

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第11期

Vol.33 No.11

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

京津冀与长三角区域大气 NO ₂ 污染特征	王英, 李令军, 刘阳 (3685)
2008~2011 年夏季京津冀区域背景大气污染变化分析	杨俊益, 辛金元, 吉东生, 朱彬 (3693)
沧州市大气污染特征观测研究	王永宏, 胡波, 王跃思, 刘伟, 张武 (3705)
华北工业城市降水中金属元素污染特征及来源	李月梅, 潘月鹏, 王跃思, 王英锋, 李杏茹 (3712)
广州市交通主干道空气中苯系物的测量	叶丛雷, 谢品华, 秦敏, 凌六一, 郑尼娜, 刘文彬, 黄祖照 (3718)
基于实时交通信息的道路机动车动态排放清单模拟研究	黄成, 刘娟, 陈长虹, 张健, 刘登国, 朱景瑜, 黄伟明, 巢渊 (3725)
柴油轿车燃用煤基 F-T 合成油的排放特性	胡志远, 程亮, 谭丕强, 楼狄明 (3733)
九龙江口滨海湿地生源要素空间分布特征	余小青, 杨军, 刘乐冕, 田原, 余正, 王昌付 (3739)
南四湖水体氮、磷营养盐时空分布特征及营养状态评价	舒凤月, 刘玉配, 赵颖, 吴艳鹏, 李爱华 (3748)
天目湖流域湿地对氮磷输出影响研究	李兆富, 刘红玉, 李恒鹏 (3753)
北京市新建城区不透水地表径流 N、P 输出形态特征研究	李立青, 吕书丛, 朱仁肖, 刘泽权, 单保庆 (3760)
云阳宗海库的分布与来源	张玉玺, 向小平, 张英, 陈玺, 刘景涛, 王金翠, 张媛静, 孙继朝 (3768)
南方某城市地表水体中粪源性污染指示微生物的分布特征研究	孙傅, 沙婧, 刘彦华 (3778)
三峡库区大宁河藻细胞昼夜垂直迁移研究	张永生, 郑丙辉, 姜霞, 郑浩, 钟娜, 陈春宵 (3787)
江淮农村生态型排水系统构建及截污作用研究	单保庆, 李楠, 唐文忠 (3797)
人工湿地植物床-沟壕系统水质净化效果	汪仲琼, 张荣斌, 陈庆华, 魏宏斌, 王为东 (3804)
潜流人工湿地演变对废水中有机物、氮及磷去除的影响	魏泽军, 谢建平, 黄玉明 (3812)
人工湿地处理含盐生活污水的特性研究	高峰, 杨朝晖, 李晨, 金卫红, 邓一兵 (3820)
催化湿式氧化法降解水中的 β -萘酚	刘杰, 于超英, 赵培庆, 陈革新 (3826)
ZVI/EDDS/Air 体系降解水中 2,4-二氯酚的研究	孙倩, 周海燕, 曹梦华, 吴琳娜, 王琳玲, 陈静, 陆晓华 (3833)
微波改性 MWNTs/TiO ₂ 复合材料对 1,2,3-三氯苯的光催化降解研究	施周, 张茜, 张伟, 徐舜开, 张骅 (3840)
腐殖酸对生物炭去除水中 Cr(VI) 的影响机制研究	丁文川, 田秀美, 王定勇, 曾晓岚, 徐茜, 陈健康, 艾小雨 (3847)
臭氧氧化-活性污泥法处理含 PVA 工业废水的试验研究	邢晓琼, 黄程兰, 刘敏, 陈滢 (3854)
复合底物对颗粒化 EBPR 系统除磷特性的影响及优化试验研究	徐少娟, 孙培德, 郑雄柳, 董毅 (3859)
进水比例对水解反应器出水水质的影响研究	梁康强, 熊娅, 戚茂荣, 林秀军, 朱民, 宋英豪 (3868)
厌氧-好氧联合型生物反应器填埋场渗滤液水质水量变化规律的研究	韩智勇, 刘丹, 李启彬, 陈馨 (3873)
我国城市污水处理回用调查研究	郭宇杰, 王学超, 周振民 (3881)
快雌醇和壬基酚在土壤中的吸附-解吸特征	姜鲁, 王继华, 李建忠, 辛佳, 李森, 刘翔 (3885)
黄土丘陵区刺槐林深层土壤有机碳矿化特征初探	马昕昕, 许明祥, 杨凯 (3893)
半干旱黄土丘陵区土壤结皮的地表水文效应	卫伟, 温智, 陈利顶, 陈瑾, 吴东平 (3901)
广西大石围巨型漏斗土壤中多环芳烃与环境因素	孔祥胜, 祁士华, 蒋忠诚, 黄保健 (3905)
酸性条件下黄铁矿氧化机制的研究	王楠, 易筱筠, 党志, 刘云 (3916)
淋洗条件下砂土和粉土盐运移过程的监测研究	付腾飞, 贾永刚, 郭磊, 刘晓磊 (3922)
空气注射修复苯污染地下水模拟研究	樊艳玲, 姜林, 张丹, 钟茂生, 贾晓洋 (3927)
不同终点检测 5 种双酚 A 类化合物对 MCF-7 的细胞毒性	张帅帅, 刘堰, 刘树深, 朱祥伟 (3935)
上海世博园后滩湿地桤木类群落特征及其对环境因子的响应	陈立婧, 吴艳芳, 景钰湘, 王聪, 张饮江 (3941)
耐盐石油降解菌的筛选鉴定及其特性研究	吴涛, 谢文军, 依艳丽, 李小彬, 王君, 胡相明 (3949)
高效降酚菌株 <i>Ochrobactrum</i> sp. CH10 生长动力学和苯酚降解特性的研究	陈晓华, 魏刚, 刘思远, 孙江曼, 王芳芳, 李昊源, 刘宇军 (3956)
四溴双酚 A 好氧降解菌的筛选及其降解特性研究	钱艳园, 刘莉莉, 于晓娟, 丁丛, 王志平, 施玉衡, 李晨君 (3962)
长期施用有机和无机肥对黑土 <i>nirS</i> 型反硝化菌种群结构和丰度的影响	尹昌, 范分良, 李兆君, 宋阿琳, 朱平, 彭畅, 梁永超 (3967)
三氯乙烯在不同土壤中的吸附特性及其影响因素研究	何龙, 邱兆富, 吕树光, 逯志昌, 王治立, 隋倩, 林匡飞, 刘勇弟 (3976)
多菌灵在农田土壤中的降解及其影响因素研究	肖文丹, 杨肖娥, 李廷强 (3983)
硫化物对垃圾焚烧污泥焚烧飞灰高温过程中重金属挥发的影响	刘敬勇, 孙永裕 (3990)
关于医疗垃圾飞灰中二噁英在惰性气氛下的低温热脱附研究	纪莎莎, 李晓东, 徐旭, 陈彤 (3999)
第七届环境模拟与污染控制学术研讨会论文	
稻田气溶胶 NH ₃ 和气体 NO _x 排放在线测定研究	龚巍巍, 栾胜基 (4006)
一种可同时检测挥发性氯代烷烃和氯代烯烃的电子鼻的研制	文晓刚, 刘锐, 蔡强, 万梅, 汤灵容, 陈吕军 (4012)
基于被动采样技术的垃圾焚烧厂及周边大气中 PAHs 分布研究	孙少艾, 李洋, 周轶, 王海蛟, 孙英 (4018)
涪江流域农业非点源污染空间分布及污染源识别	丁晓雯, 沈珍瑶 (4025)
人工湿地不同区域基质磷含量的差异分析	曹雪莹, 种云霄, 余光伟, 仲海涛 (4033)
基于 RT-qPCR 选择性检测水中活性病原菌	林怡雯, 李丹, 吴舒旭, 何苗, 杨天 (4040)
消毒副产物生成的温度影响和动力学模型	张小璐, 杨宏伟, 王小仵, 付静, 解跃峰 (4046)
一种厌氧微观定量研究新方法	张仲良, 吴静, 蒋剑凯, 姜洁, 李怀志 (4052)
梧桐树叶作为反硝化碳源的研究	熊剑锋, 徐华, 阎宁, 张永明 (4057)
降解嗜盐菌 AD-3 的筛选、降解特性及加氧酶基因的研究	崔长征, 冯天才, 于亚琦, 董斐, 杨昕梅, 冯耀宇, 刘勇弟, 林汉平 (4062)
《环境科学》征订启事 (3711) 《环境科学》征稿简则 (3767) 信息 (3998, 4039, 4045, 4056) 专辑征稿通知 (4051)	

