

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 SO ₂ 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, 史云, 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铅的研究	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)
TiO ₂ 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 <i>Arthrobacter</i> 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)
短短芽孢杆菌及其芽孢对苣的降解	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, 刘丁戎, 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	肖烨, 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)
硫素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)	

黄连根茎浸提物对绿藻的毒理作用

陈亚楠, 袁玲*

(西南大学资源环境学院, 重庆 400716)

摘要: 黄连根茎和制剂具有抗菌等作用, 广泛用于水产养殖, 所造成水生态风险需要评估. 试验设置总生物碱为 0 (CK), 0.088 (T1)、0.44 (T2) 和 1.76 mg·L⁻¹ (T3) 的黄连根茎浸提液 (CRE) 4 种处理, 研究了对斜生栅藻和蛋白核小球藻的毒理作用. 结果表明, T1 抑制绿藻生长, T2 和 T3 使绿藻生长和繁殖停止; 它们均显著降低绿藻叶绿素和蛋白质含量, 说明 CRE 抑制光合作用和蛋白质合成是绿藻生长繁殖速率降低和死亡的直接原因. CRE 使氢离子和胞内物质外流, 导致藻液 pH 值显著降低和电导率提高. 在 T1 和 T2 处理中, 绿藻细胞 SOD 活性先升后降; 在 T3 处理中, SOD 活性显著降低. 说明在 CRE 暴露初期, 低中浓度的 CRE 诱导绿藻细胞产生抗性, 随暴露时间增长或直接暴露在高浓度的 CRE 下, 抗氧化酶系统被破坏. 同样, 随着 CRE 浓度增大, 丙二醛含量增加, 意味着绿藻细胞膜结构破坏, 透性增加. CRE 总体上对蛋白核小球藻的危害作用大于斜生栅藻. 在水产养殖中, 滥用黄连根茎或制剂, 以及大规模集约化种植黄连对水体初级生产力具有潜在的生态风险.

关键词: 黄连根茎; 斜生栅藻; 蛋白核小球藻; 毒理作用; 生物碱

中图分类号: X131.2; X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)05-1655-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.05.019

Toxicity of *Coptis chinensis* Rhizome Extracts to Green Algae

CHEN Ya-nan, YUAN Ling*

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

Abstract: *Coptis chinensis* contains antiseptic alkaloids and thus its rhizomes and preparations are widely used for the treatment of fish diseases. In order to realize the risk of water ecosystems produced by this medical herb and preparations used in aquaculture, the present experiment was carried out to study the toxicity of *Coptis chinensis* rhizome extract (CRE) to *Scenedesmus oblique* and *Chlorella pyrenoidosa* grown in culture solution with 0.00 (CK), 0.088 (T1), 0.44 (T2) and 1.76 mg·L⁻¹ (T3) of CRE, respectively. The results show that low concentration of CRE (T1) inhibited the growth rate of the alga and high CRE (T2 and T3) ceased growth and reproductions. CRE also decreased the chlorophyll and proteins in alga cells, indicating the inhibition of photosynthesis and protein biosynthesis, which could be direct reasons for the low growth rate and death of green alga. The efflux of protons and substances from alga cells led to pH reduction and conductivity increment in culture solution with CRE. Furthermore, the activity of superoxide dismutase in alga increased at the beginning of CRE in T1 and T2 treatments but decreased as time prolonged which was in contrast to high CRE treatment. And the long exposure to low CRE treatment behaved otherwise. This suggests that the low concentration of CRE could induce the resistant reactions in alga at initial time but high CRE concentration or long exposure even at low CRE concentration could inhibit the enzyme synthesis. Similarly, malondialdehyde in alga increased as CRE concentrations increased in culture solutions, implying the damage and high permeability of cell membrane. In general, *Chlorella pyrenoidosa* was more sensitive to CRE. The abuse of rhizomes and preparations in aquaculture and intensive cultivation of *Coptis chinensis* plants in a large scale might produce ecological risks to primary productivity of water ecosystems.

Key words: *Coptis chinensis*; *Scenedesmus oblique*; *Chlorella pyrenoidosa*; toxicity; alkaloid

黄连 (*Rhizoma coptidis*) 属毛茛科植物, 根茎含有 30 余种生物碱, 其中小檗碱 (berberine) 含量最高, 其次是黄连碱 (coptisine)、甲基黄连碱 (worenine)、掌叶防己碱 (palmatisine)、药根碱 (jatrorrhizine)、表黄连碱 (epiberberine) 等^[1]. 黄连生物碱易溶于水, 在水产养殖中, 黄连根茎和制剂广泛用于鱼类多种感染性疾病的防治^[2,3]. 此外, 我国 60% 的黄连集中种植于三峡库区的石柱县^[4]. 黄连的生长周期 3~5 a, 根茎残体、根细胞脱落和根系的分泌作用将黄连生物碱带入土壤^[5], 再经降雨淋溶进入地表或地下径流. 因此, 黄连生物碱可直接或间接进入水体, 作用于水生动物、植物和微生物,

对水生态系统可能产生持续影响.

