

稀土元素钕对铜绿微囊藻生长和生理特性的影响

王应军, 伍 钧, 金航标, 余 游

(四川农业大学资源环境学院, 四川 雅安 625014)

摘 要:通过模拟培养试验,研究了不同 Nd^{3+} 初始浓度条件下铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)的生长及生理变化。结果表明,相对 BG11 培养基(Nd^{3+} 初始浓度为 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),低初始 Nd^{3+} 浓度(0.01 、 0.05 、 0.1 、 0.5 、 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)条件下,随着 Nd^{3+} 浓度的增加,藻细胞中叶绿素 a 含量、可溶性蛋白含量和过氧化氢酶(CAT)活性均呈增加趋势,促进了铜绿微囊藻生长;在 Nd^{3+} 初始浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,藻细胞丙二醛(MDA)含量急剧增加,CAT 活性下降,藻细胞清除活性氧(ROS)能力下降,抗氧化防御体系被破坏,膜脂过氧化严重,严重抑制藻细胞生长,在初始 Nd^{3+} 浓度 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 胁迫下,铜绿微囊藻无法生长。藻细胞超微结构表明,过量的 Nd^{3+} 破坏了藻细胞内的类囊体结构,胞内脂质体含量增加,细胞膜变粗糙甚至变形破碎,对藻细胞造成不可逆伤害。

关键词:铜绿微囊藻;钕;生长特性;超微结构

中图分类号:X172 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)07-1261-07

Effects of Neodymium on the Growth and Physiological Characteristics of *Microcystis aeruginosa*

WANG Ying-jun, WU Jun, JIN Hang-biao, YU You

(College of Environmental Science and Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China)

Abstract: To investigate the effect of neodymium on *Microcystis aeruginosa*, the growth and physiological changes had been studied under different initial Nd^{3+} concentration by lab cultured experiments. The results showed that, compared with the control (Nd^{3+} -free), the content of chlorophyll a (Chl-a), soluble protein and the enzymatic activity of catalase (CAT) increased when initial Nd^{3+} concentration changed from $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ to $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and the growth of *Microcystis aeruginosa* was stimulated; However, under $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ initial Nd^{3+} concentration, the content of malon-di-aldehyde (MDA) increased immediately but the enzymatic activity of catalase (CAT) reduced, which resulted in the decline of the *Microcystis aeruginosa*'s ability to eliminate the active oxygen and the ruin of antioxidant defense system, and the growth of *Microcystis aeruginosa* slowed down. Finally, while the initial Nd^{3+} concentration was $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, *Microcystis aeruginosa* couldn't grow anymore. The ultrastructure of *Microcystis aeruginosa* showed that excessive Nd^{3+} could lead to the decrease of thylakoid and the increase of fat particle, and the cell membrane became rough and even broken, which caused irreversible damage to algal cells.

Keywords: *Microcystis aeruginosa*; neodymium; growth; ultrastructure

在我国许多地区,由于湖泊和水库等重要淡水水体富营养化严重,经常爆发大面积的“水华”。由富营养化引起的淡水资源减少和藻类毒素污染事故已成为一个全球性问题^[1-3]。铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)是最常见的水华蓝藻,普遍存在于世界各地富营养化水体中^[4],是众多水华蓝藻中的优势种。因

此,研究铜绿微囊藻的生长特性对控制“水华”现象的发生有重要意义。

金属钕(Nd)是重要的轻稀土金属之一。由于其独特的物理和化学性质,近十多年来在稀土永磁材料、高级稀土合金和高科技材料等方面的应用日益广泛,且用量激增,前景十分广阔。我国从20世纪90年代以来,在金属钕的生产原料供给、品种与产量、应用及市场等方面均取得了很大成就,目前我国已成为世界金属钕的生产和供应大国,金属钕的生产能力及产量均居全球首位^[5-6]。

随着稀土的大规模应用,稀土元素及其化合物大量进入环境,特别是通过工业废水排放和农田地表径

收稿日期:2010-03-02

基金项目:四川省教育厅重点基金资助项目(2006017);四川省学术和技术带头人培养基金资助项目;四川农业大学引进人才科技资助项目(01402000)

作者简介:王应军(1972—),男,副教授,主要从事环境水利、环境生物工程等方面的研究。E-mail:wwyyjj1972@163.com

通讯作者:伍 钧 E-mail:wuj1962@163.com

流等进入水体的稀土不断增加,由此对水生生态环境的影响不容忽视^[7]。但在国内目前还未见钕对水生生态环境影响方面的研究报道,作者首次就钕对铜绿微囊藻生长和生理特性的影响进行研究,目的在于探究稀土元素钕对“水华”爆发的贡献以及为藻类增殖机理的研究提供试验依据。

