

钇对铅胁迫下铜绿微囊藻抗氧化能力及藻毒素释放的影响

吴清莲, 王应军*, 杜宇, 郑颖

(四川农业大学资源环境学院, 成都 611130)

摘要:为探讨稀土钇(Y^{3+})质量浓度对铅胁迫下铜绿微囊藻(*Microcystic aeruginosa*)生理特性及藻毒素含量的影响,用不同质量浓度钇作用于 $1.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Pb^{2+} 胁迫下的铜绿微囊藻,绘制铜绿微囊藻的生长曲线并测定超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(POD)、过氧化物酶(CAT)活性、丙二醛(MDA)及藻毒素-LR(MC-LR)含量。结果表明:在铅胁迫下,低质量浓度 Y^{3+} ($0.10\sim 0.50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)改善了铅胁迫下铜绿微囊藻的生长,而高质量浓度 Y^{3+} ($1.00\sim 10.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)则加剧了对铜绿微囊藻的毒害作用;在 Y^{3+} 质量浓度升高时,藻细胞丙二醛(MDA)和溶液中藻毒素 MC-LR 含量大量增加,抗氧化酶活性均下降,藻细胞清除活性氧(ROS)能力减弱,抗氧化防御系统被破坏,膜脂过氧化严重,严重抑制藻细胞生长。在铅胁迫下,钇对铜绿微囊藻产生“低促-高抑”的 Hormesis 效应显著。

关键词:铜绿微囊藻;钇;铅胁迫;生理特性;微囊藻毒素-LR

中图分类号:Q945.78 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)06-1128-06 doi:10.11654/jaes.2013.06.007

Effects of Yttrium on Physiological Characteristics and Microcystins Release of *Microcystic aeruginosa* with Pb^{2+} Stress

WU Qing-lian, WANG Ying-jun*, DU Yu, ZHENG Ying

(College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: In order to study the effects of different yttrium (Y^{3+}) concentrations on the physiology and microcystin-LR (MC-LR), the *M. aeruginosa* FACHB912 was used in this work. The effects of different Y^{3+} concentration on *M. aeruginosa* under $1.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Pb^{2+} stress were investigated. Based on the growth curve of *M. aeruginosa*, the activity of antioxidant enzymes including SOD, POD, CAT, and the content of malondialdehyde (MDA) and microcystic toxins (MC-LR), results showed that obvious auxo-actions to the growth of *M. aeruginosa*, could be observed at relatively low concentrations of Y^{3+} ($0.10\sim 0.50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) with Pb stress. Correspondingly, the activities of SOD, POD, and CAT in *M. aeruginosa* were enhanced, and the MDA presented decrease significantly. When the higher concentrations ($1.00\sim 10.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) of Y^{3+} was employed, more severely inhibition to the growth of *M. aeruginosa* could be observed. When the concentrations were in the range of $0.50\sim 10.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, the content of MDA and MC-LR increased immediately and the activity of antioxidant enzymes was reduced, which potentially lead to the decline of the ability of eliminating the reactive oxygen species. Moreover, the antioxidant defense system was destroyed, and the growth of *M. aeruginosa* was seriously inhibited correspondingly. The typical "Hormesis" effects can be observed as the yttrium was employed on *M. aeruginosa*.

Keywords: *Microcystic aeruginosa*; yttrium; Pb^{2+} stress; physiological characteristics; microcystin-LR

我国稀土资源丰富,是世界上稀土储量最多的国家(约占总储量的 80%),也是稀土应用范围最广、应

用量最大的国家^[1]。自 20 世纪初以来,我国稀土的年产量增长率逐年提高,尤其在工业、农业、国防和医药等方面的应用极为广泛,在石化、印染、制革等行业发展最为迅速,使得稀土元素及其化合物大量进入环境,必然对水生生态系统产生潜在的影响^[2]。我国水体富营养化现象较严重,造成富营养化的主要原因是过量营养元素的输入,但也有研究表明^[3],某些微量元素

收稿日期:2012-11-20

基金项目:大学生创新性实验(01409222)

