男, 副教授, 硕士, E-mail: caimagz@hotmail.com

基金项目: 广东省科技计划项目(2009B020307013)

生产者的重要组成部分,对藻类的有害作用可能会影响整个食物链^[3]. 杜氏盐藻 *Dunaliella salina* 是杜氏藻属中的一种极度耐盐的单细胞绿藻. 杜氏盐藻具有一些特殊的性质使之能够在极端环境中生存,例如可以耐受 $0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 至饱和 ($5.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) NaCl、强光照、高温和 pH 1~11 的广泛酸碱环境^[4]. 杜氏盐藻的另一种特性是它在极端的渗透胁迫下能够在细胞内过度积累 β 胡萝卜素以维持胞内的渗透平衡,是一种最优良的 β 胡萝卜素的生物来源^[5]. 杜氏盐藻的这些性质使其在环境毒理学研究领域作为受试生物具有显著的应用价值. 本论文通过检测农业杀虫剂杀虫双对杜氏盐藻细胞生长、单细胞 β 胡萝卜素质量和抗氧化酶 SOD 及 CAT 活性的剂量作用,以及杀虫双对杜氏盐藻的毒性作用,阐明该杀虫剂的环境作用. 希望能够为杀虫剂的使用和环境控制提供有用的参考.

1 材料与方法

1.1 盐藻培养

杜氏盐藻藻种 (FACHB-435) 购自中国科学院野生生物种质库 - 淡水藻种库. 杜氏盐藻细胞培养在含 $1.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 的培养液中. 培养条件为温度 $26 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 光照强度 8000 lx , 光/暗周期为 $14 \text{ h}/10 \text{ h}$, 摇床转速 $96 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$.

1.2 毒性试验

杜氏盐藻培养至对数期或对数后期收集藻细胞,重悬于 50 mL 新鲜培养液中,同时,分别加入不同浓度的杀虫双继续培养. 设置杀虫双质量浓度为 0.5 、 1.0 、 2.0 、 4.0 和 $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 以不加杀虫剂的藻液作为对照. 培养条件同 1.1 所述. 使用光学显微镜观察细胞形态.

绘制细胞数 ($Y, \times 10^4$) 与 $D_{630 \text{ nm}}$ (X) 之间的关系曲线,由回归方程(1)计算样品的细胞数.

$$Y = 3418.3X + 226.33, R^2 = 0.9908. \quad (1)$$

每 24 h 取样,以相同盐度的新鲜培养液作为空白调零,分别测量各个样品的光密度 ($D_{630 \text{ nm}}$).

1.3 β 胡萝卜素质量浓度检测

使用分光光度计测量 $D_{453 \text{ nm}}$,并绘制 β 胡萝卜素/丙酮标准溶液与 $D_{453 \text{ nm}}$ 之间的标准曲线,得回归方程(2):

$$y = 3.5224x - 0.0349, R^2 = 0.9976, \quad (2)$$

其中, y 为 β 胡萝卜素质量浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), x 为 $D_{453 \text{ nm}}$.

吸取 2 mL 藻液 $8000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min , 收

集藻体并溶解于 2 mL 丙酮中,不断震荡直至所有色素都被提取出来. 使用 $60 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的乙醇 - KOH 溶液 0.2 mL $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 下皂化色素提取混合液 3 h . 加入 w 为 1.2% NaCl 溶液后用乙醚萃取 β 胡萝卜素,干燥后溶解于 2 mL 丙酮中,测量其 $D_{453 \text{ nm}}$ 值,最后根据标准曲线计算 β 胡萝卜素质量浓度,随后根据藻液细胞数计算出单细胞的 β 胡萝卜素质量.

1.4 粗酶液的提取

加入杀虫剂培养 2 d 后的藻液在室温下 $8000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min , 去除培养液收集藻体. 准确称取 0.5 g 新鲜藻体移至 2 mL 离心管中,加入 1 mL PBS ($50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 7.8) 和 0.02 g 聚乙烯吡咯烷酮 (PVP). $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下 $12000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 20 min , 以破碎植物细胞. 随后 $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下 $12000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 30 min , 上清液即为粗酶提取液. 粗酶提取液直接用于酶活检测或按体积比 $1:1$ 加入 $50 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 甘油溶液, $-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件保存备用.

