

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第10期

Vol.38 No.10

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国城市热岛时空特征及其影响因子的分析	曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 徐家平 (3987)
卫星遥感在 NO ₂ 总量控制中的应用	武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇 (3998)
京津冀城市群空气污染的模式总结与治理效果评估	王振波, 梁龙武, 林雄斌, 刘海猛 (4005)
南京北郊冬春季气溶胶数浓度变化特征分析	吴丹, 张璠, 刘刚, 吴明, 夏俊荣, 盖鑫磊, 李凤英, 杨孟 (4015)
冬季临安大气本底站气溶胶来源解析及其粒径分布特征	施双双, 王红磊, 朱彬, 林旭, 郭婷, 沙丹丹, 蒋琳, 张玉欣, 师远哲 (4024)
成都市大气颗粒物粒径分布及水溶性离子组成的季节变化特征	陶月乐, 李亲凯, 张俊, 李斯奇, 李晓东 (4034)
泉州市大气 PM _{2.5} 中水溶性离子季节变化特征及来源解析	张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 孙境蔚, 张棕巍, 许文质 (4044)
2011~2012 年北京大气 PM _{2.5} 中重金属的污染特征与来源分析	周雪明, 郑乃嘉, 李英红, 段菁春, 谭吉华, 张元勋, 贺克斌, 马永亮 (4054)
厦门海沧区 PM _{2.5} 中金属元素污染评价及来源分析	赵莉斯, 于瑞莲, 徐玲玲, 胡恭任, 吴鑫, 陈衍婷 (4061)
道路扬尘 PM _{2.5} 中金属元素污染特征及健康风险评估	张静, 张衍杰, 方小珍, 李凤华, 吴琳, 毛洪钧 (4071)
福建九仙山大气 PM ₁₀ 及部分化学组成的季节变化	魏雅, 林长城, 胡清华, 吴水平 (4077)
北京城区冬季空气污染时期 C2~C6 碳氢化合物含量特征	李月, 魏巍, 杨干, 陈东升, 程水源, 韩力慧 (4084)
2016 年北京市春节大气颗粒物污染特征激光雷达监测分析	石琳琳, 李令军, 李倩, 姜磊, 周一鸣, 李云婷, 刘保献, 张大伟 (4092)
廊坊市夏季臭氧体积分数影响因素及生成敏感性	李磊, 赵玉梅, 王旭光, 刘炜, 佟洁, 宋丽芸, 李怀瑞, 王清川 (4100)
人类活动对漓江地表水体水-岩作用的影响	赵海娟, 肖琼, 吴夏, 刘凡, 苗迎, 蒋勇军 (4108)
岩溶区水库冬季溶解有机质组成特征及来源:以桂林五里峡水库为例	卢晓斌, 彭文杰, 李强, 房君佳, 靳振江, 宋昂, 黄炳惠, 于爽 (4120)
岩溶关键带微量元素运移的时空变化:以豫西鸡冠洞为例	梁沙, 杨琰, 张娜, 孙喆, 张萍, 田宁, 凌新有, 任小敏 (4130)
龟石水库夏季富营养化状况与蓝藻水华暴发特征	苟婷, 马千里, 王振兴, 王丽, 姚玲爱, 许振成, 赵学敏, 梁荣昌, 蓝郁 (4141)
阿哈水库叶绿素 a 时空分布特征及其与藻类、环境因子的关系	罗宜富, 李磊, 李秋华, 焦树林, 李红梅, 陈峰峰 (4151)
天目湖沙河水库浮游植物群落结构的时空异质性	孙祥, 朱广伟, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 史浩辰, 杭心语, 徐涤非 (4160)
程海沉积物重金属时空变化及人为污染与潜在生态风险	于真真, 刘恩峰, 张恩楼, 林琪, 沈吉, 王荣, 李艳玲 (4169)
自然降雨条件下红壤坡地磷素随径流垂向分层输出特征	左继超, 郑海金, 奚同行, 王凌云, 聂小飞, 刘昭 (4178)
邻苯二甲酸酯在三峡库区消落带非淹水期土壤中污染特征及健康风险	杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4187)
滦河干流水体多环芳烃与有机氯农药季节性分布、组成及源解析	王乙震, 张世禄, 孔凡青, 袁媛 (4194)
潍坊滨海经济技术开发区饮用水中有机磷酸酯的水平及人体暴露风险评估	董政, 马玉龙, 李珺琪, 袁浩东, 金军, 王英 (4212)
道路灰尘中有机磷阻燃剂污染特征及人体暴露	李静, 王俊霞, 许婉婷, 尚荣双, 顾海东, 温耀进, 张丽君 (4220)
居民经手口途径摄入含 PAHs 颗粒物的致癌风险评价	佟瑞鹏, 杨校毅, 张磊, 程蒙召 (4228)
基于空间自相关的地下水脆弱性时空演变	刘宇, 兰双双, 张永祥, 李芳春, 侯树楷 (4236)
Ag-AgI/CN/MA 复合物的制备及其可见光催化性能	张塞, 张丽丽, 胡春 (4245)
凤眼莲对富营养化水体中氨氮化和反硝化微生物的影响	李洁, 蒋丽娟, 王晓琳, 肖琳 (4253)
利用含 Cu(II) 废水强化微生物燃料电池处理含 Cr(VI) 废水	熊晓敏, 吴夏芳, 贾红华, 雍晓雨, 周俊, 韦萍 (4262)
生态高负荷土地快速渗滤系统处理猪场废水的效能及微生态	宿程远, 刘凡凡, 钟余, 黄智, 郑鹏, 农志文, 卢宇翔 (4271)
细菌对城市污水中小球藻生长和油脂积累的影响	涂仁杰, 金文标, 韩松芳, 陈洪一 (4279)
污水处理厂消毒技术对抗生素抗性菌的强化去除	刘亚兰, 马岑鑫, 丁河舟, 邱勇, 李冰, 王硕, 李激 (4286)
AnMBR-A-MBR 和 A ² -MBR 工艺处理焦化废水效果与急性毒性物质特征对比	朱佳迪, 李菲菲, 陈吕军 (4293)
基于实时控制技术的 CANON 工艺稳定性运行	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (4302)
新型硫铁复合填料强化再生水深度脱氮除磷	周彦卿, 郝庆霞, 刘思远, 王雨沙 (4309)
连续流亚硝化中试反应器的启动及其能力提升	朱强, 刘凯, 董石语, 顾澄伟, 王凡, 李祥, 黄勇 (4316)
基于不同接种污泥复合型厌氧氨氧化反应器的快速启动特征	闫刚, 李田, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, Samwine Thomas (4324)
两段式曝气对好氧颗粒污泥脱氮性能的影响	王文啸, 卞伟, 王盟, 阚睿哲, 赵青, 梁东博, 李军 (4332)
醋糟高效厌氧消化体系构建	周云龙, 许之扬, 赵明星, 施万胜, 黄振兴, 何迪, 阮文权 (4340)
基于总量及形态的土壤重金属生态风险评价对比:以龙岩市适中镇为例	王蕊, 陈明, 陈楠, 刘冠男, 张二喜, 刘晓端, 张佳文 (4348)
锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评价	陈凤, 董泽琴, 王程程, 韦雪花, 胡宇, 张丽娟 (4360)
三峡库区典型消落带 CH ₄ 排放的变化特征及影响因素	柴雪思, 郝庆菊, 黄哲, 范志伟, 江长胜 (4370)
地膜覆盖对菜地生态系统 N ₂ O 排放的影响	冯迪, 郝庆菊, 张凯莉, 石将来, 石孝均, 江长胜 (4380)
不同用量竹炭对污泥堆肥过程温室气体排放的影响	向秋洁, 杨雨洽, 张成, 相欣奕, 木志坚 (4390)
半固态培养条件下烟曲霉去除土壤中镉	陈耀宁, 汪元南, 黎媛萍, 李辉, 陈艳容, 伍艳馨, 苟宇, 朱福造, 张道利, 刘耀, 曾光明 (4398)
猪粪堆肥过程中金霉素去除及重金属形态变化	温沁雪, 曹永森, 陈志强 (4405)
堆肥-生物强化对重度石油污染土壤的修复作用	吴蔓莉, 陈凯丽, 叶茜琼, 祁燕云, 徐会宁, 王卓, 薛鹏飞, 朱常琳 (4412)
微生物多样性对土壤碳代谢特征的影响	安丽芸, 李君剑, 严俊霞, 李洪建 (4420)
冬小麦田 O ₃ 气孔与非气孔沉降及风险评估	徐静馨, 郑有飞, 赵辉, 储仲芳, 黄积庆, 袁月 (4427)
中国西南酸雨区降水化学特征研究进展	周晓得, 徐志方, 刘文景, 武瑶, 赵童, 蒋浩 (4438)
《环境科学》征稿简则 (4261) 《环境科学》征订启事 (4270) 信息 (4186, 4404, 4446)	