多菌灵在农田土壤中的降解及其影响因子研究

肖文丹, 杨肖娥*, 李廷强

(浙江大学环境与资源学院污染环境修复与生态健康教育部重点实验室, 杭州 310058)

摘要: 采用实验室模拟方法, 研究了微生物、含水量和 Cd 对土壤中多菌灵降解动态的影响. 结果表明, 土壤中多菌灵 ($5.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $10.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的降解半衰期在灭菌条件下为灭菌条件下的 12.6 ~ 13.8 倍; 复合降解菌群 (枯草杆菌、副球菌、黄杆菌和假单胞菌) 的加入显著缩短了土壤中多菌灵的降解半衰期 (32.1% ~ 37.1%); 当土壤含水量由 40% 田间持水量提高到 60% 或 80% 田间持水量, 多菌灵降解半衰期缩短 46.2% 或 74.0%; 低浓度 Cd ($5.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的加入显著缩短了土壤中多菌灵的降解半衰期 (32.1% ~ 52.4%), 而高浓度的 Cd ($50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 延长多菌灵的降解半衰期 (92.6% ~ 103.0%); 对添加复合降解菌群的土壤, 低浓度 Cd ($5.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的加入同样显著缩短了土壤中多菌灵的降解半衰期 (34.0% ~ 34.4%), 高浓度的 Cd ($50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 延长多菌灵的降解半衰期 (74.4% ~ 109.4%). 研究表明, 土著微生物在多菌灵降解过程中发挥重要的作用, 多菌灵降解菌群、较高的土壤湿度和低浓度的 Cd 也促进了土壤中多菌灵的降解.

关键词: 多菌灵; 降解动态; 多菌灵降解菌; 土壤含水量; Cd

中图分类号: X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2012)11-3983-07

Degradation of Carbendazim in Paddy Soil and the Influencing Factors

XIAO Wen-dan, YANG Xiao-e, LI Ting-qiang

(Key Laboratory of Environment Remediation and Ecological Health, Ministry of Education, College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The influences of microorganism, soil moisture and cadmium (Cd) on degradation of carbendazim in paddy soil were investigated with laboratory microcosm experiments. The results showed that the half-life of carbendazim ($5.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $10.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) in sterilized soils was 12.6-13.8 times of those in non-sterilized soils. The half-life of carbendazim was decreased by 32.1%-37.1% when the soils were inoculated with carbendazim-degrading strains. When the soil moisture was increased from 40% to 60% or 80% of water holding capacity, the half life of carbendazim was decreased by 46.2% or 74.0%, respectively. Low level of Cd ($5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) enhanced the degradation of carbendazim in soils with half-life time decreased by 32.1%-52.4%, but high level of Cd ($50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) inhibited the degradation of carbendazim in soils with half-life time increased by 92.6%-103.0%. For the soils inoculated with carbendazim-degrading strains, the half life of carbendazim was decreased by 34.0%-34.4% with the addition of low level of Cd ($5.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), while the half life time was increased by 74.4%-109.4% with the addition of high level of Cd ($50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). The results demonstrate that indigenous microorganisms is a critical factor that influences carbendazim degradation in soils, and that carbendazim-degrading strains, high soil moisture and low Cd level enhance the degradation of carbendazim.

Key words: carbendazim; degradation; carbendazim degrading bacteria; soil moisture; cadmium

多菌灵 (carbendazim, MBC), 化学名称为苯并咪唑-2-氨基甲酸甲酯, 是一种高效低毒的广谱内吸性杀菌剂. 自 20 世纪 70 年代中期, 其迅速代替有机汞、有机硫杀菌剂, 被广泛应用于水稻、棉花、蔬菜、果树和药材等由半知菌和多子囊菌等真菌引起的病害防治^[1]. 同时, 多菌灵还是许多苯并咪唑类杀菌剂的主要水解产物和有效成分^[2].

农业生产中, 多菌灵通常是重复多次使用, 特别是在设施蔬菜生产过程中, 由于病害多发、高发, 多菌灵使用量大且施用频率高^[3]. 多菌灵可从土壤中或直接喷洒进入蔬菜和作物体内, 并且在动物饲料中广泛使用, 通过动物体进入人体而导致组织病变^[4]. 已有研究表明, 多菌灵能够干扰哺乳动物的内分泌, 并对精母细胞的减数分

裂产生影响^[5,6].

施入土壤中的农药和除草剂在土壤中的降解和残留除与本身的性质有关外, 还与土壤理化性质、土壤微生物和环境因子有密切的关系^[7]. 多菌灵化学性质稳定, 在土壤中的降解半衰期与土壤类型和初始浓度有关, 为几天到几个月不等^[8~10]. 土壤中存在着的丰富的微生物群落, 对土壤中多菌灵的降解发挥了重要作用, 农药的微生物分解是其在环境中降解消除的一个重要途径^[11]. 目前已报道的多菌灵降解菌有假单胞菌 *Pseudomonas* sp.^[12]、芽孢

收稿日期: 2011-12-18; 修订日期: 2012-05-23

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2009AA06Z316)

作者简介: 肖文丹 (1987 ~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为环境修复, E-mail: Wendan.Xiao@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: xyang571@yahoo.com

杆菌 *Bacillus pumilus*^[13]、红球菌 *Rhodococcus* sp.^[14]、罗尔斯通氏菌 *Ralstonia* sp.^[15] 和木霉菌株 *Trichoderma* sp.^[16]。但是,目前关于功能菌群降解土壤中多菌灵的研究还比较少。改变土壤环境,选择有利于多菌灵降解的环境条件是促进多菌灵的降解,缩短其在土壤中滞留期的行之有效的方法。多菌灵在土壤中的降解速率随着土壤 pH 值升高而增加^[17]。但是,针对大范围的土壤,pH 等环境条件不易改变,而含水量较易调控。目前并未有报道指明含水量是如何影响土壤中多菌灵降解的。由于农田土壤中农药大量施用^[18]以及污水、污泥灌溉的广泛应用^[19],多菌灵和 Cd 复合污染越来越严重,污染土壤的范围越来越广^[20],研究 Cd 对多菌灵降解的影响迫在眉睫。本研究利用高效液相色谱分析技术,在分析不同土壤中多菌灵降解动态变化的基础上,阐明了土著微生物、降解菌群、土壤含水量以及 Cd 对多菌灵降解的影响,以期为进一步降低其在土壤中的残留提供依据。