作者简介:吴清莲(1990—),女,重庆永川人,本科生,主要从事环境生态工程方面的研究。E-mail: wuqinglian1990@163.com

* 通信作者:王应军 E-mail: wwyj1972@163.com

也会造成藻类大量繁殖。

铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)是水华优势藻种,在适宜的环境条件下会爆发大面积“水华”,并产生毒性极强的微囊藻毒素,造成湖泊水环境和生态系统的严重破坏^[4]。国内外学者关于稀土对藻类影响的研究基本集中于镧、铈等轻稀土,几乎未涉及钇等重稀土,而稀土钇在地壳中的丰度为 $28.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,在所有稀土中位居第二,近年来也大量流入水体中^[5]。王应军等^[6]研究了稀土 Y^{3+} 对铜绿微囊藻生长及其抗氧化酶的影响,结果表明,低质量浓度的 Y^{3+} 对铜绿微囊藻生长表现出明显促进作用,而高质量浓度则部分或完全抑制了藻细胞的正常生长。但稀土对重金属胁迫下藻类生长产生影响的浓度范围和程度大小还鲜有报道。基于以上原因,本文以铜绿微囊藻为试验材料,从藻类生理特性和藻毒素方面来探究稀土元素对重金属胁迫下藻类生长的影响及其作用机制,以期钇对重金属胁迫下藻类的影响机制研究提供一定试验数据。

1 材料与方法

1.1 实验藻种

试验所用藻种铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)FACHB912购自中国科学院水生生物研究所藻种库。

1.2 Y^{3+} 、 Pb^{2+} 储备液配制

称取一定量的分析纯 Y_2O_3 、 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$,加热溶解并使多余的盐酸充分挥发后,用蒸馏水稀释配成 $1000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (以 Y^{3+} 、 Pb^{2+} 计)的 Y^{3+} 、 Pb^{2+} 储备液各1 L。

1.3 藻种的培养

取若干个1 L锥形瓶,分别向其中加入定量的BG11培养液,于 $121\text{ }^\circ\text{C}$ 高压蒸汽灭菌30 min,待自然冷却后,向锥形瓶中加入同样经高压灭菌的 Y^{3+} 储备液和 Pb^{2+} 储备液,使每个锥形瓶中钇的浓度分别为0、0.1、0.2、0.5、1、2、5、10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Pb^{2+} 均为 $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,并设置一组不加 Y^{3+} 和 Pb^{2+} 的纯培养基。然后加入已预先培养7 d的铜绿微囊藻,使各个锥形瓶中藻细胞浓度数量级达到 $3.5\times 10^5\text{ cells}\cdot\text{mL}^{-1}$ 水平,静置培养(温度 $25\text{ }^\circ\text{C}$,光照强度 $2000\sim 2500\text{ lx}$,光暗比12 h:12 h),每日定时摇瓶3次,并每隔24 h将各锥形瓶变换位置。

1.4 藻细胞数和比增长率 μ 的测定

采用光密度(OD)测量法^[7]。将实验第3 d的藻细胞数作为对数生长期的基数,按下式计算试验中每日藻的比增长率: $\mu=(\ln N-\ln N_0)/t$

式中: N 和 N_0 为对数期终结和开始时的藻细胞数; t 为对数期开始与终结的时间间隔。

1.5 粗酶液的提取

在实验的第12 d取40 mL藻液, $10\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心10 min,收集藻细胞。加 $0.05\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、pH7.8的磷酸缓冲液(不超过25 mL),反复冻融5次,将提取液转入比色管中,定容至25 mL,然后在 $4\text{ }^\circ\text{C}$ 下 $10\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心10 min,上清液即为粗酶液,用于超氧化物歧化酶SOD、过氧化物酶POD、过氧化氢酶CAT和丙二醛MDA的测定。

1.6 超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)和丙二醛(MDA)含量的测定

利用1.5节提取的粗酶液,采用氮蓝四唑(NBT)光化学还原法^[8]测定SOD活性,采用愈创木酚法^[9]测定POD活性,紫外吸收法^[11]测定CAT活性,采用硫代巴比妥酸(TBA)比色法^[11]测定MDA含量。

