

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第12期

Vol.36 No.12

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

2014年APEC前后北京城区PM_{2.5}中水溶性离子特征分析 杨懂艳,刘保献,张大伟,石爱军,周健楠,景宽,富佳明(4325)

2013年北京市不同方位PM_{2.5}背景浓度研究 李云婷,程念亮,张大伟,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,陈晨(4331)

APEC期间北京空气质量改善对比分析 李文涛,高庆先,刘俊蓉,李亮,高文康,苏布达(4340)

嘉兴市春季PM₁₀、主要污染气体和气溶胶粒径分布的周末效应 沈利娟,王红磊,吕升,李莉,张孝寒,章国骏,王聿(4348)

烟花燃放对珠三角地区春节期间空气质量的影响 赵伟,范绍佳,谢文彰,孙家仁(4358)

典型钢铁行业汞排放特征及质量平衡 张雅惠,张成,王定勇,罗程钟,杨熹,徐凤(4366)

上海市公园绿地树叶对大气重金属污染的磁学响应 刘飞,褚慧敏,郑祥民(4374)

重庆金佛山降雪中飞灰颗粒物特征及来源解析 于正良,杨平恒,景伟力,袁道先,任坤,李林立(4381)

利用新型组合填料的生物滴滤塔净化混合废气研究 梅瑜,成卓韦,王家德,陆胤(4389)

低浓度CO₂在聚苯胺/Y分子筛复合材料上的吸附 刘凤玲,卢霞,张慧,葛鑫,刘杰,张泳真(4396)

红壤丘陵区冬季大气湿沉降化学特征及森林冠层对其截留作用机制 郝卓,高扬,张进忠,于贵瑞(4403)

中亚热带常绿阔叶林湿沉降过程中盐基离子变化特征 安思危,孙涛,马明,王定勇(4414)

基于Landsat 8影像估算新安江水库光合有效辐射漫射衰减系数 张毅博,张运林,查勇,施坤,周永强,刘明亮(4420)

白石水库颗粒有机物及沉积物中碳、氮稳定同位素的空间分布特征 郭凯,赵文,王珊,戴玉新,张荣坤,李东明(4430)

小关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应 李磊,李秋华,焦树林,李钥,肖晶,邓龙,孙荣国,高永春,骆兰(4436)

湖泊基质客土改良的环境效应:对芦苇生长及光合荧光特性的影响 余居华,钟继承,范成新,黄蔚,商景阁,古小治(4444)

贵州纳朵洞洞穴水水文地球化学变化特征及其环境意义 沈蔚,王建力,王家录,蒋先淑,毛庆亚,陈挚秋,刘肖(4455)

碧水岩地下河中微量金属元素对降雨的响应特征及来源分析 邹艳娥,蒋萍萍,张强,汤庆佳,康志强,龚晓萍,陈长杰,俞建国(4464)

钱塘江(杭州段)表层水中全氟化化合物的残留水平及分布特征 张明,唐访良,俞雅雯,徐建芬,李华,吴敏华,张伟,潘见阳(4471)

长江中游沉积物中多溴联苯醚的污染特征及风险评价 田奇昌,唐洪波,夏丹,王莎莎,高丽荣(4479)

城市地表水表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评估:以永康市为例 齐鹏,余树全,张超,梁立成,车继鲁(4486)

柠檬酸对三峡水库消落区土壤中汞活化及甲基化的影响 覃蔡清,梁丽,游蕊,邓晗,王定勇(4494)

微生物对冰封期湖泊沉积物中有机磷降解释放的影响 左乐,吕昌伟,何江,王伟颖,颜道浩(4501)

扰动和加藻共同作用下太湖沉积物中形态磷变化规律 陈俊,李大鹏,朱培颖,黄勇,王忍(4509)

生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应 张树楠,肖润林,刘锋,吴金水(4516)

开放系统下方解石对磷的去除 李振炫,刁家勇,黄利东,陈艳芳,刘大刚,许正文(4523)

铜在壳核结构磁性颗粒上的吸附:效能与表面性质的关系 李秋梅,陈静,李海宁,张晓蕾,张高生(4531)

基于优质碳源提供的CAMBR复合工艺短程硝化-反硝化除磷研究 程继辉,吴鹏,程朝阳,沈耀良(4539)

