

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第5期

Vol.36 No.5

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

深圳大气颗粒物中卤代多环芳烃污染研究 孙建林,常文静,陈正侠,曾辉(1513)

北京市典型餐饮企业 VOCs 排放特征研究 崔彤,程婧晨,何万清,任培芳,聂磊,徐东耀,潘涛(1523)

2006~2010年珠三角地区 SO₂ 特征分析 李菲,谭浩波,邓雪娇,邓涛,徐婉筠,冉靓,赵春生(1530)

环境空气 PM_{2.5} 连续监测系统手工采样比对测试 王强,钟琪,迟颖,张杨,杨凯(1538)

燃煤电厂可凝结颗粒物的测试与排放 裴冰(1544)

南海水域不同深度非光合微生物的固碳潜能及其对不同电子供体的响应 方峰,王磊,席雪飞,胡佳俊,付小花,陆兵,徐殿胜(1550)

基于 GOCI 影像和水体光学分类的内陆湖泊叶绿素 a 浓度遥感估算 冯驰,金琦,王艳楠,赵丽娜,吕恒,李云梅(1557)

贵州清水江流域丰水期水化学特征及离子来源分析 吕婕梅,安艳玲,吴起鑫,罗进,蒋浩(1565)

东莞石马河流域水化学特征时空差异及来源辨析 高磊,陈建耀,王江,柯志庭,朱爱萍,许凯(1573)

河南鸡冠洞洞穴水对极端气候的响应及其控制因素研究 刘肖,杨琰,彭涛,赵景耀,任小凤,张银环,聂旭东,李建仓,凌新有,张志钦(1582)

石漠化治理对岩溶地下水水化学和溶解无机碳稳定同位素的影响 肖时珍,熊康宁,蓝家程,张晖,杨龙(1590)

旱季不同土地利用类型下岩溶碳汇效应差异 赵瑞一,梁作兵,王尊波,于正良,江泽利(1598)

有机氯农药在岩溶区上覆土壤中的垂直迁移特征及对地下水的影响 孙玉川,王永启,梁作兵,袁道先(1605)

山东南四湖沉积物中汞的污染现状及迁移研究 曹霏霏,杨丽原,庞绪贵,王炳华,王云倩(1615)

摇蚊幼虫扰动下沉沉积物微环境和微界面对物理扰动强度的响应 史晓丹,李勇,李大鹏,王忍,邓猛,黄勇(1622)

南方红壤区氮湿沉降特征及其对流域氮输出的影响 郝卓,高扬,张进忠,徐亚娟,于贵瑞(1630)

不同紫色母岩对景观水体氮磷及有机物去除的影响 黄雪娇,刘晓晨,李振轮,石纹豪,杨珊(1639)

荔枝落叶对铜绿微囊藻生长和光合作用的影响 汪小雄,姜成春,李锦卫,汪晓军(1648)

黄连根茎浸提物对绿藻的毒理作用 陈亚楠,袁玲(1655)

饮用水中消毒副产物 1,1-二氯丙酮的形成机制 丁春生,孟壮,徐洋洋,缪佳(1662)

水中利谷隆氯化降解动力学和消毒副产物生成特性 凌晓,胡晨燕,程明,谷建(1668)

化学消毒的中和剂对水中内毒素活性检测的影响 张灿,刘文君,史文,安代志,白森,徐稳(1674)

牛粪生物炭对水中氨氮的吸附特性 马锋锋,赵保卫,刁静茹,钟金魁,李安邦(1678)

丁二酸改性茶油树木屑吸附附的研究 张晓峰,陈迪云,彭燕,刘永胜,熊雪莹(1686)

SPG 膜表面润湿性对膜污染和化学耐受性的影响 张静,肖太民,张晶,曹丽亚,杜亚威,刘春,张磊(1694)

TiO₂ 诱导下左旋氧氟沙星的可见光降解及其机制 郭宏生,刘亚楠,乔琪,魏红,董呈幸,薛洁,李克斌(1700)

新型高分子絮凝剂对废水中 Cr(VI) 的捕集性能 王刚,杜凤龄,常青,徐敏(1707)

基于 OUR-HPR 测量在线估计活性污泥合成 PHA 量 曾善文,王泽宇,高敬,刘东,张代钧,卢培利(1713)

分离高浓度污泥产酸发酵液的自生动态膜形成机制 黄帅,刘宏波,殷波,马惠君,符波,刘和,白洁(1720)

通风强度对市政污泥生物干化中试效果的影响 张喻,韩融,陆文静,王洪涛,明中远,王强,夏伟(1727)

生物可降解螯合剂谷氨酸 N,N-二乙酸四钠对污泥中重金属萃取效率的研究 吴青,崔延瑞,汤晓晓,杨慧娟,孙剑辉(1733)

百乐克(BIOLAK)活性污泥宏基因组的生物多样性及功能分析 田美,刘汉湖,申欣,赵方庆,陈帅,姚永佳(1739)

异养硝化-好氧反硝化菌 YL 的脱氮特性 梁贤,任勇翔,杨垒,赵思琪,夏志红(1749)

菌株 *Arthrobacter* sp. CN2 降解对硝基苯酚的特性与动力学 任磊,史延华,贾阳,姚雪松,Ruth Nahurira,弥春霞,闫艳春(1757)

短短芽胞杆菌及其芽胞对苜蓿的降解 刘芷辰,叶锦韶,彭辉,刘则华,邓庭进,尹华,廖丽萍(1763)

垃圾填埋场抗生素抗性基因初探 李蕾,徐晶,赵由才,宋立岩(1769)

不同构型人工湿地基质中土著菌的耐药性及整合子丰度调查 麦晓蓓,陶然,杨扬,张敏,林剑华,满滢(1776)

硝酸盐和甲烷对覆土中苯系物厌氧氧化的影响 柳蓉,龙焰,王立立,何婷,叶锦韶(1785)

山西高原落叶松人工林土壤呼吸的空间异质性 严俊霞,李洪建,李君剑,武江星(1793)

施氮对黄土旱塬区春玉米土壤呼吸和温度敏感性的影响 姜继韶,郭胜利,王蕊,刘庆芳,王志齐,张彦军,李娜娜,李如剑,吴得峰,孙棋棋(1802)

宣威街道尘中重金属的分布特征及其健康风险评估 张文超,吕森林,刘丁或,刘品威,米持真一,王效举,王青耀(1810)

宝鸡市街道尘埃磁学特征空间分布及环境意义 张俊辉,王瑾,张健,房妮,夏敦胜(1818)

长期施肥下浙江稻田不同颗粒组分有机碳的稳定特征 毛霞丽,陆扣萍,孙涛,张小凯,何丽芝,王海龙(1827)

矿区植被恢复方式对土壤微生物和酶活性的影响 李君剑,刘峰,周小梅(1836)

三江平原典型湿地类型土壤微生物特征与土壤养分的研究 肖焯,黄志刚,武海涛,吕宪国(1842)

钠盐类型对表面活性剂清洗煤油污染土壤的强化效应 黄昭露,陈泉源,周娟,谢墨函(1849)

石油污染土壤的生物修复技术及微生物生态效应 杨茜,吴蔓莉,聂麦茜,王婷婷,张明辉(1856)

可生物降解螯合剂 GLDA 诱导东南景天修复重金属污染土壤的研究 卫泽斌,陈晓红,吴启堂,谭蒙(1864)

