

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20210312001

卢桂蓉, 王应军, 范子奇. 稀土元素 La(III)对铜绿微囊藻生长和生理特性的影响[J]. 生态毒理学报, 2021, 16(6): 256-267

Lu G R, Wang Y J, Fan Z Q. Effects of La(III) on the growth and physiological characteristics of *Microcystis aeruginosa* [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2021, 16(6): 256-267 (in Chinese)

稀土元素 La(III) 对铜绿微囊藻生长和生理特性的影响

卢桂蓉, 王应军*, 范子奇

四川农业大学环境学院, 成都 611130

收稿日期: 2021-03-12 录用日期: 2021-06-02

摘要: 为了解在营养元素氮、磷限制环境下稀土元素镧(La)对贫营养水体中铜绿微囊藻的影响及作用机制。在实验室模拟培养下, 研究稀土元素镧对铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)生长和生理特性的影响, 测定缺素胁迫和正常情况不同 La^{3+} 浓度对藻的生长量、叶绿素 *a*、可溶性糖、可溶性蛋白、抗氧化酶活性(过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)以及丙二醛(MDA)含量的影响。结果表明, 在缺磷胁迫下, 低浓度 La^{3+} ($0.10 \sim 0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 能刺激铜绿微囊藻的生长, 增强光合作用效率, 提高抗氧化酶活性; 随着处理浓度的提高和处理时间的延长, 藻类生长受到抑制, 表现为光合色素、可溶性蛋白含量明显下降, 可溶性糖含量增加, 膜质过氧化程度加重。与正常情况的培养相比, 在缺磷胁迫下, 铜绿微囊藻对 La^{3+} 的耐受力明显降低; 而在缺氮情况下, La^{3+} 不能维持微囊藻的正常生长代谢。因此, 一定浓度范围的稀土元素镧对缺磷及正常情况下的铜绿微囊藻生长有促进作用, 是引起贫营养水体中铜绿微囊藻大量繁殖的诱因之一。

关键词: 磷; 氮; 稀土元素; 镧; 铜绿微囊藻; 生理特性

文章编号: 1673-5897(2021)6-256-12 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Effects of La(III) on Growth and Physiological Characteristics of *Microcystis aeruginosa*

Lu Guirong, Wang Yingjun*, Fan Ziqi

College of Environmental Sciences, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

Received 12 March 2021 accepted 2 June 2021

Abstract: In order to understand the effect and mechanism of rare earth element lanthanum (La) on *Microcystis aeruginosa* in oligotrophic water under the limit environment of nutrient elements nitrogen and phosphorus. Under simulated cultivation in the laboratory, the effects of lanthanum on the growth and physiological characteristics of *Microcystis aeruginosa* were studied. The effects of different La^{3+} concentrations on the growth of algae, the contents of chlorophyll *a*, soluble sugar and soluble protein, the activity of antioxidant enzymes (catalase (CAT) and peroxidase (POD)), and the content of malondialdehyde (MDA), under nutrient deficiency stress and normal conditions were measured. The results showed that under phosphorus deficiency stress, low concentration of La^{3+} ($0.10 \sim 0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) could stimulate the growth of *Microcystis aeruginosa*, enhance the photosynthetic efficiency and the activity of antioxidant enzymes. With the increase of treatment concentration and the extension of treatment time,

第一作者: 卢桂蓉(2000—), 女, 学士, 研究方向为环境工程, E-mail: 932959376@qq.com

* 通讯作者 (Corresponding author), E-mail: wwyj1972@163.com

the growth of algae was inhibited, the contents of photosynthetic pigment and soluble protein were obviously decreased, the content of soluble sugar was increased, and the degree of membrane peroxidation was aggravated. Compared with the normal culture, the tolerance of *Microcystis aeruginosa* to La^{3+} was significantly reduced under phosphorus deficiency stress. *Microcystis aeruginosa* could not maintain the normal growth and metabolism under the condition of nitrogen deficiency with La^{3+} . Therefore, lanthanum in a certain concentration range can promote the growth of *Microcystis aeruginosa* in phosphorus deficiency and normal conditions, and is one of the inducements for the proliferation of *Microcystis aeruginosa* in oligotrophic water.

Keywords: phosphorus; nitrogen; rare earth element; lanthanum; *Microcystis aeruginosa*; physiological characteristic

铜绿微囊藻是引起我国湖泊蓝藻水华的优势藻种之一,其大量增殖会释放危害人体健康的藻毒素^[1],并破坏自然生态系统^[2]。氮、磷是易限制藻类生长的元素^[3]。研究发现,在贫营养湖泊中,少量的稀土能作为蓝藻细胞的一种营养元素被利用与储存,并对藻细胞的生长和生理活性产生影响,稀土的输入是引起低营养水体发生“水华”现象的原因之一^[4-5],因此,有研究开始关注稀土元素能否取代氮、磷,进而引发贫营养水体向富营养方向发展^[6]。

如今,稀土元素的优质功能不断被挖掘,导致市场需求量急剧增加,稀土矿山挖采过程中产生的废水会对环境造成严重的污染。在詹鸿峰等^[7]对某地区离子型稀土矿废水的调查研究中发现,该矿山废水中含有较多的镧(La)、钕、镨和铈等稀土元素,其含量分别可达0.70、0.15、0.25和0.14 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。而La作为稀土中含量第二丰富的元素,因其独特的物化性质被广泛应用,使得大量的La从原矿区逐渐转移至其他区域环境,以枯水期长江部分流域为例,其含量达到0.1 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[8],远远超过世界淡水中含量的平均水平,且含量呈现逐渐增加的趋势,因此,在自然水体中存在高浓度La的可能性也逐渐增加。

但是,目前关于稀土对水生植物影响的研究较少,已有实验表明 La^{3+} 能提高植物叶绿素含量、促进植物对营养元素的吸收、刺激幼苗的萌发生长^[9],增强植物在逆境下的抗逆性^[10-11]。根据物化性质可把稀土元素分为轻、重2种稀土。其中,杜金戈等^[12]研究证明重稀土铈对缺N或P胁迫影响下的铜绿微囊藻有明显的“Hormesis”效应^[13],而La作为一种轻稀土,在营养元素限制的条件下,对铜绿微囊藻是否有类似的影响机制,目前尚无清楚的认知。因此,本实验以缺N、缺P胁迫的实验条件模拟贫营养水体,测定不同浓度 La^{3+} 对铜绿微囊藻生长量及抗氧化酶活性等生理指标的影响,进一步研究轻稀土元素La

对贫营养水体发生富营养化现象的影响及作用机制,并为潜在的稀土污染风险评价及预测提供参考依据。

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 受试藻种与铜贮备液的配制

1.1.1 受试藻种

本实验所使用的藻种是铜绿微囊藻 FACHB912,购自中国科学院水生生物研究所藻种库(FACHB),此株系从太湖中经过分离、纯化后获得。在藻种购得后,用BG-11培养基进行扩培,并将培养的光照度设置为2 000~2 500 lx,温度为(25±0.5)℃,光暗比为12 h:12 h。

1.1.2 铜贮备液

称取0.5888 g La_2O_3 (AR,成都恒瑞新材料有限公司),再加入少量的超纯水以及浓盐酸(AR)并进行加热溶解,当盐酸充分挥发后,转移至100 mL容量瓶用超纯水定容至刻度线,再移取1 mL定容后的溶液至1 000 mL容量瓶中用超纯水定容,得到浓度为5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 La^{3+} 溶液,将贮备液经蒸汽高压灭菌后备用。