1 材料与方法

1.1 试验藻种及培养

试验所用铜绿微囊藻藻种 FACHB912 购自中国科学院武汉水生生物研究所。用 BG11 培养基^[8]培养待用。

称一定量的分析纯 Nd_2O_3 ,加适量蒸馏水和浓盐酸,加热溶解并使多余盐酸完全挥发后,用蒸馏水稀释配成 $1\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (以 Nd^{3+} 计)的钕储备液。

取 9 个 1 L 的锥形瓶,先分别向其中加入 500 mL BG11 培养液,于 $121\text{ }^\circ\text{C}$ 高压蒸汽灭菌 30 min。待其自然冷却后,向锥形瓶中加入经高压灭菌后的钕储备液,使各锥形瓶中钕的浓度分别为 0、0.01、0.05、0.1、0.5、1、5、10、50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。然后加入已预先培养 7 d 的 FACHB912,使各个锥形瓶中藻细胞浓度数量级达到 $10^5\text{ cell}\cdot\text{mL}^{-1}$ 水平,静置培养(温度 $25\text{ }^\circ\text{C}$,光照强度 $2\,000\sim 2\,500\text{ lx}$,光暗比为 12 h:12 h,每日定时振摇数次,并每隔 24 h 将各锥形瓶变换位置)。

1.2 藻细胞数测定和比增长率(μ)的计算

利用血球计数板显微计数。以第 3 d 的藻细胞数作为对数生长期的基数,按下式计算试验过程中每日相对于该基数的比增长率。

$$\mu = \ln(X_i/X_3)/(i-3)$$

式中: μ 为比增长率, d^{-1} ; X_i 为第 i 天的藻细胞数($i=4\sim 16$); X_3 为第 3 d 的藻细胞数。

1.3 叶绿素 a 含量的测定

采用丙酮萃取法,在试验的第 11 d 取 10 mL 藻液, $8\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 10 min,弃去上清液,加入 5 mL 10%丙酮,摇匀,在 $4\text{ }^\circ\text{C}$ 冰箱里避光萃取 24 h。然后, $10\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 10 min 取上清液,以 90%丙酮作参比,分别在 663、750、645、630 nm 下读取吸光度,按下式计算叶绿素 a 的含量^[1]:

$$C = 11.64(A_{663} - A_{750}) - 2.16(A_{645} - A_{750}) + 0.1(A_{630} - A_{750})$$

$$\text{Chl-a}/\mu\text{g}\cdot(10^8\text{ cells})^{-1} = 10^8 CV_1/(V_2\rho)$$

式中: V_1 为提取液体积, mL; V_2 为藻液体积, mL; ρ 为藻细胞密度, $\text{cell}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。

1.4 粗酶液的提取

在试验第 11 d,取 40 mL 藻液在 $8\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 10 min,收集藻细胞,加入 2 mL 预冷的磷酸缓冲液($0.05\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ pH}7.8$)和少量石英砂进行冰浴研磨,直到镜检无完整藻细胞为止,定容至 35 mL,在 $4\text{ }^\circ\text{C}$ 下 $10\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 4 min,取上清液(粗酶液)用于 CAT 活性和 MDA 含量的测定。

1.5 过氧化氢酶(CAT)活性和可溶性蛋白含量的测定

取 1.4 节所得的粗酶液,采用参考文献[9]的方法测定 CAT 活性和可溶性蛋白的含量。

1.6 丙二醛(MDA)含量的测定

试验第 11 d,采用硫代巴比妥酸(TBA)比色法^[7]测定丙二醛的含量。吸取经离心处理后的上清液 2 mL(对照管以 2 mL 水代替),加入 2 mL 0.6%TBA 溶液(用质量分数 10%的三氯乙酸配制),混匀,用塑料薄膜封住试管口,在沸水浴中煮 15 min 后迅速再离心($10\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 10 min),取上清液测定其在 450、532、600 nm 波长下的吸光度值。MDA 含量的计算式如下:

$$C/\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1} = 6.45(A_{532} - A_{600}) - 0.56A_{450}$$

$$\text{MDA 含量}/\text{nmol}\cdot(10^8\text{ cells})^{-1} = 10^8 CV_1 M$$

式中: V_1 为酶液总量, mL; M 为 40 mL 藻液中的细胞数(cells)。

1.7 铜绿微囊藻超微结构的观察

试验第 11 d,离心收集藻细胞,用 2.5%戊二醛($0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ pH}7.2$ 的磷酸缓冲液配制)在 $4\text{ }^\circ\text{C}$ 下固定 2 h, $14\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 30 min 收集藻细胞,将样品包埋于 1.8%的琼脂糖中,再用 1%锇酸(以 $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ pH}7.2$ 的磷酸缓冲液配制)固定 2 h,梯度酒精脱水, Epon 环氧树脂 812 渗透、包埋。 $37\text{ }^\circ\text{C}$ 保温 24 h, $60\text{ }^\circ\text{C}$ 保温 48 h, LKB 超薄切片机切片,将切片经柠檬酸铅-醋酸双氧铀双重染色后,用透射电镜观察。

