

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)

不同白腐真菌复配方式对产酶的影响

孟瑶¹, 梁红^{1*}, 高大文^{1,2}

(1. 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040; 2. 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090)

摘要: 通过对 1 株和由多株白腐真菌复配共同参与下的复合菌产酶量和达到最高酶活所需时间进行比较, 筛选出白腐真菌最佳产酶的复配方式。结果表明, 青顶拟多孔菌和糙皮侧耳菌两株菌相互发生协同作用, 促进漆酶的分泌, 产酶量为 $50.45 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$; 青顶拟多孔菌、糙皮侧耳菌和偏肿拟栓菌这 3 株菌在分泌过程中促进作用大于抑制作用, 产酶量最高为 $75.98 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$; 青顶拟多孔菌、糙皮侧耳菌和血红密孔菌三者相互之间出现拮抗作用, 产酶量最低为 $2.91 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$; 实验证明, 在白腐真菌之间既存在拮抗作用, 也存在协同作用, 因此达到最高酶活所用时间也不同。

关键词: 白腐真菌; 复合菌; 酶; 漆酶; 酶活

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)01-0271-06

White-Rot Fungi Combinations Impact on Enzyme Productions

MENG Yao¹, LIANG Hong¹, GAO Da-wen^{1,2}

(1. School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Water Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: In this study, the maximum laccase (Lac) activities by single white-rot fungus and combining white-rot fungi were investigated. The optimal combinations of white-rot fungi were obtained by comparing the maximum Lac activities and the time of achieving the maximum Lac activity. The results showed that the synergy of white-rot fungi *Polyporellus picipes* and *Pleurotus ostreatus* improved the secretion of the laccase, with the enzyme production of $50.45 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$, as well as the combination of white-rot fungi *Polyporellus picipes*, *Pleurotus ostreatus* and *Pseudotrametes gibbosa* promoted the laccase production of $75.98 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$. However, the combination of white-rot fungi *Polyporellus picipes*, *Pleurotus ostreatus* and *Pycnoporus sanguineus* generated antagonistic effect, with the enzyme production of $2.91 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$. Both synergistic and antagonistic effects among the white-rot fungi results in different time for achieving the maximum Lac activity of white-rot fungi.

Key words: white-rot fungi; combining white-rot fungi; enzyme; laccase; enzyme activities

有机污染物是现代环境的主要污染物, 残留时间久, 危害大。常用的处理方法有物理、化学和生物等^[1~3]。由于微生物修复具有低成本、高效益、无二次污染, 且作用潜力巨大的特点^[4], 近年来, 随着农田污染和水体富营养化污染加剧^[5], 越来越多的国内外研究学者把目光投向微生物修复^[6]。研究表明, 白腐真菌分泌木质素过氧化物酶、锰过氧化物酶和漆酶, 主要分泌漆酶^[7], 漆酶是一种含有铜的多酚氧化酶, 能够以多重基因编码的同工酶形式出现^[8,9], 可催化大量酚类化合物和芳香胺的氧化, 从而降解多种难降解的有机污染物^[10,11]。

前期研究发现, 多种白腐真菌之间复配以及与土壤真菌、细菌、酵母复合后的产酶能力大大提高。有研究将 2 株 *Trichoderma reesei* 进行组合培养^[13]或将 *Trichoderma* sp. ZH1 分别和 *Trametes* sp. AH28-2、*Lentinula edodes*、*Aspergillus niger* 复配^[14~16], 通过菌株之间的相互作用来提高漆酶分泌量, 但其研究的重点主要集中在培养条件的优化方面。Baldrian 等^[17]研究 2 株白腐真菌 *Trametes*

versicolor 和 *Pleurotus ostreatus* 的复合菌与土壤真菌、细菌和酵母接触后, 酶活性显著提高。Chi 等^[18]对 4 种白腐真菌进行复配研究, 发现将 *P. ostreatus* 和 *C. subvermispora* 组合培养, 可以大大提高漆酶酶活, 其对高分子染料的降解效果和白杨木的腐朽速率也较单一菌株好。由于目前缺乏白腐真菌复配的系统研究, 特别是关于东北土著白腐真菌之间复配降解有机污染物的报道较少。因此本研究结合国内外白腐真菌研究报道, 采用东北土著白腐真菌, 选择农业废弃物麸皮作为共代谢底物, 以漆酶为标准, 系统研究确定共代谢降解高分子量多环芳烃的最佳产酶复配方式, 以期充分开发和利用东北地区土著白腐真菌对高分子量多环芳烃进行高效降解提供技术支持。

