

# 六价铬抑制淡水蓝绿藻生长的毒性效应

陈海柳, 潘纲\*, 闫海, 秦延文(中国科学院生态环境研究中心环境水化学国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 采用化学品毒性藻类测试的标准方法得到 Cr(VI) 抑制蛋白核小球藻、聚球藻、极大螺旋藻、钝顶螺旋藻、羊角月牙藻和四尾栅藻生长的 96h EC<sub>50</sub> 分别为 4.96、6.50、11.16、11.74、12.43、20.89 mg/L; 6 种蓝绿藻对 Cr(VI) 耐受性大小顺序为: 四尾栅藻 > 羊角月牙藻 > 钝顶螺旋藻 > 极大螺旋藻 > 聚球藻 > 蛋白核小球藻。不同藻类对 Cr(VI) 的敏感程度可能与细胞大小和形状、细胞壁结构、藻类分泌物以及酶的作用有关。本文运用 X 射线吸收近边结构(XANES) 初步研究了蛋白核小球藻对 Cr(VI) 的吸收和转化。

关键词: 六价铬; 蓝绿藻; 毒性效应; XANES

中图分类号: X173 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2003)02-06-0013

## Toxic Effects of Hexavalent Chromium on the Growth of Blue Green Microalgae

Chen Hailiu, Pan Gang\*, Yan Hai, Qin Yanwen(State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

**Abstract:** A standard method of algal bioassay for determining the toxicity of toxic chemicals was applied to the interaction between Cr(VI) and six blue-green microalgae. The 96h EC<sub>50</sub> of hexavalent chromium on the growth of *Chlorella pyrenoidosa*, *Synechococcus*, *Spirulina maxima*, *Spirulina platensis*, *Selenastrum capriornutum* and *Scenedesmus quadricauda* were 4.96, 6.50, 11.16, 11.74, 12.43 and 20.89 mg/L, respectively. The tolerance of the six blue-green microalgae to Cr(VI) was in the order of *Scenedesmus quadricauda* > *Selenastrum capriornutum* > *Spirulina platensis* > *Spirulina maxima* > *Synechococcus* > *Chlorella pyrenoidosa*. The sensitivity of these species to Cr(VI) might relate to the cell size, the structure of cell wall, as well as the redox reaction caused by the exudate or enzyme. X-ray absorption near edge structure(XANES) was used to study the accumulation and transformation of Cr(VI) in *Chlorella pyrenoidosa*.

**Key words:** hexavalent chromium; blue-green microalgae; toxicity; XANES

水、空气和土壤中的铬, 可以通过食物链逐级富集, 对动植物和人类健康构成危害, 其中又以 Cr(VI) 的生物毒性最大<sup>[1]</sup>。Cr(VI) 在细胞内参与氧化还原的过程, 被转化成较低的价态, 从而影响细胞正常的新陈代谢, Cr(VI) 的化合物还有致癌、致畸作用<sup>[2,3]</sup>。

在水生生态系统及水生食物链中, 藻类占据着重要的位置。利用一些微藻的敏感种类作为指示生物, 可以监测水体重金属污染的程度。目前关于重金属铬对藻类的毒性以及不同藻类对铬的抗性仅有有限的报道<sup>[4]</sup>。Travieso 等<sup>[5]</sup>认为小球藻在 45 mg/L 的 Cr(VI) 存在下生长不受影响, 而尖细栅藻在 Cr 浓度高于 15 mg/L 时未见生长; Renata 等<sup>[6]</sup>的研究则表明小球藻对

Cr(VI) 的耐受性比栅藻要低得多, 其 72h EC<sub>50</sub> 小于 5 mg/L; Corradi 等<sup>[7]</sup>指出栅藻的分泌物具有降低 Cr(VI) 毒性的作用。至于致毒机理, 目前还没有一个很好的解释。本文选择 6 种常见的淡水蓝绿藻, 采用化学品毒性藻类测试的标准实验方法<sup>[8]</sup>确定了六价铬抑制藻类生长的 96h EC<sub>50</sub>, 并利用 X 射线吸收精细结构(XAFS) 中的近边结构(XANES) 分析初步探索了蛋白核小球藻对 Cr(VI) 转化作用, 为进一步研究 Cr

