

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第2期

Vol.35 No.2

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国环境空气中颗粒物达标统计要求研究	王帅,丁俊男,王瑞斌,李健军,孟晓艳,杨彬,林宏 (401)
北京城区 PM _{2.5} 中致癌重金属季节变化特征及其来源分析	陶俊,张仁健,段菁春,荆俊山,朱李华,陈忠明,赵岳,曹军骥 (411)
北京地区冬春 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 污染水平时空分布及其与气象条件的关系	赵晨曦,王云琦,王玉杰,张会兰,赵冰清 (418)
北京市 PM _{2.5} 可吸入颗粒物反演及其时空分布分析	王艳慧,肖瑶 (428)
杭州市春季大气超细颗粒物粒径谱分布特征	谢小芳,孙在,杨文俊 (436)
春节期间南京市大气气溶胶粒径分布特征	王红磊,朱彬,沈利娟,刘晓慧,张泽峰,杨洋 (442)
南京市大气颗粒物中有机碳和元素碳粒径分布特征	吴梦龙,郭照冰,刘凤玲,刘杰,卢霞,姜琳琳 (451)
忻州市环境空气 PM ₁₀ 中有机碳和元素碳污染特征分析	史美鲜,彭林,刘效峰,牟玲,白慧玲,刘凤娟,杨花 (458)
广州某工业区大气中 PCDD/Fs 含量水平及其季节性变化特征	青亮,苏原,苏青,张素坤,任明忠 (464)
燃煤电厂锅炉 PM _{2.5} 排放危害度评价模型建立及案例分析	史妍婷,杜谦,高建民,边昕,王知涛,董鹤鸣,韩强,曹阳 (470)
中国南海大气降水化学特征	肖红伟,龙爱民,谢露华,肖化云,刘丛强 (475)
临安本底站酸雨长期观测特征分析	李正泉,马浩,毛裕定,冯涛 (481)
北京城区大气氮湿沉降特征研究	贺成武,任玉芬,王效科,毛宇翔 (490)
烟雾箱与数值模拟研究苯和乙苯的臭氧生成潜势	贾龙,徐永福 (495)
祁连山老虎沟 12 号冰川积雪中飞灰颗粒物的特征	董志文,秦大河,秦翔,杜志恒,陈记祖,任贾文 (504)
生活垃圾填埋场作业面恶臭散发率研究	羌宁,王红玉,赵爱华,袁文祥,邵俊,陈檬 (513)
生物滴滤塔处理苯酚气体研究	何觉聪,黄倩茹,陈洲洋,叶纪宏,罗雨薇,魏在山 (520)
国 V 柴油机燃用丁醇-柴油混合燃料颗粒粒径分布特性试验研究	楼狄明,徐宁,范文佳,张涛 (526)
翻堆频率对猪粪条堆肥过程温室气体和氨气排放的影响	赵晨阳,李洪枚,魏源送,钟佳,郑嘉嘉,韩圣慧,万合峰 (533)
CuBr ₂ 分解缓释-膜催化对零价汞的氧化性能研究	胡林刚,瞿赞,晏乃强,郭永福,谢江坤,贾金平 (541)
浙闽沿海岸域总溶解态无机锡的分布及影响因素研究	张许州,任景玲,刘宗广,樊孝鹏,刘诚刚,吴莹 (547)
基于双向算法的湖库允许纳污负荷量计算及案例	贾海峰,郭羽 (555)
北京平原区第四系地下水污染风险评价	郭高轩,李宇,许亮,李志萍,杨庆,许苗娟 (562)
不同季节辽河口营养盐的河口混合行为	张晋华,于立霞,姚庆祯,田琳 (569)
太湖南运河入湖河口沉积物氮素分布特征	马久远,王国祥,李振国,张佳,周锋,魏宏农,欧媛 (577)
亚热带地区潜流人工湿地木本植物筛选与净化潜力评价	陈永华,吴晓芙,郝君,陈明利,朱光玉 (585)
潜流人工湿地基质结构与水力特性相关性研究	白少元,宋志鑫,丁彦礼,游少鸿,何珊 (592)
凤眼莲对铜绿微囊藻生长及藻毒素与营养盐释放的影响	周庆,韩士群,严少华,宋伟,刘国峰 (597)
不同预氧化剂对长江原水氯(胺)化 DBPs 生成潜能的影响	田富箱,徐斌,荣蓉,陈英英,张天阳,朱贺振 (605)
溴化十六烷基吡啶改性沸石对水中菲的吸附作用	李佳,林建伟,詹艳慧,陈祖梅,王鹏钧 (611)
四环素光催化降解特性与选择性研究	宋晨怡,尹大强 (619)
微生物电解系统生物阴极的硫酸盐还原特性研究	符诗雨,刘广立,骆海萍,张仁铎,章莹颖 (626)
市政污水 A/DAT-IAT 系统中溶解性有机物表征与生态安全	杨赛,周启星,华涛 (633)
膜-生物反应器处理高盐废水膜面污染物特性研究	李彬,王志刚,安莹,吴志超 (643)
臭氧-曝气生物滤池组合工艺处理石化二级出水的试验研究	刘明国,吴昌永,周岳溪,高祯,王佩超,杨琦,董德 (651)
厌氧生物法处理果胶废水的研究	陈兵兵,杨春平,黎想,代传花,彭蓝艳 (657)
氧氟沙星在碳纳米管上的吸附机制研究	赵兴兴,于水利,王哲 (663)
平菇菌糠对废水中铜离子的生物吸附性能	胡晓婧,戴婷婷,顾海东,金羽,曲娟娟 (669)
基于流态化作用的吸附反应动力学和穿透特征	王君,王瑶,黄星,袁益龙,陈瑞晖,周航,周丹丹 (678)
广州城市污泥中重金属形态特征及其生态风险评价	郭鹏然,雷永乾,蔡大川,张涛,吴锐,潘佳钊 (684)
中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究	张小敏,张秀英,钟大洋,江洪 (692)
废旧电容器封存点土壤中的 PCBs 污染特征和健康风险评价	周玲莉,吴广龙,薛南冬,杨兵,李发生,丁琼,周丹丹,燕云仲,刘博,韩宝禄 (704)
深圳市表层土壤多环芳烃污染及空间分异研究	章迪,曹善平,孙建林,曾辉 (711)
洋河流域万全段重金属污染风险及控制对策	谭冰,王铁宇,朱朝云,李奇峰,徐笠,吕永龙 (719)
施用组配固化剂对盆栽土壤重金属交换态含量及在水稻中累积分布的影响	曾卉,周航,邱琼瑶,廖柏寒 (727)
螯合剂复配对实际重金属污染土壤洗脱效率影响及形态变化特征	尹雪,陈家军,吕策 (733)
<i>Pseudomonas</i> sp. QJX-1 的锰氧化特性研究	周娜娜,柏耀辉,梁金松,罗金明,刘锐平,胡承志,袁林江 (740)
$n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 对混培养菌与纯培养菌同步脱氮除硫的影响	陈子爱,陈会娟,魏本平,刘刚金,邓良伟,吴力斌 (746)
杭州市空气微生物群落碳代谢特征研究	龚婵娟,许晶,方治国,楼秀芹,欧阳志云 (753)
鼠李糖脂逆胶束体系中纤维素酶的后萃研究	赵艳鸽,袁兴中,黄华军,崔凯龙,彭馨,彭子原,曾光明 (759)
黄海常见鱼类体内汞含量的种内和种间差异研究	朱艾嘉,许战洲,柳圭泽,邓丽杰,方宏达,黄良民 (764)
3 种 PAEs 对蚯蚓的毒性作用和组织酶活性影响的研究	王艳,马泽民,吴石金 (770)
新型保水剂应用于土壤-小白菜系统的环境安全评价	李希,贺纪正,郑袁明,郑明兰 (780)
黄河三角洲翅碱蓬湿地硫化氢和羧基硫排放动态研究	李新华,郭洪海,杨丽萍,朱振林,孙晓青 (786)
农田土壤 N ₂ O 产生的关键微生物过程及减排措施	朱永官,王晓辉,杨小茹,徐会娟,贾炎 (792)
《环境科学》征订启事 (691) 《环境科学》征稿简则 (800) 信息 (489,519,591,791)	

