

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第1期

Vol.34 No.1

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角背景地区秋冬季节大气气态总汞含量特征研究	窦红颖,王书肖,王龙,张磊,郝吉明 (1)
厦门城区大气颗粒物 PM ₁₀ 中有机酸源谱特征分析	杨冰玉,黄星星,郑桢,刘碧莲,吴水平 (8)
兴隆大气气溶胶中水溶性无机离子分析	李杏茹,宋爱利,王英锋,孙颖,刘子锐,王跃思 (15)
气相组分对氨吸收同步脱除模拟烟气 SO ₂ 和 NO _x 的影响	王鸿,朱天乐,王美艳 (21)
麦秸全量还田下太湖地区两种典型水稻土稻季氨挥发特性比较	汪军,王德建,张刚,王远 (27)
单光子/光电子在线质谱实时分析聚氯乙烯热分解/燃烧产物	陈文东,侯可勇,陈平,李芳龙,赵无垠,崔华鹏,花磊,谢园园,李海洋 (34)
碱性活性炭表面特征及其吸附甲烷的研究	张梦竹,李琳,刘俊新,孙永军,李国滨 (39)
夏季黄渤海表层海水中二甲亚砜 (DMSO) 的浓度分布	王敏,张洪海,杨桂朋 (45)
2010年秋季长江口口外海域 CDOM 的三维荧光光谱-平行因子分析	闫丽红,陈学君,苏荣国,韩秀荣,张传松,石晓勇 (51)
基于集合均方根滤波的太湖叶绿素 a 浓度估算与预测	李渊,李云梅,王桥,张卓,郭飞,吕恒,毕坤,黄昌春,郭宇龙 (61)
基于 HJ1A-CCD 数据的高光谱影像重构研究	郭宇龙,李云梅,朱利,徐德强,李渊,檀静,周莉,刘阁 (69)
重庆雪玉洞岩溶地下河地球化学敏感性研究	徐尚全,杨平恒,殷建军,毛海红,王鹏,周小萍 (77)
区域点源和非点源磷入河量计算的二元统计模型	陈丁江,孙嗣畅,贾颖娜,陈佳勃,吕军 (84)
秦淮河典型河段总氮总磷时空变异特征	李跃飞,夏永秋,李晓波,熊正琴,颜晓元 (91)
湘江沉积物铜和汞质量基准的建立及其应用	蒋博峰,桑磊鑫,孙卫玲,郝伟,李丽,邓宝山 (98)
丹江口水库迁建区土壤重金属分布及污染评价	张雷,秦延文,郑丙辉,时瑶,韩超男 (108)
汾河水库周边土壤重金属含量与空间分布	李晋昌,张红,石伟 (116)
黄河下游引黄灌区地下水重金属分布及健康风险评估	张妍,李发东,欧阳竹,赵广帅,李静,柳强 (121)
胶州湾、套子湾及四十里湾表层沉积物中有机氯农药的含量和分布特征	刘艺凯,钟广财,唐建辉,潘晓辉,田崇国,陈颖军 (129)
基于干扰梯度的钦江流域底栖动物完整性指数候选参数筛选	卢东琪,张勇,蔡德所,刘朔孺,陈燕海,王备新 (137)
海洋细菌 <i>Marinobacter adhaerens</i> HY-3 分离鉴定及对中肋骨条藻的化感作用	王洪斌,陈文慧,李信书,李士虎,阎斌伦 (145)
水稻秸秆浸泡液对铜绿微囊藻生理特性的影响	苏文,孔繁翔,于洋,贾育红,张民 (150)
化感物质肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻生长及生理特性的影响	高李李,郭沛涌,苏光明,魏燕芳 (156)
无负压供水模式下管网水力模拟与安全评价分析	王欢欢,刘书明,姜帅,孟凡琳,白璐 (163)
天然有机物的相对分子质量分布及亲疏水性对微滤膜组合工艺中膜污染的影响	胡孟柳,林洁,许光红,董秉直 (169)
不同基质条件下透性处理对脱硫弧菌硫酸盐还原活性的影响	徐慧伟,张旭,李立明,郑光洁,李广贺 (177)
基于零价铁的双金属体系对六氯苯还原脱氯研究	曾宪委,刘建国,聂小琴 (182)
负载型 TiO ₂ 光电催化降解孔雀石绿的动力学研究	张小娜,周少奇,周晓 (188)
污水厂微曝气系统工况下充氧性能测试与分析	吴媛媛,周小红,施汉昌,邱勇 (194)
微气泡及其产生方式对活性污泥混合液性质的影响	刘春,马锦,张磊,张静,张明,吴根 (198)
不同氮浓度冲击对颗粒污泥脱氮过程中 N ₂ O 产生量的影响	韩雪,高大文 (204)
模拟电镀污泥重金属浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响	谢鑫源,孙培德,楼菊青,郭茂新,马王钢 (209)
嗜麦芽窄食单胞菌对铜的吸附特性与离子交换	白洁琼,尹华,叶锦韶,彭辉,唐立楠,何宝燕,李跃鹏 (217)
阴离子表面活性剂改性水滑石吸附硝基苯的特性研究	夏燕,朱润良,陶奇,刘汉阳 (226)
活性氧化铝对水中磷的去除与回收研究	孟文娜,谢杰,吴德意,张振家,孔海南 (231)
北京城区可吸入颗粒物分布与呼吸系统疾病相关分析	杨维,赵文吉,官兆宁,赵文慧,唐涛 (237)
北京市市售鸡蛋和鸭蛋中全氟化合物的污染水平研究	齐彦杰,周珍,史亚利,孟昭福 (244)
北京市场常见淡水食用鱼体内农药残留水平调查及健康风险评估	于志勇,金芬,孙景芳,原盛广,郑蓓,张文婧,安伟,杨敏 (251)
多效应残差法 (MERA) 表征二甲亚砜-农药二元混合物毒性相互作用	霍向晨,刘树深,张晶,张瑾 (257)
利用 DGGE-菌落原位杂交法分离土壤中精喹禾灵降解菌	吕欣,彭霞薇,呼庆,马安周,江泽平,魏远 (263)
不同白腐真菌复配方式对产酶的影响	孟瑶,梁红,高大文 (271)
不同施肥措施对土壤活性有机碳的影响	张瑞,张贵龙,姬艳艳,李刚,常泓,杨殿林 (277)
垦殖对湿地土壤有机碳垂直分布及可溶性有机碳截留的影响	霍莉莉,邹元春,郭佳伟,吕宪国 (283)
黄河三角洲碱蓬湿地土壤有机碳及其组分分布特征	董洪芳,于君宝,管博 (288)
丘陵林地土壤酸化改良剂的集中施用-自然扩散修复技术研究	方熊,刘菊秀,尹光彩,赵亮,刘世忠,褚国伟,李义勇 (293)
重度滴滴涕污染土壤低温等离子体修复条件优化研究	陈海红,骆永明,滕应,刘五星,潘澄,李振高,贾玉娟 (302)
无定形 Fe(OH) ₃ 和 Fe ₃ O ₄ 共沉淀态 As 的化学提取	陈义萍,王少峰,黄永峰 (308)
铝和锰对外生菌根真菌生长、养分吸收及分泌作用的影响	李华,黄建国,袁玲 (315)
污泥和餐厨垃圾联合干法中温厌氧消化性能研究	段妮娜,董滨,李江华,戴翎翎,戴晓虎 (321)
高比表面生物质炭的制备、表征及吸附性能	李坤权,李焯,郑正,桑大志 (328)
基于情景分析的浙江沿海地区环境污染防治战略研究	田金平,陈吕军,杜鹏飞,钱易 (336)
微生物全细胞传感器在重金属生物可利用度监测中的研究进展	侯启会,马安周,庄绪亮,庄国强 (347)
2012 城市生态学术研讨会会议论文	
北京市城乡环境梯度下街尘中重金属污染特征	何小艳,顾培,李叙勇,赵洪涛 (357)
北京市道路灰尘中污染物含量沿城乡梯度、道路密度梯度的变化特征	唐荣莉,马克明,张育新,毛齐正 (364)
北京城市典型下垫面降雨径流污染初始冲刷效应分析	任玉芬,王效科,欧阳志云,侯培强 (373)
洋河流域张家口段河流水质演化及驱动因子分析	虎博,王铁宇,吕永龙,吕立云,罗维 (379)
低碳交通电动汽车减排潜力及其影响因素分析	施晓清,李笑诺,杨建新 (385)
北京市社区生活垃圾分类收集实效调查及其长效管理机制研究	邓俊,徐琬莹,周传斌 (395)
人工湿地在应用中存在的问题及解决措施	黄锦楼,陈琴,许连煌 (401)
《环境科学》征订启事 (26)	《环境科学》征稿简则 (68)
信息 (76,144,301,400)	专辑征稿通知 (394)

