

doi: 10.7541/2018.102

生长素吲哚乙酸对铜绿微囊藻生理生化及产毒特性的影响

卿 纯¹ 张卉灵¹ 林毅青¹ 李 俊¹ 胡 婷² 邵继海¹

(1. 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128; 2. 湖南农业大学东方科技学院, 长沙 410128)

摘要: 为了探究生长素吲哚乙酸(IAA)对产毒铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)的影响, 从生长、光合色素含量、叶绿素光诱导荧光特征、脂质氧化和微囊藻毒素合成特性等方面, 研究了IAA对*M. aeruginosa* CHAB 6301生理生化及产毒的影响。结果表明, 在低浓度IAA(0.04和0.2 mg/L)条件下, 铜绿微囊藻生长、叶绿素含量、光合系统(PS II)电子传递效率及藻毒素含量均无明显变化, 藻蓝蛋白、别藻蓝蛋白和丙二醛(MDA)含量均低于对照。高浓度IAA(1和5 mg/L)能够促进细胞生长, 提高叶绿素含量, 但是抑制藻蓝蛋白和别藻蓝蛋白含量, 降低膜脂过氧化程度和细胞内藻毒素合成。综合各指标测定结果, 低浓度IAA对*M. aeruginosa* CHAB6301生长和光合作用影响不明显, 而高浓度IAA可促进藻细胞生长和光合作用, 增加微囊藻水华形成几率。

关键词: 吲哚乙酸; 铜绿微囊藻; 光合色素; 叶绿素荧光; 微囊藻毒素

中图分类号: Q938.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-3207(2018)04-0832-07

随着世界人口快速增加和工农业的快速发展, 大量生产、生活废水进入江河、湖泊, 使得水体富营养化。藻类过度繁殖形成淡水水体“水华”, 蓝藻水华及其引起的蓝藻毒素次生污染已成为全球关注的热点环境问题^[1]。近十多年来, 我国的三大湖泊太湖、滇池和巢湖及其他众多水体蓝藻水华频繁发生, 引起水生生态系统结构和功能的失衡, 并且直接或间接的影响到人类健康, 已成为我国目前和今后很长时期内面临的水环境问题^[2]。微囊藻属(*Microcystis*)是目前已知的遍布最广的淡水藻属, 在淡水生态系统和半咸水生态系统中均占有一席之地, 也是我国水体中的最主要水华蓝藻种类, 因其会产生对人类健康具有危害的微囊藻毒素而尤其受到高度关注^[3]。

植物可以分泌天然的内源物质来调控自身生长发育, 被称为植物激素。目前, 植物激素按其不同的功能被分为: 生长素(auxin)、赤霉素(GA)、细胞分裂素(CTK)、脱落酸(Abscisic acid, ABA)和乙烯(Ethylene, ETH)^[4]。生长素是最早被发现、使用最广泛的一类植物激素, 其化学本质是吲哚-3-乙酸(Indole-3-acetic acid, IAA), 是含有一个不饱和芳香

族环和乙酸侧链的内源激素, 在植物生长发育过程中起着十分重要的作用^[5]。生长素类激素在器官水平上, 可影响器官的生长、成熟和衰老^[6], 在细胞水平上, 可影响细胞的伸长、分裂和分化^[7]。生长素对植物生长发育的调控作用, 因其浓度、植物种类、器官和细胞的年龄不同而异, 且与根系生长发育密切相关^[8]。

生长素的大量施用可通过雨水冲刷、地表径流等途径进入河流、湖泊, 导致水体中浓度较高。据报道, 在工业废水中生长素浓度介于0.1—1 mg/L, 而在饮用水水源中浓度亦可达0—0.2 mg/L^[9, 10]。另一方面, 水生生态系统中物种数量庞大, 包含水生植物、藻类和细菌等。沉水植物根系寄生菌及浮游藻类也会向水体分泌生长素等物质, 在促进植物生长的同时又可对水生生物群落产生重大影响^[11]。植物激素对藻类的作用已有报道; 2, 4-二氯苯氧乙酸在低浓度下(0.50 mg/L)可促进小球藻和栅藻的生长, 而高浓度(≥ 4.0 mg/L)则表现为抑制作用^[12]; 类似的, 6-苄氨基嘌呤在低浓度时对绿色巴夫藻的生长有促进作用, 可是当浓度 ≥ 1 mg/L时可导致细胞死亡^[13]; GA₃可促进铜绿微囊藻PCC7806细胞的

收稿日期: 2017-10-20; 修订日期: 2018-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(31470511)资助 [Supported by the National Natural Science Foundation of China (31470511)]

