

# 锶诱导的氧化胁迫对叉鞭金藻 (*Dicrateria inornata*) 的影响\*

李梅 徐瑾 刘志礼<sup>1)</sup> 徐俊  
(南京大学生命科学院 南京 210093)

**提要** 采用不同浓度的锶胁迫方法研究了叉鞭金藻生长、叶绿素、MDA含量及三种抗氧化酶SOD、CAT、GPX活性的变化。结果表明,在实验设计的各种 $\text{Sr}^{2+}$ 浓度内叉鞭金藻均能生长,但 $\text{Sr}^{2+}$ 浓度较高时生长受到不同程度的抑制,细胞数量比对照组分别减少15.9%和51.0%;叉鞭金藻中叶绿素含量随着 $\text{Sr}^{2+}$ 浓度的升高而降低,呈负相关关系;叉鞭金藻中MDA含量在较低 $\text{Sr}^{2+}$ 浓度下稍呈下降趋势,但与对照组相比并无显著差异,而在23.04mmol/L  $\text{Sr}^{2+}$ 浓度时是对照的1.23倍;低 $\text{Sr}^{2+}$ 浓度时,叉鞭金藻中蛋白质含量没有大的变化,当浓度超过5.76mmol/L时则引起蛋白质含量下降;叉鞭金藻中抗氧化酶SOD在低 $\text{Sr}^{2+}$ 时分别降低12.5%、7.5%和9.5%,高 $\text{Sr}^{2+}$ 时显著升高,为对照组的85.7%;CAT、GPX活性在低 $\text{Sr}^{2+}$ 浓度时差别不大,但当浓度为23.04mmol/L时升高显著,比对照组分别增加了19.8%和74.4%。

**关键词** 叉鞭金藻,生长,锶胁迫,抗氧化酶

**中图分类号** Q946

随着现代工业的迅速发展,人类对海洋的污染日益严重,其中包括重金属的污染(毕春娟等,2003)。研究表明,重金属对海洋浮游植物有不利影响。锶是海水的微量组成成分,是海洋重要的初级生产者——多数藻类的必需微量元素,但锶也是常见的核裂变副产物。<sup>90</sup>Sr作为放射性同位素,可以诱导多种肿瘤及白血病的发生,对人类的健康造成危害。随着核武器试验、核工业和核动力设施的迅速发展,<sup>90</sup>Sr等人工放射性同位素被不断排入海洋(Eisenbud *et al.*, 1997)。因此研究锶胁迫对海洋微藻的致毒机理颇为重要。

以往对重金属离子胁迫下植物体内膜脂过氧化水平及SOD等抗氧化系统的研究主要集中于高等植物,微藻方面则相对较少,且主要集中在农药,Cu、Cd等常见重金属方面。唐学玺等(1995,1997,1999)曾研究了农药久效磷对几种海洋微藻(包括叉鞭金藻)的毒性、SOD活性、自由基伤害和活性氧伤害;彭金良等(2001)报道了 $\alpha$ -萘酚

对普通小球藻抗氧化酶活性的影响;Rijstenbil等(1994)和Okamoto等(1996,1998)分别考察了重金属胁迫下某些微藻SOD活性的变化;Lee等(2003)探讨了Cd胁迫引起微藻抗氧化酶活性的变化;而对 $\text{Sr}^{2+}$ 胁迫下微藻的影响鲜见报道。本文中又以叉鞭金藻为材料,研究 $\text{Sr}^{2+}$ 胁迫对其生长、叶绿素含量、丙二醛(MDA)含量及超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和谷胱甘肽过氧化物酶(GPX)等三种抗氧化酶的影响,以期探讨水体污染对藻类伤害的机理积累科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 藻种培养

实验用叉鞭金藻(*Dicrateria inornata*)由中国科学院海洋研究所提供,采用f/2营养盐配方,灭菌人工海水(Lyman *et al.*, 1940)培养。用于微藻培养的三角瓶,预先在稀盐酸中浸泡数日,再用相应浓度的氯化锶培养液预平衡2天左右,以消除实验过程中容器壁对 $\text{Sr}^{2+}$ 的吸附;以分析纯氯化

