

纳米硫化镉量子点对斜生栅藻的毒性研究

王 蓉, 林溢琦, 孙相振, 钟 秋, 耿 辉, 熊 丽*

(湖北省遗传调控与整合生物学重点实验室, 华中师范大学生命科学学院, 武汉 430079)

摘 要:采用 96 h 急性毒性实验的方法, 研究了新型纳米材料硫化镉量子点(CdS)对斜生栅藻的毒性效应。结果表明, 随着量子点浓度的增大, 其对斜生栅藻生长的抑制作用也在增大, 并在浓度为 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时达到了显著抑制作用。通过光学显微镜观察发现, 经过量子点处理之后的斜生栅藻细胞形态出现了变化, 并且随着处理浓度的增大, 藻细胞颜色变浅的程度也增大, 这说明硫化镉量子点可能对藻细胞色素的合成存在阻碍作用。在处理 96 h 后, 硫化镉量子点对藻细胞光合色素含量的影响和藻密度的影响是一致的, 各浓度组 SOD(超氧化物歧化酶)含量相比于对照组均出现了显著变化, 而 MDA(丙二醛)含量则是在浓度为 $0.2, 0.4, 0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时与对照组相比变化较小, 在浓度为 $0.8, 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时出现较显著变化, 并且 SOD 和 MDA 含量在浓度为 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时呈明显负相关关系, 这说明在各组均发生了不同程度的脂质过氧化反应。

关键词:量子点硫化镉; 斜生栅藻; 光合色素; 超氧化物歧化酶; 丙二醛

中图分类号: X503.23

文献标志码: A

文章编号: 1672-2043(2013)03-0524-06

doi:10.11654/jaes.2013.03.018

Effect of Quantum Dot Cadmium Sulfide on *Scenedesmus obliquus*

WANG Rong, LIN Yi-qi, SUN Xiang-zhen, ZHONG Qiu, GENG Hui, XIONG Li*

(Hubei Key Laboratory of Genetic Regulation and Integrative Biology, College of Life Sciences, Central China Normal University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Nanotechnology engineering is rapidly growing with promises of substantial benefits. However, worries have been raised that their properties making them so attractive are thought to have potential health or environmental hazards. This study was designed to assess the acute toxicity of quantum dot cadmium sulfide(CdS QDs) nanomaterial on aquatic ecosystem. It is widely used in light chemical batteries, energy storage device, photoluminescence, electroluminescence, sensors, infrared window material and light catalysis. *Scenedesmus obliquus* was exposed to different CdS QDs concentrations($0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) and algal growth was daily assayed while shape and color of cells, photosynthesis pigments, free malondialdehyde(MDA) and superoxide dismutase(SOD) content were assayed after 96 h exposure. The concentration of $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ caused a significant algal growth inhibition. The optical microscopy images showed cells' tendency to turn pallor when CdS QDs concentration is increased, indicating that it might inhibit the synthesis of chlorophylls whose content varied with cell density. The MDA and SOD contents were opposite, indicating that varying degrees of lipid peroxidation occurred in the cell membrane. This study contributes to the assessment of toxicological effect of quantum dot cadmium sulfide on aquatic ecosystem.

Keywords: quantum dot cadmium sulfide; *Scenedesmus obliquus*; photosynthesis pigments; SOD; MDA

量子点(Quantum dot)是一种准零维(Quasi-zero-dimensional)的纳米材料, 由少量的原子所构成, 又被称为半导体纳米微晶体, 是一种由 II-VI 族或 III-V

族元素组成的、稳定的、溶于水的、尺寸在 2~20 nm 之间的纳米晶粒^[1]。由于量子点具有独特的光学、电子、化学和生物功能性质, 被广泛应用于从能源到医学、生物医学和生物分析成像的各个领域^[2]。纳米硫化镉(CdS QDs)是一种常用的量子点, 有独特的光电化学性能, 广泛应用于光化学电池和储能器件, 在光致发光、电致发光、传感器、红外窗口材料、光催化等许多领域有着广泛的应用^[3]。随着硫化镉量子点在生