1.2 藻类培养实验与指标测定

1.2.1 藻类培养

当铜绿微囊藻处于对数生长期时,取一定量的藻液,经5 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心10 min后收集藻细胞,分别用不含P、不含N以及不含N、P的BG-11培养基洗涤4次后,重新接种到新的缺P、缺N以及同时缺N、P的BG-11培养基中;再取适量藻液重新接种到含有N、P元素的BG-11培养基中(对照组),将所有组的藻密度均调为 $1.2 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。在无菌环境下,分别向锥形瓶中加入500 mL含藻的缺P的BG-11培养基、缺N的BG-11培养基、缺N、P的BG-11培养基、正常BG-11培养基,再分别加入0、2.5、5、12.5和25 mL La^{3+} 储备液,使各锥形瓶中 La^{3+}

浓度分别为 0、0.10、0.20、0.50 和 1.00 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 并分别设置 3 个平行。将接种后的培养基均置于光照培养箱中静置培养 16 d, 培养条件与扩培条件相同。在同时缺 N、P 组中, 铜绿微囊藻不能正常生长, 后续指标均未测量。

1.2.2 藻密度测定

采用分光光度法测定铜绿微囊藻数量, 每天定时取 3 mL 藻液, 在波长为 680 nm 处测定其吸光度, 再通过相应的标准曲线换算出培养液中藻细胞的浓度^[14]。

1.2.3 叶绿素 a 含量的测定

采用丙酮萃取法^[15]。在实验的第 4、8、12 和 16 天, 从培养基中取 10 mL 藻液, 经 5 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min, 弃去上清液, 再加入 5 mL 90% 丙酮, 摇匀后在温度为 4 $^{\circ}\text{C}$ 下避光萃取 24 h, 再经 5 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min, 取上清液, 用 90% 的丙酮作参照, 分别在波长 630、645、663 和 750 nm 处测定其吸光度, 并按以下公式计算叶绿素 a 含量^[16]。

$$C = 11.64(A_{663} - A_{750}) - 2.16(A_{645} - A_{750}) + 0.1(A_{630} - A_{650})$$

$$\text{Chl } a = \frac{10^8(CV_1)}{V_2\rho}$$

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($\text{cells} \cdot \text{mL}^{-1}$); Chl a 为叶绿素 a 含量($\mu\text{g} \cdot (10^8 \text{ cells})^{-1}$)。

1.2.4 粗酶液的提取

在实验的第 4、8、12 和 16 天取 10 mL 藻液, 10 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min, 收集藻细胞, 加 0.05 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、pH 为 7.8 的磷酸缓冲液 1.5 mL, 并于液氮内反复冻融 5 次后用匀浆器研磨 5 min, 然后在 4 $^{\circ}\text{C}$ 下 40 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min, 所得上清液即为粗酶液。

1.2.5 可溶性蛋白含量、抗氧化酶活性、丙二醛含量和可溶性糖的测定

取由实验 1.2.4 所提取的粗酶液, 以考马斯亮蓝法测定可溶性蛋白含量^[17], 以愈创木酚法^[18]测定过氧化物酶(POD)活性, 以钼酸铵比色法^[19]测定过氧化氢酶(CAT)活性, 以硫代巴比妥酸 TBA 比色法^[20]测定丙二醛(MDA)含量, 以蒽酮硫酸比色法^[21]测定可溶性糖含量。以上指标均采用南京建成生物研究所测试盒测定。

1.3 数据处理

结果采用 Origin2019 软件进行处理和绘图, 同时, 使用 SPSS 20.0 软件进行差异显著性分析及检验, 当 $P < 0.05$ 差异显著。

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 La^{3+} 对铜绿微囊藻生长量的影响

由图 1 可知, 在对照组中, 培养初期藻细胞处于适应阶段, 生长差异不明显, 第 10 天藻细胞进入对数生长期。藻的生长量总体高于缺 N 和缺 P 这 2 组, 可知 N、P 元素的缺乏会对藻类的正常生长产生不利影响^[22]。当 La^{3+} 浓度在 0 ~ 1.00 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内, 铜绿微囊藻生长量随 La^{3+} 浓度增加呈现先增后减的趋势, 均表现为促进作用。在 La^{3+} 浓度为 0.50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, La^{3+} 对铜绿微囊藻的刺激作用达到最大, 藻细胞的增幅明显高于不加稀土 La^{3+} 的空白组 ($P < 0.01$), 在第 16 天达到最大生物量 $1.77 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$, 比空白组 (0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{La}^{3+}$) 生物量增加了 43.59%。

在缺 P 组中, 藻细胞增长较为缓慢, 当 La^{3+} 浓度为 0.10 ~ 0.20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 藻细胞的生长幅度显著高于单一缺 P 组 ($P < 0.01$), 且 La^{3+} 浓度为 0.20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 促进作用达到最大, 在第 16 天达到最大生物量 $6.59 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$, 比单一缺 P 组增加了 7.32%; 随着 La^{3+} 浓度的增加 (0.50 ~ 1.00 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 铜绿微囊藻的生长受到抑制, 其藻细胞的生长幅度低于空白组 ($P < 0.01$), 且浓度越大, 抑制作用越强。

在缺 N 组中, 在 La^{3+} 浓度为 0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 藻可以维持 11 d 的缓慢生长, 其细胞密度最大为 $2.71 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$, 而 La^{3+} 浓度为 0.10 ~ 1.00 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 藻细胞量在 7 d 缓慢增加后迅速减少, 且藻细胞在整个培养期内的生长量均低于单一缺 N 组, 说明 La^{3+} 在缺 N 胁迫下, 对铜绿微囊藻表现为迫害作用。铜绿微囊藻在缺 N 培养基中细胞的生物量明显低于缺 P 培养基中的生长, 铜绿微囊藻对 P 缺乏的耐受能力高于对 N 缺乏的耐受能力 ($P < 0.01$)。铜绿微囊藻在适应期结束后未迅速进入对数生长期, 而出现停止生长甚至下降的趋势, 因此, 测定藻细胞内各生理指标意义不大, 后续分析中不考虑缺 N 组。

由此可见, 缺乏 N、P 营养元素不利于铜绿微囊藻的生长, 而适量的 La 能促进藻类的生长。缺 P 会降低铜绿微囊藻对稀土 La^{3+} 浓度的耐受能力, 可能是因为藻细胞对稀土的富集能力与磷元素有关。崔宜淳^[23]的培养实验结果表明, 少量稀土元素能够改变藻类细胞器的某些结构及相应的功能, 此外, 稀土可以与某些特定的酶结合, 并激活酶的活性, 进而加快藻细胞的生长代谢, 促进藻类生长, 这一结论与吕赞等^[24]对水华鱼腥藻的培养实验结果相似; 而在

高浓度稀土的培养下,藻类的生长会受到抑制,相关实验研究也证明,过量的稀土元素会竞争性地结合活性中心,抑制多种与藻类生长相关酶的活性,导致藻类的生长受到抑制^[25]。铜绿微囊藻对 P 缺乏的耐受力高于对 N 缺乏的耐受力,适宜浓度的稀土 La^{3+} 能短时间抵抗由于缺 P 造成的损害,维持铜绿微囊藻的正常生长;但在缺 N 胁迫下,稀土 La^{3+} 不能减少缺 N 胁迫的损害,反而与缺 N 共同对铜绿微囊藻的生长造成了负面影响。

