

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第5期

Vol.33 No.5

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

区域空气质量模拟中查表法的应用研究	谢旻,王体健,江飞,李树,蔡彦枫,庄炳亮(1409)
长江三角洲地区秸秆露天焚烧大气污染物排放清单及其在空气质量模式中的应用	苏继峰,朱彬,康汉青,王红磊,王体健(1418)
北京及周边城市一元脂肪酸大气颗粒物干沉降通量及来源分析研究	徐小娟,李杏茹,王跃思,刘晨书,潘月鹏,王英锋(1425)
上海大气超细颗粒物和工业纳米颗粒的表征及细胞毒性的比较研究	张睿,吕森林,尚羽,易飞,任晶晶,郝晓洁,安静,吴明红(1431)
青岛市大气 PM _{2.5} 元素组成及来源研究	李秀镇,盛立芳,徐华,屈文军(1438)
冬季天津家庭室内空气颗粒物中邻苯二甲酸酯污染研究	王夫美,陈丽,焦姣,张雷波,姬亚芹,白志鹏,张利文,孙增荣,张星梅(1446)
再悬浮装置在大气 PM _{2.5} 源谱分析中的应用	段恒轶,钱冉冉,吴水平,印红玲(1452)
黔西南煤燃烧产物微量元素分布特征及富集规律研究	魏晓飞,张国平,李玲,项萌,蔡永兵(1457)
三峡水库不同运行状态下支流澎溪河水-气界面温室气体通量特征初探	蒋滔,郭劲松,李哲,方芳,白镭,刘静(1463)
香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析	王亮,肖尚斌,刘德富,陈文重,王雨春,陈小燕,段玉杰(1471)
臭氧浓度升高与土壤湿度对农田土壤微生物呼吸温度敏感性的影响	陈书涛,张勇,胡正华,史艳妹,沈小帅(1476)
托木尔峰青冰滩 72 号冰川径流水化学特征初步研究	赵爱芳,张明军,李忠勤,王飞腾,王圣杰(1484)
五大连池水溶性有机磷矿化特性的研究	张斌,席北斗,赵越,魏自民,白雪,王曼林(1491)
7 条环太湖河流沉积物氮含量沿程分布规律	卢少勇,远野,金相灿,焦伟,吴瑶洁,任德有,周羽化,陈雷(1497)
巢湖十五里河沉积物氮磷形态分布及生物有效性	李如忠,李峰,周爱佳,童芳,钱家忠(1503)
北运河系地表水近 10 年来水质变化及影响因素分析	郭婧,荆红卫,李金香,李令军(1511)
东莞运河排涝对东江河网水质影响分析	孙磊,毛献忠,黄旻旻(1519)
北京平原区地下水污染源识别与危害性分级	陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮(1526)
地下水曝气修复过程的三维数值模拟	李恒震,胡黎明,王建,武晓峰,刘培斌(1532)
垂向水动力扰动机的蓝藻控制效应数值实验研究	邹锐,周璟,孙永健,嵇晓燕,岳佳,刘永(1540)
新型生物岛栅中污染物去除的微生物机制研究	高明瑜,谢慧君,王文兴(1550)
营养盐水平对念珠藻胞外有机物产生的影响	齐飞,刘晓媛,徐冰冰,黄岳,封莉,张立秋(1556)
水网藻种植水对铜绿微囊藻生长的抑制作用研究	傅海燕,柴天,赵坤,刘智峰,张明真,侯明,许鹏成(1564)
酞酸酯在模拟海河苕草微宇宙中的消减和分布特征	迟杰,杨青(1570)
电子束辐射对铜绿微囊藻毒素产生和释放的抑制作用研究	刘书宇,吴明红,姜钦鹏(1575)
青铜峡灌区典型排水沟水污特征解析	李强坤,胡亚伟,罗良国(1579)
四溴双酚 A 的辐射降解研究	李杰,徐殿斗,徐刚,马玲玲,吴明红(1587)
污泥基活性炭催化臭氧氧化降解水中微量布洛芬的效能研究	王红娟,齐飞,封莉,张立秋(1591)
高水力负荷对人工湿地处理精养虾塘排水效果的影响	李怀正,章星异,陈卫兵,叶剑峰(1597)
城市污水生物脱氮系统出水经氯胺消毒形成 NDMA 的影响因素研究	尚晓玲,李咏梅(1604)
利用淀粉基共混物作为反硝化固体碳源的研究	沈志强,吴为中,杨春平,陈佳利,王建龙(1609)
好氧污泥颗粒化过程中 Zeta 电位与 EPS 的变化特性	王浩宇,苏本生,黄丹,崔晓姣,竺建荣(1614)
活性污泥对病毒的生物吸附特性	周玉芬,郑祥,雷洋,陈迪(1621)
阴离子型聚丙烯酰胺在离子交换膜上的吸附规律	邓梦洁,于水利,时文歆,衣雪松(1625)
两性修饰膨润土对苯酚的吸附及热力学特征	李婷,孟昭福,张斌(1632)
表面活性剂对苯并[a]芘在黑炭表面吸附解吸的影响	张景环,陈春溶,张玮航,栗桂州(1639)
南京市 4 个污水处理厂的活性污泥中细菌的分离鉴定和抗生素耐药性分析	葛峰,郭坤,周广灿,张会娟,刘济宁,戴亦军(1646)
焦化废水中苯酚降解菌筛选及其降解性能	陈春,李文英,吴静文,李静(1652)
Xanthobacter flavus DT8 降解二噁英的特性研究	金小君,陈东之,朱润晔,陈静,陈建孟(1657)
未开发油气田地地表炔氧化菌空间定量分布	满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强(1663)
矿化垃圾中氧化甲烷兼性营养菌的筛选与生物特性研究	赵天涛,项锦欣,张丽杰,全学军,赵由才(1670)
长江中游干流及 22 条支流表层水中多氯联苯的分布特征及其潜在风险	李昆,赵高峰,周怀东,曾敏,廖柏寒,吴正勇,张盼伟,郝红(1676)
典型血吸虫病区表层水中酚类化合物的污染特征及潜在风险	吴正勇,赵高峰,周怀东,李科林,曾敏,李昆,张盼伟,郝红(1682)
闽江福州段沉积物中多环芳烃的空间分布异质性研究	陈卫锋,倪进治,杨红玉,魏然,杨玉盛(1687)
三峡库区蓄水运用期表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价	王健康,高博,周怀东,陆瑾,王雨春,殷淑华,郝红,袁浩(1693)
典型电器工业区河涌沉积物中重金属的分布和潜在生态风险	邓代永,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许政英(1700)
密云水库上游金属矿区土壤中重金属形态分布及风险评价	高彦鑫,冯金国,唐磊,朱先芳,刘文清,李宏兵(1707)
湘西花垣矿区土壤重金属污染及其生物有效性	杨胜香,袁志忠,李朝阳,龙华,唐文杰(1718)
基于 GIS 的某训练场土壤重金属污染评价	刘玉通,方振东,杨琴,谢朝新,王大勇,毛华军(1725)
土壤质地和湿度对 SVE 技术修复苯污染土壤的影响	刘少卿,姜林,姚玉君,李艳霞,刘希涛,林春野(1731)
蒙脱土、高岭土和针铁矿对 DNA 吸附与解吸特征	王慎阳,饶伟,王代长,张亚楠,李腾,唐冰培,杨世杰(1736)
LNAPL 在砂质含水层中动态迁移的电阻率法监测试验研究	潘玉英,贾永刚,郭磊,李进军,单红仙(1744)
亚临界水解预处理稻草秸秆制备活性炭及表征	董宇,申哲民,雷阳明,王茜,刘婷婷(1753)
蓝藻好氧堆肥及其氮素损失控制的研究	任云,崔春红,刘奋武,占新华,周立祥(1760)
固定化微生物技术修复 PAHs 污染土壤的研究进展	钱林波,元妙新,陈宝梁(1767)
《环境科学》征订启事(1483)	《环境科学》征稿简则(1620)
信息	(1490,1496,1586,1743)