收稿日期: 2012-03-04; 修订日期: 2012-03-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(21177033)

作者简介: 孟瑶(1986~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境微生物技术。

* 通讯联系人, E-mail: hongliang@nefu.edu.cn

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 菌种来源

实验菌种取自保存于东北林业大学环境微生物实验室的灵芝 *Ganoderma lucidum*、青顶拟多孔菌 *Polyporellus picipes*、彩绒革盖菌 *Coriolus uersicolor*、糙皮侧耳菌 *Pleurotus ostreatus*、偏肿拟栓菌 *Pseudotrametes gibbosa*、血红密孔菌 *Pycnoporus sanguineus*。

1.1.2 液体培养基

固体培养基:土豆 $200 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 葡萄糖 $20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 琼脂 $20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, KH_2PO_4 $3.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, MgSO_4 $1.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 定容至 1L, 自然 pH (用于白腐真菌的扩大培养)。

基础培养基: 麸皮 $20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 氯化铵 $0.44 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, KH_2PO_4 $0.2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, MgSO_4 $0.05 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, CaCl_2 $0.01 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 吐温 80 $1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 无机溶液 $1 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$, 维生素溶液 $0.5 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$, 自然 pH。

无机溶液: $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $3.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, MnSO_4 $0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, NaCl $1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $0.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, CoSO_4 $0.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, CaCl_2 $0.082 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, ZnSO_4 $0.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ $0.01 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2$ $0.01 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, H_3BO_3 $0.01 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, NaMoO_4 $0.01 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

维生素溶液: VB1 $0.005 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, VB2 $0.005 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 生物素 $0.002 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 叶酸 $0.002 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, VB6 $0.01 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 烟酸 $0.005 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

1.1.3 主要试剂与仪器

试剂: 2-甲基萘 (纯度 > 96%), 石油醚分析纯, 称取一定量的 2-甲基萘溶于石油醚, 配制成 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 2-甲基萘石油醚溶液作为降解底物; ABTS[2,2'-连氨基-双-(2-乙基苯异二氢噻唑啉-6-磺酸)] 配制成浓度为 $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 ABTS 溶液; pH = 5 醋酸-醋酸钠缓冲溶液; 去离子水。

仪器: SPX-150B 型生化恒温培养箱 (天津市泰斯特仪器有限公司)、SW-CJ-1D 型单人净化工作台 (苏州净化设备有限公司)、752 型紫外-可见光度计 (上海菁华科技仪器有限公司)、H1650 高速离心机 (长沙湘仪离心机仪器有限公司)、MSX-280 型手提式压力蒸汽消毒器 (北京市永光日月医疗仪器厂)、HZQ-X100 振荡培养箱 (中国哈尔滨市东联电子技术开发有限公司)。

1.2 方法

1.2.1 菌株培养

将斜面上生长的 6 种白腐真菌经培养箱 28°C 活化 3 d 后, 从斜面接种于含固体培养基的平板上培养 7 d 后待用。向 150 mL 锥形瓶中分别加入 1 mL 2-甲基萘石油醚溶液, 放置通风橱中过夜, 待石油醚挥发完毕后取出, 各加入 50 mL 液体培养基, 配制成 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 2-甲基萘的溶液, 灭菌后, 接种菌片, 28°C 、 $120 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 摇床培养。每组样品做 3 个平行, 定时取样测定其酶活。