\* 江苏省自然科学基金资助项目,95021301号。李梅,博士后,E-mail:lilylimei@sohu.com

1) 通讯作者,刘志礼,教授,博士生导师,E-mail:liuzl@nju.edu.cn

收稿日期:2003-11-12,收修改稿日期:2004-04-29

锶为母液,  $\text{Sr}^{2+}$  浓度梯度分别为 0、0.09、0.36、1.44、5.76、23.04 mmol/L, 再将去除原培养液的处于对数期的微藻接种到上述不同浓度的  $\text{Sr}^{2+}$  溶液中静止培养, 培养温度为  $(24 \pm 1)^\circ\text{C}$ , 光强为  $120 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 光暗周期为 12h : 12h, 每日定时摇动 2 次。

### 1.2 生长和叶绿素 a 含量的测定

以不含  $\text{Sr}^{2+}$  的人工海水为对照组, 420nm 处隔天测 OD 值。通过血球计数板及藻液  $\text{OD}_{420}$  值确定细胞数与吸光值之间的关系:  $y = 0.93 + 50.69x$ ,  $y$  为细胞数 ( $10^5$  个/ml),  $x$  为 420nm 处 (1cm 光径) 藻液吸光值, 相关系数  $r = 0.999$ ; 由公式  $\mu = (\ln N_1 - \ln N_0)/(t_1 - t_0)$  计算生长速率, 其中  $N_0$ 、 $N_1$  分别为起始和  $t_1$  时间的细胞数; 在生长后期用 90% 丙酮提取分别测定各组叶绿素含量 (纪明侯, 1997)。

### 1.3 粗酶液制备及酶活性测定

分别吸取指数生长后期的上述培养液若干, 离心收集新鲜藻体并重新悬浮于适量 1/15 mol/L 预冷磷酸盐缓冲液 (pH 7.0) 中, 冰浴下超声波发生器破碎, 低温高速离心, 取上清液作酶活分析。根据 TBA 法于 552nm 处测定 MDA 的含量; SOD

活性测定采用黄嘌呤氧化酶法 (McCord *et al.*, 1969); 根据文献测定 CAT 的酶活性 (Rao *et al.*, 1996); GPX 的活性参照 Flohe 等 (1984) 的方法; 可溶性蛋白含量根据考马斯亮蓝法测定。

### 1.4 数据分析

实验至少设三个平行样, 取其平均值。统计用 Origin 6.1 软件进行 ANNOV 分析, 将实验组与对照组及其组间差异进行显著性  $t$  检验, 以  $P < 0.05$  作为显著性依据。表 3、表 4 中所示值为平均值和标准方差。

## 2 结果

### 2.1 锶胁迫对叉鞭金藻生长的影响

接种后隔天测定微藻的生长量, 直至处理 17 天。不同  $\text{Sr}^{2+}$  浓度叉鞭金藻的细胞数目见表 1。在实验设计的所有  $\text{Sr}^{2+}$  浓度范围内叉鞭金藻均可生长。 $\text{Sr}^{2+}$  浓度低于 1.44 mmol/L 时, 生长没有显著差别, 而在较高  $\text{Sr}^{2+}$  浓度下, 叉鞭金藻的生长受到抑制, 分别为对照组的 15.9% 和 51.0%。光学显微镜下观察, 对照组及实验组的细胞大小及结构没有区别。生长速率见表 2。

表 1 不同  $\text{Sr}^{2+}$  浓度下叉鞭金藻的细胞数量 ( $\times 10^6/\text{ml}$ )

Tab.1 Cell counts ( $\times 10^6/\text{ml}$ ) of *D. inornata* under different strontium concentrations

时间 (d)	$\text{Sr}^{2+}$ 浓度 (mmol/L)					
	0	0.09	0.36	1.44	5.76	23.04
1	0.713	0.732	0.744	0.754	0.754	0.752
3	1.081	1.092	1.061	1.071	0.994	0.848
5	1.267	1.315	1.308	1.274	1.144	0.899
7	1.448	1.514	1.502	1.467	1.315	0.919
9	1.636	1.724	1.675	1.629	1.446	0.904
11	1.879	1.945	1.893	1.827	1.610	1.005
13	2.026	2.110	2.060	2.009	1.712	1.021
15	2.208	2.290	2.230	2.176	1.881	1.087
17	2.508	2.582	2.528	2.482	2.107	1.228