水网藻种植水对铜绿微囊藻生长的抑制作用研究

傅海燕¹, 柴天¹, 赵坤^{1,2,3}, 刘智峰⁴, 张明真^{1,2}, 侯明^{1,2}, 许鹏成^{1,2}

(1. 厦门理工学院环境工程系, 厦门 361024; 2. 华北电力大学能源与环境研究院, 北京 102206; 3. 中国水电顾问集团中南勘测设计研究院, 长沙 410014; 4. 湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082)

摘要: 研究了不同浓度水网藻种植水对铜绿微囊藻生长的抑制作用以及对叶绿素 a 和抗氧化酶活性(SOD、CAT、POD)的影响。结果表明, 水网藻种植水对铜绿微囊藻的抑制效果明显, 20% ~ 80% 浓度的种植水第 8 d 的平均抑藻率达到 98.9%, 藻细胞几乎全部死亡。在种植水的作用下藻细胞叶绿素 a 含量迅速降低, 叶绿素 a 遭到破坏。实验前 2 d 由于受到活性氧的刺激铜绿微囊藻抗氧化酶活性增加, 且都高于对照组, 随着抗氧化酶活性达到极限, 活性氧开始积累并破坏细胞的正常代谢, 抗氧化酶活性迅速降低, 80% 浓度的实验组至第 8 d 时 SOD、CAT、POD 活性分别仅为 31、6、5 U·mg⁻¹。水网藻种植水经过高温处理后对铜绿微囊藻基本没有抑制作用, 说明种植水中的抑藻物质具有热不稳定性。

关键词: 水网藻; 铜绿微囊藻; 化感作用; 叶绿素 a; 抗氧化酶活性; 降解特性

中图分类号: X52; X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)05-1564-06

Inhibitory Effects of Liquor Cultured with *Hydrodictyon reticulatum* on the Growth of *Microcystis aeruginosa*

FU Hai-yan¹, CHAI Tian¹, ZHAO Kun^{1,2,3}, LIU Zhi-feng⁴, ZHANG Ming-zhen^{1,2}, HOU Ming^{1,2}, XU Peng-cheng^{1,2}

(1. Department of Environmental Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China; 2. Research Academic of Energy and Environmental Studies, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 3. Hydrochina Zhongnan Engineering Corporation, Changsha 410014, China; 4. College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The inhibitory effects of aquatic filtrate from *Hydrodictyon reticulatum* culture on the growth of *Microcystis aeruginosa* and the influences on its chlorophyll a content and activities of antioxidant enzymes (SOD, CAT and POD) were studied. The results showed that liquor cultured with *H. reticulatum* could inhibit the growth of *M. aeruginosa* markedly, displayed that the average inhibition ratio was 98.9% on the 8th day with 20%-80% liquor cultured with *H. reticulatum* which meant algal cell almost died. The chlorophyll a content of *M. aeruginosa* decreased by liquor cultured with *H. reticulatum*. Due to stimulative function of active oxygen, the activities of antioxidant enzymes of *M. aeruginosa* increased at the first 2 days and they were higher than that of the control group. With the limit of activities of antioxidant enzymes coming, active oxygen began to accumulate which damaged normal cellular metabolism and decreased the activities of antioxidant enzymes rapidly. The activities of SOD, CAT and POD were only 31, 6, 5 U·mg⁻¹ respectively on the 8th day with 80% liquor cultured with *H. reticulatum*. The inhibitory effects of liquor cultured with *H. reticulatum* after high-temperature treatment on *M. aeruginosa* were un conspicuous, which demonstrated that liquor cultured with *H. reticulatum* was thermally-instable.