凤眼莲对铜绿微囊藻生长及藻毒素与营养盐释放的影响

周庆, 韩士群, 严少华*, 宋伟, 刘国锋

(江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014)

摘要: 针对目前我国凤眼莲治理富营养化水体技术的规模化应用现状, 考虑到大面积控养的凤眼莲与暴发的水华蓝藻(尤其是产毒铜绿微囊藻)会在湖湾区短期内密集共存的情况, 开展了凤眼莲对产毒铜绿微囊藻生长、生理特性、藻毒素生产与释放影响的研究, 另外, 也考察了短期共存下藻类营养盐释放与凤眼莲对藻毒素积累的情况。半连续共培养实验结果表明, 凤眼莲能够有效抑制铜绿微囊藻的生长, 促进藻细胞的衰亡。虽然凤眼莲未对铜绿微囊藻光合系统 II 的电子传递产生影响, 但减少了其光合系统中的藻蓝蛋白(PC)含量和藻蓝蛋白/别藻蓝蛋白(PC/APC)水平, 10% 和 20% 水体交换率处理的 PC/APC 水平第 8 d 时分别降至相应空白对照的 $54.93\% \pm 7.07\%$ 和 $55.81\% \pm 1.97\%$ 。凤眼莲对铜绿微囊藻形成了一定的氧化伤害, 最终促进其抗氧化系统中超氧化物歧化酶比活显著下降, 丙二醛含量显著提高, 10% 和 20% 水体交换率处理的丙二醛含量第 8 d 时分别升至相应空白对照的 2.95 ± 0.074 倍和 2.22 ± 0.086 倍。凤眼莲通过促进蓝藻的衰亡和分解, 加速了营养盐的释放。12 d 内, 可溶性总氮浓度回升到初始水平, 而水体可溶性总磷的释放速度比氮营养盐更快。另一方面, 凤眼莲并没有促进铜绿微囊藻毒素的生产, 也没有使水体藻毒素含量显著提高。相反, 和自然衰减不同, 短期内显著促进了水体藻毒素的降解, 第 12 d 时 10% 和 20% 水体交换率处理的水体藻毒素分别下降至 $12.07 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1} \pm 0.63 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $11.36 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1} \pm 0.04 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。而凤眼莲整株的藻毒素短期积累量(FW)仅为 $5.95 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1} \pm 0.76 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 。增加水体交换率能够在一定程度上减缓凤眼莲对铜绿微囊藻的伤害, 减缓营养盐的释放速度, 但对水体藻毒素消减的影响不显著。

关键词: 凤眼莲; 铜绿微囊藻; 藻毒素生产; 藻毒素释放; 藻毒素积累

中图分类号: X524; X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)02-0597-08

Impacts of *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms Stress on the Growth Characteristics, Microcystins and Nutrients Release of *Microcystis aeruginosa*

ZHOU Qing, HAN Shi-qun, YAN Shao-hua, SONG Wei, LIU Guo-feng

(Institute of Agricultural Resources and Environmental Sciences, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: Due to the large-scale application of *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms on the bioremediation of eutrophic lake in China, the influence of growth, physiological characteristics, microcystins production and release of *M. aeruginosa* by *E. crassipes* was investigated. Meanwhile, the release risk of nutrients from *M. aeruginosa* and the accumulation risk of microcystins in *E. crassipes* were explored through semi-continuous co-existence experiments. Our results indicated that *M. aeruginosa* was promoted by *E. crassipes* to undergo the cell death. Under the stress of *E. crassipes*, direct damage of phycocyanin and phycocyanin/allophycocyanin ratio in *M. aeruginosa* occurred, while the photosystem II-Hill reaction in *M. aeruginosa* was not interrupted. The PC/APC levels in the treatment of 10% and 20% water exchange rate were respectively decreased to $54.93\% \pm 7.07\%$ and $55.81\% \pm 1.97\%$ of the level in their relative controls after 8 days. Then, the final significant decrease of specific superoxide dismutase activity and the striking elevation of malondialdehyde content in *M. aeruginosa* could be the results of oxidative damage by *E. crassipes*. Algal malondialdehyde content in the treatment of 10% and 20% water exchange rate were respectively 2.95 ± 0.074 and 2.22 ± 0.086 times of the level in their relative controls on day 8. The release of nutrients from *M. aeruginosa* was accelerated because the decay and lysis of algal cells were promoted by *E. crassipes*. After 12-day co-existence experiments, the concentration of total dissolved nitrogen in water was brought back to the initial level and the release of total dissolved phosphorus was faster than nitrogen nutrients under the stress of *E. crassipes*. In addition, the microcystins production in *M. aeruginosa* was not stimulated and the extracellular microcystins were significantly eliminated by the influence of *E. crassipes*. The extracellular microcystins contents in the treatment of 10% and 20% water exchange rate were respectively decreased to $12.07 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1} \pm 0.63 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ and $11.36 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1} \pm 0.04 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ after 12 days. But the microcystins level in the whole plants of *E. crassipes* co-cultured with *M. aeruginosa* for 12 days was only about $5.95 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1} \pm 0.76 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ FW. The increase of water exchange rate could reduce the damage of *M. aeruginosa* by *E. crassipes*, but had no significant effect on the microcystins elimination.

Key words: *Eichhornia crassipes*; *Microcystis aeruginosa*; microcystins production; microcystins release; microcystins accumulation

收稿日期: 2013-06-03; 修订日期: 2013-09-01

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07103-002); 江苏省自然科学基金项目(BK20130730); 江苏省自主创新探索项目[CX(11)4061]

作者简介: 周庆(1980~), 女, 博士研究生, 副研究员, 主要研究方向为水体藻类生态与水体富营养化治理, E-mail: qqzhouqing@hotmail.com

* 通讯联系人, E-mail: shyan@jaas.ac.cn

近年来,富营养化水体的修复成为全世界一个具有挑战性的环境问题,而氮、磷营养盐超标是我国水环境的主要危害^[1]。底泥疏浚^[2]、沉积物固化^[3]、水生植物种养^[4]等许多措施已被用来控制氮、磷污染物。其中,水生植物种养技术因成本低而被广泛应用^[5]。凤眼莲早期被认为是世界上最有害的水草^[6],但是由于它出众的耐污和水质净化能力^[7],目前被较广地应用在富营养化水体生物修复工程中。随着安全控制性种养技术^[8]、机械化打捞技术^[9]和规模化处置、资源化利用技术^[10]的有效衔接,以凤眼莲为载体的富营养化水体生物修复工程在太湖、滇池规模化应用。2012年,太湖和滇池的凤眼莲种养面积分别达到16.7 km²和12 km²。

我国富营养化湖泊大多伴有蓝藻水华的危害。自从2007年太湖水华事件后,蓝藻水华的危害引起了更多的关注。铜绿微囊藻是我国富营养化水体中最常见的水华藻类^[11]。藻毒素(MCs)的释放成为藻类水华对水环境的极大危害。虽然凤眼莲对富营养化水体修复的效果显著^[12],但由于富营养化水体的大容量和持续注入的污染负荷使得蓝藻水华还将在相当长一段时间内继续发生。然而,凤眼莲的控养区域优先选在湖湾地区,而湖湾地区也是蓝藻水华受风向和水流影响下容易聚集的地方。因此,在湖湾区大量的产毒蓝藻将不可避免地规模化种养的凤眼莲密集共存。

虽然凤眼莲根系分泌物中的几种克藻化合物已经被分离出来,并且这些克藻化合物对不同藻的影响也有所研究^[13~15],但是有关凤眼莲如何影响产毒铜绿微囊藻、以及在凤眼莲影响下铜绿微囊藻内容物释放对环境影响的问题,目前尚无研究。本研究分析了凤眼莲对铜绿微囊藻生理特性和MCs生产的影响,同时探讨了铜绿微囊藻受凤眼莲胁迫下营养盐和MCs释放的影响,并对凤眼莲积累MCs的短期风险进行了分析,以期对凤眼莲等漂浮植物规模化应用的生态风险提供一定评估依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