2.2 La^{3+} 对 Chl *a* 含量的影响

大多数藻细胞通常需要通过光合作用才能合成维持其自身正常生命代谢活动所需要的有机物,而 Chl *a* 作为一种重要的光合色素,具有吸收并转化光能的功能,其转换效率即光合作用效率能够直接反映藻细胞将光能转化为自身所需化学能的能力,是

光合作用的重要指标之一^[26]。因此,Chl *a* 可以作为评估植物或藻类生长状况的一项重要指标。

如图 2 所示,在对照组中,Chl *a* 含量在整个培养周期内均呈现增加趋势,随着藻进入对数期,Chl *a* 增长幅度增加,且增加量随着 La^{3+} 浓度的升高呈现先增后减的趋势。在 La^{3+} 浓度为 $0.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时 Chl *a* 含量达到最大,在第 4、8、12 和 16 天的生长量分别比空白组藻 Chl *a* 的含量提高了 22.81%、45.68%、71.00% 和 80.95% ($P < 0.01$)。即适宜浓度的稀土 La^{3+} 能提高铜绿微囊藻的光合效率,促进叶绿素的合成。

在缺 P 组中,低浓度的 La^{3+} ($0.10 \sim 0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 对 Chl *a* 表现为刺激作用 ($P < 0.01$),浓度为 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时促进作用达到最大,其 Chl *a* 含量在第 12 天为 $0.89 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,比单一缺 P 组 ($0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{La}^{3+}$) 中

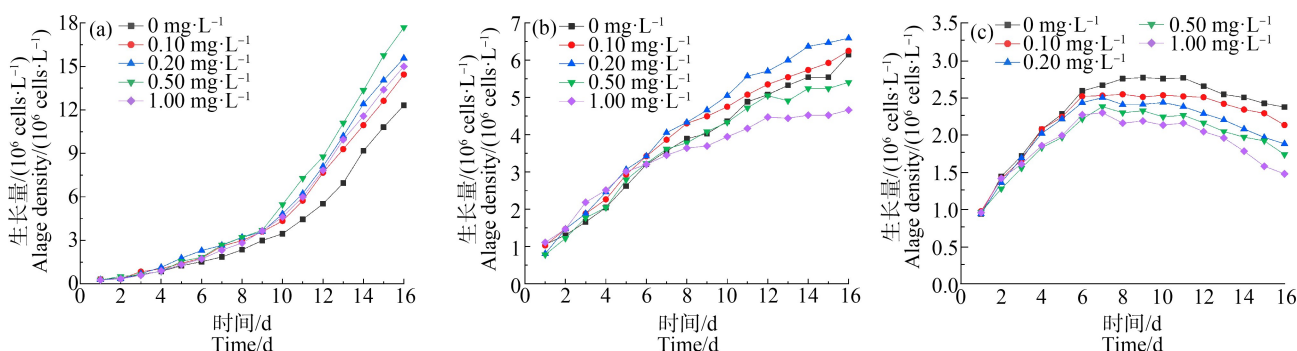


图 1 在不同生长环境下不同浓度 La^{3+} 对铜绿微囊藻生长量的影响

注:(a)对照组;(b)缺磷组;(c)缺氮组。

Fig. 1 Effects of La^{3+} with different concentration on the growth of *Microcystis aeruginosa* under different growth environments

Note:(a) Control group; (b) Phosphorus deficiency group; (c) Nitrogen deficiency group.

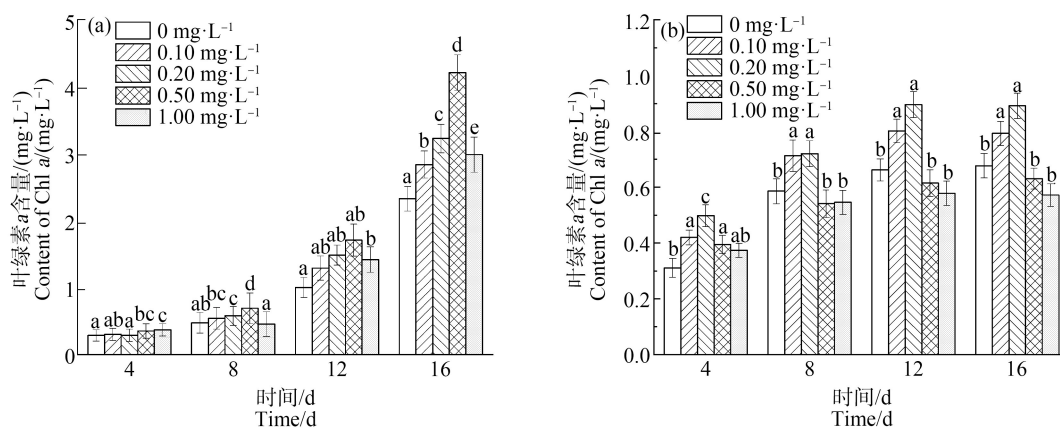


图 2 不同浓度 La^{3+} 处理下对叶绿素 *a* (Chl *a*) 的影响

注:(a)对照组;(b)缺磷组。

Fig. 2 Chlorophyll *a* (Chl *a*) content under different La^{3+} treatments

Note: (a) Control group; (b) Phosphorus deficiency group.

铜绿微囊藻中 Chl *a* 含量提高了 31.75%, 而高浓度的 La^{3+} ($0.50 \sim 1.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 表现为抑制作用, 在 La^{3+} 浓度为 $1.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 抑制作用达到最大, 第 16 天的 Chl *a* 含量为 $0.57 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 比单一缺 P 组降低了 15.48%。在相同 La^{3+} 浓度下, 缺 P 组藻细胞内 Chl *a* 含量低于对照组, 即缺 P 会影响藻细胞内 Chl *a* 的合成, 这一结果与张杰等^[9]研究 La 对水稻幼苗影响的实验结果类似。本研究表明, 适宜 La^{3+} 浓度能够刺激细胞内 Chl *a* 的合成从而提高光合效率, 有利于铜绿微囊藻细胞合成大量有机物。已有的研究表明, 适宜的稀土元素可以作为一种中间物质与 K^+ 、 Na^+ 和 Ca^{2+} 等离子发生相互作用, 调节细胞对某些营养元素的吸收效率, 进而增加细胞内叶绿素的合成量, 而高浓度 La^{3+} 对细胞的活化作用低于 Mg^{2+} , 使细胞内叶绿素的合成受到较强的抑制作用^[27]。

2.3 La^{3+} 对可溶性糖含量的影响

可溶性糖在植物的整个生命周期中具有十分重要的作用。已有的研究表明, 可溶性糖可作为植物生长发育和有关基因表达的重要调节因子之一, 也是维持藻细胞正常渗透压的重要调节物质, 能表示藻类细胞的抗逆性大小, 其含量在一定的程度上能够定性反映藻类细胞抵御外界不良环境的能力^[28]。同时, 可溶性糖作为植物光合作用的主要产物, 是储存、积累及运输有机物的主要形式^[29]。

如图 3 所示, 对照组中, 在整个培养周期内, 随着培养时间的延长, 不同 La^{3+} 浓度处理下的藻细胞内可溶性糖的含量均逐渐减少。在 La^{3+} 浓度为 $0.10 \sim 0.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 可溶性糖含量低于空白组, 且随