1.7 培养基中微囊藻毒素-LR(MC-LR)的测定

在试验第11 d,取10 mL藻液, $10\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心10 min,取上清液备用。MC-LR采用酶联免疫吸附法(ELISA)检测^[10],全自动酶标分析仪为Bio-Tek, EL309型。

1.8 实验数据的统计与分析

对所得数据用SPSS17.0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 Y^{3+} 对 Pb^{2+} 胁迫下铜绿微囊藻生长的影响

由图1可知,在 Pb^{2+} 胁迫下,加入 $0.1\sim 0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Y^{3+} 相对于单一 Pb^{2+} (即 $0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)作用下的铜绿微囊藻均有极为显著的促进生长作用($P<0.01$),最大比生

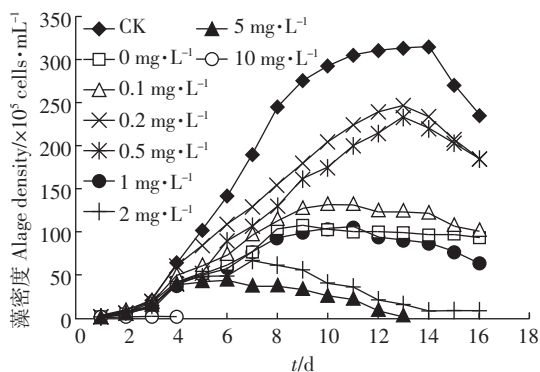


图1 Y^{3+} 对 Pb^{2+} 胁迫铜绿微囊藻生长的影响

Figure 1 Effects of Y^{3+} on the growth of *Microcystis aeruginosa* under Pb^{2+} stress

长速率分别比单一 Pb^{2+} 作用下提高了 42.50%、76.73% 和 18.79%，最大生物量分别提高了 23.23%、130.23% 和 116.28%。当 Y^{3+} 质量浓度大于 $1.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，铜绿微囊藻的生长状况比单一 Pb^{2+} 作用时更差，在第 8 d 达到最大生物量后便迅速进入衰减期。随着 Y^{3+} 浓度的增高，对铜绿微囊藻生长的抑制作用显著增强 (P 均小于 0.05)。其中 Y^{3+} 浓度提高到 $10.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时，在第 4 d 时，只观察到一些死亡藻细胞的残片，可见此时铜绿微囊藻的生长完全被抑制。因此，在生长及生理特性的分析中均不考虑此浓度配比。

2.2 Y^{3+} 对 Pb^{2+} 胁迫下铜绿微囊藻 SOD 活性的影响

图 2 显示，单一铅胁迫下铜绿微囊藻 SOD 活性在第 4~8 d 内前后波动不大 ($P>0.05$)，随后进入迅速上升阶段，第 16 d 时 SOD 活性是第 4 d 的 1.62 倍 ($P<0.05$)。0.1 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Y^{3+} 组 SOD 活性随时间的延长而急剧升高 ($P<0.05$)，其中第 8~12 d 内上升幅度最大。0.2~1