ANAMMOX菌利用零价铁转化氨和硝酸盐实验 周健,黄勇,袁怡,刘忻,李祥,沈杰,杨朋兵(4546)

基于GIS的天津市饮用水水质健康风险评价 符刚,曾强,赵亮,张玥,冯宝佳,王睿,张磊,王洋,侯常春(4553)

北京自备井水源内毒素污染及与其他水质参数的相关分析 张灿,刘文君,敖澍,史云,安代志,刘治平(4561)

广州市小学生多环芳烃内暴露水平 苏慧,赵波,张素坤,刘珊,任明忠,李杰,石小霞(4567)

构建三元混合污染物的三维等效图 刘雪,刘树深,刘海玲(4574)

化学提取法表征污染土壤中PAHs老化规律和蚯蚓富集特征 张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,刘总堂,李娇,王代长,蒋新(4582)

不同取样尺度下华北落叶松人工林土壤呼吸的空间变异性 严俊霞,梁雅南,李洪建,李君剑(4591)

基于环境效应的土壤重金属临界负荷制图 施亚星,吴绍华,周生路,王春辉,陈浩(4600)

土壤中铅锌的稳定化处理及机制研究 谢伟强,李小明,陈灿,陈寻峰,钟宇,钟振宇,万勇,王琰(4609)

纳米氧化锌、硫酸锌和AM真菌对玉米生长的影响 李帅,刘雪琴,王发园,苗艳芳(4615)

蜈蚣草中砷与铊的赋存特征及其相互作用 张玉秀,马旭,廖晓勇,阎秀兰,马栋,龚雪刚(4623)

纳米沸石对土壤Cd形态及大白菜Cd吸收的影响 熊仕娟,徐卫红,谢文文,陈蓉,陈永勤,迟芬琳,陈序根,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体(4630)

黑麦草、丛枝菌根对番茄Cd吸收、土壤Cd形态的影响 陈永勤,江玲,徐卫红,迟芬琳,陈序根,谢文文,熊仕娟,张进忠,熊治庭(4642)

耐盐类固醇激素降解菌交替赤杆菌MH-B5的降解特性、降解途径及其固定化 马聪,秦丹,孙倩,于昌平(4651)

浙江省瓯江氨氧化古菌和氨氧化细菌分布及多样性特征 李虎,黄福义,苏建强,洪有为,俞慎(4659)

缙云山马尾松林和柑橘林土壤微生物PLFA沿海拔梯度的变化 曾清苹,何丙辉,毛巧芝,吴耀鹏,黄祺,李源(4667)

华北平原耕作土壤特性对基因工程菌迁移的影响 张静,刘平,刘春,陈晓轩,张磊(4676)

再生铜冶炼过程多氯萘与二噁英类排放特征分析与控制技术评估 田亚静,姜晨,吴广龙,丁琼,王铁宇,吕永龙(4682)

《环境科学》第36卷(2015年)总目录 (4690)

《环境科学》征订启事(4347) 《环境科学》征稿简则(4454) 信息(4463,4530,4573,4581)

华北平原耕作土壤特性对基因工程菌迁移的影响

张静,刘平,刘春*,陈晓轩,张磊

(河北科技大学环境科学与工程学院,河北省污染防治生物技术重点实验室,石家庄 050018)

摘要: 基因工程菌在土壤中的迁移是影响污染土壤生物强化修复的重要因素。在华北平原饱和耕作土壤中,考察了1株阿特拉津降解基因工程菌迁移留存及其影响因素。结果表明,在饱和耕作土壤中,平流渗透是基因工程菌迁移的主要机制,其过程可用过滤模型拟合。土壤性质对孔隙水流和基因工程菌迁移具有显著影响。随着土壤粒径、孔隙率和土壤砂粒组分增加,土壤水力传导率常数增大,基因工程菌过滤系数减小,土壤对基因工程菌过滤留存作用降低。土壤条件不变时,增加入渗流量也会增大土壤水力传导率常数,减小基因工程菌过滤系数。饱和土壤中,水力传导率常数为 $5.02 \sim 6.70 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ 时,基因工程菌在土壤中的过滤系数为 $0.105 \sim 0.274$,二者存在显著负相关关系。