1.5 SOD 活性测定

参照王学奎^[6]方法并略作修改进行 SOD 活性测定. 反应混合液包含 1 mL 甲硫氨酸 (Met, $39 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)、 1 mL 硝基蓝四氮唑 (NBT, $189 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)、 $15 \mu\text{L}$ 粗酶提取液和 1 mL 核黄素 ($6 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$). 反应液置于 4000 lx 日光下反应 20 min 后,使用分光光度计测定光密度 ($D_{560 \text{ nm}}$). 以 1 mL Met、 1 mL NBT 和 1 mL PBS 混合液作为空白样. 1 mL Met、 1 mL NBT、 $15 \mu\text{L}$ PBS 和 1 mL 核黄素混合液作为对照样. 1 mL Met、 1 mL NBT、 $15 \mu\text{L}$ 粗酶提取液和 1 mL PBS 混合液作为色素值样. 一个 SOD 酶活性单位 (U) 定义为将 NBT 的还原性抑制到对照一半 (50%) 时所需的酶量. 由下式计算 SOD 活性 ($\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$):

$$\text{SOD 活性} = \frac{2(D_{\text{CK}} - D_{\text{S}} + D_{\text{P}}) \times V}{D_{\text{CK}} \times m_{\text{f}} \times V_{\text{t}}},$$

其中, D_{CK} 为对照样的光密度, D_{S} 为样品的光密度, D_{P} 为色素值样的光密度, V 为粗酶提取液总体积 (mL), V_{t} 为样品反应液中粗酶液体积 (mL), m_{f} 为样品鲜质量 (g).

1.6 CAT 活性测定

参照王学奎^[6]方法并略作修改进行 CAT 活性的测定. 在 $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 下测定 CAT 活性,反应混合液包含 1 mL 粗酶提取液和 2 mL H_2O_2 ($1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$). 1 mL 粗酶提取液和 2 mL PBS ($50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 7.8) 混合液为空白样. 使用紫外分光光度计在 240 nm 测定光密度,准确反应 5 min 后,再测一次光密度. 一个 CAT 酶

活性单位(U)定义为每分钟 $D_{240\text{ nm}}$ 减少0.1 的酶量. 由下式计算 CAT 活性($\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$):

$$\text{CAT 活性} = \frac{\Delta D_{240\text{ nm}} \times V}{0.1 \times V_t \times t \times m_t},$$

其中, $\Delta D_{240\text{ nm}}$ 为光密度的减少量, V 为粗酶提取液总体积(mL), V_t 为样品反应液中粗酶液体积(mL), m_t 为样品鲜质量(g), t 为反应时间(min).

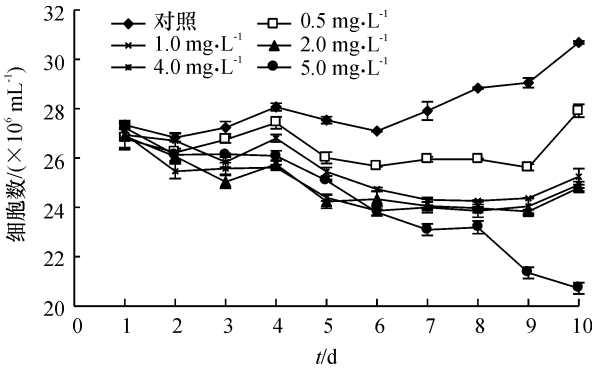
1.7 数据分析

所有试验均设 3 个重复, 并对试验结果取平均值, 使用软件 SPSS - 13 对数据进行统计分析, 在 95% 或 99% 的置信界限确定显著性.