产毒铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*, FACHB-912)购于中国科学院武汉水生生物研究所淡水藻种库,采用1/10改良Hoagland's培养基(pH 7.0)。当铜绿微囊藻生长处于对数生长期($D_{650} \approx 0.3100$)时,再用于共培养实验。1/10改良Hoagland's培养基经121℃灭菌20 min。凤眼莲

[*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms]取自江苏省农业科学院保种池。经去除残体、自来水冲洗、去离子水充分冲洗后,选取大小基本一致的健康植株,在1/10改良Hoagland's培养基(pH 7.0)中预培养7 d,再用于共培养实验。光照培养箱设定标准培养条件为温度28℃,相对湿度75%,光照强度40 $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$,光照周期12 h:12 h。

1.2 实验方法

半连续共培养实验于12 L平底敞口玻璃器皿中进行,在10 L对数生长期的铜绿微囊藻培养液中加入初始鲜重约为160 g的凤眼莲进行共培养,采用标准培养条件。每天用新的对数生长期的铜绿微囊藻培养液更换一定体积的共培养液,设置10%、20%两个水体交换梯度,以考察增加含藻水体的交换量对凤眼莲化感抑制铜绿微囊藻作用的缓解效果,以及对水体化学指标、藻毒素指标的影响。不加凤眼莲的处理作为对照,每个处理设置3个平行。更换出的培养液为出水,新添加的对数生长期的铜绿微囊藻培养液为进水。每天取样测定藻细胞密度,每两天取样测定水体化学指标、藻细胞生理学指标、以及藻细胞内和胞外MCs指标。第0 d与第6 d取样,测定藻细胞的Hill反应活力。第0 d和第12 d取样,测定凤眼莲中积累的MCs情况。

1.3 测定方法

1.3.1 水体化学指标

水体氨态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)浓度采用水杨酸-次氯酸盐测定法,硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)采用紫外光度法,亚硝态氮($\text{NO}_2^- - \text{N}$)采用乙二胺比色法。总可溶性氮(TDN)采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法,总可溶性磷(TDP)采用钼锑抗分光光度法。以上方法均参考标准方法^[16]。

1.3.2 藻类生理学指标

铜绿微囊藻细胞数量采用血球计数板法测定,计数前培养液经超声波打散处理(5 s)和鲁哥氏碘溶液染色处理,细胞总数误差率小于15%。叶绿素a含量采用热乙醇法^[17],总蛋白浓度的测定采用Bradford法^[18],藻蓝蛋白(PC)和别藻蓝蛋白(APC)的测定依照文献^[19]的方法,2,3,5-氯化三苯基四唑(TTC)-脱氢酶活性依照文献^[20]的方法测定,其中用氯仿代替石油醚作为提取剂。超氧化物歧化酶(SOD)的活性测定采用SOD检测试剂盒(南京建成生物工程研究所)。藻细胞丙二醛(MDA)的含量采用微量MDA检测试剂盒(南京建成生物工程研究所)。Hill反应活力按照文献^[21]的方法测定,以

2, 6-二氯酚靛酚 (DCPIP) 为电子受体, 增加了一个步骤, 将与反应体系等体积的培养液离心获得的上清液, 进一步冻干后加入反应体系中。

1.3.3 MCs 的测定

采集的培养液经膜过滤 (Whatman GF/C, 0.45 μm 孔径), 滤液即为胞外 MCs 样品。将含有藻细胞的滤膜剪切成碎片后重悬于 75% 甲醇, 进一步进行超声波水浴处理 (1 h), 然后再进行离心、过滤、旋转蒸发仪蒸干 (50 $^{\circ}\text{C}$)、最后重悬于超纯水中, 即为胞内 MCs 样品。凤眼莲积累 MCs 量的测定中, 植株的预处理和匀浆方法依照文献 [22], 采用甲醇为提取剂, 黑暗中浸提 24 h, 再超声波水浴处理 (1 h), 离心、过滤、旋转蒸发仪蒸干 (50 $^{\circ}\text{C}$)、最后重悬于超纯水中。将此重悬液进行 C18 固相萃取 (Waters, Sep-Pak[®] Vac 3cc), 甲醇洗脱液旋转蒸干后, 重悬于超纯水, 即获得凤眼莲植株积累的 MCs 样品。MCs 采用酶联免疫 (ELISA) 试剂盒进行分析 (Taiwan Algal Science Inc., 检测限为 0.01 $\text{ng}\cdot\text{mL}^{-1}$), 以 MC-LR 为标准品。

1.4 统计分析

采用 SPSS 13.0 软件包进行统计分析, 线性回归分析用于分析各指标间的相关性, 处理间差异分析采用 ANOVA, $P < 0.05$ 表示显著性差异, $P < 0.01$ 表示极显著性差异。

2 结果与分析

2.1 凤眼莲对铜绿微囊藻生长的影响

如图 1 所示, 在短期半连续培养条件下, 凤眼莲有效地抑制了铜绿微囊藻的生长。在凤眼莲影响下, 20% 水体交换率处理中铜绿微囊藻的死亡速度慢于 10% 交换率的处理, 但到第 10 d, 两种处理的

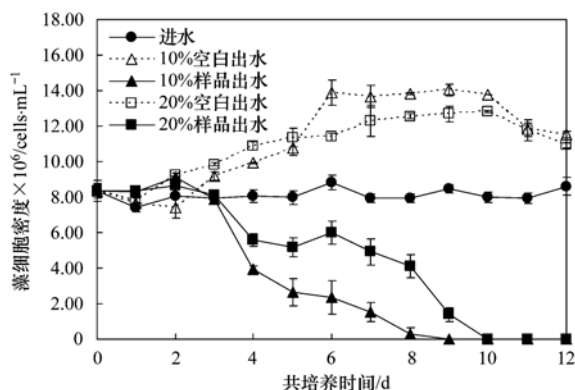


图 1 不同水体交换率下凤眼莲对铜绿微囊藻生长的影响

Fig. 1 Change in biomass of *M. aeruginosa* under the impact of *E. crassipes* at different water exchange rate

共培养液中藻细胞密度均降为 0。可见, 在没有限制营养和光照的条件下, 凤眼莲依然能够通过分泌某些化感物质有效地抑制铜绿微囊藻的生长, 而增加水体交换率能够延缓凤眼莲对藻类的抑制速度。

2.2 凤眼莲对铜绿微囊藻光合系统的影响

叶绿素 a (Chl-a)、PC 和 APC 是蓝藻光合作用过程中最重要的光捕获色素 [23]。在凤眼莲影响下, 不同水体交换率处理中的水体叶绿素 a 含量迅速下降, 与铜绿微囊藻的细胞密度呈极显著正相关关系 ($r^2 = 0.9494$, $P < 0.01$), 然而藻细胞中的叶绿素 a 含量却相对稳定, 直到第 8 d 才显著低于无凤眼莲影响的对照, 10% 和 20% 水体交换率的处理分别降到相应空白对照的 $62.81\% \pm 10.10\%$ 和 $79.71\% \pm 6.87\%$ (图 2)。

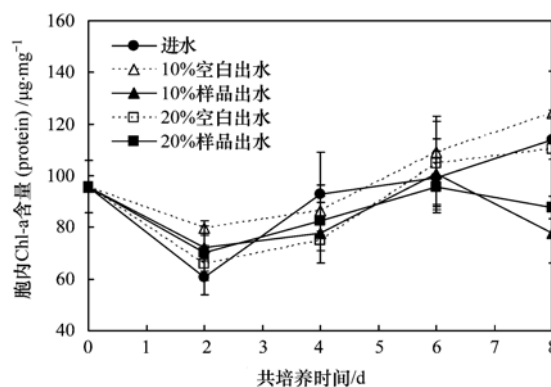


图 2 不同水体交换率下凤眼莲对铜绿微囊藻叶绿素含量的影响

Fig. 2 Change in Chl-a level of *M. aeruginosa* under the impact of *E. crassipes* at different water exchange rate