关键词: 基因工程菌; 土壤修复; 迁移; 水力传导率常数; 过滤系数

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)12-4676-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.12.045

Effects of Cultivation Soil Properties on the Transport of Genetically Engineered Microorganism in Huabei Plain

ZHANG Jing, LIU Ping, LIU Chun*, CHEN Xiao-xuan, ZHANG Lei

(Pollution Prevention Biotechnology Laboratory of Hebei Province, School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: The transport of genetically engineered microorganism (GEM) in the soil is considered to be the important factor influencing the enhanced bioremediation of polluted soil. The transport of an atrazine-degrading GEM and its influencing factors were investigated in the saturated cultivation soil of Huabei Plain. The results showed that horizontal infiltration was the main mechanism of GEM transport in the saturated cultivation soil. The transport process could be simulated using the filtration model. Soil properties showed significant effects on pore water flow and GEM transport in saturated soil. When particle size, porosity and sand component of the soil increased, the hydraulic conductivity constant increased and filtration coefficient of GEM decreased in saturated soil, indicating the reduced retention of GEM in the soil. An increase in infiltration flow also increased hydraulic conductivity constant in saturated soil and consequently decreased filtration coefficient of GEM. When hydraulic conductivity constants ranged from $5.02 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ to $6.70 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ in the saturated soil, the filtration coefficients of GEM varied from 0.105 to 0.274. There was a significantly negative correlation between them.

Key words: genetically engineered microorganism (GEM); saturated cultivation soil; transport; hydraulic conductivity constant; filtration coefficient

土壤污染是当今世界主要的环境问题之一,土壤中的污染物不仅对土壤生态系统造成危害,而且可以通过植物富集进入食物链,或者通过渗透和流失污染地下水和饮用水源,从而对人类健康造成威胁。因此,污染土壤修复一直是环境科学和工程领域关注和研究的热点之一。石油以及多环芳烃(PAH)、农药、炸药等持久性有机污染物(POPs)一直是国内外污染土壤修复研究中的重点^[1~4]。我国的土壤修复研究主要集中于原油及石油烃类污染土壤^[5~7]。土壤生物原位修复技术具有费用低、效果好、无二次污染、环境影响小等优点,获得广泛的研究和应用。在生物强化土壤原位修复中,菌株的选择是核心问题之一^[8],构建并应用基因工程菌株逐渐受到重视和关注^[9,10]。

基因工程菌株在土壤中的留存迁移是决定其生物

修复效果的主要因素之一。基因工程菌的留存密度对其在土壤中的生存和建立稳定种群具有重要影响^[11]。基因工程菌在水力饱和及非饱和的土壤孔隙中迁移过程存在很大差异。一些研究考察了饱和或非饱和条件下细菌细胞在多孔介质中的迁移情况^[12~15],认为孔隙结构、介质粒度、营养条件、离子强度等是影响迁移过程的重要因素^[16~18],但所用多孔介质多为石英砂或其它颗粒填充床,而非实际土壤。

阿特拉津(atrazine)是应用最为广泛的除草剂,在世界各地用量很大,土壤残留严重,是农药污染土

收稿日期: 2015-04-23; 修订日期: 2015-07-09

基金项目: 河北省自然科学基金项目(E2015208140); 石家庄市裕华区科学技术研究与发展计划项目

作者简介: 张静(1981~),女,讲师,硕士,主要研究方向为环境生物处理技术,E-mail: zhangjing1129@163.com

* 通讯联系人,E-mail: liuchun@hebest.edu.cn

壤修复中最受关注的污染物之一。阿特拉津是 POPs 物质,也是潜在的内分泌干扰物。阿特拉津在华北平原耕作土壤中也有施用和残留,是河北省第一次农业污染源普查中关注的主要农药污染物之一。物理化学^[19, 20]及生物修复方法^[21~24]均被应用于阿特拉津污染土壤修复,其中在生物强化修复研究中多采用野生阿特拉津降解菌株,基因工程菌株应用研究不多。

本研究在华北平原饱和耕作土壤中,考察了土壤性质和孔隙水流条件对 1 株阿特拉津降解基因工程菌留存迁移的影响,以期为实施基因工程菌强化阿特拉津原位土壤生物修复提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 菌株和菌悬液的制备

