

文章编号:1005-0523(2019)02-0126-07

蓝藻对苦草生理指标的影响

沈云路¹,康彩霞^{1,2},童楨恭¹,戴星照³

(1. 华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌 330013;2. 江西省山江湖办开发治理委员会办公室,江西 南昌 330046;3. 江西省农业科学院,江西 南昌 330200)

摘要:为了探讨湖泊富营养化过程中沉水植物产生的生理反应,选择苦草为研究对象,通过室内模拟试验,研究了不同浓度蓝藻(在0,122,166 $\mu\text{g/L}$ 和222 $\mu\text{g/L}$)对其叶片和根部造成的生理影响。结果表明:苦草叶片可溶性蛋白含量随着蓝藻浓度升高而减少,同样苦草根部的根系过氧化氢酶(CAT),超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)比活性受到不同程度的抑制。苦草叶片中的SOD比活性在第20 d显著高于10 d,而POD,CAT酶的比活性随着蓝藻浓度增加而增加,以适应氧化胁迫。丙二醛(MDA)在水中叶绿素a浓度为222 $\mu\text{g/L}$ 时显著增加,苦草在蓝藻叶绿素a浓度 $>122 \mu\text{g/L}$ 时,苦草通过调节其抗氧化防御系统去除过量活性氧,以适应蓝藻浓度引起的氧化胁迫。这为控制太湖中的蓝藻浓度和恢复苦草的生物种群提供了科学的理论依据。

关键词:赤潮;生理响应;沉水植物的恢复;苦草

中图分类号:X171

文献标志码:A

过去经济的快速增长,伴随而来的入湖污染物的增加,水位变化导致水生植物减少,使水体富营养化加重。富营养化水体中的藻类水华已经成为一个世界性的生态问题。太湖是中国第三大淡水湖泊,位于长江三角洲地区,面积2 338 km^2 ,平均水深2 m,2010—2012年的入湖水量为109~119亿 m^3 ^[1]。太湖蓝藻水华的爆发自20世纪80年代初逐渐开始,1990—2007年6月蓝藻爆发,2007年7月—2015年12月仅初步控制蓝藻爆发^[1]。太湖富营养化导致水生植物的可栖息面积不断减少,许多植物种类多样性减少,有些甚至灭绝。

富营养化水体中的水生植物,特别是沉水植物的消失中是由各种因素引起的。在富营养化水体中,蓝藻是藻类水华中的优势物种,蓝藻水华的爆发不仅能够使水体水质恶化,其中一些产毒藻类还会产生大量蓝藻毒素,对水生生物产生重要影响^[2]。蓝藻漂浮在水面引起遮光效应,抑制沉水植物的光合作用,并造成的缺氧水体会影响水生生物的生存。它们对沉水植物具有化感作用,抑制其生长和光合产氧过程。除了这类影响,当他处于水质腐化期藻类繁殖旺盛时期也会进一步降低水质。这些有害的影响包括溶解氧的耗尽和营养物质的急剧增加,这反过来加剧了藻类繁殖对沉水植物不利影响^[3]。

当植物处在逆境中时,其体内会产生大量的活性氧自由基,而活性氧自由基会破坏植物的蛋白质、核酸等,导致系统功能紊乱,严重时会导致植物细胞死亡。蓝藻对沉水植物的胁迫机制可追溯到沉水植物体内ROS的形成。活性氧(ROS),包括超氧阴离子(O_2^-),过氧化氢(H_2O_2)和羟基自由基($\cdot\text{OH}$),形成于许多大型植物正常细胞生理代谢过程^[4]。正常情况下,植物体内的活性氧(ROS)不能对植物造成损害,因为植物具有活性

收稿日期:2018-09-09

基金项目:江西省科学技术厅基金项目(20171BAB216052)