收稿日期: 2012-09-11

基金项目: 国家大学生创新性试验计划项目; 国家自然科学基金(30771429.31071653); 教育部留学归国人员科研基金

作者简介: 王 蓉(1990—), 女, 湖南常德人, 在读本科生。

* 通信作者: 熊 丽 E-mail: xiongliy@mail.ccnu.edu.cn

物医学等研究及生产中的广泛应用,以硫化镉量子点为原料的产品可能随着产品的使用、丢弃使其释放、渗入或流入土壤和水体等介质中,与此密切相关的药物毒性问题以及对人类环境可能产生的污染问题都日渐引起研究者的高度关注。目前对量子点的毒性尚未进行充分的检验,因此,评价量子点的生物安全性已成为21世纪毒理学的新课题^[4]。

藻类是水生生态系统的初级生产者,其种类多样性和初级生产量直接影响水生态系统的结构和功能,因而成为监测评价水环境质量的重要指标^[5]。斜生栅藻(*Scenedesmus obliquus*)是一种常见的浮游藻类,对毒物敏感、易获得、个体小、繁殖快,在较短时间内即可得到化学物质对其许多世代及种群水平的影响评价,因而成为检测评价水环境质量的一种常用的、重要的测试生物^[6]。

本实验通过不同浓度硫化镉量子点对斜生栅藻细胞密度和形态、光合色素含量、SOD和MDA含量的影响进行研究,以期对硫化镉量子点对斜生栅藻的毒性和生物安全性研究提供依据。

1 材料和方法

1.1 实验材料

斜生栅藻(*S. obliquus*)由中国科学院武汉水生生物研究所藻种库提供(No.FACHB39),并经室内扩大培养用于实验。斜生栅藻的培养基为HB-4培养基^[7],所有试剂均为分析纯。

硫化镉量子点母液制备:采用乳化液膜法合成硫化镉量子点^[8]。将溶于无水乙醇的硫化镉量子点样品取出,自然风干。称取粉末状硫化镉量子点0.1 g,用蒸馏水溶解,使用前用超声波振荡溶解30 min,获得分散均匀的5 mg·L⁻¹母液,4℃下储存备用。

1.2 实验方法

1.2.1 驯化培养

将斜生栅藻在无菌条件下转移至HB-4培养液中,于光照培养箱中驯化培养1周,至对数生长期进一步扩大培养。培养条件为:温度(25±0.5)℃,pH 7~8;明暗周期比12 h:12 h,光强3000 lx,静置培养,每日定时人工摇动3次^[9]。

1.2.2 纳米硫化镉量子点对斜生栅藻生长的影响

将处于对数生长期的斜生栅藻接种于灭菌的HB-4人工培养液中,起始藻密度均为1.1×10⁶ cells·mL⁻¹,实验设置6个硫化镉量子点浓度梯度(0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mg·L⁻¹),实验处理前将母液置于超声

仪中10 min使溶液稳定、均匀。每个浓度设3个平行,采用容积为100 mL的灭菌锥形瓶进行分装,每瓶中藻液的体积为50 mL。每隔24 h用血球计数板测定藻细胞密度(cells·mL⁻¹)^[10]。

1.2.3 光合色素的测定

培养96 h后,取20 mL藻液于离心机(Eppendorf 5415R)中5000 r·min⁻¹,4℃下离心10 min,收集藻细胞。取5 mL 80%丙酮制成细胞悬液,转移到10 mL试管中,用封口膜密封,黑暗条件下抽提24 h后,充分混匀,吸取1.2 mL于微量离心管中,8500 r·min⁻¹离心15 min,取上清液于96孔板中,以80%丙酮为空白对照,用酶标仪(BIO-TEC)测定OD₆₆₃、OD₆₄₅、OD₄₅₀值。光合色素含量计算公式如下^[11]:

$$C-a=12.21 \times OD_{663} - 2.81 \times OD_{645}$$

$$C-b=20.13 \times OD_{645} - 5.03 \times OD_{663}$$

$$C-k=(1000 \times OD_{450} - 3.27 \times C-a - 104 \times C-b)/229$$

式中:C-a为叶绿素a;C-b为叶绿素b;C-k为类胡萝卜素。单位均为μg·mL⁻¹。

以80%的丙酮作为空白对照,测定300~800 nm波长范围内叶绿素的连续吸收光谱。

1.2.4 粗酶液的提取

取100 mL藻液于冷冻离心机在4℃、5000 r·min⁻¹下离心15 min,收集藻细胞,用磷酸缓冲溶液(0.1 mol·L⁻¹,pH 7.8)润洗藻细胞3次,每组中加入预冷的磷酸缓冲溶液1.2 mL(0.1 mol·L⁻¹,pH 7.8)和少量的石英砂进行冰浴研磨,将匀浆液在4℃下8500 r·min⁻¹离心15 min,取上清液并记下总体积,冷冻保存备用^[10]。