1 材料与方法

1.1 反应试剂与仪器

1.1.1 反应试剂

甲醇为 HPLC 级,多菌灵标准品($\geq 99.5\%$)购自农业部农药检定所,实验所需溶液均由 Millipore Milli-Q 超纯水系统(美国)出水(18.2 M Ω)配制。

1.1.2 实验仪器

Agilent 1200 液相色谱仪;LRH-250 生化培养箱(上海一恒科技有限公司);HZ-9211K 型控温振荡器(太仓市科教器材厂);BUCHI R200 旋转蒸发器;超声萃取仪(上海科导超声仪器有限公司);YXQ-LS-50 高压灭菌锅(上海博讯实业有限公司医疗设备厂);减压抽滤装置(巩义市英峪予华仪器厂);BYK FD-1 冷冻干燥机;Millipore Milli-Q 超纯水系统等。

1.2 供试土壤

采集浙江大学华家池校区试验田 0~20 cm 的新鲜土样,土样经风干,除去植物残根和石砾等杂物,过 2 mm 筛备用。试验田没有多菌灵的使用历史,土壤的理化性质见表 1。

1.3 供试菌株

本实验选用浙江大学农药与环境毒理研究所分离的多菌灵降解菌来研究其对多菌灵降解动态的影响。该降解菌为复合菌群,其中四大优势菌分别为枯草杆菌 *Bacillus subtilis*、副球菌 *Paracoccus* sp.、黄杆菌 *Flavobacterium* 和假单胞菌 *Pseudomonas* sp. CBW。此复合菌能利用多菌灵为唯一碳源进行生长,在 5 d 内对无机盐培养基内的多菌灵(10 mg·L⁻¹)的降解率达到 99.6%。菌悬液的制备为将多菌灵降解菌接种在 LB 液体培养基中,在 30℃,200 r·min⁻¹ 摇床培养至对数生长后期,4 000 r·min⁻¹ 离心收集菌体并用磷酸缓冲液洗涤 3 次,再用磷酸缓冲液重悬菌体至所需浓度。

表 1 土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the soil used in this study

pH (H ₂ O)	有机质/mg·kg ⁻¹	阳离子交换量/cmol·kg ⁻¹	总氮/g·kg ⁻¹	总磷/g·kg ⁻¹	总钾/g·kg ⁻¹	总隔/mg·kg ⁻¹
5.3 ± 0.03	19.87 ± 0.35	14.66 ± 0.03	1.77 ± 0.02	4.15 ± 0.11	1.58 ± 0.02	1.10 ± 0.01

1.4 多菌灵测定方法

称取 5 g 土样于 100 mL 具塞三角瓶中,加入 20 mL 甲醇振荡 2 h,超声 30 min,用布氏漏斗抽滤,再用 5 mL 甲醇洗涤残渣 3 次,合并滤液于 250 mL 旋蒸瓶中,置于 50℃ 水浴上浓缩至近干,用甲醇定容至 5 mL,待 HPLC 检测。

HPLC 检测条件:Eclipse XDB-C18 柱[4.6 mm (id) × 150 mm],粒径 5 μm;流动相:甲醇:水(35:65);流速:0.8 mL·min⁻¹;检测波长:281 nm;进样量:10 μL;柱温:室温;多菌灵保留时间约 2.7 min。

多菌灵添加回收率:为了检测土壤样品中多菌灵提取方法的可靠性,向无多菌灵的土样中分别添加 1.0 和 10 mg·kg⁻¹ 的多菌灵,每个浓度设 3 个重

复,同时做空白实验,测定多菌灵的回收率。回收率 = 加标试样测定值/加标量 × 100%。

1.5 实验设计

1.5.1 微生物对多菌灵降解动态的影响

称取 150 g 干土于塑料盆中,土壤中多菌灵的添加浓度为低浓度(5.0 mg·kg⁻¹)和高浓度(10.0 mg·kg⁻¹),每个浓度设置 3 组,分别为:①灭菌土;②非灭菌土,加入灭活降解菌剂;③非灭菌土,加入降解菌剂。灭菌土壤需在 121℃,1.1 kg·cm⁻² 压力下间歇灭菌 3 次,每次灭菌 30 min,降解菌剂的加入量为 10⁸ CFU·g⁻¹,每个处理设 3 个重复。加入适量无菌水,使土壤含水量为田间持水量的 60%,用开有内径 1 mm 的 5 个小孔的锡箔纸覆盖塑料盆,于

人工气候箱(25 ± 1)℃ 黑暗培养,培养土壤期间每天调节水分,使土壤含水量保持恒定,药剂处理后 1、3、7、14、21 和 28 d 取样测定土壤中多菌灵的残留量.

1.5.2 含水量对多菌灵降解动态的影响

在 2 个浓度多菌灵 (5.0 mg·kg⁻¹ 和 10.0 mg·kg⁻¹) 的土壤中,各加入一定的水分,调节土壤含水量分别为田间持水量的 40%、60% 和 80%,每个处理设 3 个重复. 用开有内径 1 mm 的 5 个小孔的锡箔纸覆盖塑料盆,于人工气候箱(25 ± 1)℃ 黑暗培养,其余步骤同 1.5.1 节.

1.5.3 Cd 对多菌灵降解动态的影响

在 2 个浓度多菌灵 (5.0 mg·kg⁻¹ 和 10.0 mg·kg⁻¹) 的土壤中,按照添加 Cd 的浓度以及是否加入有活性的多菌灵降解菌设置为 6 组,分别为:① Cd 本底,无外源添加 Cd,加入灭活降解菌;② 土壤中 Cd 添加浓度为 5.0 mg·kg⁻¹,加入灭活降解菌;③ 土壤中 Cd 添加浓度为 50.0 mg·kg⁻¹,加入灭活降解菌;④ Cd 本底,无外源添加 Cd,加入多菌灵降解菌;⑤ 土壤中 Cd 添加浓度为 5.0 mg·kg⁻¹,加入多菌灵降解菌;⑥ 土壤中 Cd 添加浓度为 50.0 mg·kg⁻¹,加入多菌灵降解菌. 加入适量无菌水,使

土壤含水量为田间最大持水量的 60%,每个处理设 3 个重复. 用开有内径 1 mm 的 5 个小孔的锡箔纸覆盖塑料盆,于人工气候箱(25 ± 1)℃ 黑暗培养,其余步骤同 1.5.1 节.

2 结果与分析

2.1 多菌灵添加回收率

多菌灵在土壤中的平均添加回收率和变异系数见表 2. 多菌灵在土壤中的添加浓度分别为 1.0 mg·kg⁻¹和 10.0 mg·kg⁻¹,测得的平均添加回收率为 86.1% ~ 92.5%,变异系数为 2.4% ~ 2.9%,最低检测限为 0.1 mg·kg⁻¹,数据表明土壤中多菌灵的提取方法符合农药残留分析的要求.