La^{3+} 浓度增加可溶性糖含量减少。在前半个周期中, 当 La^{3+} 浓度为 $1.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 可溶性糖含量明显高于空白组 ($P < 0.01$)。在第 4、12 和 16 天中, La^{3+} 浓度为 $0.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 可溶性糖含量分别达到同一时间测定的最低量, 分别为 425.89、195.32 和 $114.73 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

缺 P 胁迫下, La^{3+} 浓度在 $0.10 \sim 0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内可溶性糖含量减少, 在 La^{3+} 浓度为 $0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 可溶性糖含量最低, 其在第 4、8、12 和 16 天含量分别为 554.34、421.02、305.93 和 $224.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 分别比单一缺 P 胁迫下的铜绿微囊藻中可溶性糖含量降低了 11.91%、26.13%、33.40% 和 28.89%。当稀土 La^{3+} 的浓度大于 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 可溶性糖的含量随稀土 La^{3+} 浓度增加而增多。

不同浓度的稀土 La^{3+} 对缺 P 组和对照组的藻有不同的影响机制, 缺 P 组中藻内可溶性糖的含量整体高于对照组, 且在可溶性糖含量最低时对应的稀土 La^{3+} 浓度存在差异。在轻度胁迫下, 可溶性糖可作为渗透压调节剂, 维持着细胞内渗透压平衡^[30]; 有研究表明, 重金属胁迫下, 细胞内的可溶性糖会出现几种不同的变化趋势^[30-33]。在本实验中, 可溶性糖的含量随着稀土 La^{3+} 浓度增加呈现先减后增的趋势, 这与王琼等^[30]的实验结果一致, 可知对照组中可溶性糖含量的变化趋势主要是由于渗透压引起。在缺 P 组中, 低浓度的 La^{3+} 可能通过改变细胞器结构功能, 促进细胞利用糖类作为能量供给来加快藻类细胞的代谢; 而高浓度的 La^{3+} 可能使细胞外渗透压增大, 藻细胞破灭导致可溶性糖流出, 测定出的可溶

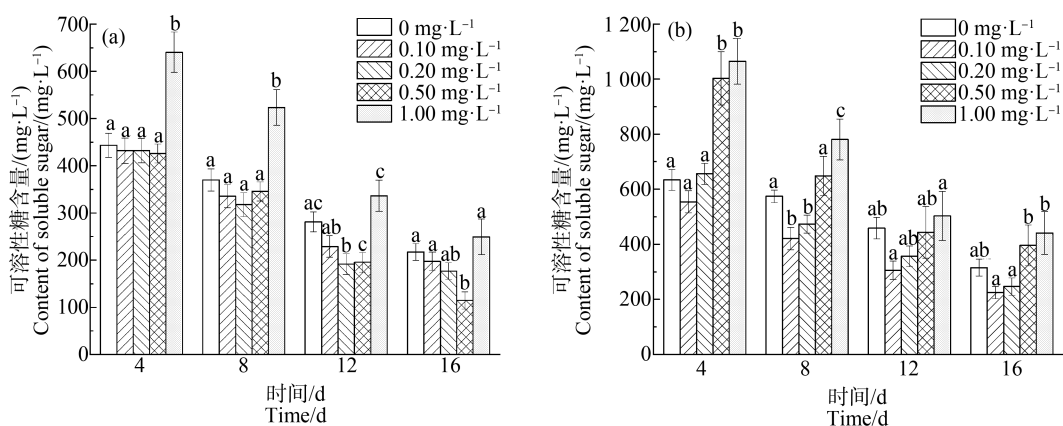


图 3 不同浓度 La^{3+} 处理下可溶性糖含量变化

注: (a) 对照组; (b) 缺磷组。

Fig. 3 Soluble sugar content under different La^{3+} treatments

Note: (a) Control group; (b) Phosphorus deficiency group.

性糖含量增加。同时,在高浓度 La^{3+} 的胁迫下,藻细胞的结构受损,而 P 元素是细胞内能量直接来源 ATP 合成的必要元素,缺 P 会导致 ATP 含量减少,使可溶性糖的利用量大大降低,可溶性糖在细胞内的积累量增加,造成其含量明显高于对照组中的含量。

2.4 La^{3+} 对可溶性蛋白含量的影响

藻细胞中的大部分可溶性蛋白质是参与藻类各种代谢有关的酶类,因此,可溶性蛋白含量可以作为衡量藻类或植物的生理生化反应及总代谢的重要指标之一。

由图 4 可知,对照组中,浓度为 $0.10 \sim 1.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的稀土 La^{3+} 能显著提高铜绿微囊藻的蛋白质含量($P < 0.01$),在浓度为 $0.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,藻类蛋白质含量达到最大,在第 8、12 和 16 天的含量分别为 0.70 、 1.45 和 $1.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,分别比空白组中铜绿微囊藻的蛋白质含量提高了 22.81% 、 46.46% 和 0.24% 。蛋白质的含量与光合作用密切相关,在此浓度范围内,稀土 La^{3+} 促进 Chl *a* 的合成,提高了藻细胞的光合速

率,使光合作用制造的蛋白质明显增多。

缺 P 组中,在 La^{3+} 浓度为 $0.10 \sim 0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,蛋白质含量高于单一缺 P 组,表现为促进作用,且在浓度为 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时促进作用最明显,在第 12 天的蛋白质含量提高量最大($P < 0.01$),为 34.54% ;随着培养液中 La^{3+} 浓度增加(La^{3+} 浓度 $> 0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),藻细胞内的可溶性蛋白的含量呈下降趋势。

缺 P 组中,蛋白质含量及增长速度均低于相同浓度 La^{3+} 处理下的对照组,对照组中的蛋白质含量在第 16 天最高达到 $1.906 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,比缺 P 组中最高含量 $0.844 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 提高 55.7% 。因此,缺 P 会影响藻细胞内蛋白质的合成,进而影响藻类的正常代谢。低浓度的 La^{3+} 均能增加可溶性蛋白质的含量,已有的研究表明,适量的稀土能通过某种机制将信号传递到细胞内,促进钙调蛋白(CaM)基因表达,激活依赖于 CaM 的各种酶活性,引起蛋白质含量升高^[34];而高浓度的 La^{3+} 则抑制 CaM 基因表达^[35-36],使合成的蛋白质等有机物量减少。

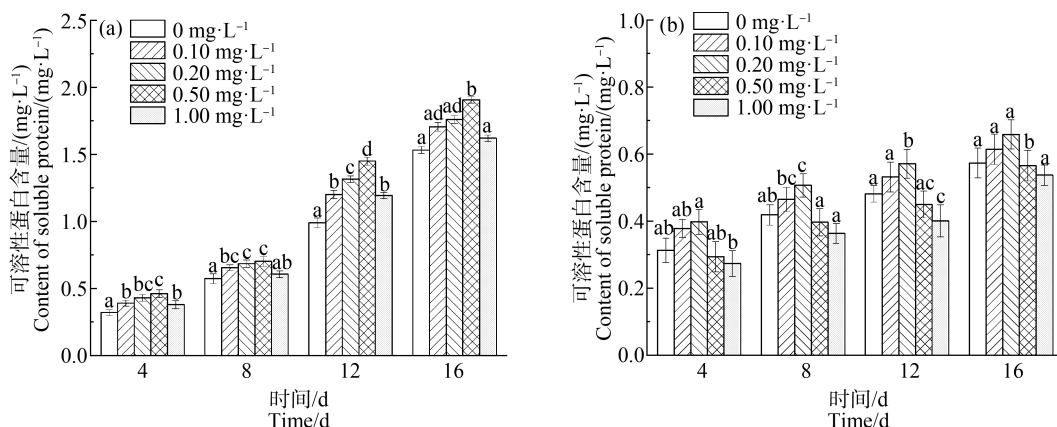


图 4 不同浓度 La^{3+} 处理下蛋白质含量变化

注:(a)对照组;(b)缺磷组。

Fig. 4 Protein content under different La^{3+} treatments

Note: (a) Controll group; (b) Phosphorus deficiency group.