Key words: *Hydrodictyon reticulatum*; *Microcystis aeruginosa*; allelopathy; chlorophyll a; activities of antioxidant enzymes; degradation characteristics

日益严重的水体富营养化导致藻类爆发性生长, 形成水华或赤潮, 对水体生态系统和人类健康构成严重威胁, 因此藻类控制已成为全球关注的热点问题之一^[1, 2]。目前, 除藻技术主要包括物理法、化学法、生物法等。化学法使用的除藻剂(如硫酸铜)不可避免地破坏生态平衡和造成二次污染, 物理法和传统的生物法则存在成本高、效率低、操作时间长等缺点^[3]。近年来利用水生植物分泌的化感物质抑制藻类生长的方法越来越受到重视^[4], 化感物质是植物产生的次生代谢物质, 一般能在自然条件下降解, 不会在生态系统

中积累, 生态安全性好^[5, 6]。许多水生植物产生的化感物质能够有效抑制藻类的生长, 如芦苇、香蒲、穗状狐尾藻、金鱼藻、苦草、菹草等^[7~11], 目前化感抑藻的方式主要有植物纯提取物实验、分泌物实验、藻类共培养实验和渗析袋实验等^[12]。陈卫民等^[13]研究了混

收稿日期: 2011-06-03; 修订日期: 2011-11-14

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07104-004); 国家自然科学基金项目(51109181); 厦门市科技计划项目(3502Z20093040); 福建省教育厅项目(JA11236)

作者简介: 傅海燕(1979~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为生物除藻技术, E-mail: fuhy@xmut.edu.cn

合培养和分开培养条件下苦草和铜绿微囊藻的相互化感作用,结果表明苦草释放的化感物质使得藻细胞内活性氧过量积累,光合作用受到影响,藻细胞死亡。Dziga 等^[14]研究了 2 种化感物质焦枋酸和对苯二酚对铜绿微囊藻的抑制作用,结果表明两者是通过对光合系统和碱性磷酸酶的破坏抑制其生长。Wu 等^[15]研究了粉绿狐尾藻对铜绿微囊藻的化感作用与其生理机制,发现其抑制作用是通过降低后者的藻胆蛋白来实现的。

本课题组在前期研究中通过水网藻和铜绿微囊藻的共生培养和分离培养实验,证明了水网藻对铜绿微囊藻具有较强的化感抑制作用^[16]。本研究研究了水网藻种植水对铜绿微囊藻的生长作用、光合作用和抗氧化酶活性的影响,以及水网藻种植水的降解特性,以期为证明水网藻治理水华的可行性提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

水网藻(*Hydrodictyon reticulatum*)和铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)由中国科学院武汉水生生物研究所淡水藻种库提供。分别采用 MCV 和 BG11 培养基培养,生长温度为 $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$,光照度为 $3\,000\text{ lx}$,光暗比为 12 h:12 h,每天振荡 4 次,待生长至对数生长期便可用于实验。

水网藻种植水:将生长良好的水网藻接种到新鲜的培养基中,置于无菌光照培养箱培养 30 d 后,将培养液先用滤纸过滤,再经 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 微孔滤膜过滤后即得到水网藻种植水。

1.2 实验方法

1.2.1 水网藻种植水的抑藻实验

在系列 500 mL 锥形瓶中接入 100 mL 铜绿微囊藻藻种,再分别往各瓶中加入 100、200、300、400 mL 水网藻种植水,往各瓶中加入蒸馏水至总体积为 500 mL,然后往各瓶中投入相应浓度的 BG11 营养盐,即配置成水网藻种植水浓度为 20%、40%、60%、80% 的培养液,对照组不加种植水,藻液初始 D_{680} 为 0.1,整个过程均在无菌操作台上进行,用纱布包扎好瓶口,防止灰尘或其它杂质落入,每组 3 个平行,每天振荡 2 次,每 24 h 测定 D_{680} ,每 48 h 测定叶绿素 a 浓度、SOD、POD 和 CAT 酶活性,每个参数测 2 个平行。

1.2.2 水网藻种植水的热不稳定性实验

将水网藻种植水经 120°C 高压蒸汽灭菌锅处理

2 h 后,配制成 80% 浓度的培养液进行上述抑制作用实验,对照组加入的种植水不经过高温处理,并设置不加种植水的空白组,分别做 3 组平行实验,通过测定 D_{680} 来判断铜绿微囊藻的生长情况。

1.3 测定方法

1.3.1 铜绿微囊藻生长量的测定

用紫外可见分光光度计于 680 nm 波长处的吸光度(D_{680})表示藻细胞数量。

1.3.2 叶绿素 a 的测定^[17]

取 10 mL 的水样经 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 的微孔滤膜过滤,将过滤后的滤膜置于冰箱中冷冻 8 h,转入研钵中,加入少量碳酸镁粉末和 2~3 mL 90% 丙酮,充分研磨,提取叶绿素 a,然后用 90% 丙酮定容到 10 mL,放入冰箱冷藏 6 h 继续浸取,再经 $4\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 10 min,取上清液测定 630、645、663、750 nm 波长下的吸光度,按下式计算叶绿素 a 含量:

$$\text{叶绿素 a}(\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}) = [11.64 \times (D_{663} - D_{750}) - 2.16 \times (D_{645} - D_{750}) + 0.1 \times (D_{630} - D_{750})] \cdot V_1 / V$$

式中, V 为水样体积(L), V_1 为提取液定容后的体积(mL), D 为吸光度。

1.3.3 酶液的制备

取 5 mL 藻液加至灭菌的离心管中, $4\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 15 min 收集藻细胞,加入预冷的磷酸缓冲液($\text{pH} = 7.8$)在冰浴上研磨成匀浆,加磷酸缓冲液至总体积为 5 mL,以 $15\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 15 min,上清液即为酶提取液。

1.3.4 超氧化物歧化酶 SOD 的测定^[18]

采用氮蓝四唑(NBT)法,往试管中依次加入 $50\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 磷酸缓冲液 1.5 mL、 $130\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 甲硫氨酸溶液 0.3 mL、 $750\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氮蓝四唑溶液 0.3 mL、 $100\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ EDTA- Na_2 溶液 0.3 mL、 $20\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 核黄素溶液 0.3 mL、酶液 0.05 mL、蒸馏水 0.25 mL,2 支对照管以磷酸缓冲液代替酶液,混匀,将 1 支对照管置于暗处,其它各管于 $4\,000\text{ lx}$ 日光灯下反应 20 min,保持各管受光情况一致,反应结束后,以不照光的对照管为空白,于 560 nm 波长处测定各管吸光度,按下式计算 SOD 活性:

$$\text{SOD 活性}(\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}) = (\text{Ack} - \text{AE}) \times V / (\text{Ack} \times 0.5 \times W \times V_1)$$

式中,Ack 为照光对照管的吸光度,AE 为样品管的吸光度, V 为样品液总体积(mL), V_1 为测定时样品用量(mL), W 为样鲜重(mg)。

1.3.5 过氧化氢酶(CAT)的测定^[18]

往试管中依次加入 0.3% H_2O_2 1 mL、 H_2O 1.9

mL、酶液 0.1 mL,开始反应,测定 240 nm 处的吸光度降低速度,每分钟 D_{240} 减少 0.01 为 1 个活力单位, CAT 酶活性单位(以鲜重计)为 $U \cdot mg^{-1}$.