水稻秸秆浸泡液对铜绿微囊藻生理特性的影响

苏文^{1,2}, 孔繁翔^{1*}, 于洋¹, 贾育红^{1,2}, 张民¹

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 室内利用流式细胞仪对暴露于不同浓度水稻秸秆浸泡液下铜绿微囊藻的细胞生长、细胞膜完整性、膜电位、酯酶活性进行了为期 15 d 的检测, 研究了水稻秸秆浸泡液对铜绿微囊藻生理特性的影响。结果发现, 浸泡 5 d 的水稻秸秆液可以抑制藻的生长, 呈明显的浓度抑制型变化; PI 荧光检测显示暴露于浸泡液各组细胞 (>98%) 的细胞膜保持高度完整; FDA 荧光检测显示与对照组相比, 第 1、4 d 处理组酯酶活性增强和减小的细胞都有增加, 但活性下降的细胞数量明显多于活性增强的细胞, 第 7 d 酯酶活性下降的细胞数量明显增加, 而增强的细胞数量基本不变, 第 10、15 d 酯酶活性正常的细胞数量增加显著, 而酯酶活性下降的细胞数量明显减少, 增强的细胞变化幅度较小; DiOC6(3) 荧光检测显示膜电位在前 7 d 变化显著, 第 10、15 d 变化程度减弱, 与酯酶活性变化趋势一致。分析表明, 浸泡液存在促进和抑制藻细胞生长的两种作用, 抑制作用占据优势, 随着暴露时间延长, 促进作用消失, 抑制作用有所下滑, 浸泡液对藻细胞生长具有抑制性而非致死性的作用。

关键词: 秸秆; 流式细胞仪; 铜绿微囊藻; 光合作用; 酯酶活性

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)01-0150-06

Effects of the Rice Straw on *Microcystis aeruginosa* Analyzed by Different Physiological Parameters

SU Wen^{1,2}, KONG Fan-xiang¹, YU Yang¹, JIA Yu-hong^{1,2}, ZHANG Min¹

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The growth and physiology of bloom-forming cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* were determined by the flow cytometry when exposed to rice straw extract for 15 d. The cell growth, cell integrity, mitochondrial transmembrane potential, and esterase activity were used to evaluate the physiological response in *Microcystis aeruginosa*. Rice straw extract stored for 5 days significantly inhibited the growth of *Microcystis aeruginosa* in a concentration-dependent way; Most of the algae cells (>98%) remained complete membranes in all the concentration treatments; Compared with the control cultures, the rice straw induced both negative and positive effects on the esterase activity for each test within 4 days, while the inhibition exceeded the stimulation effect. After a 7 d exposure, only the inhibition effect was found. Neither the inhibited nor stimulated effects was observed after algae exposure from 10 d to 15 d. Evident changes was found in the membrane potential during 7 d experiment, whereas inhibition effect became weaker after 10 d and 15 d exposure, in consistent with the result of esterase activity. These results confirmed that the rice straw extract might provide both dominant inhibition and relatively weak stimulation effects. After a long time exposure, inhibition effect became limited while stimulation effect disappeared. The action of rice straw may be algistatic (preventing algal growth) but not algicidal (killing algae).

Key words: rice straw; flow cytometry; *Microcystis aeruginosa*; photosynthesis; esterase activity

近年来大量的营养盐通过各种途径进入水体, 引起藻类的过度生长, 形成藻类水华, 造成水质的恶化, 某些产毒藻类危害水生动物及人体健康^[1]。因此, 有效控制富营养化水体中的藻类, 防止水华发生成为目前环境领域的研究热点和前沿^[2]。

化感作用 (Allelopathy) 是 1937 年 Molisch 首次提出并定义为某种植物 (包含微生物) 生成的化学物质, 对其他植物产生某种作用的现象^[3]。目前, 植物化感作用被认为是一种新型的生物抑藻技术, 具有高效、经济、生态学风险小等特点, 近年来备受国内外关注^[4,5]。80 年代以后, 随着对化感作用等相关研究的深入, 利用农作物秸秆 (大麦、水稻等) 进行抑藻的方法逐步得到了应用。我

国水稻种植面积广、品种多, 以稻秆抑藻机制为基础, 建立科学的水体生态调控体系, 具有潜在的实用价值。

目前, 国内外已有学者开展了水稻对淡水藻个体及其群体生长抑制作用的研究, Park 等^[6]采用水稻秸秆甲醇提取物抑制铜绿微囊藻生长, 表明甲醇提取物即使很低的浓度下 (0.01 mg·L⁻¹) 也可以强烈抑制藻类生长。Park 等^[7]利用稻壳中提取的单体