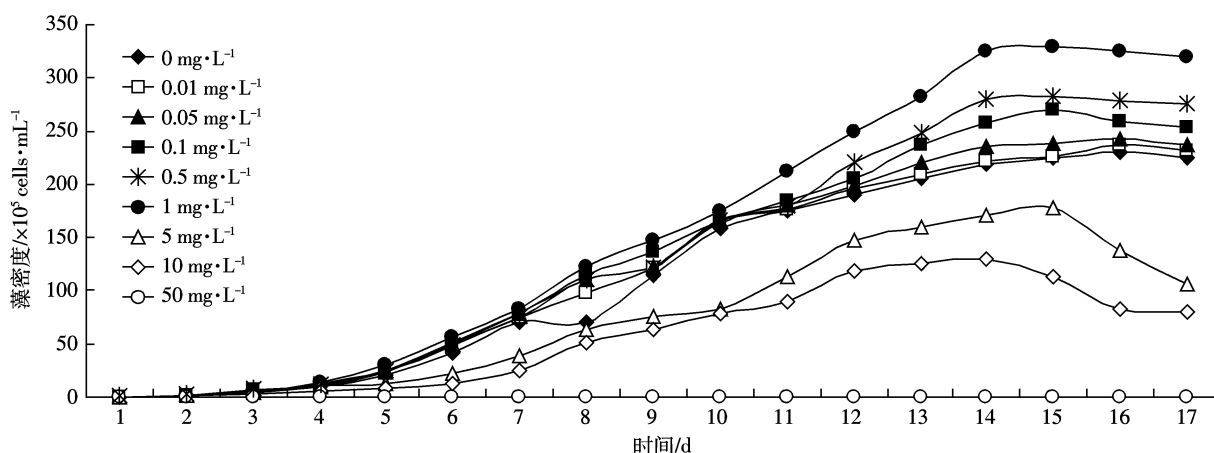
1.8 试验数据的统计和分析

对所得数据用 SAS 统计软件进行单因子方差分析,当 $P < 0.05$ 时认为各处理组数据差异显著。

2 结果与分析

2.1 Nd^{3+} 浓度对铜绿微囊藻生长的影响

结合图 1 和表 1 可知,初始 Nd^{3+} 浓度为 $0.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时能略微促进铜绿微囊藻的生长,但不显著(P 分别为 0.87 和 0.77);初始 Nd^{3+} 浓度为 0.1、0.5、1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,在培养的前 10 d,对藻细胞的生长促进不明显(P 分别为 0.72、0.79 和 0.58);但到第 11~17

图 1 不同初始 Nd^{3+} 浓度下铜绿微囊藻的生长曲线Figure 1 The growth curves of *Microcystis aeruginosa* under different initial Nd^{3+} concentrations

d, 促进效果显著 (P 分别为 0.02、0.02 和 0.001); 当初始 Nd^{3+} 浓度为 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 其藻细胞最大现存量和最大比增长率均为最大, 分别为 $330 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{mL}^{-1}$ 和 1.09 d^{-1} , 说明此浓度能最大限度地促进藻细胞生长。由图 1 知, 初始 Nd^{3+} 浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时对藻的增殖确实存在抑制作用但不显著 ($P=0.18$), 当 Nd^{3+} 浓度达到 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时其抑制效果才显著 ($P=0.03$)。相对高浓度处理组中 (Nd^{3+} 浓度为 5、 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 藻细胞进入对数期的时间比空白对照组滞后约 2 d, 且其对数生长期明显缩短。当 Nd^{3+} 初始浓度达到 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 铜绿微囊藻的生长完全被抑制。

表 1 不同初始 Nd^{3+} 浓度下铜绿微囊藻的
最大生物量和最大比增长率

Table 1 The maximum cell density and the maximum specific growth rate of *Microcystis aeruginosa* under different initial concentration of Nd^{3+}

Nd^{3+} 初始浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\mu_{\text{max}}/\text{d}^{-1}$	最大现存量/ $\times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{mL}^{-1}$
0	0.705	230
0.01	0.833	237
0.05	0.875	243
0.1	0.906	270
0.5	0.916	282
1	1.090	330
5	0.464	178
10	0.407	130

2.2 Nd^{3+} 浓度对叶绿素 a 含量的影响

图 2 表明, 在低浓度处理组 (Nd^{3+} 初始浓度为 0.01、0.05、 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 随着 Nd^{3+} 初始浓度的加大, 叶