如图 3(a) 所示, 虽然由于第 2 d 进水中的藻 PC 含量较高, 使得第 2 d 的处理和空白中的 PC 含量均值整体有所增加, 但铜绿微囊藻中的 PC 含量受凤眼莲影响, 从第 2 d 开始显著低于无凤眼莲影响的对照, 并且不同水体交换率的处理之间差异不显著。同时, 铜绿微囊藻中的 PC/APC 水平受凤眼莲影响, 从第 4 d 开始显著低于无凤眼莲影响的对照。第 8 d 时, 10% 和 20% 水体交换率处理的 PC/APC 水平分别降到相应空白对照的 $54.93\% \pm 7.07\%$ 和 $55.81\% \pm 1.97\%$ 。但 20% 水体交换率处理中的藻 PC/APC 水平最终显著高于 10% 水体交换率的处理 [图 3(b)]。

DCPIP-Hill 反应活力主要用于测量光合系统 II (PS II) 中电子由水传递到 DCPIP 的能力。如图 4 所示, 虽然共培养第 6 d 时, 铜绿微囊藻的生长受到严重抑制, 但与空白相比, 其 DCPIP-Hill 反应活力并未受到凤眼莲的显著影响 (图 4)。

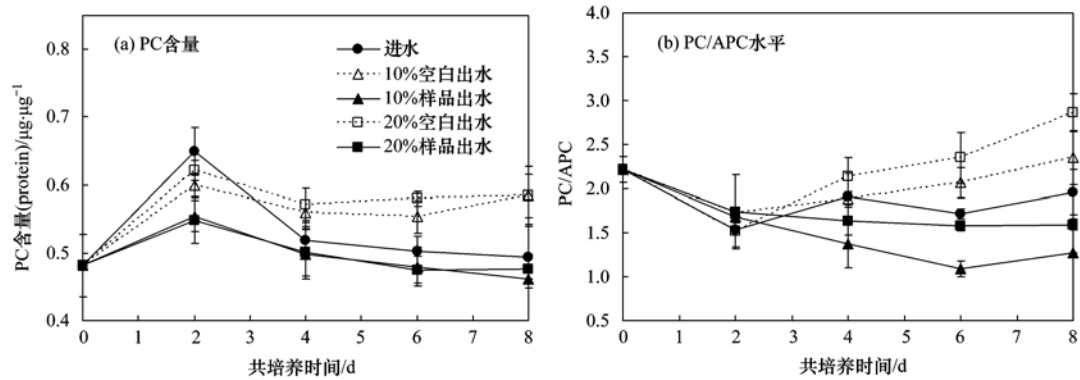


图3 不同水体交换率下凤眼莲对铜绿微囊藻 PC 含量与 PC/APC 水平的影响

Fig. 3 Changes in PC level and PC/APC ratio of *M. aeruginosa* under the impact of *E. crassipes* at different water exchange rate

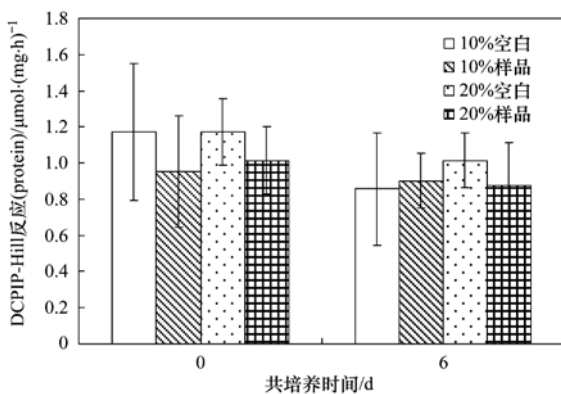


图4 不同水体交换率下凤眼莲对铜绿微囊藻 DCPIP-Hill 反应活力的影响

Fig. 4 Change in DCPIP-Hill reaction activity of *M. aeruginosa* under the impact of *E. crassipes* at different water exchange rate

可见,凤眼莲可能主要通过损伤铜绿微囊藻的 PC 和 PC/APC 水平对铜绿微囊藻整个光合系统中的能量捕获与电子传递过程进行干扰,而增加水体交换率在一定程度上可以减轻这种伤害。

2.3 凤眼莲对铜绿微囊藻 SOD 与 TTC-脱氢酶的影响

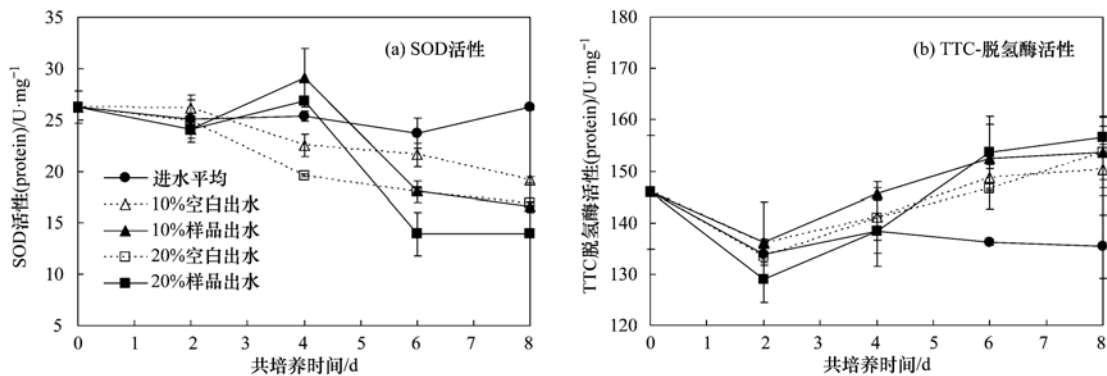


图5 不同水体交换率下凤眼莲对铜绿微囊藻 SOD 和 TTC-脱氢酶活性的影响

Fig. 5 Change in SOD and TTC-dehydrogenase activities of *M. aeruginosa* under the impact of *E. crassipes* at different water exchange rate

光合电子传递链中电子的渗漏促进活性氧自由基(ROS)的形成,而 SOD 是藻细胞活性氧清除系统中一类重要的保护酶^[24]。如图 5(a)所示,在半连续培养条件下,空白对照中藻细胞 SOD 水平随着细胞生长周期的进程逐步有所下降。凤眼莲影响下,铜绿微囊藻 SOD 活性呈现先升高后下降的趋势,这与芦苇 (*Phragmites communis*)^[25]、水稻 (*Oryza sativa*)^[26] 对铜绿微囊藻 SOD 活性的影响一致。虽然第 6~8 d 时,10% 水体交换率处理中的铜绿微囊藻的 SOD 活性显著高于 20% 水体交换率,但从酶活抑制效率来看,第 8 d 时,凤眼莲影响下 10% 水体交换率和 20% 水体交换率处理中铜绿微囊藻的 SOD 活性分别为相应空白对照的 $86.43\% \pm 2.94\%$ 和 $82.99\% \pm 1.77\%$,两者差异不显著。

TTC-脱氢酶常被用来反映活的藻细胞体的活力^[27],也被用来评估次氯酸钙等杀藻剂的效果^[20]。然而在本实验条件下,凤眼莲影响下的铜绿微囊藻 TTC-脱氢酶的比酶活与空白对照相比,差异并不显著[图 5(b)]。可见,铜绿微囊藻 TTC-脱氢酶活性

并不能很好地反映凤眼莲根系分泌物的抑藻效果。

2.4 凤眼莲对铜绿微囊藻 MDA 的影响

MDA 是磷脂不饱和脂肪酸过氧化反应的产物, 可以作为细胞膜受损的标志^[28]。如图 6 所示, 铜绿微囊藻的 MDA 含量受到凤眼莲影响 6 d 后显著高于空白对照, 10% 和 20% 水体交换率处理的丙二醛含量第 8 d 时分别升至相应空白对照的 2.95 ± 0.074 倍和 2.22 ± 0.086 倍, 但 20% 水体交换率处理中的藻 MDA 含量最终显著低于 10% 水体交换率的处理。可见, 凤眼莲对铜绿微囊藻造成了氧化伤害, 而水体交换率的增加在一定程度上可以减轻这种伤害。