收稿日期: 2012-03-20; 修订日期: 2012-06-19

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07103-002, 2009ZX07106-005-006); 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2008CB418000)

作者简介: 苏文 (1985 ~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为湖泊生物生态学, E-mail: soonhai@126.com

* 通讯联系人, E-mail: fukong@niglas.ac.cn

抑制铜绿微囊藻个体及群体生长,发现稻壳内存在强烈抑制藻单体及群体生长的物质。同时, Park 等^[8]利用稻壳提取物对蓝藻、绿藻和浮游动物进行实验,发现蓝藻对其提取物最敏感,绿藻次之,提取物对浮游动物的影响很小。国内学者在水稻秸秆抑藻的化学作用和生物作用进行了诸多探究,证实了水稻秸秆可以抑制蓝藻、球形棕囊藻等藻类的生长^[9~11]。万宏等^[12]和吴小平等^[13]的研究表明细菌存在是水稻秸秆抑藻所必需的,但是张余霞等^[9]发现当水稻秸秆(以干重计)浓度不小于 $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,无论细菌存在与否,稻秆均可强烈抑制藻生长。近年来,杨维东等^[10]和冯菁等^[14]研究表明水稻秸秆对藻抑制作用受细菌,有氧无氧,降解时间的综合作用影响。虽然水稻对藻生长的抑制作用已经引起人们关注,但国内外学者对水稻秸秆控藻的研究存在 2 个问题:①大部分实验为短期暴露实验(4~7 d),不能长时间反映稻秆抑藻效果^[6, 10, 14];②水稻稻秆抑藻机制研究甚少。

本研究以江苏水稻主栽品种武育梗为实验材料,将其浸泡液作用于铜绿微囊藻,实验进行 15 d,运用流式细胞仪(flow cytometry, FCM)对铜绿微囊藻的生长、细胞膜完整性、酯酶活性、膜电位进行检测,分析了稻秆的抑藻机制,以期对稻秆控藻的应用提供理论依据与实际指导。

1 材料与方法

1.1 材料

水稻秸秆用去离子水清洗 3~5 次,33℃ 下干燥 5 d,剪成 2 cm 长的小段,粉碎,过 40 目筛。取 20 g 粉碎的稻秆,分别浸泡于装有 400 mL 无菌水的 1 L 锥形瓶中。密封在 25℃ 的人工气候箱放置 5 d 后,稻秆浸泡液过 GF/C 膜用于抑藻实验。

1.2 藻种及培养

藻种铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)由中国科学院武汉水生生物研究所提供,用 BG-11 培养基^[15]于光照培养箱中培养。培养条件为:光强 $40 \mu\text{E} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$,温度 25℃,光暗比 12 h:12 h,每天定时摇晃 3 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(0.5 、 2 、 4 、 8 、 $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$),在 100 mL 锥形瓶内加入 35 mL BG11 培养基,高温灭菌后接种处于对数生长期的藻。据 OECD 标准,在进行藻类毒性实验时,藻的初始密度多设定为 $10^4 \sim 10^5 \text{ cell} \cdot \text{mL}^{-1}$ ^[16],本研

究接种藻浓度为 $1.6 \times 10^5 \text{ cell} \cdot \text{mL}^{-1}$,抑藻实验体系均用灭菌去离子水定容到 50 mL,对照不加浸泡液,每个浓度梯度 3 个平行样,设置 5 个空白对照,培养 3 d 后加入不同浓度的稻秆浸泡液。分别于实验第 1、4、7、10、15 d 取样,过 300 目滤膜后,分别加入表征细胞膜完整性染料 PI(Sigma, P-4170)^[17],表征膜电位染料 DIOC6(3)(Sigma)^[18]和表征细胞膜选择透过性染料 FDA(Sigma, F-7378)^[19,20],加入各染料的浓度为 10 、 25 、 $15 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,对应的 25℃ 暗室温育时间为 15、8、15 min。温育后的样品,立即使用流式细胞仪进行测定。

1.4 仪器分析

应用 FACS Vantage SE 流式细胞仪(Becton Dickinson)进行样品的测定,激光器为 Coherent 水冷氙离子激光器,激发的波长为 488 nm。FL2 通道处收集 PI 荧光,荧光检测波长为 560~590 nm,FL1 通道处收集 FDA 和 DIOC6(3)荧光,荧光检测波长为 530~560 nm。每个样品检测细胞 10 000 个,检测到的数据用 WinMDI 软件分析^[20]。

1.5 统计分析

采用 SPSS 16.0 软件包进行统计分析,组间差异利用 one-way analysis of variance (ANOVA)分析, $P < 0.05$ 表示显著性差异, $P < 0.01$ 表示极显著性差异。

2 结果与讨论

2.1 水稻秸秆对铜绿微囊藻生长的抑制作用

采用不同浓度的水稻秸秆浸泡液处理铜绿微囊藻,对藻的生长进行了 15 d 的监测。用细胞密度相对对照组百分比表征暴露于 0.5 、 2.0 、 4.0 、 8.0 和 $10.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度下的水稻秸秆浸泡液对铜绿微囊藻的抑制作用(图 1)。结果发现,处理组的藻从第 1 d 开始,其生长就受明显抑制,第 15 d 时高浓度处理组($8.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $10.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)抑藻效果仍可高达 60% 左右,与对照相比具有极显著差异($P < 0.01$),有别于相关学者的研究结果^[9, 11]。Choe 等^[21]研究发现, $0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的水稻秸秆可促进铜绿微囊藻生长。Xiao 等^[22]观察到,第 1 d 时,低浓度的大麦秆提取液能促进铜绿微囊藻的生长。造成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、浸泡液浓度等不同有关。例如,芦苇化感物质 2-甲基乙酰乙酸乙酯(EMA)抑制起始密度低羊角月牙藻(*Selenastrum capricornutum*)的生长,但是促进起始密度高羊角

月牙藻的生长^[23].

水稻秸秆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. 第1~7 d,随暴露时间的延长抑制效果增强. 2、4和8 g·L⁻¹处理组藻细胞密度占对照组百分比分别由第1 d的66%、59%、52%下降至第7 d的42%、42%、41%. 第10~15 d时,抑藻效果与前7 d相比有所减弱,2 g·L⁻¹和4 g·L⁻¹处理组占对照组百分比第10 d和第15 d分别为60%、45%和68%、46%. 据此推测稻秆抑藻的物质可能不太稳定,导致时间延长抑藻效果有所下滑,这与张玲等^[24]的研究结果类似. 他们认为未灭菌稻秆的活性物质可能对氧气或微生物敏感,时间越长,抑藻效果越差.