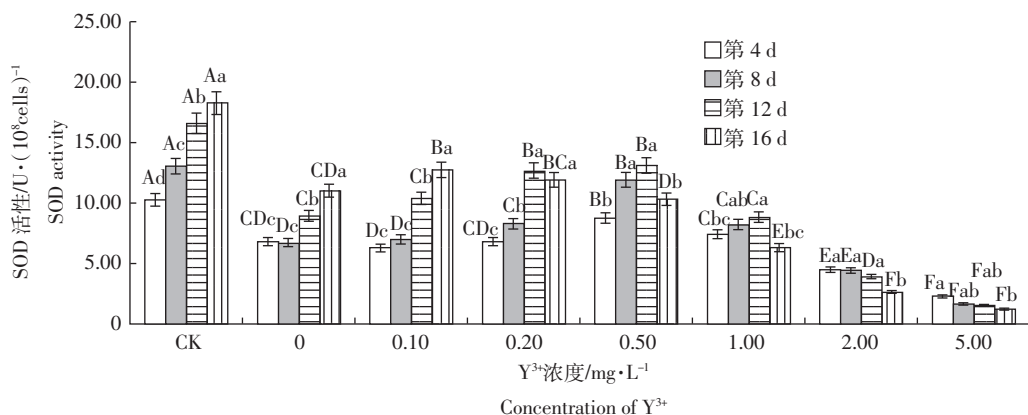
$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Y^{3+} 组 SOD 活性随时间的延长先上升而后下降，它们的最大值均出现在第 12 d。2~5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Y^{3+} 组在整个培养期间呈下降趋势。实验第 4~16 d，SOD 活性随 Y^{3+} 浓度的递增呈先升后降的趋势；实验第 4~12 d，SOD 峰值均出现在 Y^{3+} 浓度为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处；实验第 16 d 时，SOD 峰值出现在 Y^{3+} 浓度为 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2.3 Y^{3+} 对 Pb^{2+} 胁迫下铜绿微囊藻 POD 活性的影响

由图 3 可知，0.1~0.2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Y^{3+} 组 POD 活性除第 4 d 外，其余时间均显著高于单一铅胁迫 ($P<0.05$)。0.5~5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Y^{3+} 组 POD 活性随时间的推移而持续下降，其中 0.5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Y^{3+} 组 POD 活性从第 12 d 开始低于单一铅胁迫，且随时间的延长与对照的差距也越来越大。

2.4 Y^{3+} 对 Pb^{2+} 胁迫下铜绿微囊藻 CAT 活性的影响

由图 4 可知，单一铅胁迫组和 0.10~0.20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Y^{3+} 组 CAT 活性在整个培养期间呈持续上升趋势；实



数据用均值±标准偏差表示，采用 Duncan 法检验各实验组之间的差异程度。相同大写字母表示相同时间、不同实验组之间差异不显著 ($P>0.05$)；不同大写字母则代表差异显著 ($P<0.05$)。相同小写字母表示相同实验组在不同时间差异不显著 ($P>0.05$)；而不同小写字母则代表差异显著 ($P<0.05$)。下同

图 2 Y^{3+} 对 Pb^{2+} 胁迫下铜绿微囊藻超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响

Figure 2 The effect of Y^{3+} on activities of superoxide dismutase of *M. aeruginosa* under Pb^{2+} stress

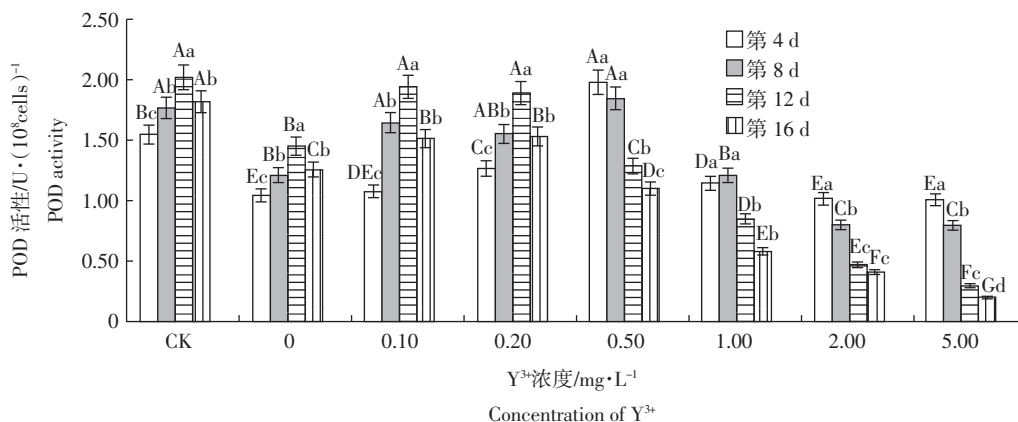


图 3 Y^{3+} 对 Pb^{2+} 胁迫下铜绿微囊藻过氧化物酶(POD)活性的影响

Figure 3 The effect of Y^{3+} on activities of peroxidase of *M. aeruginosa* under Pb^{2+} stress