作者简介:沈云路(1994—),男,硕士研究生,研究方向为环境生态学。

通讯作者:童楨恭(1972—),男,教授,博士,研究方向为给水处理理论与技术。

氧清除系统,使活性氧的产生和清除处于动态平衡中。而在逆境胁迫下,这种平衡被打破,活性氧大量产生。活性氧攻击膜系统,造成膜脂组分改变,膜上多种酶的构向发生改变,膜选择透性丧失,电解质和某些小分子有机物质外泄;线粒体和叶绿体的形态结构受到破坏,光合作用和呼吸代谢紊乱,严重时会导致植物死亡。为了防止由 ROS 引起的细胞损伤,植物中的细胞形成了一个协作良好的抗氧化系统由各种抗氧化酶组成,如超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)。SOD 的功能是将超氧阴离子转化为过氧化氢,然后通过 POD 和 CAT 将其还原为水和氧。SOD、CAT 和 POD 通常被用作检测沉水植物受到胁迫程度的生理指标。丙二醛(MDA)是脂质过氧化的主要降解产物,通常被用作生物系统中氧化应激反应的指示剂。此外,大多数可溶性蛋白是参与植物各种代谢的酶。因此,可溶性蛋白质含量可用于指示影响植物受到胁迫下的生理效应^[5]。

苦草是一种多年生沉水植物,广泛分布于中国一些水域。该植物以其适应能力强、分布广、易采收等优点而被选择。在中国太湖,苦草目前的研究主要集中在纯污染物对沉水植物的非生物效应上,如微囊藻毒素和铜离子对苦草的影响^[6],较少研究由蓝藻等生物因素引起的沉水植物的损伤机理。本研究采用池塘自然藻类和天然长势良好的苦草。本研究的目的是论证不同蓝藻浓度胁迫下苦草的生理响应。这些结果将为太湖富营养化湖泊中的氧化胁迫的发生提供理论依据,并有助于沉水植物的恢复。

1 材料和方法

1.1 材料

从太湖中取长势良好的苦草,在去除泥土和老叶后,将取样的植物彻底洗净并在脱氯自来水中培育 3 d。只有长势良好的,个体均匀的植物被选择用于实验。实验池水为:115 $\mu\text{g/L}$ 叶绿素 a,0.033 mg/L NH_4^+-N ,0.058 mg/L NO_2^--N ,1.251 mg/L NO_3^+-N ,0.094 mg/L $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$,池中微囊藻毒素(MCs)的浓度为 0.35 $\mu\text{g/L}$,蓝藻细胞占藻类细胞的 99%,其中,96%是微囊藻属。

1.2 实验设计

将实验的苦草每个玻璃杯中中放置约 200 ± 5 克鲜重的植物(FW),平均种 32 棵。将实验组的 4 个容器分别进行 4 种不同浓度的天然蓝藻的处理。在每个处理中蓝藻的初始浓度以水中叶绿素 a 的浓度表示。根据太湖的叶绿素 a 浓度,浓缩藻类用于调节每种处理中的蓝藻浓度。设计 4 个处理组 A1、A2、A3 和 A4 叶绿素浓度分别为 0,122,166 和 222 $\mu\text{g/L}$,设 3 个平行。通过 0.45 μm 微孔滤膜对各处理组中添加蓝藻前的天然水进行过滤。将玻璃杯中采用 ψ 为 10%的 Hoagland 营养液进行驯化培养 10 d 苦草置于体积为 40 L (30 cm \times 30 cm \times 45 cm)的强化玻璃罐中。除 A1 添加 30 L 蒸馏水外,每个罐都装满了来自池塘的 30 L 天然水,此时按照 4 个组设计浓度添加蓝藻。4 个容器置于恒温为 25 $^{\circ}\text{C}$,光照强度为 3×400 Lux,光周期为:12 h(光);12 h(暗)的条件下进行 10 d 实验。

1.3 测定方法

通过 0.45 μm 微孔滤膜对组中的天然水进行过滤,然后用离子色谱仪对水中 NO_2^--N , NH_4^+-N , NO_3^--N , $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的浓度进行检测,阴阳离子分别采用 ICS-2100 型离子色谱仪和 ICS-1100 型离子色谱仪进行检测。

SOD,POD,CAT,可溶性蛋白质酶液的制备:取植株相同叶位的鲜叶片,用蒸馏水洗净,揩干,用于测定各项生理指标。SOD,POD 酶液制备时取材于预冷研钵中,加入 pH 值为 7.8 的磷酸缓冲液 0.05 mol/L,冰浴下研磨成匀浆,10 000 r/min 低温(4 $^{\circ}\text{C}$)离心 20 min,上清液即为所需要的酶液。