对有抑藻活性的物质,首先需要解决的问题是确定它对藻类生长的作用是抑制性的(抑制藻类生长)还是致死性的(杀死细胞). 本实验利用PI染料大分子,借助流式细胞技术对藻细胞膜完整性进行了检测. 细胞膜完整的藻细胞拒绝PI的进入,只有细胞膜受损的细胞,PI才能进入其内并与核酸物质结合,所以PI荧光强度越强说明细胞膜受损害程度越严重^[19,20]. 实验结果(表1)显示,5个浓度处理组(0.5、2、4、8、10 g·L⁻¹)的铜绿微囊藻在15 d的暴露实验中,PI荧光强度很低,提示藻细胞膜完

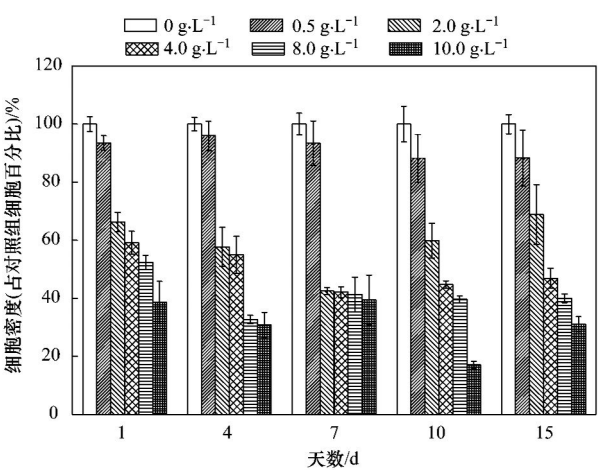


图1 不同浓度水稻秸秆浸泡液对铜绿微囊藻暴露1、4、7、10、15 d后生长的抑制作用

Fig. 1 Inhibition effect on growth of *Microcystis aeruginosa* cells after a 1, 4, 7, 10 and 15 d rice straw exposure

整性未受到影响,大部分细胞保持完整(>98%). 这表明水稻秸秆对铜绿微囊藻的抑制作用是抑制性的而非致死性的,这与大麦秆的研究结果相同^[22,25]. 也有研究表明,利用盐京九号稻秆水提取液作用于铜绿微囊藻,出现了藻细胞黄化沉底现象,表明藻体出现死亡^[9]. 水稻的水生环境不同,抑制浮游藻类的机制可能不同,同时除了所用实验材料不同外,藻细胞自身的生理状态、藻密度都可能影响除藻效果^[26].

表1 铜绿微囊藻暴露1、4、7、10、15 d后细胞膜完整性变化¹⁾

Table 1 Cell membrane integrity of *Microcystis aeruginosa* cells after a 1, 4, 7, 10 and 15 d rice straw exposure

项目	1 d	4 d	7 d	10 d	15 d
对照组	98.86(±0.01)	98.93(±0.02)	98.94(±0.03)	98.96(±0.02)	98.72(±0.01)
0.5 g·L ⁻¹	98.86(±0.02)	98.93(±0.03)	98.94(±0.04)	98.96(±0.05)	98.72(±0.06)
2.0 g·L ⁻¹	98.83(±0.02)	98.96(±0.02)	98.85(±0.03)	98.96(±0.05)	98.61(±0.04)
4.0 g·L ⁻¹	98.85(±0.04)	98.93(±0.05)	98.94(±0.06)	98.91(±0.03)	98.91(±0.05)
8.0 g·L ⁻¹	98.79(±0.01)	98.97(±0.02)	98.97(±0.03)	98.97(±0.02)	98.92(±0.03)
10.0 g·L ⁻¹	98.74(±0.05)	98.96(±0.01)	98.96(±0.02)	98.95(±0.05)	98.89(±0.01)

1)细胞膜完整性以PI未染色细胞占总细胞数的百分比(%)(±SD)表示

大麦秸秆控藻在野外已取得多个成功的实例^[25,27],但是大麦秆产生抑藻作用前需要进行为期3个月的有氧降解^[28,29]. 计算水稻秸秆浸泡液抑制铜绿微囊藻生长的15 d半数抑制浓度(EC₅₀,以干重计,下同)为6.003 g·L⁻¹(表2),而大麦秆降解50 d的浸泡液对铜绿微囊藻15 d EC₅₀为4.3 g·L⁻¹^[22],两者相差不大. 需要说明的是,稻秆只需要进行5 d降解即可产生与大麦秆相似程度的抑制效果,表明在野外控藻应用时,稻秆的前处理比大麦秆简单易行.

表2 铜绿微囊藻细胞生长,酯酶,膜电位在1、4、7、10、15 d的EC₅₀值

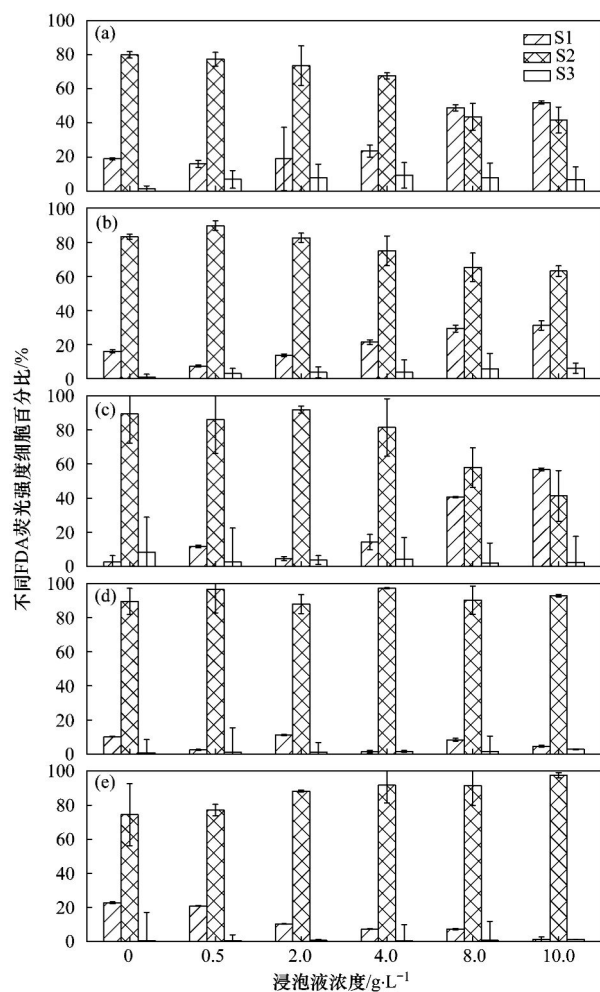
Table 2 Effect of rice straw on cell growth, esterase activity, membrane potential of *Microcystis aeruginosa* cells