半固态培养条件下烟曲霉去除土壤中镉

陈耀宁^{1,2}, 汪元南^{1,2}, 黎媛萍³, 李辉⁴, 陈艳容^{1,2}, 伍艳馨^{1,2}, 苟宇^{1,2}, 朱福造^{1,2}, 张道利^{1,2}, 刘耀^{1,2}, 曾光明^{1,2}

(1. 湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082; 2. 环境生物与控制教育部重点实验室(湖南大学), 长沙 410082; 3. 湖南城市学院市政与测绘工程学院, 益阳 413000; 4. 湖南省林业科学院生物环境工程研究所, 长沙 410004)

摘要: 选用了1株高耐镉(Cd)的烟曲霉, 提出了利用烟曲霉在半固态培养体系表面生长并去除Cd的方法, 研究了菌体对不同模拟Cd污染水平土壤中Cd的去除效果, 测定了菌体吸附和富集Cd的变化。结果表明, 烟曲霉在半固态培养体系中能够实现一定的Cd去除效果, Cd含量为 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 对土壤Cd的综合去除率可达31%。同时通过研究不同Cd含量下烟曲霉干重和体系pH随时间变化情况, 发现随着培养时间和Cd含量的增加, 烟曲霉干重逐渐下降, 最大下降幅度可达64%, pH为5.6~6.0时去除效果较好。培养过程中土壤Cd形态变化表明, 烟曲霉在该体系下主要去除土壤中弱酸溶态和可还原态的Cd, 可氧化态Cd含量在培养前后基本保持不变。这种方法的提出为微生物去除土壤重金属污染提供了新的思路。

关键词: 烟曲霉; 土壤; 镉; 去除; 重金属形态

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)10-4398-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201703039

Removal of Cd from Soil by *Aspergillus fumigatus* in a Semi-solid Culture

CHEN Yao-ning^{1,2}, WANG Yuan-nan^{1,2}, LI Yuan-ping³, LI Hui⁴, CHEN Yan-rong^{1,2}, WU Yan-xin^{1,2}, GOU Yu^{1,2}, ZHU Fu-zao^{1,2}, ZHANG Dao-li^{1,2}, LIU Yao^{1,2}, ZENG Guang-ming^{1,2}

(1. College of Environment Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Key Laboratory of Environmental Biology and Pollution Control (Hunan University), Changsha 410082, China; 3. College of Municipal and Mapping Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, China; 4. Institute of Biological and Environmental Engineering, Hunan Academy of Forestry, Changsha 410004, China)

Abstract: A method was proposed to remove Cd from contaminated soils by a semi-solid culture containing *Aspergillus fumigatus* that have a strong resistance to Cd. The removal efficiencies of Cd in different simulated Cd pollution levels were studied and the changes in Cd adsorption and the enrichment in *Aspergillus fumigatus* were measured. The results showed that *Aspergillus fumigatus* could remove some Cd from the soil in the semi-solid culture system. When the concentration of Cd was $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, the total removal rate of Cd was up to 31%. Meanwhile, the dry weight of *Aspergillus fumigatus* and the pH of the system were studied during the culture process. The results showed that the dry weight decreased with the increase in culture time and Cd concentration, the maximum decrease rate of dry weight was 64%. The removal efficiency was the best when the pH was varied from 5.6 to 6.0. The changes in different extraction fractions for Cd showed that the main fractions of Cd removed by *Aspergillus fumigatus* were the acid-soluble fraction and the reducible fraction and the oxidizable fraction of Cd remained essentially unchanged before and after the culturing. The proposed method would provide valuable information for the remediation of heavy metal-contaminated soil by fungi.

Key words: *Aspergillus fumigatus*; soil; cadmium; removal; heavy metal speciation

随着经济的快速发展, 城市化和工业化进程的深入, 重金属正在通过一些工矿企业排放的“三废”、农药的施用及矿物燃料的燃烧等途径进入土壤^[1], 使得土壤受到重金属严重污染。重金属污染尤其是土壤重金属污染已成为危害人类生存和发展及全球环境的主要问题之一, 其修复研究已成为国内外研究的重点和热点^[2]。土壤环境中的重金属污染是一个不可逆的过程, 进入土壤的重金属不能被微生物降解, 积累到一定程度就会对土壤-植物系统产生毒害, 导致土壤质量退化^[3]、作物产量和品质降低^[4,5], 污染地下水^[6], 不利于生物体的正常代谢^[7]。镉是常见的重金属污染物之一, 浓度较低

时即有较大毒性, 与其它重金属相比具有较强的化学活性, 更易被植物吸收, 能通过食物链富集于人体内, 危害人体健康^[8,9]。

一般来说, 重金属污染土壤修复原理主要有两种思路: 一是改变重金属在土壤中的存在形态, 降

收稿日期: 2017-03-06; 修订日期: 2017-05-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378190, 51521006, 51578222, 51579094); 湖南省自然科学基金项目(13JJB002); 湖南省科技厅重点研发计划项目(2016SK2045); 湖南省教育厅创新平台开放基金项目(17K019)