1.3.6 过氧化物酶(POD)的测定^[18]

往试管中依次加入 0.3% H_2O_2 2 mL、0.2% 愈创木酚 0.95 mL、pH = 7.0 的磷酸缓冲液 1 mL、酶液 0.05 mL,开始反应,测定 470 nm 处吸光度降低速度,每分钟 D_{470} 减少 0.01 为 1 个活力单位, POD 酶活性单位(以鲜重计)为 $U \cdot mg^{-1}$.

1.4 数据处理

水网藻种植水对铜绿微囊藻的抑制率公式为^[19]:

$$IR = (1 - N/N_0) \times 100\%$$

式中, IR 为抑制率; N 为加入水网藻种植水实验组的 D_{680} ; N_0 为对照组 D_{680} .

各个数据都是采用 3 个平行实验的平均值. 采用 Excel 2007 软件对数据进行处理, 误差分析采用软件自带的标准差分析.

2 结果与讨论

2.1 水网藻种植水对铜绿微囊藻的抑制作用

图 1 为铜绿微囊藻的生长曲线. 从中可知, 对照组的铜绿微囊藻生长情况良好, D_{680} 迅速上升, 8 d 后达到 0.321, 而其余 4 个实验组的铜绿微囊藻明显受到抑制, D_{680} 在前 2 d 有所增加, 但增长速度明显低于对照组, 然后迅速下降, 至第 8 d 时基本检测不到藻细胞的存在, 培养液澄清透明, 藻体基本死亡.

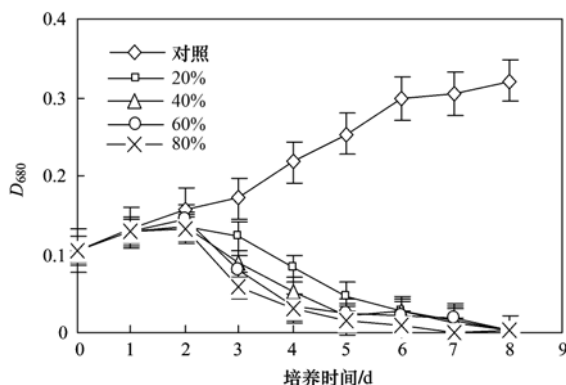


图 1 水网藻种植水对铜绿微囊藻生长的影响

Fig. 1 Effects of liquor cultured with *Hydrodictyon reticulatum* on the growth of *Microcystis aeruginosa*

图 2 是不同浓度的水网藻种植水对铜绿微囊藻的抑制率比较. 各个处理组的抑制率都比较高, 8 d 后平均达到 98.9%. 80% 浓度的种植水对铜绿微囊

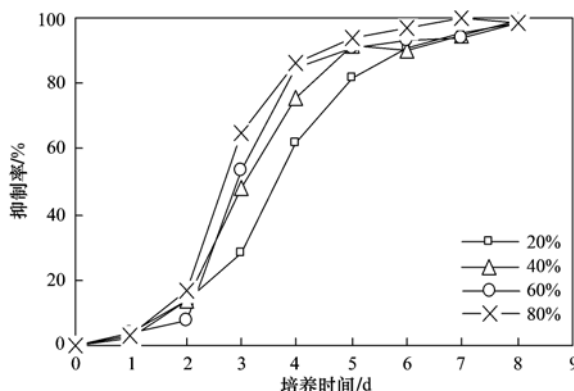


图 2 水网藻种植水对铜绿微囊藻的抑制率

Fig. 2 Inhibition rate of liquor cultured with *Hydrodictyon reticulatum* on *Microcystis aeruginosa*

藻的抑制率最高, 在第 7 d 达到 100%.

实验结果表明, 水网藻种植水对铜绿微囊藻有较强的抑制作用, 证明水网藻种植水中含有某种能够抑制铜绿微囊藻生长的物质. 4 个实验组中 80% 浓度的种植水对铜绿微囊藻的抑制作用最强, 藻细胞在第 6 d 时全部死亡, 其余 3 组的抑藻能力都比较强. 李磊等^[20]研究了荷花和睡莲种植水对铜绿微囊藻的抑制作用, 表现为明显的“低促高抑”现象, 其原因可能是低浓度的化感物质能改变细胞膜的通透性, 使藻体对溶液中营养物质的吸收能力更强, 但是当化感物质浓度超过某一阈值时, 细胞膜受到破坏, 藻体死亡^[21]. 而本实验并未出现这种现象, 这可能是由于水网藻对铜绿微囊藻的抑制作用非常强, 20% 浓度的种植水也足以完全抑制铜绿微囊藻的生长.

2.2 水网藻种植水对铜绿微囊藻光合系统的影响

图 3 为水网藻种植水对铜绿微囊藻叶绿素 a 含量的影响, 其变化规律与藻细胞数量变化曲线基本一致. 从中可见, 对照组中的叶绿素 a 浓度呈直线上升趋势, 8 d 内从 $358.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 增加到 $1265.7 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 表明铜绿微囊藻生长情况良好. 而 20%、40%、60%、80% 浓度 4 个实验组的叶绿素 a 含量在实验开始 2 d 内有所增加, 然后开始下降, 随着铜绿微囊藻生物量的减少, 叶绿素 a 浓度降到一个极低值, 藻细胞基本死亡.