1.2.5 超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定

采用Beauchamp^[12]建立的Bewley^[13]改良的氮蓝四唑(NBT)光化学还原反应法。酶活力单位定义参见Bewley等^[13]。蛋白质含量用考马斯亮蓝法测定^[14],以牛血清蛋白做标准曲线。

1.2.6 丙二醛(MDA)含量的测定

参照Heath^[15]和林植芳等^[16]的方法,采用硫代巴比妥酸(TBA)法测定MDA的含量。

1.3 实验数据处理

实验数据处理采用Origin 6.0统计分析软件,进行t检测和差异显著性分析。图中的*和**分别表示在P<0.05和P<0.01时差异显著和极显著。

2 结果与分析

2.1 硫化镉量子点对斜生栅藻生长的影响

图1显示不同浓度量子点对斜生栅藻的生长影

响。由图1可以看出,对照和 $0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 实验组的细胞呈现S型生长曲线,而剩余4个实验组的细胞生长趋势则是在72 h时达到峰值后出现了明显的减少现象。24 h时,相比于对照,高浓度组(0.6 、 0.8 、 $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)已经开始对藻细胞的生长表现出明显的抑制作用,并且抑制作用随着浓度增大而增大。72 h时, 0.4 、 0.6 、 0.8 、 $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 实验组的细胞数达到生长的峰值;至96 h时,上述几组的细胞数出现了大幅度减少的现象,与对照组相比分别下降了45.5%、72.1%、79.4%和83.6%,低浓度组($0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的细胞数相对于空白对照组减少了16.4%。从图中可以看出,量子点对斜生栅藻生长的抑制作用随着量子点浓度的增大而增大。

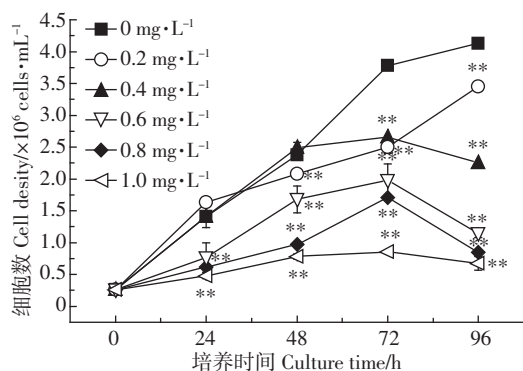


图1 CdS QDs对斜生栅藻生长的影响

Figure 1 Effect of CdS QDs nanoparticles on growth of *S. obliquus*

2.2 硫化镉量子点对斜生栅藻光合色素含量的影响

图2表示用不同浓度硫化镉量子点对斜生栅藻处理96 h后,对光合色素含量产生的影响。从图中可以看出随着量子点浓度的增大,其抑制藻类光合色素合成的作用也增大。在96 h测定叶绿素a的含量,各实验组从低浓度到高浓度其叶绿素a的含量相比于空白对照分别减少了30.56%、46.77%、56.57%、70.75%、87.18%。综上可知三种光合色素中,硫化镉量子点对叶绿素a含量的影响是最大的。

图3表示硫化镉量子点对斜生栅藻处理96 h后吸收光谱的影响。由图可见,各浓度组的吸收光谱谱带相似。在蓝光区430 nm处和红光区663 nm处均出现了明显的吸收峰,其分别为叶绿素a、b的特征吸收峰。可见不同染毒浓度组明显影响了吸收峰值的大小,其结果和藻细胞的种群动态变化趋势、光合色素含量的变化是一致的。可以推测,不同浓度的硫化镉量子点可能通过影响藻细胞的生长数量,进而影响各

