

四尾栅藻对重金属镉胁迫的响应

尹文珂, 程金凤*, 肖婉露, 郭瑞军, 康冰*

(西北农林科技大学生命学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:通过不同浓度镉(0、0.5、1、3、5、7 mg·L⁻¹)胁迫实验,对四尾栅藻(*Scenedesmus quadricauda*)的生长、色素、过氧化氢、超氧化物阴离子、可溶性蛋白含量进行分析,研究四尾栅藻对重金属镉胁迫的响应情况。实验显示:镉胁迫使四尾栅藻的生长受到抑制,在较高镉浓度(3~7 mg·L⁻¹)下四尾栅藻的生长受到强烈抑制;随着镉浓度的上升,色素(叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素)含量逐渐减少,过氧化氢、超氧化物阴离子含量增加,过氧化氢含量在镉浓度为 5~7 mg·L⁻¹ 时显著增多,超氧化物阴离子含量在镉浓度为 7 mg·L⁻¹ 时显著增加;可溶性蛋白含量先增加,并在镉浓度为 1 mg·L⁻¹ 时达到最大值,之后随着镉浓度的上升而逐渐减小。研究结果表明,四尾栅藻对重金属镉有较好的耐受性(可以耐受 1 mg·L⁻¹ 的镉)。

关键词:四尾栅藻;镉;响应

中图分类号:X52 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)04-0633-06 doi:10.11654/jaes.2015.04.004

Effect of Cadmium on *Scenedesmus quadricauda*

YIN Wen-ke, CHENG Jin-feng*, XIAO Wan-lu, GUO Rui-jun, KANG Bing*

(College of Life Sciences, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Heavy metal pollution is one of the most concerned water environmental problems. In this study, the effects of different Cd²⁺ concentrations on the growth, pigments, hydrogen peroxide, superoxide anion and soluble protein of *Scenedesmus quadricauda* were investigated in laboratory. Result showed that algal growth was inhibited under cadmium stress, especially under high cadmium concentrations (3~7 mg·L⁻¹). Pigment (chlorophyll a, chlorophyll b, and carotenoids) contents decreased with increasing concentrations of cadmium. Contents of hydrogen peroxide and superoxide anion increased significantly under 5~7 mg·L⁻¹ and 7 mg·L⁻¹, respectively. Soluble protein content reached the maximum at 1 mg·L⁻¹ and decreased afterwards. *Scenedesmus quadricauda* displayed better tolerance to cadmium (upto 1 mg·L⁻¹ cadmium).

Keywords: *Scenedesmus quadricauda*; cadmium; response

水体重金属污染已成为当今世界上最严重的环境问题之一,不仅对水生植物、动物产生严重危害,并可能通过食物链影响到人类健康。据报道,水体中微量的重金属即可产生毒性效应,引起藻类生理代谢功能紊乱,减少细胞色素,抑制光合作用,导致细胞畸变,组织坏死,甚至使藻类中毒死亡^[1]。Piovar 等^[2]研究指出,铜对四尾栅藻(*Scenedesmus quadricauda*)和共球藻(*Trebouxia erici*)的生长、叶绿素含量、可溶性蛋

白等产生不利的影响。Magdalena 等^[3]研究指出,真眼点藻(*Eustigmatos* sp.)在含有锌和铅的培养液中,生物量的比增长率和叶绿素含量随着金属浓度的上升以及暴露时间的延长而减少。刘静等^[4]指出高浓度的金属锰能抑制四尾栅藻的生长,导致生物量下降,叶绿素含量降低。Jozef 等^[5]研究指出,生长在含镉培养液中的四尾栅藻,叶绿素含量、可溶性蛋白和可溶性酚含量下降。

镉是水体中污染最严重的元素之一,能破坏植物体光合器官和叶绿体结构^[6],抑制叶绿素的生物合成^[7]。受镉离子胁迫的植物还表现出活性氧(Reactive oxygen species, ROS)积累、酶失活、DNA 和蛋白质破坏以及膜脂过氧化伤害等症状^[8-12]。四尾栅藻是一种常见的绿藻,容易生长,被广泛应用到各学科各领域