POD 的测定:采用愈创木酚氧化法^[7]。

MDA 的测定:采用硫代巴比妥酸(TBA)法^[8]。

叶绿素的测定:采用丙酮提取法、分光光度法测定^[9]。

SOD 的测定:采用亚硝酸法^[9]。

CAT的测定:采用紫外吸收法^[10]。

可溶性蛋白质含量的测定:采用 Folin-酚法^[10]。

1.4 数据分析

数据使用平均±标准差(SD)。采用单因素方差分析和 Dunnett T 检验进行统计学分析。

2 结果

2.1 实验水箱水质变化

在实验中,水的 pH 值从 7.69 变为 9.79。与初始值相比,实验组溶液中的叶绿素 a 浓度在 10 d 内有不同程度的下降(表 1)。

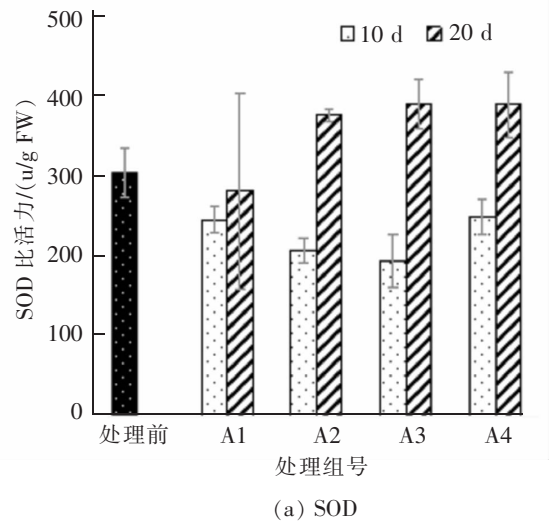
2.2 苦草叶片的生理指标

图 1 显示了 A、B 两组处理后叶片中 SOD、CAT 和 POD 活性的变化。20 d 时与处理前苦草的 SOD 活性相比,除 A1 处理组略微下降外,SOD 活性随着蓝藻浓度的增加而增加(图 1)。在高浓度的天然蓝藻胁迫下,在苦草叶中观察到 CAT 和 POD 活性的呈上升趋势(图 1),分别在 A4 和 A3 组最为显著。测定了苦草叶片中 MDA 的含量,并将其作为氧化胁迫的标志,与处理前的植株相比,除处理 A4 外,其余各植株的 MDA 含量均保持不变。处理后的第十天 A4 叶片中 MDA 含量从 2.97 $\mu\text{mol/g}$ FW 增加到 3.64 $\mu\text{mol/gFW}$ (图 2),除处理 A1(图 2)轻微下降外,苦草叶可溶性蛋白含量显著降低。与处理前的苦草叶可溶性蛋白含量相比,A4 的可溶性蛋白含量下降了 47.2%(图 2)。

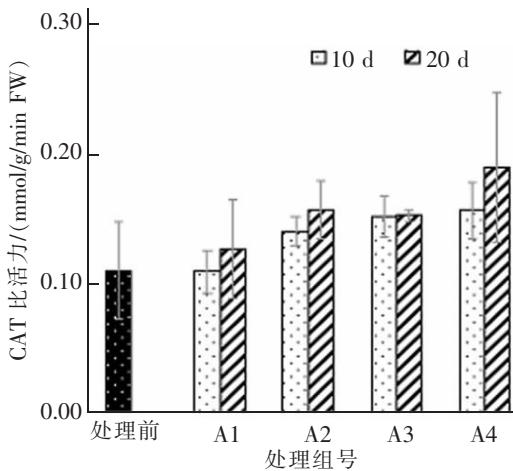
表 1 实验水质变化表

Tab.1 Experimental water quality change

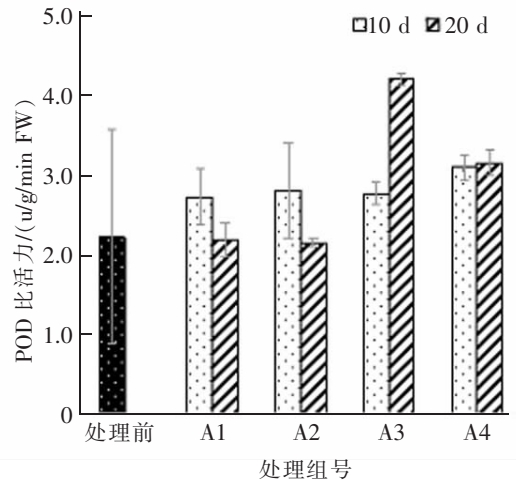
时间/d	叶绿素 a 浓度/($\mu\text{g/L}$)			
	A1	A2	A3	A4
10	0	122	166	222
20	0	76	126	41