本研究使用的基因工程菌受体细胞为大肠杆菌 DH5 α ,质粒载体为 pACYC184 和 pUC18-gfp,分别携带阿特拉津脱氯水解酶基因和绿色荧光蛋白基因,对氯霉素有抗性^[25]。

挑单菌落于 LB 培养基中(含 25 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 氯霉素),在 37 $^{\circ}\text{C}$, 120 ~ 140 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 摇床转速下培养过夜,离心,磷酸缓冲液(pH 7.0)洗涤,收获细胞,制成菌悬液备用。

1.2 土壤样品及土壤微系统

本研究选取华北平原地区 0 ~ 20 cm 的表层耕作土壤样品(取自河北科技大学新校区附近麦田)作为研究对象,并选取 0 ~ 20 cm 的表层林地土壤样品(取自河北科技大学中校区景观林带)作为对照,土壤样品性质采用标准方法测定^[26],如表 1 所示。土壤密度为 2.65 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

将土壤筛分为 < 0.6 mm、0.6 ~ 2 mm 和 > 2 mm 这 3 种粒径范围的样品,按照一定的容重填充至土壤微系统的土壤柱中,土壤微系统如图 1 所示。土壤柱内径为 2 cm,长度为 2、4、8、12 和 16 cm。填充后上下颠倒并强烈振荡柱体,以使不同长度土壤柱内填充程度尽量均匀一致。土壤柱填充后采用过量的 0.01 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 CaCl_2 溶液饱和并排出土壤孔隙中的气体。

表 1 土壤样品基本性质

Table 1 Essential properties of soil samples

项目	含水率/%	有机质含量/%	pH 值	机械组成/%		
				砂粒	粉粒	黏粒
耕作土壤	9.42	1.03	7.1	21.85	30.02	48.13
林地土壤	3.36	1.77	7.0	41.25	26.25	32.50

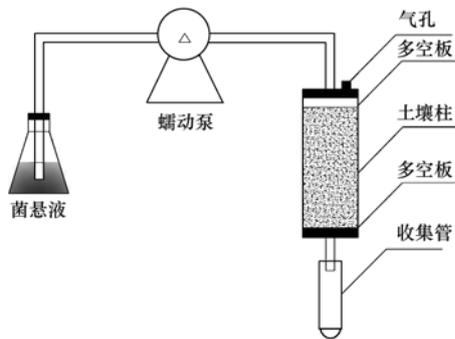


图 1 土壤微系统示意

Fig. 1 Profile of the soil microcosm system

1.3 基因工程菌在土壤中的迁移

将基因工程菌细胞悬液稀释至 $10^8 \text{CFU}\cdot\text{mL}^{-1}$,然后通过蠕动泵在一定的人渗流量下注入饱和土壤柱,使菌悬液流过不同长度的土壤柱,在土壤柱末端收集淋出液,并检测淋出液中基因工程菌的细胞密度,以此表征菌悬液流至不同土壤柱高度时,基因工程菌在土壤中的迁移和留存状况。

研究中最小入渗流量为 1.25 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$,在此条件下,所有土壤柱的存水量大于土壤柱的孔隙体

积,保证土壤柱为饱和流。根据 Darcy 定律计算不同条件下土壤柱水力传导率常数,以反映土壤性质差异以及土壤孔隙变化对土壤孔隙水流的影响。

1.4 S 基因工程菌密度检测和原位观察

基因工程菌密度利用抗生素抗性(含 25 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 氯霉素) LB 培养基平板,采用稀释平板法测定。采用无菌管收集土壤淋出液,然后稀释至一定的浓度后测定。每个样品取 3 个稀释度,每个稀释度取 2 个平行样,涂布于选择性培养基平板上,37 $^{\circ}\text{C}$ 培养 24 h 后计数,菌落数目取平均值。土壤和淋出液中基因工程菌细胞采用荧光显微镜进行原位观察。

2 结果与讨论

2.1 饱和流条件下基因工程菌迁移的主要机制

微生物在土壤中的迁移和留存主要受到土壤吸附、对流弥散过程和过滤过程的影响。在流量为 1.25 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$,长度为 4 cm 的土壤柱中,检测不同时间土壤淋出液中的基因工程菌密度,以考察饱和

流条件下迁移的主要机制,结果如图 2 所示.