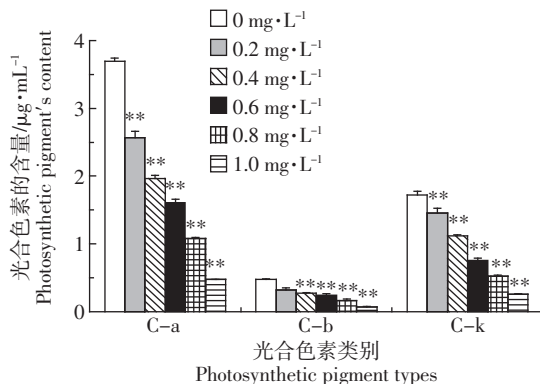


图2 CdS QDs对斜生栅藻光合色素含量的影响

Figure 2 Effects of CdS QDs nanoparticles on the photosynthetic pigment content of *S. obliquus*

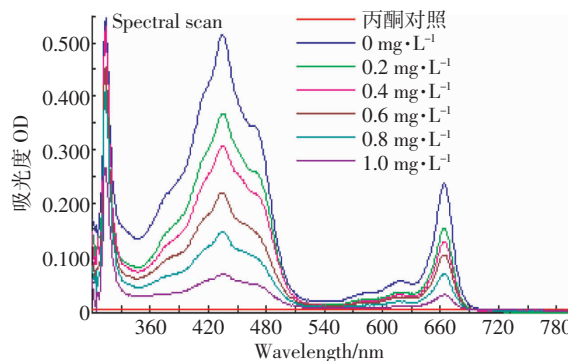


图3 CdS QDs对斜生栅藻吸收光谱的影响

Figure 3 Effects of CdS QDs nanoparticles on the absorption spectrum of *S. obliquus*

浓度组光合色素的含量。

2.3 硫化镉量子点对斜生栅藻SOD含量的影响

图4表示处理96 h后,硫化镉量子点对斜生栅藻SOD含量的影响。由图可以看出,随着暴露浓度的增大,SOD含量呈现出波动变化。与对照组相比,当暴露浓度为 $0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,SOD含量增加74.68%;暴露浓度为 $0.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,SOD含量下降38.29%;当暴露浓度为 $0.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,SOD增加25.06%;在高浓度组(0.8 、 $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)处理下,SOD含量随浓度的增大而降低,两组分别降低18.64%、69.42%。

2.4 硫化镉量子点对斜生栅藻MDA含量的影响

图5表示处理96 h后,硫化镉量子点对斜生栅藻MDA含量的影响。由图可以看出,在较低暴露浓度(0.2 、 0.4 、 $0.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)下,MDA含量变化不大。与对照组相比,在暴露浓度为 $0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (低浓度)时,MDA含量下降9.16%;在暴露浓度为 $0.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,MDA上升3.63%;在 $0.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (高浓度)时,MDA下降4.58%;在暴露浓度为 $0.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,MDA降低

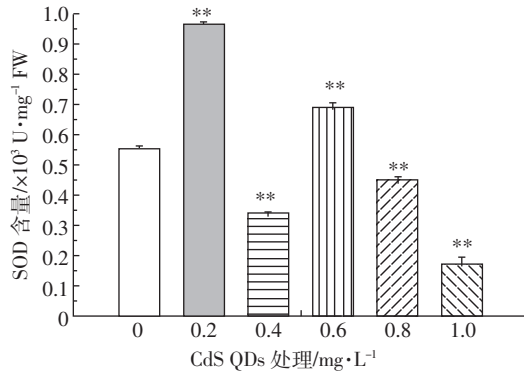


图 4 不同浓度 CdS QDs 对斜生栅藻 SOD 含量的影响

Figure 4 Effects of different CdS QDs nanoparticles on the SOD activities of *S.obliquus*

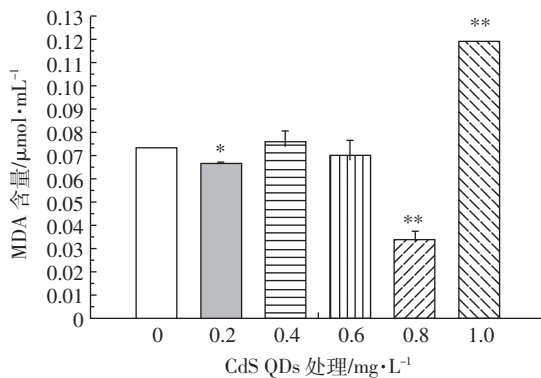


图 5 不同浓度 CdS QDs 对斜生栅藻 MDA 含量的影响

Figure 5 Effects of different CdS QDs nanoparticles on the MDA activities of *S.obliquus*