作者简介: 陈耀宁(1978~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为固体废物资源化与环境微生物学, E-mail: cyn@hnu.edu.cn

低其生物有效性和迁移性;二是将重金属从土壤中去,使其浓度逐渐减少至无害的程度^[10].其修复方法主要是物理化学修复和生物修复.物理化学修复主要包括土壤淋滤^[11]、电动修复^[12]和化学固化^[13,14]等,这些方法虽然在一定程度上减少了重金属对土壤及生态环境的危害,但是能耗大、费用高和存在二次污染等问题限制了它们的广泛应用^[15].生物修复方法主要有植物修复^[16,17]、动物修复^[18]和微生物修复^[19]等技术.微生物修复技术中常用的微生物有细菌^[20]、藻类^[21]和真菌^[22]三大类,其中真菌对重金属耐性最强.烟曲霉是一种大型丝状真菌,对重金属具有较大的耐受性和吸附容积^[23],其胞外聚合物对水体中重金属吸附^[24,25]和产酸对土壤重金属淋滤^[26]的研究已有一些报道,但是将其直接用于土壤重金属的去除还未见报道.液态静置培养中烟曲霉依靠较长的菌丝从培养基内获取养分,但菌落多浮于培养基表面,容易直接挑取.如果添加营养液将 Cd 污染土壤制成半固态培养体系,则有望在培养烟曲霉的同时实现从体系内吸附和富集重金属,进而通过剥离菌落较易实现部分去除 Cd,从而达到利用真菌去除土壤中重金属目标,不过利用这种思路进行土壤重金属污染修复的研究还鲜见报道.

本文拟选用 1 株具有高耐镉的烟曲霉,通过添加营养液将 Cd 污染土壤制成半固态培养体系并用于烟曲霉的培养,研究了半固态培养条件下烟曲霉对含不同 Cd 污染土样中 Cd 的去除效果,通过测定烟曲霉胞外和胞内 Cd 的含量及土壤中剩余 Cd 的含量,分析了烟曲霉对土壤中 Cd 的去除效率,验证了烟曲霉去除土壤中重金属的可能性,同时还探讨了处理前后土样中 Cd 的形态变化,以期微生物去除土壤重金属污染提供了新的思路.

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 菌种

烟曲霉(*Aspergillus fumigatus*),购于中国普通微生物菌种保藏中心(CGMCC 3.7795).将菌种于土豆琼脂葡萄糖培养基 30℃ 培养 5 d,刮取少量孢子于无菌水中充分振荡,调节体积制备孢子浓度约为 1.0×10^7 CFU·mL⁻¹ 的菌悬液.

1.1.2 培养基

土豆琼脂葡萄糖培养基(PDA)配方:新鲜土豆 200 g,葡萄糖 20 g,琼脂 15 g,蒸馏水 1 000 mL,

自然 pH.

马丁培养基:葡萄糖 10 g,蛋白胨 5 g, KH₂PO₄·3H₂O 1 g, MgSO₄·7H₂O 0.5 g, 0.1% 孟加拉红溶液 3.3 mL,蒸馏水 1 000 mL.

1.1.3 土样

土样取自岳麓山(长沙),剔除表面石子和树叶后于自然条件下风干,然后再过 40 目尼龙筛备用.其基本理化性质为:pH 5.48,有机质 55.6 g·kg⁻¹,总镉含量 0.07 mg·kg⁻¹.配制不同含量硝酸镉,取定量溶液加入土壤混匀,污染土壤,使得 Cd 含量为 10、20 和 50 mg·kg⁻¹ (不包括土壤背景含量),以下分别记为 Cd(10)、Cd(20)和 Cd(50)^[27],将其置于塑料瓶内放置 30 天^[28],使其形态趋于稳定,被污染后的 Cd 含量测定分别为 10.50、20.35 和 50.26 mg·kg⁻¹.

1.2 实验设置

准确移取灭菌后的马丁培养基 15 mL,倒入 9 cm 灭菌平板中,然后分别添加不同含量的含镉土样 8.0 g,混合均匀,待其冷却后接种烟曲霉菌悬液,每个浓度均设置供 7 次取样的平行样.置于 37℃ 恒温培养箱中静置培养 20 d,分别于第 0、3、5、8、11、14 和 20 d 取样测定相关参数,取样时挑取整个平板上所有菌体,各项参数均测定 3 次取平均值.实验机理图详见图 1.

1.3 菌体干重的测定

菌体取样后,将附着的土壤尽量剥除干净后置于 60℃ 烘箱中干至恒重,用分析天平称量其质量.

1.4 pH 的测定

取培养后的样品 1 g,然后加入 2.5 mL 超纯水,于振荡器上振荡 45 min,离心后取上清液用精密 pH 计测定.

1.5 烟曲霉胞外吸附和胞内富集 Cd 含量的测定

胞外吸附 Cd 含量采用 Lima^[29]的测定方法并作如下改动:取 100 mg 干菌体细胞悬浮于 20 mL 的 ddH₂O 中,于冰水中超声 5 min,然后在室温下以 4 000 r·min⁻¹ 离心 10 min,保存好上清液;将余下菌体置于 30 mL EDTA (pH 7.0, 20 mmol·L⁻¹) 中,于振荡器上振荡 30 min^[30],过滤,保存滤液;再用 20 mL 的 ddH₂O 冲洗菌丝体,并于 4 000 r·min⁻¹ 离心 10 min,保存上清液,混合各步滤液,过 0.45 μm 滤膜,滤液用原子吸收法(AAS)测定 Cd 浓度,计算单位重量的菌体上吸附的 Cd 重量.胞内富集 Cd 含量采用 Lima 的测定方法^[29]并作如下改动:50 mg 处理后的菌丝体再悬浮于 1 mL 100 mmol·L⁻¹ 羟