绿洲土 Pb-Zn 复合胁迫下重金属形态特征和生物有效性 金诚,赵转军,南忠仁,王胜利,武文飞,王厚成(1870)

硫酸对水稻根系铁锰胶膜形成及吸收的影响 王丹,李鑫,王代长,饶伟,杜光辉,杨军,化党领(1877)

臭氧对几种楠木气体交换参数的影响 李苗苗(1888)

某货车侧翻水污染事件的环境损害评估方法探索 蔡锋,赵士波,陈刚才,鲜思淑,杨清玲,周贤杰,余海(1902)

《环境科学》征订启事(1543) 《环境科学》征稿简则(1756) 信息(1667,1726,1809,1848)

荔枝落叶对铜绿微囊藻生长和光合作用的影响

汪小雄^{1,2}, 姜成春^{2*}, 李锦卫², 汪晓军¹

(1. 华南理工大学环境与能源学院, 广州 510006; 2. 深圳职业技术学院建筑与环境工程学院, 深圳 518055)

摘要: 利用浮游植物荧光分类仪对暴露于不同浓度荔枝落叶浸出液下铜绿微囊藻的生长、最大光合作用效率(F_v/F_m)、实际光合作用效率(YII)、光能利用效率(α)、最大相对电子传递速率(rETRmax)和光饱和系数(Ik)进行了为期 15 d 的检测, 研究浸出液对铜绿微囊藻生长和光合作用的影响. 结果发现, 浸泡 5 d 的荔枝落叶浸出液可以抑制藻的生长, 呈明显的浓度抑制型变化, 随着时间的延长, 抑制作用下滑. 荧光参数 F_v/F_m 、YII 和 α 与浸出液浓度由负相关转为正相关或保持正相关关系, 浸出液可能早期对藻光合作用发生胁迫, 或通过提高光能利用效率来度过胁迫环境, rETRmax、Ik 和叶绿素 a 浓度与浸出液浓度由负相关转为显著负相关关系. 三维荧光图谱结果表明, 第 15 d 时, 在投量为 $2.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 色氨酸及酪氨酸荧光峰强度约为 $1.2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 投量情况下的 1/3, 同时腐殖酸的荧光峰强度减弱. 进一步研究藻细胞生长的半抑制浓度 EC_{50} 值表明, 与传统的农作物秸秆控藻比较, 其 EC_{50} 值较低, 可能荔枝落叶化感控藻效果较强, 只需较低的浸出液浓度而能达到较好的控藻效果.

关键词: 荔枝; 铜绿微囊藻; 化感作用; 光合作用; 浮游植物荧光分类仪

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)05-1648-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.2015.05.018

Effects of *Litchi chinensis* Defoliation on Growth and Photosynthesis of *Microcystis aeruginosa*

WANG Xiao-xiong^{1,2}, JIANG Chen-chun^{2*}, LI Jin-wei², WANG Xiao-jun¹

(1. College of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. School of Civil and Environmental Engineering, Shenzhen Polytechnic, Shenzhen 518055, China)

Abstract: The growth and physiology of bloom-forming cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* were determined by the pulse amplitude modulated fluorimetry when exposed to different concentrations of *Litchi chinensis* defoliation extract for 15 d. The growth, maximal efficiency (F_v/F_m), effective quantum yield (YII) of PSII photochemistry, photosynthesis efficiency (α), maximum electron transport rate (rETRmax) and light saturation coefficient (Ik) were used to evaluate the growth and photosynthesis in *M. aeruginosa*. It was found that the extract of *L. chinensis* defoliation stored for 5 days significantly inhibited the growth of *M. aeruginosa* in a concentration-dependent way. After a long time of exposure, stimulation effect disappeared gradually. F_v/F_m fluorescence parameters, YII and alpha changed from negative correlation to positive correlation or kept positive correlation with the extract of *L. chinensis* defoliation, which might affect the photosynthesis of *M. aeruginosa* at early time or help the cyanobacterium to survive in the stress environment by improving the efficiency of light energy. Ik, rETRmax and the content of algal chlorophyll-a changed from negative to significant negative correlation with the extract. Three-dimensional fluorescence spectra showed that the peak intensities of tryptophan and tyrosine fluorescence were only about one third in $2.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ extract treatment when compared to the $1.2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ extract treatment on day 15. At the same time, the peak intensity of humic acid fluorescence was weaker than that on day 1. Further study showed that the EC_{50} of algal growth was smaller than that of the traditional crops straw, which might achieve good effect to control the growth of algae with lower concentration of *L. chinensis* defoliation extract due to its strong allelopathy.

Key words: *Litchi chinensis*; *Microcystis aeruginosa*; allelopathy; photosynthesis; Photo-PAM

近年来大量工业废水和生活污水的排入, 加速了湖泊水库的富营养化进程, “水华”频繁出现, 面积逐年扩散, 持续时间延长. 大规模的蓝藻水华暴发降低了水资源的利用效能, 如引起水质腐败、藻毒素通过食物链影响人类的健康、一些藻类及其代谢产物在消毒中产生的“三致”物质、藻类堵塞自来水管的过滤装置、一些藻细胞破坏絮凝过程等. 因此, 有效控制富营养化水体中的藻类, 防止水华的发生成为目前环境领域的研究热点和前沿^[1].

20 世纪 70 年代, Rice^[2] 将化感作用定义为一种植物(包括微生物)通过向环境释放化学物质而

对其他个体产生的有害或有益的作用. 研究表明, 大多数化感物质不仅生物可降解, 而且比合成的农药半衰期较短^[3], 较传统的除草剂污染较小^[4]. 植物化感作用被认为是一种新型的生物抑藻技术, 具

收稿日期: 2014-10-16; 修订日期: 2014-11-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378316); 广州市科技计划项目基金(2009Z1-E751); 公益性行业(水利)科研专项(201301047); 深圳市科技局项目(JCYJ20130331151242230)

作者简介: 汪小雄(1972~), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为水资源保护与水污染控制, E-mail: wangxiaoxiong20@szpt.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: jiangcc@szpt.edu.cn

有高效、经济、生态学风险小等特点,近年来备受国内外关注^[5,6]。目前,利用水生植物控制水华的研究主要集中于沉水植物、挺水植物和浮水植物,并取得了一定的进展^[7]。20世纪80年代以后,利用农作物秸秆抑藻的方法逐步得到了应用。大麦秸秆控藻藻类过度生长的方法逐步得到推广,这也是迄今为止植物化感控藻方面应用效果最好的实例,无论在现场实验还是实验室实验,均证明了大麦秸秆抑制藻类生长的有效性^[8~10]。稻草秸秆浸泡液对铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)生长的化感抑制作用表明,在 $10.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 投加量下,15 d 稻草浸泡液对微囊藻的抑制率达70%以上^[11]。然而,目前对陆生植物化感控藻的研究相对较少,相对于水生植物来说,陆生植物具有材料来源广、数量大、经济成本低、生态相对友好,如利用落叶控藻,兼有废物利用等优点。荔枝是中国南方分布较广的一种常绿乔木植物,具有种植面积广、栽培粗放、寿命长等优点,建立以荔枝落叶浸出液抑藻机制为基础的水体生态调控体系,具有潜在的实用价值。

本研究以黑叶荔枝品种为实验材料,将其落叶水浸出液作用于铜绿微囊藻,实验进行15 d,运用浮游植物荧光分类仪(Photo-PAM)对铜绿微囊藻的生长、光合活性、快速光反应曲线进行测定,荧光分光光度计分析藻培养过程中三维荧光光谱图变化,以期荔枝落叶控藻的应用提供理论依据与实践指导。