表 2 不同  $\text{Sr}^{2+}$  浓度下叉鞭金藻的生长速率

Tab.2 Growth rate of *D. inornata* under different strontium concentrations

$\text{Sr}^{2+}$ 浓度 (mmol/L)	0	0.09	0.36	1.14	5.76	23.04
生长速率	0.101	0.097	0.086	0.085	0.067*	0.030*

\* 差异显著, 表 3、表 4 同

## 2.2 锶胁迫对叉鞭金藻叶绿素、蛋白质和 MDA 含量的影响

表 3 显示了不同  $\text{Sr}^{2+}$  浓度下叉鞭金藻细胞中叶绿素、蛋白质和 MDA 含量的变化情况。实验表明, 叶绿素含量在 0.72—2.32  $\mu\text{g}/\text{ml}$  范围内变化, 随着  $\text{Sr}^{2+}$  浓度的升高叶绿素含量逐渐下降, 当  $\text{Sr}^{2+}$  浓度为 23.04 mmol/L 时, 叶绿素含量最低。在低浓度  $\text{Sr}^{2+}$  胁迫下, 叉鞭金藻细胞中的 MDA 含量较对照组降低, 但当  $\text{Sr}^{2+}$  浓度为 23.04 mmol/L 时, MDA 高出对照组 123.0%, 说明高浓度的  $\text{Sr}^{2+}$

胁迫造成了微藻膜脂过氧化作用加剧, 导致细胞受到严重伤害; 对蛋白质而言,  $\text{Sr}^{2+}$  浓度的增加可使蛋白质含量稍微升高, 但当  $\text{Sr}^{2+}$  浓度超过 5.76 mmol/L 时则引起蛋白质含量下降。  $\text{Sr}^{2+}$  浓度为 0.09 mmol/L 时蛋白质含量最高为每  $10^6$  个细胞 45  $\mu\text{g}$ , 与对照组相比, 在 0.09、0.36、1.44 mmol/L 的  $\text{Sr}^{2+}$  浓度下叉鞭金藻细胞的蛋白质分别增加了 13.5%、10.6% 和 10.9%, 而在 5.76 mmol/L 和 23.04 mmol/L 的  $\text{Sr}^{2+}$  浓度下其蛋白质分别下降了 3.8% 和 49.7%。

表 3 不同  $\text{Sr}^{2+}$  浓度下叉鞭金藻叶绿素 a、蛋白质和 MDA 含量的变化

Tab. 3 Chlorophyll a, protein and MDA contents of *D. inornata* under different strontium concentrations

锶浓度 (mmol/L)	0	0.09	0.36	1.44	5.76	23.04
叶绿素 a ( $\mu\text{g}/\text{ml}$ )	2.32 ± 0.09	2.25 ± 0.08	1.99 ± 0.11	1.71 ± 0.38	1.57 ± 0.06	0.72 ± 0.16*
蛋白质 ( $\mu\text{g}/10^6$ cells)	39.57 ± 3.25	44.92 ± 2.43*	41.94 ± 1.24	43.08 ± 1.26	38.06 ± 3.25	19.92 ± 5.71*
MDA (nmol/ $10^6$ cells)	76.23 ± 3.85	56.75 ± 1.38	57.36 ± 2.97	54.18 ± 2.89	62.27 ± 4.90	93.75 ± 6.25*

## 2.3 锶胁迫对抗氧化酶活性的影响

$\text{Sr}^{2+}$  胁迫对叉鞭金藻抗氧化酶 (SOD, CAT, GPX) 活性的影响见表 4。统计分析发现, SOD 活性与对照组相比均有显著差异, 在较低  $\text{Sr}^{2+}$  浓度下其分别降低了 12.5%、7.5% 和 9.5%, 而在 23.04 mmol/L  $\text{Sr}^{2+}$  浓度时显著升高, 为对照组的