黄连根茎对植物和微生物具有广泛的生物学毒性. 除杀灭或抑制人畜病原微生物之外, 黄连根茎浸提物降低菜豆和绿豆的发芽率, 抑制幼苗生长、影响硝酸还原酶活性和根系生理代谢等^[6]; 在种植黄连的土壤中, 细菌和放线菌数减少, 真菌数增加, 微生物多样性和均匀性指数降低, 种群结构改

收稿日期: 2014-09-26; 修订日期: 2014-12-31

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2013CB127405)

作者简介: 陈亚楠 (1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为农业资源与环境, E-mail: chenynm@163.com

* 通讯联系人, E-mail: Lingyuanh@aliyun.com

变^[5],类似雷公藤和黄花蒿等药用植物对植物生长和土壤微生物的影响^[7,8].值得注意的是,种植黄连后一般需要休耕多年,连作障碍严重^[9],意味着进入土壤的化感物质不易分解,残效期较长.绿藻能净化水体,是滤食性鱼类的主要饵料,具有多种多样的生理、生化和生态功能,是评价水体生产力和健康质量的重要指标^[10].三峡库区是我国水资源保护的重点地区,其水质关系到下游 4 亿人民的生产生活和南水北调的水质安全.当地水产养殖业发达,并大规模集中种植黄连,但黄连生物碱对水生植物的影响尚待研究.为此,本研究以斜生栅藻和蛋白核小球藻为试验材料,分析了黄连根茎浸提物对它们的毒理作用,以期为评估水产养殖中黄连根茎或制剂过度使用和集约化种植可能引起的水生态风险提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试黄连取自石柱县黄水镇 5 年生黄连根茎, $(80 \pm 1)^\circ\text{C}$ 烘干,粉碎过 2 mm 筛,称取 100.00 g,加去离子水 37°C 水浴,浸提 24 h,过滤,定容至 1 000 mL(样品由西南大学药学院 HPLC 测定:生物碱总含量为 $176.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其中,小檗碱 $101.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,黄连碱 $28.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,巴马汀 $26.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,表小檗碱 $18.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,药根碱 $1.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),配成质量浓度为 $100\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的黄连根茎浸提液(*Coptis chinensis* root extracts, CRE),放入 4°C 冰箱避光保存备用.

斜生栅藻(*S. oblique*)和蛋白核小球藻(*C. pyrenoidosa*)均购自中国科学院武汉水生研究所,用 SE 培养基培养至对数生长期,用无菌水将斜生栅的藻密度稀释为 $1.15 \times 10^7\text{ 个}\cdot\text{mL}^{-1}$,蛋白核小球藻为 $1.40 \times 10^7\text{ 个}\cdot\text{mL}^{-1}$ 备用.

1.2 试验方法

1.2.1 绿藻预培养

取 1 200 mL 的广口瓶 12 个,分别加入 SE 培养基 900 mL,接种 50.0 mL 藻液,在温度 $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 、光照周期 $12\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$ 、光强 $1\,200\text{ lx}$ 下进行预培养 4 d.

1.2.2 试验设计

设置 0.00、0.05、0.25、 $1.00\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ CER 质量浓度的 4 个处理(依次用 CK、T1、T2、T3 表示),每个处理重复 3 次.具体操作是:在绿藻预培养 4 d 后,分别加入 0、0.5、2.5、10 mL 的 $100\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ CRE

溶液,并用 SE 培养基补足至 1 L(藻体密度为 $1.75 \times 10^6\text{ 个}\cdot\text{mL}^{-1}$),构成 CK、T1、T2、T3 等 4 个处理,各处理相当于含有黄连总生物碱(total alkaloid, TA): 0、0.088、0.44 和 $1.76\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,再继续培养 144 h.

1.2.3 测定指标及方法

在 0~144 h 培养期,每间隔 12 h 用显微镜-血球计数板观察藻细胞数^[11],电导仪测定培养液电导率^[12],精密 pH 计测定培养液 pH^[13].在培养结束时,用考马斯亮蓝法和丙酮-分光光度法分别测定绿藻的蛋白质和叶绿素含量^[14];在 48、96 和 144 h 这 3 个时段,每瓶各取 100 mL 藻液, $4\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 15 min,收集绿藻细胞,分别用硫代巴比妥酸法、氮蓝四唑法和碘量法测定丙二醛(MDA)含量、超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)活性^[14].