(a) SOD



(b) CAT



(c) POD

图 1 在不同蓝藻浓度处理 10 d 后苦草叶中 SOD、CAT 和 POD 活性的变化

Fig.1 Changes of SOD, CAT, and POD activities in leaves of *Vallisneria Asiatca* after 10 d, exposure to different cyanobacterial concentrations

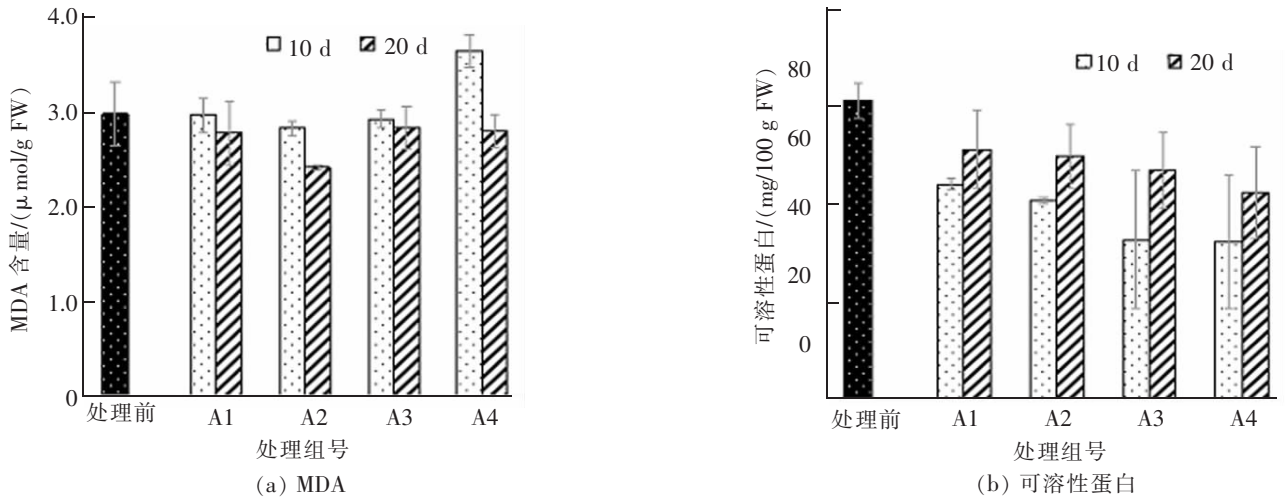
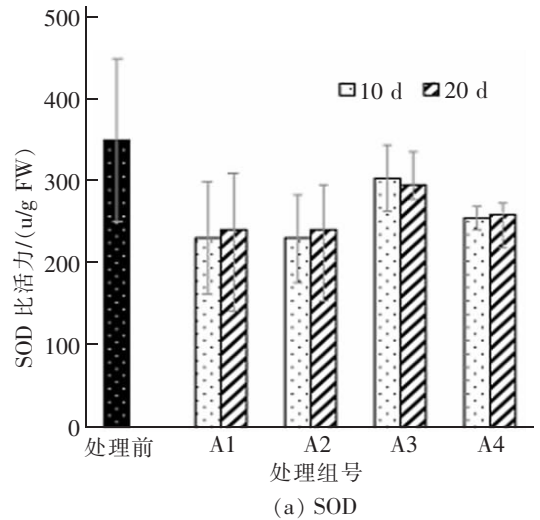


图 2 在不同蓝藻浓度处理 10 d 后苦草叶中 MDA 和可溶性蛋白的变化

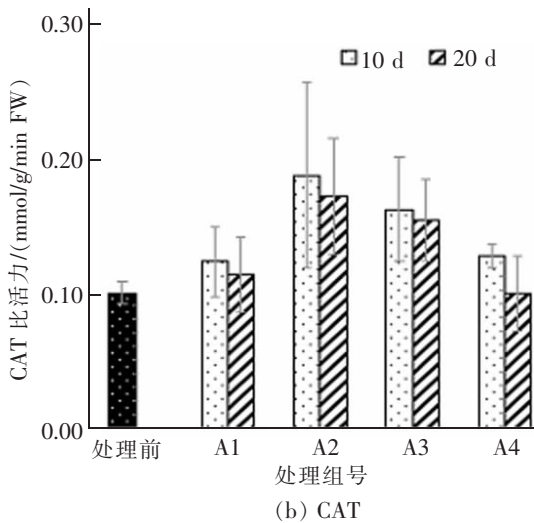
Fig.2 Changes of MDA and soluble protein contents in leaves of *Vallisneria Asiatica* after 10 d, exposure to different cyanobacterial concentrations