收稿日期:2014-10-27

基金项目:国家自然科学基金项目(31000099)、西北农林科技大学基本科研业务费专项资金(2014YB038)

作者简介:尹文珂(1988—),女,河南平顶山人,在读硕士,主要从事植物学研究。E-mail: yinwk1129@163.com

* 通信作者:程金凤 E-mail: chengjinfeng@nwsuaf.edu.cn
康冰 E-mail: yl-kangbing@163.com

的研究中^[13-14]。Fargašová^[15]研究了锰、钼、镍、铜(Ⅰ)和铜(Ⅱ)、钒单独和交互对四尾栅藻的影响。然而,目前关于镉对四尾栅藻生长影响的报道很少。

本文以四尾栅藻为材料,研究其不同浓度镉离子胁迫下,细胞生长、色素、过氧化氢、超氧化物阴离子以及可溶性蛋白含量的变化,探索其对重金属镉的耐受性,旨在为进一步处理含重金属的废水提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验所用四尾栅藻(*Scenedesmus quadricauda*)分离自西北农林科技大学北校区图书馆前的喷泉中。将该藻种接种至 BG11 培养基中并置于人工气候培养箱中,于(20±1)℃、光照 4000 lx、光暗比 12 h:12 h 条件下培养。

1.2 实验设计

实验所用重金属镉为 CdSO₄·3H₂O。根据预实验结果和文献数据^[16]设置了 6 个镉浓度水平,分别为 0、0.5、1、3、5、7 mg·L⁻¹,每个浓度设置 3 个平行。将生长至对数期的藻细胞 4000 r·min⁻¹ 离心 10 min,收获后接种至含有不同镉浓度的培养液中,接种密度为 3×10⁴ 个·mL⁻¹。从接种后第 2 d 开始,隔天定时取样测定,共培养 20 d。

1.3 藻细胞生长的测定

参考 Cai 等^[17]的方法进行测定:取对数生长期的藻细胞,稀释不同的倍数,然后用分光光度计分别测定不同稀释倍数下藻液的吸光值,并在显微镜下对藻细胞进行计数,绘制吸光值和藻细胞密度间的标准曲线。

每天定时取样,用分光光度计在 450 nm 下测定吸光值,利用标准曲线计算藻细胞密度。

1.4 色素提取及含量的测定

色素的提取采用二甲基亚砜法^[18]。取破碎后的藻液,加入二甲基亚砜,于 65℃ 下黑暗放置 1 h,取出后放至室温,离心 15 min 取上清液。然后利用分光光度计测定 750 nm 下的吸光值,确保测定值小于 0.01。然后测量 665、649、480 nm 处的吸光值(A_{665} 、 A_{649} 和 A_{480}),利用 Wellburn^[19]提出的公式计算叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素的含量。

$$C_a = 12.19A_{665} - 3.45A_{649}$$

$$C_b = 21.99A_{649} - 4.53A_{665}$$

$$C_{x+c} = (1000A_{480} - 2.14C_a - 70.16C_b) / 220$$

式中: C_a 为叶绿素 a 的量; C_b 为叶绿素 b 的量; C_{x+c} 为总类胡萝卜素的量。

1.5 过氧化氢含量的测定

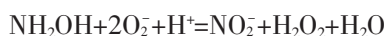
过氧化氢的测定采用四氯化钛法^[20]。四氯化钛能和过氧化氢反应产生橙红色,在 410 nm 处有最大吸光值。取破碎后的藻液,加入 50 mmol·L⁻¹ pH 为 6.0 的磷酸缓冲液,6000 r·min⁻¹ 离心 15 min,取上清液 3 mL,加入 0.1% 四氯化钛和 20% 硫酸的混合液(1:1),混匀后再离心 15 min,取上清液,用分光光度计在 410 nm 波长下测定吸光值。

过氧化氢的含量通过绘制的标准曲线确定。

1.6 超氧化物阴离子含量的测定

参照高俊凤^[21]的 α-萘胺显色法测定。NO₂⁻可以和盐酸羟胺反应,产生的物质可以和 α-萘胺发生显色反应,呈紫红色,在 530 nm 处有最大吸光值。

利用标准曲线可以得出相应的 NO₂⁻ 浓度,再根据下列反应方程式换算出超氧化物阴离子自由基的浓度:



1.7 可溶性蛋白含量的测定

采用 Bradford^[22]的考马斯亮蓝 G-250 法测定。在提取的含有可溶性蛋白溶液中加入考马斯亮蓝,放置 2 min 后于 1 h 内在 595 nm 处比色测定,以牛血清白蛋白(BSA)为标准蛋白制作标准曲线,通过该曲线得到可溶性蛋白含量。

1.8 数据处理与分析

所有的处理设置三个重复,所有数据均以平均数±标准差(Mean±SD)表示,利用 SPSS 17 统计软件对实验结果进行单因素方差分析(ANOVA),并用 LSD 法对组间差异进行比较,以 $P \leq 0.05$ 作为差异显著水平。

2 结果与分析

2.1 镉对四尾栅藻生长的影响

不同浓度的镉对四尾栅藻生长的影响见表 1。在培养的第 2 d,镉对四尾栅藻生长的影响不显著($P > 0.05$);培养第 4 d,3 mg·L⁻¹ 镉开始出现抑制作用;第 10 d,1 mg·L⁻¹ 镉开始出现抑制作用;第 12 d,0.5 mg·L⁻¹ 镉开始出现抑制作用,且随着镉浓度的上升,抑制作用增强。在高浓度镉离子(3~7 mg·L⁻¹)作用下,四尾栅藻的生长受到较强抑制,即高浓度镉对四尾栅藻有较强的毒性,可以强烈抑制四尾栅藻的生长。虽然 1 mg·L⁻¹ 的镉对其有抑制作用,但

表 1 不同镉浓度下四尾栅藻的细胞密度($\times 10^5 \cdot \text{mL}^{-1}$)
Table 1 Cell density of *S. quadricauda* under various Cd^{2+} concentrations($\times 10^5 \cdot \text{mL}^{-1}$)

镉浓度 Cd concentration	培养时间/d									
	2 d	4 d	6 d	8 d	10 d	12 d	14 d	16 d	18 d	20 d
0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	1.23±0.402 4a	4.11±0.785 4a	8.55±0.612 4a	9.91±0.504 1a	12.71±0.696 9a	15.03±0.773 6a	23.37±1.333 0a	35.99±0.392 0a	41.74±4.490 8a	52.11±3.950 7a
0.5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.97±0.504 1a	3.24±0.588 5a	7.84±0.313 6ab	10.19±0.848 1a	11.84±0.627 3a	13.39±0.999 0b	16.55±1.585 7b	18.69±1.394 6b	17.80±1.833 8b	30.32±3.760 6b
1 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.86±0.565 4a	4.16±0.271 6a	6.98±0.282 7b	9.07±0.045 3a	8.03±0.567 2b	7.84±0.235 2c	9.57±0.683 6c	9.05±1.070 3c	9.31±0.394 7c	15.48±0.370 5c
3 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.76±0.510 2a	0.81±0.598 9b	1.70±0.163 2c	2.69±0.163 2b	1.08±0.479 1c	0.63±0.207 5d	2.41±0.431 8d	2.51±0.543 2d	2.43±0.489 7d	5.28±0.386 8d
5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.34±0.386 8a	0.79±0.641 8b	1.28±0.119 8c	2.28±0.078 4b	1.68±0.479 1c	1.05±0.275 4d	2.49±0.504 1d	2.15±0.522 1d	1.96±0.543 2d	3.87±1.131 7d
7 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.63±0.271 6a	0.45±0.039 3b	1.15±0.252 0c	1.94±0.163 2b	1.73±0.565 4c	1.15±0.275 4d	2.25±0.402 4d	2.07±0.296 9d	1.91±0.316 9d	3.40±0.773 6d
F Value	1.354	30.892	345.156	290.861	262.284	418.704	264.606	844.191	180.273	213.731
P Value	0.308	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

注:不同小写字母表示在不同金属浓度处理间差异显著($P \leq 0.05$)。
Note: Different lowercase letters within a column indicate significant differences between Cd treatments($P \leq 0.05$).