1 材料与方法

1.1 材料

黑叶荔枝落叶采自于人工种植树种,采集地点位于广东省深圳市某高校校园(N $22^{\circ}35'23.86''$, E $113^{\circ}56'50.87''$),树龄约10 a,收集地面脱落的较干净的树叶用于实验。落叶用去离子自来水冲洗3~5次,40℃下干燥5 d,人工尽量将干燥的落叶揉碎,取50 g 粉碎的落叶,浸泡于装有500 mL 蒸馏水的1 L 锥形瓶中,密封在26℃的人工气候箱放置5 d后,浸出液用0.22 μm 滤膜抽滤以消除其他微生物的影响,贮存于冰箱(0~4℃)冷藏待用。

1.2 藻种及培养

藻种铜绿微囊藻由中国科学院武汉水生生物研究所提供,用BG-11培养基^[12]于光照培养箱中培养。培养条件为:光强约 $30\text{ }\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,温度 $26^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$,光暗比12 h:12 h,每天定时摇晃1~2次。

1.3 实验方法

实验共设置1个对照组和5个质量浓度梯度组(0.4、0.8、1.2、1.6、2.0 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),在250 mL 锥形瓶内加入100 mL BG-11培养基,接种处于对数生长期的藻1 mL,藻的初始密度约 $10^4\sim 10^5\text{ cell}\cdot\text{mL}^{-1}$,按照上述浓度添加荔枝落叶浸出液,添加体积为0~2 mL,对照组不加浸出液,实验体系均用蒸馏水定容到相同体积(103 mL),每个浓度梯度3个平行样。分别于实验第1、4、7、10、15 d 取样,进行藻生物量(叶绿素a浓度表示)和叶绿素荧光参数测定。

1.4 叶绿素荧光参数测定

采用德国Walz公司的浮游植物荧光分类仪(Photo-PAM)测定。微囊藻样品暗适应2 min后进行测量,叶绿素荧光参数 F_v/F_m (最大光合作用效率)、 Y_{II} (实际光合作用效率)、藻细胞生物量叶绿素a浓度可在荧光仪上直接读出。

测量光合电子相对电子传递速率值与光强度绘图,可得快速光曲线,由于其测量时间短,对光合状态影响小,能反映细胞水平上样品的光合活性。采用Platt等的方法^[13],通过拟合快速光曲线,得到光合活性参数,包括光能利用效率 α 、最大相对电子传递速率 $rETR_{max}$ 和光饱和系数 I_k 。

1.5 三维荧光光谱分析

三维荧光光谱采用F-7000型荧光分光光度计(岛津日立,日本)测定。带通为激发波长 $E_x=5\text{ nm}$,发射波长 $E_m=5\text{ nm}$;扫描波长范围为 $E_x\ 200\sim 600\text{ nm}$, $E_m\ 200\sim 600\text{ nm}$;扫描光谱进行仪器自动校正。分别取对照组和2个质量浓度组(1.2 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、2.0 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),于实验第1、7、15 d 取藻液检测。

1.6 EC_{50} 的计算

EC_{50} 是指半抑制浓度,采用SPSS 13.0软件包计算,方法参照文献[14]。

1.7 统计分析

采用SPSS 13.0软件包进行统计分析,应用独立样本 t 检验进行差异比较, $P<0.05$ 表示差异显著, $P<0.01$ 表示差异极显著,双因子方差分析对实验结果进行统计分析。

2 结果与讨论

2.1 荔枝落叶浸出液对铜绿微囊藻生长的抑制作用

采用不同浓度的荔枝落叶浸出液处理铜绿微囊藻,对藻的生长进行了15 d的监测。处理组叶绿素

a 与对照组百分比表征暴露于 0.4、0.8、1.2、1.6 和 2.0 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度下的荔枝落叶浸出液对铜绿微囊藻的抑制作用(图 1)。结果发现,处理组从第 1 d 开始,藻的生长没有多大的变化,并没有受到明显抑制,2.0 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度下的荔枝落叶浸出液对微囊藻生长有一定促进作用。第 1~10 d,随暴露时间的延长抑制效果增强,1.2、1.6 和 2.0 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组叶绿素 a 浓度占对照组百分比分别由第 1 d 的 101.5%、93.1% 和 103.4% 下降至第 10 d 的 19.2%、26.2%、7.5%。第 10~15 d 时,抑藻效果与前 10 d 相比有所减弱,上述 3 种浓度处理组占对照组百分比第 15 d 分别为 54.7%、59.3% 和 18.3%。然而,从第 10 d 开始,浸出液对微囊藻的抑制作用减弱,第 15 d 各处理组抑藻效果均低于第 10 d,这与 Xiao 等^[15]在观察大麦秸秆提取液能对铜绿微囊藻的生长抑制作用相似。第 15 d 时高浓度处理组(2.0 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)抑藻效果仍可高达 80% 以上,与对照相比具有极显著差异($P < 0.01$)。浸出液对铜绿微囊藻生长的抑制效果随着暴露浓度的增加而显著升高,暴露时间不同,其抑藻效果也不同。在未灭菌稻秆中有同样的结果,可能原因是活性物质对氧气或微生物敏感,时间越长,抑藻效果越差^[16]。

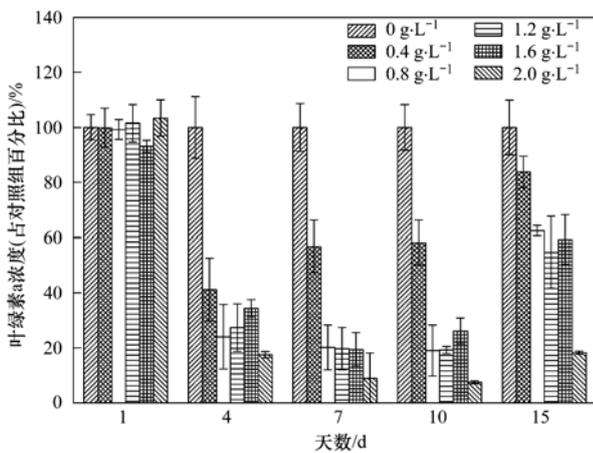


图 1 荔枝落叶浸出液对铜绿微囊藻暴露 1、4、7、10、15 d 后的抑制作用

Fig. 1 Inhibition effect on the growth of *M. aeruginosa* cultures after 1,4,7,10 and 15 d exposure to *L. chinensis* defoliation

2.2 荔枝落叶浸出液对铜绿微囊藻叶绿素 a 浓度的影响

由图 2 可知,第 1 d 时,处理组和对照组叶绿素 a 浓度为 32~36 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,差异无很大区别,落叶浸出液浓度为 0.4 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,第 7 d 铜绿微囊藻叶绿素 a 浓度为 689.6 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,对照组为 1213.8 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,其他处理组叶绿素 a 浓度为 245 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以

下,当落叶浸出液浓度为 2.0 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,叶绿素 a 浓度为 108.4 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,化感抑藻效果明显;第 7 d 开始,各处理组抑制能力下降,第 15 d 时,对照组叶绿素 a 浓度为 4650.8 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,控藻能力最强的为浸出液浓度为 2.0 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,叶绿素 a 相对浓度虽仅有对照组的 18.3%,但其实际浓度有 851.3 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,在一定条件下,仍有可能发生水华。