项目	EC 50/g·L ⁻¹				
	1 d	4 d	7 d	10 d	15 d
细胞生长	7.64	5.701	7.532	5.348	6.003
酯酶	8.932	16.983	9.357	—	—
膜电位	4.499	6.394	4.052	4.154	6.409

2.2 水稻秸秆抑制铜绿微囊藻生长的生理响应

目前水稻秸秆抑制铜绿微囊生长的机制尚不清

楚,这是限制和影响秸秆野外大范围应用的主要原因^[10]. 利用荧光染料 FDA 和 DIOC6(3) 对暴露于不同浓度水稻秸秆浸泡液的铜绿微囊藻酯酶活性和膜电位进行检测,深入揭示稻杆抑藻的机制,以期填补国内外研究的空白. 酯酶活性作为流式细胞仪检测中敏感的毒理学指标,可以用来反映细胞的新陈代谢活性^[30,31]. 各处理组不同 FDA 荧光强度的细胞百分比分布(图 2)显示,实验第 1 d,所有处理组 S1 区域(酯酶下降)和 S3 区域(酯酶上升)细胞数目明显多于对照组,酯酶下降细胞比例随浸泡液浓度增加而增加. 第 4 d 时,各处理组 S1 和 S3 区域细胞百分比虽然大于对照组,但是低于第 1 d 的细胞百分比. 第 1 d,8、10 g·L⁻¹处理组 S1 区域和 S3 区域细胞百分比分别为 49%、52% 和 8%、7%,都显



左侧 S1 为 FDA 荧光强度减少细胞区,中间 S2 为健康对照细胞区,右侧 S3 为 FDA 荧光强度增加区域

图 2 铜绿微囊藻暴露 1、4、7、10、15 d 后不同 FDA 荧光强度细胞百分比

Fig. 2 Cell percentage under different FDA fluorescence(%) of *Microcystis aeruginosa* cultures after a 1, 4, 7, 10 and 15 d rice straw exposure

著高于对照组(19%, $P < 0.01$; 1%, $P < 0.01$). 第 4 d,8、10 g·L⁻¹处理组 S1 区域和 S3 区域细胞百分比分别为 29%、31% 和 6%、5%,虽然仍高于对照组(16%、1%),但是只有 10 g·L⁻¹处理组 S1 区域和 S3 区域细胞百分比与对照组有显著差异($P < 0.05$),酯酶活性下降和上升的细胞数量明显低于实验第 1 d. 第 7 d 各处理组只有 S1 区域细胞增加, S3 区域细胞不再增加. 第 10~15 d,各处理组藻的酯酶活性不再降低,随着浸泡液处理浓度的升高,正常细胞的数量越来越高. 笔者推测水稻秸秆浸泡液存在抑制和促进藻细胞生长的两种作用,因为抑制作用占据优势,所以前 7 d 细胞生长受到抑制. 浸泡液中的抑制物质可能随着时间延长不稳定^[24],所以第 10~15 d 藻细胞的酯酶活性不再受到抑制. 水稻秸秆中存在促进藻类生长的化学成分在其他研究中也类似发现^[21,22],Park 等^[7]自水稻稻壳中提纯的 10 种单体,有 2 种可促进单体铜绿微囊藻生长. Xiao 等^[22]实验表明大麦秆中也存在对藻的促进作用,不过随着暴露时间延长,这种作用越来越弱. 有些学者认为细胞膜渗透性的改变会影响 FDA 的摄入^[32],进而引起 FDA 的改变,但是细胞膜完整性的结果证明实验第 1、4 和 7 d FDA 的降低与膜渗透性改变无关,这种降低是因为水稻秸秆抑制了铜绿微囊藻酯酶活性造成的,酯酶活性的降低也在藻类生长受到抑制的结果上再次得到证实.

DIOC6(3)是一种带阳离子的荧光染料,由于膜电位内负外正,细胞膜可以选择性的对其进行富集. 当膜电位发生去极化时(膜电位下降),DIOC6(3)荧光强度下降;当膜电位超级化时(膜电位上升),DIOC6(3)荧光强度增强^[33]. 所以 DIOC6(3)荧光强度的变化被用来表征藻细胞中膜电位的变化^[34,35]. 不同暴露时间 DIOC6(3)荧光强度平均值的变化(图 3)显示,第 1 d 低浓度(0.5 g·L⁻¹、2 g·L⁻¹)膜电位分别升至对照组的 1.4 和 1.3 倍,高浓度(4.0、8.0 和 10.0 g·L⁻¹)分别下降至对照组的 40%、18%、16%;第 4 d 膜电位下降,但是高浓度(4.0、8.0 和 10.0 g·L⁻¹)下降至对照组 51%、41%、19%,下降程度弱于第 1 d;第 7 d,2 g·L⁻¹浓度组膜电位升至最高为对照组的 174%,高浓度组(4.0 g·L⁻¹和 8.0 g·L⁻¹)降至最低点,分别为对照组的 22%、17%;说明第 7 d 时膜电位受到水稻秸秆影响发生明显变化,细胞膜的生理功能可能受到严重影响,发生紊乱. 第 10~15 d,膜电位随暴露浓度升高仍在降低,但是随着暴露时间延长,降低程度

减弱,高浓度组(4.0、8.0和10.0 g·L⁻¹)在第15 d时膜电位相当于对照组的42%、39%、39%。结合酯酶活性变化的结果(图2),笔者认为第4 d高浓度组膜电位下降程度减弱可能受部分细胞生长被促进影响,第10~15 d膜电位下降程度的减弱推测是抑藻作用下滑引起的。

目前藻类研究中常用的生理指标为酯酶,而对膜电位的研究较少,表2的结果可以看出:除第4 d外,膜电位 EC₅₀ < 生长 EC₅₀ < 酯酶 EC₅₀。第4 d膜电位 EC₅₀ > 生长 EC₅₀,这可能是部分细胞受到稻秆促进作用引起的。因此笔者认为膜电位也可以敏感地反应藻的生理变化,在研究藻生长的实验中可能是更优于酯酶的毒理学指标。

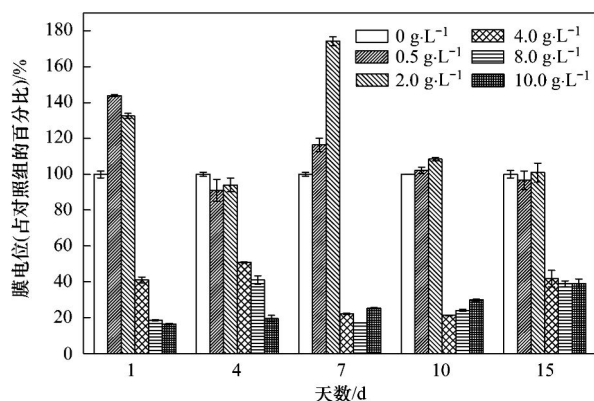


图3 不同暴露时间 DIOC6(3) 荧光强度平均值的变化

Fig. 3 DIOC6(3) mean fluorescence intensity of *M. aeruginosa* exposed to different time