四尾栅藻还可以生长,即可以耐受 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的镉。

2.2 镉对四尾栅藻色素含量的影响

不同浓度的镉对四尾栅藻色素含量的影响见图 1。以培养第 18 d 取样分析为例,不同浓度的镉对叶绿素 a 的含量均有显著影响($P \leq 0.05$),随着镉浓度的上升,叶绿素 a 的含量减少。与对照组相比,镉浓度为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时叶绿素 a 的含量降低了 59.93%,镉浓度为 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时其含量减幅高达 81.38%。不同浓度的镉对叶绿素 b 的含量也有显著影响($P \leq 0.05$),但与叶绿素 a 相比所受的影响较小,与对照组相比,镉浓度为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时其含量降低了 29.03%,镉浓度为 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时降低了 53.56%。随着镉浓度的上升,类胡萝卜素的含量也有所减少,不同浓度的镉对类胡萝卜素含量的影响显著($P \leq 0.05$)。与对照组相比,镉浓度

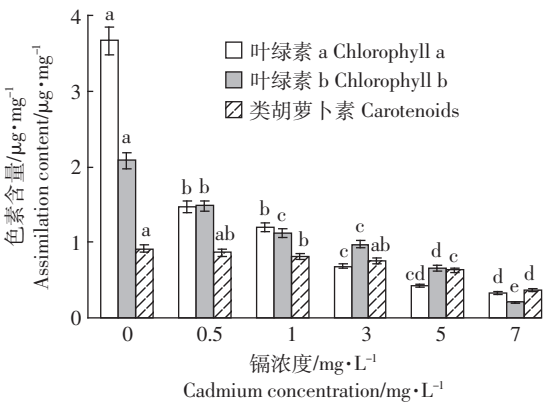
为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时类胡萝卜素的含量降低了 30.79%,镉浓度为 $7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时降低了 60.17%。

2.3 镉对四尾栅藻可溶性蛋白含量的影响

在培养第 18 d 时,四尾栅藻可溶性蛋白的变化见图 2。在较低镉浓度范围内($0 \sim 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),随着镉浓度的上升,可溶性蛋白的含量逐渐增大,镉浓度上升到 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,可溶性蛋白含量达到最大,之后随着镉浓度的上升其含量逐渐减小,即在高浓度的镉溶液中,可溶性蛋白的产生受到抑制,且随着镉浓度的上升抑制作用逐渐增强。在镉浓度为 $3, 5, 7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,可溶性蛋白含量分别为对照组的 91.95%、46.1%、34.54%。

2.4 镉对四尾栅藻过氧化氢和超氧化物阴离子含量的影响

在不同浓度的镉溶液中培养 18 d,过氧化氢和超氧化物阴离子含量的变化见图 3。在一定浓度范围内($0 \sim 3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),镉对过氧化氢含量的影响不显著($P >$



图中不同小写字母表示各处理间差异显著($P \leq 0.05$)。下同
Different lowercase letters indicate significant difference($P \leq 0.05$) between different treatments. The same below

图 1 培养 18 d 四尾栅藻的各种色素的含量($n=3$)
Figure 1 Effect of Cd^{2+} concentrations on pigments of *S. quadricauda* on 18 days($n=3$)

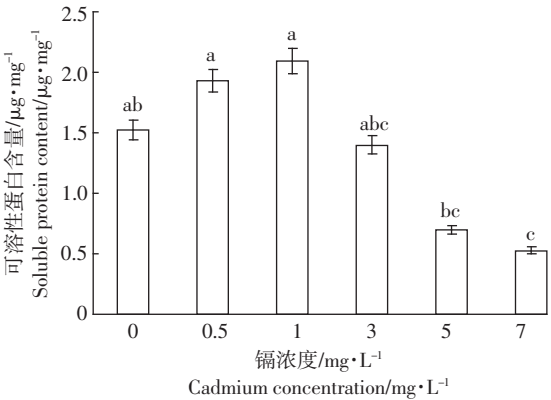


图 2 培养 18 d 四尾栅藻的可溶性蛋白的含量($n=3$)
Figure 2 Effect of Cd^{2+} concentrations on soluble protein of *S. quadricauda* on 18 days($n=3$)