2.5 La^{3+} 对 CAT、POD 活性的影响

植物在生长发育过程中需要吸收、利用氧气来维持自身的正常生长代谢,在此过程中,细胞内会生成一定量的有害物质活性氧(ROS)^[37]。活性氧作为自然生理过程中产生的有害代谢产物,具有氧化植物细胞内的蛋白质、脂质和核酸,以及破坏植物细胞正常结构和生理功能的危害作用^[38-39]。在植物正常的生长过程中,植物体内的 ROS 会保持一种动态平衡,即植物体内产生的 ROS 与体内抗氧化系统清除 ROS

的物质存在一定关系^[40]。但是,当植物细胞受到严重胁迫时,细胞体内产生的 ROS 将无法及时被抗氧化系统消除,进而大量累积,抑制了抗氧化酶活性^[41]。

植物细胞内具有清除 ROS 功能的抗氧化防御体系,该体系由 SOD、CAT 和 POD 组成^[42],其活性可以直接反映生物体抵御不良环境的能力。其中, SOD 作为生物体内抗氧化防御系统清除 ROS 的第一道防线^[43-44],在 $\cdot\text{O}_2^-$ 的诱导下其活性会升高并歧化 $\cdot\text{O}_2^-$ 产生 H_2O_2 ^[45];随着催化底物 H_2O_2 的增多,

POD 和 CAT 活性会上升并将 H_2O_2 降解成 H_2O 和 O_2 , 可见, POD 与 SOD 活性在细胞体内存在一定的相关性, 而杜金戈等^[12]在进行钇(Y^{3+})对铜绿微囊藻生长及生理影响研究时发现, 在缺 N、P 胁迫下, SOD 和 POD 活性随稀土 Y^{3+} 浓度变化的趋势大致相同。因此, 本文测定了 POD 和 CAT 活性来反映藻细胞抵抗逆境的能力, 其实验结果如图 5 和图 6 所示。

如图 5 和图 6 所示, 缺 P 组中, CAT 和 POD 的活性均随 La^{3+} 浓度的增加, 表现出先增后减的趋势。在第 12 天, La^{3+} 浓度达到 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, CAT 和 POD 活性均达到最高, 分别为 $11.29 \text{ U} \cdot (10^8 \text{ cells})^{-1}$ 和 $7.29 \text{ U} \cdot (10^8 \text{ cells})^{-1}$, 比单一缺 P 组分别提高了

25.58% 和 30.65% ($P < 0.01$); 而高浓度 La^{3+} 下, CAT 和 POD 活性下降, 可能是因为高浓度的 La^{3+} 破坏了藻细胞内的抗氧化平衡, 导致抗氧化酶活性降低。在第 16 天时, 在长时间的缺 P 和 La^{3+} 的协同胁迫下, 铜绿微囊藻受到抑制作用增强, 叶绿素合成减少, 蛋白质含量下降, CAT 活性也随之下降。对照组中, CAT 和 POD 的活性与缺 P 组表现出类似的变化趋势, 但 CAT ($P < 0.01$) 和 POD 在 La^{3+} 浓度为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时活性达到最大值。

对比 2 组实验可以发现, 缺 P 组中 CAT 和 POD 活性高于对照组, 而藻细胞对 La^{3+} 的耐受能力低于于对照组, 即营养元素 P 的缺乏会加重铜绿微囊藻

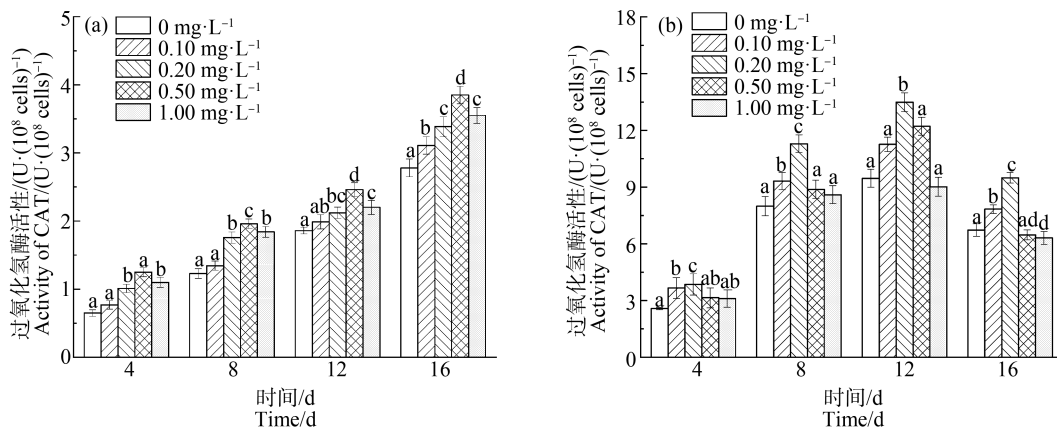


图 5 不同浓度 La^{3+} 处理下过氧化氢酶 (CAT) 活性变化

注: (a) 对照组; (b) 缺磷组。

Fig. 5 The catalase (CAT) activity under different La^{3+} treatments

Note: (a) Control group; (b) Phosphorus deficiency group.

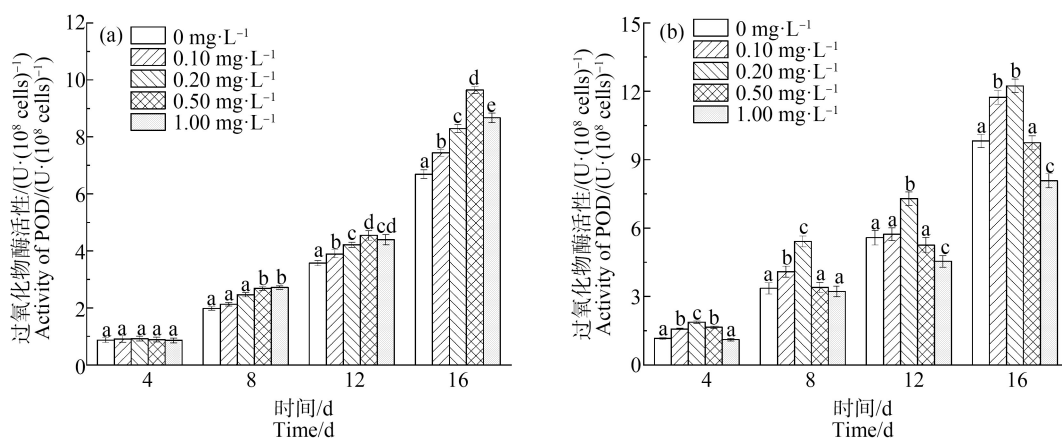


图 6 不同浓度 La^{3+} 处理下过氧化物酶 (POD) 活性变化

注: (a) 对照组; (b) 缺磷组。

Fig. 6 The peroxidase (POD) activity under different La^{3+} treatments

Note: (a) Control group; (b) Phosphorus deficiency group.