1.3 数据处理

采用 Excel 对试验数据进行基本计算,SPSS 17.0 软件进行方差分析,差异显著性检验用 LSD 法,显著性水平为 $P < 0.05$.

2 结果与分析

2.1 绿藻的生长繁殖

图 1 可见,对照处理的两种绿藻生长曲线呈显著的对数增加趋势,其中,斜生栅藻 $Y_{\text{CK}} = 0.546 \ln(t) + 2.377$, $R^2 = 0.79^{**}$ (式中, Y 为绿藻细胞密度, t 为时间,下同);蛋白核小球藻 $Y_{\text{CK}} = 0.669 \ln(t) + 1.322$, $R^2 = 0.81^{**}$.但是,黄连根茎浸提液(CRE)显著抑制 2 种绿藻的生长繁殖,并表现出明显的药物剂量依赖关系. T1 处理的绿藻生长曲线仍呈对数增长趋势,但单位时间藻细胞密度增加量明显下降(斜生栅藻 $Y_{\text{T1}} = 0.392 \ln(t) + 2.366$, $R^2 = 0.90^{**}$;蛋白核小球藻 $Y_{\text{T1}} = 0.515 \ln(t) + 1.307$, $R^2 = 0.60^{**}$), T2 和 T3 处理已无对数增殖趋势,其中,斜生栅藻初始藻细胞密度与结束时(144 h)的差异不大,但蛋白核小球藻在 144 h 的密度仅为初始密度(0 h)的 41.00%~59.00%,有大量藻体死亡.随着 CRE 浓度的增加,绿藻生长繁殖量逐渐降低,中、高浓度的 CRE 对蛋白核小球藻的毒性大于斜生栅藻.

2.2 绿藻叶绿素和蛋白质含量

图 2 可见,随着 CRE 浓度增加, T2 和 T3 处理显著降低斜生栅藻和蛋白核小球藻的叶绿素和蛋白质含量.在 T3 处理中,斜生栅藻的叶绿素和蛋白质

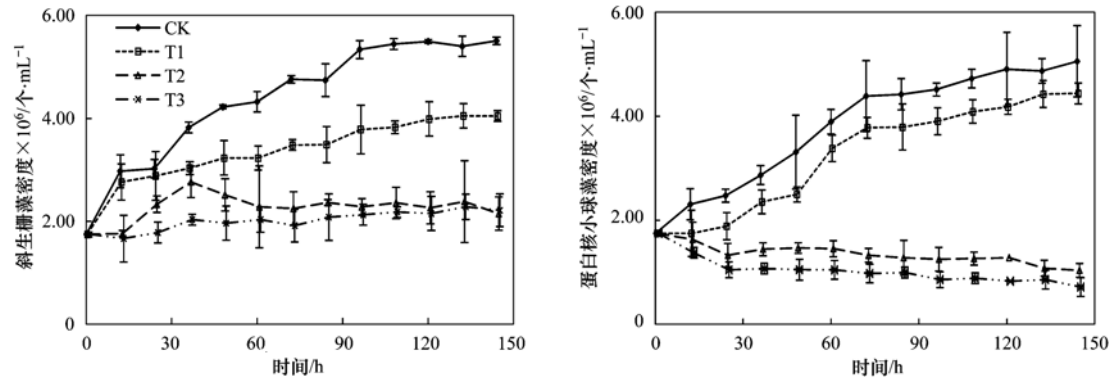


图1 CRE对斜生栅藻和蛋白核小球藻生长繁殖的影响

Fig. 1 Effects of *Coptis chinensis* root extracts on growth and reproduction of *S. oblique* and *C. pyrenoidosa*

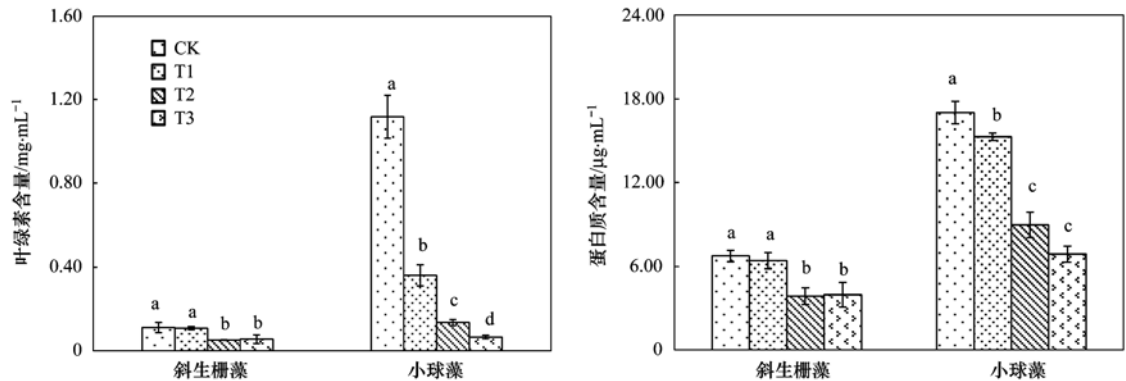


图2 黄连浸提液对绿藻叶绿素和蛋白质含量的影响

Fig. 2 Effects of *Coptis chinensis* root extracts on chlorophyll and protein in green algae