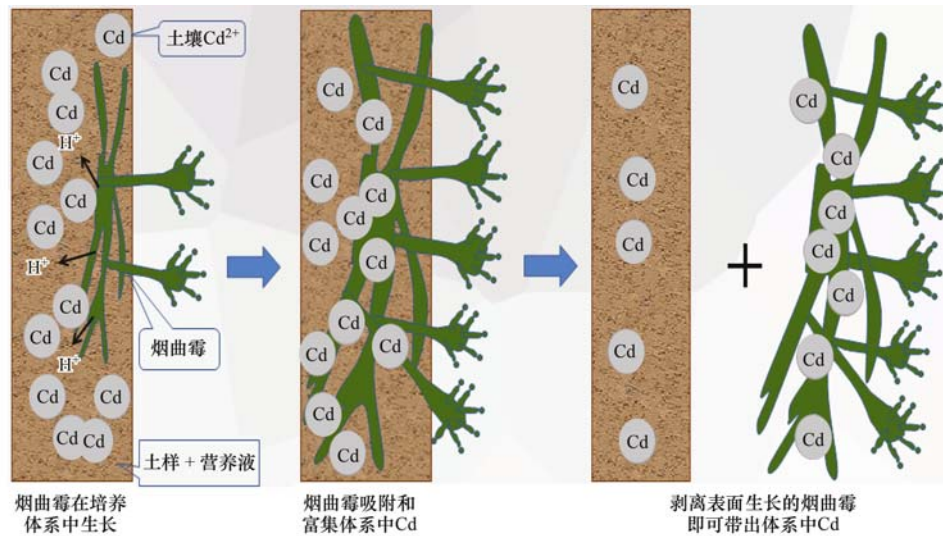


图 1 实验机制

Fig. 1 Experimental mechanism

乙基哌嗪乙硫磺酸 (pH 8.6), $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 苯甲基硫酰氟和 0.2% (体积比) Tween-20 的混合提取液中, 于冰水中超声 10 min 后离心, 收集上清液, 并将剩余的细胞加入含 25 mL 的 HNO_3 ($2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 中, 于 100°C 加热 24 h^[31], 离心后各步上清液合并后摇匀, 过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜, 滤液用 AAS 法测定 Cd 浓度, 计算单位重量的菌体内富集的 Cd 重量。

1.6 重金属形态及总量的测定

土壤重金属形态采用优化的 BCR 连续提取法^[32]。其中弱酸溶态、可还原态、可氧化态和残渣态分别记为步骤 1、2、3 和 4。土壤重金属总量采用石墨消解法测定, 准确称量 0.25 g 样品于消解管中, 然后依次加入 HNO_3 、HF 和 HClO_4 , 置于石墨消解仪上消解完全后定容至 50 mL, 再用 AAS 法测定。

1.7 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 进行数据处理, 实验中的数据均采用平均值 $\pm$ 标准偏差。图形采用 Origin 9.1 进行处理。

2 结果与讨论

2.1 半固态培养过程中土壤 Cd 的去除

2.1.1 烟曲霉胞外吸附 Cd 含量的变化

图 2 为烟曲霉在 20 d 培养过程中对土壤 Cd 的去除变化。从中可见, 随着培养时间的增加, 菌体对土壤中 Cd 的吸附量先增加后减少。整个培养过程中, Cd(10)、Cd(20) 和 Cd(50) 最大吸附质量分别为 9.17、17.62 和 $32.72 \mu\text{g}$, 当 Cd 含量为 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 其最大吸附量较低含量组 [Cd(10) 和

Cd(20)] 提前 3 d, 由此表明, 随着 Cd 含量和培养时间的增加, 菌体对体系中 Cd 的吸附效率下降, 去除效率降低。在培养的前期 (前 5 d), 吸附量较大, 这与环境中营养物质充足和菌体的快速生长有关, 第 11 d 后吸附量逐渐减少, 这个阶段烟曲霉生物量下降和部分菌体死亡消融是其原因 (图 4)。体系中 Cd 浓度越高, 烟曲霉吸附总质量越多, 这个阶段高含量 Cd 土样中烟曲霉尚能存活, 单位菌体吸附 Cd 的量较多。

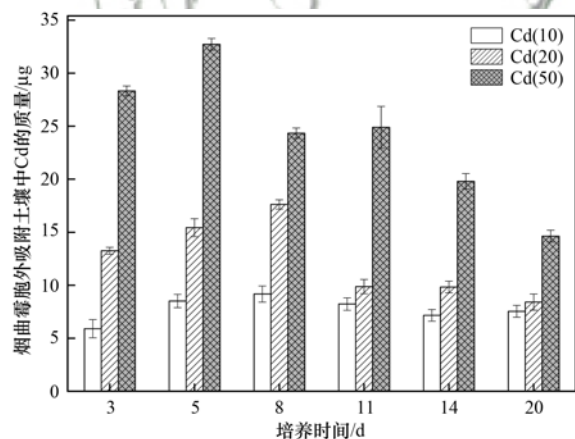


图 2 烟曲霉胞外吸附土壤中 Cd 质量

Fig. 2 Extracellular adsorption of Cd in soil by *Aspergillus fumigatus*

2.1.2 烟曲霉胞内富集 Cd 质量

烟曲霉的胞内积累 Cd 质量如图 3 所示, 随着培养时间的延长, 烟曲霉胞内富集 Cd 质量先增加后减少 [Cd(10) 除外], 当体系中 Cd 含量为 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 烟曲霉富集量在培养前后变化不大, 虽然后期菌体的干重有下降的趋势 (图 4), 但该含量对菌体的副作用较小, 对菌体的富集作用产生不

利影响有限^[33]. Cd(20) 在前 8 d 被烟曲霉吸附逐渐增多, 最大富集 Cd 质量为 24.05 μg , Cd(50) 组菌体富集 Cd 质量在整个过程中较 Cd(20) 低. 结果表明, 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 Cd 对烟曲霉有一定的毒害作用, 相较 10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 体系菌体的生物活性明显受到抑制(图 4), 使得菌体富集作用受到限制, 培养时间越长, 这种限制的影响越大.

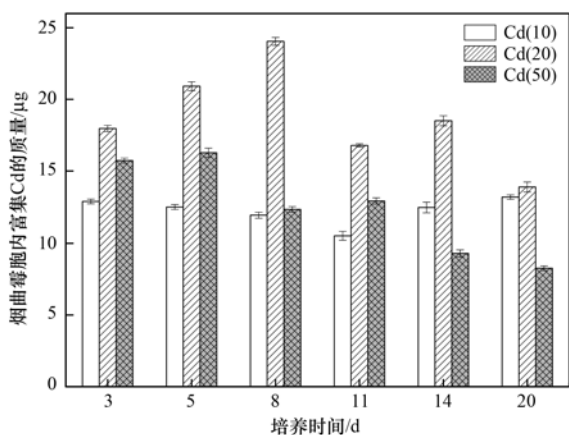


图 3 烟曲霉胞内富集土壤中 Cd 的质量

Fig. 3 Accumulation of Cd in soil by *Aspergillus fumigatus*

2.2 菌体干重变化

图 4 为烟曲霉在 20 d 培养过程中菌体干重的变化. 从中可见, 菌体干重整体呈下降的变化趋势, 培养中期(5 ~ 11 d)下降迅速, 11 d 后干重下降速度减缓. 培养前期(前 5 d), 不同组的变化趋势并不完全相同, 当含 Cd 为 10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 从第 3 ~ 5 d, 菌体干重增加, 而后下降迅速; 而含量为 20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的含 Cd 土样中, 菌体干重略微上升, 下降时间比含量为 Cd(10) 推迟 3 d, 这可以认为是烟曲霉应对环境压力的一种响应^[23]; 而含量为 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的含镉土样中, 菌体干重持续下降, 最大下降幅度为 64%, 这表明高含量的 Cd 明显抑制烟曲霉的活性, 这种抑制作用随着 Cd 含量和培养时间的增加而增加.