膜脂氧化的程度。与杜金戈等^[12]的实验结果类似,即低浓度的稀土元素能促进酶活性的增强,高浓度则抑制酶活性。

2.6 La^{3+} 对MDA含量的影响

MDA是细胞膜脂过氧化过程中的一种重要产物,常作为反映植物衰老生理和抗性生理状况的指标,其含量可用来表达细胞膜膜脂氧化的程度,间接确定膜系统受损程度以及植物的抗逆性。因此,MDA的含量可以作为判断细胞膜结构损伤程度以及藻体受胁迫程度的重要依据^[46-47]。

如图7所示,在对照组和缺P组中,不同 La^{3+} 浓度对铜绿微囊藻中MDA含量变化有相似的影响,但在缺P和稀土 La^{3+} 同时胁迫下,铜绿微囊藻MDA含量高于单一稀土 La^{3+} 胁迫下的含量。

在缺P组中,MDA含量随稀土 La^{3+} 浓度的增加表现出先减少后增加的趋势,且不同 La^{3+} 浓度处理下MDA含量均随处理时间的延长而增加。在第16天,稀土 La^{3+} 浓度为 $0.10 \sim 0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,MDA含量低于单一缺P组($P < 0.01$),在稀土 La^{3+} 浓度为 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,MDA达到最低含量 $2.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,比单一缺P组中MDA含量降低6.25%,而 La^{3+} 浓度 $> 0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,MDA含量上升,即适量的稀土元素 La^{3+} 有利于铜绿微囊藻抵御缺P胁迫。

对比CAT、POD活性和MDA含量可知,低浓度的稀土 La^{3+} 能增强细胞中抗氧化酶的活性,降低MDA含量,减少缺P胁迫对细胞的损害,维持藻细胞的正常生长代谢;而高浓度的 La^{3+} 严重阻碍抗氧化酶的合成,使藻类细胞的抗氧化体系无法正常运

行,细胞膜脂过氧化,干扰和破坏细胞的正常功能。同时,产生并积累的大量MDA反过来抑制抗氧化酶活性^[48],严重影响藻细胞的正常生命代谢水平。

2.7 生理毒理指标相关性

此外,本研究对藻的生理毒理指标进行了相关性分析。由表1可知,生物量、叶绿素a含量、可溶性蛋白含量、CAT活性、POD活性、MDA含量之间均呈显著正相关($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$)。其中,铜绿微囊藻的生物量与CAT活性、POD活性、MDA含量之间相关系数达到0.90以上,呈现显著正相关($P < 0.01$),说明铜绿微囊藻的生长状况与酶活性存在一定的关联;而CAT、POD作为藻细胞内2种重要的抗氧化酶,在一定程度上,其活性对藻细胞受损程度有相似的反映;同时,铜绿微囊藻藻细胞密度对于叶绿素a和可溶性蛋白的合成有重要的影响,直接影响两者的含量。但是,可溶性糖与其他6项生理毒理学指标均呈显著负相关($P < 0.05$),即在实验测定时间内,在一定浓度稀土La的影响下,铜绿微囊藻藻细胞中可溶性糖含量越低,藻细胞抗氧化酶活性越高,铜绿微囊藻生长越好。

综上所述,不管是正常水体还是在缺P的贫营养水体中,轻稀土 La^{3+} 对铜绿微囊藻的生态学效应在细胞层次上均表现出典型“Hormesis”现象,具体表现为:

(1)在对照组中,低浓度 La^{3+} ($0.10 \sim 0.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)对铜绿微囊藻的生长有一定促进作用,高浓度($> 0.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) La^{3+} 对铜绿微囊藻的生长有一定抑制作用。

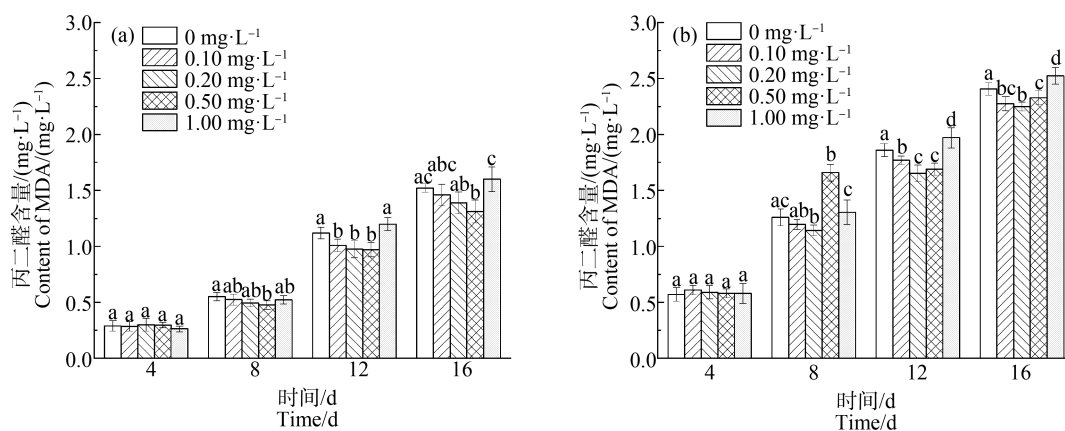


图7 不同浓度 La^{3+} 处理下丙二醛(MDA)含量变化

注:(a)对照组;(b)缺磷组。

Fig. 7 Malondialdehyde (MDA) content under different La^{3+} treatments

Note: (a) Control group; (b) Phosphorus deficiency group.

表 1 生理毒理指标相关性
Table 1 Correlation of physiological and toxicological indexes

	生物量 Biomass	叶绿素 <i>a</i> 含量 Content of chlorophyll <i>a</i>	可溶性蛋白含量 Content of soluble protein	CAT 活性 Activity of CAT	POD 活性 Activity of POD	MDA 含量 Content of MDA	可溶性糖含量 Content of soluble sugar
生物量 Biomass	1						
叶绿素 <i>a</i> 含量 Content of chlorophyll <i>a</i>	0.875*	1					
可溶性蛋白含量 Content of soluble protein	0.883*	0.903**	1				
CAT 活性 Activity of CAT	0.936**	0.850*	0.880*	1			
POD 活性 Activity of POD	0.965**	0.927**	0.929**	0.948**	1		
MDA 含量 Content of MDA	0.918**	0.729*	0.721*	0.905**	0.868*	1	
可溶性糖含量 Content of soluble sugar	-0.744*	-0.729*	-0.781*	-0.744*	-0.752*	-0.655*	1

注:**在 0.01 水平(双侧)上显著相关;*在 0.05 水平(双侧)上显著相关。
Note: **significant correlation at 0.01 level (bilateral); *significant correlation at 0.05 level (bilateral).