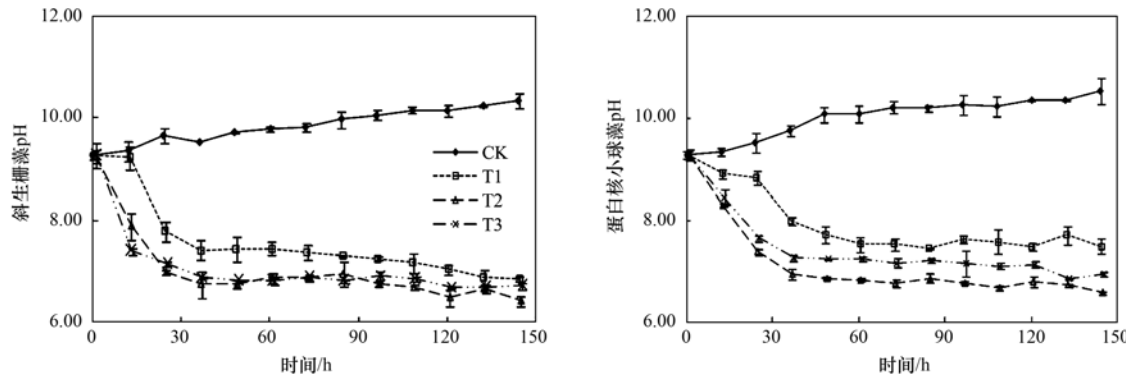
含量分别比CK降低了50.00%和41.27%；蛋白核小球藻的叶绿素和蛋白质含量分别比CK降低了94.16%和59.56%。

2.3 绿藻培养液的pH和电导率

图3所示,在试验期间(0~144 h),绿藻CK处理的pH值上升了1个单位(斜生栅藻CK处理的pH值从9.24上升至10.33；蛋白核小球藻CK的

pH值从9.27升高到10.53)。但是,CRE处理的pH值显著降低,在144 h,斜生栅藻T1、T2和T3处理的pH分别比CK下降了25.95%、30.61%和27.50%；蛋白核小球藻T1、T2和T3处理的pH分别比CK下降了19.30%、29.11%和25.14%。

在绿藻培养期间,溶液的电导率随培养时间延长而提高(图4)。培养结束时,CRE处理的电导率



T1、T2、T3已扣除背景值的影响,下同

图3 CRE对斜生栅藻和蛋白核小球藻培养液pH的影响

Fig. 3 Effects of *Coptis chinensis* root extracts on pH in culture solutions of *S. oblique* and *C. pyrenoidosa*

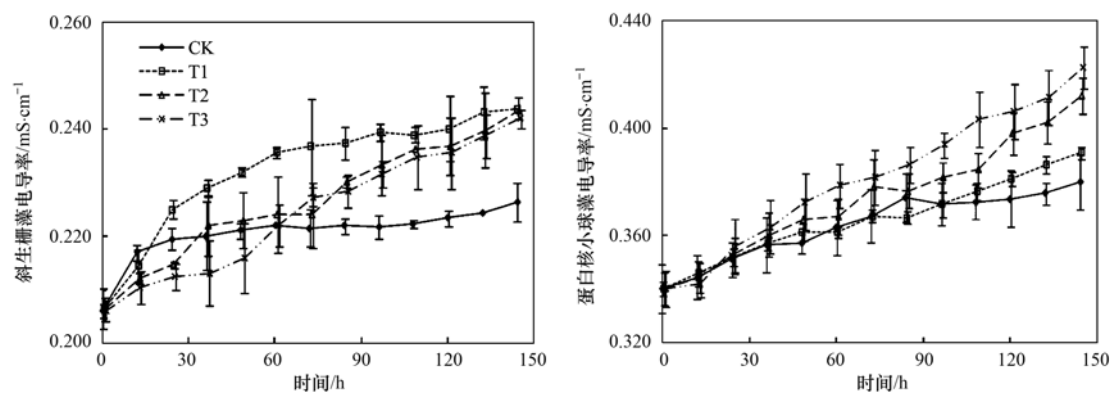


图4 CRE对斜生栅藻和蛋白核小球藻培养液电导率的影响

Fig. 4 Effects of *Coptis chinensis* root extracts on conductivity in culture solutions of *S. oblique* and *C. pyrenoidosa*

显著高于CK. 在144 h时,斜生栅藻T1、T2和T3处理的电导率比CK处理依次增加了7.72%、7.76%和6.88%;蛋白核小球藻CRE处理的电导率比CK依次提高了2.87%(T1)、9.77%(T2)和11.15%(T3).