53.86%; 1.0 mg·L⁻¹ 时, MDA 升高 62.60%。

2.5 硫化镉量子点对斜生栅藻细胞形态的影响

图 6 为处理 96 h 后,在光学显微镜下以 40 倍物镜拍摄到细胞形态的变化。正常条件下生长的斜生栅藻细胞呈纺锤形,两端尖细^[17]。实验过程中每日定时人工摇动 3 次,摇动时间每次 2 min,使细胞呈单细胞状态。与对照组(图 6a)相比,到浓度为 0.6 mg·L⁻¹ 时视野下细胞数目明显减少(图 6b),而且在同一浓度下的其他视野中,经仔细观察,发现出现藻形态的变化,变化出现于两端边缘,细胞整体趋向于圆形。通过观察发现,随暴露浓度升高,细胞颜色变浅、数目急剧减少,如图 6c。

3 讨论

经过 96 h 的急性毒性实验,硫化镉量子点对斜生栅藻生长的抑制作用随着浓度的增大而增大。有研究表明,关于硫化镉量子点的毒性机制研究主要集中在重金属元 Cd²⁺ 的释放、氧化过程中活性氧的产生以及

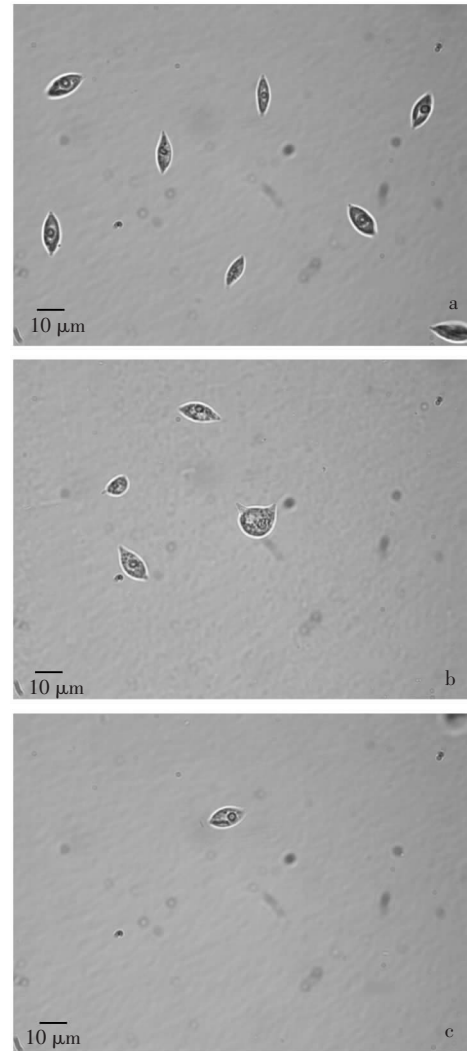


图 6 光镜拍照培养 96 h 后的斜生栅藻细胞形态

Figure 6 Light microscopy images of *S. obliquus* cells after 96 h exposure

活性氧自由基介导的氧化应激等方面的探讨^[18]。其对细胞的毒性作用机制可概括为以下两点:(1)量子点诱导产生活性氧,进而对细胞产生氧化损伤作用^[19];(2)纳米量子点释放内核重金属离子,通过释放的重金属离子对细胞产生毒性作用^[20]。因此,可推测本实验中 Cd²⁺ 的释放和活性氧的氧化损伤作用是硫化镉量子点造成细胞毒性的主要原因。

在本实验的生长抑制测试中,不同浓度暴露组细胞数量均在 96 h 时出现了明显的下降。由此可见,硫化镉量子点对藻细胞生长具有明显的抑制作用,且抑制作用随暴露浓度的增大而增大,在高浓度(0.8、1.0 mg·L⁻¹)时抑制作用极显著($P<0.01$)。有研究表明,较低暴露浓度时硫化镉量子点的细胞毒性机制可能是活性氧的氧化损伤,而在较高暴露浓度时,可能 Cd²⁺