作者简介: 卿纯(1993—), 女, 湖南湘潭人; 硕士研究生; 研究方向为环境微生物技术。E-mail: 584027069@qq.com

通信作者: 邵继海(1979—), 男, 湖北洪湖人; 副教授; 研究方向为环境微生物技术。E-mail: shao@hunau.net

生长,增加了叶绿素 a 、藻蓝蛋白和细胞可溶性蛋白的含量,但减少了水溶性碳水化合物的积累^[14];适当浓度IAA(<0.5 mg/L)亦可促进微拟球藻细胞生长^[15]。目前,植物激素对藻类影响研究多集中在促进可食用藻类生长,提高经济效益,而对于生态系统中产毒微囊藻的影响研究尚属空白。基于此,本文从微囊藻生理响应及产毒等方面研究了IAA对铜绿微囊藻的影响,研究结果为正确评价IAA在富营养化水体的生态效应提供了基础信息。

1 材料与方法

1.1 材料

试验选用的铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa* CHAB6301)由中国科学院水生生物研究所有害藻类学科组惠赠,该藻分离于洱海。微囊藻的培养基为BG-11完全培养基培养,光照培养箱条件为:光强30 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,温度(25 $\pm$ 1) $^{\circ}\text{C}$,光周期12h:12h (L:D)。吡啶乙酸(IAA)购自Solarbio公司。

1.2 方法

血根碱抑藻试验 用无菌水配置浓度为50 mg/L的吡啶乙酸母液。实验在250 mL的三角瓶中进行,分别取0、0.08、0.4、2、10 mL的吡啶乙酸母液加入到85 mL无菌的BG-11培养基中,再向其中加入5 mL用BG-11培养的处于对数生长期的*M. aeruginosa* CHAB6301,然后向各处处理加入无菌水,使其终体积为100 mL,各实验组体系吡啶乙酸最终浓度为0、0.04、0.2、1和5 mg/L, *M. aeruginosa* CHAB6301起始藻细胞浓度约为 4.30×10^6 个/mL。实验于第2、第4和第6天进行取样检测。藻细胞密度用血球计数板在显微镜下计数^[16]。

色素含量的测定 *M. aeruginosa* CHAB6301细胞内叶绿素(Chl. a)、类胡萝卜素(Carotenoid)浓度采用紫外可见光度计测定^[17]。取4 mL藻液于10 mL离心管中,在10000 $\times g$ 、4 $^{\circ}\text{C}$ 条件下离心10min,弃上清液,加入4 mL 80%的丙酮,于4 $^{\circ}\text{C}$ 静置24h。24h后取出待测样品,离心,收集上清液,用紫外可见分光光度计测定663、645和470 nm处的吸光度值。Chl. a 、类胡萝卜素浓度分别参照文献[18]中方法进行计算。

藻蓝蛋白和别藻蓝蛋白含量的测定 取适量的藻液在10000 $\times g$ 、4 $^{\circ}\text{C}$ 离心10min,离心后收集藻细胞并转移至陶瓷研钵中,加入少许石英砂并在液氮环境中研磨细胞至匀浆,匀浆再次离心,收集离心后的上清液,在波长620和650 nm下测吸光值,

用下列公式分别计算出藻蓝蛋白(PC)和别藻蓝蛋白(APC)含量^[19]。

$$\text{PC (mg/L)} = (A_{620} - 0.7 \times A_{650}) / 7.38$$

$$\text{APC (mg/L)} = (A_{680} - 0.19 \times A_{620}) / 5.65$$

叶绿素荧光的测定 *M. aeruginosa* CHAB6301叶绿素诱导荧光多项瞬态上升动力学用Handy-PEA (Handy-Plant Efficiency Analyser, Hansatech Instruments, UK)测定,每次取样2 mL,荧光测定前所有样品暗适应15min,光化光强度为3000 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,荧光瞬时上升曲线的记录时间为50 μs —1s,采样速率在前2ms之内是 10^5 次/s,2ms之后为 10^3 次/s^[20]。

测定的JIP参数,参照Strasser和Strasser的方法^[21]选取了表1中参数进行分析。

MDA的测定 取适量藻液进行离心,离心后收集细胞并转移至陶瓷研钵中,加入少量石英砂并在液氮环境中研磨细胞至匀浆,再次离心,收集上清粗酶液进行丙二醛(MDA)的测定。

丙二醛的测定采用硫代巴比妥酸法^[22],上清液分别在600、532和450 nm处测定吸光值,用下列公式计算丙二醛含量。

$$\text{MDA}(\mu\text{mol/L}) = 6.45 \times (A_{532} - A_{600}) - 0.56 \times A_{450}$$

藻细胞内毒素含量的测定 细胞内藻毒素(MC-LR)的提取与检测参照文献[23]中方法进行改良。取100 mL藻液于10000 $\times g$ 、4 $^{\circ}\text{C}$ 离心10min,弃上清。各样品中加入1.5 mL 80% 甲醇溶液,超声5min,摇床振荡1h。收集甲醇溶液过0.45 μm 有机滤膜,采用高效液相色谱(HPLC)进行检测。HPLC(Agilent 1200 series, 美国)配有 C_{18} 柱(Hypersil GOLD, 250 mm $\times$ 4.6 mm, 5 μm)和紫外检测器(G1314B),检测波长为238 nm,柱温35 $^{\circ}\text{C}$,流动相为甲醇:水(0.05% TFA)=45:55,流速为1 mL/min,线性梯度洗脱程序为:45%—90% 甲醇 20min; 90%—45% 甲醇1min; 45%甲醇,后运行4min。