1.2.2 白腐真菌培养条件

本实验以广泛存在于石油污染中的 2-甲基萘为目标污染物, 以漆酶为考核指标, 筛选单一高产酶菌株, 然后分别对其复配, 测定 2 种和 3 种白腐真菌的复合菌产漆酶的情况, 用打孔器接直径不等的菌片于灭菌后的含有液体培养基的 150 mL 三角瓶中。在 1 种菌的研究中每瓶分别接 3 个直径为 10 mm 的菌片、在 2 种菌的研究中每瓶每种菌分别接一个 10 mm 和一个 5 mm 的菌片、在 3 种菌的研究中每瓶每种菌分别接一个直径为 10 mm 的菌片, 每组样品做 3 个平行, 在 28°C 、 $120 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下摇床培养, 定期取样测定酶活。

生物量的测定参见文献[19]的方法。漆酶活力的测定参见文献[20]的方法。

2 结果与分析

2.1 6 种白腐真菌对系统产酶的影响

在 28°C 、 $120 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下, 摇床培养 6 种白腐真菌, 并定时取样测定酶活。6 种白腐真菌分泌漆酶活性随时间变化先升高, 到最高峰时开始下降, 趋势均一致 (图 1); 灵芝菌在第 6 d 达到酶活峰值 $10.72 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$, 糙皮侧耳菌在第 4 d 达到酶活峰值 $8.01 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$, 青顶拟多孔菌在第 14 d 达到酶活峰值 $24.49 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$, 然而彩绒革盖菌、血红密孔菌、偏肿拟栓菌在第 10 d 分泌漆酶峰值分别为 14.71 、 10.32 、 $20.99 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。产酶量最高的菌株为青顶拟多孔菌。

2.2 2 种白腐真菌复配对系统产酶的影响

2.2.1 对酶活的影响

在 28°C 、 $120 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下, 将筛选得到高产酶菌株青顶拟多孔菌与其他 5 种白腐真菌复配, 测定的复合菌的产酶量。将 2 种白腐真菌复合菌的产酶量分别与 2 种白腐真菌产酶活之和进行比较 (图 2), 2 种白腐真菌复合菌产酶量由高到低依次为青顶拟

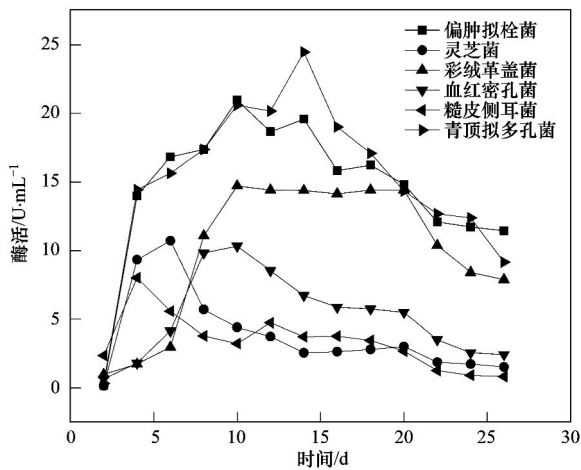


图1 6种白腐真菌酶活曲线

Fig. 1 Lac activity of six white-rot fungi

多孔菌 + 糙皮侧耳菌 ($50.45 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$)、青顶拟多孔菌 + 灵芝菌 ($42.89 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$)、青顶拟多孔菌 + 彩绒革盖菌 ($22.01 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$)、青顶拟多孔菌 + 偏肿拟栓菌 ($16.42 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$)、青顶拟多孔菌 + 血红密孔菌 ($6.16 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$), 可见产酶量最高的复合菌是青顶拟多孔菌 + 糙皮侧耳菌, 筛选出的 2 种白腐真菌复合菌产酶量是单种菌产酶量之和的 1.55 倍。

青顶拟多孔菌 + 灵芝菌、青顶拟多孔菌 + 糙皮侧耳菌的复配均比两者相加 ($35.22 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、 $32.5 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$) 得到的酶活要高, 说明以上两种菌复配可以促进酶活产生, 具有协同作用; 相反, 青顶拟多孔菌 + 偏肿拟栓菌、青顶拟多孔菌 + 血红密孔菌的复配产生的酶活小于两者相加 ($45.48 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、 $34.81 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$) 得到的酶活量, 并且均小于其中任意一种白腐真菌分泌的漆酶活性, 说明青顶拟多孔菌分别和偏肿拟栓菌、血红密孔菌之间相互抑制, 产生拮抗作用。