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(20177029)

作者简介: 陈海柳(1976~), 女, 硕士研究生, 主要从事天然水体重金属污染及其与藻类相互作用机制的研究。

收稿日期: 2002-06-18; 修订日期: 2002-10-22

\* 联系人

(VI)与藻细胞的作用机制以及利用水生生物进行铬污染水体的水质评价提供重要依据。

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料

3种绿藻蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)、四尾栅藻(*Scenedesmus quadricauda*)、羊角月牙藻(*Selenastrum capriornutum*)和3种蓝藻聚球藻(*Synechococcus*)、极大螺旋藻(*Spirulina maxima*)、钝顶螺旋藻(*Spirulina platensis*)均购自中国科学院水生生物研究所,实验前经过预培养。化学试剂  $K_2Cr_2O_7$  为分析纯。

### 1.2 实验方法

(1) 培养条件 绿藻采用水生4号培养基<sup>[9]</sup>,培养液初始 pH 为 7.0;聚球藻采用 HGZ 培养基<sup>[9]</sup>,螺旋藻采用 Zarrouk 培养基<sup>[10]</sup>,培养液初始 pH 均为 8.5。培养容器为 100 mL 玻璃三角瓶,平行样 3 个,重复 3 次。所有玻璃器皿和培养液均经过高温高压灭菌锅 125 °C、20 min 的灭菌,冷却后再置于洁净工作台内进行 30 min 的紫外灯杀菌。将接种的藻液置于恒温光照培养箱中培养,保持温度 25 ± 1 °C,光照强度 2500 lx,光暗比 12 h:12 h,每天摇瓶 2~3 次。

(2) 藻生物量的测定 在建立每种藻类细胞干重浓度与藻液光密度之间的线性关系( $R^2 > 0.99$ )的基础上,用 721 型可见光栅分光光度计测定培养 96 h 的藻液在一定波长下(螺旋藻取 560 nm,其它藻类为 650 nm)的光密度值,计算细胞干重浓度以表征藻的生物量。

(3) 半效应浓度的确定 采用化学品毒性藻类测试的标准实验方法,藻初始浓度(干重)为 10 mg/L,培养液中 Cr(VI) 初始浓度依次为 0.1、2.5、10、20、40 mg/L,培养 96 h 后测定藻液光密度值,计算干重浓度。根据初步实验的结果,以用直线内插法确定的 96 h- $EC_{50}$  为中点,各向两边以等差数列的形式延伸 2 个浓度,同时做对照。根据进一步实验的数据,采用几率单位法计算 96 h- $EC_{50}$ ,并对金属浓度对数与几率单位之间的剂量反应方程进行  $\chi^2$  检验。

(4) XAFS 实验 本实验于中国科学院高能物理研究所同步辐射室 XAFS 实验站完成。

根据毒性实验的结果,选择对 Cr(VI) 最敏感的藻种,将在浓度为 96 h- $EC_{50}$  值的 Cr(VI) 中生长了 96 h 后的藻液以及对对照藻样离心去上清液,用 5% NaCl 洗涤藻体 3 次,0.45  $\mu$ m 滤膜过滤,风干,压平;同时将标准样品  $K_2Cr_2O_7$  和  $Cr_2O_3$  研磨粉末,均匀涂抹于胶带上。在同步辐射光源条件下,分别测量样品与标准的吸收系数与 X 射线光子能量间的关系;采用 V3 滤光片,能量扫描范围从 Cr 的吸收边(5989 eV)前 150 eV 至边后 100 eV(即 -150 eV ~ 100 eV),分 -150 eV ~ -15 eV、-15 eV ~ 70 eV、70 eV ~ 100 eV 3 段进行扫描,各段步长分别为 5 eV、0.5 eV、1 eV,每步记数时间分别为 6 s、10 s、10 s,样品采用荧光模式,标准采用透射模式。根据测量数据计算并作吸收系数-入射光能量曲线。