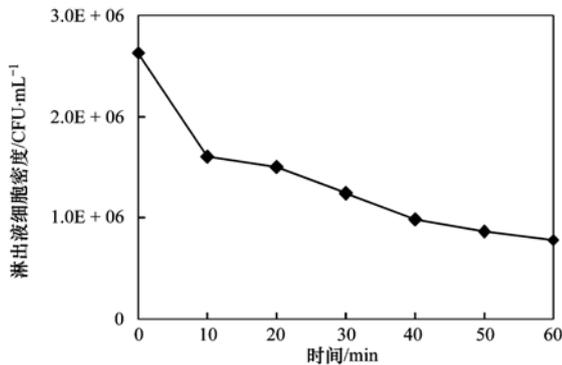


图 2 淋出液中基因工程菌密度随时间的变化

Fig. 2 Variation of GEM density in the leachate with time

可以看到,淋出液中基因工程菌密度随时间逐渐降低. 如果土壤吸附起主要作用,淋出液中的基因工程菌密度应随时间逐渐增大. 同时,对实验后的土壤原位观察发现,土壤颗粒表面基因工程菌细胞很少,而在土壤颗粒空隙水中细胞较多. 可见,在饱和流条件下,平流渗透是基因工程菌迁移的主要形式,过滤过程是细胞留存的主要机制,因此,可以采用过滤模型来描述此条件下基因工程菌的迁移过程,如式(1)、(2)所示.

$$\frac{\partial C}{\partial x} = -\lambda C \quad (1)$$

$$\ln C = -\lambda x + \ln C_0 \quad (2)$$

式中, C 是细胞密度, x 是土壤柱深度, C_0 为 $x=0$ 时细胞密度, λ 是过滤系数.

2.2 土壤特性对基因工程菌迁移的影响

土壤特性对孔隙结构和孔间水流具有显著影响,是影响基因工程菌的迁移重要因素,因此考察了土壤粒径、孔隙率和机械组成对基因工程菌迁移的影响.

2.2.1 土壤粒径

将 <0.6 mm、 $0.6 \sim 2$ mm、 >2 mm 这 3 种粒径范围的耕作土壤,按照容重为 $1.0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (孔隙率为 62.3%) 填充至土壤柱,菌悬液在 $1.25 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 的入渗流量下通过土壤柱,检测淋出液细胞密度,结果如图 3 所示. 可以看到,随着填充土壤粒径的增大,土壤淋出液细胞密度呈现增大的趋势,基因工程菌平流迁移增强,过滤留存作用减小.

用式(2)对图 3 数据进行拟合,求得基因工程菌过滤系数,并根据 Darcy 定律计算土壤柱水力传导率常数,结果如图 4 所示. 可以看到,随着粒径增大,土壤对基因工程菌的留存作用降低:粒径 <0.6

mm 时,基因工程菌过滤系数为 0.269,而粒径 >2 mm 时,基因工程菌过滤系数仅为 0.105.

尽管土壤柱的孔隙率相同,但粒径 >2 mm 的土壤柱孔间水流速度较快,水力传导率常数为 $6.70 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$,明显高于粒径 <0.6 mm 土壤柱的 $5.38 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$,从而降低了基因工程菌的过滤留存作用. 此外,不同粒径土壤颗粒的团聚体稳定性也有差异,粒径 >2 mm 土壤颗粒的团聚体水稳性很高,可以达到 78.4%,土壤孔隙结构受水流影响较小;而粒径较小的土壤颗粒团聚体水稳性较差,在饱和流条件下逐渐发生解体,使得土壤孔径减小,进一步增强了基因工程菌的过滤留存作用.