藻类叶绿素 a 浓度与其光合作用密切相关。水生植物对藻类化感抑制作用表明,共生培养的情况下,金鱼藻能明显降低铜绿微囊藻的叶绿素 a 含量^[17],黄菖蒲和狭叶香蒲可以诱导铜绿微囊藻产生氧化胁迫,导致叶绿素分解^[18],穗花狐尾藻能显著抑制铜绿微囊藻的叶绿素荧光参数和快速光响应曲线^[19]。当培养液中添加荔枝落叶浸出液时,其叶绿素 a 浓度在第 15 d 均有大幅降低,浸出液含有的化感物质可能对叶绿素 a 具有破坏或抑制光合作用,或两者兼有,进而影响藻的生长,浸出液中的化感物质究竟起何作用,仍有待于进一步研究。然而,浸出液中的化感物质可能为非稳定物质,在培养后期,由于化感物质的分解,抑藻能力减弱。因此,在实际生产中,必须定期添加浸出液,才有可能较长期抑制藻类的生长作用。

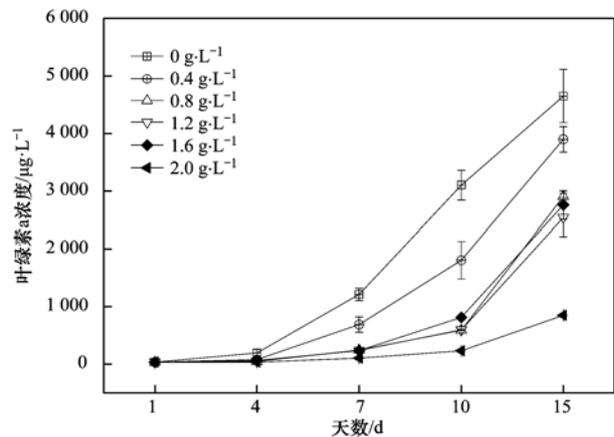


图 2 荔枝落叶浸出液对铜绿微囊藻暴露 1、4、7、10、15 d 后叶绿素浓度的影响

Fig. 2 Chl-a content of *M. aeruginosa* after 1,4,7,10 and 15 d exposure to the *L. chinensis* defoliation extract

2.3 荔枝落叶浸出液对铜绿微囊藻 PSII 光合作效率的影响

光合作用效率反映藻细胞将光能转化为化学能量的能力,是光合作用的重要指标,荔枝落叶对藻细胞最大光合作用效率(F_v/F_m)和实际光合作用效率(YII)的影响如图 3 所示。第 1 d 时,对照组和处理组的 F_v/F_m 均在 0.6 左右波动,第 4 d 时, F_v/F_m 的

值急剧上升,接近 0.8,可能原因是藻进入新环境引起 F_v/F_m 和 YII 下降,需 1~4 d 的适应期,才可能恢复;第 4~10 d,对照和各处理组变化不是特别明显,保持在近 0.8,而对照组和 0.4 g L⁻¹ 的浸出液浓度作用下的处理组,在第 10 d 后开始呈略微的下降趋势,在第 15 d,其 F_v/F_m 分别为 0.63 和 0.68 [图 3 (a)]. 各荔枝落叶浸出液处理组的 YII 值与 F_v/F_m 值呈现相同的变化趋势,但相对来讲,YII 值比 F_v/F_m

F_m 值较小 [图 3 (b)]. H₂O₂^[20]、铜离子^[21] 和铁离子^[22] 的环境压力引起藻细胞光化学量子产量降低,高剂量 UV-C 辐照能完全抑制藻的能量转化过程^[23]. 本研究表明,浸出液可能在早期影响光合作用活性,在后期影响不大,甚至有轻微的促进作用. 这种差异的原因可能与实验中所用的实验材料、藻起始密度、藻株、浸出液的种类和浓度等不同有关.

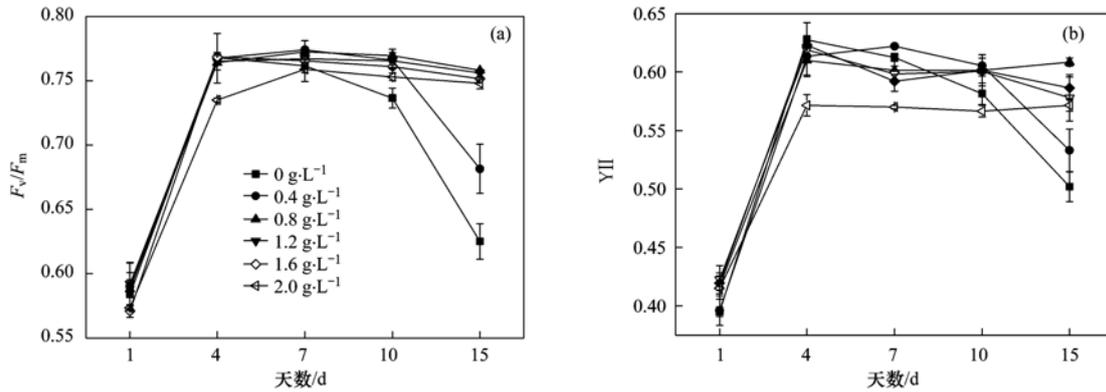


图 3 荔枝落叶浸出液对铜绿微囊藻 PSII 最大和有效光合作用效率的影响

Fig. 3 Time courses of the maximal efficiency (F_v/F_m) and efficiency of photosystem II (YII) of *M. aeruginosa* in different extract treatments

2.4 荔枝落叶浸出液对铜绿微囊藻 PSII 光合活性参数的影响

将各测量光强度下的光合电子相对电子传递速率值与光强度绘图,可得到快速光曲线,由快速光曲线得到光合活性参数,包括光能利用效率 α 、最大相对电子传递速率 $rETR_{max}$ 、光饱和系数 I_k ,结果如图 4 所示. 对照和处理组的 α 值变化不大,保持在 0.2~0.3 m²·s· μ mol⁻¹ 之间,对照组和低浓度处理组 0.4 mg·L⁻¹ 分别从第 7 d 和第 10 d 开始下降,但下降幅度不明显 [图 4 (a)],且与落叶浸出液浓度存在一定的正相关性,相关系数为 0.843 (表 1); 无论是处理还是对照组, $rETR_{max}$ 值从第 4 d 时开始均表现上升,至第 15 d 时,由起始的 100 左右上升到 150~200 之间 [图 4 (b)],且与落叶浸出液浓度存在一定的负相关性,相关系数为 -0.866; I_k 值分别由第 1 d 的 450~500 μ mol·(m²·s)⁻¹ 开始,升高至 500~1 000 μ mol·(m²·s)⁻¹ 之间 [图 4 (c)],且与落叶浸出液浓度存在一定的负相关性,相关系数为 -0.871. 以上结果表明,荔枝落叶浸出液能影响藻细胞光合活性, I_k 值与 $rETR_{max}$ 值的降低与荔枝落叶浸出液之间呈现显著负相关关系,而 α 值的降低与荔枝落叶浸出液之间呈现正相关关系.