藻体中叶绿素 a 是大部分藻类的主要光合色素, 其含量往往与藻细胞生长状态和光合作用密切相关, 可据此判断出水体的初级生产力情况, 在监测中可将叶绿素 a 含量作为其光合作用潜力的一种指标^[20, 22]. 由图 1 和图 2 结合可知, 叶绿素 a 含量的变化情况与铜绿微囊藻生物量的变化情况基本一

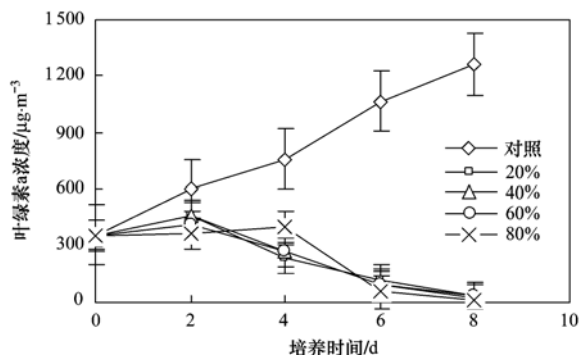


图3 水网藻种植水对铜绿微囊藻叶绿素 a 的影响

Fig. 3 Effects of liquor cultured with *Hydrodictyon reticulatum* on the chlorophyll a content of *Microcystis aeruginosa*

致,随着铜绿微囊藻生物量降低而降低。叶绿素 a 含量的降低一方面是由于藻细胞的减少,另外也可能与水网藻种植水中的化学物质阻碍铜绿微囊藻叶绿素 a 的合成或者加速叶绿素 a 的降解有关^[23]。

2.3 水网藻种植水对铜绿微囊藻抗氧化体系酶活性的影响

2.3.1 种植水对 SOD 活性的影响

图 4 为在不同浓度水网藻种植水的作用下铜绿微囊藻 SOD 活性随时间的变化曲线,对照组的 SOD 活性变化不大,由 $475 \text{ U} \cdot \text{mg}^{-1}$ 缓慢增加到 $631 \text{ U} \cdot \text{mg}^{-1}$,表明藻细胞几乎没有受到逆境伤害,而这种缓慢增长是由于藻细胞数量的增加也会相应地引起 SOD 活性的增长。其余 4 个不同浓度实验组铜绿微囊藻的 SOD 活性在实验初始阶段迅速上升,第 2 d 达到一个峰值,并都要高于对照组的 SOD 活性,这个峰值与水网藻种植水浓度呈负相关,20% 浓度实验组的 SOD 活性最高,达到 $897 \text{ U} \cdot \text{mg}^{-1}$ 。然后各组 SOD 迅速下降,这与藻细胞数量开始下降的时间相一致,至第 8 d 都降到 $50 \text{ U} \cdot \text{mg}^{-1}$ 以下。

2.3.2 种植水对 CAT 活性的影响

如图 5 所示,对照组的藻类 CAT 活性波动不

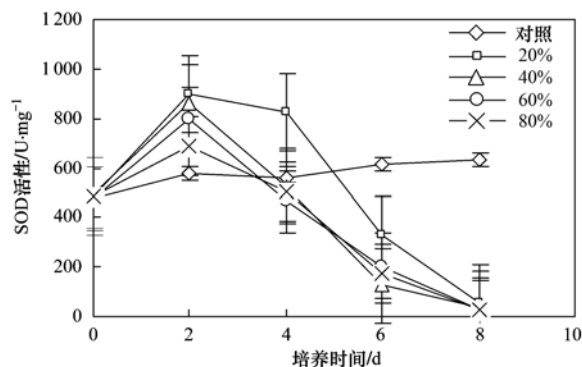


图4 水网藻种植水对铜绿微囊藻 SOD 活性的影响

Fig. 4 Effects of liquor cultured with *Hydrodictyon reticulatum* on SOD activity of *Microcystis aeruginosa*

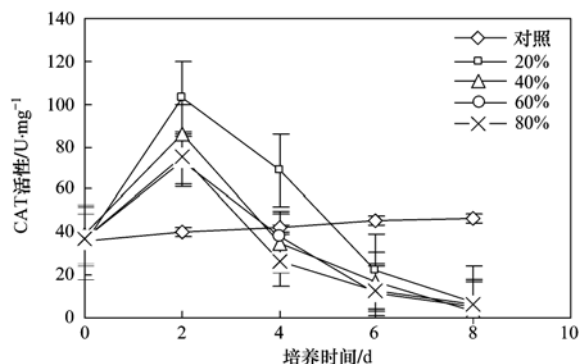


图5 水网藻种植水对铜绿微囊藻 CAT 活性的影响

Fig. 5 Effects of liquor cultured with *Hydrodictyon reticulatum* on CAT activity of *Microcystis aeruginosa*

大,而实验组的藻类 CAT 活性先增高后降低,第 2 d 藻类 CAT 活性平均为对照组的 2 倍。其下降速率与水网藻种植水浓度有关,至实验结束时 CAT 平均活性仅为 $5 \text{ U} \cdot \text{mg}^{-1}$ 。

2.3.3 种植水对 POD 活性的影响

图 6 为水网藻种植水对铜绿微囊藻 POD 活性的影响,与对 SOD、CAT 活性的影响规律相类似。对照组的 POD 活性维持在 $54 \text{ U} \cdot \text{mg}^{-1}$ 左右,20% 浓度的 POD 活性在第 2 d 为对照组的 2.8 倍,然后迅速降低,至实验结束时 CAT 平均活性仅为 $4 \text{ U} \cdot \text{mg}^{-1}$,此时铜绿微囊藻细胞数量基本为 0。

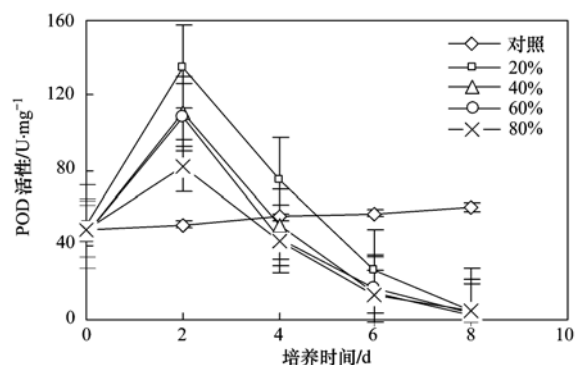


图6 水网藻种植水对铜绿微囊藻 POD 活性的影响

Fig. 6 Effects of liquor cultured with *Hydrodictyon reticulatum* on POD activity of *Microcystis aeruginosa*