2 结果与分析

2.1 杜氏盐藻细胞生长

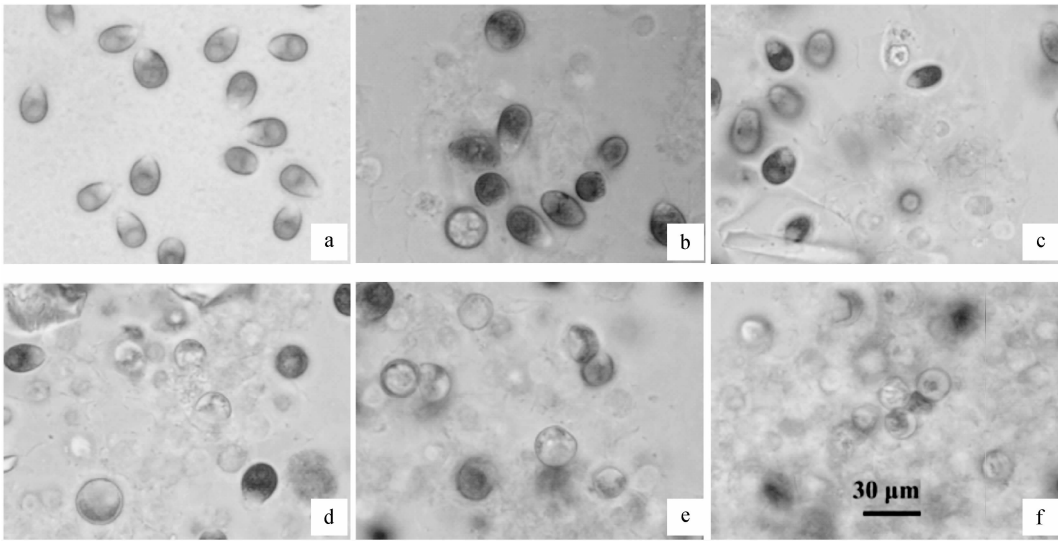
图 1 显示, 使用 $0.5\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 杀虫双处理的杜氏盐藻的细胞生长情况与未加杀虫剂的对照样的生长情况相类似, 只是细胞数相对显著下降. 分别使用 1.0 、 2.0 和 $4.0\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 杀虫双处理盐藻, 在前 5 或 6 d 内细胞数呈现下降趋势, 但在 8 d 后细胞数开始增长. 另外, 使用 $5.0\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 杀虫双处理盐藻导致细胞死亡, 10 d 后细胞几乎死亡殆尽. 通过单因素方差分析, 各浓度处理样品之间细胞生长显示出显著差异 ($P < 0.05$), 而相关性分析结果表明, 盐藻细胞生长显著负相关于杀虫双浓度 ($r = -0.871 < 0, P < 0.05$), 杀虫双对杜氏盐藻的 10 d IC_{50} 为 $32\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.



图中数据点代表 3 次重复试验的平均值和标准差 (t 检验, $p < 0.01$).
图 1 不同质量浓度杀虫双处理时杜氏盐藻的细胞生长情况
Fig. 1 Cell growth of *Dunaliella salina* treated by dimehypo at various mass concentrations

2.2 细胞形态变化

由于杜氏盐藻缺乏细胞壁, 光学显微镜观察证实盐藻细胞膜外仅包被着一层糖蛋白膜, 长期与污染物接触可能会破坏细胞的完整性. 正常藻细胞呈现鲜绿色, 健康的细胞会不断游动, 而杀虫剂处理的细胞颜色变灰暗变模糊 (图 2). 污染的细胞呈现三角形、圆形或不规则的形状, 一些细胞发生破碎, 所有这些都说明了杀虫剂对盐藻细胞的破坏作用. 从图 1 和图 2 可以看出少量的杀虫剂对杜氏盐藻的生长造成的不利影响很小. 随着杀虫剂浓度的增大, 细胞数逐渐减少, 并且破碎细胞的数目也不断增加直到观察不到活细胞.