2.3 培养过程中 pH 值的变化

pH 对重金属的影响较大, 当 pH 较高时, 有利于重金属向化合态转化; 相反, pH 较低时, 有利于重金属向游离态转化^[34]. pH 在整个培养过程的变化趋势见图 5. 从中可知, pH 一直呈上升趋势, 由 5.48 增加到 6.59, 是体系内营养物质氨化作用所致^[35]. 从图 2 和图 3 可以看出, 胞外吸附量和胞内富集量在 3 ~ 8 d 时最大, 此时体系 pH 值在 5.6 和 6.0 之间, 表明这是烟曲霉去除土样 Cd 的最佳 pH. 随着 Cd 浓度的增加, pH 值逐渐下降, 这与烟曲霉

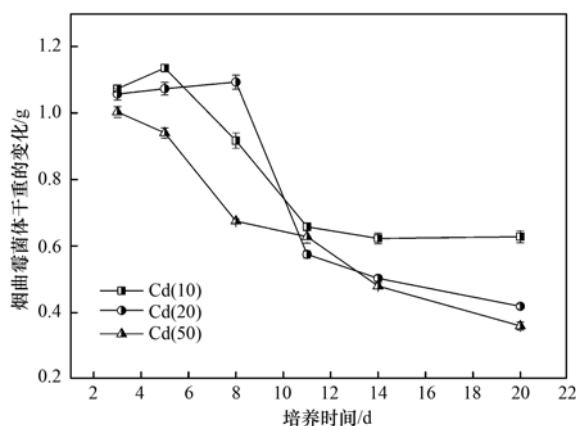


图 4 半固态培养过程中烟曲霉菌体干重的变化

Fig. 4 Changes in the dry weight of *Aspergillus fumigatus* in the semi-solid culture

应对环境压力分泌有机酸有关^[36,37]. 培养初期(前 5 d), Cd(50) 的 pH 与 Cd(20) 组接近, 上升较 Cd(10) 缓慢, 这是烟曲霉高含量 Cd 作用下, 氨化减弱和产酸增强共同作用的结果. 随着培养时间的延长(5 d 后), pH 逐渐增加, 烟曲霉在较高 Cd 环境下受到抑制, 菌体生长放缓, 富集 Cd 的量减少.

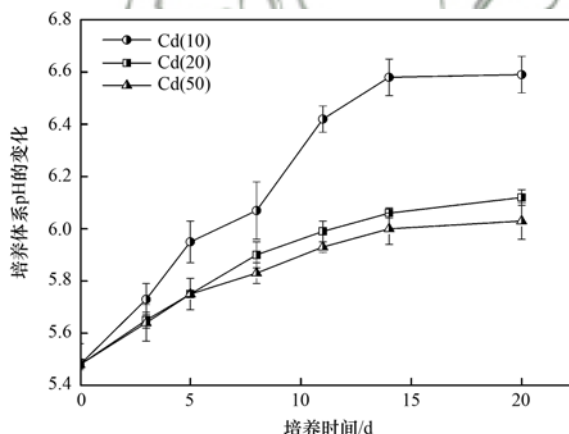


图 5 培养过程中 pH 变化

Fig. 5 Variations in pH in the culture

2.4 培养前后土壤 Cd 形态的变化

土壤重金属形态与多种因素有关, 不同形态的重金属活性和生物有效性不同. 实验结果表明, 随着 Cd 含量增加, 可氧化态和残渣态所占质量分数逐渐上升(图 6), 这与烟曲霉在培养过中对弱酸溶态和可还原态中 Cd 的转化有关(表 1), 而培养前后有机结合态基本保持不变, 实验使用的外源性 Cd 加入到土壤后, 其主要是以生物有效性高的(弱酸溶态和可还原态)状态存在, 外源性 Cd 向可氧化态的转化不明显, 这与前人的研究结果一致^[37]. 培养过程中由于烟曲霉的降解和代谢, 体系腐殖化程度增加, 整个过程中残渣态比率有小幅上升^[38].

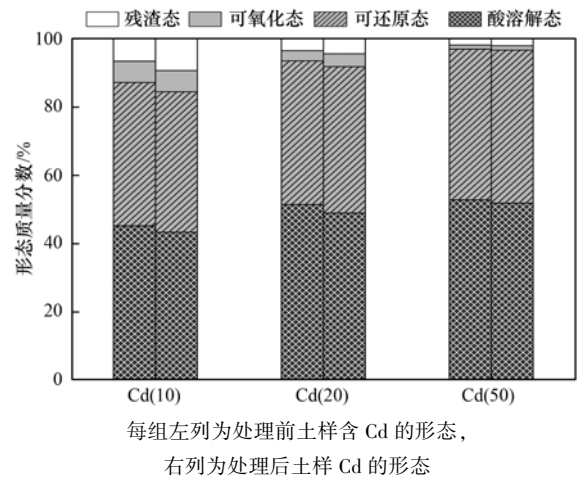


图 6 培养前后土壤中 Cd 各形态百分含量
Fig. 6 Change in the different extraction fractions of Cd before and after the culture

2.5 培养前后土样中 Cd 含量及总 Cd 去除率变化
表 1 所示为培养前后土样 Cd 质量平衡及烟曲霉对土样 Cd 去除率的变化. 可以看出, 烟曲霉对 3 个含量组中 Cd 的去除质量相近, 但是去除率却明显不同, 随着 Cd 浓度增加, 烟曲霉对土样中 Cd 的去除率逐渐减小, Cd(10) 组中去除率为 31.33%, 而 Cd(50) 组去除率仅为 6.27%, 表明含 Cd 较低的土样明显有利于烟曲霉的去除, 可以看出这种方法更适合处理一些 Cd 浓度相对较低且对微生物毒害作用较小的污染土壤. 通过对比土样中减少的 Cd 质量和菌体去除 Cd 的总质量可以看出, 二者基本持平, 表明土壤中 Cd 的降低途径主要是通过烟曲霉的吸附和富集来实现. 可见这种通过半固态培养微生物来去除土壤中 Cd 的方法是可行的, 而且微

表 1 处理前后 Cd 质量平衡及烟曲霉对 Cd 的去除率

Table 1 Quality balance and removal rate of Cd by *Aspergillus fumigatus* before and after the culture

Cd 含量	10 mg·kg ⁻¹		20 mg·kg ⁻¹		50 mg·kg ⁻¹	
	处理前	处理后	处理前	处理后	处理前	处理后
土样质量/g	8.00 ± 0.01	7.11 ± 0.01	8.00 ± 0.01	7.39 ± 0.01	8.00 ± 0.01	7.62 ± 0.01
土样 Cd 含量/mg·kg ⁻¹	10.50 ± 0.02	8.87 ± 0.01	20.35 ± 0.02	19.10 ± 0.01	50.26 ± 0.03	49.75 ± 0.02
处理 Cd 总质量/μg	84.00 ± 0.27	63.96 ± 0.16	162.80 ± 0.36	141.15 ± 0.26	402.08 ± 0.74	379.10 ± 0.65
质量差/μg	20.04 ± 0.43		21.65 ± 0.62		22.99 ± 1.39	
单位菌体 Cd 含量/mg·kg ⁻¹	33 ± 0.03		53.23 ± 0.02		63.61 ± 0.03	
培养后菌体质量/g	0.628 ± 0.003		0.419 ± 0.005		0.360 ± 0.002	
菌体总去除量/μg	20.72 ± 0.201		22.30 ± 0.274		22.90 ± 0.329	
总去除率/%	31.33 ± 0.75		15.17 ± 0.47		6.27 ± 0.38	

生物生长速度快, 相对于 植物吸附, 具有速度更快和操作更便捷的优势.