表1 选取的JIP测定参数及其意义

Tab. 1 The JIP-test parameters selected quantifying PSII behavior

JIP测定参数 Parameters from the JIP test	参数意义 Means of parameter
$\phi P_0 = 1 - (F_0/F_M)$	最大光化学效率(在 $t=0$ 时)
$\phi E_0 = [1 - (F_0/F_M)] \cdot \psi_0$	用于电子传递的量子产额(在 $t=0$ 时)
$\psi_0 = 1 - V_j$	反应中心捕获的激子中用来推动电子传递到电子传递链中超过 Q_A 的其他电子受体的激子占用来推动 Q_A 还原激子的比率(在 $t=0$ 时)
$\phi D_0 = F_0/F_M$	用于热耗散的量子比率(在 $t=0$ 时)

数据分析 采用SPSS 13.0软件对实验数据进行统计分析,所有数据均采用平均值 $\pm$ 标准误差(Means $\pm$ SE)表示,采用ANOVA进行对实验结果进行方差分析,采用Tukey's法进行多重比较,以 $P<0.05$ 为差异显著性标准,以 $P<0.01$ 为差异极显著性标准。

2 结果

2.1 IAA对藻细胞生长的影响

由图1可知,在试验的第2天,各IAA处理的藻细胞密度和对照相比没有明显差异;到第4天,1 mg/L的IAA处理组的细胞密度和对照相比要高出5.26%。在试验的第6天,高浓度IAA(1和5 mg/L)处理组和对照组相比有显著的增长,分别高出26.22%和35.61%。

2.2 IAA对光合系统的影响

图2A显示了不同浓度IAA处理*M. aeruginosa* CHAB6301第2、第4、第6天Chl.*a*含量的变化。在试验的第2天,各浓度IAA的处理组Chl.*a*含量与对照组相比均没有明显变化。在试验的第4天,仅浓度为5 mg/L的处理组Chl.*a*含量比对照组的要高16.19%。到了试验第6天,各浓度处理组的Chl.*a*含量和对照组相比仍没有显著差别。

图2B显示了不同浓度IAA处理的*M. aeruginosa* CHAB6301在第2、第4、第6天类胡萝卜素含量的变化特征。在试验的第2、第4天,1和5 mg/L浓度的处理组类胡萝卜素含量和对照组相比有明显增加。而到第6天,所有IAA处理组单位细胞中类胡萝卜素均与对照组相比没有明显差异。

图2C显示了生长素IAA对*M. aeruginosa* CHAB6301藻蓝蛋白含量的影响。在试验的第2天,低浓度IAA(0.04、0.2和1 mg/L)处理组与对照组相比

较,藻蓝蛋白的含量没有显著差异;当IAA为5 mg/L时,该处理组藻蓝蛋白含量显著低于对照组,比空白对照减少21.03%。试验第4天,低浓度IAA(0.04和0.2 mg/L)处理组藻蓝蛋白含量与对照组相比仍没有显著差异,而1和5 mg/L IAA处理组藻细胞内的藻蓝蛋白受到显著抑制,其中IAA浓度为5 mg/L时微囊藻藻蓝蛋白含量最小,比对照组低了36.98%。第6天,各处理藻蓝蛋白含量变化和第2天的基本相同。

图2D显示生长素IAA对*M. aeruginosa* CHAB6301 别藻蓝蛋白含量的影响。在试验的第2天,各浓度实验组与空白对照组没有显著变化。第4天时IAA浓度为0.2、1和5 mg/L的实验组别藻蓝蛋白含量受到显著抑制,和对照组相比分别降低了28.15%、31.82%和39.04%。而到了第6天,各实验组与对照组相比没有显著差异。

图2E显示了试验第4天生长素IAA对*M. aeruginosa* CHAB6301 PSII能量流动分配比率的影响(第2和第6天各实验组数据无显著性差异,数据未展示)。在IAA胁迫后的第4天,当IAA浓度为0.04和0.2 mg/L时,3个PSII能量分配比率参数(ψ_0 、 ϕP_0 、 ϕE_0 、 ϕD_0)与对照相比均无显著差异;当IAA浓度达到1和5 mg/L时 ψ_0 、 ϕP_0 、 ϕE_0 显著高于对照,而 ϕD_0 显著低于对照。

2.3 IAA对藻膜脂过氧化程度的影响

由实验可知,藻细胞内MDA含量随着IAA浓度增加而降低(图3)。处理后第2天,浓度为5 mg/L的处理组MDA含量最低,相对对照组降低了26.05%。处理后第4天,除了浓度为0.04 mg/L的处理组相比对照组没有显著变化外,其他处理组皆出现显著降低的现象。处理后第6天,各IAA浓度处理组MDA含量皆显著低于对照。