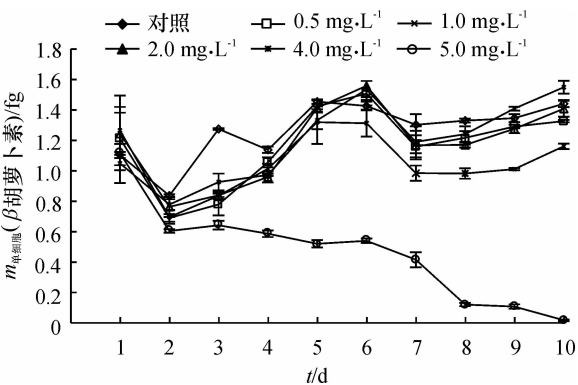
a ~ f: 杀虫双质量浓度分别为 0 (对照)、0.5、1.0、2.0、4.0 和 $5.0\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.
图 2 不同质量浓度杀虫双处理时杜氏盐藻的细胞形态变化情况
Fig. 2 Cell shape variations of *Dunaliella salina* treated by dimehypo at various mass concentrations

2.3 β 胡萝卜素含量变化

使用上述浓度的杀虫双处理盐藻, 在第 2 天所

有样品的单细胞 β 胡萝卜素含量都会降低 (图 3). 第 3 ~ 6 天, 使用 0.5 、 1.0 、 2.0 和 $4.0\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 杀虫

双处理的样品内单细胞 β 胡萝卜素含量显著积累,并且与对照样的积累趋势类似,第 3~5 天各样品中单细胞 β 胡萝卜素含量始终低于对照样,而第 6 天时使用 0.5 、 1 和 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 杀虫双处理的样品内单细胞 β 胡萝卜素含量反而高于对照样. 前 4 种浓度杀虫双处理样品中单细胞 β 胡萝卜素含量在第 7 天再次降低并在第 8 天重新增长,除 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 杀虫双处理的样品在最后两天高于对照样外,其余样品始终低于对照样. 使用 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 杀虫双处理的样品内 β 胡萝卜素含量显著降低,最终已检测不到(图 3). 通过单因素方差分析,大部分处理时间内各浓度处理样品细胞 β 胡萝卜素的积累显示出显著差异($P<0.05$),而相关性分析结果表明,单细胞 β 胡萝卜素含量显著负相关于杀虫双浓度($r=-0.883<0$, $P<0.05$).



图中数据点代表 3 次重复实验的平均值和标准差(t 检验, $p<0.05$).
图 3 不同质量浓度杀虫双处理时杜氏盐藻单细胞 β 胡萝卜素质量变化情况
Fig. 3 Single cell β -carotene content variation of *Dunaliella salina* treated by dimehypo at various mass concentrations

2.4 SOD 活性

在所有杀虫双处理的样品中,杀虫双的处理都会造成杜氏盐藻 SOD 活性的降低. 相关性分析表明 SOD 活性与杀虫双处理浓度没有显著性关系($P>0.05$). 并且单因素方差分析表明杀虫双处理的样品与对照样的 SOD 活性在生物学上同样没有显著差异($P>0.05$)(表 1).

2.5 CAT 活性

除最高质量浓度 $5.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 杀虫双处理的样品外,其他所有杀虫双处理的样品中均检测到 CAT 活性的显著提高(表 1),但相关性分析结果显示,在所有处理样品中,CAT 活性与杀虫剂处理浓度没有显著性关系($P>0.05$). 浓度较低时,杀虫双质量浓度的提高,会刺激 CAT 活性提高,并在 $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 杀虫双处理时达到最大值. 随后,杀虫双质量浓度的进一步提高反而抑制 CAT 活性,但仍然高于对照(表 1). 试验结果表明,相对低质量浓度的杀虫双会

促进杜氏盐藻细胞 CAT 活性的显著提高,而过高的杀虫双质量浓度(如 $5.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)对 CAT 活性的提高又有抑制作用.

表 1 不同质量浓度杀虫双处理杜氏盐藻 2 d 后 SOD 和 CAT 活性变化情况¹⁾

Tab. 1 The SOD activity and CAT actiuty of *Dunaliella salina* after 2 d treated by dimehypo at various mass concentrations

ρ (杀虫双)/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	SOD 活性/ ($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$)	CAT 活性/ ($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)
0(对照)	200.89 ± 4.01	30.97 ± 2.05
0.5	190.49 ± 2.36	$35.85\pm2.00^*$
1.0	190.00 ± 1.76	$58.15\pm1.72^*$
2.0	189.29 ± 1.43	$42.88\pm0.34^*$
4.0	186.62 ± 0.82	$42.66\pm0.48^*$
5.0	186.37 ± 0.92	34.44 ± 1.57

1)表中数据为平均值 $\pm$ 标准差($n=3$, t 检验, $p<0.01$);使用单因素方差分析方法分析对照与其他样品相应酶活性之间的差异显著性,*表示差异显著($P<0.05$).