3 结论

(1) 烟曲霉在加入外源 Cd 的环境下能正常生长, 随着 Cd 含量的增加, 菌体去除 Cd 的绝对重量呈现增加趋势, 但是去除率逐渐减少. 其中当 Cd 含量为 10 mg·kg⁻¹ 时, 烟曲霉对土壤 Cd 的去除率可达 31%, 初步表明通过半固态培养微生物来去除土壤中 Cd 的方法是可行的, 对于提升其效率和深入揭示其机制还需要进一步的研究.

(2) 烟曲霉在培养过程中生物量干重随着培养时间和 Cd 含量的增加呈下降的趋势, 并且最大下降幅度为 64%, 最适 pH 为 5.6 ~ 6.0.

(3) 烟曲霉去除半固态培养体系中 Cd 的形态主要为弱酸溶态和可还原态, 培养前后可氧化态基本保持不变.

参考文献:

[1] 黄益宗, 郝晓伟, 雷鸣, 等. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践[J]. 农业环境科学学报, 2013, 3(3): 409-417.

Huang Y Z, Hao X W, Lei M, *et al.* The remediation technology and remediation practice of heavy metals-contaminated soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 3(3): 409-417.
[2] 徐磊, 周静, 崔红标, 等. 重金属污染土壤的修复与修复效果评价研究进展[J]. 中国农学通报, 2014, 30(20): 161-167.
Xu L, Zhou J, Cui H B, *et al.* Research progress in remediation and its effect evaluation of heavy metal contaminated soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(20): 161-167.
[3] Bremner I. Nutritional and physiological significance of metallothionein [A]. In: Kägi J H R, Kojima Y (Eds.). Metallothionein II [M]. Basel: Birkhäuser, 1987. 81-107.
[4] Benavides M P, Gallego S M, Tomaro M L. Cadmium toxicity in plants[J]. Brazilian Journal of Plant Physiology, 2005, 17(1): 21-34.
[5] 张从, 夏立江. 污染土壤生物修复技术[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2000. 23-26.
[6] 刘发欣, 高怀友, 伍钧. 镉的食物链迁移及其污染防治对策研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(S): 805-809.
Liu F X, Gao H Y, Wu J. Transfer of cadmium in food chain and its prevention and control from pollution[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(S): 805-809.
[7] 肖青青, 王宏镡, 赵宾, 等. 云南个旧市郊农作物重金属污染现状及健康风险[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(2):

- 271-281.
- Xiao Q Q, Wang H B, Zhao B, *et al.* Heavy metal pollution in crops growing in suburb of Gejiu City, Yunnan Province, China: present situation and health risk [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, **30**(2): 271-281.
- [8] 陈圣安. 镉污染对水稻生理生化的影响[J]. *农技服务*, 2011, **28**(7): 1033-1035.
- [9] 姜春晓. 高效抗重金属菌株的选育及其在生物修复镉污染土壤中的应用[D]. 天津: 南开大学, 2009.
- Jiang C X. Breeding of cadmium-tolerant strain and its application in remediation of cadmium-contaminated soils with bioremediation[M]. Tianjin: Nankai University, 2009.
- [10] 丁竹红, 胡忻, 尹大强. 整合剂在重金属污染土壤修复中应用研究进展[J]. *生态环境学报*, 2009, **18**(2): 777-782.
- Ding Z H, Hu X, Yin D Q. Application of chelants in remediation of heavy metals-contaminated soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, **18**(2): 777-782.
- [11] 周普雄, 严颢, 余震, 等. 生物淋滤联合类 Fenton 反应去除污染土壤中重金属的效果[J]. *环境科学*, 2016, **37**(9): 3575-3581.
- Zhou P X, Yan X, Yu Z, *et al.* Performance of bioleaching combined with fenton-like reaction in heavy metals removal from contaminated soil[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(9): 3575-3581.
- [12] 王旭, 张豪, 张松林, 等. 土壤重金属污染及修复技术的研究进展[J]. *甘肃农业*, 2011, (3): 60-62.
- [13] Basta N T, Gradwohl R, Snethen K L, *et al.* Chemical immobilization of lead, zinc, and cadmium in smelter-contaminated soils using biosolids and rock phosphate[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, **30**(4): 1222-1230.
- [14] Knox A S, Seaman J C, Mench M J, *et al.* Remediation of metal-and radionuclides-contaminated soils by in situ stabilization techniques [A]. In: Iskandar I K (Ed.). *Environmental Restoration of Metals-Contaminated Soils* [M]. New York: Lewis, 2000. 21-60.
- [15] 王学刚, 王光辉, 刘金生. 矿区重金属污染土壤的修复技术研究现状[J]. *工业安全与环保*, 2010, **36**(4): 29-31.
- Wang X G, Wang G H, Liu J S. Study on mining area's heavy-metal soil pollution remediation technology[J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2010, **36**(4): 29-31.
- [16] 刘周莉, 何兴元, 陈玮. 忍冬: 一种新发现的镉超富集植物[J]. *生态环境学报*, 2013, **22**(4): 666-670.
- Liu Z L, He X Y, Chen W. *Lonicera japonica* Thunb. -a newly discovered Cd hyper-accumulator [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, **22**(4): 666-670.
- [17] 赵颖, 刘利军, 党晋华, 等. 污灌区复合污染土壤的植物修复研究[J]. *生态环境学报*, 2013, **22**(7): 1208-1213.
- Zhao Y, Liu L J, Dang J H, *et al.* Phytoremediation of combined pollution soil in a sewage irrigation area [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, **22**(7): 1208-1213.
- [18] 唐浩, 朱江, 黄沈发, 等. 蚯蚓在土壤重金属污染及其修复中的应用研究进展[J]. *土壤*, 2013, **45**(1): 17-25.
- Tang H, Zhu J, Huang S F, *et al.* Review on application of earthworm in soil heavy metal pollution and remediation [J]. *Soil*, 2013, **45**(1): 17-25.
- [19] 曹德菊, 程培. 3 种微生物对 Cu Cd 生物吸附效应的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2004, **23**(3): 471-474.
- Cao D J, Cheng P. Bioremediation of several microorganisms towards Cu and Cd by adsorption [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, **23**(3): 471-474.
- [20] Butter T J, Evison L M, Hancock I C, *et al.* The removal and recovery of cadmium from dilute aqueous solutions by biosorption and electrolysis at laboratory scale[J]. *Water Research*, 1998, **32**(2): 400-406.
- [21] Anastopoulos I, Kyzas G Z. Progress in batch biosorption of heavy metals onto algae[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2015, **209**: 77-86.
- [22] Mnasri M, Janoušková M, Rydlová J, *et al.* Comparison of arbuscular mycorrhizal fungal effects on the heavy metal uptake of a host and a non-host plant species in contact with extraradical mycelial network[J]. *Chemosphere*, 2017, **171**: 476-484.
- [23] 银玉容. 烟曲霉胞外聚合物与水中重金属 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 的相互作用及机理[D]. 广州: 华南理工大学, 2012. 55-70.
- Yin Y R. The interaction and mechanism between heavy metals (Cu^{2+} , Cd^{2+} and Pb^{2+}) and extracellular polymeric substances produced by *Aspergillus fumigatus*[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012. 55-70.
- [24] Yin Y R, Hu Y Y, Xiong F. Biosorption properties of Cd(II), Pb(II), and Cu(II) of extracellular polymeric substances (EPS) extracted from *Aspergillus fumigatus* and determined by polarographic method [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, **185**(8): 6713-6718.
- [25] Yin Y R, Hu Y Y, Xiong F. Sorption of Cu(II) and Cd(II) by extracellular polymeric substances (EPS) from *Aspergillus fumigatus*[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2011, **65**(7): 1012-1018.
- [26] Seh-Bardan B J, Othman R, Ab Wahid S, *et al.* Column bioleaching of arsenic and heavy metals from gold mine tailings by *Aspergillus fumigatus* [J]. *Clean-Soil, Air, Water*, 2012, **40**(6): 607-614.
- [27] 尹君, 高如泰, 刘文菊, 等. 土壤酶活性与土壤 Cd 污染评价指标[J]. *农业环境保护*, 1999, **18**(3): 130-132.
- [28] Di Palma L, Petrucci E, Pietrangeli B. Environmental effects of using chelating agents in polluted sediment remediation [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2015, **94**(3): 340-344.
- [29] Lima A I G, Corticeiro S C, Figueira E M D A P. Glutathione-mediated cadmium sequestration in *Rhizobium leguminosarum* [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2006, **39**(4): 763-769.
- [30] Mirimanoff N, Wilkinson K J. Regulation of Zn accumulation by a freshwater gram-positive bacterium (*Rhodococcus opacus*) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2000, **34**(4): 616-622.
- [31] Hu Z Q, Chandran K, Grasso D, *et al.* Impact of metal sorption and internalization on nitrification inhibition[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(4): 728-734.
- [32] Cuong D T, Obbard J P. Metal speciation in coastal marine sediments from Singapore using a modified BCR-sequential extraction procedure[J]. *Applied Geochemistry*, 2006, **21**(8): 1335-1346.
- [33] Vatamaniuk O K, Mari S, Lu Y P, *et al.* Mechanism of heavy metal ion activation of phytochelatin (PC) synthase: blocked thiols are sufficient for PC synthase-catalyzed transpeptidation of