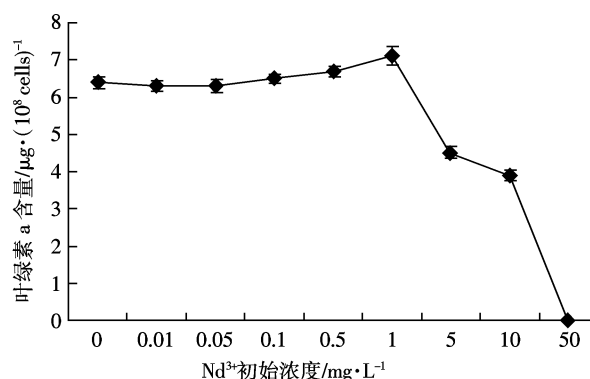


图 2 不同初始 Nd^{3+} 浓度下铜绿微囊藻叶绿素 a 含量的变化
Figure 2 Concentration changes of Chlorophyll a of *Microcystis aeruginosa* under different initial Nd^{3+} concentrations

绿素 a 的含量随之增加, 但其增加量不显著 (P 分别为 0.27、0.30 和 0.10); Nd^{3+} 浓度为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时和 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 叶绿素 a 的含量增加显著 (P 分别为 0.04 和 0.003), 增加约 10.94%; 当 Nd^{3+} 初始浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 胞内叶绿素 a 含量开始显著减少 (P 均小于 0.05)。

2.3 Nd^{3+} 浓度对可溶性蛋白含量的影响

由图 3 可知, 初始浓度为 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Nd^{3+} 能提高胞内可溶性蛋白的含量, 分别比对照组增加了 4.35%、8.69%, 其增加量不显著 (P 分别为 0.03 和 0.07); 0.1 、 0.5 、 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的初始 Nd^{3+} 浓度实验组中可溶性蛋白的增加量显著 (P 均小于 0.05), 增加量分别达到 20.86%、31.3% 和 37.39%。 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Nd^{3+} 浓度组中可溶性蛋白含量分别比对照组降低了 21.74% 和 30.43%, 也均显著 (P 均小于 0.05)。

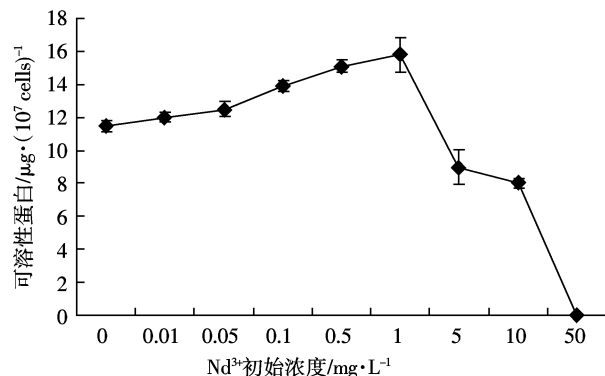
图3 不同初始Nd³⁺浓度下可溶性蛋白含量的变化

Figure 3 Concentration changes of soluble protein of *Microcystis aeruginosa* under different initial Nd³⁺ concentrations

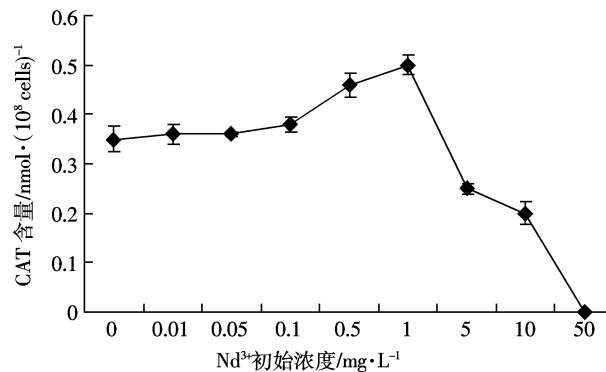
图5 不同初始Nd³⁺浓度下CAT活性的变化

Figure 5 Enzymic activity of catalase changes of *Microcystis aeruginosa* under different initial Nd³⁺ concentrations

2.4 Nd³⁺浓度对MDA含量和CAT活性的影响

植物器官衰老或在逆境条件下,往往发生膜脂过氧化作用,MDA是膜脂过氧化的最终分解产物之一,其含量可以反映植物遭受伤害的程度。从图4可以看出,在Nd³⁺胁迫下MDA含量逐步增加。初始Nd³⁺浓度为0.01、0.05 mg·L⁻¹下,其含量的增加不显著(*P*分别为0.21和0.08),分别比对照增加0.05、0.1 μg·(10⁸ cells)⁻¹;高于此浓度的初始Nd³⁺胁迫下MDA含量显著增加(*P*均低于0.05);在50 mg·L⁻¹ Nd³⁺胁迫下铜绿微囊藻全部死亡,试验组未能检测到MDA。由此说明,只要铜绿微囊藻受Nd³⁺胁迫,不管其浓度大小,细胞均会受膜脂过氧化伤害,胁迫浓度越大受到的伤害越深。