2.5 铜绿微囊藻叶绿素荧光参数和叶绿素 a 浓度与落叶浸出液相关性分析

5 项荧光参数和叶绿素 a 浓度与荔枝落叶浸出液浓度相关性分析如表 1 所示,从中可知,铜绿微囊藻的叶绿素 a 浓度与浸出液浓度由负相关转为极显著负相关, $rETR_{max}$ 和 I_k 与浸出液浓度基本由负相关转为显著负相关,可能原因是浸出液中化感物质释放或作用滞后等原因引起的; F_v/F_m 和 YII 与浸出液浓度基本由负相关转为正相关关系,可能在胁迫早期,微囊藻的 F_v/F_m 和 YII 受到抑制,浸出液抑制了光合作用的原初反应,阻碍光合电子的传递,后期藻适应了这种胁迫^[24, 25],从浸出液对光合作用效率的影响 (见图 3) 也可以看出;相反,光能利用效率 α 与浸出液浓度一直保持正相关或显著正相关关系,可能在浸出液胁迫环境下,藻类可通过提高自身的光能利用率度过胁迫环境,这在 UV-C 辐照胁迫环境下, α 值与 UV-C 辐照剂量之间呈现显著正相关关系结果类似^[23]. 然而,桉树叶水浸出液对海洋微藻的光合作用影响结果表明,荧光参数 F_v/F_m 、YII 和 ETR 均由正相关变成负相关的变化趋势^[26],可能原因是实验中所用的藻株、浸出液的种类和浓度等不同有关.

2.6 荔枝落叶浸出液对铜绿微囊藻三维荧光的影响

三维荧光光谱能够在不破坏样品结构的前提下,直观地反映荧光物质的种类和相对含量信息^[27~29]. 本研究采用三维荧光光谱,研究细胞水平

表 1 铜绿微囊藻叶绿素荧光参数、叶绿素 a 浓度与荔枝落叶浸出液浓度的相关系数¹⁾
Table 1 Correlation coefficients of chlorophyll fluorescence parameters, and chlorophyll-a content
of *M. aeruginosa* with the *L. chinensis* defoliation extract

作用时间/d	F_v/F_m	YII	α	rETRmax	Ik	叶绿素 a 浓度
1	-0.598	0.828 *	0.781	-0.024	-0.348	-0.013
4	-0.618	-0.663	0.393	0.013	0.027	-0.761
7	0.000	-0.900 *	0.207	-0.850 *	-0.853 *	-0.874 *
10	0.085	-0.284	0.319	-0.850 **	-0.964 **	-0.859 *
15	0.799	0.655	0.843 *	-0.866 *	-0.871 *	-0.939 **

1) ** 表示极显著相关, * 表示显著相关

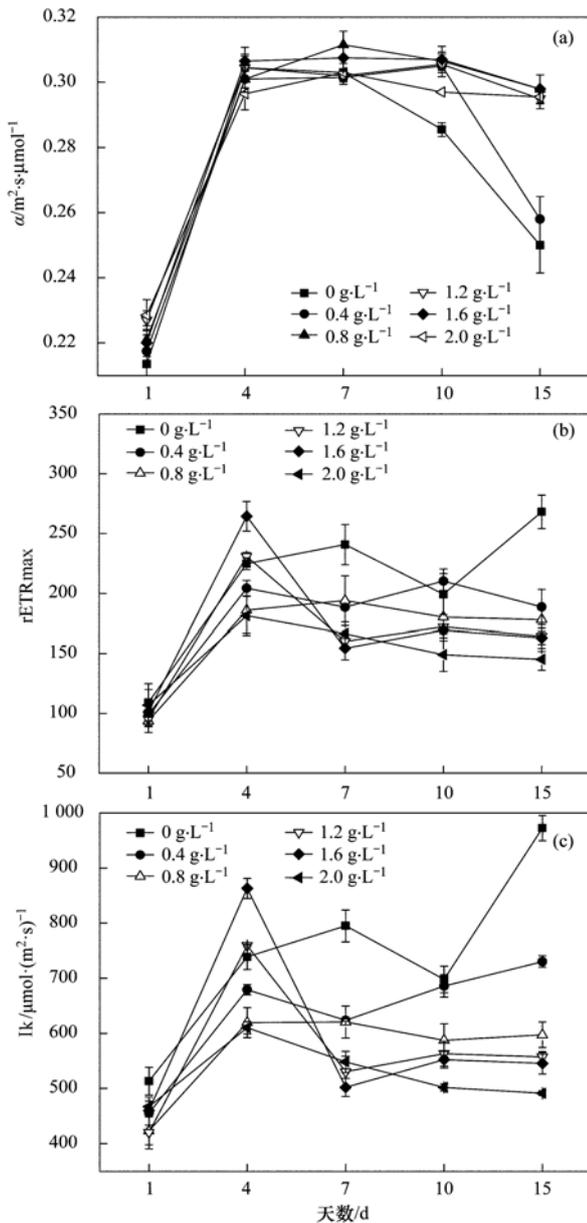


图 4 荔枝落叶浸出液对铜绿微囊藻光合活性参数的影响
Fig. 4 Changes of the photosynthesis efficiency (α), maximal electron transport rates (rETRmax) and light saturation coefficient (Ik) of *M. aeruginosa* against in different extract treatments

上荔枝落叶浸出液对于藻细胞光谱的影响. 如图 5 所示,对照组谱图中主要包括 1 个荧光峰,主要为溶解性微生物代谢物被释放至水体中,位于激发/发射波长 275/340 nm 附近,可能为色氨酸及酪氨酸的荧光峰^[30],第 15 d 的荧光强度约为第 1 d 的 2 倍. 荔枝落叶浸出液的添加,谱图中除出现色氨酸及酪氨酸的荧光峰外,另一处腐殖酸对应的荧光峰(位于 320/430 nm 附近),与预氯化会导致荧光峰强度和位置的变化^[31]相同,荔枝落叶浸出液同样会引起荧光峰强度和位置发生变化,当投量从 $1.2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 升高至 $2.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,色氨酸及酪氨酸的荧光峰相对强度有所上升,且位置发生偏移,在投量增加的情况下,腐殖酸的对应荧光峰强度增加,第 15 d 时,在投量为 $2.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,色氨酸及酪氨酸荧光峰强度约为 $1.2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 投量情况下的 1/3,同时腐殖酸的荧光峰强度随着时间的推移逐渐减弱,可能该类物质为易降解的缘故,而且结果与落叶投量对藻细胞叶绿素 a 浓度的影响趋势是一致的.

2.7 荔枝落叶浸出液对铜绿微囊藻 EC_{50} 值的影响

EC_{50} 称作半最大效应浓度,指能引起 50% 最大效应的浓度. 表 2 为铜绿微囊藻的 EC_{50} 值在荔枝落叶浸出液胁迫下的情况,从中可知,在不同的时间,藻的 EC_{50} 值有区别,其中在第 1 d 时, EC_{50} 最大,表明浸出液对藻的毒性最小,可能是浸出液的毒性还没有表现,或还没有影响到藻的生物量的原因,在第 4 d 时 EC_{50} 最小,代表此时毒性最大,表明为对藻生长的抑制能力最强,随着时间的延长, EC_{50} 逐渐增大,浸出液的毒性减弱,有可能是浸出液中含有的化感物质逐渐分解,或者微藻对浸出液的适应性增强的原因,这与桉树叶水浸出液对海洋微藻的 EC_{50} 影响的研究结果比较一致^[26]. 已有研究指出,农作物秸秆-稻秆只需进行 5 d 降解,即可产生与大麦秸秆 3 个月降解相似程度的抑藻效果^[32],本研究结果表明,荔枝落叶也仅需 5 d 降解,而且第 15 d 的 EC_{50}