表 2 多菌灵在土壤中的添加回收率和变异系数

Table 2 Recovery and variation coefficient of carbendazim spiked in soil		
添加水平/mg·kg ⁻¹	平均回收率/%	变异系数/%
1.0	86.1	2.4
10.0	92.5	2.9

2.2 微生物对土壤中多菌灵降解动态的影响

灭菌、非灭菌(加灭活降解菌)和非灭菌(加降解菌)土壤中多菌灵(5 mg·kg⁻¹和 10 mg·kg⁻¹)的降解特征如图 1 所示,灭菌土壤中多菌灵降解非常

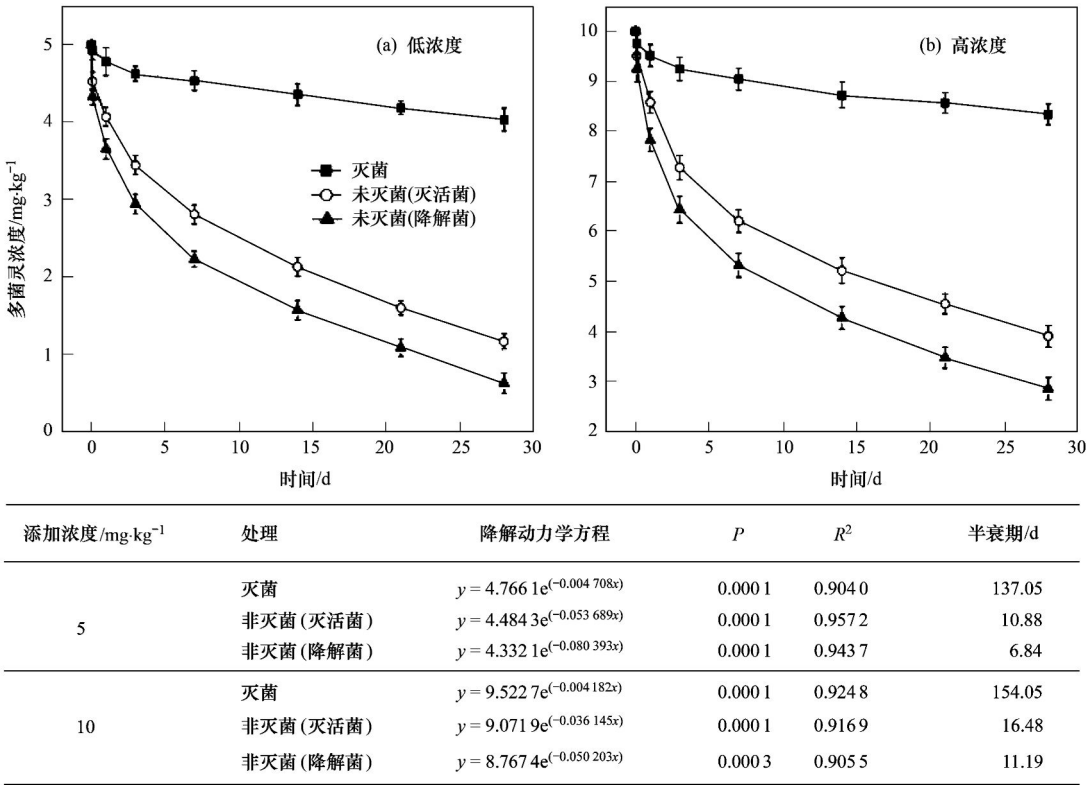


图 1 微生物对土壤中多菌灵降解动态的影响
Fig. 1 Effects of microorganisms on the degradation of carbendazim in soil

缓慢,非灭菌土壤中的多菌灵降解明显快于灭菌土壤,而且添加多菌灵降解菌会促进多菌灵的降解. 处理 28 d 后,低浓度 3 个处理土壤中多菌灵的降解率分别为 19.4%、76.6% 和 87.6%,高浓度 3 个处理土壤中多菌灵的降解率分别为 16.7%、60.9% 和 71.4%. 多菌灵在土壤中前期降解较快,后期降解较慢,对图 1 中多菌灵的降解动态进行回归分析表明,多菌灵的降解动态符合一级反应动力学方程 $c = c_0 e^{-kt}$. 灭菌条件下,多菌灵 ($5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 降解半衰期为非灭菌(加灭活降解菌)的 12.6 ~ 13.8 倍. 加入有活性的多菌灵降解菌之后,多菌灵 ($5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 降解半衰期与加灭活降解菌的处理比较,分别缩短了 37.1% 和 32.1%,降解菌显著地加快了土壤中多菌灵的降解.

2.3 含水量对土壤中多菌灵降解动态的影响

在含水量分别为 40%、60% 和 80% 田间持水量的土壤中多菌灵 ($5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的降解特征如图 2 所示. 28 d 后,3 个不同含水量的土壤中,多菌灵 ($5.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的降解率分别为 63.0%、76.7% 和 95.0%,并且多菌灵 ($10.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的降解率分别为 54.4%、60.9% 和 70.6%,随着含水量的提高,2 个浓度的多菌灵在土壤中的降解速度均加快. 对图 2 中多菌灵的降解动态进行回归分析表明,多菌灵的降解动态符合一级反应动力学方程 $c = c_0 e^{-kt}$. 在含水量分别为 40%、60% 和 80% 田间持水量的土壤中,随着含水量的提高,土壤中多菌灵 ($5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的降解半衰期分别降低了 74.0% 和 46.2%. 由此可以得出,在一定的土壤湿度范围内,随着湿度增高,多菌灵在土壤中的降解速度加快.

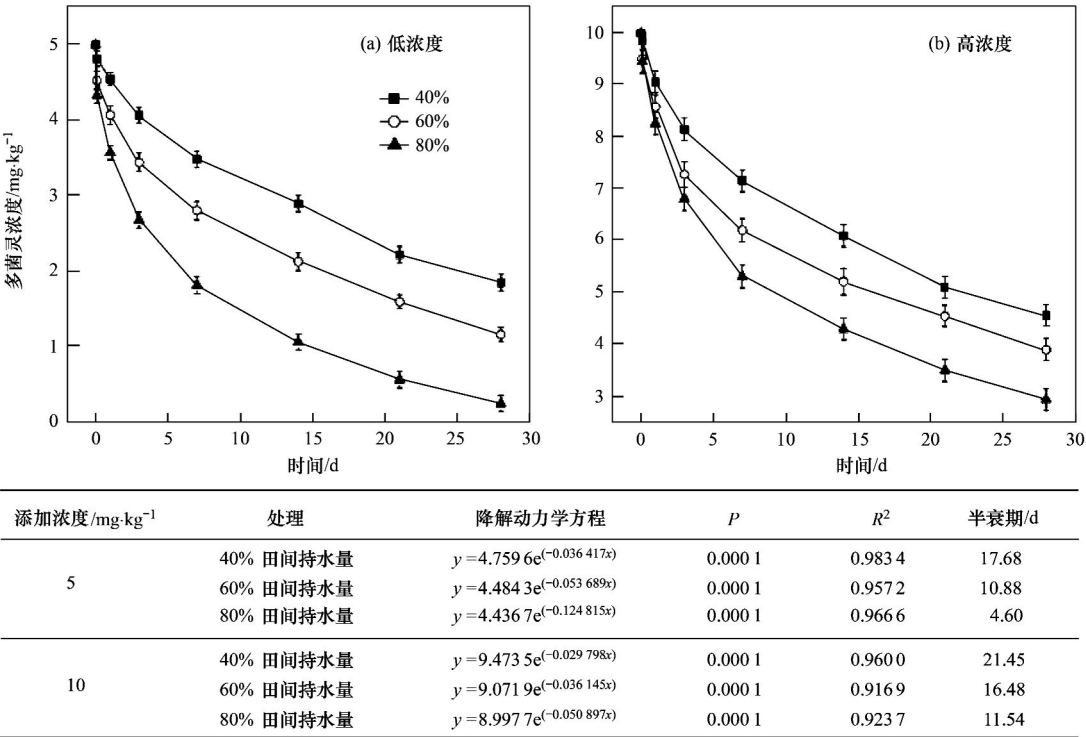


图 2 含水量对土壤中多菌灵降解动态的影响
Fig. 2 Effects of soil moisture on the degradation of carbendazim in soil