2.4 CRE对绿藻SOD、CAT和MDA的影响

表1可见,在3个不同阶段,与各自的CK相

比,CRE均显著增加绿藻的SOD活性,CRE处理的斜生栅藻SOD增加幅度为19%~310%,蛋白核小球藻为42%~732%.其中,斜生栅藻T1和T2处理的SOD活性在96 h时最高,而T3处理的峰值出现在144 h;蛋白核小球藻T1处理SOD峰值出现在48 h,而T2和T3处理的峰值滞后到144 h.

表1 黄连根浸提液对绿藻SOD活性的影响¹⁾

Table 1 Effects of <i>Coptis chinensis</i> fibrous root extracts on SOD activity							
绿藻	处理	处理 方差分析	SOD 活性/ $\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$			时间进程方差分析	
			48 h	96 h	144 h	<i>F</i> 值	<i>P</i>
斜生栅藻	CK		16.72 ± 0.06d	19.77 ± 0.38c	19.41 ± 0.75c	23.622	0.001
	T1		19.85 ± 1.39c	74.86 ± 7.28a	27.88 ± 0.90b	142.563	0.000
	T2		31.85 ± 1.28b	50.99 ± 8.15b	40.70 ± 0.17a	12.134	0.008
	T3		35.28 ± 1.30a	24.81 ± 1.46c	40.47 ± 2.14a	68.174	0.000
		<i>F</i> 值	174.041	64.041	216.104		
		<i>P</i>	0.000	0.000	0.000		
蛋白核小球藻	CK		10.10 ± 0.73d	13.81 ± 0.26c	17.42 ± 1.22d	57.739	0.000
	T1		23.97 ± 0.65a	14.95 ± 2.29bc	23.79 ± 0.90c	24.577	0.001
	T2		22.08 ± 0.84b	18.20 ± 1.75b	28.63 ± 0.73b	58.574	0.000
	T3		14.31 ± 0.30c	21.70 ± 1.43a	31.82 ± 2.26a	96.034	0.000
		<i>F</i> 值	291.766	11.078	59.365		
		<i>P</i>	0.000	0.000	0.000		

1) 在同一列中,有不同字母表示差异显著(LSD法, $P < 0.05$),下同

在2种绿藻的CK处理中,3个时段测定的CAT活性无显著变化($P > 0.05$);但在CRE的处理中,时间和CRE均显著影响绿藻的CAT活性(表2).在48 h,3个CRE处理的CAT活性均显著低于CK,CRE的浓度越大CAT活性降低越多,4个处理CAT活性由高到低依次为CK>T1>T2>T3;在96 h和144 h,T1和T2处理的CAT活性又逐步升高,但在高浓度的T3处理中,绿藻CAT活性一直维持在很低的水平.2种绿藻均有相似的现象.

表3所见,在2种绿藻的CK处理中,3个时段测定的MDA含量均无显著变化($P > 0.05$);但在

CRE的处理中,时间和CRE均显著影响绿藻的MDA含量.CRE使2种绿藻的MDA含量极显著提高($P < 0.01$),尤其在处理后48 h出现明显的峰值(如斜生栅藻3个CRE处理的MDA含量比CK增加了7~14倍);在96 h和144 h,各CRE处理的MDA含量又显著下降.此外,低浓度的CRE对MDA的影响大于高浓度的CRE.如在48 h时,斜生栅藻T1处理MDA含量是 $4.94 \mu\text{mol} \cdot \text{mg}^{-1}$,T2和T3处理分别是 $2.36 \mu\text{mol} \cdot \text{mg}^{-1}$ 和 $2.54 \mu\text{mol} \cdot \text{mg}^{-1}$,但均显著高于CK.蛋白核小球藻也存在相似现象.