总体来看,藻细胞内CAT含量随初始Nd³⁺浓度的增大,先增加后减少(图5)。在0.01、0.05、0.1 mg·L⁻¹ Nd³⁺处理组中CAT酶的增加量不显著(*P*分别为0.36、0.09和0.08),在0.5、1 mg·L⁻¹ Nd³⁺处理组中CAT酶含量增加显著,其中CAT活性峰值均出现在

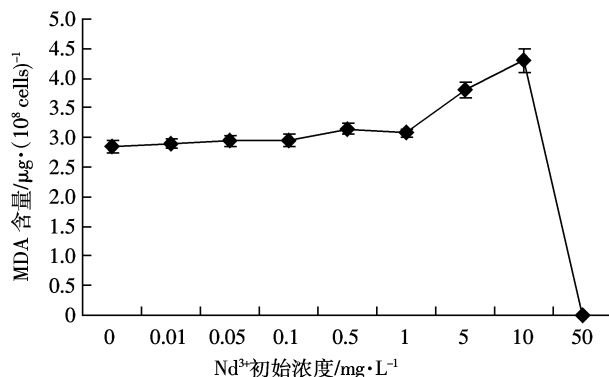
图4 不同初始Nd³⁺浓度下铜绿微囊藻MDA含量的变化

Figure 4 Concentration changes of malon-dialdehyde of *Microcystis aeruginosa* under different initial Nd³⁺ concentrations

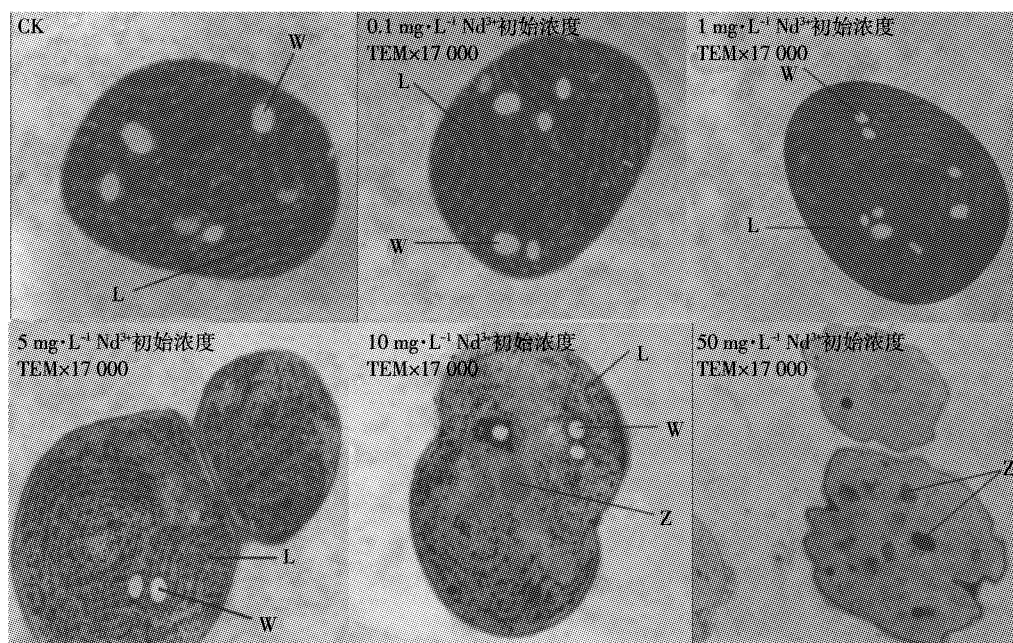
Nd³⁺浓度为1 mg·L⁻¹时。而5、10 mg·L⁻¹ Nd³⁺处理组中CAT酶含量显著减少(*P*均小于0.05)。

2.5 Nd³⁺浓度对藻细胞超微结构的影响

铜绿微囊藻属于原核生物,一般呈圆形或椭圆形,细胞内没有叶绿体、线粒体、高尔基体、中心体和内质网等完整的细胞器结构,主要含有细胞膜、伪空胞(椭圆形颗粒W)和大量横纹形状的光合作用片层即类囊体(条状体L),见图6。类囊体多分布在周边区,各种光合色素均附于其上,光合作用过程多在此进行。由图6可知,与对照组的同期细胞相比,经0.1 mg·L⁻¹ Nd³⁺处理的藻细胞微结构并无明显变化;经1 mg·L⁻¹ Nd³⁺处理的藻细胞,类囊体片层比对照组数量增多且更加清晰。5~10 mg·L⁻¹ Nd³⁺浓度组中藻细胞的类囊体结构破碎变散,且细胞膜变粗糙,有明显增厚的趋势,伪空包数量减少明显,胞内开始出现脂肪颗粒(黑色颗粒Z)。50 mg·L⁻¹ Nd³⁺浓度组中藻细胞皱缩或者破裂,胞内脂肪颗粒变多,藻体内电子密度减小,类囊体已经完全溶解。