2.4 Cd 对土壤中多菌灵降解动态的影响

在添加不同浓度 Cd (0 、 5 和 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的土壤中多菌灵的降解特征如图 3 所示. 28 d 后,在添加灭活降解菌、不同浓度 Cd (0 、 5 和 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的土壤中,多菌灵 ($5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的降解率分别为 76.6%、92.4% 和 52.9%,多菌灵 ($10.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的降解率分别为 61.0%、71.7% 和 42.2%,土壤中加入有活性的多菌灵降解菌后,在不同浓度 Cd (0 、

5 和 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的土壤中,多菌灵 ($5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的降解率分别为 87.5%、97.4% 和 64.8%,多菌灵 ($10.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的降解率分别为 71.4%、82.7% 和 56.0%. 表明低浓度的 Cd ($5.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 促进多菌灵的降解,而高浓度的 Cd ($50.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 抑制多菌灵的降解. 对图 3 中多菌灵的降解动态进行回归分析表明,多菌灵的降解动态符合一级反应动力学方程 $c = c_0 e^{-kt}$. 在加入灭活降解菌的土壤中,Cd5 处

理与未添加 Cd 的处理相比,多菌灵 ($5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 降解半衰期分别缩短了 52.4% 和 32.1%,但是 Cd50 处理中多菌灵 ($5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 降解半衰期比未添加 Cd 的处理分别增加了 103.0% 和 92.6%。在加入有活性的多菌灵降解菌的土壤中,Cd5 处理与未添加 Cd 的处理相比,多

菌灵 ($5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 降解半衰期分别缩短了 34.4% 和 34.0%,但是 Cd50 处理中多菌灵 ($5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 降解半衰期比未添加 Cd 的处理分别增加了 109.4% 和 74.4%。由此可见,低浓度的 Cd 促进多菌灵在土壤中降解,而高浓度的 Cd 抑制了多菌灵在土壤中的降解。

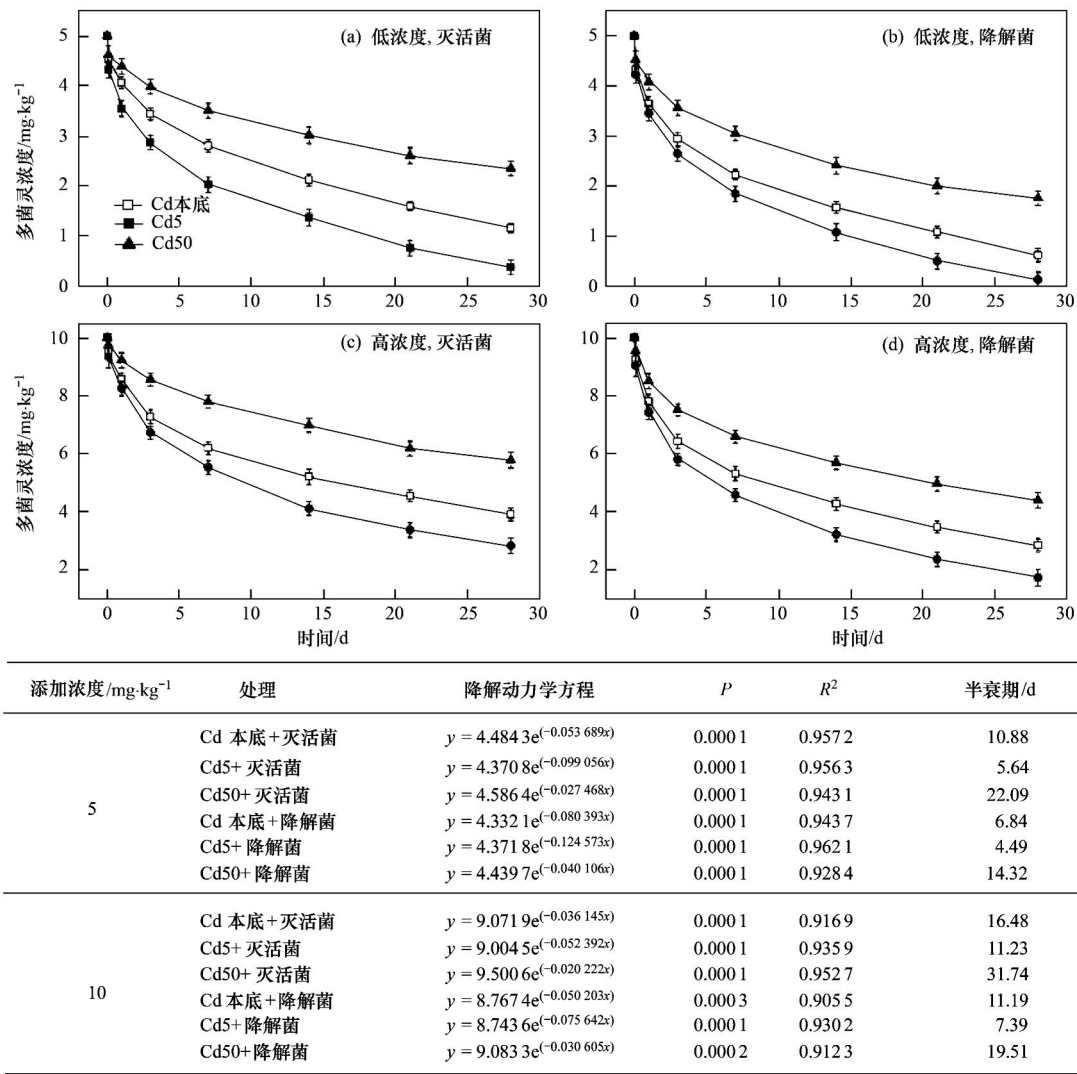


图3 Cd 对土壤中多菌灵降解动态的影响
Fig. 3 Effects of Cd on the degradation of carbendazim in soil

3 讨论

3.1 微生物对土壤中多菌灵降解动态的影响

多菌灵在土壤中的降解主要是微生物降解,降解产物主要为2-氨基苯并咪唑和邻苯二胺^[21,22]。多菌灵的降解途径如图4所示,首先降解成2-氨基苯并咪唑,然后迅速转化成2-羟基苯并咪唑,此后咪唑环打开进一步生成邻苯二胺^[12,22],多菌灵的微生物降解过程属于矿化作用,其过程包括水解、羟基

化、开环等作用方式。前面研究可知,微生物能加快土壤中的多菌灵的降解,使多菌灵在土壤中的滞留时间变短,持效性降低。土壤微生物量及其微生物代谢活性的高低直接决定了土壤中残留农药的多少^[10]。朱九生等^[23]研究发现微生物的存在能加快土壤中乙草胺的降解,灭菌土壤中乙草胺的降解半衰期为非灭菌土壤的4~9倍。郑丽英等^[24]也发现微生物对土壤中双草醚的降解速度有显著影响,能加快土壤中双草醚的降解,使土壤中双草醚的滞留