3 讨论

污染物能够引起杜氏盐藻细胞内大量活性氧簇(Reactive oxygen species, ROS),包括 $\cdot\text{O}_2^-$ 、 $^1\text{O}_2$ 和 H_2O_2 的积累和膜脂质的过氧化. 为了缓解和修复 ROS 造成的损害,杜氏藻通过积累抗氧化剂包括低分子量的非酶自由基清除剂(如 β 胡萝卜素)和抗氧化酶如 SOD、CAT 与过氧化物酶(Peroxidase, POD)保护非饱和的膜脂质、核酸、酶和其他分子结构免受氧自由基的毒害^[7]. 本文中,在相对低质量浓度杀虫双($0.5\sim2.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)处理的杜氏盐藻中,单细胞 β 胡萝卜素质量在一定时期内(第 6 天)会高于对照样,同时在杀虫双处理的杜氏盐藻中检测出高水平的 CAT 活性. 使用不同浓度杀虫双进行处理,虽然都会造成 SOD 活性的降低,但细胞始终保持相对较高的 SOD 活性水平. 所有这些结果都表明,抗氧化剂(β 胡萝卜素、SOD 和 CAT)的存在可能是杜氏盐藻细胞能够在杀虫剂存在的环境下生存和生长的重要因素. 根据 Streb 等^[8]的研究,一种高山植物 *Homogyne alpina* 由于一种稳定的 CAT 的存在能够耐受光胁迫. 另一项研究表明,高强度的 UV-B 辐射($13.2\text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)使杜氏盐藻 SOD 活性显著降低($P<0.05$),而 CAT 活性只有轻微的变化($P>0.05$)^[9]. 陈传红等^[10]研究了丁草胺对杜氏盐藻生理生化的影响,发现在较低浓度时对盐藻的类胡萝卜素含量有一定促进作用,浓度加大,类胡萝卜素含量逐渐降低. 另外,不同浓度的丁草胺对杜氏盐藻 SOD 活性具有明显的影响,低浓度时 SOD 的活性有所增加,随着浓度的加大活性降低,并且过氧化物酶(POD)活性

的变化情况与 SOD 类似. 本研究中, SOD 活性随着杀虫双浓度的提高不断降低, CAT 活性在低浓度杀虫双处理下升高, 随后在高浓度处理下降低, 但在杀虫双处理的所有样品中 CAT 活性都高于对照样. 说明杀虫双处理时均会刺激杜氏盐藻内 CAT 活性不同程度的提高, 但可能会抑制 SOD 活性, 并且高浓度的杀虫双加剧了这种抑制作用, 使 SOD 活性降低. 我们在研究农业杀虫剂敌百虫对杜氏盐藻毒性作用的试验中发现, 敌百虫对杜氏盐藻细胞生长、 β 胡萝卜素含量和抗氧化酶活性的影响与本次试验结果相类似^[11]. 由此可以推测, 杜氏盐藻对农业杀虫剂等毒性物质的一种响应机制可能是通过对细胞内抗氧化剂的调控来应对毒性物质及由其产生的 ROS 的毒害, 且在其他胁迫条件下(如 UV 辐射), 也可能存在类似的响应机制.

另外, 在一些藻类中存在“两阶段效应”(Biphasic effects), 即低水平的有机污染物先抑制后刺激藻类生长. 本论文中, 在特定质量浓度($0.5 \sim 4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)的杀虫双处理杜氏盐藻时也发现了类似的结果, 显示出对杜氏盐藻的“两阶段效应”. β 胡萝卜素水平的恢复可能是细胞生长在抑制作用下得以恢复的原因. Shariati 等^[12]的研究表明, 镉离子浓度的提高显著降低了 2 个品种(Iranian 和 Australian)杜氏盐藻的细胞数和叶绿素含量, 并且培养液中高浓度镉离子导致氧自由基的形成可能造成了生长速率的降低. 与对照样相比, 在 2 个品种的细胞中都检测到单细胞 β 胡萝卜素含量的提高, 这些 β 胡萝卜素可能也在杜氏盐藻中作为一种非酶的抗氧化机制起重要作用. 与“两阶段的效应”不同, 陈传红等^[10]的研究发现, 低浓度的丁草胺对杜氏盐藻生长速率有促进作用, 而高浓度的丁草胺对杜氏盐藻生长速率有显著的抑制作用. 这种现象被称为“毒物兴奋效应”(Hormesis), 即非常低浓度的有机污染物会刺激藻类生长.