验第 4 d,除 $5.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Y}^{3+}$ 组外,其余处理组和单一铅胁迫组相比 CAT 活性差异均不明显 ($P>0.05$); $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Y}^{3+}$ 组 CAT 活性随时间的推移先升后降,但变化均不显著 ($P>0.05$)。 $1\sim 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Y}^{3+}$ 组 CAT 活性在 16 d 显著低于单一铅胁迫组, $2\sim 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Y}^{3+}$ 组在 8~16 d 显著低于单一铅胁迫组 ($P<0.05$)。

2.5 Y^{3+} 对 Pb^{2+} 胁迫下铜绿微囊藻 MDA 含量的影响

由图 5 知,低浓度的 Y^{3+} ($0.1\sim 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 处理铜绿微囊藻,藻细胞 MDA 含量在整个培养阶段与单一铅胁迫组均无显著性差异 ($P>0.05$); 而高 Y^{3+} 组 ($1\sim 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 除第 4 d 外,MDA 含量则随 Y^{3+} 浓度的提高和处理时间的延长而不断上升,且在整个处理时间内均明显高于单一铅胁迫组 ($P<0.05$),其中第 16 d 时 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Y}^{3+}$ 组 MDA 含量比单一铅胁迫组提高了 73.72% ($P<0.05$)。

2.4 Y^{3+} 对 Pb^{2+} 胁迫下铜绿微囊藻 MC-LR 含量的影响

由图 6 可知, Pb^{2+} 胁迫下的铜绿微囊藻在 $1\sim 5$

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Y}^{3+}$ 作用下 MC-LR 含量极显著高于单一铅胁迫组 ($P<0.01$); Y^{3+} 浓度为 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, MC-LR 含量最低 (0.188 ± 0.02) $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 比单一铅胁迫组显著降低了 12.56% ($P<0.05$)。这可能是由于铜绿微囊藻在此 Y^{3+} 浓度下死亡细胞较少,向培养基中释放的藻毒素较少的缘故。

3 讨论

铅离子进入植物体内后,会干扰离子间原有的平衡系统并取代某些酶和蛋白质行使功能时所必需的元素,使其变性或活性降低,甚至抑制其生长。在本实验中,稀土元素对铅胁迫下的铜绿微囊藻的生长仍存在“低促高抑”效应。广泛认为此效应与酶有关^[1]。一方面稀土元素可能直接影响跟生长密切相关的酶的活性,从而影响植物或藻类光合作用强度以及对营养元素的吸收,进而影响生长;另一方面,稀土元素通过影响抗氧化酶活性来影响生物体的抗逆性,从而间接

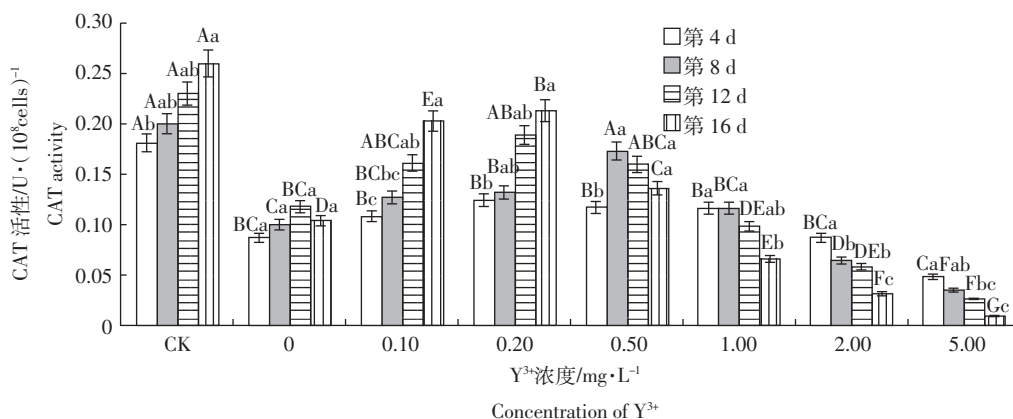


图 4 Y^{3+} 对 Pb^{2+} 胁迫下铜绿微囊藻过氧化氢酶 (CAT) 活性的影响

Figure 4 The effect of Y^{3+} on activities of catalase of *M. aeruginosa* under Pb^{2+} stress