2.3 苦草根部分生理变化

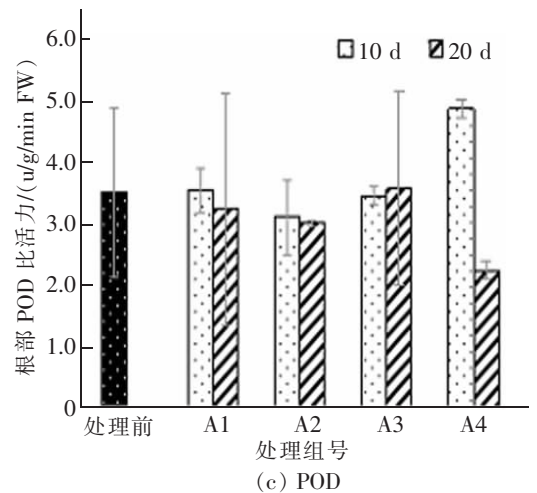
在所有的天然蓝藻浓度水平上发现苦草的根中的 SOD 活性无显著差异(图 3)。苦草 A2 组中 CAT 活性分别提高了 90%,之后下降了(图 3)。除处理组 A4(图 3)外,与处理之前对照相比各处理后的苦草 POD 活性均无显著变化。在 A3、A4(图 4)的高浓度蓝藻中的苦草根中可溶性蛋白和 MDA 含量显著增加 ($P < 0.05$)。



(a) SOD



(b) CAT



(c) POD

图 3 在不同蓝藻浓度处理 10 d 后苦草根部分 SOD、CAT 和 POD 活性的变化

Fig.3 Changes of SOD, CAT, and POD activities in roots of *Vallisneria Asiatica* after 10 d, exposure to different cyanobacterial concentrations

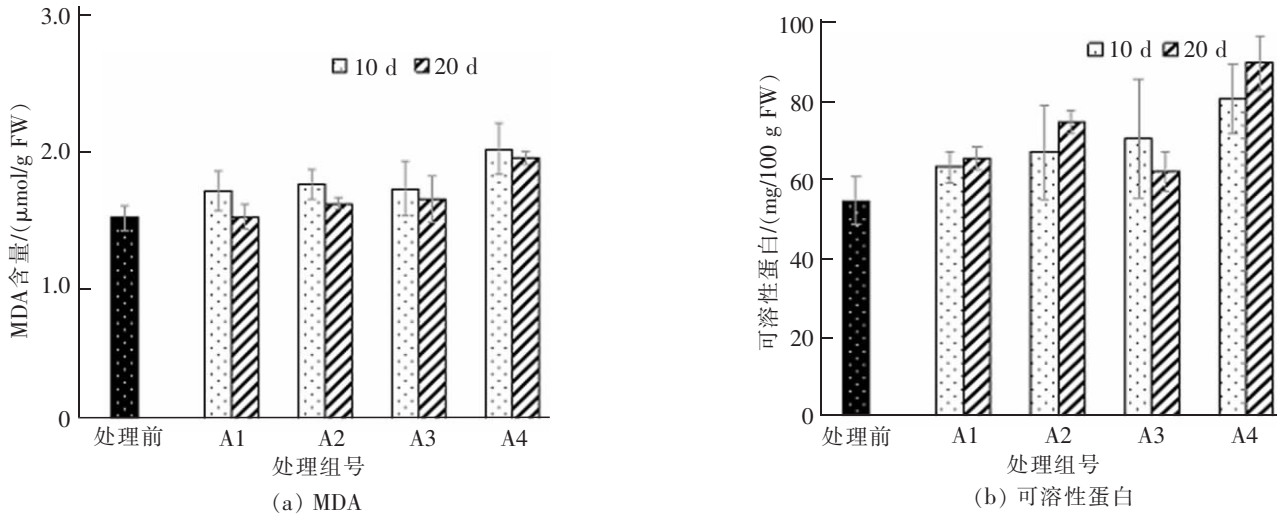


图4 在不同蓝藻浓度处理 10 d 后苦草根 MDA 和可溶性蛋白的变化

Fig.4 Changes of MDA and soluble protein contents in roots of *Vallisneria Asiatica* after 10 d, exposure to different cyanobacterial concentrations