85.7%; 在浓度不断升高的  $\text{Sr}^{2+}$  溶液中, 叉鞭金藻细胞中的 CAT 活性先下降后升高, 当  $\text{Sr}^{2+}$  浓度为 23.04 mmol/L 时, 其活性为对照组的 19.8%;  $\text{Sr}^{2+}$  浓度对微藻中的 GPX 影响不明显, 仅在最高浓度比对照增强了 74.4%。

表 4 不同  $\text{Sr}^{2+}$  浓度下叉鞭金藻 SOD、CAT、GPX 活性的变化

Tab. 4 Activities of SOD, CAT and GPX of *D. inornata* under different strontium concentrations

$\text{Sr}^{2+}$ 浓度 (mmol/L)	0	0.09	0.36	1.44	5.76	23.04
SOD (U/ $10^6$ cells)	433.88 ± 17.52	379.72 ± 6.68	401.24 ± 14.90	393.44 ± 8.01	444.00 ± 9.11	805.78 ± 46.04*
CAT (U/ $10^6$ cells)	1.80 ± 0.12	1.71 ± 0.18	1.17 ± 0.13	1.19 ± 0.03	2.14 ± 0.14*	2.15 ± 0.11*
GPX (U/ $10^6$ cells)	440.78 ± 83.31	463.03 ± 67.02	600.69 ± 24.45	476.88 ± 32.44	473.55 ± 7.20	768.73 ± 96.33*

## 3 讨论

天然海水和人工海水中  $\text{Sr}^{2+}$  浓度均为 0.09 mmol/L。在预实验中, 作者曾尝试在人工海水培养基中加入大量  $\text{SrCl}_2$  至有沉淀出现, 即“饱和锶海水培养基”, 并在其中培养叉鞭金藻, 结果发现叉鞭金藻在其中能够生长。经光学显微镜观察, 活动藻细胞的形态结构未发生明显的变化, 但细胞数量减少, 并可见部分细胞死亡, 因此本实验设计了 6 组较大范围的  $\text{Sr}^{2+}$  浓度培养基。实验结果表明, 在 6 组  $\text{Sr}^{2+}$  浓度下微藻细胞均能够生长, 较低浓度的  $\text{Sr}^{2+}$  含量对微藻生长没有影响, 但高

浓度  $\text{Sr}^{2+}$  对微藻的生长有抑制作用。叶绿素的研究结果与 Cid 等 (1995) 关于  $\text{Cu}^{2+}$  胁迫对 *Phaeodactylum tricornerutum* 叶绿素含量的影响相一致, 即高浓度  $\text{Sr}^{2+}$  下叶绿素的急剧减少可能是由于藻细胞数降低和高浓度  $\text{Sr}^{2+}$  使叉鞭金藻的膜透性发生了变化, 大量的  $\text{Sr}^{2+}$  进入了细胞, 从而使叶绿体膜遭到了破坏所致。

自 Fridovich 提出自由基伤害学说以来, 该学说已被广泛用于研究生物细胞毒害机理 (McCord et al, 1969)。在重金属离子胁迫下, 植物体产生大量的活性氧自由基, 导致细胞膜脂过氧化, 生理

代谢紊乱。丙二醛(MDA)被认为是植物体在逆境条件下发生膜脂过氧化作用的产物之一,通常利用它作为膜脂过氧化强弱的一个重要指标。本实验结果表明:与对照组相比,23.04mmol/L  $\text{Sr}^{2+}$  浓度组叉鞭金藻细胞中的MDA含量升高显著,与此同时,生长受到抑制,提示藻细胞脂质过氧化作用的增强和细胞膜伤害的加重,脂类过氧化物产生活跃的氧原子造成膜的不稳定性。作者推测,高浓度  $\text{Sr}^{2+}$  胁迫使藻细胞产生过量的自由基,而引起膜脂过氧化,构成对膜的伤害,引起叶绿素含量的降低,这很可能是高浓度  $\text{Sr}^{2+}$  抑制藻细胞生长的原因之一。