表 2 黄连根浸提液对绿藻 CAT 活性的影响

Table 2 Effects of <i>Coptis chinensis</i> fibrous root extracts on CAT activity							
绿藻	处理	处理 方差分析	CAT 活性/ $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{min})^{-1}$			时间进程方差分析	
			48 h	96 h	144 h	<i>F</i> 值	<i>P</i>
斜生栅藻	CK		3.73 ± 0.52a	3.78 ± 0.75a	3.98 ± 0.33a	0.348	0.719
	T1		1.68 ± 0.10b	3.57 ± 0.01a	3.43 ± 1.12a	295.853	0.000
	T2		1.27 ± 0.11b	2.88 ± 0.10b	3.90 ± 0.45a	72.513	0.000
	T3		0.49 ± 0.04c	0.46 ± 0.01c	0.68 ± 0.09b	12.908	0.007
		<i>F</i> 值	79.589	370.544	74.088		
		<i>P</i>	0.000	0.000	0.000		
蛋白核小球藻	CK		1.91 ± 0.03a	1.83 ± 0.01a	1.48 ± 1.05b	4.063	0.077
	T1		1.20 ± 0.12b	1.99 ± 0.17a	3.78 ± 0.76a	35.601	0.000
	T2		1.21 ± 0.12b	1.60 ± 0.01b	1.82 ± 0.13b	93.025	0.000
	T3		0.23 ± 0.05c	0.11 ± 0.01c	0.25 ± 0.02c	10.909	0.000
		<i>F</i> 值	195.305	230.577	34.647		
		<i>P</i>	0.000	0.000	0.000		

表 3 黄连根浸提液对绿藻 MAD 含量的影响

Table 3 Effects of <i>Coptis chinensis</i> fibrous root extracts on MAD content							
绿藻	处理	处理 方差分析	MDA/ $\mu\text{mol}\cdot\text{mg}^{-1}$			时间进程方差分析	
			48 h	96 h	144 h	<i>F</i> 值	<i>P</i>
斜生栅藻	CK		0.33 ± 0.07c	0.36 ± 0.06c	0.36 ± 0.09c	1.959	0.204
	T1		4.94 ± 0.05a	1.67 ± 0.10a	1.62 ± 0.09a	1 534.427	0.000
	T2		2.36 ± 0.44b	0.85 ± 0.13b	0.92 ± 0.04b	31.615	0.001
	T3		2.54 ± 0.36b	0.53 ± 0.11c	0.76 ± 0.02c	93.953	0.000
		<i>F</i> 值	131.182	75.279	235.846		
		<i>P</i>	0.000	0.000	0.000		
蛋白核小球藻	CK		0.09 ± 0.07c	0.11 ± 0.01c	0.15 ± 0.03d	1.294	0.341
	T1		1.76 ± 0.09a	0.50 ± 0.07a	0.49 ± 0.06b	209.215	0.000
	T2		0.83 ± 0.05b	0.31 ± 0.00b	0.66 ± 0.03a	66.946	0.000
	T3		0.81 ± 0.00b	0.13 ± 0.00c	0.35 ± 0.01c	389.50	0.000
		<i>F</i> 值	367.980	79.981	44.370		
		<i>P</i>	0.000	0.000	0.000		

3 讨论

绿藻是水体生态系统的重要组成部分。作为地球上最重要的有机质初级生产者,它们通过光合作用,吸收 CO₂,释放 O₂,生产出 7 倍于陆生植物形成的光合碳水化合物,并为水生动植物提供氧气和饵料,在水生态系统中扮演极其重要的角色^[15]。需要指出的是,绿藻对外界环境反应敏感,pH、温度、光照、养分、污染物等因素都会影响其生长^[16]。因此,绿藻常作为监测水体污染的指示植物。黄连根茎或制剂具有消炎杀菌等作用,在集约化水产养殖中,黄连根茎或制剂单独和配合用于防治鱼、虾、蟹、贝类、海参的多种细菌和病毒引起的疾病^[2,3]。一般每公斤鱼体的黄连根茎(或制剂)用量约为 20 mg,连续或隔日投药,持续 7 d^[17],相当于水箱养鱼水体中含有黄连总生物碱(TA)0.95 mg·L⁻¹。试验表明,当培养液中黄连 TA 浓度为 0.088 mg·L⁻¹时

(T1 处理),斜生栅藻的生长繁殖速率显著降低;当 TA 浓度为 0.44 mg·L⁻¹时(T2 处理),斜生栅藻停止生长繁殖,蛋白核小球藻出现藻体死亡。换言之,当水体中的黄连 TA 浓度达到鱼病用药量的 10%,就可能影响到集约化水产养殖中绿藻的正常生长繁殖;当水体中黄连 TA 浓度为鱼病用药量的一半,就会导致绿藻生长停止,这意味着进入水体的黄连生物碱将降低水体初级生产力,对水环境产生破坏作用。在逆境条件下,水生植物的生长繁殖状况是反映其抗性最重要和直接指标^[18],蛋白核小球藻对中、高浓度的 CRE 比斜生栅藻更为敏感,暗示进入水体的黄连生物碱还可能改变绿藻的群落结构,影响水体的生态平衡。因此,水产养殖滥用黄连制剂,集约化大规模种植黄连,其根系残体腐烂经地下和地表径流进入水体均可能存在直接和间接的生态风险。

斜生栅藻等 6 种淡水藻适宜的 pH 范围在 8 ~

10^[19],在 CRE 胁迫下,两种供试绿藻培养液的 pH 值显著降低,源于绿藻分泌过多的氢离子引起,这种现象类似于重金属胁迫促进低等植物分泌氢离子^[20]. 在适合的 pH 条件下,绿藻的抗性最强,不适宜的 pH 将加重 Cr 的危害^[21],故降低培养液的 pH 可能进一步加重 CRE 的危害. 此外,CRE 提高培养液电导率,说明绿藻细胞膜结构破坏,透性增加,细胞内含物流出.