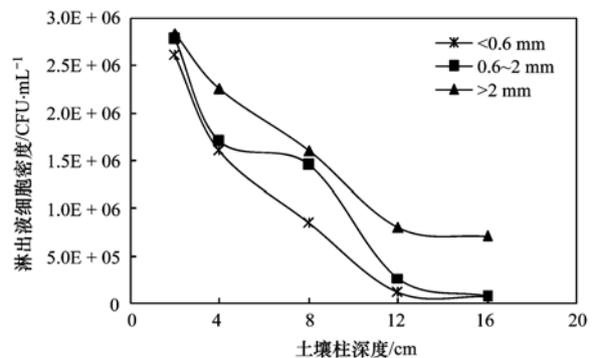


图 3 不同粒径土壤柱淋出液基因工程菌密度随深度变化

Fig. 3 Variation of GEM density in the leachate with the soil columns depth at different soil particle sizes

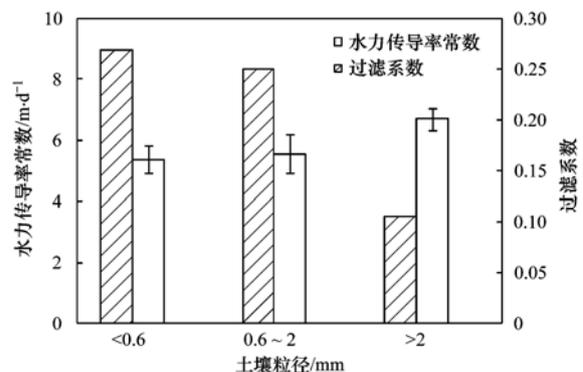


图 4 不同粒径土壤柱水力传导率常数和基因工程菌过滤系数

Fig. 4 Hydraulic conductivity constants and filtration coefficients of GEM in the soil columns at different soil particle sizes

2.2.2 土壤孔隙率

将粒径范围为 $0.6 \sim 2$ mm 的土壤颗粒,按照容重为 0.8 、 1.0 和 $1.2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 填充至土壤柱,对应土壤柱孔隙率为 69.9%、62.3% 和 54.7%. 菌悬液在 $1.25 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 的入渗流量下通过土壤柱,检测淋出液细胞密度,结果如图 5 所示. 同样,用式(2)对图 5 数据进行拟合,求得基因工程菌过滤系数,并计算土壤柱平均水力传导率常数,结果如图 6 所示.

可以看到,随着土壤孔隙率的减小,水力传导率常数降低,3 种孔隙率土壤柱平均水力传导率常数分别为 5.73、5.56 和 5.02 $m \cdot d^{-1}$ 。同时,淋出液基因工程菌密度亦随着土壤孔隙率的减小而降低,土壤柱对基因工程菌的过滤留存作用增强。孔隙率为 69.9%、62.3% 和 54.7% 时,基因工程菌过滤系数分别为 0.156、0.250 和 0.274。

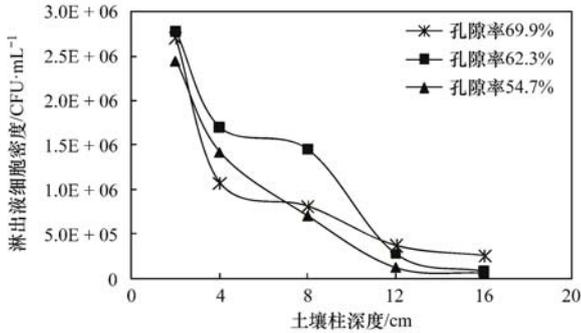


图 5 不同孔隙率土壤柱淋出液基因工程菌密度随深度变化
Fig. 5 Variation of GEM density in the leachate with the soil columns depth at different soil porosities

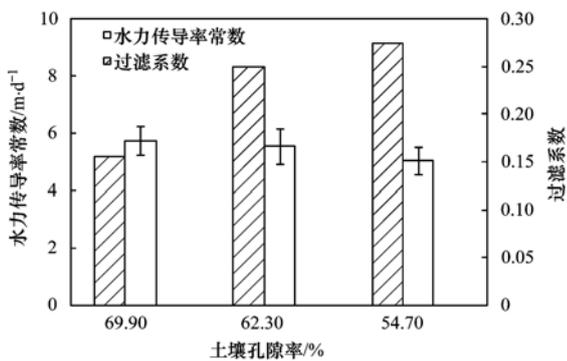


图 6 不同孔隙率土壤柱水力传导率常数和基因工程菌过滤系数
Fig. 6 Hydraulic conductivity constants and filtration coefficients of GEM in the soil columns at different soil porosities