## 2 结果与讨论

### 2.1 Cr(VI)对藻类生长的抑制效应

图 1~6 分别显示了 6 种蓝绿藻在含 Cr(VI) 环境中的生长情况。随着 Cr(VI) 浓度的升高,藻类的生长均受到不同程度的抑制:蛋白核小球藻最敏感,在 Cr(VI) 浓度为 1 mg/L 时生长就受到明显的抑制,Cr(VI) 的半效应浓度在 5 mg/L 左右;其次是聚球藻,半效应浓度在 5 mg/L ~ 10 mg/L 之间;Cr(VI) 浓度低于 5 mg/L 时对 2 种螺旋藻的生长影响并不明显,半效应浓度在 10 mg/L 附近;四尾栅藻对 Cr(VI) 的耐受性最强,半效应浓度达到 20 mg/L 左右,而在 10 mg/L 之前,其生物量随 Cr(VI) 浓度的升高是缓慢降低的。

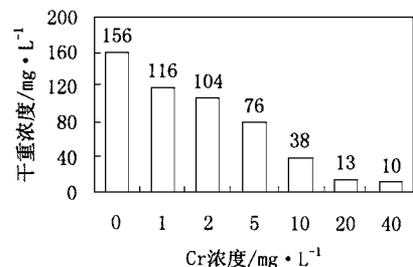


图 1 Cr(VI)对蛋白核小球藻生长的效应

Fig. 1 Effect of Cr(VI) on the growth of *C. pyrenoidosa*

### 2.2 96 h- $EC_{50}$ 的确定

表 1 为在初步实验的基础上进一步确定

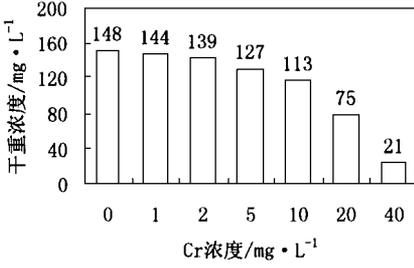


图 2 Cr(VI)对四尾栅藻生长的效应

Fig.2 Effect of Cr(VI) on the growth of *S. quadricauda*

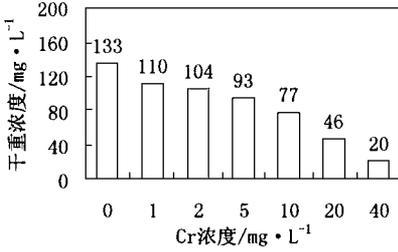


图 3 Cr(VI)对月牙藻生长的效应

Fig.3 Effect of Cr(VI) on the growth of *S. capriornutum*

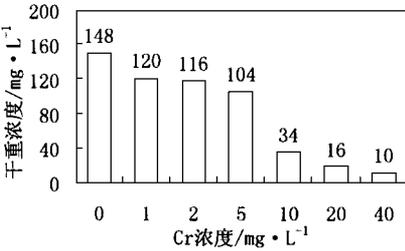


图 4 Cr(VI)对聚球藻生长的效应

Fig.4 Effect of Cr(VI) on the growth of *Synechococcus*

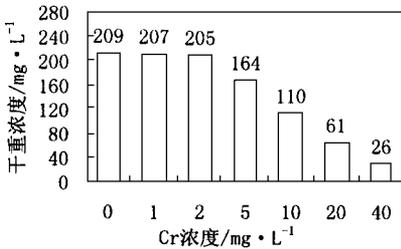


图 5 Cr(VI)对极大螺旋藻生长的效应

Fig.5 Effect of Cr(VI) on the growth of *S. maxima*

Cr(VI)抑制藻类生长的 96h EC<sub>50</sub>的实验结果. 将浓度对数(x)与几率单位(y)进行一元线性回归,得到如下剂量反应方程:

蛋白核小球藻:  $y = - 2.0192x + 6.4044$   
 $R^2 = 0.9813$  (1)