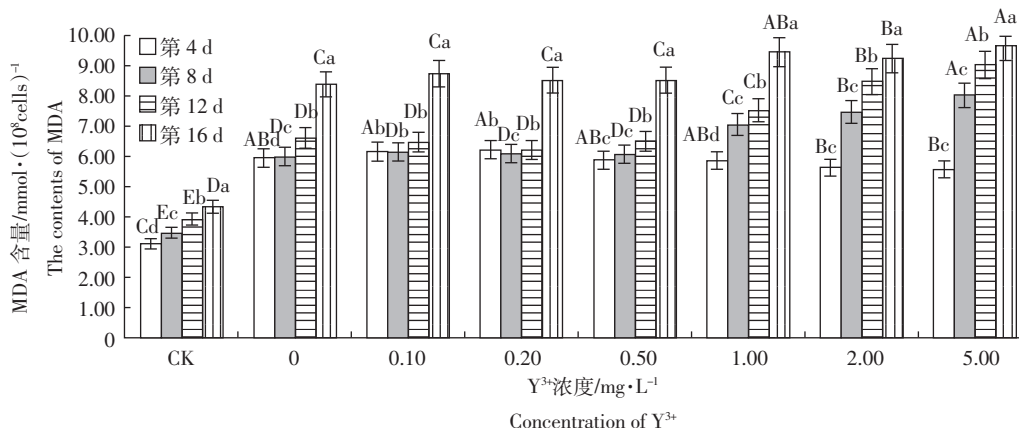
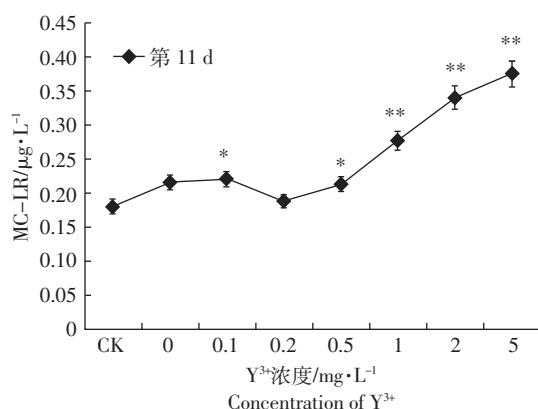


图 5 Y^{3+} 对 Pb^{2+} 胁迫下铜绿微囊藻丙二醛 (MDA) 含量的影响

Figure 5 The effect of Y^{3+} on the contents of malondialdehyde (MDA) of *M. aeruginosa* under Pb^{2+} stress



* 表示与对照差异显著, ** 表示与对照差异极显著

图6 不同Y³⁺浓度下培养基中MC-LR含量的变化

Figure 6 MC-LR content of medium under different Y³⁺ concentrations

影响生物体的生长。由本实验得知, Y³⁺浓度范围为0.10~0.50 mg·L⁻¹时, 铜绿微囊藻的生长均极显著优于单一铅胁迫, Y³⁺浓度为0.2 mg·L⁻¹时铜绿微囊藻生物量最大, 随着Y³⁺浓度增高, 铜绿微囊藻的生物量逐渐降低。这可能是由于稀土Y³⁺与铜绿微囊藻的生长之间存在相应的浓度-效应关系, 在适宜浓度下, 铜绿微囊藻的各种活性酶较高, 光合作用和抗逆性较强, 吸收的营养元素较多; 低于或高于适宜浓度, 都会减弱铜绿微囊藻的各项生理活动。