3 讨论

藻类是自然界中的一个共生体,蓝藻细胞占藻类总数的 99%左右,微囊藻种类占 96%。我们利用天然藻群落来研究植物在蓝藻生物胁迫下的响应,来研究苦草的一系列有效的生理防御反应,这将为太湖富营养化湖泊中苦草的恢复提供借鉴意义。苦草可以生长的 pH 范围为 4~12,但其生长的适宜范围是 6~10^[11]。在实验过程中,水的 pH 值从 7.69 变化到 9.79,对苦草生长没有造成不利影响。高浓度的天然蓝藻是影响苦草生理功能的主要因素。众所周知,当蓝藻浓度增加到一定水平时,它们会影响光照条件、产生毒素、耗尽溶解氧和释放有机物,这些都对水生植物的生长有害^[12]。例如,宋玉芝等对伊乐藻的研究表明,随着附着藻类的生物量的增加,伊乐藻的生物量、叶绿素含量和光合作用速率均显著下降^[13]。在实验中,当蓝藻浓度超过 122 $\mu\text{g}/\text{L}$ 时,苦草处于氧化胁迫状态时,随着蓝藻浓度的进一步增加,所有的负面影响都会增加。

研究可知,植物通过激活抗氧化机制来响应非生物和生物胁迫。氧化胁迫与在生物和非生物胁迫下的积累大量的活性氧有关^[14-15]。对于植物而言,只有在几种抗氧化酶协同作用下才能生存,并且提供良好的防御系统来维持 ROS 的动态平衡^[16]。

SOD 在保护植物免受氧化损伤和调节植物的生理代谢方面起着关键作用^[17]。本试验与处理前的植株相比,除 A1,其他处理均随着时间推移叶片中 SOD 活性上升,而根部 SOD 下降,根部所受氧化损伤更为严重。太湖梅梁湾沉水植物叶片中的 SOD 活性也很低^[18],其透明度很低。据报道,当超氧化物自由基的生成量超过 SOD 对其清除能力时,超氧自由基和其它氧自由基可使 SOD 失活^[19]。此外,在沉水植物中 SOD 活性低也会损害 ROS 的清除系统,通过氧化胁迫引起植物损伤。CAT 和 POD 是植物防御系统中的重要酶,可以将植物细胞中的过氧化氢转化为水和氧,没有一组处理组中 CAT 和 POD 活性显著提高。苦草的叶片中 SOD 的失活导致超氧化物自由基转化为过氧化氢,从而不能激活 CAT 和 POD。

苦草根中 CAT 和 POD 活性增加的结果也证明了高浓度的蓝藻对苦草造成的氧化胁迫。抗氧化酶的升高表明植物中正在进行的解毒过程。然而,在苦草的根部随着蓝藻浓度的升高,CAT 活性先升高后降低。结果表明,一旦污染加重,植物中抗氧化酶活性下降^[20]。处理组 A4 根系中 POD 活性显著增加,而其他处理组 POD 活性与处理前相比仍保持在相同水平。可以推测得出在蓝藻暴露下根中 POD 比 CAT 在根中更具耐受性。

植物中的几种抗氧化酶(SOD,CAT 和 POD)在胁迫条件下协同维持苦草体内活性氧的动态平衡。然而,一旦 ROS 的平衡在胁迫下被破坏,在过量 ROS 的攻击下发生脂质过氧化^[21]。因此,脂质过氧化的主要降解

产物 MDA 被用来检测脂质过氧化程度,是评价污染水平的有效指标^[22]。MDA 也对细胞膜和细胞内的许多生物分子造成相当大的损伤,本研究中,在 A4 处理蓝藻胁迫下,MDA 含量显著增加。叶片中高 MDA 含量可归因于 SOD 和不敏感 CAT 和 POD 的降低,而根系中高 MDA 含量可能是由于蓝藻中高浓度的 SOD 失活和 CAT 失活引起的。低酶活性有利于超氧化物自由基和过氧化氢的积累,这可能导致脂质过氧化。此外,大量研究表明,过量的活性氧导致了植物代谢紊乱,包括在环境胁迫下沉水植物叶片中可溶性蛋白质的减少,如铵的累积^[23-24]。苦草的可溶性蛋白质含量也随着蓝藻浓度的增加而呈下降趋势,另一方面表明蓝藻胁迫下植物的代谢能力与处理前相比有显著差异。然而,当叶绿素 a 浓度高于 166 $\mu\text{g/L}$ 时,苦草的根中可溶性蛋白质含量显著增加,这可能是因为从叶片向根部转移的可溶性蛋白是为了适应环境胁迫^[25]。