在生物体抗氧化防御系统中存在着清除自由基的两种成分,即酶性成分和非酶性成分。在酶性成分中,SOD、CAT、GPX 组成了一个有效的活性氧清除系统。在一定范围内,SOD 和 CAT 共同作用,能把具有潜在危害的  $\text{O}_2 \cdot$  和  $\text{H}_2\text{O}_2$  转化为无害的  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{O}_2$  并且减少具毒性的、高活性的氧化剂羟自由基( $\cdot\text{OH}$ )的形成,一定程度上降低了植物体内自由基的水平。GPX 也是植物体内重要的抗氧化酶,可将 SOD 的产物  $\text{H}_2\text{O}_2$  有效地清除。在正常情况下,生物细胞代谢产生的活性氧并不造成严重的危害,因为细胞内 SOD 等一系列保护酶组成一个清除活性氧的防御过氧化系统,使活性氧的产生和清除处于一个平衡状态,从而使细胞免受伤害,起到保护作用。但在逆境条件下,植物体内活性氧自由基的产生速度超出了植物清除活性氧的能力,引起活性氧的积累,从而引起伤害。Rijstenbil 等(1994)和 Okamoto 等(1996, 1998)分别报道过重金属胁迫下某些微藻 SOD 活性的变化,但是关于  $\text{Sr}^{2+}$  对微藻 SOD 活性的影响,目前所知甚少。本实验结果表明,在  $\text{Sr}^{2+}$  胁迫下,藻细胞内的 SOD 活性在  $\text{Sr}^{2+}$  由低浓度到高浓度的胁迫处理过程中先降低后升高,在 23.04 mmol/L 时藻细胞的 SOD 显著升高,提示金藻细胞内始终具有较高的清除活性氧的能力,从而减少了活性氧对细胞的伤害,使金藻细胞保持较完好的结构与功能,表现出对  $\text{Sr}^{2+}$  较强的耐受力。当  $\text{Sr}^{2+}$  浓度为 5.76 及 23.04mmol/L 时藻细胞的 CAT 活性显著增强,显示其在抵御重金属引起的氧化胁迫中起重要作用。Lee 等(2003)发现镉胁迫下的微藻 CAT 活性增强。GPX 存在与细胞的胞液中,也见于叶绿体,因此有学者提出 GPX 对  $\text{H}_2\text{O}_2$  的还原比 CAT 更具重要性,后者只限于细胞

的过氧化物酶体中(Jones, 1982)。已有报道,在重金属胁迫下,随着金属种类和浓度的增加,植物中这些酶活性增强(Lee *et al.*, 2003)。本实验结果表明, $\text{Sr}^{2+}$  浓度越高,SOD、CAT 和 GPX 活性水平越强,提示这些酶性成分具有抵御镉诱导的氧化胁迫的作用。作者注意到,在无镉时(即对照组)的MDA含量、SOD 和 CAT 活性都较正常  $\text{Sr}^{2+}$  浓度(0.09mmol/L)高,说明无  $\text{Sr}^{2+}$  时细胞似乎也产生了氧化胁迫,引起酶活性的升高。

#### 4 结语

本研究中发现了叉鞭金藻对  $\text{Sr}^{2+}$  胁迫具有较高的耐受能力。率先用微藻研究重金属镉的抗性系统,有望通过进一步的研究来探讨其对镉的吸收,为重金属污染的处理提供更多的资料。