2.2.2 对达到最高酶活所用时间的影响

6 种白腐真菌每两种复配酶活曲线如图 3, 结合图 1 得出青顶拟多孔菌 + 偏肿拟栓菌和青顶拟多孔菌 + 血红密孔菌在第 8 d 达到最高酶活, 分别比其单种菌提前达到最高酶活; 青顶拟多孔菌 + 灵芝菌在第 10 d 分泌漆酶最多, 比灵芝菌延后 4 d 达到最高漆酶量, 比青顶拟多孔菌提前 4 d 达到最高漆酶量; 青顶拟多孔菌 + 彩绒革盖菌和青顶拟多孔菌 + 糙皮侧耳菌都是在第 20 d 漆酶活性最高, 比其单种菌达到最高酶活所用时间长。

2.3 3 种白腐真菌复配对系统产酶的影响

2.3.1 对酶活的影响

相同条件下, 将筛选得到的产酶量最高的 2 种

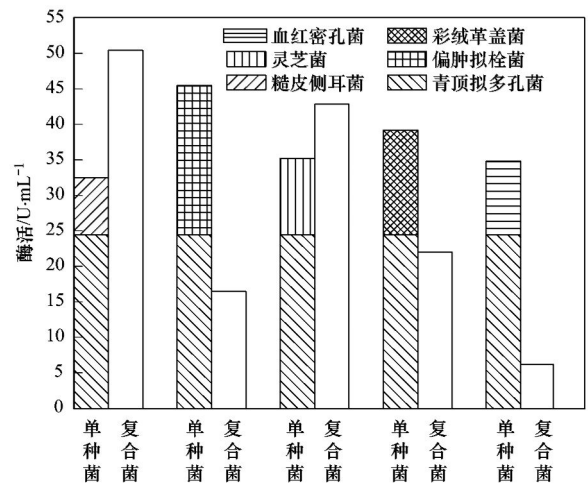


图2 2种白腐真菌复配的最高产酶量与其单种菌的最高产酶量之和比较

Fig. 2 Comparison of the maximum enzyme-production of two white-rot fungi combination and sum of single white-rot fungus

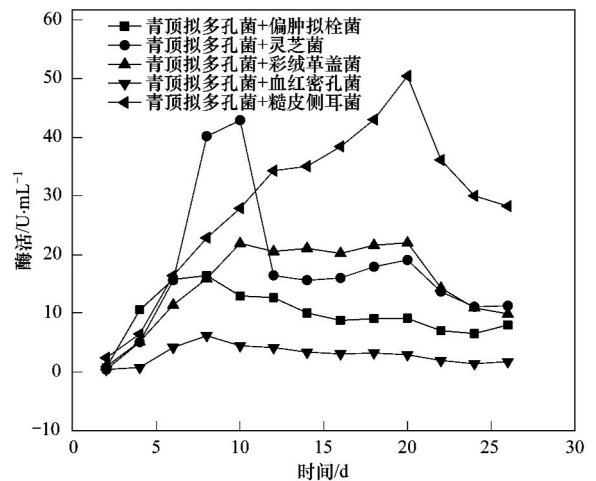


图3 2种白腐真菌复配酶活曲线

Fig. 3 Lac activity of two white-rot fungi combination

白腐真菌复合菌: 青顶拟多孔菌 + 糙皮侧耳菌与其它 4 种白腐真菌复配, 并测定 3 种白腐真菌复合菌的酶活。将复合菌的产酶量分别与 3 株白腐真菌分泌酶活之和进行比较, 结果如图 4. 3 种白腐真菌复合菌分泌漆酶由高到低依次为青顶拟多孔菌 + 糙皮侧耳菌 + 偏肿拟栓菌 ($75.98 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$)、青顶拟多孔菌 + 糙皮侧耳菌 + 彩绒革盖菌 ($49.49 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$)、青顶拟多孔菌 + 糙皮侧耳菌 + 灵芝菌 ($35.94 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$)、青顶拟多孔菌 + 糙皮侧耳菌 + 血红密孔菌 ($2.91 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$), 可见产酶量最高的 3 种白腐真菌复合菌是青顶拟多孔菌 + 糙皮侧耳菌 + 偏肿拟栓菌, 其产酶量是单种菌分泌酶活之和的 1.42 倍。