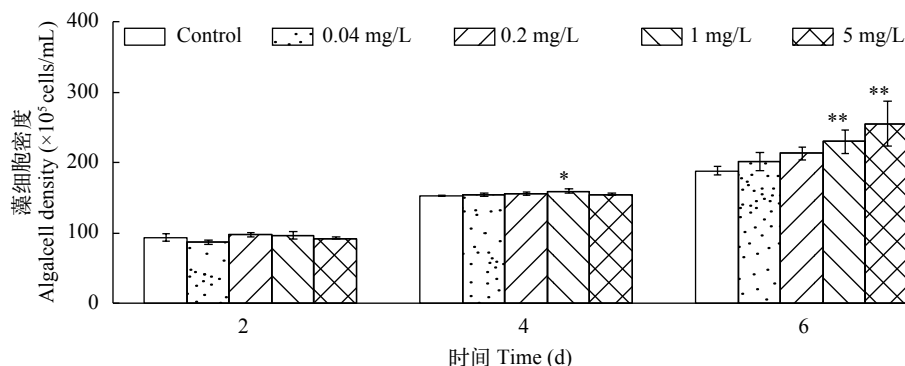


图1 IAA对铜绿微囊藻生长的影响

Fig. 1 Effects of IAA on the growth of *M. aeruginosa* CHAB-6301

“*”代表 $P<0.05$, “**”代表 $P<0.01$; 下同

“*” indicates that $P<0.05$, and “**” denotes that $P<0.01$; the same applies below