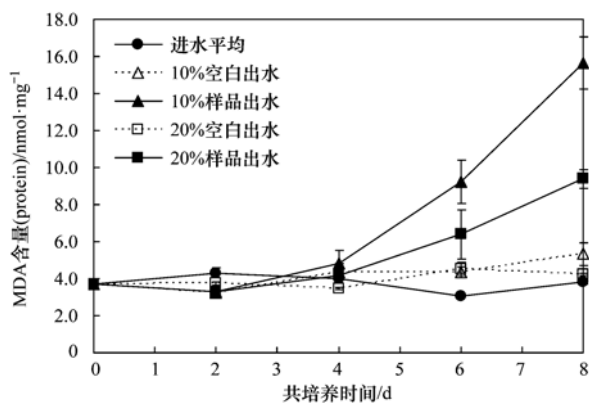


图 6 不同水体交换率下凤眼莲对铜绿微囊藻 MDA 含量的影响

Fig. 6 Change in MDA content of *M. aeruginosa* under the impact of *E. crassipes* at different water exchange rate

2.5 凤眼莲与铜绿微囊藻共培养条件下水体氮、磷营养的吸收与释放的变化

如图 7(a) 所示, 在本实验条件下, 2~4 d 内凤眼莲与铜绿微囊藻共培养液中 TDN 的含量显著低于空白对照。但随着藻细胞的加速衰亡, 第 12 d 时共培养液中 TDN 的含量与初始 TDN 含量无显著差异, 增加水体交换率对共培养液中 TDN 含量的回升有一定的延缓作用。而空白对照中的 TDN 的含量随着藻细胞自然衰亡期的到来, 在第 12 d 也开始出现了上升。因此, 凤眼莲可能主要通过促进蓝藻的衰亡和分解, 加速了营养盐的释放。

随着蓝藻的死亡与分解, 大量无机营养盐释放到水体中, 其中, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 是主要释放的氮营养盐形式^[29]。如图 7(b) 所示, 在凤眼莲影响下, 10% 水体交换率处理的共培养液中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度的上升速度明显快于 20% 水体交换率的处理, 第 6 d 时 10% 水体交换率处理的共培养液中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度就达到最高值 (2.55 ± 0.16) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 这可能主要是

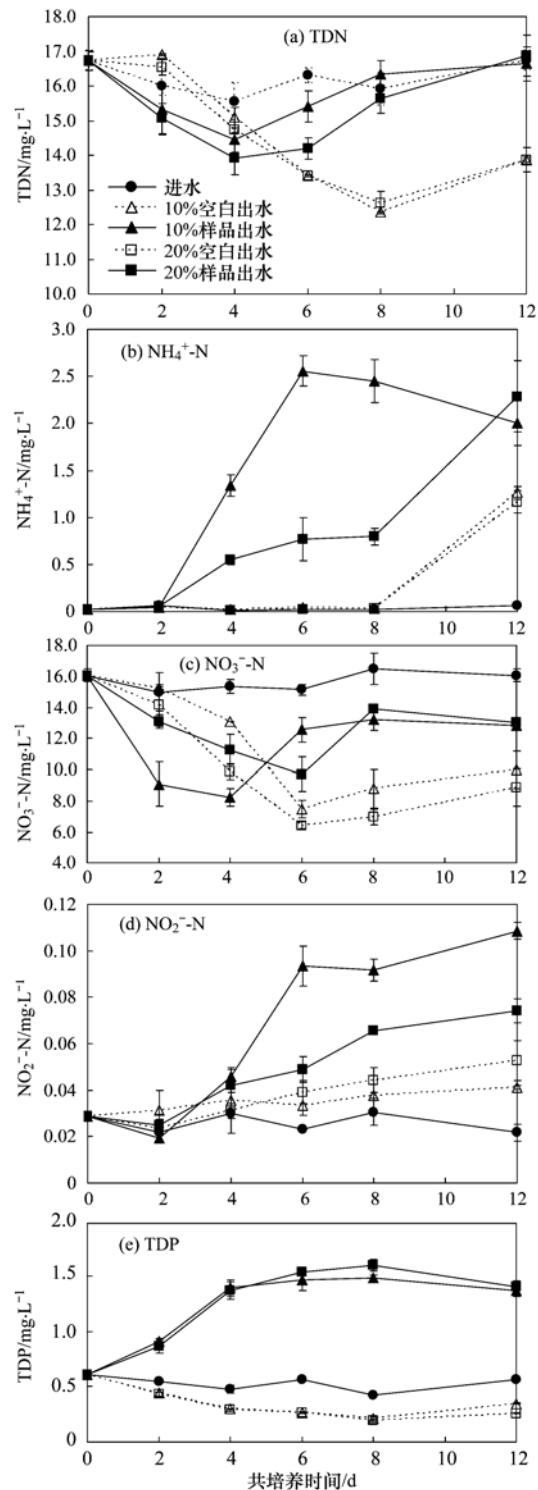


图 7 不同水体交换率下凤眼莲对铜绿微囊藻营养盐释放的影响

Fig. 7 Changes of the nutrients concentration in *M. aeruginosa* cultures under the impact of *E. crassipes* at different water exchange rate

由于 10% 水体交换率处理中的藻细胞衰亡速度快于 20% 水体交换率的处理。同时, 本实验中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 也是一种主要释放的氮营养盐形式, 其浓度的上升趋势与 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 相同 [图 7(c)]。而 $\text{NO}_2^- \text{-N}$

虽然在水体中浓度很小,但在凤眼莲影响的 6 d 后, 10% 水体交换率处理的共培养液中 NO_2^- -N 浓度显著高于 20% 水体交换率的处理[图 7(d)], 10% 水体交换率处理的共培养液中 NO_2^- -N 浓度是 20% 水体交换率处理的 $(1.31 \pm 0.057) \sim (1.91 \pm 0.067)$ 倍. 因此,可能在凤眼莲干预下的蓝藻衰亡和分解过程中,低水体交换率有利于提高水体的硝化-反硝化反应的能力. 另一方面,在凤眼莲干预下的蓝藻衰亡和分解中,水体 TDP 的释放明显比氮营养盐更快[图 7(e)].

2.6 凤眼莲对铜绿微囊藻 MCs 的生产和释放的影响

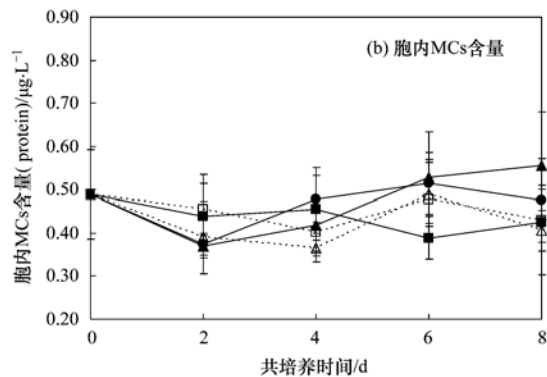
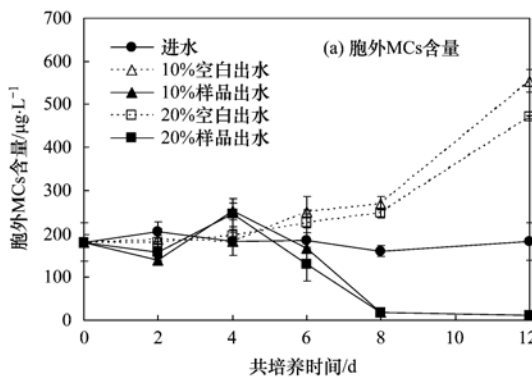


图 8 不同水体交换率下凤眼莲对铜绿微囊藻胞外、胞内 MCs 含量的影响

Fig. 8 Changes of extracellular and intracellular MC-LR equivalents in *M. aeruginosa* cultures under the impact of *E. crassipes* at different water exchange rate

2.7 凤眼莲对 MCs 的积累情况

从凤眼莲全株含有的 MCs 水平来看,与产毒铜绿微囊藻半连续共培养 12 d 后,凤眼莲积累的 MCs 含量显著提高,但 10% 与 20% 水体交换率的处理间差异不显著,平均 MCs 的积累量(FW)为 $(5.95 \pm 0.76) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ (图 9).