的释放占主导地位^[1]。因此可推测,本实验中低浓度组的生长抑制主要由氧化损伤引起,随着暴露浓度升高, Cd^{2+} 的释放浓度增大,对细胞的毒性作用增强。

光合色素是反映植物利用光照能力的重要指标,在植物的生理、生长过程中起着至关重要的作用,因此可作为反映植物应对环境胁迫状况的重要指标。本实验中,随着硫化镉量子点暴露浓度增大,藻细胞具有颜色变浅、光合色素含量减少的趋势,这与其对藻细胞生长抑制趋势一致。这表明,在低浓度硫化镉量子点暴露下,细胞中活性氧积累,影响了叶绿体正常生理功能;而在中、高浓度硫化镉量子点暴露下, Cd^{2+} 的释放增多对细胞产生毒性作用,破坏了叶绿体结构,使叶绿素合成受阻^[1]。由于细胞无法正常进行光合作用,进一步导致藻类生长受阻、细胞颜色变浅^[21]。

在藻细胞的正常代谢过程中可产生各种活性氧代谢物,如超氧阴离子、单线态氧、过氧化氢和羟自由基等^[22]。细胞内的SOD能清除过多活性氧代谢物,维持细胞内氧自由基处于正常水平,在减轻脂质过氧化作用和膜损伤方面有重要作用^[23]。MDA是生物膜中多种不饱和脂肪酸在氧自由基的攻击下形成的脂质过氧化最终产物之一,MDA能使膜的通透性增强,其浓度可以表示脂质过氧化强度和膜系统伤害程度。本实验中,MDA的含量在0.2、0.4、0.6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 暴露浓度下与对照组相比变化不大,说明细胞膜的脂质过氧化程度不明显,细胞膜没有受到明显损伤。在0.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 暴露浓度下,SOD含量提高可能是由于硫化镉量子点诱导 $\text{O}_2\cdot$ 等活性氧自由基产生,增大了氧自由基的产生量^[22], $\text{O}_2\cdot$ 含量一定程度的增加能诱导SOD含量的上升,以保持细胞清除自由基的正常功能^[24]。在0.4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 暴露浓度下,硫化镉量子点的毒性影响开始超出机体的耐受能力,SOD受到损伤,含量下降,这是机体中毒反应的前兆^[24],这与硫化镉量子点对藻细胞生长的抑制作用一致。在暴露浓度为0.6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下,SOD含量再次升高可能是由于 Cd^{2+} 的释放造成的。研究表明,无表面涂层的量子点材料易发生表面氧化,分解释放出 Cd^{2+} , Cd^{2+} 对体外细胞的增殖、存活能力均能产生直接作用^[23]。本实验采用的硫化镉量子点未经表面修饰,能够氧化解离,释放 Cd^{2+} ,而 Cd^{2+} 浓度增加作为逆境胁迫条件,诱导藻细胞产生应激效应,使SOD含量升高。在0.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度处理下,SOD和MDA含量均显著降低,可能是由于藻细胞的吞饮作用使硫化镉量子点进入细胞。有研究表明,量子点能够直接对细胞器结构造成损伤^[25],因此推测细胞内的线粒体和叶

绿体可能受到损伤,使细胞内产生的自由基减少,MDA的含量随之下降,同时SOD合成受阻,含量也随之下降。在高浓度1.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下,SOD含量明显下降可能是由于硫化镉量子点诱导产生大量活性氧自由基,使细胞长时间维持较高的 $\text{O}_2\cdot$ 水平,造成细胞内活性物质包括酶损伤,毒性影响超出机体耐受能力,SOD受到损伤,含量持续下降^[24]。同时,细胞脂质过氧化程度加剧,导致MDA的含量大幅升高。

4 结论

硫化镉量子点对斜生栅藻细胞具有细胞毒性作用,且毒性效应与硫化镉量子点的暴露浓度有关。低暴露浓度致毒机制主要是由活性氧引起的氧化损伤,氧化损伤作用导致藻细胞出现生长抑制、光合色素含量下降。当暴露浓度为0.6、0.8、1.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,由于 Cd^{2+} 的释放程度加大,在原有氧化损伤的基础上,加剧了硫化镉量子点对细胞的毒性效应,导致藻细胞出现显著的生长抑制;SOD和MDA含量出现的相应变化表明高浓度的硫化镉量子点对斜生栅藻的细胞膜造成了损伤。