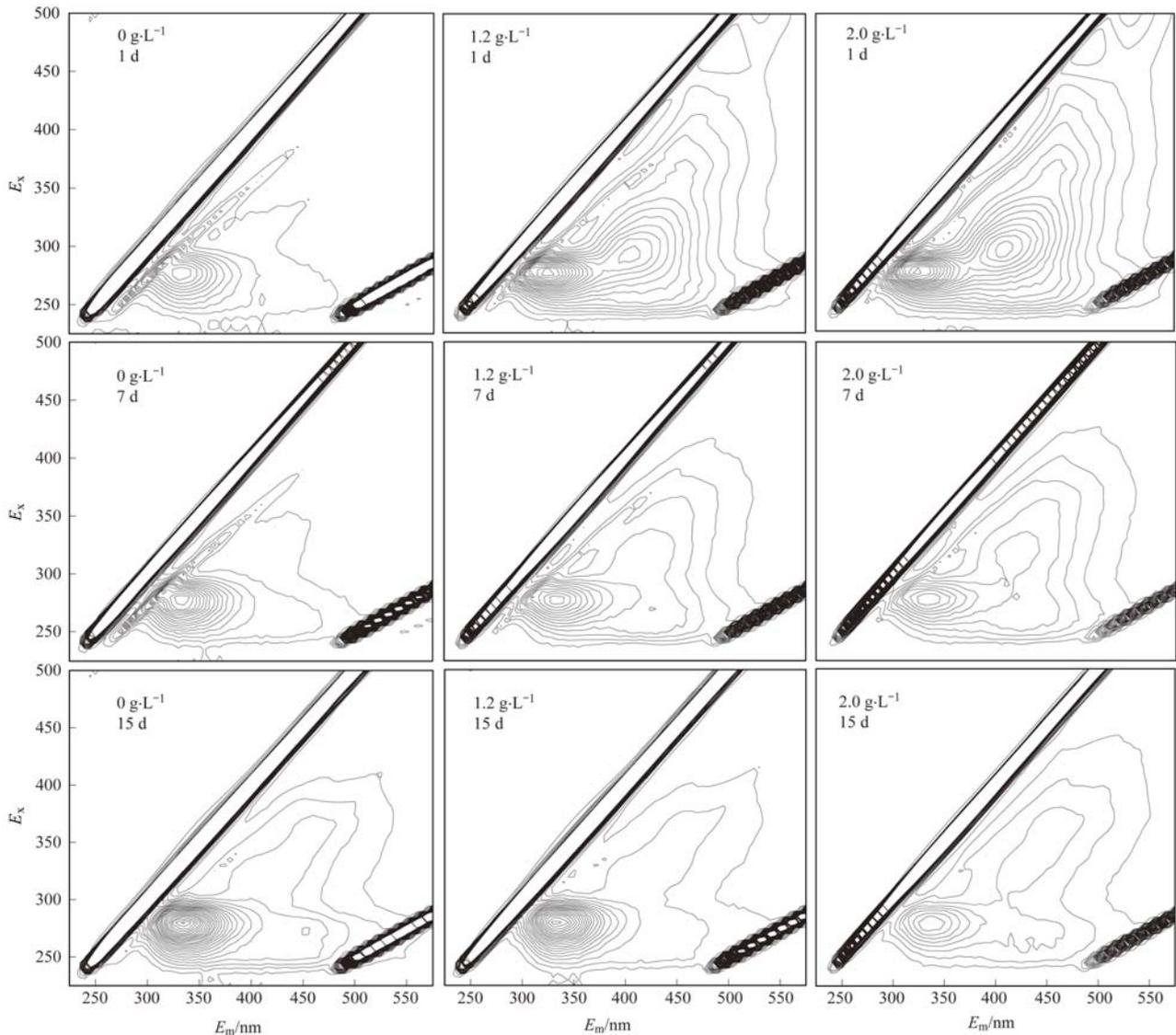


图5 荔枝落叶浸出液在第1、7和15 d铜绿微囊藻的三维荧光图谱

Fig. 5 EEM spectra of *M. aeruginosa* after 1, 7 and 15 d exposure to the *L. chinensis* defoliation extract

值约为稻秆或大麦秸秆 1/4 ~ 1/5,因此,只需投入更少量的荔枝落叶而能达到较好的控藻效果,减少水体营养盐的增加。

表2 铜绿微囊藻细胞生长在1、4、7、10、15 d的 EC_{50} 值

Table 2 EC_{50} of cell growth of *M. aeruginosa* after 1, 4, 7, 10 and 15 d exposure to the *L. chinensis* defoliation extract

检测项目	$EC_{50}/g \cdot L^{-1}$				
	1 d	4 d	7 d	10 d	15 d
叶绿素 a 浓度	2.78	0.14	0.42	0.43	1.26

3 结论

(1) 不同浓度荔枝落叶浸出液处理铜绿微囊藻时,随着暴露时间的延长抑制效果呈先增强后下滑的趋势,当浸出液在较高浓度时,第15 d抑制率高达80%以上,然而,叶绿素 a 实际浓度依然较高,仍

可能发生水华,建议野外控藻应用时,应考虑持续或反复添加浸出液。

(2) 荧光参数与荔枝落叶浸出液浓度相关性分析表明, F_v/F_m 和 Y_{II} 与浸出液浓度由负相关转为正相关关系,浸出液可能早期对藻光合作用发生胁迫,后期藻适应了这种胁迫的缘故; α 与浸出液浓度保持正相关关系,藻可能通过提高光能利用效率来度过胁迫环境; $rETR_{max}$ 、 I_k 和叶绿素 a 浓度与浸出液浓度基本由负相关转为显著负相关或极显著负相关关系,表明浸出液中化感物质可能释放或作用滞后等原因引起的。

(3) 三维荧光图谱分析表明,荔枝落叶浸出液的投加会引起色氨酸及酪氨酸的荧光峰相对强度有所上升,且位置发生偏移,较高投量的情况下,能有

效抑制与铜绿微囊藻生长密切相关的色氨酸及酪氨酸荧光峰强度,同时腐殖酸的荧光峰强度随着时间的推移逐渐减弱,可能该类物质为易降解物质并逐渐降解的缘故。

(4) 研究藻细胞生长的半抑制浓度值发现,第4 d 的 EC_{50} 最小,代表此时毒性最大,与传统的农作物秸秆控藻比较,其 EC_{50} 值较低,可能荔枝落叶化感作用控藻效果较强,只需较低的浸出液浓度就能达到较好的控藻效果。

参考文献:

- [1] 胡洪营, 门玉洁, 李锋民. 植物化感作用抑制藻类生长的研究进展[J]. 生态环境, 2006, **15**(1): 153-157.
- [2] Rice E L. Allelopathy [M]. (2nd ed.). Orlando, Fla.: Academic Press, 1984.
- [3] Qian H F, Xu X Y, Chen W, et al. Allelochemical stress causes oxidative damage and inhibition of photosynthesis in *Chlorella vulgaris* [J]. Chemosphere, 2009, **75**(3): 368-375.
- [4] Macías F A, Oliva R M, Simonet A M, et al. What are allelochemicals? [A]. In: Olofsdotter M. (Ed.). Allelopathy in Rice[M]. Manila, Philippines: IRRI Press, 1998.
- [5] 张彬, 王书敏, 刘小兵, 等. 植物化感抑藻物质研究[J]. 给水排水, 2011, **37**(4): 115-121.
- [6] Vyvyan J R. Allelochemicals as leads for new herbicides and agrochemicals [J]. Tetrahedron, 2002, **58**(9): 1631-1646.
- [7] 江中央, 郭沛涌. 陆生植物对藻类化感抑制作用的研究进展[J]. 工业水处理, 2011, **31**(12): 13-17.
- [8] 肖溪. 大麦秸秆对蓝藻化感抑制作用与机理的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [9] Overall N C, Lees D R. The identification and significance of chemicals released from decomposing barley straw during reservoir algal control [J]. Water Research, 1997, **31**(3): 614-620.
- [10] Ball A S, Williams M, Vincent D, et al. Algal growth control by a barley straw extract [J]. Bioresource Technology, 2001, **77**(2): 177-181.
- [11] Su W, Hagström J A, Jia Y H, et al. Effects of rice straw on the cell viability, photosynthesis, and growth of *Microcystis aeruginosa* [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2014, **32**(1): 120-129.
- [12] Rippka R, Deruelles J, Waterbury J B, et al. Generic assignments, strain histories and properties of pure cultures of cyanobacteria [J]. Microbiology, 1979, **111**(1): 1-61.
- [13] Paltt T, Gallegos C L, Harrison W G. Photoinhibition of photosynthesis in natural assemblages of marine phytoplankton [J]. Journal of Marine Research, 1980, **38**: 687-701.
- [14] 贾春生. 利用 SPSS 软件计算杀虫剂的 LC_{50} [J]. 昆虫知识, 2006, **43**(3): 414-417.
- [15] Xiao X, Chen Y X, Liang X Q, et al. Effects of Tibetan hullless barley on bloom-forming cyanobacterium (*Microcystis aeruginosa*) measured by different physiological and morphologic parameters [J]. Chemosphere, 2010, **81**(9): 1118-1123.
- [16] 张玲. 盐京九号水稻 (*Oryza sativa* L. Yanjing 9) 抑制铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 生长作用及其机制的研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2008. 38-41.
- [17] 李小路, 潘慧云, 徐洁, 等. 金鱼藻与铜绿微囊藻共生情况下的化感作用[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(11): 2243-2249.
- [18] 陈国元, 唐凯. 不同质量浓度黄菖蒲和狭叶香蒲对铜绿微囊藻的化感作用[J]. 环境工程学报, 2014, **8**(2): 465-470.
- [19] 朱俊英, 刘碧云, 王静, 等. 穗花狐尾藻化感作用对铜绿微囊藻光合效率的影响[J]. 环境科学, 2011, **32**(10): 2904-2908.
- [20] Drábková M, Admiraal W, Maršálek B. Combined exposure to hydrogen peroxide and light-Selective effects on cyanobacteria, green algae, and diatoms [J]. Environmental Science & Technology, 2007, **41**(1): 309-314.
- [21] Wu Z X, Gan N Q, Huang Q, et al. Response of *Microcystis* to copper stress-Do phenotypes of *Microcystis* make a difference in stress tolerance? [J]. Environmental Pollution, 2007, **147**(2): 324-330.
- [22] Xing W, Huang W M, Li D H, et al. Effects of iron on growth, pigment content, photosystem II efficiency, and siderophore production of *Microcystis aeruginosa* and *Microcystis wesenbergii* [J]. Current Microbiology, 2007, **55**(2): 94-98.
- [23] 陶益. UV-C 辐照对典型藻类生长抑制效果与机理研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- [24] Van Kooten O, Snel J F H. The use of chlorophyll fluorescence nomenclature in plant stress physiology [J]. Photosynthesis Research, 1990, **25**(3): 147-150.
- [25] 梁英, 冯力霞, 尹翠玲, 等. 叶绿素荧光技术在微藻环境胁迫研究中的应用现状及前景[J]. 海洋科学, 2007, **31**(1): 71-76.
- [26] 姜恒, 吴斌, 阎冰, 等. 桉树叶水浸出液对 2 种海洋微藻生长和叶绿素荧光特性的影响[J]. 环境科学研究, 2013, **26**(11): 1186-1193.
- [27] Sheng G P, Yu H Q. Characterization of extracellular polymeric substances of aerobic and anaerobic sludge using three-dimensional excitation and emission matrix fluorescence spectroscopy [J]. Water Research, 2006, **40**(6): 1233-1239.
- [28] Ni B J, Fang F, Xie W M, et al. Characterization of extracellular polymeric substances produced by mixed microorganisms in activated sludge with gel-permeating chromatography, excitation-emission matrix fluorescence spectroscopy measurement and kinetic modeling [J]. Water Research, 2009, **43**(5): 1350-1358.
- [29] 吕洪刚, 张锡辉, 龚纯英, 等. 藻类的三维荧光光谱辨别及算法研究[J]. 中国环境科学, 2005, **25**(5): 581-584.
- [30] Chen W, Westerhoff P, Leenheer J A, et al. Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter [J]. Environmental Science & Technology, 2003, **37**(24): 5701-5710.
- [31] 马敏, 刘锐平, 刘会娟, 等. 预氯化对铝盐混凝铜绿微囊藻过程中溶解性有机物和残余铝的影响[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(1): 73-78.
- [32] 苏文, 孔繁翔, 于洋, 等. 水稻秸秆浸泡液对铜绿微囊藻生理特性的影响[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 150-155.