青顶拟多孔菌 + 糙皮侧耳菌 + 偏肿拟栓菌三者

复配分泌的酶活量比 3 种单一菌株的酶活量之和 ($53.49 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$) 高; 青顶拟多孔菌 + 糙皮侧耳菌 + 彩绒革盖菌复配的酶活产量与 3 种单一菌株的酶活量之和 ($47.21 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$) 略高, 说明三者之间具有相加作用; 然而青顶拟多孔菌 + 糙皮侧耳菌 + 血红密孔菌和青顶拟多孔菌 + 糙皮侧耳菌 + 灵芝菌三者复配的复合菌产酶量比三者产酶量之和 ($42.82 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、 $43.22 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$) 少, 得出三者之间发生拮抗作用, 相互抑制漆酶的分泌。

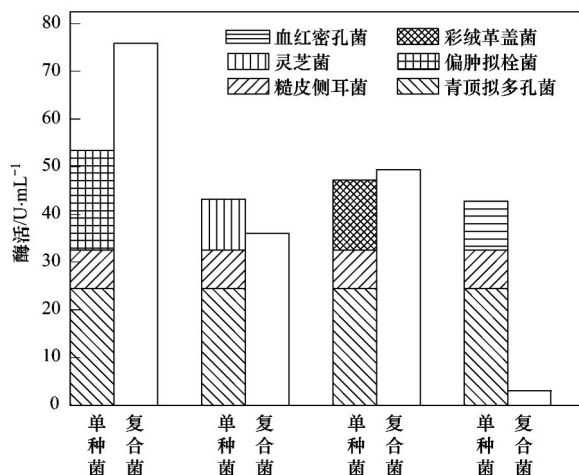


图 4 3 种白腐真菌复配的最高产酶量与其单菌株的最高产酶量之和比较

Fig. 4 Comparison of the maximum enzyme-production of three white-rot fungi combination and the sum of single fungus

2.3.2 对达到最高酶活所用时间的影响

6 种白腐真菌 3 株菌复配的最高酶活时间曲线如图 5, 青顶拟多孔菌 + 糙皮侧耳菌 + 偏肿拟栓菌的最高产酶量出现在第 14 d, 青顶拟多孔菌 + 糙皮侧耳菌 + 灵芝菌在第 10 d, 青顶拟多孔菌 + 糙皮侧耳菌 + 彩绒革盖菌在第 16 d, 青顶拟多孔菌 + 糙皮侧耳菌 + 血红密孔菌在第 10 d 产酶量最高。由图 1、图 3 和图 5 可见, 3 种白腐真菌复合菌比其单种菌或 2 种白腐真菌复合菌达到最高酶活所需的时间不尽相同。

漆酶的分泌与菌丝的生长状态密切相关, 另外不同胞外酶之间发生诱导或者刺激作用也会提高漆酶酶活^[14,15]。复合菌株在生长过程中, 菌株之间对培养基中的营养物质存在竞争作用, 其间菌丝的代谢强度发生了变化, 导致复合菌漆酶分泌量出现了波动^[21]。因此, 导致本研究不同组合复合菌之间达到最高酶活所用时间不同的主要原因是株菌竞争营养物质使复合菌达到最高酶活所用时间与单株菌相比有时提前有时延后。

复合菌产酶能力可能高于单一菌株, 还可能低于单一菌株, 这与段传人等^[22]的研究结果相同, 由于次生代谢产物比较复杂, 各自的产酶时间不同, 影响了整体的产酶时间和最高产酶量, 三者之间可能促进漆酶的分泌, 也可能抑制漆酶的分泌。