由于植物器官衰老或在逆境下受到伤害,其体内的活性氧如超氧阴离子自由基 (O_2^-)、过氧化氢 (H_2O_2)、氢氧自由基 ($\cdot\text{OH}$)、单线态氧 ($^1\text{O}_2$) 的产量增加,这些自由基能阻碍叶绿素的合成,促使发生膜脂质过氧化反应,破坏细胞膜结构,增加膜透性,并且能与细胞中许多生物大分子发生反应,影响多种反应的进行,使得细胞代谢失调,阻碍细胞的正常生长和繁殖,严重时导致细胞死亡。生物在进化过程中形成了一套完整的抵抗外界不良因素的抗氧化酶

系统(SOD、CAT、POD、APX、GR等),在一定范围内能够消除细胞内多余的自由基,从而起到保护细胞的作用^[7].在本研究中,各个处理组的抗氧化酶活性在实验初始阶段都有一个突增,并远远大于藻细胞的正常水平,这表明在水网藻种植水的作用下,藻细胞中活性氧开始增加,相应地刺激抗氧化酶活性升高,以保证活性氧的产生和清除达到动态平衡,此时活性氧的浓度处于正常水平,而当活性氧的产生速率大于抗氧化酶活性的增加速率时,酶活性达到极限,平衡被打破,活性氧开始积累,使得细胞膜和许多生物大分子受到损伤,同时抗氧化酶系统遭到破坏,酶活性迅速降低,藻细胞数量开始下降.另外,比较不同浓度实验组抗氧化酶活性达到的峰值可知,水网藻种植水浓度与酶活性的峰值呈反比,说明水网藻种植水能够降低藻细胞抗氧化酶活性的极值,这就加快了活性氧的积累,使得藻细胞迅速死亡.由此可见,水网藻种植水抑制铜绿微囊藻生长主要是从刺激藻细胞产生大量活性氧和降低藻细胞抗氧化酶活性这两个方面实现的. Li等^[8]证明了从芦苇中提取的化感物质EMA在高浓度下能降低蛋白核小球藻和铜绿微囊藻的SOD和POD活性.张庭廷等^[24]发现在实验初始阶段对羟基苯甲酸和阿魏酸能够刺激水华鱼腥藻SOD活性升高,但后期活性氧开始积累,导致发生膜脂质过氧化反应. Wu等^[25]发现竹叶眼子菜能刺激低初始浓度斜生栅藻的SOD、CAT、POD、APA活性增加.

2.4 水网藻种植水的热不稳定性

经高温处理后的水网藻种植水的抑藻能力如图7所示,高温处理组的 D_{680} 持续上升,到第8d增长到0.341,与空白组铜绿微囊藻的生长速度相当,而对照的 D_{680} 第8d时仅为0.006,这表明水网藻种植水中的抑藻物质大部分是热不稳定物质,高温加热

容易导致其分解,所以抑藻能力基本丧失,证明水网藻种植水的抑藻物质具有热不稳定性.李磊等^[20]研究了采用不同灭菌方法(高温灭菌和0.45 μm 微滤膜过滤)对荷花和睡莲种植水抑藻效果的影响,结果表明高温灭菌后两种植物种植水对铜绿微囊藻已基本没有抑制作用,而用0.45 μm 微滤膜过滤的种植水抑藻效果明显,说明荷花和睡莲的分泌物中也含有热不稳定物质.

3 结论

水网藻种植水对铜绿微囊藻有较强的抑制作用,证明种植水中含有某种高效的抑藻物质.水网藻种植水能够破坏铜绿微囊藻的叶绿素a,诱导活性氧产生从而刺激SOD、CAT、POD活性升高,同时还能降低铜绿微囊藻的抗氧化酶活性.另外,水网藻种植水中的抑藻物质具有热不稳定性.

参考文献:

- [1] Vasconcelos V M, Pereira E. Cyanobacteria diversity and toxicity in a wastewater treatment plant (Portugal) [J]. Water Research, 2001, **35**(5): 1354-1357.
- [2] Veldhuis M J W, Wassmann P. Bloom dynamics and biological control of a high biomass HAB species in European coastal waters: a phaeocystis case study [J]. Harmful Algae, 2005, **4**(5): 805-809.
- [3] 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.
- [4] Fitter A. Making allelopathy respectable [J]. Science, 2003, **301**(5638): 1337-1338.
- [5] Jin Z H, Zhuang Y Y, Dai S G, et al. Isolation and identification of extracts of *Eichhornia crassipes* and their allelopathic effects on algae [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2003, **71**(5): 1048-1052.
- [6] Nakai S, Inoue Y, Hosomi M, et al. *Myriophyllum spicatum*-released allelopathic polyphenols inhibiting growth of blue-green algae *Microcystis aeruginosa* [J]. Water Research, 2000, **34**(11): 3026-3032.
- [7] 李锋民, 胡洪营, 门玉洁, 等. 化感物质对小球藻抗氧化体系酶活性的影响 [J]. 环境科学, 2006, **27**(10): 2091-2094.
- [8] Li F M, Hu H Y. Isolation and characterization of a novel antialgal allelochemical from *Phragmites communis* [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2005, **71**(11): 6545-6553.
- [9] Nakai S, Inoue Y, Hosomi M, et al. Growth inhibition of blue-green algae by allelopathic effects of macrophytes [J]. Water Science & Technology, 1999, **39**(8): 47-53.
- [10] Nakai S, Yamada S, Hosomi M. Anti-cyanobacterial fatty acids released from *Myriophyllum spicatum* [J]. Hydrobiologia, 2005, **543**(1): 71-78.
- [11] Gross E M, Erhard D, Iványi E. Allelopathic activity of *Ceratophyllum demersum* L. and *Najas marina* ssp. *intermedia*

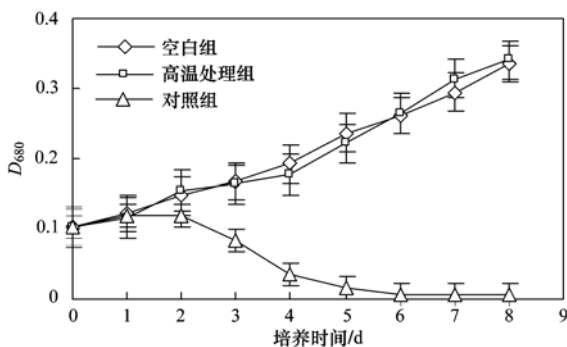


图7 经高温处理后的水网藻种植水(80%)对铜绿微囊藻生长的影响

Fig. 7 Effects of liquor cultured with *Hydrodictyon reticulatum* (80%) placed for 10 d on the growth of *Microcystis aeruginosa*