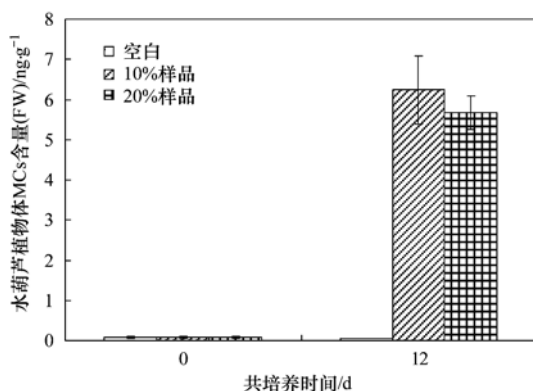


图 9 不同水体交换率下凤眼莲对 MCs 积累

Fig. 9 Changes of MCs content in *E. crassipes* at different water exchange rate

3 讨论

在没有限制营养和光照的条件下,凤眼莲通过

生产毒素是产毒蓝藻生长过程中基本的构成要素. 在半连续共培养实验中,无凤眼莲影响的空白对照,随着藻细胞衰亡的开始,释放到水体的 MCs 显著上升,第 12 d 时 10% 和 20% 水体交换率的处理分别达到 $(554.05 \pm 26.65) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(470.14 \pm 3.73) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. 而在凤眼莲影响下,水体中的 MCs 含量并没有升高,第 12 d 时 10% 和 20% 水体交换率的处理分别下降到 $(12.07 \pm 0.63) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(11.36 \pm 0.04) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ [图 8(a)]. 另一方面,凤眼莲影响下,铜绿微囊藻胞内的 MCs 水平与对照相比并没有显著的差异[图 8(b)].

分泌化感物质对藻类产生竞争抑制. 其中 *N*-苯基-2-萘胺等 3 种凤眼莲化感物质获得分离,但是化感物质实际上是一类复杂的混合物^[30]. 本研究采用的半连续共培养条件,正是体现了这种复杂化感混合物的综合效应.

有研究认为,植物化感作用最重要的机制之一就是化感物质与 PS II 中的组成成分结合,抑制 PS II 中的电子传递^[31]. 本研究结果表明,与凤眼莲共培养条件下,铜绿微囊藻受到胁迫,藻细胞大量衰亡,但其 PS II 中的电子传递并没有受到显著影响. 线性回归分析表明,凤眼莲影响下,铜绿微囊藻中的 PC/APC 水平与藻细胞密度呈显著正相关关系 ($r^2 = 0.6430, P < 0.05$). 因此,凤眼莲可能主要通过损伤铜绿微囊藻的 PC 和 PC/APC 水平对铜绿微囊藻整个光合系统中的能量捕获与电子传递过程进行干扰.

凤眼莲的胁迫加速了铜绿微囊藻细胞的衰亡,从而加速了其胞内营养盐的释放. 本研究表明,共存水体短期内存在营养盐上升的情况. 可能由于凤眼莲对水体氮、磷吸收的强度差异,水体 TDP 的释放明显比氮营养盐快. 后续还需进一步研究,扩大

凤眼莲吸收作用与水体交换作用消减这一短期营养盐加速释放风险的可能性与贡献程度。

Robillot 等^[32]指出铜绿微囊藻对数生长期时, 释放少部分 MCs, 并且维持在一个稳定的水平, 而藻细胞内的 MCs 数量是胞外的 6 倍以上。随着藻细胞的死亡, 细胞内的 MCs 就会大量地释放到水体中^[33]。凤眼莲的胁迫加速了铜绿微囊藻细胞的衰亡, 也必然导致胞内 MCs 的释放。本研究结果表明, 凤眼莲并没有促进胞外 MCs 浓度的上升, 相反却加速了 MCs 的消减。已报道的爪哇莫丝 (*Vesicularia dubyana*)^[34]、加拿大披碱草 (*Elymus canadensis*)^[34] 和浮萍 (*Lemna gibba*)^[35] 积累 MCs 含量 (FW) 水平分别可达到 110.0、40.0 和 2.24 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 而凤眼莲平均 MCs 含量 (FW) 仅为 $(5.95 \pm 0.76) \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 这可能是与植株的差异和毒素接触时间的差异有关。同时说明凤眼莲对 MCs 的积累不是铜绿微囊藻胞外 MCs 消减的主要原因。

自然水体中存在着大量的不同种类的藻毒素降解微生物^[36], 而本实验中所用的凤眼莲并不是来源于无菌苗, 且共培养实验在敞口的玻璃器皿中进行。凤眼莲发达的根系能够为细菌提供生长依附的媒介, 有效提高生物依附表面积与上覆水体积的比例。高岩等^[37]研究发现, 凤眼莲能够显著提高水体硝化、反硝化细菌的数量。因此, 笔者推测, 凤眼莲可能通过提高 MCs 降解细菌的数量促进了水体中 MCs 的消减。

已有的研究发现, 莱茵衣藻 (*Chlamydomonas reinhardtii*)^[38]能够促进水华鱼腥藻 (*Anabaena flos-aquae*) 类毒素的生产, 芦苇 (*Phragmites communis* Trin.)^[39]和蚤状溞 (*Daphnia pulex*)^[40]能够促进铜绿微囊藻 MCs 的生产。而凤眼莲并没有促进铜绿微囊藻 MCs 的生产。

4 结论

(1) 凤眼莲能够有效地抑制铜绿微囊藻的生长, 促进藻细胞的衰亡。凤眼莲可能主要通过损伤铜绿微囊藻的 PC 和 PC/APC 水平对铜绿微囊藻整个光合系统中的能量捕获与电子传递过程进行干扰。同时, SOD 酶活的最终下降与藻细胞 MDA 水平的提高进一步证明了凤眼莲对铜绿微囊藻也形成了氧化伤害。增加水体交换率有利于减缓凤眼莲对铜绿微囊藻的伤害。

(2) 凤眼莲通过促进蓝藻的衰亡和分解, 加速了营养盐的释放。12 d 内, TDN 回升到初始水平, 而

水体 TDP 水平的释放速度明显比氮营养盐更快。

(3) 凤眼莲没有促进铜绿微囊藻中 MCs 的生产, 同时可以有效地消减胞外释放的 MCs。且短期内, 凤眼莲自身平均 MCs 含量 (FW) 的积累量仅为 $(5.95 \pm 0.76) \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

参考文献:

- [1] 国家环保总局科技标准司. 中国湖泊富营养化及其防治研究 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001. 23-28.
- [2] Murphy T P, Lawson A, Kumagai M, et al. Review of emerging issues in sediment treatment [J]. Aquatic Ecosystem Health and Management, 1999, 2(4): 419-434.
- [3] 邱臣坤, 张太平. 受污染底泥固化/稳定化处理及营养物质释放特征研究 [J]. 生态环境学报, 2011, 20(10): 1530-1535.
- [4] 童昌华, 杨肖娥, 濮培民. 富营养化水体的水生植物净化试验研究 [J]. 应用生态学报, 2004, 15(8): 1447-1450.
- [5] Sun L, Liu Y, Jin H. Nitrogen removal from polluted river by enhanced floating bed grown canna [J]. Ecological Engineering, 2009, 35(1): 135-140.
- [6] Holm L G, Plucknett D L, Pancho V, et al. The world's worst weeds: Distribution and biology [M]. Honolulu: University Press of Hawaii, 1977. 609.
- [7] Malik A. Environmental challenge vis a vis opportunity: the case of water hyacinth [J]. Environment International, 2007, 33(1): 122-138.
- [8] 宋任彬, 杨琰, 何锋, 等. 水葫芦控制性种养技术研究 [J]. 环境科学导刊, 2011, 30(4): 5-7, 16.
- [9] 严少华, 刘海琴, 张志勇, 等. 水葫芦机械化采收减容一体化船 [P]. 中国专利: ZL201020100681.6, 2011-11-17.
- [10] 叶小梅, 常志州, 杜严静, 等. 水葫芦能源利用的生命周期环境影响评价 [J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(12): 2450-2456.
- [11] 吴晓东, 孔繁翔. 水华期间太湖梅梁湾微囊藻原位生长速率的测定 [J]. 中国环境科学, 2008, 28(6): 552-555.
- [12] 王智, 张志勇, 韩亚平, 等. 滇池湖湾大水域种养水葫芦对水质的影响分析 [J]. 环境工程学报, 2012, 6(11): 3827-3832.
- [13] 杨善元, 俞子文, 孙文浩, 等. 凤眼莲根系中抑藻物质分离与鉴定 [J]. 植物生理学报, 1992, 18(4): 399-402.
- [14] 刘洁生, 陈芝兰, 杨维东, 等. 凤眼莲根系丙酮提取物抑制赤潮藻类生长的机制研究 [J]. 环境科学学报, 2006, 26(5): 815-820.
- [15] 陈芝兰, 杨维东, 刘洁生, 等. 凤眼莲根系分泌物对塔玛亚历山大藻的化感作用 [J]. 水生生物学报, 2005, 29(3): 313-317.
- [16] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 244-248.
- [17] Wintermans J F G M, De Mots A. Spectrophotometric characteristics of chlorophyll a and b and their pheophytins in ethanol [J]. Biochimica et Biophysica Acta, 1965, 109(2): 448-453.