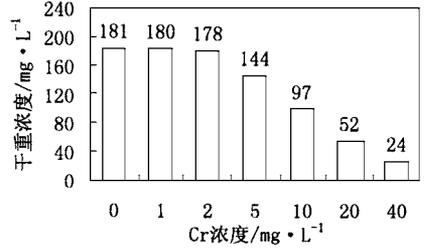


图 6 Cr(VI)对钝顶螺旋藻生长的效应

Fig.6 Effect of Cr(VI) on the growth of *S. platensis*

四尾栅藻:  $y = - 3.2384x + 9.2747$

$R^2 = 0.9825$  (2)

羊角月牙藻:  $y = - 2.7039x + 7.9594$

$R^2 = 0.9759$  (3)

聚球藻:  $y = - 6.7762x + 10.509$

$R^2 = 0.9787$  (4)

极大螺旋藻:  $y = - 2.3202x + 7.431$

$R^2 = 0.9893$  (5)

钝顶螺旋藻:  $y = - 2.1144x + 7.2617$

$R^2 = 0.9962$  (6)

当几率单位为 5 时,分别通过上述方程计算得到 Cr(VI)抑制蛋白核小球藻、四尾栅藻、羊角月牙藻、聚球藻、极大螺旋藻和钝顶螺旋藻生长的 96h EC<sub>50</sub> 分别为: 4.96、20.89、12.43、6.50、11.16、11.74 mg/L.

为了验证计算所得的 96h EC<sub>50</sub>的可靠性,对 6 种藻类的剂量反应方程进行 X<sup>2</sup> 检验(表 2).查 X<sup>2</sup> 表,当自由度为 3 时, X<sub>0.05</sub><sup>2</sup> = 7.82,6 种藻类的计算 X<sup>2</sup> 均小于 X<sub>0.05</sub><sup>2</sup>,故所得的剂量反应方程符合精度要求,96h EC<sub>50</sub>值可靠.由此得到,6 种蓝绿藻对 Cr(VI)耐受性大小顺序为:四尾栅藻 > 羊角月牙藻 > 钝顶螺旋藻 > 极大螺旋藻 > 聚球藻 > 蛋白核小球藻.

水体中的重金属对藻类产生毒性的前提是该金属与藻细胞的结合.一般的重金属阳离子在短时间内被吸附到藻细胞壁上的原因主要有 2 个:与细胞壁所含的藻酸盐中带负电荷的功能基(羟基、氨基、羧基、硫酸根以及磷酸根等)进行络合,或与藻酸盐所含的 Ca<sup>2+</sup> 等阳离子发生离子交换<sup>[11]</sup>.而对于在溶液中以 Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>2-</sup> 或 CrO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 形式存在的 Cr(VI),一方面可能通过细

表 1 Cr(VI)抑制蓝绿藻生长的结果

Table 1 Results of Cr(VI) on the inhibition of blue-green algae's growth

	Cr 浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0	4	4.5	5	5.5	6
蛋白核小球藻	浓度对数( $x$ )		0.602	0.653	0.699	0.740	0.778
	干重/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	144.55	84.18	76.48	70.27	66.84	63.63
	反应率/%	100.0	58.2	52.9	48.6	46.2	44.0
	几率单位( $y$ )		5.21	5.07	4.97	4.91	4.85
	Cr 浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0	15	17.5	20	22.5	25
四尾栅藻	浓度对数( $x$ )		1.176	1.243	1.301	1.352	1.398
	干重/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	152.03	103.72	93.11	77.19	67.14	63.23
	反应率/%	100.0	68.2	61.2	50.8	44.2	41.6
	几率单位( $y$ )		5.47	5.28	5.02	4.86	4.79
	Cr 浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0	7.5	10	12.5	15	17.5
羊角月牙藻	浓度对数( $x$ )	0	0.875	1.000	1.097	1.176	1.243
	干重/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	137.86	101.50	79.78	69.04	53.26	51.20
	反应率/%	100.0	73.6	57.9	50.1	38.6	37.1
	几率单位( $y$ )		5.64	5.2	5.00	4.71	4.67
	Cr 浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5
聚球藻	浓度对数( $x$ )	0	0.740	0.778	0.813	0.845	0.875
	干重/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	153.49	107.51	87.21	77.51	67.45	49.49
	反应率/%	100.0	70.0	56.8	50.5	43.9	32.2
	几率单位( $y$ )		5.52	5.17	5.01	4.85	4.54
	Cr 浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0	5	7.5	10	12	15
极大螺旋藻	浓度对数( $x$ )		0.699	0.875	1.000	1.079	1.176
	干重/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	202.98	160.94	134.53	107.78	90.76	82.07
	反应率/%	100.0	79.3	66.3	53.1	44.7	40.4
	几率单位( $y$ )		5.82	5.42	5.08	4.870	4.76
	Cr 浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0	5.0	7.5	10	12.5	15
钝顶螺旋藻	浓度对数( $x$ )		0.699	0.875	1.000	1.097	1.176
	干重/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	184.35	144.24	123.37	100.27	87.75	76.52
	反应率/%	100.0	78.2	66.9	54.4	47.6	41.5
	几率单位( $y$ )		5.78	5.44	5.11	4.94	4.79