CRE 显著降低绿藻叶绿素含量;蛋白质含量也因 CRE 的加入而显著降低. 众所周知,在光合作用中,叶绿素参与光能的吸收,其含量降低影响光合速率^[22]. CRE 降低绿藻叶绿素含量必然抑制光合作用,减少光合产物积累,导致绿藻生长停滞. 蛋白质是细胞的重要组成部分,CRE 降低藻体蛋白质含量意味着抑制藻蛋白合成,进而影响了绿藻细胞分裂与生长.

在逆境条件下,生物体可通过多种方式建立生物防御体系而减少伤害^[23]. 其中,诱导产生系统抗性是植物减少逆境伤害的重要方式之一,涉及到超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)等催化的多种生物化学反应^[24]. SOD 和 CAT 分别能清除游离氧和过氧化氢,减少它们对生物细胞和器官的伤害作用^[25]. 在 CRE 胁迫下,绿藻 SOD 活性显著提高,说明 CRE 激活了 SOD 酶的活性,也暗示细胞内游离氧增多;在高浓度 CRE 的环境中,随着暴露时间延长,SOD 活性降低表明 SOD 酶系统遭到破坏,即 CRE 对绿藻细胞危害加重. 这种现象也可在其它毒物危害中发现^[26]. 两种绿藻 SOD 活性对 CRE 的响应各异. 其次,暴露在低、中浓度 CRE 的绿藻,初期 CAT 活性显著降低,随后又逐步升高,但高浓度 CRE 使绿藻 CAT 活性一直维持在很低的水平. 推测 CRE 对绿藻 CAT 酶系初期有明显的抑制,后期又有所恢复;但高浓度的 CRE 对 CAT 酶系统有不可逆的破坏作用. 其三,CRE 极显著增加 2 种绿藻体内的 MDA 含量,与 CK 相比,在 48 h 斜生栅藻增加了 7~14 倍. 在生物体内,MDA 是细胞膜磷脂氧化最终产物之一,其含量与细胞膜“磷脂双层”的破坏程度呈显著正相关^[27]. 因此,在培养液中加入 CRE 之后,绿藻 MDA 含量显著增加意味着细胞膜磷脂氧化. 植物在干旱、患病、重金属等逆境条件下,产生大量活性氧,使细胞膜发生过氧化作用,最终形成 MDA^[28]. 在本试验中,随着 CRE 浓度的增大,斜生栅藻 SOD 活性提高,CAT 的降幅显著低于蛋白核小球藻,有益于减少前者体内游离氧和过氧化氢的积累,这可能是 CRE 对蛋白核小球藻的危害

大于斜生栅藻的原因之一.

总之,CRE 对斜生栅藻和蛋白核小球藻有明显的毒害作用,研究黄连根茎提取液对绿藻的毒理作用,有助于警示在水产养殖中黄连根茎或制剂滥用;同时,黄连合理栽培及科学布局也有利于降低水生生态风险.

4 结 论

黄连根茎浸提液对斜生栅藻和蛋白核小球藻产生急性毒害,显著抑制其生长繁殖,导致藻体培养液 pH 降低而电导率升高,藻体叶绿素和蛋白质含量降低,脂质氧化严重. 抗氧化酶 SOD 活性显著升高而 CAT 活性降低.

参考文献:

- [1] 徐江,蒋俊,贾晓斌,等. HPLC-ESI-MS 同时分析黄黄连饮片及其制剂中的活性成分[J]. 中草药, 2012, **43**(2): 279-282.
- [2] 陈丽婷,邹志利,王晓清,等. 中草药添加剂在水产养殖中的应用研究进展[J]. 水产科学, 2004, **33**(3): 190-194.
- [3] Liu X, Hu S, Chen X, *et al.* Hollow fiber cell fishing with high-performance liquid chromatography for rapid screening and analysis of an antitumor-active protoberberine alkaloid group from *Coptis chinensis*[J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2014, **98**: 463-475.
- [4] 孔德英,陆丽华,滕少娜,等. 石柱黄连出口现状及对策研究[J]. 中国现代中药, 2013, **15**(8): 701-703.
- [5] 李鑫鑫. 黄连栽培模式对土壤因子的影响及黄连品系间主要生理指标研究[D]. 武汉: 华中农业大学植物科学与技术学院, 2010.
- [6] 李倩,吴叶宽,袁玲,等. 黄连须根浸提液对 2 种豆科植物的化感效应[J]. 中国中药杂志, 2013, **38**(6): 806-811.
- [7] 罗世琼,黄建国,袁玲. 野生黄花蒿土壤的养分状况与微生物特征[J]. 土壤学报, 2014, **51**(4): 868-879.
- [8] 李杨军,何军,马志卿,等. 雷公藤生物碱对土壤微生物的影响[J]. 西北农业学报, 2012, **21**(10): 174-178.
- [9] Sanderson H, Brain R A, Johnson D J, *et al.* Toxicity classification and evaluation of four pharmaceutical classes: antibiotics, antineoplastics, cardiovascular, and sex hormones [J]. Toxicology, 2004, **203**(1-3): 27-40.
- [10] Ji J, Long Z F, Lin D H. Toxicity of oxide nanoparticles to the green algae *Chlorella* sp. [J]. Chemical Engineering Journal, 2011, **170**(2-3): 525-530.
- [11] 朱小山,朱琳,田胜艳,等. 三种金属氧化物纳米颗粒的水生态毒性[J]. 生态学报, 2008, **28**(8): 3507-3516.
- [12] 郭亚丽,傅海燕,黄国和,等. 阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻的化感作用[J]. 环境科学, 2013, **34**(4): 1492-1497.
- [13] Moheimani N R. Inorganic carbon and pH effect on growth and lipid productivity of *Tetraselmis suecica* and *Chlorella* sp. (Chlorophyta) grown outdoors in bag photobioreactors [J].

- Journal of Applied Phycology, 2013, **25**(2): 387-398.
- [14] 吴叶宽, 袁玲, 黄建国, 等. 青蒿素对绿藻的化感效应[J]. 中国中药杂志, 2013, **38**(9): 1349-1354.
- [15] Hemschemeier A, MeLis A, Happe T. AnaLytical approaches to photobioLogicAl hydrogen production in unicellular green algae [J]. Photosynthesis Research, 2009, **102**(2-3): 523-540.
- [16] Mata M T, Martins A A, Caetano N S. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, **14**(1): 217-232.
- [17] 吴梅秀. 中草药在水产养殖业中的应用前景[J]. 畜牧兽医杂志, 2008, **27**(2): 64-65.
- [18] Baron J S, Hall E K, Nolan B T, *et al.* The interactive effects of excess reactive nitrogen and climate change on aquatic ecosystems and water resources of the United States [J]. Biogeochemistry, 2014, **114**(1-3): 71-92.
- [19] 许海, 刘兆普, 袁兰, 等. pH 对几种淡水藻类生长的影响[J]. 环境科学与技术, 2009, **32**(1): 27-30.
- [20] 何永美, 刘鲁峰, 谢春琼, 等. 镉对铅锌矿区小花南芥根际真菌氢离子分泌的影响[J]. 云南农业大学学报, 2014, **29**(3): 404-408.
- [21] 赵娜, 冯鸣凤, 朱琳. 不同 pH 值条件下 Cr^{6+} 对小球藻和斜生栅藻的毒性效应[J]. 东南大学学报(医学版), 2010, **29**(4): 382-386.
- [22] Chaves M M, Flexas J, Pinheiro C. Photosynthesis under drought and salt stress; regulation mechanisms from whole plant to cell [J]. Annals of Botany, 2010, **103**(4): 551-560.
- [23] Dasgupta N, Nandy P, Tiwari C, *et al.* Salinity-imposed changes of some isozymes and total leaf protein expression in five mangroves from two different habitats [J]. Journal of Plant Interactions, 2010, **5**(3): 211-221.
- [24] Soto P, Gaete H, Hidalgo M E. Assessment of catalase activity, lipid peroxidation, chlorophyll-*a*, and growth rate in the freshwater green algae *Pseudokirchneriella subcapitata* exposed to copper and zinc [J]. Latin American Journal of Aquatic Research, 2011, **39**(2): 280-285.
- [25] Faize M, Burgos L, Faize L, *et al.* Involvement of cytosolic ascorbate peroxidase and Cu/Zn-superoxide dismutase for improved tolerance against drought stress [J]. Journal of Experimental Botany, 2011, **62**(8): 2599-2613.
- [26] 高扬, 毛亮, 周培, 等. Pb、Cd 复合胁迫下 4 种植物抗氧化防御差异性研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, **18**(4): 836-842.
- [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* (Trebouxiophyceae) [J]. Plant Growth Regulation, 2014, **73**(1): 57-66.
- [28] Qian H, Li J Q, Pan X, *et al.* Effects of streptomycin on growth of algae *Chlorella vulgaris* and *Microcystis aeruginosa* [J]. Environmental Toxicology, 2012, **27**(4): 229-237.

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-hu, 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 Phytoremediation 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