硫化镉量子点对斜生栅藻细胞致毒的主要原因可能是 Cd^{2+} 的释放和活性氧的氧化损伤作用,其具体作用机制还有待进一步研究。硫化镉量子点作为一种新型的广泛使用的材料,其对水环境的潜在危害不容忽视,相关部门在制定硫化镉量子点安全标准时应当慎重考虑。

参考文献:

- [1] 余强,李坤刚,文兴,等. 纳米硫化镉量子点细胞毒性作用机制[J]. 生态毒理学报, 2009, 4(4): 488-493.
YU Qiang, LI Kun-gang, WEN Xing, et al. The Cytotoxicity mechanism of unmodified cadmium sulfide quantum dots[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2009, 4(4): 488-493.
- [2] LI Jiahua, ZHANG Yue, XIAO Qi, et al. Mitochondria as target of quantum dots toxicity[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 194: 440-444.
- [3] 汤国虎. 纳米硫化镉的最新研究进展[J]. 中国陶瓷, 2009, 45(11): 10-13.
TANG Guo-hu. Present situation and progress of study of CDS nanoparticle[J]. *China Ceramics*, 2009, 45(11): 10-13.
- [4] 何振宇,周培疆. 量子点在生物医学检验中的应用及毒性研究进展[J]. 中国卫生检验杂志, 2009, 19(9): 3016.
HE Zhen-yu, ZHOU Pei-jiang. The application and toxicity research progress of quantum dots in the medical inspection[J]. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*, 2009, 19(12): 3016.
- [5] 徐晓宇,魏颖,唐红枫,等. 甲胺磷、氯菊酯及其混合物对斜生栅