胞内负责运送碳酸根、硫酸根、磷酸根等阴离子的酶系统直接被细胞吸收<sup>[12]</sup>;另一方面也可能先被胞外分泌物还原为  $\text{Cr}^{3+}$ ,再进一步与细胞结合并进入细胞.因此,藻细胞的大小和形状、细胞壁所含功能基以及胞外分泌物和酶等因素都会影响细胞对  $\text{Cr(VI)}$  的亲和性,进而导致毒性的差异,如小球藻和聚球藻对  $\text{Cr(VI)}$  最敏感的原因可能与它们的细胞个体小且为球状有关.

藻细胞可以通过分泌胞外物质(如有机螯合物)来束缚有毒金属离子,也可利用胞内金属硫蛋白将金属离子封闭在细胞内的某些部位(如液泡、线粒体、细胞核等),降低其毒性<sup>[13]</sup>.四尾栅藻对  $\text{Cr(VI)}$  的较强耐受性和小球藻、聚球藻对  $\text{Cr(VI)}$  的敏感性也许与上述外排作用和胞内解毒作用有关;具体的抗性机制,还有待

深入的研究.

### 2.3 蛋白核小球藻对 $\text{Cr(VI)}$ 吸收和转化的 XANES 研究

X射线吸收光谱用于探测元素的化学环境,特别是生物体系中的过渡元素,是一种理想的方法<sup>[14]</sup>.根据不同价态  $\text{Cr}$  的能量吸收边的差异(包括各种吸收峰的出现、大小、形状等),可利用 X射线吸收近边精细结构(XANES)进行价态分析.

从标准样品的 X射线吸收光谱(图 7~8)可以看出, $\text{Cr(VI)}$  在边前有一个尖锐的吸收峰, $\text{Cr}^{3+}$  则没有;在  $\text{Cr(VI)}$  浓度为  $5 \text{ mg/L}$  的环境中生长了 96h 后,蛋白核小球藻细胞中  $\text{Cr}$  的 X射线吸收光谱(图 9)呈现出  $\text{Cr}^{3+}$  的谱图特征;而对照藻样在扫描的能量范围内并未出现铬的特

表 2 剂量反应方程的  $X^2$  检验结果Table 2  $X^2$  test results of reaction equations of Cr( VI)