- [18] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein dye binding [J]. Analytical Biochemistry, 1976, **72** (1-2): 248-254.
- [19] Bennett A, Bogorad L. Complementary chromatic adaptation in a filamentous blue-green alga [J]. Journal of Cell Biology, 1973, **58**(2): 419-435.
- [20] Xie J, Hu W, Pei H, *et al.* Detection of amount and activity of living algae in fresh water by dehydrogenase activity (DHA) [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2008, **146**(1-3): 473-478.
- [21] Sallal A K J, Nimer N A, Al-Oriquat G. Inhibition of photosystem II in *Chlorogloeopsis fritschii* with shikonin acetate [J]. FEBS Letters, 1990, **263**(2): 248-250.
- [22] Wang Z, Xiao B, Song L, *et al.* Effects of microcystin-LR, linear alkylbenzene sulfonate and their mixture on lettuce (*Lactuca sativa* L.) seeds and seedlings [J]. Ecotoxicology, 2011, **20**(4): 803-814.
- [23] Gantt E. Phycobilisomes; Light-harvesting pigment complexes [J]. Bioscience, 1975, **25**(12): 781-788.
- [24] Scandalios J G. Oxygen stress and superoxide dismutases [J]. Plant Physiology, 1993, **101**(1): 7-12.
- [25] 李锋民, 胡洪营, 种云霄, 等. 芦苇化感物质 EMA 对铜绿微囊藻生理特性的影响 [J]. 中国环境科学, 2007, **27**(3): 377-381.
- [26] 张余霞, 张玲, 张阳阳, 等. 盐京九号水稻种植水对铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)抑制作用的研究 [J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2010, **10**(4): 99-104.
- [27] 梁文艳, 王珂, 阮清鹭, 等. TTC-脱氢酶还原法测定铜绿微囊藻活性 [J]. 环境科学学报, 2008, **28**(9): 1745-1750.
- [28] Halliwell B, Gutteridge J M C. Free radicals in biology and medicine (2nd ed.) [M]. Oxford: Clarendon Press, 1989. 123.
- [29] 曾巾, 杨柳燕, 肖琳, 等. 湖泊氮素生物地球化学循环及微生物的作用 [J]. 湖泊科学, 2007, **19**(4): 382-389.
- [30] 孙文浩, 余叔文, 杨善元, 等. 凤眼莲根系分泌物中的克藻化合物 [J]. 植物生理学报, 1993, **19**(1): 92-96.
- [31] Einhellig F A. Mechanism of action of allelochemicals in allelopathy [A]. In: Inderjit, Einhellig F A, Dakshini K M M. Allelopathy: organisms, Processes, and Applications [C]. Washington DC: American Chemical Society, 1995. 96-116.
- [32] Robillot C, Vinh J, Puiseux-Dao S, *et al.* Hepatotoxin production kinetics of the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* PCC 7820, as determined by HPLC-Mass spectrometry and protein phosphatase bioassay [J]. Environmental Science and Technology, 2000, **34**(16): 3372-3378.
- [33] Daly R I, Ho L, Brookes J D, *et al.* Effect of chlorination on *Microcystis aeruginosa* cell integrity and subsequent microcystin release and degradation [J]. Environmental Science & Technology, 2007, **41**(12): 4447-4453.
- [34] Pflugmacher S, Wiegand C, Beattie K A, *et al.* Uptake of the cyanobacterial hepatotoxin microcystin-LR by aquatic macrophytes [J]. Journal of Applied Botany and Food, 1998, **72**(5-6): 228-232.
- [35] Saqrane S, Ghazali I E, Ouahid Y, *et al.* Phytotoxic effects of cyanobacteria extract on the aquatic plant *Lemna gibba*: Microcystin accumulation, detoxication and oxidative stress induction [J]. Aquatic Toxicology, 2007, **83**(4): 284-294.
- [36] Christoffersen K, Lyck S, Winding A. Microbial activity and bacterial community structure during degradation of microcystins [J]. Aquatic Microbial Ecology, 2002, **27**(2): 125-136.
- [37] 高岩, 易能, 张志勇, 等. 凤眼莲对富营养化水体硝化、反硝化脱氮释放 N_2O 的影响 [J]. 环境科学学报, 2012, **32**(2): 349-359.
- [38] Kearns K D, Hunter M D. Green algal extracellular products regulate antialgal toxin production in a cyanobacterium [J]. Environmental Microbiology, 2000, **2**(3): 291-297.
- [39] 门玉洁, 胡洪营. 芦苇化感物质 EMA 对铜绿微囊藻生长及藻毒素产生和释放的影响 [J]. 环境科学, 2007, **28**(9): 2058-2062.
- [40] Jang M H, Ha K, Joo G J, *et al.* Toxin production of cyanobacteria is increased by exposure to zooplankton [J]. Freshwater Biology, 2003, **48**(9): 1540-1550.