SOD、POD、CAT是植物体内主要的抗氧化酶, 已有学者研究在重金属胁迫下稀土元素对植物抗氧化酶活性的影响, 如王春涛^[12]研究镉胁迫下稀土钕对菹草和伊乐藻受伤害的缓解作用时得出结论: 适当浓度钕能够增强植物体抗氧化酶活性, 清除过量自由基, 减少膜脂的过氧化反应; 张小兰等^[13]研究重金属Ni毒害下La的缓解效应得出结论, 加入10 mg·L⁻¹钕后于同浓度单一Ni处理相比, SOD、CAT活性增强, MDA含量有所下降。庞欣等^[14]研究镧对铅胁迫下小麦幼苗抗氧化酶活性的影响时提出镧的缓解作用有时间和浓度限制, 超过阈值以及胁迫严重时稀土会与重金属协同加深对植物的迫害。本实验研究Y³⁺对Pb²⁺胁迫下对铜绿微囊藻生长生理的影响, 得出与前人相似的结论, 即低质量浓度Y³⁺(0.10~0.50 mg·L⁻¹)促进了铅胁迫下铜绿微囊藻的抗氧化酶活性, 而高质量浓度Y³⁺(1.00~10.00 mg·L⁻¹)则抑制了铜绿微囊藻的酶活性。

MC-LR是微囊藻毒素(Microcystins, MCs)的一种异构体, 其产量和异构体类型受环境因子的影响很大, 其急性毒性最强^[15], 家畜及野生动物饮用了含微

囊藻毒素的水后, 会出现腹泻、乏力、厌食、呕吐等症状, 甚至死亡^[3]。已有研究表明, 适于铜绿微囊藻生长的条件往往并非最佳的产毒和毒素释放的条件, 微囊藻的产毒行为可能是对逆境的应激反应^[16]。我国推荐的饮用水源中将微囊藻毒素-LR的标准值列为1.0 μg·L⁻¹^[17]。本次试验各个试验处理组测得的MC-LR均小于1.0 μg·L⁻¹, 可能是本实验是在实验室模拟条件下测得第11 d藻细胞死亡后释放到培养基中的MC-LR含量, 此时培养基中藻细胞数目略微低于湖泊中铜绿微囊藻细胞的密度^[18]。

4 结论

(1)在铅胁迫下, Y³⁺对铜绿微囊藻生长产生明显促进作用的浓度范围为0.10~0.50 mg·L⁻¹, 此时藻体的SOD、POD和CAT活性加强, MDA含量降低, 促进了铜绿微囊藻生长, 藻细胞死亡数少, 培养基中MC-LR含量低。

(2)在铅胁迫下, Y³⁺对藻体有明显抑制作用的浓度范围为1.00~10.00 mg·L⁻¹, 此时藻体受到活性氧伤害, 抗氧化酶活性降低, MDA含量增高, 培养基中MC-LR含量高, 稀土进入水体对藻类的生长生理和产毒素能力产生了影响。

(3)在铅胁迫下, Y³⁺对铜绿微囊藻所表现出的“低促高抑”现象对防治水华有一定的指导作用, 但还有待更深入研究。

参考文献:

- [1] 胡勤海, 金海亮. 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.
- [2] 易文利, 王国栋, 刘选卫, 等. 氮磷比例对铜绿微囊藻生长及部分生化组成的影响[J]. 西北农林科技大学, 2005, 33(6): 151-154.
YI Wen-li, WANG Guo-dong, LIU Xuan-wei, et al. Effects of N/P ratios on the growth and some biochemical constituents of *Microcystis aeruginosa*[J]. *J of Northwest Sci-tech Univ of Agri And For*, 2005, 33(6): 151-154.
- [3] Codd G A. Cyanobacterial toxins, the perception of water quality, and the prioritization 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] 王中良, 刘丛强, 徐志芳, 等. 河流稀土元素地球化学研究进展[J]. 地球科学进展, 2000, 15(5):553-556.
- WANG Zhong-liang, LIU Cong-qiang, XU Zhi-fang, et al. Rivers rare geochemical research progress[J]. *Journal of Earth Science Progress*, 2000, 15(5):553-556.
- [6] 王应军, 金航标, 陈燕, 等. 稀土 Y^{3+} 对铜绿微囊藻生长及其抗氧化酶的影响[J]. 四川农业大学学报, 2011, 29(1):108-113.
- WANG Ying-jun, JIN Hang-biao, CHEN Yan, et al. Effects of yttrium (Y^{3+}) on growth and antioxidant enzyme of *Microcystis aeruginosa*[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2011, 29(1):108-113.
- [7] 刘洁, 常学秀, 黄丽娟, 等. Ni 元素对铜绿微囊藻的生长、光谱特性及藻胆蛋白含量的影响[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2005, 27(4):365-368.
- LIU Jie, CHANG Xue-xiu, HUANG Li-juan, et al. Effects of Ni on the growth, absorption spectrum and phycobiliprotein content of *Microcystis aeruginosa*[J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences)*, 2005, 27(4):365-368.
- [8] Badger M R, Andrews T J. Photosynthesis and inorganic carbon usage by the marine cyanobacterium *Synechococcus* sp.[J]. *Plant Physiol*, 2002, 70:517-523.
- [9] Espie G S, Canvin D T. Evidence for Na^{+} -independent uptake by the cyanobacterium *Synechococcus leopoliensis*[J]. *Plant Physiol*, 1997, 84:125-130.
- [10] Metcalf J S, Bell S G, Codd G A. Colorimetric immuno-protein phosphatase inhibition assay for specific detection of microcystins and nodularins of cyanobacteria[J]. *Appl Environ Microbiol*, 2001, 67(2):904-909.
- [11] Cavender-Bares K, Mama E, Chisholm S, et al. Differential response of equatorial Pacific phytoplankton to iron fertilization[J]. *Limnol Oceanogr*, 1998, 44:237-246.
- [12] 王春涛. 稀土钇减轻镉对水生植物胁迫的研究[D]. 南京: 南京师范大学生命科学学院, 2005.
- WANG Chun-tao. Research on alleviation of cadmium stress on aquatic plants by rare earth neodymium[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, College of Life Science, 2005.
- [13] 张小兰, 施国新, 徐勤松, 等. 镧缓解镍对水鳖叶片的毒害效应研究[J]. 中国稀土学报, 2003, 21(1):81-84.
- ZHANG Xiao-lan, SHI Guo-xin, XU Qin-song, et al. Detoxication of lanthanum against nickel in *Hydrocharis dubia* B L. backer leaves[J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 2003, 21(1):81-84.
- [14] 庞欣, 王东红, 彭安. 镧对铅胁迫下小麦幼苗抗氧化酶活性的影响[J]. 环境化学, 2002, 21(4):318-323.
- PANG Xin, WANG Dong-hong, PENG An. Effect of La^{3+} on the activities of antioxidant enzymes in wheat seedlings under lead stress[J]. *Environmental Chemistry*, 2002, 21(4):318-323.
- [15] Rinehart K L, Namikoshi M, Choi B W. Structure and biosynthesis of toxins from blue-green algae (cyanobacteria)[J]. *Journal of Applied Phycology*, 1994, 6(2):159-176.
- [16] 张玮, 林一群, 郭定芳, 等. 不同氮、磷浓度对铜绿微囊藻生长、光合及产毒的影响[J]. 水生生物学报, 2006, 30(3):318-322.
- ZHANG Wei, LIN Yi-qun, GUO Ding-fang, et al. Influence of different nitrogen and phosphorus concentrations on growth, photosynthesis and microcystin production of *Microcystis aeruginosa*[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, 30(3):318-322.
- [17] GB 3838—2002, 生活饮用水卫生标准[S].
- GB 3838—2002, Drinking water hygiene standards of the People's Republic of China national standards[S].
- [18] 张娟, 梁前进, 周云龙, 等. 官厅水库水体中微囊藻毒素及其与微囊藻细胞密度相关性研究[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(5):53-55.
- ZHANG Juan, LIANG Qian-jin, ZHOU Yun-long, et al. Study on microcystins and their correlation with microcystis cell densities in Guanting Reservoir[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2006, 6(5):53-55.