藻类	Cr 浓度对数 ( x )	计算几率单位 ( y )	反应率 ( p )	对照反应率 ( k ) / %	实际反应率 ( r ) / %	$( r - kp )^2 /$ $kp(1 - p)$
蛋白核小球藻	0.602	5.19	0.576	100	58.2	0.017
	0.653	5.09	0.536	100	52.9	0.019
	0.699	4.99	0.496	100	48.6	0.039
	0.74	4.91	0.464	100	46.2	0.001
	0.778	4.83	0.432	100	44	0.028
	$X^2$					
四尾栅藻	1.176	5.47	0.681	100	68.2	0.001
	1.243	5.25	0.6	100	61.2	0.064
	1.301	5.06	0.534	100	50.8	0.277
	1.352	4.9	0.48	100	44.2	0.59
	1.398	4.75	0.398	100	41.6	0.134
	$X^2$					
羊角月牙藻	0.875	5.590	0.721	100	73.60	0.116
	1.000	5.26	0.604	100	57.90	0.267
	1.097	4.99	0.496	100	50.10	0.009
	1.176	4.78	0.422	100	38.60	0.522
	1.243	4.60	0.344	100	37.10	0.333
	$X^2$					
聚球藻	0.740	5.490	0.688	100	70.00	0.072
	0.778	5.24	0.598	100	56.80	0.370
	0.813	5.00	0.500	100	50.50	0.010
	0.845	4.78	0.402	100	43.90	0.584
	0.875	4.58	0.357	100	32.20	0.520
	$X^2$					
极大螺旋藻	0.699	5.810	0.791	100	79.30	0.002
	0.875	5.40	0.656	100	66.30	0.020
	1.000	5.11	0.544	100	53.10	0.068
	1.079	4.93	0.472	100	44.70	0.248
	1.176	4.70	0.381	100	40.40	0.231
	$X^2$					
钝顶螺旋藻	0.699	5.83	0.797	100	78.20	0.132
	0.875	5.43	0.667	100	66.90	0.002
	1.000	5.16	0.564	100	54.40	0.164
	1.097	4.94	0.476	100	47.60	0.000
	1.176	4.76	0.404	100	41.50	0.051
	$X^2$					

征吸收边,即对照藻样中不含 Cr.

初步分析:Cr( VI)的生物毒性与其被还原程度有关.Cr( VI)可能是在细胞外就被藻类分泌的物质还原为  $Cr^{3+}$ ,再被细胞吸附或吸收;也有可能是在细胞内被还原.Cr( VI)与细胞内的还原型辅酶 II NAD(P)H、戊糖、谷胱甘肽等形成的 Cr( V)的复合物能诱发 DNA 的变异<sup>[15]</sup>, $Cr^{3+}$ 则会与酶的  $-COOH$ 、 $-SH$  等基团结合而引起酶结构和活性的改变<sup>[16]</sup>.上述反应进行的

程度除了与细胞本身的组成和机能有关外,还受环境中 Cr( VI)初始浓度的影响, $EC_{50}$ 值有可能是研究这些关系的一个有用指标.

### 3 结论

(1)采用化学品藻类毒性测试的标准实验方法,通过金属浓度对数与几率单位的剂量反应方程计算,得到 Cr( VI)抑制 3 种绿藻蛋白核小球藻、四尾栅藻、羊角月牙藻和 3 种蓝藻聚球藻、极大螺旋藻、钝顶螺旋藻生长的 96h  $EC_{50}$ 分

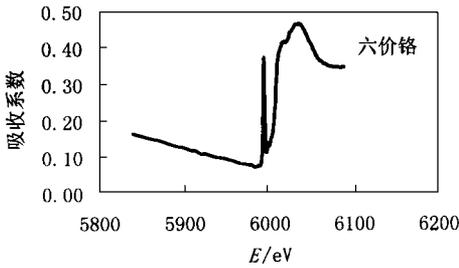


图 7 Cr(VI)的 X射线吸收近边结构光谱

Fig. 7 XANES spectrogram of Cr(VI)

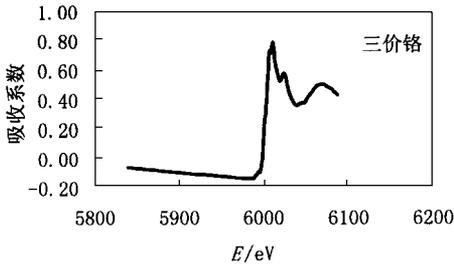
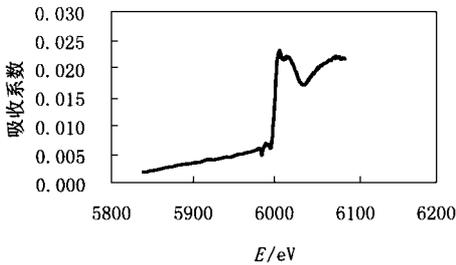
图 8 Cr<sup>3+</sup>的 X射线吸收近边结构光谱Fig. 8 XANES spectrogram of Cr<sup>3+</sup>