CONTENTS

Form of the Particulate Matter Ambient Air Standards in China	WANG Shuai, DING Jun-nan, WANG Rui-bin, <i>et al.</i> (401)
Seasonal Variation of Carcinogenic Heavy Metals in PM _{2.5} and Source Analysis in Beijing	TAO Jun, ZHANG Ren-jian, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (411)
Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} and PM ₁₀ Pollution Status and the Correlation of Particulate Matters and Meteorological Factors During Winter and Spring in Beijing	ZHAO Chen-xi, WANG Yun-qi, WANG Yu-jie, <i>et al.</i> (418)
Inversion and Spatial-Temporal Distribution Analysis on PM _{5.0} Inhalable Particulate in Beijing	WANG Yan-hui, XIAO Yao (428)
Characterization of Ultrafine Particle Size Distribution in the Urban Atmosphere of Hangzhou in Spring	XIE Xiao-fang, SUN Zai, YANG Wen-jun (436)
Size Distributions of Aerosol During the Spring Festival in Nanjing	WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (442)
Size Distributions of Organic Carbon and Elemental Carbon in Nanjing Aerosol Particles	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (451)
Characterization of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ in Xinzhou City	SHI Mei-xian, PENG Lin, LIU Xiao-feng, <i>et al.</i> (458)
Seasonal Variation of Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Atmosphere of an Industrial Area, Guangzhou	QING Xian, SU Yuan, SU Qing, <i>et al.</i> (464)
Hazard Evaluation Modeling of Particulate Matters Emitted by Coal-Fired Boilers and Case Analysis	SHI Yan-ting, DU Qian, GAO Jian-min, <i>et al.</i> (470)
Chemical Characteristics of Precipitation in South China Sea	XIAO Hong-wei, LONG Ai-min, XIE Lu-hua, <i>et al.</i> (475)
Analysis of Acid Rain Characteristics of Lin'an Regional Background Station Using Long-term Observation Data	LI Zheng-quan, MA Hao, MAO Yu-ding, <i>et al.</i> (481)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition in Beijing Urban Area	HE Cheng-wu, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (490)
Studies of Ozone Formation Potentials for Benzene and Ethylbenzene Using a Smog Chamber and Model Simulation	JIA Long, XU Yong-fu (495)
Characteristics of Fly Ash Particles Deposition in the Snowpack of Laohugou Glacier No. 12 in Western Qilian Mountains, China	DONG Zhi-wen, QIN Da-he, QIN Xiang, <i>et al.</i> (504)
Odor Emission Rate of Municipal Solid Waste from Landfill Working Area	QIANG Ning, WANG Hong-yu, ZHAO Ai-hua, <i>et al.</i> (513)
Gaseous Phenol Removal in a Bio-Trickling Filter	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (520)
Particulate Distribution Characteristics of Chinese Phrase V Diesel Engine Based on Butanol-Diesel Blends	LOU Di-ming, XU Ning, FAN Wen-jia, <i>et al.</i> (526)
Effects of Turning Frequency on Emission of Greenhouse Gas and Ammonia During Swine Manure Windrow Composting	ZHAO Chen-yang, LI Hong-mei, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (533)
Oxidation of Mercury by CuBr ₂ Decomposition Under Controlled-Release Membrane Catalysis Condition	HU Lin-gang, QU Zan, YAN Nai-qiang, <i>et al.</i> (541)
Distributions and Influencing Factors of Total Dissolved Inorganic Antimony in the Coastal Area of Zhejiang and Fujian	ZHANG Xu-zhou, REN Jing-ling, LIU Zong-guang, <i>et al.</i> (547)
Calculation of Allowable Pollution Loads for Lake and Reservoir Based on Bi-direction Algorithm and Its Case Study	JIA Hai-feng, GUO Yu (555)
Risk Assessment of Quaternary Groundwater Contamination in Beijing Plain	GUO Gao-xuan, LI Yu, XU Liang, <i>et al.</i> (562)
Mixing Behavior of Nutrients in Different Seasons at Liaohe Estuary	ZHANG Jin-hua, YU Li-xia, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (569)
Distribution of Nitrogen in the Sediment of Taige South River Estuary	MA Jiu-yuan, WANG Guo-xiang, LI Zhen-guo, <i>et al.</i> (577)
Selection and Purification Potential Evaluation of Woody Plant in Vertical Flow Constructed Wetlands in the Subtropical Area	CHEN Yong-hua, WU Xiao-fu, HAO Jun, <i>et al.</i> (585)
Correlation of Substrate Structure and Hydraulic Characteristics in Subsurface Flow Constructed Wetlands	BAI Shao-yuan, SONG Zhi-xin, DING Yan-li, <i>et al.</i> (592)
Impacts of <i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms Stress on the Growth Characteristics, Microcystins and Nutrients Release of <i>Microcystis aeruginosa</i>	ZHOU Qing, HAN Shi-qun, YAN Shao-hua, <i>et al.</i> (597)
Effects of Different Pre-oxidants on DBPs Formation Potential by Chlorination and Chloramination of Yangtze River Raw Water	TIAN Fu-xiang, XU Bin, RONG Rong, <i>et al.</i> (605)
Adsorption of Phenanthrene from Aqueous Solution on Cetylpyridinium Bromide (CPB)-Modified Zeolite	LI Jia, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (611)
Characteristics and Selectivity of Photocatalytic-Degradation of Tetracycline Hydrochloride	SONG Chen-yi, YIN Da-qiang (619)
Characterization of Biocatalysed Sulfate Reduction in a Cathode of Microbial Electrolysis System	FU Shi-yu, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (626)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in A/DAT-IAT System for Municipal Wastewater Treatment Based on Ecological Safety	YANG Sai, ZHOU Qi-xing, HUA Tao (633)
Membrane Surface Fouling Properties in MBRs for High-Salinity Wastewater Treatment	LI Bin, WANG Zhi-wei, AN Ying, <i>et al.</i> (643)
Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Ozone-biological Aerated Filter	LIU Ming-guo, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (651)
Treatment of Pectin Wastewater by Anaerobic Biological Process	CHEN Bing-bing, YANG Chun-ping, LI Xiang, <i>et al.</i> (657)
Sorption Mechanism of Ofloxacin by Carbon Nanotubes	ZHAO Xing-xing, YU Shui-li, WANG Zhe (663)
Biosorption Characteristics of Cu ²⁺ by Spent Substrate of <i>Pleurotus</i> Oyster	HU Xiao-jing, ZANG Ting-ting, GU Hai-dong, <i>et al.</i> (669)
Adsorption Dynamics and Breakthrough Characteristics Based on the Fluidization Condition	WANG Jun, WANG Yao, HUANG Xing, <i>et al.</i> (678)
Characteristics of Speciation and Evaluation of Ecological Risk of Heavy Metals in Sewage Sludge of Guangzhou	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, CAI Da-chuan, <i>et al.</i> (684)
Spatial Distribution and Accumulation of Heavy Metal in Arable Land Soil of China	ZHANG Xiao-min, ZHANG Xiu-ying, ZHONG Tai-yang, <i>et al.</i> (692)
Pollution Patterns and Health Risk Assessment for Polychlorinated Biphenyls in Soils from a Capacitor Storage Site	ZHOU Ling-li, WU Guang-long, XUE Nan-dong, <i>et al.</i> (704)
Occurrence and Spatial Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Shenzhen, China	ZHANG Di, CAO Shan-ping, SUN Jian-lin, <i>et al.</i> (711)
Risk Assessment and Countermeasures of Heavy Metals Pollution in Wanquan Segment of Yanghe River	TAN Bing, WANG Tie-yu, ZHU Zhao-yun, <i>et al.</i> (719)
Effects of Group Matching Curing Agent on Exchangeable Pb, Cd, Zn Contents in the Potted Soils and their Accumulation in Rice Plants	ZENG Hui, ZHOU Hang, QIU Qiong-yao, <i>et al.</i> (727)
Impact of Compound Chelants on Removal of Heavy Metals and Characteristics of Morphologic Change in Soil from Heavy Metals Contaminated Sites	YIN Xue, CHEN Jia-jun, LÜ Ce (733)
Characterization of Manganese Oxidation by <i>Pseudomonas</i> sp. QJX-1	ZHOU Na-na, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (740)
Effects of the Ratio of NO ₃ ⁻ -N to NO ₂ ⁻ -N on the Removal of Sulfide and Nitrogen by Mixed Culture and Pure Culture	CHEN Zi-ai, CHEN Hui-juan, WEI Ben-ping, <i>et al.</i> (746)
Carbon Metabolic Characteristics of Airborne Microbes in Hangzhou	GONG Chan-juan, XU Jing, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i> (753)
Study on the Backward Extraction of Cellulase in Rhammolid Reverse Micelles	ZHAO Yan-ge, YUAN Xing-zhong, HUANG Hua-jun, <i>et al.</i> (759)
Inner- and Inter-Species Differences of Mercury Concentration in Common Fishes from the Yellow Sea	ZHU Ai-jia, XU Zhan-zhou, LIU Gui-ze, <i>et al.</i> (764)
Study on the Effect of Enzymatic Activity and Acute Toxicity of Three PAEs on <i>Eisenia foetida</i>	WANG Yan, MA Ze-min, WU Shi-jin (770)
Environmental Safety Assessment on the New Super Absorbent Polymers Applied into a Soil-Chinese Cabbage System	LI Xi, HE Ji-zheng, ZHENG Yuan-ming, <i>et al.</i> (780)
Study on Dynamics of Hydrogen Sulfide and Carbonyl Sulfide Emission Fluxes from <i>Suaeda salsa</i> Marsh in the Yellow River Estuary	LI Xin-hua, GUO Hong-hai, YANG Li-ping, <i>et al.</i> (786)
Key Microbial Processes in Nitrous Oxide Emissions of Agricultural Soil and Mitigation Strategies	ZHU Yong-guan, WANG Xiao-hui, YANG Xiao-ru, <i>et al.</i> (792)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年2月15日 35卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 2 Feb. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行