- (Wolfgang) Casper[J]. *Hydrobiologia*, 2003, **506-509**(1-3): 583-589.
- [12] 肖溪, 楼莉萍, 李华, 等. 沉水植物化感作用控藻能力评述[J]. *应用生态学报*, 2009, **20**(3): 705-712.
- [13] 陈卫民, 张清敏, 戴树桂. 苦草与铜绿微囊藻的相互化感作用[J]. *中国环境科学*, 2009, **29**(2): 147-151.
- [14] Dziga D, Suda M, Bialczyk J, *et al.* The alteration of *Microcystis aeruginosa* biomass and dissolved Microcystin-LR concentration following exposure to plant-producing phenols[J]. *Environmental Toxicology*, 2007, **22**(4): 341-346.
- [15] Wu C, Chang X X, Dong H J, *et al.* Allelopathic inhibitory effect of *Myriophyllum aquaticum* (Vell.) Verdc. on *Microcystis aeruginosa* and its physiological mechanism[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(6): 2595-2603.
- [16] 赵坤, 傅海燕, 柴天, 等. 水网藻对铜绿微囊藻的化感作用及对氮磷去除能力研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(8): 2267-2272.
- [17] 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.
- [18] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2002. 119-129.
- [19] 李锋民, 胡洪营. 大型水生植物浸出液对藻类的化感抑制作用[J]. *中国给水排水*, 2004, **20**(11): 18-21.
- [20] 李磊, 侯文华. 荷花和睡莲种植水对铜绿微囊藻生长的抑制作用研究[J]. *环境科学*, 2007, **28**(10): 2180-2186.
- [21] Allen R D. Dissection of oxidative stress tolerance using transgenic plants[J]. *Plant Physiology*, 1995, **107**(4): 1049-1054.
- [22] 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.
- [23] 张庭廷, 郑春艳, 何梅, 等. 亚油酸对铜绿微囊藻的抑制机理[J]. *中国环境科学*, 2009, **29**(4): 419-424.
- [24] 张庭廷, 吴安平, 何梅, 等. 酚酸类物质对水华藻类的化感作用及其机理[J]. *中国环境科学*, 2007, **27**(4): 472-476.
- [25] Wu Z B, Deng P, Wu X H, *et al.* Allelopathic effects of the submerged macrophyte *Potamogeton malaianus* on *Scenedesmus obliquus*[J]. *Hydrobiologia*, 2007, **592**(1): 465-474.