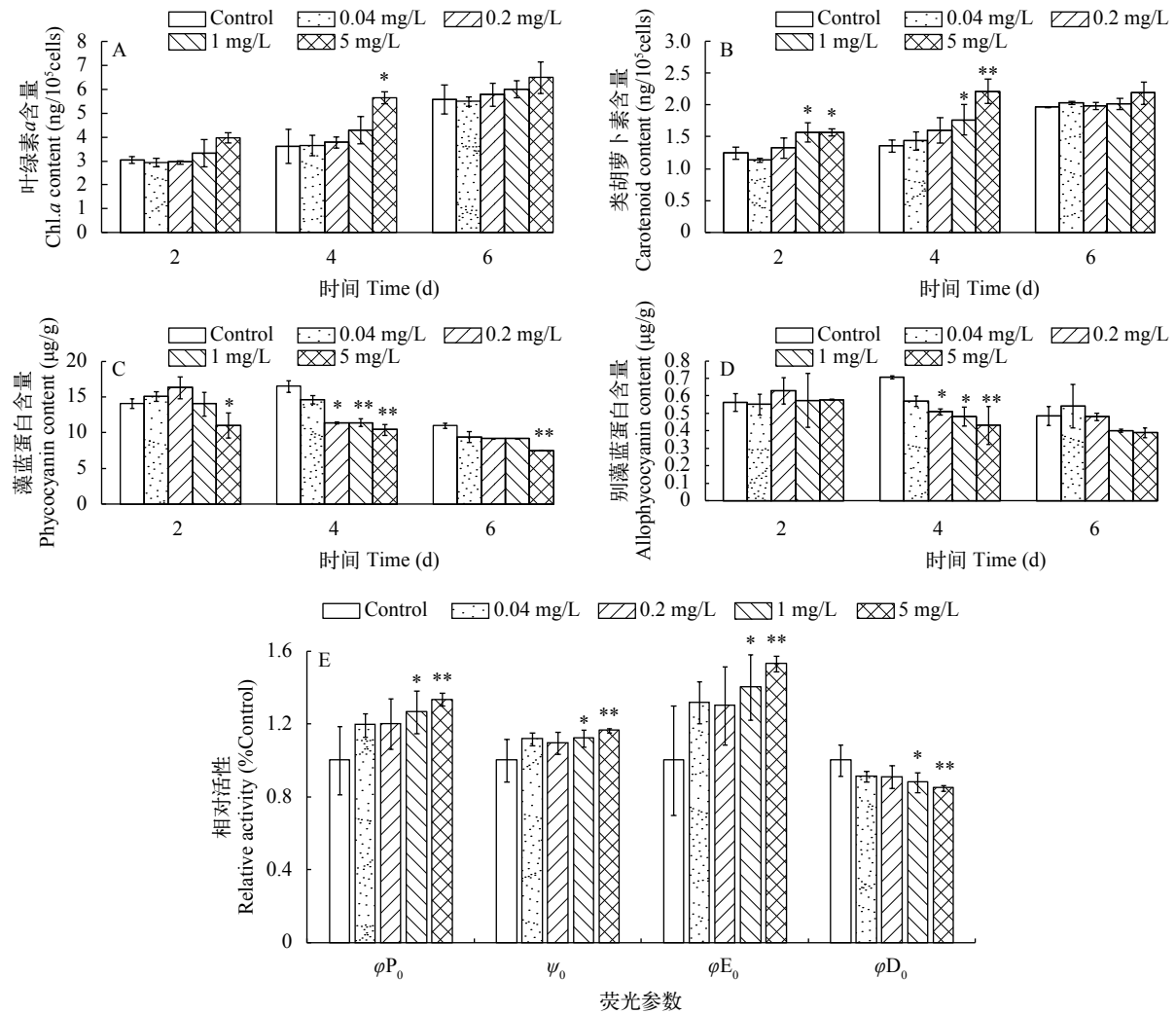


图2 IAA对铜绿微囊藻光合系统II电子传递特性的影响

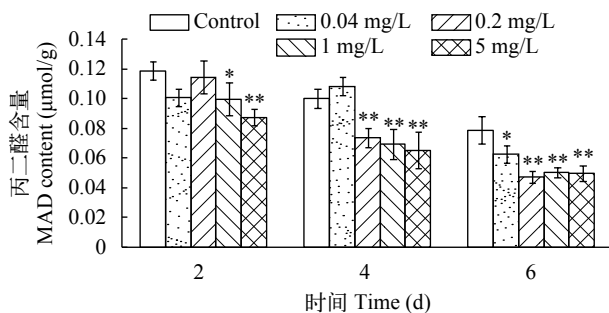
Fig. 2 Influences of IAA on the electron transfer characteristics in *M. aeruginosa* CHAB-6301 PS II

图3 IAA对铜绿微囊藻细胞丙二醛含量的影响

Fig. 3 Effects of IAA on the MAD content of *M. aeruginosa* CHAB6301

2.4 IAA对胞内微囊藻毒素含量的影响

在实验结束后, 对细胞内毒素的含量进行检测 (图4)。当IAA浓度为0.04和0.2 mg/L时, 微囊藻胞内MC-LR含量与对照组相比没有显著差异。当IAA浓度为1 mg/L时, 藻细胞内MC-LR含量开始下降。而浓度为5 mg/L时, MC-LR含量最小, 与对照

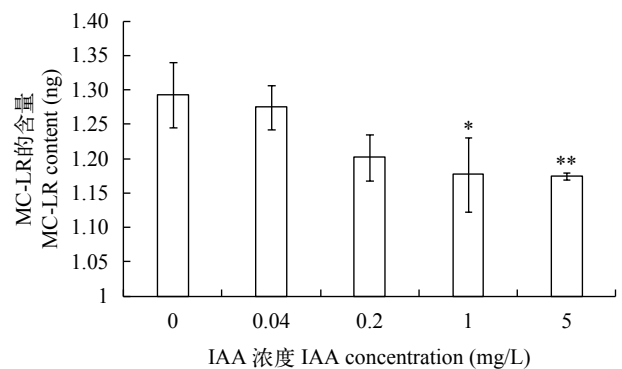


图4 各处理藻细胞内MC-LR浓度

Fig. 4 The contents of microcystin-LR (MC-LR) in different treatments

组相比下降9.18%。

3 讨论

生长素在调节维管束植物的细胞分裂中扮演着极为重要的角色, 在微藻的生长中可能也起着重

要的作用^[24]。Pan等^[25]研究结果显示微囊藻在浓度为0.001—25 mg/L的赤霉素(GA₃)作用下,经第20天的培养后,细胞生长得到了明显的促进。Burkiewicz等^[26]研究表明,赤霉素和细胞分裂素在一定浓度下促进了小球藻、栅藻和胶球藻的细胞分裂和干重含量。Piotrowska-Niczyporuk等^[27]研究了不同类型生长素在不同浓度下对小球藻生长的影响,结果表明:0.1 μmol/L的IAA和吲哚-3-丁酸以及1 μmol/L的苯乙酸和1-萘乙酸均可促进小球藻的生长,并在48h后细胞数达到最大,而浓度继续上升至100 μmol/L时,所有受试细胞增殖均受明显抑制。本研究结果显示1—5 mg/L的IAA对铜绿微囊藻生长有明显的促进作用。

Chl.*a*、类胡萝卜素、藻蓝蛋白和别藻蓝蛋白是*M. aeruginosa* CHAB6301细胞内重要的光合色素组成成分^[28]。本研究结果表明:IAA能显著提高微囊藻细胞内Chl.*a*和Carotenoid含量,而抑制藻蓝蛋白和别藻蓝蛋白含量。有研究表明,生长素可以调节藻类细胞中的细胞氧化还原状态,从而防止叶绿素和类胡萝卜素的氧化降解^[29]。藻蓝蛋白是蓝藻光系统II(PS II)中天线复合物的重要捕光色素^[30]。藻蓝蛋白的变化与叶绿素的变化有所不同,其合成、分解与细胞内的氮含量和蛋白质合成直接相关^[31]。藻胆蛋白(例如藻蓝蛋白、别藻蓝蛋白和藻红蛋白等)也可用作氮的储存物并且是构成总细胞蛋白的重要组成部分。当蓝藻出现氮(或硫)营养限制时,藻细胞可以调控藻胆蛋白降解以缓解细胞对氮的需求^[32,33]。目前关于IAA对蓝藻蛋白质合成的影响及分子机理的研究尚属空白,对于IAA降低微囊藻藻胆蛋白的原因有待深入研究。