时间变短,灭菌土壤中双草醚的降解半衰期为非灭菌土壤中双草醚降解半衰期的 5~7 倍。

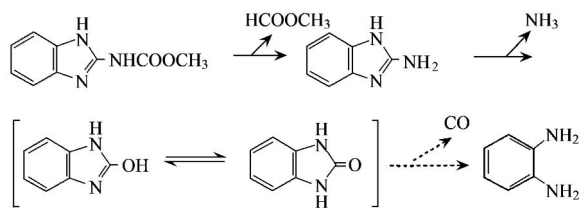


图 4 多菌灵降解途径

Fig. 4 Degradation pathway of carbendazim

外源添加降解菌可以显著地加快土壤中多菌灵的降解^[12,25,26],实验施用的复合菌群能有效地降解土壤中的多菌灵,并且已有报道指出复合菌群中的假单胞菌属 *Pseudomonas* sp. 和枯草杆菌属 *Bacillus subtilis* 能有效降解土壤中的多菌灵^[12,13]。在假单胞菌 *Pseudomonas* sp. 的作用下,多菌灵被降解成邻苯二胺与邻苯二酚,中间产物主要为 2-氨基苯并咪唑和 2-羟基苯并咪唑^[12]。复合菌群可通过群落之间的代谢协同作用迅速降解农药等有机污染物,相对于单一菌群,也更易于在污染环境中成为优势群体^[27]。

本实验表明,高浓度多菌灵 ($10.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的半衰期显著长于低浓度多菌灵 ($5.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的半衰期,这可能是由于高浓度的多菌灵抑制了土壤微生物的活性,降低了土壤微生物的数量^[28],因此土壤中高浓度多菌灵降解比低浓度的要慢。

3.2 含水量对多菌灵降解动态的影响

根据前面研究,在一定的土壤湿度范围内,随着湿度提高,多菌灵在土壤中降解速度加快。朱九生等^[23]也研究发现,在一定的土壤湿度范围内,随着湿度增高,乙草胺的降解速度加快,在土壤中的半衰期变短。分析原因可能是,合适的土壤湿度有利于土壤微生物的生长和繁殖,从而促进农药的生物降解^[29]。同时,在土壤环境中,土壤湿度可以改变土壤的孔隙度、氧化还原电位、药物的溶解性以及药物和土壤的吸附作用等^[30],这些对农药的降解也可能有一定的影响。多菌灵的微生物降解过程包括水解、羟基化、开环等作用方式,当土壤湿度提高的时候,溶于水中的多菌灵也随之增加,水中的 OH^- 等氧化基团因光照也随之增加从而使多菌灵的降解速率加快^[31]。

3.3 Cd 对多菌灵降解动态的影响

研究结果表明,无论是否加入多菌灵降解菌,低浓度的 Cd ($5.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 均加快土壤中多菌灵的降

解,而高浓度的 Cd ($50.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 减缓土壤中多菌灵的降解。有报道指出,微量 Cd^{2+} 对细菌具有促进生长的作用,当 Cd^{2+} 质量浓度增加到 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,开始明显抑制细菌的生长^[32]。因此, Cd 对多菌灵降解的影响可能与土壤微生物有关,低浓度的 Cd 促进土壤微生物的生长,进而加快土壤中多菌灵的降解,而高浓度的 Cd 抑制土壤微生物的生长,从而导致土壤中多菌灵的降解减缓。另外, Cd 对多菌灵在土壤中吸附解吸的影响,也可能导致土壤中多菌灵降解速度变化。Li 等^[20]研究发现,在 Cd 与多菌灵共存的情况下, Cd 促进了土壤中多菌灵的吸附,并且在 Cd $5 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的范围内,随着 Cd 浓度的提高,对多菌灵吸附的促进作用越显著,因而有可能导致土壤中多菌灵的降解减缓。

土壤中的土著微生物和本实验选用多菌灵降解菌对 Cd 有一定抗性,在 Cd ($5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 处理下,多菌灵的降解速度提高,因此在多菌灵与重金属复合污染的土壤中,筛选对重金属有耐性的多菌灵降解菌,对多菌灵修复至关重要。Pepper 等^[33]筛选对 Cd 有抗性的氯代苯甲酸降解菌来修复氯代苯甲酸和 Cd 复合污染土壤。在低浓度 Cd 和多菌灵复合污染的土壤中, Cd 促进多菌灵的降解,并且在加入多菌灵降解菌进行强化修复时,多菌灵降解速度进一步加快,所以在低浓度 Cd 和多菌灵复合污染的土壤中,土壤修复的重点应放在 Cd 上面。然而,在高浓度 Cd 和多菌灵复合污染的土壤中, Cd 抑制多菌灵的降解,多菌灵降解减缓,所以 Cd 与多菌灵的修复都应重视。

4 结论

研究结果表明土壤微生物、土壤湿度和土壤中 Cd 浓度对多菌灵的降解均有不同程度的影响。在所有处理中,灭菌土壤和未灭菌土壤比较,多菌灵的降解半衰期变化最大,所以土壤微生物是影响多菌灵降解的主要因素,在多菌灵的降解中占有首要地位。实验选用的多菌灵降解菌-复合功能菌群也能有效地降解土壤中多菌灵,对多菌灵的降解也有显著的促进作用。对土壤微生物生长、繁殖以及代谢活性有影响的环境因子也是影响多菌灵降解的重要因素。如较高的土壤湿度和低浓度的 Cd 对土壤微生物生长有促进作用并能增强其活性,进而促进了土壤中多菌灵的降解,反之则抑制。