蓝藻胁迫下苦草的根中可溶性蛋白质含量增加,这是苦草对逆境的积极适应的标志。然而,这种适应是有限的,因为叶片与根生物量的比率较高,并且叶片中的可溶性蛋白和苦草的根对水中叶绿素 a 浓度的敏感性不同。因此,在苦草中出现了一系列负面效应。当藻叶绿素 a 增加到 122 $\mu\text{g/L}$ 时,蓝藻在氧化胁迫下产生氧化应激,这些负面效应包括叶片中 SOD 的失活、MDA 含量的增加和可溶性蛋白质含量的降低。

4 结论

1) 在同种藻类叶绿素叶浓度下的苦草叶片和根部比较,苦草叶片中 SOD,POD,CAT 相较于根部含量更高,且在起初随时间推移呈上升趋势。苦草叶(根)MDA 在低蓝藻叶绿素是变化不明显,在 A4 对照组中才显著提高。

2) 在同一时间采样的苦草样本,在不同藻类叶绿素叶浓度影响下,其叶 SOD 比活性第 10 d 下降后第 20 d 显著升高,CAT,POD 随着藻类叶绿素的浓度升高而升高,且在藻叶绿素 a 大于 166 $\mu\text{g/L}$ 时,苦草应对环境胁迫主要表现在 POD,CAT 含量明显增加,逆境下苦草中 POD,CAT 更为敏感,所以可将 POD,CAT 作为早期衡量苦草氧化胁迫的指示性生理指标。这是太湖富营养化湖泊的一个实例,在任何沉水植物生态修复工程中,藻类量的适当控制是必要的,以确保大型植物的健康生长。

参考文献:

- [1] 马建华,朱喜,胡明明,等. 太湖蓝藻爆发现状及继续治理[J]. 江苏水利,2017(3):21-27.
- [2] 薛庆举,苏小妹,谢丽强. 蓝藻毒素对底栖动物的毒理学研究进展[J]. 生态学报,2015,35(14):4570-4578.
- [3] 马健荣,邓建明,秦伯强,等. 湖泊蓝藻水华发生机理研究进展[J]. 生态学报,2013,33(10):3020-3030.
- [4] BOWLER C, MONTAGU M V, INZE D. Superoxide dismutase and stress tolerance[J]. Ann Rev Plant Physiol Plant Mol Biol 1992,43:83-116.
- [5] WANG C, ZHANG S H, WANG P F, et al. Metabolic adaptations to ammonia-induced oxidative stress in leaves of the submerged macrophyte Vallisneria spiralis(Lour.)[J]. Hara Aquat Toxicol, 2008, 87: 88-98.
- [6] JIANG J L, GU X Y, SONG R, et al. Microcystin-LR induced oxidative stress and ultrastructural alterations in mesophyll cells of submerged macrophyte Vallisneria spiralis(Lour.)[J]. Hara J Hazard Mater, 2011, 190:188-196.
- [7] 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,2000:164-165.
- [8] 孙卫红,王伟青,孟庆伟. 植物抗坏血酸过氧化物酶的作用机制、酶学及分子特征[J]. 植物生理学报,2005,41(2):143-147.
- [9] 张志良,瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2003.
- [10] 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,2002:120-121.
- [11] HE S Y, LI J X, WU Y T. Application of aquatic plant in lake eutrophication of the ecological restoration[J]. Water Resour. Prot, 2007, 23: 78-81.
- [12] LI D H, LI G B, CHEN W X, LIU Y D. Interactions between a cyanobacterial bloom(Microcystis)and the submerged aquatic plant Ceratophyllum demersum Kom[J]. Chin J Oceanol Limn, 2009, 27(1):38-42.
- [13] 宋玉芝,秦伯强,高光,等. 附着生物对沉水植物伊乐藻生长的研究[J]. 生态环境,2007,16(6):1643-1647.
- [14] MILLER G, SHULEV V, MITTLER R. 2008. Reactive oxygen signaling and abiotic stress[J]. Plant Physiol, 133:481-489.