总之, 当杀虫双质量浓度小于 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 杜氏盐藻的毒性响应与对照样类似. 当使用 $1.0 \sim 4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 杀虫双处理盐藻时, 处理初期细胞生长和单细胞 β 胡萝卜素水平均降低, 接着在几天后恢复. 当杀虫双质量浓度大于 $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 细胞生长和单细胞 β 胡萝卜素水平都会一直降低, 直至检测不到. 杀虫双对杜氏盐藻的 10 d IC_{50} 为 $32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 小于敌百虫对杜氏盐藻的 10 d IC_{50} ($179 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)^[11], 因而杀虫双对杜氏盐藻的毒性更强, 说明杜氏盐藻对不同的农业杀虫剂的耐受效果不同, 有助于对不同毒物的毒性进行比较. 杀虫剂浓度的提高会抑制盐藻

生长, 但也能够刺激 CAT 的活性. 以后研究工作的重点将会集中在有机污染物对杜氏盐藻中其他酶(如 POD)的毒性作用和多种污染物对杜氏盐藻的联合效应方面.

参考文献:

- [1] 唐太斌. 沙蚕毒系新型杀虫剂: 杀虫双的研究[J]. 农药, 1980(4): 12-16.
- [2] JONSSON C M, PARAIBA L C, MENDOZA M T, et al. Bioconcentration of the insecticide pyridaphenthion by the green algae *Chlorella saccharophila* [J]. Chemosphere, 2001, 43(3): 321-325.
- [3] JONSSON C M, AOYAMA H. *In vitro* effect of agriculture pollutants and their joint action on *Pseudokirchneriella subcapitata* acid phosphatase [J]. Chemosphere, 2007, 69(6): 849-855.
- [4] ZHU Yuehui, JIANG Jianguo. Combined toxic effects of typical mutagens-dimethylphenol, tribromomethane and dinitroaniline, on unicellular green algae *Dunaliella salina* [J]. J Food Safety, 2009, 29(1): 1-13.
- [5] YE Zhiwei, JIANG Jianguo, WU Guanghong. Biosynthesis and regulation of carotenoids in *Dunaliella*: Progresses and prospects[J]. Biotechnol Adv, 2008, 26(4): 352-360.
- [6] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 169-170, 172-173.
- [7] XIONG Liming, ZHU Jiankang. Molecular and genetic aspects of plant responses to osmotic stress[J]. Plant Cell Environ, 2002, 25(2): 131-139.
- [8] STREB P, SHANG W, FEIERABEND J, et al. Divergent strategies of photoprotection in high-mountain plants[J]. Planta, 1998, 207(2): 313-324.
- [9] TIAN Jiyuan, YU Juan. Changes in ultrastructure and responses of antioxidant systems of algae (*Dunaliella salina*) during acclimation to enhanced ultraviolet-B radiation[J]. J Photoch Photobio B: Biology, 2009, 97(3): 152-160.
- [10] 陈传红, 刘振乾, 傅凤, 等. 丁草胺对杜氏盐藻生理生化的影响[J]. 生态科学, 2007, 26(1): 18-21.
- [11] 范一文, 陈辉, 姜建国. 农业杀虫剂敌百虫对杜氏盐藻的毒性作用[J]. 现代食品科技, 2011, 27(8): 877-880.
- [12] SHARIATI M, YAHYAABADI S. The effects of different concentrations of cadmium on the growth rate and beta-carotene synthesis in unicellular green algae *Dunaliella salina* [J]. Iran J Sci Technol A, 2006, 30(A1): 57-63.