光合系统被光活化的高能电子如果没有通过光合作用电子传递的方式淬灭,将会转变为氧自由基,这是光合作用微生物细胞内氧自由基的主要来源之一^[34]。细胞内氧自由基会氧化生物大分子,造成细胞损伤。MDA是细胞脂质氧化的终产物。细胞内MDA含量常被用于评价细胞的氧化损伤程度^[35]。叶绿素荧光分析结果表明IAA能提高微囊藻PS II电子传递效率,降低高能电子非光化学淬灭的几率,进而降低细胞内氧自由基。这可能是IAA能降低微囊藻细胞内MDA含量的原因。

生长素IAA是一类含有一个不饱和芳香族环和一个乙酸侧链的内源激素,可在酶的作用下进行一系列的分解转化,其分子结构中氮元素的释放对于细胞内藻毒素的合成具有一定的影响^[36]。同时,铜绿微囊藻细胞内毒素的合成途径十分复杂,由*mcy*基因家族编码的一系列酶催化完成,根据对相

关蛋白进行对比和功能划分,可发现此过程涉及48个步骤的反应^[37]。有研究表明,许多环境因子,比如水体氮、磷及CO₂浓度都能影响微囊藻毒素的合成^[38—40]。本研究结果表明,IAA能降低微囊藻细胞内微囊藻毒素的含量。然而目前IAA在微囊藻细胞内的代谢途径尚不清楚,其对微囊藻毒素合成的影响的分子机理也有待进一步深入研究。

参考文献:

- [1] Ma J G. Studies on the cytotoxicity and toxicological mechanism of microcystin on HepG2 cells [D]. Henan Normal University. 2016 [马军国. 微囊藻毒素对HepG2细胞的毒性及其作用机制研究. 河南师范大学. 2016]
- [2] Zhao S. Studies on variation and bacterial degradation of microcystins in sedimentation ponds for cyanobacterial blooms treatment [D]. University of Chinese Academy of Sciences. 2012 [赵爽. 蓝藻水华堆积处理池中微囊藻毒素的变化和细菌降解研究. 中国科学院研究生院. 2012]
- [3] Chen X F. Investigation of the regional differences and nitrogenous cycling in China's lakes [D]. Nanjing University. 2012 [陈小锋. 我国湖泊富营养化区域差异性调查及氮素循环研究. 南京大学. 2012]
- [4] Wei T. An integrated RNA-Seq and network study reveals a complex regulation process of rice seed germination [D]. University of Chinese Academy of Sciences. 2015 [魏婷. RNA-Seq结合基因网络分析揭示水稻种子萌发的复杂调控过程. 中国科学院北京基因组研究所. 2015]
- [5] Wang J L, Liu D C, Guo X L, *et al.* Advances in the pathways of auxin synthesis [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2012, 47(3): 292—301 [王家利, 刘冬成, 郭小丽, 等. 生长素合成途径的研究进展. 植物学报, 2012, 47(3): 292—301]
- [6] Bie B B. Cloning an analysis of genes involved in cucumber ethylene signal transduction pathway and improvement of the cucumber genetic transformation system [D]. Shanghai Jiao Tong University. 2013 [别蓓蓓. 黄瓜乙烯信号转导途径相关基因的克隆分析及黄瓜遗传转化体系研究. 上海交通大学. 2013]
- [7] Zhang J H. Isolation and functional analysis of aux/IAA genes in tomato [D]. Huazhong Agricultural University. 2006 [张俊红. 番茄Aux/IAA基因的克隆与功能分析. 华中农业大学. 2006]
- [8] Xu H H. Functional analysis of AtRRE1 in arabidopsis root development [D]. Wuhan University. 2011 [许恒皓. 拟南芥AtRRE1基因调控根发育研究. 武汉大学. 2011]
- [9] Yan J L, Yu M F. Determination of indoleacetic acid, 3-indolepropionic acid, indole butyric acid, in drinking water by ion chromatography [J]. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*, 2013, (7): 1723—1724 [颜金良, 俞明飞. 离子色谱法测定饮水中吲哚乙酸、吲哚丙酸