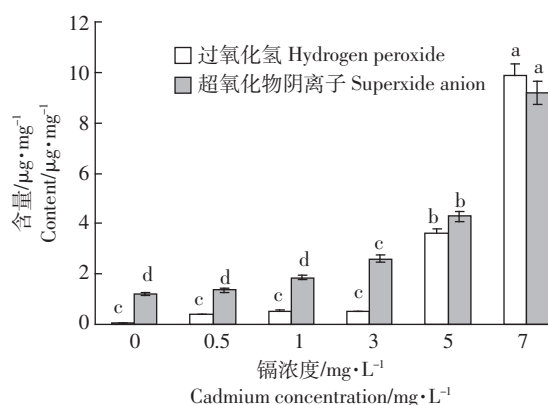


图3 培养18 d 四尾栅藻的过氧化氢和超氧化物阴离子的含量($n=3$)

Figure 3 Effects of Cd^{2+} concentrations on hydrogen peroxide and superoxide anion of *S. quadricauda* on 18 days ($n=3$)

0.05)。当镉浓度升至 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,与对照组相比,过氧化氢含量增大了约 48 倍;在镉浓度为 $7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,过氧化氢含量与对照组相比增大了约 131 倍。超氧化物阴离子的变化趋势与过氧化氢的变化趋势相似,随着镉浓度的上升,超氧化物阴离子的含量逐渐增多,低浓度的镉($0 \sim 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)对超氧化物阴离子含量的影响不显著($P>0.05$)。然而在镉浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,超氧化物阴离子含量开始明显增大,在镉浓度为 $7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,与对照组相比增大了约 8 倍。过量的过氧化氢可以抑制植物体内多种生理生化反应,最终影响植物体内代谢^[23],而过量的超氧化物阴离子可以对细胞结构和功能产生破坏^[24],因而高浓度镉下过氧化氢和超氧化物阴离子含量的显著增加说明高浓度镉对四尾栅藻有较强的毒性。

3 讨论

镉离子是目前水体重金属污染的主要元素之一。镉具有较强的生物毒性,主要表现在干扰细胞的各种代谢过程,特别是能量代谢、膜运输和蛋白质合成,并可能直接或间接地干扰 DNA 的遗传控制和修复机制^[25]。从镉对四尾栅藻生长影响的研究中可以看到,高浓度的重金属镉($3 \sim 7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)胁迫对四尾栅藻的生长产生显著的抑制作用($P \leq 0.05$)。叶绿素含量是描述藻类生长的重要指标,叶绿素含量降低表明环境对其生长有阻碍作用,反之则有促进作用^[26]。在本研究中,各种色素含量均降低,表明镉对四尾栅藻的生长代谢活动产生了抑制作用。Jozef 等^[24]研究指出四尾栅藻在铜胁迫下叶绿素 a 的含量减少,有学者研究镉对螺旋藻(*Spirulina platensis*)^[16]、普通小球藻(*Chlorella*

vulgaris)和湛江等鞭金藻(*Dicrateria zhanjiangensis*)的生长^[27]以及轮藻(*Chara fragilis*)叶绿素含量^[28]的影响发现,经过镉处理其生长均受到抑制,叶绿素 a 含量均降低。本实验结果与已有的研究结果一致。

可溶性蛋白含量是衡量植物是否发生重金属胁迫的重要指标之一。在本研究中,可溶性蛋白含量在低浓度镉胁迫下升高,在镉浓度为 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时可溶性蛋白的含量最高。随着镉浓度的上升,可溶性蛋白的含量降低。有研究表明,可溶性蛋白与细胞内多种代谢过程有关,重金属胁迫能诱导相关胁迫蛋白基因的表达,从而降低重金属的毒性,这是植物对环境胁迫的一种防卫机制^[29];也有研究认为很可能是植物通过可溶蛋白含量的提高而抵抗镉毒害,例如镉能诱导产生镉结合蛋白,从而降低镉的毒性。细胞渗透浓度和功能蛋白的数量也会因可溶性蛋白含量的提高而增加,有助于维持细胞正常代谢,但高浓度镉对蛋白质的合成起破坏作用^[30]。徐勤松等^[31]在研究镉、铜和锌胁迫下黑藻(*Hydrilla verticillata*)活性氧的产生及抗氧化酶活性的变化中发现,镉和锌胁迫下可溶性蛋白含量先增后减,在铜胁迫下可溶性蛋白含量则一直减少。Piovár 等^[2]就铜对四尾栅藻影响的研究也表明,可溶性蛋白含量虽然在低浓度下有上升的趋势,但总体还是减少的。有学者认为这是由于铜的毒性比镉和锌更强以及各金属对黑藻毒害的浓度效应不同^[30]。