- [15] PEUTHERT A, LAWTON L, PFLUGMACHER S. In vivo influence of cyanobacterial toxins on enzyme activity and gene expression of protein phosphatases in Alfalfa (*Medicago sativa*) [J]. *Toxicon*, 2008, 52: 84–90.
- [16] GE J, LI J J, ZHANG J, YANG Z. Time-dependent oxidative stress responses of submerged macrophyte *Vallisneria spiralis* seedlings exposed to ammonia in combination with microcystin under laboratory conditions [J]. *Bull Chin J Oceanol Limnol, Environ Contam Toxicol*, 2012, 89: 67–72.
- [17] BOWLER C, MONTAGU M V, INZE D. Superoxide dismutase and stress tolerance [J]. *Ann Rev Plant Physiol Plant Mol Biol*, 1992, 43: 83–116.
- [18] BLOOM A J, CHAPIN F S, MOONEY H A. Resource limitation in plants—an economic analogy [J]. *Annu Rev Ecol Syst*, 1985, 16: 363–392.
- [19] HAO A M, KUBA T, ISEVI Y, et al. Effects of copper ion on antioxidant function of *Vallisneria spiralis* [J]. *Ecol Civil Eng*, 2011, 14: 115–122.
- [20] YIN Y, WANG X R, SUN Y Y, et al. Bioaccumulation and oxidative stress in submerged macrophyte *Ceratophyllum demersum* L. upon exposure to pyrene [J]. *Environ Toxicol*, 2008, 23: 328–336.
- [21] LIAO B H, LIU H Y, ZENG Q R, et al. Complex toxic effects of acid rain on growth of kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.) [J]. *Environ. Intern*, 2005, 31: 891–895.
- [22] PFLUGMACHER S. Promotion of oxidative stress in the aquatic macrophyte *Ceratophyllum demersum* during biotransformation of the cyanobacterial toxin microcystin-LR [J]. *Aquat Toxicol*, 2004, 70: 169–178.
- [23] PEUTHERT A, PFLUGMACHER S. Influence of the cyanotoxin microcystin-LR on tocopherol in Alfalfa seedlings (*Medicago sativa*) [J]. *Toxicon*, 2010, 56: 411–417.
- [24] BRITTO D T, KRONZUCKER H J. NH⁴⁺ toxicity in higher plants: a critical review [J]. *Plant Physiol*, 2002, 159: 567–584.
- [25] CAO T, NI L Y, XIE P. Acute biochemical responses of a submerged macrophyte, *Potamogeton crispus* L., to high ammonium in an aquarium experiment [J]. *J Freshwater Ecol*, 2004, 19: 279–284.

Physiological Responses of *Vallisneria spiralis* to Different Concentrations of Cyanobacteria Under Oxidative Stress

Shen Yunlu¹, Kang Caixia^{1,2}, Tong Zhengong¹, Dai Xingzhao³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2. Office of the Mountain–River–Lake Development Committee of Jiangxi Province, Nanchang 330046, China;

3. Jiangxi Academy of Agricultural Science, Nanchang 330200, China)

Abstract: In order to study the physiological effects of different algal concentrations on their leaves and roots in eutrophic water, the experiment was designed to have 4 treatments, i.e. 0, 122, 166 $\mu\text{g/L}$ and 222 $\mu\text{g/L}$ of Chlorophyll a, and the physiological indexes between 0 d, 10 d, and 20 d of *Vallisneria spiralis* was compared. Results show that the leaves content of soluble protein was inhibited by cyanobacteria, the activity of SOD at 20 d was significantly higher than 10 d, and POD and SOD was inhibited in different degrees in roots. SOD, POD and CAT in leaves of *Vallisneria spiralis* had a rising trend with the increase of cyanobacteria concentration to adapt to oxidative stress. MDA increased significantly when the concentration of chlorophyll a (Chl a) was 222 $\mu\text{g/L}$ in water. When the chlorophyll concentration of the cyanobacteria was greater than 122 $\mu\text{g/L}$, the plant could adjust its antioxidant defense system to remove the excess active oxygen to adapt to the oxidative stress instead of cyanobacteria concentration. This provides a scientific theoretical basis for controlling cyanobacteria concentration in the eutrophic lakes of Taihu and restoring the biological population of *Vallisneria spiralis*.

Key words: red tide; physiological response; restoration of submerged macrophytes; *Vallisneria spiralis*