细胞密度变化可直观反映抑藻效果,但不能说明藻类在形态、结构以及生理方面的变化。通过细胞膜完整性、膜电位、酯酶活性的变化分析,可深入理解稻秆浸泡液对铜绿微囊藻的作用机制:显著影响酯酶活性和膜电位(图2、图3),其响应规律与细胞生长状况较为吻合;而对细胞膜完整性基本没有影响(表1)。

3 结论

(1)不同浓度水稻秸秆浸泡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,但是高浓度组在第15 d时的抑制率仍然高达60%以上。

(2)前7 d内,酯酶活性增强和减弱的细胞数量都有所增加,但随藻细胞暴露时间延长,活性增强的细胞数量不再增加,活性被抑制的细胞数量持续显著增加;藻细胞膜电位在低浓度处理组发生超级化,高浓度组发生去极化。秸秆浸泡液对藻类生长

的影响存在促进和抑制两种作用,抑制作用占据优势,同时浸泡液严重影响了藻细胞的膜功能。第10~15 d,酯酶活性和膜电位受到的影响都减弱,与浸泡液对铜绿微囊藻生长抑制作用下降的规律相吻合。15 d的暴露实验中,藻细胞膜完整性未受到影响。生理指标检测结果表明水稻秸秆对铜绿微囊藻生长的作用是抑制性的而非致死性的,建议野外控藻应用时应考虑持续或反复添加。

(3)对比藻细胞生长、酯酶和膜电位的半抑制浓度值,发现膜电位的 EC₅₀ 最小,提示膜电位可以作为检测铜绿微囊藻生理状态的灵敏指标。

致谢:在实验过程中得到了龚伊、阳振、卢亚萍、史小丽、刘凌光、吴松涛、段晓尘、钱梦雨、赵旭辉等人的帮助,并且在论文的写作和修改中得到了姜广甲同学的帮助,在此一并感谢!

参考文献:

- [1] 孔繁翔, 高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. 生态学报, 2005, **25**(3): 589-595.
- [2] 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.
- [3] Molisch H. Der Einfluss einer Pflanze auf die andere Allelopathie; Fischer[M]. 1937.
- [4] 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.
- [5] Vyvyan J R. Allelochemicals as leads for new herbicides and agrochemicals[J]. Tetrahedron, 2002, **58**(9): 1631-1646.
- [6] Park M H, Han M S, Ahn C Y, et al. Growth inhibition of bloom-forming cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* by rice straw extract[J]. Letters in Applied Microbiology, 2006, **43**(3): 307-312.
- [7] Park M H, Chung I M, Ahmad A, et al. Growth inhibition of unicellular and colonial *Microcystis* strains (*Cyanophyceae*) by compounds isolated from rice (*Oryza sativa*) hulls[J]. Aquatic Botany, 2009, **90**(4): 309-314.
- [8] Park M H, Kim B H, Chung I M, et al. Selective bactericidal potential of rice (*Oryza sativa* L. var. *japonica*) hull extract on microcystis strains in comparison with green algae and zooplankton[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2009, **83**(1): 97-101.
- [9] 张余霞, 张玲, 张阳阳, 等. 盐京九号水稻秸秆对铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)的抑制作用[J]. 生态与农村环境学报, 2008, **24**(3): 60-63.
- [10] 杨维东, 高洁, 刘洁生, 等. 稻秆浸泡液化学组分变化对抑制球形棕囊藻(*Phaeocystis globosa*)生长的影响[J]. 生态学报, 2007, **27**(12): 5184-5192.
- [11] 刘洁生, 杨维东, 高洁, 等. 稻、麦秸秆对球形棕囊藻(*Phaeocystis globosa*)生长的抑制作用[J]. 生态学报, 2007, **27**(11): 4498-4505.
- [12] 万宏, 张昀. 降解稻草对蓝藻生长的抑制作用[J]. 北京大

- 学学报(自然科学版), 2000, **36**(4): 485-488.
- [13] 吴小平, 张平静. 发酵稻草抑藻机理研究[J]. 生态环境, 2006, **15**(1): 20-22.
- [14] 冯菁, 朱擎, 吴为中, 等. 稻草浸泡液对藻类抑制作用机制[J]. 环境科学, 2008, **29**(12): 3376-3381.
- [15] Rippka R, Deruelles J, Waterbury J B, *et al.* Generic assignments, strain histories and properties of pure cultures of cyanobacteria[J]. Journal of General Microbiology, 1979, **111**(1): 1-61.
- [16] 欧阳慧灵, 孔祥臻, 何玘霜, 等. Cu^{2+} 对普通小球藻的光合毒性: 初始藻密度的影响[J]. 生态毒理学报, 2011, **6**(5): 499-506.
- [17] 于洋, 孔繁翔, 王美林, 等. 应用流式细胞技术研究铜对藻细胞膜完整性及脂酶活性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2006, **12**(5): 706-709.
- [18] Shapiro H M, Natale P J, Kamensky L A. Estimation of membrane-potentials of individual lymphocytes by flow cytometry[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1979, **76**(11): 5728-5730.
- [19] Yu Y, Kong F X, Wang M L, *et al.* Determination of short-term copper toxicity in a multispecies microalgal population using flow cytometry[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2007, **66**(1): 49-56.
- [20] Zhang M, Kong F X, Wu X D, *et al.* Different photochemical responses of phytoplankters from the large shallow Taihu Lake of subtropical China in relation to light and mixing[J]. Hydrobiologia, 2008, **603**(1): 267-278.
- [21] Choe S, Jung I. Growth inhibition of freshwater algae by ester compounds released from rotted plants[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry-Seoul, 2002, **8**(4): 297-304.
- [22] 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.
- [23] Hong Y, Hu H Y, Li F M. Growth and physiological responses of freshwater green alga *Selenastrum capricornutum* to allelochemical ethyl 2-methyl acetoacetate (EMA) under different initial algal densities[J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2008, **90**(3): 203-212.
- [24] 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.
- [25] Welch I, Barrett P R F, Gibson M T, *et al.* Barley straw as an inhibitor of algal growth I: studies in the Chesterfield Canal[J]. Journal of Applied Phycology, 1990, **2**(3): 231-239.
- [26] 梁耀懋, 赵艳红, 彭懿紫, 等. 水稻化感种质筛选的初步研究[J]. 广西农业生物科学, 2005, **24**(1): 27-29.
- [27] Barrett P R F, Curnow J C, Littlejohn J W. The control of diatom and cyanobacterial blooms in reservoirs using barley straw[J]. Hydrobiologia, 1996, **340**(1-3): 307-311.
- [28] Pillinger J W, Cooper J A, Ridge I. Role of phenolic compounds in the antialgal activity of barley straw[J]. Journal of Chemical Ecology, 1994, **20**(7): 1557-1569.
- [29] Gibson M T, Welch I M, Barrett P R F, *et al.* Barley straw as an inhibitor of algal growth II: laboratory studies[J]. Journal of Applied Phycology, 1990, **2**(3): 241-248.
- [30] Shi X L, Kong F X, Yu Y, *et al.* Survival of *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus obliquus* under dark anaerobic conditions[J]. Marine and Freshwater Research, 2007, **58**(7): 634-639.
- [31] Li J, Ou D, Zheng L, *et al.* Applicability of the fluorescein diacetate assay for metabolic activity measurement of *Microcystis aeruginosa* (Chroococcales, Cyanobacteria) [J]. Phycological Research, 2011, **59**(3): 200-207.
- [32] Rioboo C, O'Connor J E, Prado R, *et al.* Cell proliferation alterations in *Chlorella* cells under stress conditions[J]. Aquatic Toxicology, 2009, **94**(3): 229-237.
- [33] Shapiro H M. Cell membrane potential analysis[J]. Methods in Cell Biology, 1994, **41**: 121-133.
- [34] Varvarigos V, Galatis B, Katsaros C. Radial endoplasmic reticulum arrays co-localize with radial F-actin in polarizing cells of brown algae[J]. European Journal of Phycology, 2007, **42**(3): 253-262.
- [35] Holzinger A, Lütz C, Karsten U. Desiccation stress causes structural and ultrastructural alterations in the aeroterrestrial green alga *Klebsormidium crenulatum* (klebsormidlophyceae, stryphyta) isolated from an alpine soil crust1[J]. Journal of Phycology, 2011, **47**(3): 591-602.