图 9 吸收 Cr(VI)后蛋白核小球藻中

Cr的 X射线吸收近边结构光谱

Fig. 9 XANES spectrogram of Cr in *C. pyrenoidosa* after absorption of Cr(VI)

别为 4.96、20.89、12.43、6.50、11.16、11.74 mg/L。经  $X^2$  检验,剂量反应方程符合精度要求,计算所得的 96h  $EC_{50}$  真实可靠。

(2) 6 种蓝绿藻对 Cr(VI) 耐受性大小顺序为:四尾栅藻 > 羊角月牙藻 > 钝顶螺旋藻 > 极大螺旋藻 > 聚球藻 > 蛋白核小球藻。不同藻类对 Cr(VI) 的敏感程度可能与细胞大小和形状、细胞壁结构、藻类分泌物及胞内酶的作用有关,而 Cr(VI) 对细胞产生毒性的原因可能是其参与氧化还原过程而导致 DNA 的损伤以及酶结构和活性的改变。

(3) X 射线吸收精细结构(XAFS)是研究藻

细胞对 Cr(VI) 的吸收和转化及二者之间作用机制的有效手段之一。

参考文献:

- McGrath S P, Smith S. Chromium and nickel. In: Alloway B J, Ed. Heavy Metals in Soils. New York: Wiley, 1990. 125 ~ 150.
- Arslan P, Beltrame M et al. Intracellular chromium reduction. Biochim. Biophys. Acta, 1987, **931**:10 ~ 15.
- Zayed A, Lytle C M et al. Chromium accumulation, translocation and chemical speciation in vegetable crops. Planta, 1998, **206**:293 ~ 299.
- Carlos C, Jesus C G et al. Interaction of chromium with microorganisms and plants. FEMS Microbiology Reviews, 2001, **25**: 335 ~ 347.
- Travieso L, Canizarez R O et al. Heavy metal removal by microalgae. Bull. Environ. Contam. Toxicol., 1990, **62**:144 ~ 151.
- Renata R P, Blahoslav M. Selection and sensitivity comparisons of algal species for toxicity testing. Chemosphere, 1999, **38**(14):3329 ~ 3338.
- Corradi M G, Gorbi G et al. Exudates from the wild type and a Cr-tolerant strain of *Scenedesmus acutus* influence differently Cr(VI) toxicity to algae. Chemosphere, 1998, **37**(14 ~ 15): 3019 ~ 3025.
- 周永欣,章宗涉.水生生物毒性试验方法.北京:农业出版社,1989.170 ~ 190.
- 华汝成.单细胞藻类的培养与利用.北京:农业出版社,1980.278 ~ 279.
- Zarrouk. Contribution a l'etude d'une cyanophycee. Influence de divers facteurs physiques et chimiques sur la croissance et la photosynthese de *Spirulina maxima*. Ph.D. thesis, University of Paris, France. 1966.
- Cetinkaya G Donmez, Aksu Z, Ozturk A, Kutsal T. A comparative study on heavy metal biosorption characteristics of some algae. Process Biochemistry, 1999, **34**:885 ~ 892.
- Borst-Pauwels, GWFH. Ion transport in yeast. Biochim. Biophys. Acta, 1981, **650**: 88 ~ 127.
- Corradi M G, Gorbi G. Chromium toxicity on two linked trophic levels. II Morphophysiological effects on *Scenedesmus acutus*. Ecotoxicolo. Environ. Saf., 1993, **25**: 72 ~ 78.
- 王其武,刘文汉. X 射线吸收精细结构及其应用.北京:科学出版社,1994.42 ~ 49.
- Shi X L, Dalal N S. On the hydroxyl radical formation in the reaction between hydrogen peroxide and biologically generated chromium(V) species. Arch. Biochem. Biophys, 1990, **277**: 342 ~ 350.
- Levis A G, Bianchi V. Mutagenic and cytogenetic effects of chromium compounds. In: Langard S, Ed. Biological and Environmental Aspects of Chromium. Elsevier, Amsterdam, 1982, 171 ~ 208.