CONTENTS

Pollution of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Particulate Matters of Shenzhen	SUN Jian-lin, CHANG Wen-jing, CHEN Zheng-xia, <i>et al.</i> (1513)
Emission Characteristics of VOCs from Typical Restaurants in Beijing	CUI Tong, CHENG Jing-chen, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (1523)
Characteristics Analysis of Sulfur Dioxide in Pearl River Delta from 2006 to 2010	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (1530)
Comparison Test Between PM _{2.5} Continuous Monitoring System and Manual Sampling Analysis for PM _{2.5} in Ambient Air	WANG Qiang, ZHONG Qi, CHI Ying, <i>et al.</i> (1538)
Determination and Emission of Condensable Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	PEI Bing (1544)
Potential Carbon Fixation Capability of Non-photosynthetic Microbial Community at Different Depth of the South China Sea and Its Response to Different Electron Donors	FANG Feng, WANG Lei, XI Xue-fei, <i>et al.</i> (1550)
Remote Sensing Estimation of Chlorophyll-a Concentration in Inland Lakes Based on GOCI Image and Optical Classification of Water Body	FENG Chi, JIN Qi, WANG Yan-nan, <i>et al.</i> (1557)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Qingshuijiang River Basin at Wet Season in Guizhou Province	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (1565)
Temporal-spatial Variation and Source Identification of Hydro-chemical Characteristics in Shima River Catchment, Dongguan City	GAO Lei, CHEN Jian-yao, WANG Jiang, <i>et al.</i> (1573)
Response and Control Factors of Groundwater to Extreme Weather, Jiguan Cave, Henan Province, China	LIU Xiao, YANG Yan, PENG Tao, <i>et al.</i> (1582)
Impact of Rocky Desertification Treatment on Underground Water Chemistry and Dissolved Inorganic Carbon Isotope in Karst Areas	XIAO Shi-zhen, XIONG Kang-ning, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (1590)
Difference of Karst Carbon Sink Under Different Land Use and Land Cover Areas in Dry Season	ZHAO Rui-yi, LIANG Zuo-bing, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (1598)
Vertical Migration Characteristics of Organochlorine Pesticides in Overlying Soil in Karst Terranes and Its Impact on Groundwater	SUN Yu-chuan, WANG Yong-qi, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i> (1605)
Pollution Status and Migration of Mercury in the Sediments of Nansi Lake in Shandong Province	CAO Fei-fei, YANG Li-yuan, PANG Xu-gui, <i>et al.</i> (1615)
Response of Sediment Micro Environment and Micro Interface to Physical Disturbance Intensity Under the Disturbance of <i>Chironomus plumosus</i>	SHI Xiao-dan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1622)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition and Associated Impact on N Transport in the Watershed of Red Soil Area in Southern China	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1630)
Effect of Different Purple Parent Rock on Removal Rates of Nitrogen, Phosphorus and Organics in Landscape Water	HUANG Xue-jiao, LIU Xiao-chen, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1639)
Effects of <i>Litchi chinensis</i> Defoliation on Growth and Photosynthesis of <i>Microcystis aeruginosa</i>	WANG Xiao-xiong, JIANG Chen-chun, LI Jin-wei, <i>et al.</i> (1648)
Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to Green Algae	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (1655)
Formation Mechanism of the Disinfection By-product 1,1-Dichloroacetone in Drinking Water	DING Chun-sheng, MENG Zhuang, XU Yang-yang, <i>et al.</i> (1662)
Degradation Kinetics and Formation of Disinfection By-products During Linuron Chlorination in Drinking Water	LING Xiao, HU Chen-yan, CHENG Ming, <i>et al.</i> (1668)
Interference for Various Quench Agents of Chemical Disinfectants on Detection of Endotoxin Activities in Water	ZHANG Can, LIU Wen-jun, SHI Yun, <i>et al.</i> (1674)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Dairy Manure Biochar	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, DIAO Jing-ru, <i>et al.</i> (1678)
Absorption of Uranium with Tea Oil Tree Sawdust Modified by Succinic Acid	ZHANG Xiao-feng, CHEN Di-yun, PENG Yan, <i>et al.</i> (1686)
Effect of Membrane Wettability on Membrane Fouling and Chemical Durability of SPG Membranes	ZHANG Jing, XIAO Tai-min, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (1694)
TiO ₂ -Induced Photodegradation of Levofloxacin by Visible Light and Its Mechanism	GUO Hong-sheng, LIU Ya-nan, QIAO Qi, <i>et al.</i> (1700)
Performance of Novel Macromolecule Flocculant in the Treatment of Wastewater Containing Cr(VI) Ions	WANG Gang, DU Feng-ling, CHANG Qing, <i>et al.</i> (1707)
On-line Estimation for the Amount of Stored PHA in Activated Sludge Based on OUR-HPR Measurements	ZENG Shan-wen, WANG Ze-yu, GAO Jing, <i>et al.</i> (1713)
Formation Mechanism of Self-forming Dynamic Membrane During Separation of High-concentration Sewage Sludge Fermented for Acid Production	HUANG Shuai, LIU Hong-bo, YIN Bo, <i>et al.</i> (1720)
Influence of Air Flux on Municipal Sludge Biodrying in a Pilot Scale Test	ZHANG Yu, HAN Rong, LU Wen-jing, <i>et al.</i> (1727)
Extraction of Heavy Metals from Sludge Using Biodegradable Chelating Agent <i>N,N</i> -bis(carboxymethyl) Glutamic Acid Tetrasodium	WU Qing, CUI Yan-rui, TANG Xiao-xiao, <i>et al.</i> (1733)
Biodiversity and Function Analyses of BIOLAK Activated Sludge Metagenome	TIAN Mei, LIU Han-lu, SHEN Xin, <i>et al.</i> (1739)
Characteristics of Nitrogen Removal by a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium YL	LIANG Xian, REN Yong-xiang, YANG Lei, <i>et al.</i> (1749)
Biodegradation Characteristics and Kinetics of <i>p</i> -nitrophenol by Strain <i>Arthrobacter</i> sp. CN2	REN Lei, SHI Yan-hua, JIA Yang, <i>et al.</i> (1757)
Biodegradation of Pyrene by Intact Cells and Spores of <i>Brevibacillus brevis</i>	LIU Zhi-chen, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i> (1763)
Investigation of Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in Landfill	LI Lei, XU Jing, ZHAO You-cai, <i>et al.</i> (1769)
Investigation of Antibiotic Resistance of Indigenous Bacteria and Abundance of Class I Integron in Matrix of Constructed Wetlands of Different Configurations	MAI Xiao-bei, TAO Ran, YANG Yang, <i>et al.</i> (1776)
Effects of Nitrate and CH ₄ on Anaerobic Oxidation of BETX in Landfill Cover Soils	LIU Rong, LONG Yan, WANG Li-li, <i>et al.</i> (1785)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Planted Larch Forest in Shanxi Plateau	YAN Jun-xia, LI Hong-jian, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (1793)
Effects of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration and Temperature Sensitivity in Spring Maize Field in Semi-Arid Regions on Loess Plateau	JIANG Ji-shao, GUO Sheng-li, WANG Rui, <i>et al.</i> (1802)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in the Street Dusts in Xuanwei and Their Health Risk Assessment	ZHANG Wen-chao, LÜ Sen-lin, LIU Ding-yu, <i>et al.</i> (1810)
Spatial Distribution of Magnetic Properties of Street Dust in Baoji City and Its Implications of Environment	ZHANG Jun-hui, WANG Jin, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (1818)
Effect of Long-term Fertilizer Application on the Stability of Organic Carbon in Particle Size Fractions of a Paddy Soil in Zhejiang Province, China	MAO Xia-li, LU Kou-ping, SUN Tao, <i>et al.</i> (1827)
Effects of Different Reclaimed Scenarios on Soil Microbe and Enzyme Activities in Mining Areas	LI Jun-jian, LIU Feng, ZHOU Xiao-mei (1836)
Soil Microorganism Characteristics and Soil Nutrients of Different Wetlands in Sanjinag Plain, Northeast China	XIAO Ye, HUANG Zhi-gang, WU Hai-tao, <i>et al.</i> (1842)
Strengthening Effects of Sodium Salts on Washing Kerosene Contaminated Soil with Surfactants	HUANG Zhao-lu, CHEN Quan-yuan, ZHOU Juan, <i>et al.</i> (1849)
Effects and Biological Response on Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil	YANG Qian, WU Man-li, NIE Mai-qian, <i>et al.</i> (1856)
Enhanced Phytoextraction of Heavy Metals from Contaminated Soils Using <i>Sedum alfredii</i> Hance with Biodegradable Chelate GLDA	WEI Ze-bin, CHEN Xiao-hong, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (1864)
Speciation Characteristics and Bioavailability of Heavy Metals in Oasis Soil Under Pb, Zn Combined Stress	JIN Cheng, ZHAO Zhuan-jun, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (1870)
Influence of Sulfur on the Formation of Fe-Mn Plaque on Root and Uptake of Cd by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	WANG Dan, LI Xin, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (1877)
Effects of Ozone on Photosynthesis of Several Plants	LI Miao-miao (1888)
A Method Research on Environmental Damage Assessment of a Truck Rollover Pollution Incident	CAI Feng, ZHAO Shi-bo, CHEN Gang-cai, <i>et al.</i> (1902)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年5月15日 第36卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 5 May 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行