3 讨论

研究表明^[10-12],稀土元素对动物、高等植物及单细胞藻类均存在此“低促高抑”现象,此效应的产生可能是由于稀土离子通过与细胞膜或细胞器膜结合,影响了膜上的有关酶的活性或改变了膜的通透性,进而对第二信使产生作用引起级联反应,调节细胞的信息传递系统,引起相关基因差异表达,最终导致细胞内一系列生理和生化变化而产生的^[13]。但到目前为止,稀土元素对生物生长的影响机制还没有准确的结论,一般认为,稀土元素促进藻类生长的作用有两种:一是“刺激作用”,即可能作为生物生长的必需元素起促进

图 6 不同初始 Nd^{3+} 浓度下藻细胞超微结构的变化Figure 6 Ultrastructure changes of *Microcystis aeruginosa* under different initial Nd^{3+} concentrations

作用,或增加其对营养元素的摄取而加速生长,对于这种观点有一些类似的研究;二是“兴奋效应”,即低浓度的毒物却具有促进生长的作用。

藻类依靠光合作用生长,而叶绿素 a 是所有藻类的基本光合色素,通过测定藻类叶绿素含量可掌握水体的初级生产情况,其含量的高低可作为藻细胞光合作用潜力的一种指标^[14]。叶绿素 a 含量的增加可在一定程度上促进铜绿微囊藻的增殖,藻细胞数变多同时叶绿素 a 含量亦增加。本试验结果与廖铁军等^[15]报道的相似: Nd^{3+} 的加入促进了藻体对 N 和 P 的吸收,诱发了叶绿素前体化合物的大量合成,同时还可能是叶绿素形成过程中某些酶的活化剂,在叶绿素的形成过程中起间接作用。Stobart 等^[16]认为叶绿素 a 含量的降低主要是由于 Nd^{3+} 抑制了原叶绿素酸酯还原酶的活性,同时也影响了氨基-r-酮戊酸的合成。

蛋白质是生物体内重要的生物大分子之一,它不仅是生物体构建的重要组成成分,而且作为酶类的一些蛋白质在生物体内的各种生理代谢中起重要作用。此次试验中,相对低浓度 Nd^{3+} 胁迫下可溶性蛋白含量逐步增加,其原因可能是低浓度 Nd^{3+} 促进了藻细胞叶绿素 a 的合成,提高藻体光合效率,从而为蛋白质的合成提供原料;再者 Nd^{3+} 通过某种机制将信号传递到胞内,促进 CaM 基因表达,激活了依赖于 CaM 的各种酶的活性,导致蛋白质含量上升;钕也可能通过与氨基酸中氧原子配位形成络合物,提高了蛋白质的稳定

性^[17]。但在高浓度胁迫下,藻体内活性氧自由基大量产生,这些活性氧自由基会攻击各种蛋白质上的氨基酸残基,使其金属结合位点被优先氧化,组氨酸、脯氨酸、精氨酸和赖氨酸残基是氧化作用的主要靶子,从而导致蛋白质降解^[18]。

McCord 和 Fridovich^[19]自 20 世纪 60 年代末提出生物自由基伤害学说以来,已经被广泛应用于需氧生物细胞毒害机理的研究。为了使植物体内的活性氧 (ROS) 维持在一定平衡水平,各种逆境胁迫下,植物体内能迅速启动抗氧化保护酶系统,减轻植物受到的 ROS 伤害,ROS 的产生和清除处于动态平衡。CAT 是抗氧化酶防御系统中的重要保护酶,具有清除活性氧自由基、保护膜系统、使细胞不受伤害等的作用和功能。本试验结果与姜伟作等^[20]的报道相似。在低浓度条件下,CAT 的活性不断增加,以抵抗 ROS 对藻细胞的伤害,适当浓度的 Nd^{3+} 能使藻细胞建立更高水平的活性氧代谢平衡。当初始 Nd^{3+} 浓度达到一定水平后,活性氧的产生和清除平衡状态受到破坏,活性氧自由基加剧,藻细胞受到膜脂过氧化伤害程度加深。CAT 活性的不断降低导致抗氧化防御系统功能紊乱,清除 ROS 能力减弱,引起 ROS 在藻体内过量积累,导致藻细胞膜脂过氧化加强,MDA 含量迅速增加又反过来抑制保护酶的活性和降低抗氧化物含量^[21]。结合图 4 和图 5 可知,在 Nd^{3+} 初始胁迫浓度小于 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,铜绿微囊藻能通过增加自身 CAT 酶活性来有效防止