(2)在缺 P 的胁迫下,低浓度 La^{3+} (0.10 ~ 0.20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)对铜绿微囊藻的生长有一定促进作用,表现为藻密度、蛋白质、叶绿素 *a* 和抗氧化酶活性的明显增加,可溶性糖含量降低,铜绿微囊藻生长状态良好,稀土 La^{3+} 对藻细胞的抗氧化体系表现出一定的保护作用;高浓度 La^{3+} (0.50 ~ 1.00 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)对铜绿微囊藻的生长有破坏作用,表现为藻密度、蛋白质、叶绿素 *a* 和抗氧化酶活性的下降,可溶性糖含量增加,抗氧化平衡遭到破坏,膜脂过氧化严重,藻类代谢处于较低水平。

(3)在缺 N 组中,不同浓度 La^{3+} 对铜绿微囊藻的生长均表现为抑制作用,铜绿微囊藻不能正常生长。

(4)在一定时间、适宜 La^{3+} 浓度内,P 缺乏与否,稀土刺激生物效应同样存在,但缺 P 会降低铜绿微囊藻对 La^{3+} 浓度和 La^{3+} 处理时间的耐受能力。

本研究表明,在贫营养水体中,La 对铜绿微囊藻产生的“Hormesis”现象在实际工程中有重要的应用意义。它可以为稀土在实际工程应用上的使用量提供合理依据,并由稀土元素引发的潜在环境事故提供一定理论依据;同时,也可据此推测稀土元素 La^{3+} 的输入可能引发贫营养水体发生藻类大量繁殖现象,但其更深层次的影响机制还有待进一步研究。

通讯作者简介:王应军(1972—),男,博士,教授,主要研究方向为水环境污染。

参考文献 (References):

[1] 周云龙, 于明. 水华的发生、危害和防治[J]. 生物学通报, 2004, 39(6): 11-14

[2] 袁侃, 毛献忠, 陶益, 等. UV-C 辐照抑制铜绿微囊藻生长的动态实验研究[J]. 环境科学, 2010, 31(2): 310-317
Yuan K, Mao X Z, Tao Y, et al. Dynamic experiment on controlling of *Microcystis aeruginosa* by UV-C irradiation [J]. Environmental Science, 2010, 31(2): 310-317 (in Chinese)

[3] 许可. 不同氮磷浓度对普通小球藻生长及光合作用的影响研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018: 33-35
Xu K. Research on the growth and photosynthesis of *Chlorella vulgaris* under different nitrogen and phosphorus concentrations [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018: 33-35 (in Chinese)

[4] 王应军, 伍钧, 金航标, 等. 稀土元素钆对铜绿微囊藻生长和生理特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(7): 1261-1267
Wang Y J, Wu J, Jin H B, et al. Effects of neodymium on the growth and physiological characteristics of *Microcystis aeruginosa* [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(7): 1261-1267 (in Chinese)

- [5] 魏静, 林莉, 潘雄, 等. 不同环境胁迫因子对藻类分子生物学特性的影响研究进展[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(4): 14-24
Wei J, Lin L, Pan X, et al. Research progress about the effects of different environmental stress factors on algae in molecular biology [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(4): 14-24 (in Chinese)
- [6] Zhang L J, Yang T W, Gao Y S, et al. Effect of lanthanum ions (La^{3+}) on ferritin-regulated antioxidant process under PEG stress [J]. Biological Trace Element Research, 2006, 113(2): 193-208
- [7] 詹鸿峰, 王华生, 潘禹, 等. 离子型稀土矿废水检测与分析[J]. 中国稀土学报, 2020, 38(4): 550-556
Zhan H F, Wang H S, Pan Y, et al. Measurement and analysis of ion-type rare earth mine wastewater [J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2020, 38(4): 550-556 (in Chinese)
- [8] 宋雪梅. 外源稀土对凤眼莲生长及水体富营养化影响研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2014: 55
Song X M. The influence of rare earth on the growth of *Eichhornia crassipes* and the eutrophication [D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2014: 55 (in Chinese)
- [9] 张杰, 黄永杰, 刘雪云. 镧对镉胁迫下水稻幼苗生长及生理特性的影响[J]. 生态环境, 2007, 16(3): 835-841
Zhang J, Huang Y J, Liu X Y. Effects of La on growth and some physiological characteristics of rice seedlings under Cd stress [J]. Ecology and Environment, 2007, 16(3): 835-841 (in Chinese)
- [10] Xu C M, Zhao B, Wang X D, et al. Lanthanum relieves salinity-induced oxidative stress in *Saussurea involucre* [J]. Biologia Plantarum, 2007, 51(3): 567-570
- [11] 黄晓华, 周青. 镧对水培菜豆和玉米幼苗镉胁迫的缓解作用[J]. 中国稀土学报, 2005, 23(2): 245-249
Huang X H, Zhou Q. Protective effects of lanthanum on bean and corn under cadmium stress [J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2005, 23(2): 245-249 (in Chinese)
- [12] 杜金戈, 王应军, 武阳, 等. 钇(Y^{3+})对缺氮、缺磷胁迫下铜绿微囊藻生长和生理特性及藻毒素释放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(8): 1500-1507
Du J G, Wang Y J, Wu Y, et al. Effects of yttrium on growth and physiological characteristics and microcystin release of *Microcystis aeruginosa* under nitrogen and phosphorus deficiency [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(8): 1500-1507 (in Chinese)
- [13] 张信连, 杨维东, 刘洁生, 等. 稀土元素生物效应中的 hormesis 现象[J]. 生物技术, 2004, 14(6): 82-84
- [14] 吕旭阳, 张雯, 杨阳, 等. 分光光度法测定小球藻数量的方法研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(23): 11104-11105
Lv X Y, Zhang W, Yang Y, et al. Methodological research on measuring *Chlorella* quantity by spectrophotometry [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(23): 11104-11105 (in Chinese)
- [15] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2002: 89-93
- [16] 周永欣, 章宗涉. 水生生物毒性试验方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1989: 54-58
- [17] Deng Y, Wang W, Yu P F, et al. Comparison of taurine, GABA, Glu, and Asp as scavengers of malondialdehyde *in vitro* and *in vivo* [J]. Nanoscale Research Letters, 2013, 8(1): 190
- [18] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 267-268
- [19] Li H X, Xiao Y, Cao L L, et al. Cerebroside C increases tolerance to chilling injury and alters lipid composition in wheat roots [J]. PLoS One, 2013, 8(9): e73380
- [20] Liu L, Liu Y, Cui J, et al. Oxidative stress induces gastric submucosal arteriolar dysfunction in the elderly [J]. World Journal of Gastroenterology, 2013, 19(48): 9439-9446
- [21] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 1990: 160-162
- [22] 岳冬梅, 李洁, 肖琳. 营养盐恢复对氮磷饥饿铜绿微囊藻生长的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(11): 4220-4227
Yue D M, Li J, Xiao L. Nutrients recovery on the growth of nitrogen and phosphorus starved *Microcystis aeruginosa* [J]. Environmental Science, 2016, 37(11): 4220-4227 (in Chinese)
- [23] 崔宜淳. 稀土元素—镧、钕对两种淡水浮游藻类增殖的影响[D]. 北京: 首都师范大学, 2007: 34-38
Cui Y C. Effects of La/Nd on the cell multiplication of two phytoplanktons in fresh water [D]. Beijing: Capital Normal University, 2007: 34-38 (in Chinese)
- [24] 吕赞, 王应军, 冷雪, 等. 稀土铈对水华鱼腥藻生理特性及藻毒素释放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(9): 1677-1683
Lv Y, Wang Y J, Leng X, et al. Effects of cerium on physiological characteristics and microcystins release of *Anabaena flos-aquae* [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(9): 1677-1683 (in Chinese)
- [25] 杨维东, 刘洁生, 王艇, 等. $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ 对大鼠内脏组织和大脑一氧化氮及合成酶的影响[J]. 稀土, 2000, 21(2): 46-48
Yang W D, Liu J S, Wang T, et al. Effect of $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ on the induction of NO and NOS in rats [J]. Chinese Rare Earths, 2000, 21(2): 46-48 (in Chinese)