过氧化氢是活性氧重要的代表之一,在正常情况下,植物体内过氧化氢的产生和清除过程基本保持一种精细的平衡状态。这样既保证了植物体内过氧化氢具有一定的生理功能,同时也将其对植物的伤害效应降到最低^[23]。许多生物和非生物胁迫均能导致植物产生过氧化氢,通过逆境下植物体内过氧化氢含量的变化,可以了解逆境环境对植物的毒害作用。而进入生物体内的一些分子氧,可经单电子还原成超氧化物阴离子,其在逆境条件下还原的几率更大。测定逆境条件下植物组织中超氧化物阴离子自由基的含量,可以间接了解组织细胞受损状况和抗性强弱^[20]。本研究中,过氧化氢和超氧化物阴离子含量都随着镉浓度的上升而增加,在低浓度镉溶液中,过氧化氢和超氧化物阴离子含量均较少,而过氧化氢含量在 $5, 7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的镉浓度下、超氧化物阴离子含量在 $7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的镉浓度下都显著增大,可见高浓度的重金属镉对四尾栅藻有较强的毒性,而四尾栅藻可以耐受低浓度的镉。Piovár 等^[2]研究显示四尾栅藻在铜影响下,过氧化氢和超氧化物阴离子的含量随着铜含量的增大而增大;

李建宏等^[32]研究显示椭圆小球藻在镉影响下,超氧化物阴离子含量随镉浓度的上升而增大;田丹等^[27]研究显示普通小球藻和湛江等鞭金藻在镉影响下,过氧化氢含量都随着镉含量的上升而增大。本实验结果与已知的研究结果一致。

4 结论

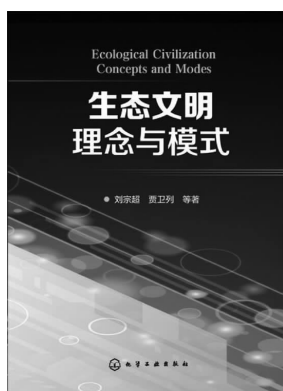
虽然重金属镉对四尾栅藻有一定的毒害作用,但在低浓度的镉($0\sim 1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)中,四尾栅藻可以产生抵抗镉毒性的一些物质(如可溶性蛋白),且低浓度镉对色素、过氧化氢、超氧化物阴离子含量的影响较小,四尾栅藻可以正常生长;四尾栅藻对低浓度重金属镉具有良好的耐受性,可以耐受浓度为 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的镉。

参考文献:

- [1] 田程. 藻类荧光对重金属毒性响应规律的研究[D]. 保定:河北科技大学, 2010.
TIAN Cheng. Study on the discipline of algal fluorescence response to heavy metal toxicity[D]. Baoding: Hebei University of Science and Technology, 2010.
- [2] Piovar J, Stavrou E, Kadukova J, et al. Influence of long-term exposure to copper on the lichen holobiont *Trebouxia erici* and the free-living alga *Scenedesmus quadricauda*[J]. *Plant Growth Regul*, 2011, 63(1): 81–88.
- [3] Magdalena T, Barbara P. Difference of Zn and Pb resistance of two ecotypes of the microalgae *Eustigmatos* sp. inhibiting metal loaded calamine mine spoils[J]. *J Appl Phycol*, 2013, 25(1): 277–284.
- [4] 刘静, 赵海涛, 盛海君, 等. Mn^{2+} 对四尾栅藻生长及 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 吸收的影响[J]. 水生态学杂志, 2010, 3(2): 32–37.
LIU Jing, ZHAO Hai-tao, SHENG Hai-jun, et al. Effects of Mn^{2+} on growth on *Scenedesmus quadricauda* and uptake of Ca^{2+} and Mn^{2+} [J]. *Journal of Hydroecology*, 2010, 3(2): 32–37.
- [5] Jozef K, Borivoj K, Frantisek S. Comparison of methyl jasmonate and cadmium effect on selected physiological parameters in *Scenedesmus quadricauda* (chlorophyta, chlorophyceae)[J]. *Phycological Society of America*, 2011, 47(5), 1044–1049.
- [6] Gratao P, Polle A, Lea P. Making the life of heavy metal stressed plants a little easier[J]. *Functional Plant Biol*, 2006, 32(6): 481–494.
- [7] Siedlecka A, Krupa Z. Interaction between cadmium and iron and its effects on photosynthetic capacity of primary leaves of *Phaseolus vulgaris* [J]. *Plant Physiol Biochem*, 1996, 34(6): 833–841.
- [8] 代惠萍. 灰杨幼苗对镉的耐性及解毒生理机制研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
DAI Hui-ping. Unraveling the mechanisms of cadmium tolerance and detoxification in *Populus×Canescens*[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012.
- [9] Foyer C, Noctor G. Oxygen processing in photosynthesis: Regulation and signalling[J]. *New Phytol*, 2000, 146(3): 359–388.
- [10] Fernandez-García N, Martí M C, Jimenez A, et al. Sub-cellular distribution of glutathione in an arabidopsis mutant (vtc1) deficient in ascorbate[J]. *J Plant Physiol*, 2009, 166(18): 2004–2012.
- [11] Foyer C, Noctor G. Oxidant and antioxidant signalling in plants: A re-evaluation of the concept of oxidative stress in a physiological context [J]. *Plant Cell Environ*, 2005, 28(8): 1056–1071.
- [12] Kuźniak E, Skłodowska M. Fungal pathogen-induced changes in the antioxidant systems of leaf peroxisomes from infected tomato plants[J]. *Planta*, 2005, 222(1): 192–200.
- [13] Compere P, Komarek J. Proposal to conserve *Scenedesmus quadricauda* (Turpin) Brebisson with conserved type under Art. 69.3 (Algae)[J]. *Taxon*, 1990, 39(3): 530–531.
- [14] Awasthi M, Rai L C. Interactions between zinc and cadmium uptake by free and immobilized cells of *Scenedesmus quadricauda* (Turp.) Breb [J]. *Acta Hydrochim Hydrobiol*, 2006, 34(1–2): 20–26.
- [15] Fargašová A. Interactive effect of manganese, molybdenum, nickel, copper (I) and copper (II), and vanadium on the freshwater alga *Scenedesmus quadricauda*[J]. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2001, 67(5): 688–695.
- [16] 刘慧, 张宇宏, 张少斌, 等. Cd^{2+} 胁迫对螺旋藻生长、光谱特性及藻胆蛋白质量浓度的影响[J]. 生态环境, 2007, 16(3): 767–770.
LIU Hui, ZHANG Yu-hong, ZHANG Shao-bin, et al. Effects of Cd^{2+} on the growth, spectroscopic properties and phycobiliprotein content of *Spirulina platensis* [J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(3): 767–770.
- [17] Cai Z P, Huang W W, Duan S S. Iron concentration-induced changes in growth and biochemical compositions of marine diatom *Phaeodactylum tricornutum* (Bacillariophyceae) [J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(4): 1327–1333.
- [18] Jozef K, Martin B. Changes of phenolic metabolism and oxidative status in nitrogen-deficient matricaria chamomilla plants[J]. *Plant Soil*, 2007, 297(1–2): 255–265.
- [19] Wellburn A R. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution[J]. *J Plant Physiol*, 1994, 144(3): 307–313.
- [20] Jozef K, Borivoj K, Jana K, et al. Physiology of matricaria chamomilla exposed to nickel excess[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, 72(2): 603–609.
- [21] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 221–223.
GAO Jun-feng. Plant physiology experiment guidance[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 221–223.
- [22] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantity of protein dye binding[J]. *Anal Biochem*, 1976, 72(1–2): 248–254.
- [23] 宋喜贵, 余小平. 植物体内过氧化氢的产生及其生理作用[J]. 连云港师范高等专科学校学报, 2010, 4(12): 99–103.
SONG Xi-gui, SHE Xiao-ping. The generation and the role of hydrogen peroxide in plant [J]. *Journal of Lianyungang Teachers College*, 2010, 4(12): 99–103.
- [24] 李琛. 藻类在含重金属废水处理中的应用[J]. 电镀与精饰, 2011, 33(2): 19–23.