膜脂过氧化; Nd^{3+} 初始浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 条件下,藻细胞内 CAT 酶活性显著降低 (P 均小于 0.05),藻细胞内氧自由基浓度过高导致 CAT 酶活性降低。

生物体的结构与其生理功能是紧密联系的。在低浓度 Nd^{3+} 胁迫下 ($0 \sim 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),藻细胞类囊体片层增加,光合作用加强,可能是促进藻类生长的原因之一;高浓度抑制铜绿微囊藻作用点可能是降低了抗氧化体系酶活性,使细胞内过量的活性氧得不到及时清除,过量的活性氧使细胞内发生脂质过氧化作用,使细胞的膜系统被破坏(包括细胞膜和细胞内膜),多种细胞器形态发生变化或解体,最终导致细胞死亡或破裂。这可能是高浓度 Nd^{3+} 抑制铜绿微囊藻生长的机理^[22]。

4 结论

稀土元素 Nd 进入水体后,确实会对铜绿微囊藻的生长造成一定影响。低浓度 Nd^{3+} (Nd^{3+} 初始浓度小于 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 胁迫下,铜绿微囊藻细胞内叶绿素 a 含量、可溶性蛋白含量和 CAT 活性不断增加,能抵御低浓度 Nd^{3+} 对藻细胞带来的危害,同时亦促进了藻细胞自身的生长代谢。在相对高浓度 Nd^{3+} ($5, 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 处理组中,藻细胞膜脂过氧化严重,破坏了藻细胞自身的防御平衡,MDA 含量激增,CAT 酶活性降低,抑制了铜绿微囊藻生长。当初始 Nd^{3+} 浓度达到 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,铜绿微囊藻无法生长。从藻细胞超微结构看,相对高浓度 Nd^{3+} 胁迫下,藻细胞内类囊体结构破碎变散,数量减少,细胞膜粗糙变形甚至破碎,胞内开始出现不溶性脂肪颗粒,这可能是高浓度 Nd^{3+} 抑制铜绿微囊藻生长的机理之一。在 Nd^{3+} 胁迫下,铜绿微囊藻所表现出来的“低促高抑”现象对防治水华工作有一定的指导作用,但还需更深入研究。

参考文献:

- [1] 钱芸,戴树桂,刘广良,等.硝酸镧对铜绿微囊藻生长特性的影响[J]. 中国环境科学, 2003, 23(1): 7-11.
QIAN Yun, DAI Shu-gui, LIU Guang-liang, et al. Effect of lanthanum nitrate on growth characteristics of *Microcystis aeruginosa* [J]. *China Environmental Science*, 2003, 23(1): 7-11.
- [2] Vasconcelos V M, Pereira E. Cyanobacteria diversity and toxicity in a wastewater treatment plant (Portugal) [J]. *Wat Res*, 2001, 35: 1354-1357.
- [3] Codd G A. Cyanobacterial toxins, the perception of water quality, and the prioritisation of eutrophication control [J]. *Ecological Engineering*, 2000, 16: 51-60.
- [4] 袁信芳,王宁,王海明,等.有机配体对铜胁迫下铜绿微囊藻生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1): 207-210.
YUAN Xin-fang, WANG Ning, WANG Hai-ming, et al. Effect of organic ligands on distribution of copper in *Microcystis aeruginosa* and the content of pigment [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1): 207-210.
- [5] 林河成. 金属钕材料的生产及应用 [J]. 稀土, 2002, 23(2): 73-77.
LIN He-cheng. The production and application of neodymium [J]. *Chinese Rare Earths*, 2002, 23(2): 73-77.
- [6] 张沛臣. 我国金属钕生产及市场状况分析 [J]. 稀土, 2005, 26(5): 29-32.
ZHANG Pei-chen. The production and market analysis of neodymium in China [J]. *Chinese Rare Earths*, 2005, 26(5): 29-32.
- [7] 胡勤海, 金明亮. 稀土元素在水体中的环境化学行为及其生物效应 [J]. 农业环境保护, 2000, 19(5): 274-277.
HU Qin-hai, JIN Ming-liang. The chemical behavior and biological effects of rare-earth elements in aquatic environment [J]. *Agro-Environmental Protection*, 2000, 19(5): 274-277.
- [8] Saito K, Hiroshi Ishii, Nishida F. Purification of microcystins by DEAE and C_{18} cartridge chromatography [J]. *Toxicon*, 2002, 40(1): 97-101.
- [9] 郝再彬, 苍晶, 徐仲, 等. 植物生理试验 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004.
HAO Zai-bin, CANG Jing, XU Zhong, et al. Experiments of plant physiology [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2004.
- [10] 卢振伟, 陈东, 刘颖, 等. 混合稀土对大鼠肝脏中 7 种酶的小剂量刺激作用 [J]. 应用化学, 2003, 20(1): 6-9.
LU Zhen-wei, CHEN Dong, LIU Ying, et al. The hormesis effect of rare earth elements on several enzymes in rats liver [J]. *Applied Chemistry*, 2003, 20(1): 6-9.
- [11] 曾青, 朱建国, 谢祖彬, 等. 镧对油菜抗病性相关酶活性的影响 [J]. 中国稀土学报, 2003, 21(3): 331-333.
ZENG Qing, ZHU Jian-guo, XIE Zu-bin, et al. Effect of lanthanum on disease resistance-related enzymes of rape [J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 2003, 21(3): 331-333.
- [12] 胡勤海, 叶畅, 叶兆杰. 稀土元素镧对金鱼藻生长生理及细胞叶绿素结构的影响 [J]. 环境科学学报, 1997, 17(1): 82-86.
HU Qin-hai, YE Chang, YE Zhao-jie. Effects of lanthanum on physiology and chloroplast ultrastructure of *Ceratophyllum demersum* [J]. *Journal of Environmental Science*, 1997, 17(1): 82-86.
- [13] Frust A. Hormetic effects in pharmacology: Pharmacological inversions as Prototypes for hormesis [J]. *Health Phys*, 1987, 52(5): 527-530.
- [14] 李磊, 侯文华. 荷花和睡莲种植水对铜绿微囊藻生长的抑制作用研究 [J]. 环境科学, 2007, 28(10): 2180-2185.
LI Lei, HOU Wen-hua. Inhibitory effects of liquor cultured with *Nelumbo nucifera* and *Nymphaea tetragona* on the growth of *Microcystis aeruginosa* [J]. *Environmental Science*, 2007, 28(10): 2180-2185.
- [15] 廖铁军, 黄云, 苏彬彦. 稀土对菠菜产量和品质的作用及生理效应研究 [J]. 稀土, 1992, 13(2): 62-64.
LIAO Tie-jun, HUANG Yun, SU Bin-yan. Quantity and quality effects of rare earth on spinach and its physiological effects researching [J]. *Chinese Rare Earths*, 1992, 13(2): 62-64.

- [16] 王 学, 施国新, 徐勤松, 等. 镧、铈及重金属元素铬、锌对竹叶眼子菜的毒害作用[J]. 中国稀土学报, 2004, 22(5):682–686.
WANG Xue, SHI Guo-xin, XU Qin-song, et al. Toxic effectes of lanthanum, cerium, chromium and zinc on *Potamogeton malaianus* [J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 2004, 22(5):682–686.
- [17] 杨燕生, 刘德龙, 百 娟, 等. 镧对小麦幼苗素质、蛋白及钙调素水平的影响[J]. 稀土, 1997, 18(2):61–63.
YANG Yan-sheng, LIU De-long, BAI Juan, et al. Effect of lanthanide (Ⅲ) on wheat seeding growth and its protein and calmodul in levels[J]. *Chinese Rare Earths*, 1997, 18(2):61–63.
- [18] Stadtman E R. Oxidation of free amino acids and amino acid residues in proteins by radiolysis and metal catalyzed reactions[J]. *Ann Rev Biochem*, 1993, 62(3):797–821.
- [19] McCord J M, Fridovich I. Superoxide dismutase; An enzymic function for erythrocuprein (hemocuprein)[J]. *J Biol Chem*, 1969, 244:6049–6055.
- [20] 姜照伟, 翁伯琦, 黄元仿, 等. 施用稀土元素镧对南非马唐生长及若干生理特性的影响[J]. 植物营养与肥科学, 2008, 14(4):713–720.
JIANG Zhao-wei, WENG Bo-qi, HUANG Yuan-fang, et al. Effects of applied rare earth elements lanthanum on the growth and some physiological characteristics of *Digitaria smutsii*[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(4):713–720.
- [21] 邱昌恩, 毕永红, 胡征宇. Zn^{2+} 胁迫对绿球藻生长、生理特性及细胞结构的影响[J]. 水生生物学报, 2007, 31(4):503–508.
QIU Chang-en, BI Yong-hong, HU Zheng-yu. The effects of Zn^{2+} stress on the growth, physiological characteristics and cell structure of *Chlorococcum* sp.[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2007, 31(4):503–508.
- [22] Prashar A, Hili P, Veness R G, et al. Antimicrobial action of palmarosa oil (*Cymbopogon martinii*) on *saccharomyces cerevisiae*[J]. *Phytochemistry*, 2003, 63:569–575.