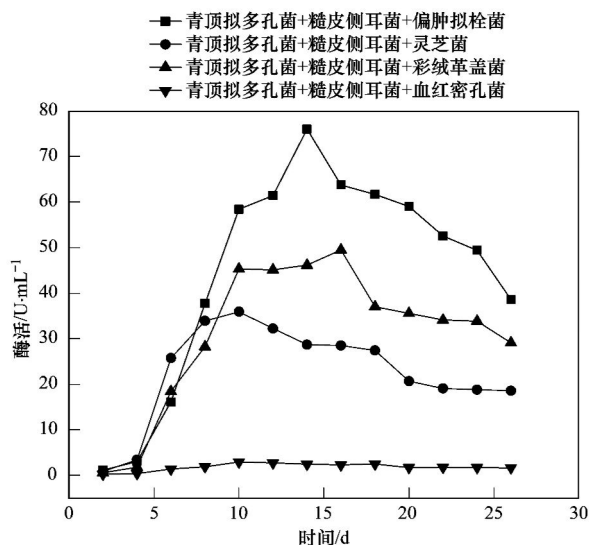


图 5 3 种白腐真菌复配酶活曲线

Fig. 5 Lac activity of three white-rot fungi combination

2.3.3 最佳复合菌漆酶分泌与生长的关系

白腐真菌生长的好坏关系到分泌漆酶的高低, 白腐真菌生长好分泌漆酶高。达到酶活峰值的时间也将直接影响对污染物的去除速率。基于此, 本研究测定了产酶最高的复合菌 (青顶拟多孔菌 + 糙皮侧耳菌 + 偏肿拟栓菌产酶量为 $75.98 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$) 的生物量, 并对其酶活与生物量的关系进行了分析, 结果如图 6 所示。复合菌株快速生长到第 6 d, 生物量开始稳定生长, 当培养到第 14 d 时生物量达到最高 0.10 g ; 分泌漆酶的曲线与生物量出现相似趋势, 培养到第 4 d 复合菌进入次生代谢阶段, 开始分泌大量的漆酶, 当培养到第 14 d 时, 酶活达到最大值 $75.98 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$, 随之分泌漆酶量开始下降。导致体系内的生物量相应减少, 分泌漆酶量也逐渐下降。以上说明漆酶的分泌与菌株的生物量之间存在正相关性, 该研究结果与课题组前期研究一致^[19,23]。

2.4 不同白腐真菌复配产酶量比较

从表 1 中可以看出在 2 种菌与 3 种菌的复配中, 随着产酶速率的升高, 酶活增大, 反之产酶速率降低酶活减少。

3 种白腐真菌 (青顶拟多孔菌 + 糙皮侧耳菌 + 偏肿拟栓菌) 复配的产酶量高于任意的 2 种白腐真菌复合的产酶量。糙皮侧耳菌对 2 种白腐真菌复合

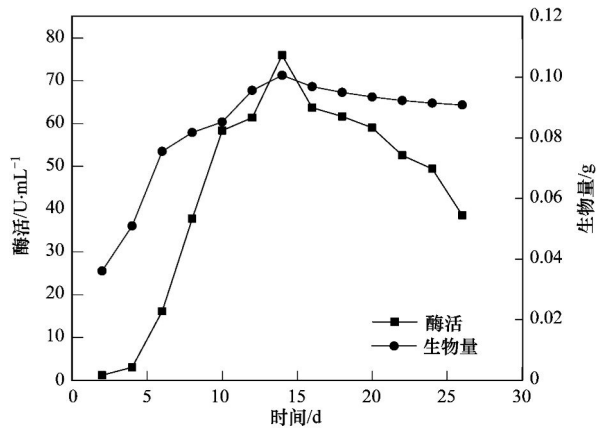


图6 青顶拟多孔菌、糙皮侧耳菌和偏肿拟栓菌的复合菌漆酶酶活与生长曲线

Fig. 6 Lac activity and growth of combining fungi (*Polyporellus picipes*, *Pleurotus ostreatus*, *Pseudotrametes gibbosa*)