#### 参 考 文 献

- 纪明侯, 1997. 海藻化学. 北京: 科学出版社, 466—467
- 毕春娟, 陈振楼, 许世远, 2003. 上海滨岸滩涂根际重金属含量季节变化及形态分布. 海洋与湖沼, 34(2): 194—200
- 唐学玺, 李永祺, 李春雁等, 1995. 有机磷农药对海洋微藻致毒性的生物学研究 I. 四种海洋微藻对久效磷的耐受力与其 SOD 活性的相关性. 海洋环境科学, 14(2): 1—5
- 唐学玺, 李永祺, 李春雁等, 1997. 有机磷农药对海洋微藻致毒性的生物学研究 II. 久效磷胁迫下扁藻和三角褐指藻脂质过氧化伤害的研究. 海洋学报, 19(1): 139—143
- 唐学玺, 李永祺, 1999. 久效磷对叉鞭金藻的毒性. 水产学报, 23(2): 131—137
- 彭金良, 严国安, 沈国兴等, 2001.  $\alpha$ -萘酚胁迫对普通小球藻生长及抗氧化酶活性的影响. 武汉大学学报(理学版), 47(4): 449—452
- Cid A, Herrero C, Torres E *et al.*, 1995. Copper toxicity on the marine microalga *Phaeodactylum tricorutum*: effects on photosynthesis and related parameters. *Aquat Toxicol*, 31: 165—174
- Eisenbud M, Gesell T, 1997. Environmental radioactivity: from natural, industrial, and military sources. 4th ed. San Diego, Academic Press Calif, 656—668
- Flohe L, Gunzler W, 1984. Assays of Glutathione Peroxidase. In: Packer L ed. *Methods in Enzymology* (Vol. 105). New York: Academic Press, 328—331
- Jones D P, 1982. Intracellular catalase function: Analysis of the catalytic activity by product formation in isolated liver cells. *Arch Biochem Biophys*, 214: 806—814

- Lee M Y, Shin H W, 2003. Cadmium-induced change in antioxidant enzymes from the marine alga *Nannochloropsis oculata*. *J Appl Phycol*, 15: 13—19
- Lyman J, Fleming R H, 1940. Composition of sea water. *J Mar Res*, 3: 134—146
- McCord J M, Fridovich I, 1969. Superoxide dismutase. An enzymic function for erythrocyte (hemocuprein). *J Biol Chem*, 244: 6049—6055
- Okamoto O K, Asano C S, Aida E *et al*, 1996. Effects of cadmium on growth and superoxide dismutase activity of the marine microalga *Tetraselmis gracilis*. *J Phycol*, 32: 74—79
- Okamoto O K, Colepicolo P, 1998. Response of superoxide dismutase to pollutant metal stress in the marine dinoflagellate *Gonyaulax polyedra*. *Comp Biochem Physiol, Part C: Pharmacology, Toxicology & Endocrinology*, 119: 67—73
- Rao M V, Paliyath G, Ormrod D P, 1996. Ultraviolet-B and ozone-induced biochemical changes in antioxidant enzymes of *Arabidopsis thaliana*. *Plant Physiol*, 110: 125—136
- Rijstenbil J W, Derkesen J W M, Gerringa L J A *et al*, 1994. Oxidative stress induced by copper: Defense and damage in the marine planktonic diatom *Ditylum brightwellii*, grown in continuous cultures with high and low zinc levels. *Mar Biol*, 119: 583—590

## STRONTIUM STRESS ON MARINE MICROALGAE *DICRATERIA INORNATA* GROWTH AND ANTIOXIDANT ENZYMES ACTIVITIES

LI Mei, XU Jin, LIU Zhi-Li, XU Jun

(College of Life Science, Nanjing University, Nanjing, 210093)

**Abstract** Increasing utilization of heavy metals in industries has caused serious environmental pollution. They were transported into marine environment and accumulated without decomposition, which has become a major concern in recent years. Strontium is a minor component of seawater but is a major hazardous contaminant from the sludge generated by nuclear industry released regularly or accidentally.  $^{90}\text{Sr}$ , a normal by-product of nuclear fission, can reside in natural environment. When strontium isomorphously replaces the calcium in animal bones, it becomes more mobile than calcium, and used to cause Urov's disease. Therefore, strontium is ranked as one of the most potential hazardous element to humans and aquatic organisms. The present study is to investigate the strontium effects in elevated concentrations on growth, lipid peroxidation and some antioxidant enzymes activities of marine microalgae *Dicrateria inornata*.