CONTENTS

Characteristics of Total Gaseous Mercury Concentrations at a Rural Site of Yangtze Delta, China	DOU Hong-ying, WANG Shu-xiao, WANG Long, <i>et al.</i> (1)
Compositions of Organic Acids in PM ₁₀ Emission Sources in Xiamen Urban Atmosphere	YANG Bing-yu, HUANG Xing-xing, ZHENG An, <i>et al.</i> (8)
Analysis on Water-soluble Inorganic Ions in the Atmospheric Aerosol of Xinglong	LI Xing-ru, SONG Ai-li, WANG Ying-feng, <i>et al.</i> (15)
Effects of Gaseous Compositions the on Simultaneous Removal of NO _x and SO ₂ from Simulated Flue Gas by Ammonia Absorption	WANG Hong, ZHU Tian-le, WANG Mei-yan (21)
Comparing the Ammonia Volatilization Characteristic of Two Typical Paddy Soil with Total Wheat Straw Returning in Taihu Lake Region	WANG Jun, WANG De-jian, ZHANG Gang, <i>et al.</i> (27)
Real-Time Analysis of Polyvinyl Chloride Thermal Decomposition/Combustion Products with Single Photon Ionization/Photoelectron Ionization Online Mass Spectrometer	CHEN Wen-dong, HOU Ke-yong, CHEN Ping, <i>et al.</i> (34)
Surface Characteristics of Alkali Modified Activated Carbon and the Adsorption Capacity of Methane	ZHANG Meng-zhu, LI Lin, LIU Jun-xin, <i>et al.</i> (39)
Distribution of Dimethylsulfoxide(DMSO) in the Surface Water of the Yellow Sea and the Bohai Sea	WANG Min, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (45)
Resolving Characteristic of CDOM by Excitation-Emission Matrix Spectroscopy Combined with Parallel Factor Analysis in the Seawater of Outer Yangtze Estuary in Autumn in 2010	YAN Li-hong, CHEN Xue-jun, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (51)
Estimation and Forecast of Chlorophyll a Concentration in Taihu Lake Based on Ensemble Square Root Filters	LI Yuan, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (61)
Research of Hyperspectral Reconstruction Based on HJ1A-CCD Data	GUO Yu-long, LI Yun-mei, ZHU Li, <i>et al.</i> (69)
Research on the Sensitivity of Geochemical of Underground River in Chongqing Xueyu Cave	XU Shang-quan, YANG Ping-heng, YIN Jian-jun, <i>et al.</i> (77)
Bivariate Statistical Model for Calculating Phosphorus Input Loads to the River from Point and Nonpoint Sources	CHEN Ding-jiang, SUN Si-yang, JIA Ying-na, <i>et al.</i> (84)
Temporal and Spatial Variations of Total Nitrogen and Total Phosphorus in the Typical Reaches of Qinhuai River	LI Yue-fei, XIA Yong-qiu, LI Xiao-bo, <i>et al.</i> (91)
Derivation and Application of Sediment Quality Criteria of Cd and Hg for the Xiangjiang River	JIANG Bo-feng, SANG Lei-xin, SUN Wei-ling, <i>et al.</i> (98)
Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soil of Relocation Areas from the Danjiangkou Reservoir	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (108)
Concentrations of Soil Heavy Metals and Their Spatial Distribution in the Surrounding Area of Fenhe Reservoir	LI Jin-chang, ZHANG Hong, SHI Wei (116)
Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals of Groundwaters in the Irrigation District of the Lower Reaches of Yellow River	ZHANG Yan, LI Fa-dong, OUYANG Zhu, <i>et al.</i> (121)
Concentrations and Distribution of Organochlorine Pesticides in the Surface Sediments of Jiaozhou Bay, Taozi Bay and Sishili Bay	LIU Yi-kai, ZHONG Guang-cai, TANG Jian-hui, <i>et al.</i> (129)
Choice of Macroinvertebrate Metrics for Constructing a Benthic-Index of Biotic Integrity Based on the Disturbance Gradients in the Qinjiang River Basin	LU Dong-qi, ZHANG Yong, CAI De-suo, <i>et al.</i> (137)
Isolation and Identification of <i>Marinobacter adhaerens</i> HY-3 and Its Allelopathy on <i>Skeletonema costatum</i>	WANG Hong-bin, CHEN Wen-hui, LI Xin-shu, <i>et al.</i> (145)
Effects of the Rice Straw on <i>Microcystis aeruginosa</i> Analyzed by Different Physiological Parameters	SU Wen, KONG Fan-xiang, YU Yang, <i>et al.</i> (150)
Effects of Allelochemicals Ethyl Cinnamate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	GAO Li-li, GUO Pei-yong, SU Guang-ming, <i>et al.</i> (156)
Hydraulic Simulation and Safety Assessment of Secondary Water Supply System with Anti-Negative Pressure Facility	WANG Huan-huan, LIU Shu-ming, JIANG Shuai, <i>et al.</i> (163)
Effect of Relative Molecular Mass Distribution and Hydrophilicity/Hydrophobicity of NOM on Membrane Fouling in MF-combined Process	HU Meng-liu, LIN Jie, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (169)
Effect of Permeabilization on Sulfate Reduction Activity of <i>Desulfovibrio vulgaris</i> Hildenborough Cells in the Presence of Different Electron Donors	XU Hui-wei, ZHANG Xu, LI Li-ming, <i>et al.</i> (177)
Dechlorination of HCB by Bimetals Based on Zero Valent Iron	ZENG Xian-wei, LIU Jian-guo, NIE Xiao-qin (182)
Study on Kinetics of Photoelectrocatalytic Degradation of Supported TiO ₂ on Malachite Green	ZHANG Xiao-na, ZHOU Shao-qi, ZHOU Xiao (188)
Measurement and Analysis of Micropore Aeration System's Oxygenating Ability Under Operation Condition in Waste Water Treatment Plant	WU Yuan-yuan, ZHOU Xiao-hong, SHI Han-chang, <i>et al.</i> (194)