菌产生协同作用, 偏肿拟栓菌对2种白腐真菌复合菌产生相加作用。

表1 单株菌和复合菌株的产酶量

Table 1 Lac activity of the single fungus and combined fungi

菌种	最高酶活 /U·mL ⁻¹	时间 /d	产酶速率 /U·(mL·d) ⁻¹
青顶	24.49	14	1.75
糙皮	8.01	4	2.00
偏肿	20.99	10	2.10
灵芝	10.72	6	1.78
彩绒	14.71	10	1.47
血红	10.32	10	1.03
青顶+糙皮	50.45	20	2.52
青顶+偏肿	16.42	8	2.05
青顶+灵芝	42.89	10	4.29
青顶+彩绒	22.01	20	1.10
青顶+血红	6.16	8	0.77
青顶+糙皮+偏肿	75.98	14	5.43
青顶+糙皮+灵芝	35.94	10	3.59
青顶+糙皮+彩绒	49.49	16	3.09
青顶+糙皮+血红	2.91	10	0.29

3种白腐真菌(青顶拟多孔菌+糙皮侧耳菌+灵芝菌)复配的产酶量低于任意的2种白腐真菌复合的产酶量。糙皮侧耳菌和灵芝菌均对2种白腐真菌复合菌出现了拮抗作用。

3种白腐真菌(青顶拟多孔菌+糙皮侧耳菌+彩绒革盖菌)复配的产酶量低于任意的2种白腐真菌复合的产酶量。糙皮侧耳菌对2种白腐真菌复合菌产生了协同作用。彩绒革盖菌2种白腐真菌复合菌产生了拮抗作用。

3种白腐真菌(青顶拟多孔菌+糙皮侧耳菌+血红密孔菌)复配的产酶量低于任意的2种白腐真菌复合的产酶量。糙皮侧耳菌和血红密孔菌均对2

种白腐真菌复合菌出现了拮抗作用。

从产酶量和达到最高酶活的时间来看,青顶拟多孔菌+糙皮侧耳菌+偏肿拟栓菌是最理想的复合菌。

本研究采用青顶拟多孔菌和糙皮侧耳菌对4种白腐真菌产酶进行诱导,但目前关于菌株之间产生协同和拮抗作用的机制还不十分清楚,这方面的研究有待于以后进一步开展。

3 结论

(1)复合菌青顶拟多孔菌+灵芝菌、青顶拟多孔菌+糙皮侧耳菌、青顶拟多孔菌+糙皮侧耳菌+偏肿拟栓菌的产酶量比单株菌产酶量之和;但复合菌青顶拟多孔菌+偏肿拟栓菌、青顶拟多孔菌+血红密孔菌、青顶拟多孔菌+糙皮侧耳菌+血红密孔菌和青顶拟多孔菌+糙皮侧耳菌+灵芝菌的产酶量却比单株菌产酶量之和低,说明菌株复配后即存在协同作用也存在拮抗作用。

(2)复配后得到的最佳产酶组合为青顶拟多孔菌+糙皮侧耳菌+偏肿拟栓菌,其最大酶活为75.98 U·mL⁻¹,产酶峰值时间为14 d。

参考文献:

- [1] Pope C J, Peters W A, Howard J B. Thermodynamic driving forces for PAH isomerization and growth during thermal treatment of polluted soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2000, **79** (1-2): 189-208.
- [2] Guieysse B, Viklund G. Sequential UV-biological degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in two-phases partitioning bioreactors[J]. *Chemosphere*, 2005, **59**(3): 369-376.
- [3] Bertilsson S, Widenfalk A. Photochemical degradation of PAHs in freshwaters and their impact on bacterial growth-influence of water chemistry[J]. *Hydrobiologia*, 2002, **469**(1-3): 23-32.
- [4] Binet P, Portal J M, Leyval C. Dissipation of 3-6-ring polycyclic aromatic hydrocarbons in the rhizosphere of ryegrass[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, **32**(4): 2011-2017.
- [5] Šašek V, Cajthaml T, Bhatt M. Use of fungal technology in soil remediation: a case study[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2003, **3**(3): 5-14.
- [6] 王聪颖, 王芳, 王涛, 等. 生物强化和生物刺激对土壤中PAHs降解的影响[J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(1): 121-127.
- [7] Jarvis P, Jefferson B, Parsons S A. The duplicity of floc strength [A]. In: *Proceedings of the Nano and Micro Particles in Water and Wastewater Treatment Conference*[C]. Zurich, Switzerland: International Water Association, 2003.
- [8] Koschorreck K, Richter S M, Swierczek A, et al. Comparative characterization of four laccases from *Trametes versicolor* concerning phenolic C-C coupling and oxidation of PAHs[J].