- LI Chen. The application of algae in treatment of waste water containing heavy metal ions[J]. *Plating and Finishing*, 2011, 33(2):19-23.
- [25] Jozef K, Boživoj K, Josef H, et al. Effect of copper and salicylic acid on phenolic metabolites and free amino acids in *Scenedesmus quadricauda* (Chlorophyceae)[J]. *Plant Science*, 2010, 178(3):307-311.
- [26] Rui C, Angela S, Richard C R, et al. The effect of cadmium on antioxidant responses and the susceptibility to oxidative stress in the hydrothermal vent mussel *bathymodiolus azoricus*[J]. *Marine Biology*, 2006, 148(4):817-825.
- [27] 田丹, 赵文, 王媛, 等. 镉胁迫对两种海洋微藻生长和抗氧化系统的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2010, 25(5):417-421.
TIAN Dan, ZHAO Wen, WANG Yuan, et al. Effects of Cd stress on growth and antioxidative system in two marine microalgae[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2010, 25(5):417-421.
- [28] 张小兰, 施国新, 徐楠, 等. Hg^{2+} 、 Cd^{2+} 对轮藻部分生理生化指标的影响[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2002, 25(1):38-43.
ZHANG Xiao-lan, SHI Guo-xin, XU Nan, et al. Effects of mercury and cadmium on some of physiological indicators of *Chara*[J]. *Journal of Nanjing Normal University*, 2002, 25(1):38-43.
- [29] 方学智. 锌对镉胁迫下小白菜生长与抗氧化系统的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
FANG Xue-zhi. Effects of different concentration zinc on *Brassica chinensis* L. growth and antioxidative system under cadmium stress[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.
- [30] 许秋瑾, 金相灿, 王兴民, 等. 不同浓度铵态氮对镉胁迫轮叶黑藻生长及抗氧化酶系统的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(2):420-424.
XU Qiu-jin, JIN Xiang-can, WANG Xing-min, et al. Effects of different concentration ammonium-N on *Hydrilla verticillata* antioxidant enzyme under Cd stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(2):420-424.
- [31] 徐勤松, 施国新, 王学, 等. 镉、铜和锌胁迫下黑藻活性氧的产生及抗氧化酶活性的变化研究[J]. 水生生物学报, 2006, 30(1):107-112.
XU Qin-song, SHI Guo-xin, WANG Xue, et al. Generation of active oxygen and change of antioxidant enzyme activity in *Hydrilla verticillata* under Cd, Cu and Zn stress[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, 30(1):107-112.
- [32] 李建宏, 浩云涛, 翁永萍. Cd^{2+} 胁迫条件下椭圆小球藻的生理应答[J]. 水生生物学报, 2004, 28(6):659-663.
LI Jian-hong, HAO Yun-tao, WENG Yong-ping. Physical responses to Cd^{2+} stress in *Chlorella ellipsoidea*[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2004, 28(6):659-663.

新书推荐



生态文明理念与模式

刘宗超、贾卫列 等著

本书分十二篇对生态文明理论和生态文明建设的实践进行了阐述。开篇系统介绍了生态文明的基本理论,在后十一篇中分别就当代生态文明相关的重大问题,先从理论上进行阐述,然后分别用两个在生态文明建设实践中取得成功的案例,说明生态文明建设对建设美丽中国、实现中华民族永续发展的重要意义。可供从事生态文明建设和环境保护工作的科研人员和管理人员参考,也供高等院校相关专业师生参阅。

※书号:9787122227034

※定价:68.0 元

※开本:16

※出版日期:2015 年 3 月

如需更多图书信息,请登录 www.cip.com.cn

服务电话:010-64518888,64518800(销售中心)

网上购书可登录化学工业出版社天猫旗舰店:<http://hxgycbs.tmall.com>

邮购地址:(100011)北京市东城区青年湖南街 13 号 化学工业出版社

如要出版新著,请与编辑联系,联系电话:010-64519525。