Influence of Microbubble and Its Generation Process on Mixed Liquor Properties of Activated Sludge	LIU Chun, MA Jin, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (198)
Impact of Different Nitrogen Concentrations on the N ₂ O Production in the Denitrification Process of Granular Sludge	HAN Xue, GAO Da-wen (204)
Effect of Simulated Heavy Metal Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	XIE Xin-yuan, SUN Pei-de, LOU Ju-qing, <i>et al.</i> (209)
Characteristic and Ion Exchanges During Cu ²⁺ and Cd ²⁺ Biosorption by <i>Stenotrophomonas maltophilia</i>	BAI Jie-qiong, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (217)
Sorption of Nitrobenzene to Anionic Surfactant Modified Layered Double Hydroxides	XIA Yan, ZHU Run-liang, TAO Qi, <i>et al.</i> (226)
Study on Phosphate Removal and Recovery by Activated Alumina	MENG Wen-na, XIE Jie, WU De-yi, <i>et al.</i> (231)
Spatial Distribution of Inhalable Particulate and Association with Respiratory Disease in Beijing City	YANG Wei, ZHAO Wen-ji, GONG Zhao-ning, <i>et al.</i> (237)
Pollution Levels of Perfluorochemicals in Chicken Eggs and Duck Eggs from the Markets in Beijing	QI Yan-jie, ZHOU Zhen, SHI Ya-li, <i>et al.</i> (244)
Residual Levels of Pesticides in Freshwater Fish from Beijing Aquatic Product Markets and Health Risk Assessment	YU Zhi-yong, JIN Fen, SUN Jing-fang, <i>et al.</i> (251)
Characterizing the Toxicity Interaction of the Binary Mixture Between DMSO and Pesticide by the Multi-Effect Residual Analysis (MERA)	HUO Xiang-chen, LIU Shu-shen, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (257)
Isolation of Quinolizop-p-ethyl-degrading Bacteria from Soil by DGGE-Colony <i>in situ</i> Hybridization	LÜ Xin, PENG Xia-wei, HU Qing, <i>et al.</i> (263)
White-Rot Fungi Combinations Impact on Enzyme Productions	MENG Yao, LIANG Hong, GAO Da-wen (271)
Effects of Different Fertilizer Application on Soil Active Organic Carbon	ZHANG Rui, ZHANG Gui-long, JI Yan-yan, <i>et al.</i> (277)
Effect of Reclamation on the Vertical Distribution of SOC and Retention of DOC	HUO Li-li, ZOU Yuan-chun, GUO Jia-wei, <i>et al.</i> (283)
Distribution Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Composition in <i>Suaeda salsa</i> Wetland in the Yellow River Delta	DONG Hong-fang, YU Jun-bao, GUAN Bo (288)
Study the Restoration Technology of Concentrated Application-Natural Diffusion about Amendments of Acidified Soil of Hilly Woodland	FANG Xiong, LIU Ju-xiu, YIN Guang-cai, <i>et al.</i> (293)
Optimizing Remediation Conditions of Non-thermal Plasma for DDTs Heavily Contaminated Soil	CHEN Hai-hong, LUO Yong-ming, TENG Ying, <i>et al.</i> (302)
Chemical Extraction of Arsenic Co-precipitated with Amorphous Fe(OH) ₃ and Fe ₃ O ₄	CHEN Yi-ping, WANG Shao-feng, JIA Yong-feng (308)
Influence of Aluminum and Manganese on the Growth, Nutrient Uptake and the Efflux by Ectomycorrhizal Fungi	LI Hua, HUANG Jian-guo, YUAN Ling (315)
High-solids Anaerobic Co-digestion of Sludge and Kitchen Garbage Under Mesophilic Conditions	DUAN Ni-na, DONG Bin, LI Jiang-hua, <i>et al.</i> (321)
Preparation, Characterization and Adsorption Performance of High Surface Area Biomass-based Activated Carbons	LI Kun-quan, LI Ye, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (328)
Study on Strategies of Pollution Prevention in Coastal City of Zhejiang Province Based on Scenario Analysis	TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun, DU Peng-fei, <i>et al.</i> (336)
Advance in the Bioavailability Monitoring of Heavy Metal Based on Microbial Whole-cell Sensor	HOU Qi-hui, MA An-zhou, ZHUANG Xiu-liang, <i>et al.</i> (347)
Characteristics of Heavy Metal Contamination in Street Dusts Along the Urban-Rural Gradient Around Beijing	HE Xiao-yan, GU Pei, LI Xu-yong, <i>et al.</i> (357)
Content Trends of Pollutants in Street Dust of Beijing Along the Urban-Rural Gradient and Road Density Gradient	TANG Rong-li, MA Ke-ming, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (364)
Analysis of First Flush Effect of Typical Underlying Surface Runoff in Beijing Urban City	REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (373)
Temporal Variation of Water Quality and Driving Factors in Yanghe Watershed of Zhangjiakou	PANG Bo, WANG Tie-yu, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (379)
Research on Carbon Reduction Potential of Electric Vehicles for Low-Carbon Transportation and Its Influencing Factors	SHI Xiao-qing, LI Xiao-nuo, YANG Jian-xin (385)
Investigation of Waste Classification and Collection Actual Effect and the Study of Long Acting Management in the Community of Beijing	DENG Jun, XU Wan-ying, ZHOU Chuan-bin (395)
Problems and Countermeasures in the Application of Constructed Wetlands	HUANG Jin-lou, CHEN Qin, XU Lian-huang (401)

《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)

2013年1月15日 34卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 1 Jan. 15, 2013

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