- glutathione and related thiol peptides [J]. Journal of Biological Chemistry, 2000, **275**(40): 31451-31459.
- [34] Chen S Y, Lin J G. Bioleaching of heavy metals from sediment: significance of pH [J]. Chemosphere, 2001, **44**(5): 1093-1102.
- [35] Zhang J C, Zeng G M, Chen Y N, *et al.* Effects of physico-chemical parameters on the bacterial and fungal communities during agricultural waste composting [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(3): 2950-2956.
- [36] Li N J, Zeng G M, Huang D L, *et al.* Oxalate production at different initial Pb²⁺ concentrations and the influence of oxalate during solid-state fermentation of straw with *Phanerochaete chrysosporium* [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(17): 8137-8142.
- [37] 杜瑞英, 聂呈荣, 林初夏, 等. 镉污染土壤对潜在能源植物生长的影响[J]. 生态环境, 2006, **15**(4): 735-738.
- Du R Y, Nie C R, Lin C X, *et al.* Effects of soil cadmium on the growth of two potential energy plants [J]. Ecology and Environment, 2006, **15**(4): 735-738.
- [38] Huang D L, Zeng G M, Feng C L, *et al.* Degradation of lead-contaminated lignocellulosic waste by *Phanerochaete chrysosporium* and the reduction of lead toxicity [J]. Environmental Science & Technology, 2008, **42**(13): 4946-4951.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2016年10月12日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单.《环境科学》连续15次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号.“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定.该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响.