CONTENTS

Using Look-up Table Method in the Simulation of Regional Atmospheric Environment	XIE Min, WANG Ti-jian, JIANG Fei, <i>et al.</i> (1409)
Applications of Pollutants Released from Crop Residues at Open Burning in Yangtze River Delta Region in Air Quality Model	SU Ji-feng, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (1418)
Atmospheric Dry Deposition Flux and Sources of Monocarboxylic Acids in Beijing and Surrounding Cities	XU Xiao-juan, LI Xing-ru, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (1425)
Comparison of Physicochemical Characterization of Shanghai Ambient Ultrafine Particles and Engineered Nano Particles and Their Cytotoxicity	 ZHANG Rui, LÜ Sen-lin, SHANG Yu, <i>et al.</i> (1431)
Element Compositions and Source of PM _{2.5} Aerosols in Qingdao	LI Xiu-zhen, SHENG Li-fang, XU Hua, <i>et al.</i> (1438)
Phthalate Esters Pollution in Household Indoor Air Particles of Tianjin in Winter	WANG Fu-mei, CHEN Li, JIAO Jiao, <i>et al.</i> (1446)
Application of a Resuspension Test Chamber in PM _{2.5} Source Profile Analysis	DUAN Heng-yi, QIAN Ran-ran, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1452)
Distribution and Enrichment of Trace Elements in Coal Combustion Products from Southwestern Guizhou	WEI Xiao-fei, ZHANG Guo-ping, LI Ling, <i>et al.</i> (1457)
Air-Water Surface Greenhouse Gas Flux in Pengxi River at Different Operational Stages of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, GUO Jing-song, LI Zhe, <i>et al.</i> (1463)
Fluxes of Greenhouse Gases from Xiangxi River in Summer and Their Influencing Factors	WANG Liang, XIAO Shang-bin, LIU De-fu, <i>et al.</i> (1471)
Effects of Elevated Ozone Concentration and Soil Moisture on Temperature Sensitivity of Soil Microbial Respiration in a Cropland	CHEN Shu-tao, ZHANG Yong, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1476)
Hydrochemical Characteristics in the Glacier No. 72 of Qinghingtian, Tomur Peak	ZHAO Ai-fang, ZHANG Ming-jun, LI Zhong-qin, <i>et al.</i> (1484)
Mineralization Characteristics of Dissolved Organic Phosphorus in Wudalianchi Lake, China	ZHANG Bin, XI Bei-dou, ZHAO Yue, <i>et al.</i> (1491)
Speciation Distribution of Nitrogen in Sediments of 7 Rivers around Taihu Lake	LU Shao-yong, YUAN Ye, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (1497)
Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Sediments from Shiwuli Stream in Lake Chaohu	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia, <i>et al.</i> (1503)
Surface Water Quality of Beiyun Rivers Basin and the Analysis of Acting Factors for the Recent Ten Years	GUO Jing, JING Hong-wei, LI Jin-xiang, <i>et al.</i> (1511)
Water Quality Impact of Dongjiang River Network Caused by Dongguan Canal Drainage	SUN Lei, MAO Xian-zhong, HUANG Min-min (1519)
Groundwater Pollution Sources Identification and Grading in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (1526)
3D Numerical Simulation of Air Sparging Remediation Process	LI Heng-zhen, HU Li-ming, WANG Jian, <i>et al.</i> (1532)
Numerical Experiment Study on the Algae Suppression Effect of Vertical Hydrodynamic Mixers	ZOU Rui, ZHOU Jing, SUN Yong-jian, <i>et al.</i> (1540)
Microbial Mechanism of Pollutants Removal in New Biological Island Grid	GAO Ming-yu, XIE Hui-jun, WANG Wen-xing (1550)
Effect of Nutrition Level of Phosphorus and Nitrogen on the Metabolism of the Extracellular Organic Matter of <i>Nostoc flagelliforme</i>	QI Fei, LIU Xiao-yuan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1556)
Inhibitory Effects of Liquor Cultured with <i>Hydrodictyon reticulatum</i> on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i>	FU Hai-yan, CHAI Tian, ZHAO Kun, <i>et al.</i> (1564)
Removal and Distribution of Phthalate Acid Esters in <i>Potamogeton crispus</i> L. Microcosm of Haihe River	 CHI Jie, YANG Qing (1570)
Control and Removal of Microcystin Production of <i>Microcystis aeruginosa</i> by Irradiation of Electron Beam	LIU Shu-yu, WU Ming-hong, JIANG Qin-peng (1575)
Source Characteristics Analysis of Discharge and Pollutants in Typical Drainage Ditch of Qingtongxia Irrigation District	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, LUO Liang-guo (1579)
Degradation of TBBPA by Electron Beam Radiolysis	LI Jie, XU Dian-dou, XU Gang, <i>et al.</i> (1587)
Catalytic Ozonation of Ibuprofen in Aqueous Solution by Activated Carbon Made from Sludge and Corn Cob	WANG Hong-juan, QI Fei, FENG Li, <i>et al.</i> (1591)
Effect of High Hydraulic Loading on Intensive Shrimp Aquaculture Wastewater Treatment Performance in Constructed Wetland	LI Huai-zheng, ZHANG Xing-yi, CHEN Wei-bing, <i>et al.</i> (1597)
Factors Influencing the Formation of NDMA During Chloramination Disinfection of Effluent from Biological Nitrogen Removal System for the Treatment of Municipal Sewage	 SHANG Xiao-ling, LI Yong-mei (1604)
Denitrification Using Starch/PCL Blends as Solid Carbon Source	SHEN Zhi-qiang, WU Wei-zhong, YANG Chun-ping, <i>et al.</i> (1609)
Profiles of Zeta Potential and EPS in Granulation Process of Aerobic Sludge	WANG Hao-yu, SU Ben-sheng, HUANG Dan, <i>et al.</i> (1614)
Biosorption Characteristics of f2 Bacteriophage onto Activated Sludge	ZHOU Yu-fen, ZHENG Xiang, LEI Yang, <i>et al.</i> (1621)
Adsorption of Anionic Polyacrylamide on the Surface of Ion Exchange Membranes	DENG Meng-jie, YU Shui-li, SHI Wen-xin, <i>et al.</i> (1625)
Adsorption of Amphoteric Modified Bentonites to Phenol and Its Thermodynamics	LI Ting, MENG Zhao-fu, ZHANG Bin (1632)
Effect of Surfactants on Sorption and Desorption of Benzo[a]pyrene onto Black Carbon	ZHANG Jing-huan, CHEN Chun-rong, ZHANG Wei-hang, <i>et al.</i> (1639)
Isolation and Identification of Bacteria in the Activated Sludge from Four Sewage Treatment Plants in Nanjing City and Its Antibiotic Resistance Analysis	 GE Feng, GUO Kun, ZHOU Guang-can, <i>et al.</i> (1646)
Screening and Characterization of Phenol Degrading Bacteria for the Coking Wastewater Treatment	CHEN Chun, LI Wen-ying, WU Jing-wen, <i>et al.</i> (1652)
Characteristics of 1,4-Dioxane Degradation by <i>Xanthobacter flavus</i> DT8	JIN Xiao-jun, CHEN Dong-zhi, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (1657)
Spatial Quantitative Distribution of Hydrocarbon-Oxidizing Bacteria of Unexploited Oil and Gas Fields	MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, <i>et al.</i> (1663)
Screening and Biological Characteristics of Amphitrophic Methane-Oxidizing Bacteria from Aged-Refuse	ZHAO Tian-tao, XIANG Jin-xin, ZHANG Li-jie, <i>et al.</i> (1670)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from 22 Tributaries and Mainstream in Middle Reaches of Yangtze River	 LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1676)
Pollution Characteristics and Potential Risks of Phenolic Compounds in Schistosomiasis Epidemic Areas	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1682)
Spatial Heterogeneity and Autocorrelation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediment of Minjiang River in Fuzhou City	CHEN Wei-feng, NI Jin-zhi, YANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1687)
Heavy Metals Pollution and Its Potential Ecological Risk of the Sediments in Three Gorges Reservoir During Its Impounding Period	WANG Jian-kang, GAO Bo, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1693)
Investigation on the Distribution and Potential Ecological Risk of Heavy Metal in the Sediments from Typical Electrical Industrial Zone	DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, GUO Ju, <i>et al.</i> (1700)
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Iron and Gold Mine Soil of Miyun Reservoir Upstream	GAO Yan-xin, FENG Jin-guo, TANG Lei, <i>et al.</i> (1707)
Heavy Metal Contamination and Bioavailability in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, YUAN Zhi-zhong, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (1718)
Evaluation of Heavy Metal Pollution in Soils from a Training Ground Based on GIS	LIU Yu-tong, FANG Zhen-dong, YANG Qin, <i>et al.</i> (1725)
Effects of Soil Texture and Water Content on Remediation of SVE on Soils Contaminated by Benzene	LIU Shao-qing, JIANG Lin, YAO Yu-jun, <i>et al.</i> (1731)
Characteristics of DNA Adsorption and Desorption in Montmorillonite, Kaoline and Goethite	WANG Shen-yang, RAO Wei, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (1736)
LNAPL Migration Monitoring in Simulated Sand Aquifer Using Resistivity Method	PAN Yu-ying, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (1744)
Preparation and Characterization of Activated Carbon from Rice Straw Pre-treated by the Subcritical Hydrolysis	DONG Yu, SHEN Zhe-min, LEI Yang-ming, <i>et al.</i> (1753)
Study on Composting of Cyanobacteria Amended with Different N Loss Inhibitor	REN Yun, CUI Chun-hong, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (1760)
Research Progress About Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Contaminated Soil with Immobilized Microorganism Technique	 QIAN Lin-bo, YUAN Miao-xin, CHEN Bao-liang (1767)

《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)

2012年5月15日 33卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 5 May 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人