- 和吲哚丁酸含量. 中国卫生检验杂志, 2013, (7): 1723—1724]
- [10] Reemtsma T, Jekel M. Dissolved organics in tannery wastewaters and their alteration by a combined anaerobic and aerobic treatment [J]. *Water Research*, 1997, **31**(5): 1035—1046
- [11] Gutierrez C K, Matsui G Y, Lincoln D E, *et al.* Production of the phytohormone indole-3-acetic acid by estuarine species of the Genus *Vibrio* [J]. *Applied & Environmental Microbiology*, 2009, **75**(8): 2253—2258
- [12] Yang S Y, Wang M X, Kuang L. Effects of plant growth regulator 2,4-D on the growth of two kinds of green algae [J]. *Freshwater Fisheries*, 2005, **35**(6): 28—30 [杨胜勇, 王明学, 匡亮. 植物生长调节剂2,4-D对两种绿藻生长的影响. 淡水渔业, 2005, **35**(6): 28—30]
- [13] Zhao S F, Liu D C, Qiu H M. The influence of plant growth regulators on the growth of *Palova viridis* [J]. *Journal of Zhanjiang Ocean University*, 1999, (4): 21—25 [赵素芬, 刘东超, 丘慧明. 植物生长调节剂对绿色巴夫藻生长的影响. 广东海洋大学学报, 1999, (4): 21—25]
- [14] Pan X, Chang F, Kang L, *et al.* Effects of gibberellin A(3) on growth and microcystin production in *Microcystis aeruginosa* (cyanophyta) [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2008, **165**(16): 1691
- [15] Jiao Y Y, Yu J Z, Pan K H. Effects of indole-3-acetic acid on the growth and fatty acid composition of *nannochloropsis oculata* [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2011, **41**(4): 57—60 [焦媛媛, 俞建中, 潘克厚. 吲哚乙酸对微拟球藻生长和脂肪酸含量的影响. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2011, **41**(4): 57—60]
- [16] Liu J X, Xie S W, Yang F, *et al.* Effects of arsenate on the growth and arsenic uptake in *Microcystis aeruginosa* at different growth phases and phosphorus levels [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(6): 2061—2068 [刘金鑫, 谢邵文, 杨芬, 等. 不同生长期和磷浓度下砷酸盐对铜绿微囊藻生长及砷吸收的影响. 环境科学学报, 2017, **37**(6): 2061—2068]
- [17] Ni Y. Toxic effects and mechanisms of mesotrione on *microcystis* sp. and *Scenedesmus quadricauda* [D]. Nanchang University. 2014 [倪妍. 硝磺草酮对微囊藻和四尾栅藻的毒性效应及致毒机理研究. 南昌大学. 2014]
- [18] He Y X. Effects and mechanisms of sanguinarine on physiological characteristics of *Microcystis aeruginosa* involve in ecological competition advantages [D]. Hunan Agricultural University. 2016 [何雅仙. 血根碱对铜绿微囊藻生态优势相关生理特性的影响及机理. 湖南农业大学. 2016]
- [19] Zhou Z P, Liu L N, Chen X L, *et al.* Effects of light, denaturation and pH on antioxidant activity of allophycocyanin (APC) from *Spirulina platensis* [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2005, **36**(2): 179—185 [周站平, 刘鲁宁, 陈秀兰, 等. 光照、变性剂和pH对钝顶螺旋藻(*Spirulina platensis*)别藻蓝蛋白(APC)抗氧化活性的影响. 海洋与湖沼, 2005, **36**(2): 179—185]
- [20] Shao J H, Wu X Q, Li R H. Physiological responses of *Microcystis aeruginosa*, PCC7806 to nonanoic acid stress [J]. *Environmental Toxicology*, 2009, **24**(6): 610—617
- [21] Strasser B J, Strasser R J. Measuring Fast Fluorescence Transients to Address Environmental Questions: The JIP-Test [M]. In: Mathis P (Eds.), *Photosynthesis: from Light to Biosphere*. Dordrecht: KAP Press. 1995, 977—980
- [22] Deng P. Studies on allelopathic effects of three submerged macrophytes on phytoplankton [D]. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences. 2007 [邓平. 三种沉水植物对浮游植物的化感效应研究. 中国科学院水生生物研究所. 2007]
- [23] Peng L, Chen W, Song L R. Study on extraction methods of intracellular microcystins [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2011, **35**(4): 708—712 [彭亮, 陈伟, 宋立荣. 微囊藻胞内毒素的提取方法. 水生生物学报, 2011, **35**(4): 708—712]
- [24] Perrottrechenmann C. Cellular responses to auxin: division versus expansion [J]. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 2010, **2**(5): a001446
- [25] Pan X, Chang F, Kang L, *et al.* Effects of gibberellin A(3) on growth and microcystin production in *Microcystis aeruginosa* (cyanophyta) [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2008, **165**(16): 1691
- [26] Burkiewicz K. The influence of gibberellins and cytokinins on the growth of some unicellular baltic algae: *botanica marina* [J]. *Botanica Marina*, 1987, **30**(1): 63—70
- [27] Piotrowska-Niczyporuk A, Bajguz A. The effect of natural and synthetic auxins on the growth, metabolite content and antioxidant response of green alga *Chlorella vulgaris*, (Trebouxioiphyceae) [J]. *Plant Growth Regulation*, 2014, **73**(1): 57—66
- [28] Chen M, Tang Y L. Investigation on the detrimental effects of salt stress on photosynthesis of *Spirulina platensis* [J]. *Agricultural Science & Technology*, 2012, **13**(8): 1625—1627, 1770
- [29] Hunt R W, Chinnasamy S, Bhatnagar A, *et al.* Effect of biochemical stimulants on biomass productivity and metabolite content of the microalga, *Chlorella sorokiniana* [J]. *Applied Biochemistry & Biotechnology*, 2010, **162**(8): 2400—2414
- [30] Grossman A R, Schaefer M R, Chiang G G, *et al.* The Responses of Cyanobacteria to Environmental Conditions: Light and Nutrients [M]. *The Molecular Biology of Cyanobacteria*. Springer Netherlands, 1994, 641—675
- [31] Grossman A R, Bhaya D, He Q. Tracking the light environment by cyanobacteria and the dynamic nature of light harvesting [J]. *Journal of Biological Chemistry*, 2001, **276**(15): 11449—11452
- [32] Boussiba S, Richmond A E. C-phycocyanin as a storage