环境科学

CONTENTS

Correlation Analysis of the Urban Heat Island Effect and Its Impact Factors in China	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3987)
Application of Satellite Remote Sensing in NO _x Emission Control	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (3998)
Control Models and Effect Evaluation of Air Pollution in Jing-Jin-Ji Urban Agglomeration	WANG Zhen-bo, LIANG Long-wu, LIN Xiong-bin, <i>et al.</i> (4005)
Pollution Characteristics of Aerosol Number Concentration in Winter and Spring in a Northern Suburb of Nanjing	WU Dan, ZHANG Fan, LIU Gang, <i>et al.</i> (4015)
Source Apportionment and Size Distribution of Aerosols at Lin'an Atmosphere Regional Background Station During Winter	SHI Shuang-shuang, WANG Hong-lei, ZHU Bin, <i>et al.</i> (4024)
Seasonal Variations in Particle Size Distribution and Water-soluble Ion Composition of Atmospheric Particles in Chengdu	TAO Yue-le, LI Qin-kai, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4034)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Quanzhou City	ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4044)
Chemical Characteristics and Sources of Heavy Metals in Fine Particles in Beijing in 2011-2012	ZHOU Xue-ming, ZHENG Nai-jia, LI Ying-hong, <i>et al.</i> (4054)
Pollution Assessment and Source Analysis of Metals in PM _{2.5} in Haicang District, Xiamen City, China	ZHAO Li-si, YU Rui-lian, XU Ling-ling, <i>et al.</i> (4061)
Characteristics and Health Risk Assessment of Metallic Elements in PM _{2.5} Fraction of Road Dust	ZHANG Jing, ZHANG Yan-jie, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4071)
Seasonal Variations in PM ₁₀ and Associated Chemical Species in Jiuxian Mountain in Fujian Province	WEI Ya, LIN Chang-cheng, HU Qing-hua, <i>et al.</i> (4077)
Characteristics of C2-C6 Hydrocarbons During the Winter Air Pollution Period in Beijing Urban Area	LI Yue, WEI Wei, YANG Gan, <i>et al.</i> (4084)
Analysis of Atmospheric Particulate Matter Pollution Characteristics by LIDAR in Beijing During Spring Festival, 2016	SHI Lin-lin, LI Ling-jun, LI Qian, <i>et al.</i> (4092)
Influence Factors and Sensitivity of Ozone Formation in Langfang in the Summer	LI Lei, ZHAO Yu-mei, WANG Xu-guang, <i>et al.</i> (4100)
Impact of Human Activities on Water-Rock Interactions in Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i> (4108)
Distinguishing the Properties and Sources of the Dissolved Organic Matter in Karst Reservoir Water During Winter Using Three-Dimensional Fluorescence Spectrum Technology: A Case Study in Wulixia Reservoir of Guangxi Province	LU Xiao-xuan, PENG Wen-jie, LI Qiang, <i>et al.</i> (4120)
Analysis of Temporal and Spatial Variations in Trace Element Migration in Karst Critical Zone: An Example of Jiguan Cave, Henan	LIANG Sha, YANG Yan, ZHANG Na, <i>et al.</i> (4130)
Eutrophication and Characteristics of Cyanobacteria Bloom in the Summer in Guishi Reservoir	GOU Ting, MA Qian-li, WANG Zhen-xing, <i>et al.</i> (4141)
Spatial and Temporal Distribution of Chlorophyll a and Its Relationship to Algae and Environmental Factors in Aha Reservoir	LUO Yi-fu, LI Lei, LI Qiu-hua, <i>et al.</i> (4151)
Spatio-temporal Variations in Phytoplankton Community in Shahe Reservoir, Tianmuhu, China	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4160)
Spatio-temporal Variations, Contamination and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in the Sediments of Chenghai Lake	YU Zhen-zhen, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (4169)
Characteristics of Phosphorus Output Through Runoff on a Red Soil Slope Under Natural Rainfall Conditions	ZUO Ji-chao, ZHENG Hai-jin, XI Tong-hang, <i>et al.</i> (4178)
Occurrence, Distribution and Health Risk of the Phthalate Esters in Riparian Soil in the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (4187)
Seasonal Distribution, Composition, and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in the Main Stream of the Luanhe River	WANG Yi-zhen, ZHANG Shi-lu, KONG Fan-qing, <i>et al.</i> (4194)
Occurrence and Human Exposure Risk Assessment of Organophosphate Esters in Drinking Water in the Weifang Binhai Economic-Technological Development Area	DONG Zheng, MA Yu-long, LI Jun-qi, <i>et al.</i> (4212)
Contamination Characteristics and Human Exposure to Organophosphate Flame Retardants in Road Dust from Suzhou City	LI Jing, WANG Jun-xia, XU Wan-ting, <i>et al.</i> (4220)
Cancer Risk of Human Intake of PAH-Contaminated Particles Based on Hand-to-Mouth Activities	TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (4228)
Spatio-temporal Evolution of Groundwater Vulnerability Based on Spatial Autocorrelation	LIU Yu, LAN Shuang-shuang, ZHANG Yong-xiang, <i>et al.</i> (4236)
Preparation of Ag-AgI/CN/MA Composites and Their Visible-light Photocatalytic Performance	ZHANG Sai, ZHANG Li-li, HU Chun (4245)
Effect of <i>Eichhornia crassipes</i> on Ammonification and Denitrification Microorganisms in Eutrophic Freshwaters	LI Jie, JIANG Li-juan, WANG Xiao-lin, <i>et al.</i> (4253)
Utilization of Copper (II) Wastewater for Enhancing the Treatment of Chromium (VI) Wastewater in Microbial Fuel Cells	XIONG Xiao-min, WU Xia-yuan, JIA Hong-hua, <i>et al.</i> (4262)
Efficiency and Microecology of a Soil Infiltration System with High Hydraulic Loading for the Treatment of Swine Wastewater	SU Cheng-yuan, LIU Fan-fan, ZHONG Yu, <i>et al.</i> (4271)
Effects of Bacteria on the Growth of and Lipid Accumulation in <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivated in Municipal Wastewater	TU Ren-jie, JIN Wen-biao, HAN Song-fang, <i>et al.</i> (4279)
Enhanced Antibiotic Resistant Bacteria Removal from Wastewater Treatment Plant by Different Disinfection Technologies	LIU Ya-lan, MA Cen-xin, DING He-zhou, <i>et al.</i> (4286)
Coking Wastewater Treatment Efficiency and Comparison of Acute Toxicity Characteristics of the AnMBR-A-MBR and A ² -MBR Processes	ZHU Jia-di, LI Fei-fei, CHEN Li-jun (4293)
Stability of the CANON Process Based on Real-Time Control Technologies	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (4302)
Improving Nitrogen and Phosphorus Removal from Reclaimed Water Using a Novel Sulfur/Iron Composite Filler	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, LIU Si-yuan, <i>et al.</i> (4309)
Start-up and Capacity Enhancement of a Partial Nitrification Pilot Reactor in Continuous Flow	ZHU Qiang, LIU Kai, DONG Shi-yu, <i>et al.</i> (4316)
Quick Start-up Performance of Combined ANAMMOX Reactor Based on Different Inoculated Sludge Types	LÜ Gang, LI Tian, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (4324)
Effect of Two-Stage Aeration on Nitrogen Removal Performance of Aerobic Granular Sludge	WANG Wen-xiao, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (4332)
Construction of a High Efficiency Anaerobic Digestion System for Vinegar Residue	ZHOU Yun-long, XU Zhi-yang, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (4340)
Comparision of Ecological Risk Assessment Based on the Total Amount and Speciation Distribution of Heavy Metals in Soil: A Case Study for Longyan City, Fujian Province	WANG Rui, CHEN Ming, CHEN Nan, <i>et al.</i> (4348)
Heavy Metal Contamination of Soils and Crops near a Zinc Smelter	CHEN Feng, DONG Ze-qin, WANG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4360)
Characteristics and Influencing Factors of CH ₄ Emissions from the Drawdown Area of the Three Gorges Reservoir	CHAI Xue-si, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (4370)
Effects of Plastic Film Mulching on Nitrous Oxide Emissions from a Vegetable Field	FENG Di, HAO Qing-ju, ZHANG Kai-li, <i>et al.</i> (4380)
Effects of Bamboo Biochar on Greenhouse Gas Emissions During the Municipal Sludge Composting Process	XIANG Qiu-jie, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4390)
Removal of Cd from Soil by <i>Aspergillus fumigatus</i> in a Semi-solid Culture	CHEN Yao-ning, WANG Yuan-nan, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4398)
Removal of Chlortetracycline and Morphological Changes in Heavy Metals in Swine Manure Using the Composting Process	WEN Qin-xue, CAO Yong-sen, CHEN Zhi-qiang (4405)
Remediation of Petroleum-Contaminated Soil Using a Bioaugmented Compost Technique	WU Man-li, CHEN Kai-li, YE Xi-qiong, <i>et al.</i> (4412)
Effects of Microbial Diversity on Soil Carbon Mineralization	AN Li-yun, LI Jun-jian, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4420)
Ozone Deposition and Risk Assessment for a Winter Wheat Field; Partitioning Between Stomatal and Non-stomatal Pathways	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (4427)
Progress in the Studies of Precipitation Chemistry in Acid Rain Areas of Southwest China	ZHOU Xiao-de, XU Zhi-fang, LIU Wen-jing, <i>et al.</i> (4438)