2.2.3 土壤机械组成

机械组成是土壤的重要性质,对土壤的孔隙结构具有显著影响。如表 1 所示,采用林地土壤作为对照,其机械组成与耕作土壤存在明显差异,耕作土壤的黏粒组分大于林地土壤,而砂粒组分小于林地土壤。将粒径范围为 0.6 ~ 2 mm 的耕作和林地土壤颗粒,按照容重为 $1.0 g \cdot cm^{-3}$ 填充至土壤柱。菌悬液在 $1.25 mL \cdot min^{-1}$ 的入渗流量下通过土壤柱,检测淋出液细胞密度,结果如图 7 所示。用式(2)对图 7 数据进行拟合,求得基因工程菌过滤系数,并计算土壤柱平均水力传导率常数,结果如图 8 所示。

可以看到,土壤机械组成对孔隙水流和基因工程菌留存作用具有显著影响。和耕作土壤相比,林

地土壤团聚体中大粒径颗粒(砂粒)组分较高,有助于在饱和和流条件下维持土壤孔径及其稳定性,因此水力传导率常数可以达到 $6.64 m \cdot d^{-1}$,高于相同条件下耕作土壤的 $5.56 m \cdot d^{-1}$ 。因此,林地土壤对基因工程菌细胞的过滤留存作用明显小于耕地土壤,过滤系数仅为 0.101。

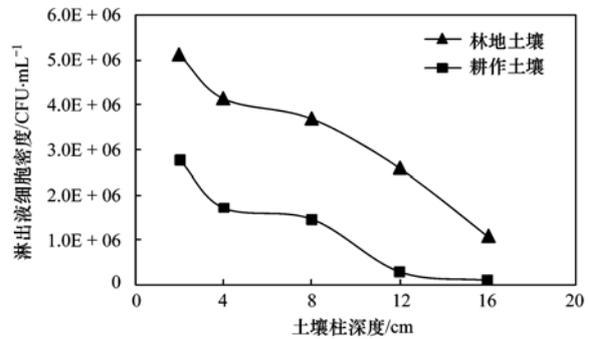


图 7 不同机械组成土壤柱淋出液基因工程菌密度随深度变化
Fig. 7 Variation of GEM density in the leachate with the soil columns depth at different soil mechanical compositions

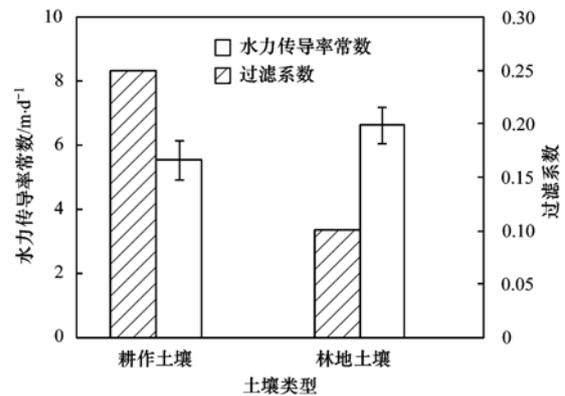


图 8 不同机械组成土壤柱水力传导率常数和基因工程菌过滤系数

Fig. 8 Hydraulic conductivity constants and filtration coefficients of GEM in the soil columns at different soil mechanical compositions

2.3 入渗流量对基因工程菌迁移的影响

将 0.6 ~ 2mm 粒径范围的耕作土壤颗粒,按照容重为 $1.0 g \cdot cm^{-3}$ (孔隙率为 62.3%) 填充至土壤柱,菌悬液在 $1.25、2.4$ 和 $6.0 mL \cdot min^{-1}$ 的入渗流量下通过土壤柱,检测淋出液细胞密度,结果如图 9 所示。用式(2)对图 9 数据进行拟合,求得基因工程菌过滤系数,并计算土壤柱平均水力传导率常数,结果如图 10 所示。

可以看到,随着入渗流量的增加,水力传导率常数增大,同时基因工程菌过滤系数减小,过滤留存作用降低。3 种入渗流量下土壤柱平均水力传导率常数分别为 5.56、5.75 和 $6.44 m \cdot d^{-1}$; 基因工程菌过滤系数分别为 0.250、0.234 和 0.154。