- 藻的毒性[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2): 718-722.
- XU Xiao-yu, WEI Ying, TANG Hong-feng, et al. Combined toxicity effect of methamidophos and cypermethrin to *Scenedesmus obliquus* [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2): 718-722.
- [6] 胡芹芹, 熊 丽, 田裴秀子, 等. 邻苯二甲酸二丁酯(DBP)对斜生栅藻的制毒效应研究[J]. 生态毒理学报, 2008, 3(1): 87-92.
- HU Qin-qin, XIONG Li, TIANPEI Xiu-zi, et al. Toxic effects of dibutyl phthalate (DBP) on *Scenedesmus obliquus* [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2008, 3(1): 87-92.
- [7] 黎尚豪, 朱 惠, 夏宜峥. 单细胞绿藻的大量培养试验[J]. 水生生物学集刊, 1959, 4: 463-472.
- LI Shang-hao, ZHU Hui, XIA Yi-zheng. Single cell green algae batch-culture [J]. *Acta Hydrobiologia Sinica*, 1959, 4: 463-472.
- [8] 柏杉山, 李清钊, 刘克明, 等. 硫化镉量子点与常规硫化镉对小鼠遗传毒性的比较研究[J]. 生态毒理学报, 2008, 3(1): 60-63.
- BAI Shan-shan, LI Qing-zhao, LIU Ke-ming, et al. Comparative study of genotoxicity in mice exposed to cadmium sulfide quantum dots and normal cadmium sulfide [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2008, 3(1): 60-63.
- [9] 王 莉, 唐丽雅, 魏晨曦, 等. 邻苯二甲酸二(乙基)己酯对斜生栅藻的生态毒性作用[J]. 生态毒理学报, 2009, 4(3): 452-456.
- WANG Li, TANG Li-ya, WEI Chen-xi, et al. Ecological toxicity of di-(2-ethylhexyl) phthalate on *Scenedesmus obliquus* [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2009, 4(3): 452-456.
- [10] 何 桢, 胡晓静, 牟 文, 等. 三聚氰胺对斜生栅藻的毒性研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(8): 1455-1459.
- HE Zhen, HU Xiao-jing, MU Wen, et al. Studies on the toxicity of melamine to *Scenedesmus obliquus* Kütz [J], 2010, 29(8): 1455-1459.
- [11] 李合生, 孙 群, 赵世杰. 植物生理生化试验原理和技术[M]. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- LI He-sheng, SUN Qun, ZHAO Shi-jie. Manual book of botanical physiology and biochemistry [M]. The second edition. Beijing: Higher Education Press, 2003.
- [12] Beauchamp C, Fridovich I. Superoxide dismutase improved assays and an assay applicable to acrylamide gel [J]. *Anal Biochem*, 1971, 44: 246-278.
- [13] Bewley T D. Physiological aspects of desiccation tolerance [J]. *Ann Rev Plant Physiol*, 1979, 30: 195-238.
- [14] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding [J]. *Anal Biochemistry*, 1976, 72: 248-254.
- [15] Heath R L, Packer L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation [J]. *Arch Biochem Biophys*, 1981, 125: 189-198.
- [16] 林植芳, 李双顺, 林桂珠, 等. 水稻叶片的衰老与超氧化物歧化酶活性及脂质过氧化作用的关系[J]. 植物学报, 1984, 26: 605-615.
- LIN Zhi-fang, LI Shuang-shun, LIN Gui-zhu, et al. Superoxide dismutase activity and lipid peroxidation in relation to senescence of rice on leaves [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 1984, 26: 605-615.
- [17] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- ZHANG Zong-she, HUANG Xiang-fei. Research methods of fresh water plankton [M]. Beijing: Science Press, 1991.
- [18] 李鸿程, 周群芳, 刘 伟, 等. 量子点毒性效应的研究进展[J]. 中国科学杂志. 2008, 38(5): 396-403.
- LI Hong-cheng, ZHOU Qun-fang, LIU Wei, et al. The study and progress of quantum dots [J]. *Science in China*, 2008, 38(5): 396-403.
- [19] Finkel T, Holbrook N J. Oxidants, oxidative stress and the biology of ageing [J]. *Nature*, 2000, 408(6809): 239-247.
- [20] 叶寒青, 杨祥良, 周井炎, 等. 环境污染物镉毒性作用机理研究进展 [J]. 广东微量元素科学, 2001, 8: 9-12.
- YE Han-qing, YANG Xiang-liang, ZHOU Jing-yan, et al. The research progress of toxicity mechanism of environmental pollutant of cadmium [J]. *Trace Elements Science*, 2001, 8: 9-12.
- [21] 金星龙, 张 宁, 李 晓, 等. 四种纳米氧化物对小球藻的毒性效应研究 [J]. 天津理工大学学报, 2011, 27(2): 58-62.
- JIN Xing-long, ZHANG Ning, LI Xiao, et al. Toxic effects of four nanoscale oxides on *Chlorella vulgaris* [J]. *Journal of Tianjin University of Technology*, 2011, 27(2): 58-62.
- [22] 刘 娜, 赵淑锐, 林 彤, 等. 碲化镉量子点诱导氧自由基产生的检测 [J]. 生态毒理学报, 2012, 7(1): 99-106.
- LIU Na, ZHAO Shu-rui, LIN Tong, et al. Detection of reactive oxygen species induced by cadmium tellurium quantum dots [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2012, 7(1): 99-106.
- [23] 梁丽君, 张静姝, 郭昌胜, 等. 硫化镉量子点对人胚肝细胞 L-02 的毒性研究 [J]. 生态毒理学报, 2010, 5(4): 525-530.
- LIANG Li-jun, ZHANG Jing-shu, GUO Chang-sheng, et al. Cadmium sulfide quantum dots induce cytotoxicity in human embryo liver cells [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2010, 5(4): 525-530.
- [24] 侯东颖, 冯 佳, 谢树莲. 纳米二氧化钛胁迫对普生轮藻的毒性效应 [J]. 环境科学学报, 2012, 32(6): 1481-1486.
- HOU Dong-ying, FENG Jia, XIE Shu-lian. Toxic effects of nanoparticle TiO₂ stress on *Chara vulgaris* L. [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 32(6): 1481-1486.
- [25] 宋尔群, 魏 宏, 宋 杨. 量子点细胞毒性效应研究进展 [J]. 环境化学, 2011, 30(3): 586-587.
- SONG Er-qun, WEI Hong, SONG Yang. Progress in quantum dots cytotoxicity research [J]. *Environmental Chemistry*, 2011, 30(3): 586-587.