- [26] Hu H W, Deng Y Y, Fan Y F, et al. Effects of artificial sweeteners on metal bioconcentration and toxicity on a green algae *Scenedesmus obliquus* [J]. Chemosphere, 2016, 150: 285-293
- [27] Chen W J, Gu Y H, Zhao G W, et al. Effects of rare earth ions on activity of RuBPCase in tobacco [J]. Plant Science, 2000, 152(2): 145-151
- [28] 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 C E, Bi Y H, Hu Z Y. 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 (in Chinese)
- [29] Sánchez F J, Manzanares M, de Andres E F, et al. Turgor maintenance, osmotic adjustment and soluble sugar and proline accumulation in 49 pea cultivars in response to water stress [J]. Field Crops Research, 1998, 59(3): 225-235
- [30] 王琼, 苏智先, 张素兰, 等. 慈竹构件和分株水平的可溶性糖含量研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(11): 1994-1998
Wang Q, Su Z X, Zhang S L, et al. Soluble sugar content of clonal plant *Neosinocalamus affinis* at module and ramet levels [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(11): 1994-1998 (in Chinese)
- [31] 丁海东, 万延慧, 齐乃敏, 等. 镉和锌对番茄幼苗抗氧化酶活性的影响[J]. 仲恺农业技术学院学报, 2004, 17(2): 37-41, 46
Ding H D, Wan Y H, Qi N M, et al. Effects of cadmium and zinc on activities of antioxidant enzymes in tomato seedlings [J]. Journal of Zhongkai Agrotechnical College, 2004, 17(2): 37-41, 46 (in Chinese)
- [32] 计汪栋, 施国新, 杨海燕, 等. 铜胁迫对竹叶眼子菜叶片生理指标和超微结构的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2727-2732
Ji W D, Shi G X, Yang H Y, et al. Effects of Cu^{2+} stress on leaf physiological indice and ultrastructure of *Potamogeton malaianus* [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(12): 2727-2732 (in Chinese)
- [33] 马成仓, 李清芳. Ca^{2+} 对汞毒害下的小麦种子萌发代谢的影响[J]. 农业环境保护, 2000, 19(3): 173-175
Ma C C, Li Q F. Effect of Ca^{2+} on germination metabolism of wheat seed under mercury poisoning condition [J]. Agro-Environmental Protection, 2000, 19(3): 173-175 (in Chinese)
- [34] 杨居荣, 贺建群, 蒋婉茹. Cd 污染对植物生理生化的影响[J]. 农业环境保护, 1995, 14(5): 193-197
Yang J R, He J Q, Jiang W R. Effect of Cd pollution on the physiology and biochemistry of plant [J]. Agro-Environmental Protection, 1995, 14(5): 193-197 (in Chinese)
- [35] 杨燕生, 刘德, 龙白娟, 等. 镉对小麦幼苗素质、蛋白质及钙调素水平的影响[J]. 稀土, 1997, 18(2): 63-65
- [36] 王应军, 陈燕, 金航标, 等. 稀土 Y^{3+} 对铜绿微囊藻生长和生理特性的影响[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(4): 2248-2251
Wang Y J, Chen Y, Jin H B, et al. Effects of yttrium (Y^{3+}) on physiological and biochemical characteristics of *Microcystis aeruginosa* [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(4): 2248-2251 (in Chinese)
- [37] 胡勤海, 管丽莉, 叶兆杰. 稀土元素对小球藻生长的影响[J]. 环境科学, 1996, 17(2): 37-38
Hu Q H, Guan L L, Ye Z J. Effects of rare-earth elements on growth and reproduction of *Chlorella pyrenoides* [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 1996, 17(2): 37-38 (in Chinese)
- [38] 袁婷, 樊驰, 王正银, 等. 钾肥对镉污染土壤中白菜生长与镉含量及保护酶活性的影响[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(3): 383-390
Yuan T, Fan C, Wang Z Y, et al. Effect of application of potassium fertilizers on the cabbage growth in Cd polluted soil and its protective enzyme activity in the cabbage content [J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(3): 383-390 (in Chinese)
- [39] 李合生. 现代植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 106-118
- [40] Pinto E, Sigaud-Kutner T C S, Leitao M A S, et al. Heavy metal-induced oxidative stress in algae [J]. Journal of Phycology, 2003, 39(6): 1008-1018
- [41] 刘璐, 闫浩, 夏文彤, 等. 镉对铜绿微囊藻和斜生栅藻的毒性效应[J]. 中国环境科学, 2014, 34(2): 478-484
Liu L, Yan H, Xia W T, et al. Toxic effect of cadmium on *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus obliquus* [J]. China Environmental Science, 2014, 34(2): 478-484 (in Chinese)
- [42] 杨舒怡, 陈晓阳, 惠文凯, 等. 逆境胁迫下植物抗氧化酶系统响应研究进展[J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2016, 45(5): 481-489
Yang S Y, Chen X Y, Hui W K, et al. Progress in responses of antioxidant enzyme systems in plant to environmental stresses [J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University: Natural Science Edition, 2016, 45(5): 481-489 (in Chinese)
- [43] 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活性的影响[J]. 四川农业大学学报, 2011, 29(1): 108-113

- Wang Y J, Jin H B, Chen Y, 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 (in Chinese)
- [44] 张春静, 王湧, 金鹏康. 重稀土元素对小球藻生长状态的影响[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(6): 2445-2451
- Zhang C J, Wang Y, Jin P K. Influence of heavy rare earth elements on the growing status of *Chlorella pyrenoidosa* [J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(6): 2445-2451 (in Chinese)
- [45] 李天翠, 熊雄, 毕永红, 等. 激光对铜绿微囊藻的抑制效果及机理研究[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(12): 72-76
- Li T C, Xiong X, Bi Y H, et al. Laser inhibition effects on *Microcystis aeruginosa* and mechanisms [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 38(12): 72-76 (in Chinese)
- [46] Hejl A M, Koster K L. Juglone disrupts root plasma membrane H^+ -ATPase activity and impairs water uptake, root respiration, and growth in soybean (*Glycine max*) and corn (*Zea mays*) [J]. Journal of Chemical Ecology, 2004, 30(2): 453-471
- [47] 唐萍, 吴国荣, 陆长梅, 等. 凤眼莲根系分泌物对栅藻结构及代谢的影响[J]. 环境科学学报, 2000, 20(3): 355-359
- Tang P, Wu G R, Lu C M, et al. Effects of the excretion from root system of *Eichhornia crassipes* on the cell structure and metabolism of *Scenedesmus arcuatus* [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2000, 20(3): 355-359 (in Chinese)
- [48] 陈少裕. 膜脂过氧化对植物细胞的伤害[J]. 植物生理学通讯, 1991, 27(2): 84-90
- Chen S Y. Injury of membrane lipid peroxidation to plant cell [J]. Plant Physiology Communications, 1991, 27(2): 84-90 (in Chinese) ◆