致谢:浙江大学农药与环境毒理研究所虞云龙课题组为本研究提供多菌灵降解菌,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 朱凤晓, 孔洁, 由焦化, 等. 高效复合菌对多菌灵的生物降解[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(5): 1045-1050.
- [2] Boudina A, Emmelin C, Baahiouamer A, *et al.* Photochemical behaviour of carbendazim in aqueous solution[J]. Chemosphere, 2003, **50**(5): 649-655.
- [3] Yu Y L, Chu X Q, Pang G H, *et al.* Effects of repeated applications of fungicide carbendazim on its persistence and microbial community in soil [J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, **21**(2): 179-185.
- [4] Reisinger K, Szigeti J, Varnagy L. Determination of carbendazim residues in the eggs, liver and pectoral muscle of Japanese quail (*Coturnix coturnix japonica*) [J]. Acta Veterinaria Hungarica, 2006, **54**(1): 127-133.
- [5] Akbarsha M A, Kadalmani B, Giriya R, *et al.* Spermatotoxic effect of carbendazim [J]. Indian Journal of Experimental Biology, 2001, **39**(9): 921-924.
- [6] Singhal L K, Bagga S, Kumar R, *et al.* Down regulation of humoral immunity in chickens due to carbendazim [J]. Toxicology in Vitro, 2003, **17**(5-6): 687-692.
- [7] 乔雄梧. 农药在土壤中的环境行为[J]. 农药科学与管理, 1999, (增刊): 12-16.
- [8] Burrows L A, Edwards C A. The use of integrated soil microcosms to assess the impact of carbendazim on soil ecosystems [J]. Ecotoxicology, 2004, **13**(1-2): 143-161.
- [9] Torstensson L, Wessén B. Interactions between the fungicide benomyl and soil microorganisms [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1984, **16**(5): 445-452.
- [10] Thapar S, Bhushan R, Mathur R P. Degradation of organophosphorus and carbamate pesticides in soils-HPLC determination[J]. Biomedical Chromatography, 1995, **9**(1): 18-22.
- [11] Pattanasupong A, Nagase H, Sugimoto E, *et al.* Degradation of carbendazim and 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid by immobilized consortium on Loofa Sponge [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2004, **98**(1): 28-33.
- [12] Fang H, Wang Y Q, Gao C M, *et al.* Isolation and characterization of *Pseudomonas* sp. CBW capable of degrading carbendazim[J]. Biodegradation, 2010, **21**(6): 939-946.
- [13] Zhang L Z, Qiao X W, Ma L P. Influence of environmental factors on degradation of carbendazim by *Bacillus pumilus* strain NY97-1[J]. International Journal of Environment and Pollution, 2009, **38**(3): 309-317.
- [14] Wang Z C, Xu J L, Li Y, *et al.* *Rhodococcus jialingiae* sp. nov., an actinobacterium isolated from sludge of a carbendazim wastewater treatment facility [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2010, **60**(2): 378-381.
- [15] Zhang G S, Jia X M, Cheng T F, *et al.* Isolation and characterization of a new carbendazim-degrading *Ralstonia* sp. strain[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2005, **21**(3): 265-269.
- [16] 田连生, 陈菲. T2-2 菌株对多菌灵的降解特性及生物修复试验[J]. 微生物学报, 2009, **49**(7): 925-930.
- [17] Helweg A. Degradation and adsorption of carbendazim and 2-aminobenzimidazole in soil[J]. Pesticide Science, 1977, **8**(1): 71-78.
- [18] Thawornchaisit U, Polprasert C. Evaluation of phosphate fertilizers for the stabilization of cadmium in highly contaminated soils[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **165**(1-3): 1109-1113.
- [19] Muchuweti M, Birkett J W, Chinyanga E, *et al.* Heavy metal content of vegetables irrigated with mixtures of wastewater and sewage sludge in Zimbabwe: implications for human health[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2006, **112**(1): 41-48.
- [20] Li X H, Zhou Q X, Wei S H, *et al.* Adsorption and desorption of carbendazim and cadmium in typical soils in northeastern China as affected by temperature[J]. Geoderma, 2011, **160**(3-4): 347-354.
- [21] Mazellier P, Leroy é, Legube B. Photochemical behavior of the fungicide carbendazim in dilute aqueous solution[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 2002, **153**(1-3): 221-227.
- [22] Virág D, Kiss A. Photostability and photodegradation pathways of distinctive pesticides [J]. Journal of Environmental Quality, 2009, **38**(1): 157-163.
- [23] 朱九生, 乔雄梧, 王静, 等. 乙草胺在土壤环境中的降解及其影响因子的研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, **23**(5): 1025-1029.
- [24] 郑丽英, 杨仁斌, 郭正元. 双草醚在稻田土壤中的降解及其影响因子的研究[J]. 土壤通报, 2006, **37**(3): 569-572.
- [25] Xu J L, Gu X Y, Shen B, *et al.* Isolation and characterization of a carbendazim-degrading *Rhodococcus* sp. djl-6 [J]. Current Microbiology, 2006, **53**(1): 72-76.
- [26] Wang Z C, Wang Y Y, Gong F F, *et al.* Biodegradation of carbendazim by a novel actinobacterium *Rhodococcus jialingiae* djl-6-2[J]. Chemosphere, 2010, **81**(5): 639-644.
- [27] 王伟东, 牛俊玲, 崔宗均. 农药的微生物降解综述[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2005, **17**(2): 18-22.
- [28] Wang Y S, Huang Y J, Chen W C, *et al.* Effect of carbendazim and pencycuron on soil bacterial community [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **172**(1): 84-91.
- [29] 陈良燕, 石利利, 徐亦刚, 等. 巨大芽孢杆菌 LY-4 对土壤中杀虫单农药的降解[J]. 中国环境科学, 2000, **20**(6): 511-514.
- [30] Ingerslev F, Toräng L, Loke M L, *et al.* Primary biodegradation of veterinary antibiotics in aerobic and anaerobic surface water simulation systems[J]. Chemosphere, 2001, **44**(4): 865-872.
- [31] 方晓航, 仇荣亮. 农药在土壤环境中的行为研究[J]. 土壤与环境, 2002, **11**(1): 94-97.
- [32] 段学军, 闵航. Cd 对稻田土壤典型微生物种的胁迫生理毒性[J]. 生态环境, 2005, **14**(6): 865-869.
- [33] Pepper I L, Gentry T J, Newby D T, *et al.* The role of cell bioaugmentation and gene bioaugmentation in the remediation of co-contaminated soils[J]. Environmental Health Perspectives, 2002, **110**(6): 943-946.