- Archives of Biochemistry and Biophysics, 2008, **474**(1): 213-219.
- [9] Takamiya M, Magan N, Warner P J. Impact assessment of bisphenol A on lignin-modifying enzymes by basidiomycete *Trametes versicolor*[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, **154**(1-3): 33-37.
- [10] Aktaş N, Çiçek H, Ünal A T, *et al.* Reaction kinetics for laccase-catalyzed polymerization of 1-naphthol[J]. Bioresource Technology, 2001, **80**(1): 29-36.
- [11] Andersson B E, Henrysson T. Accumulation and degradation of dead-end metabolites during treatment of soil contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons with five strains of white-rot fungi[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1996, **46**(5-6): 647-652.
- [12] Karmakar S, Greene H L. Oxidative destruction of chlorofluorocarbons(CFC11 and CFC12) by zeolite catalysts[J]. Journal of Catalysis, 1992, **138**(1): 364-376.
- [13] Awafo V A, Chahal D S, Simpson B K. Evaluation of combination treatments of sodium hydroxide and steam explosion for the production of cellulase-systems by two *T. reesei* mutants under solid-state fermentation conditions [J]. Bioresource Technology, 2000, **73**(2): 235-245.
- [14] Zhang H, Hong Y Z, Xiao Y Z, *et al.* Efficient production of laccases by *Trametes* sp. AH28- 2 in cocultivation with a *Trichoderma* strain[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2006, **73**(1): 89-94.
- [15] Savoie J M, Mata G, Billette C. Extracellular laccase production during hyphal interactions between *Trichoderma* sp. and Shiitake, *Lentinula edodes* [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1998, **49**(5): 589-593.
- [16] Gutierrez-Correa M, Portal L, Moreno P, *et al.* Mixed culture solid substrate fermentation of *Trichoderma reesei* with *Aspergillus niger* on sugar cane bagasse[J]. Bioresource Technology, 1999, **68**(2): 173-178.
- [17] Baldrian P. Increase of laccase activity during interspecific interactions of white-rot fungi[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2004, **50**(3): 245-253.
- [18] Chi Y J, Hatakka A, Maijala P. Can co-culturing of two white-rot fungi increase lignin degradation and the production of lignin-degrading enzymes? [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2007, **59**(1): 32-39.
- [19] 杜丽娜, 高大文. 青顶拟多孔菌对单一和复合多环芳烃的降解特性[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(2): 277-282.
- [20] Bourbonnais R, Paice M G. Oxidation of non-phenolic substrates: an expanded role for laccase in lignin biodegradation [J]. Federation of European Biochemical Societies Letters, 1990, **267**(1): 99-102.
- [21] Boddy L. Interspecific combative interactions between wood-decaying basidiomycetes [J]. Federation of European Microbiological Societies Microbiology Ecology, 2000, **31**(3): 185-194.
- [22] 段传人, 朱丽平, 姚月良. 三种白腐菌及其组合菌种木质素降解酶比较研究[J]. 菌物学报, 2009, **28**(4): 577-583.
- [23] 陈军, 高大文, 池玉杰, 等. 偏肿拟栓菌 *Pseudotrametes gibbosa* 产漆酶的条件优化[J]. 菌物学报, 2008, **27**(6): 940-946.

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 Perfluorochlorinated Chemicals 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 Quinolizidine- <i>p</i> -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