Sample marine microalgae *D. inornata* were provided by Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao. It was maintained in sterilized artificial seawater enriched with *f/2* medium. The algae grew at  $(24 \pm 1)^\circ\text{C}$ ,  $120\mu\text{mol photon}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 12h : 12h L/D cycle. The experiments were conducted in 500 ml flasks autoclaved at  $121^\circ\text{C}$  for 20 min. Strontium-bearing solutions were prepared by dissolving analytical grade strontium chloride in deionized water.  $\text{Sr}^{2+}$  solutions in the range 0.09 to 23.04mmol/L were prepared by diluting concentrated stock solution. Growth of microalgae was measured spectrophotometrically at 420nm in a cuvette with a 1-cm light path.  $OD_{420}$  values were converted to cell counts using linear regressions between optical density and cell counts determined in preliminary experiments ( $y = 50.69OD_{420} + 0.93$ ,  $r = 0.999$ , cell counts =  $y \times 10^5$ ). For enzymes assays, *D. inornata* samples were centrifuged and re-suspended in 1/15 mmol of pre-cooled sodium phosphate buffer (pH 7.0). After sonication in an ice bath, the cell debris was removed by centrifugation at high speed. The supernatant was used for enzyme activity assay.

The results show that *D. inornata* could grow under all experimental conditions. Growth was not inhibited significantly by strontium constraint whose concentration is lower than 1.14mmol/L. However, 5.76mmol/L and above, significant reduction in the number of microalgal cells were apparent. Growth was inhibited by 15.9% and 51.0%, when compared to the control at strontium treatment concentrations of 5.76 and

23.04mmol/L respectively. Meanwhile, chlorophyll *a* content varied from 0.72 to 2.32 $\mu$ g/ml as strontium concentration increased. At 23.04mmol/L, chlorophyll *a* content reached the minimum. Protein content remained relatively similar at concentrations up to 5.76mmol/L. Once at 23.04mmol/L, a significant (49.7%) decrease was observed. MDA content decreased significantly at 0.09, 0.36, 1.14 and 5.76mmol/L concentrations. But after 23.04mmol/L, MDA increased significantly to 123.0% of that in the control. In the case of antioxidase activities, SOD decreased between 7.5% to 12.5%, at lower strontium levels; and increased remarkably at higher levels, 85.7% more than the control. Significant increments in CAT and GPX activities were also seen which is 19.8% and 74.4% respectively higher than the control at the strontium concentration of 23.04mmol/L. A decrease in SOD and CAT activities are evident at lower external concentrations whereas GPX activity was not significantly affected by concentrations lower than 23.04mmol/L.

Studying antioxidant system under the stress of strontium could be a new approaches in microalgae research. In conclusion, *D. inornata* can induced some antioxidant enzymes, which are important protective material to minimize cell oxidative damage by pollution. *D. inornata* is able to live in high strontium concentrated areas.

**Key words** Marine microalgae *Dicrateria inornata*, Growth, Strontium stress, Antioxidant enzymes

### 欢迎订阅 2005 年《上海水产大学学报》

《上海水产大学学报》是上海水产大学主办的以水产科学为主的综合性学术刊物。主要反映自然科学各学科的科研成果,促进学术与教学研究的交流与繁荣。主要刊载渔业资源,水产养殖和增殖,水产捕捞,水产品保鲜与综合利用,渔业水域环境保护,渔船,渔业机械与仪器,渔业经济与技术管理以及基础研究等方面的论文,调查报告,研究简报,综述与评述,简讯等,并酌登学术动态和重要书刊的评价等。

目前,《上海水产大学学报》已同时被中文核心期刊要目总览定为中文核心期刊、中国科学院文献情报中心定为中国科技论文统计源期刊、中国科学技术信息研究所定为中国科技核心期刊。

本刊为季刊,大 16 开,国内外公开发行。每期单价 6 元。全年定价 24 元(含邮费)。国际标准刊号:ISSN1004-7271,国内统一刊号:CN31-1613/S。国内邮发代号:4-604,国际发行代号:4822Q。读者可在当地邮局订阅,也可直接汇款至编辑部订阅。编辑部还有《上海水产大学学报》(1992-2001 年)全文检索光盘,定价 50 元(含邮费)。欢迎订阅。

编辑部地址:上海市军工路 334 号,上海水产大学 38 信箱,邮编:200090

联系电话:021-65710892,传真:021-65680965

E-mail: xuebao@shfu.edu.cn