CONTENTS

Characteristics of Atmospheric NO ₂ in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and the Yangtze River Delta Analyzed by Satellite and Ground Observations	··· WANG Ying, LI Ling-jun, LIU Yang (3685)
Variation Analysis of Background Atmospheric Pollutants in North China During the Summer of 2008 to 2011	····· YANG Jun-yi, XIN Jin-yuan, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (3693)
Characteristics of Atmospheric Pollutants in Cangzhou	····· WANG Yong-hong, HU Bo, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (3705)
Chemical Characteristics and Sources of Trace Metals in Precipitation Collected from a Typical Industrial City in Northern China	····· LI Yue-mei, PAN Yue-peng, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (3712)
BTX Monitoring Nearby Main Road Traffic in Guangzhou	····· YE Cong-lei, XIE Pin-hua, QIN Min, <i>et al.</i> (3718)
Dynamic Road Vehicle Emission Inventory Simulation Study Based on Real Time Traffic Information	····· HUANG Cheng, LIU Juan, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (3725)
Emission Characteristics of a Diesel Car Fueled with Coal Based Fischer-Tropsch (F-T) Diesel and Fossil Diesel Blends	····· HU Zhi-yuan, CHENG Liang, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (3733)
Spatial Variations of Biogenic Elements in Coastal Wetland Sediments of the Jiulong River Estuary	····· YU Xiao-qing, YANG Jun, LIU Le-mian, <i>et al.</i> (3739)
Spatio-Temporal Distribution of TN and TP in Water and Evaluation of Eutrophic State of Lake Nansi	····· SHU Feng-yue, LIU Yu-pei, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (3748)
Impact on Nitrogen and Phosphorous Export of Wetlands in Tianmu Lake Watershed	····· LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, LI Heng-peng (3753)
Nitrogen and Phosphorus Composition in Urban Runoff from the New Development Area in Beijing	····· LI Li-qing, LÜ Shu-cong, ZHU Ren-xiao, <i>et al.</i> (3760)
Distribution and Sources of Arsenic in Yangzonghai Lake, China	····· ZHANG Yu-xi, XIANG Xiao-ping, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3768)
Occurrence of Fecal Indicator Bacteria in Urban Surface Water: A Case Study in Southern China	····· SUN Fu, SHA Jing, LIU Yan-hua (3778)
Vertical Migration of Algal Cells in the Daning River Bay of the Three Gorges Reservoir	····· ZHANG Yong-sheng, ZHENG Bing-hui, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3787)
Construct of Yangtze-Huai River Rural Areas Ecological Drainage System and Its Retention Effect on Pollutants	····· SHAN Bao-qing, LI Nan, TANG Wen-zhong (3797)
Water Treatment Efficiency of Constructed Wetland Plant-Bed/Ditch Systems	····· WANG Zhong-qiong, ZHANG Rong-bin, CHEN Qing-hua, <i>et al.</i> (3804)
Effect of the Subsurface Constructed Wetland Evolution into Free Surface Flow Constructed Wetland on the Removal of Organic Matter, Nitrogen, and Phosphorus in Wastewater	····· WEI Ze-jun, XIE Jian-ping, HUANG Yu-ming (3812)
Treatment Characteristics of Saline Domestic Wastewater by Constructed Wetland	····· GAO Feng, YANG Zhao-hui, LI Chen, <i>et al.</i> (3820)
Degradation of β -Naphthol by Catalytic Wet Air Oxidation	····· LIU Jie, YU Chao-ying, ZHAO Pei-qing, <i>et al.</i> (3826)
Degradation of 2,4-Dichlorophenol in Aqueous Solution by ZVI/EDDS/Air System	····· SUN Qian, ZHOU Hai-yan, CAO Meng-hua, <i>et al.</i> (3833)
Study on Photocatalytic Degradation of 1,2,3-Trichlorobenzene Using the Microwaved MWNTs/TiO ₂ Composite	····· SHI Zhou, ZHANG Qian, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3840)
Mechanism of Cr(VI) Removal from Aqueous Solution Using Biochar Promoted by Humic Acid	····· DING Wen-chuan, TIAN Xiu-mei, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3847)
Research on the Treatment of Wastewater Containing PVA by Ozonation-Activated Sludge Process	····· XING Xiao-qiong, HUANG Cheng-lan, LIU Min, <i>et al.</i> (3854)
Effects of Composite Substrates on the Phosphorus Removal in Granule-based EBPR System and Its Optimization Experiment	····· XU Shao-juan, SUN Pei-de, ZHENG Xiong-liu, <i>et al.</i> (3859)
Research of Input Water Ratio's Impact on the Quality of Effluent Water from Hydrolysis Reactor	····· LIANG Kang-qiang, XIONG Ya, QI Mao-rong, <i>et al.</i> (3868)
Evolution of Leachate Quantity and Quality in the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill	····· HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin, <i>et al.</i> (3873)
National Survey of Urban Sewage Reuse in China	····· GUO Yu-jie, WANG Xue-chao, ZHOU Zhen-min (3881)
Sorption and Desorption of 17 α -Ethinyl Estradiol and 4- <i>n</i> -Nonylphenol in Soil	····· JIANG Lu, WANG Ji-hua, LI Jian-zhong, <i>et al.</i> (3885)
Soil Organic Carbon Mineralization of Black Locust Forest in the Deep Soil Layer of the Hilly Region of the Loess Plateau, China	····· MA Xin-xin, XU Ming-xiang, YANG Kai (3893)
Effects of Soil Crusts on Surface Hydrology in the Semiarid Loess Hilly Area	····· WEI Wei, WEN Zhi, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (3901)
Environmental Factors on Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils from Dashiwei Karst Giant Doline (Tiankeng) in Guangxi, China	····· KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, JIANG Zhong-cheng, <i>et al.</i> (3905)
Investigation on Mechanism of Pyrite Oxidation in Acidic Solutions	····· WANG Nan, YI Xiao-yun, DANG Zhi, <i>et al.</i> (3916)
Monitoring of Water and Salt Transport in Silt and Sandy Soil During the Leaching Process	····· FU Teng-fei, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (3922)
Simulation on Remediation of Benzene Contaminated Groundwater by Air Sparging	····· FAN Yan-ling, JIANG Lin, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3927)
Detecting the Cytotoxicities of Five Bisphenol A Analogues to the MCF-7 Human Breast Carcinoma Cell Line Through Different Endpoints	····· ZHANG Shuai-shuai, LIU Yan, LIU Shu-shen, <i>et al.</i> (3935)
Response of Copepod Community Characteristics to Environmental Factors in the Backshore Wetland of Expo Garden, Shanghai	····· CHEN Li-jing, WU Yan-fang, JING Yu-xiang, <i>et al.</i> (3941)
Isolation, Identification and Characterization of Halotolerant Petroleum-degrading Bacteria	····· WU Tao, XIE Wen-jun, YI Yan-li, <i>et al.</i> (3949)
Growth Kinetics and Phenol Degradation of Highly Efficient Phenol-degrading <i>Ochrobactrum</i> sp. CH10	····· CHEN Xiao-hua, WEI Gang, LIU Si-yuan, <i>et al.</i> (3956)
Isolation of Aerobic Degrading Strains for TBBPA and the Properties of Biodegradation	····· QIAN Yan-yuan, LIU Li-li, YU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3962)
Influences of Long-term Application of Organic and Inorganic Fertilizers on the Composition and Abundance of <i>nirS</i> -type Denitrifiers in Black Soil	····· YIN Chang, FAN Fen-liang, LI Zhao-jun, <i>et al.</i> (3967)
Characteristics and Influencing Factors of Trichloroethylene Adsorption in Different Soil Types	····· HE Long, QIU Zhao-fu, LÜ Shu-guang, <i>et al.</i> (3976)
Degradation of Carbenazim in Paddy Soil and the Influencing Factors	····· XIAO Wen-dan, YANG Xiao-e, LI Ting-qiang (3983)
Effects of Sulphur Compounds on the Volatile Characteristics of Heavy Metals in Fly Ash from the MSW and Sewage Sludge Co-combustion Plant During the Disposal Process with Higher Temperature	····· LIU Jing-yong, SUN Shui-yu (3990)
Low-temperature Thermal Treatment of Dioxin in Medical Waste Fly Ash Under Inert Atmosphere	····· JI Sha-sha, LI Xiao-dong, XU Xu, <i>et al.</i> (3999)
Hourly Measurement on Aerosol NH ₃ and Gas NO _x Emission in the Rice Field	····· GONG Wei-wei, LUAN Sheng-ji (4006)
Implementation of an Electronic Nose for Rapid Detection of Volatile Chloralkane and Chloroalkene	····· WEN Xiao-gang, LIU Rui, CAI Qiang, <i>et al.</i> (4012)
Pilot Study on PAHs of the Atmosphere Around the Refuse Incineration Plant Based on the Technology of Passive Sampling	····· SUN Shao-ai, LI Yang, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (4018)
Spatial Distribution and Pollution Source Identification of Agricultural Non-Point Source Pollution in Fujian Watershed	····· DING Xiao-wen, SHEN Zhen-yao (4025)
Difference of P Content in Different Area Substrate of Constructed Wetland	····· CAO Xue-ying, CHONG Yun-xiao, YU Guang-wei, <i>et al.</i> (4033)
Selective Detection of Viable Pathogenic Bacteria in Water Using Reverse Transcription Quantitative PCR	····· LIN Yi-wen, LI Dan, WU Shu-xu, <i>et al.</i> (4040)
Formation of Disinfection By-products; Temperature Effect and Kinetic Modeling	····· ZHANG Xiao-lu, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (4046)
A Novel Quantitative Approach to Study Dynamic Anaerobic Process at Micro Scale	····· ZHANG Zhong-liang, WU Jing, JIANG Jian-kai, <i>et al.</i> (4052)
Leaves of <i>Platanus orientalis</i> as the Carbon Source for Denitrification	····· XIONG Jian-feng, XU Hua, YAN Ning, <i>et al.</i> (4057)
Isolation, Characterization of an Anthracene Degrading Bacterium <i>Martellella</i> sp. AD-3 and Cloning of Dioxygenase Gene	····· CUI Chang-zheng, FENG Tian-cai, YU Ya-qi, <i>et al.</i> (4062)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年11月15日 33卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 11 Nov. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱(海淀区双清路 18 号, 邮政编码: 100085) 电话: 010-62941102, 010-62849343 传真: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京 399 信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国 内 定 价: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行