- protein in the blue-green alga *Spirulina platensis* [J]. *Archives of Microbiology*, 1980, **125**(1—2): 143—147
- [33] Mansouri H, Talebizadeh B. Effect of gibberellic acid on the cyanobacterium *Nostoc linckia* [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2016, **28**(4): 2187—2193
- [34] Murata N, Takahashi S, Nishiyama Y, *et al.* Photoinhibition of photosystem II under environmental stress [J]. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics*, 2007, **1767**(6): 414—421
- [35] Zhang R, Wang G J, Li Z F, *et al.* Inhibitory effect of *Bacillus subtilis* on *Microcystis aeruginosa* [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(6): 1814—1821 [张睿, 王广军, 李志斐, 等. 枯草芽孢杆菌对铜绿微囊藻抑制效果的研究. 中国环境科学, 2015, **35**(6): 1814—1821]
- [36] Vézic C, Rapala J, Vaitomaa J, *et al.* Effect of nitrogen and phosphorus on growth of toxic and nontoxic *Microcystis* strains and on intracellular microcystin concentrations [J]. *Microbial Ecology*, 2002, **43**(4): 443
- [37] Tan X F. Structural insights into microcystin synthetase from *Microcystis aeruginosa* [D]. University of Science and Technology of China. 2014 [谭啸峰. 铜绿微囊藻中微囊藻毒素合成蛋白的结构研究. 中国科学技术大学. 2014]
- [38] Watanabe M F, Oishi S. Effects of environmental factors on toxicity of a cyanobacterium (*Microcystis aeruginosa*) under culture conditions [J]. *Applied & Environmental Microbiology*, 1985, **49**(5): 1342—1344
- [39] Zhang W, Lin Y Q, Guo D F, *et al.* Influence of different nitrogen and phosphorus concentrations on growth, photosynthesis concentrations on growth, photosynthesis and microcystin production of *Microcystis aeruginosa* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, **30**(3): 318—322 [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. 水生生物学报, 2006, **30**(3): 318—322]
- [40] Westhuizen A J V D, Eloff J N, Kruger G H J. Effect of temperature and light (fluence rate) on the composition of the toxin of the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* (UV-006) [J]. *Archiv Fur Hydrobiologie*, 1986, **108**(2): 145—154

EFFECTS OF IAA ON THE PHYSIOLOGICAL AND TOXIN-PRODUCING CHARACTERISTICS OF *MICROCYSTIS AERUGINOSA*

QING Chun¹, ZHANG Hui-Ling¹, LIN Yi-Qing¹, LI Jun¹, HU Ting² and SHAO Ji-Hai¹

(1. Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Orient Science and Technology College of Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: In order to investigate the effects of indole-3-acetic acid (IAA) on physiological characteristics of *Microcystis aeruginosa* (*M. aeruginosa*), the growth, photosynthetic pigment content, chlorophyll fluorescence, lipid oxidation, and microcystin biosynthesis characteristics were studied. The achieved results showed that there was no significant variation in cell density, chlorophyll content, chlorophyll fluorescence characteristics, and microcystin contents at low concentrations of IAA (e.g., 0.04 and 0.2 mg/L). However the contents of phycocyanin, allophycocyanin, and malondialdehyde (MDA) decreased in comparison with the control group. High concentrations of IAA (1 and 5 mg/L) accelerate the algal growth and increased chlorophyll content, while that inhibited the contents of phycocyanin and allophycocyanin and reduced the peroxidation of membrane lipid peroxidation as well as synthetization of intracellular algal toxins. The findings also demonstrated that low concentrations of IAA have no clear influence on the growth and photosynthesis of *M. aeruginosa* CHAB-6301. However, high concentrations of IAA can promote the growth and photosynthesis of this alga, which may increase the possibility of formation of *Microcystis*-based water blooms.

Key words: Indole-3-acetic acid; *Microcystis aeruginosa*; Photosynthetic pigments; Chlorophyll fluorescence; Microcystins