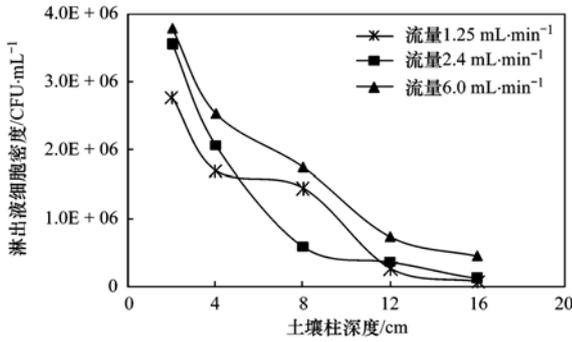


图 9 不同注入流量土壤柱淋出液基因工程菌密度随深度变化
Fig. 9 Variation of GEM density in the leachate with the soil columns depth at different input flows

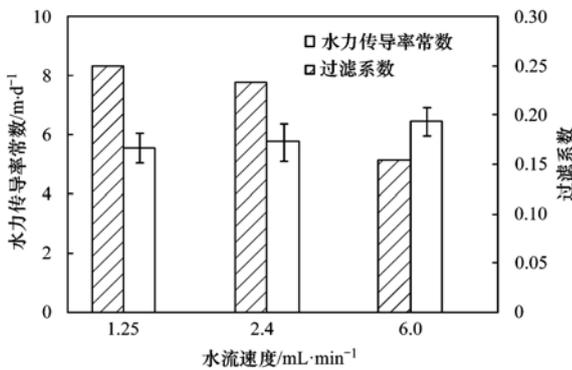


图 10 不同注入流量土壤柱水力传导率常数和基因工程菌过滤系数

Fig. 10 Hydraulic conductivity constants and filtration coefficients of GEM in the soil columns at different input flows

以上研究结果表明,饱和土壤中,土壤性质和入渗流量影响土壤孔隙水流,改变水力传导率常数,进而影响基因工程菌在土壤中的迁移和留存.不同条件下水力传导率常数和基因工程菌过滤系数的关系如图 11 所示.可以看到,水力传导率常数和基因工程菌过滤系数之间存在明显线性相关关系.使用

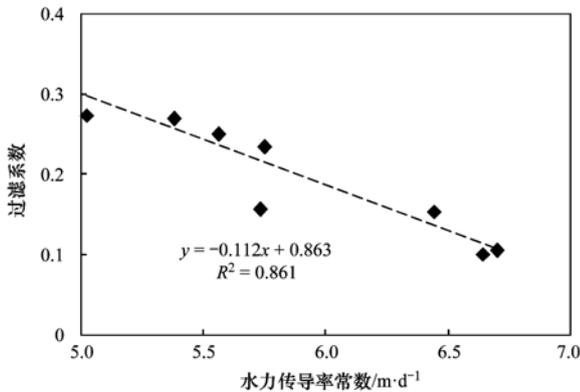


图 11 水力传导率常数和基因工程菌过滤系数关系
Fig. 11 Relationship between hydraulic conductivity constants and filtration coefficients of GEM

SPSS statistics 19 软件对二者进行相关性分析,结果显示水力传导率常数和基因工程菌过滤系数之间具有显著负相关性($R = -0.928, P = 0.000$).此结果进一步证实平流渗透是饱和土壤中基因工程菌迁移的主要机制.

3 结论

(1)在饱和耕作土壤中,平流渗透是基因工程菌迁移的主要机制,其过程可采用过滤模型拟合.

(2)土壤性质对孔隙水流和基因工程菌迁移具有显著影响.随着土壤粒径、孔隙率和土壤砂粒组分增加,水力传导率常数增大,过滤系数减小,土壤对基因工程菌过滤留存作用降低.

(3)土壤条件不变时,增加入渗流量也会增大水力传导率常数,减小过滤系数,降低土壤的过滤留存作用.

(4)饱和土壤中,水力传导率常数为 $5.02 \sim 6.70 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 时,基因工程菌在土壤中的过滤系数为 $0.105 \sim 0.274$,二者存在显著负相关关系.

参考文献:

- [1] Das K, Mukherjee A K. Crude petroleum-oil biodegradation efficiency of *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas aeruginosa* strains isolated from a petroleum-oil contaminated soil from North-East India [J]. *Bioresource Technology*, 2007, **98** (7): 1339-1345.
- [2] Hamdi H, Benzarti S, Manusadzianas L, et al. Bioaugmentation and biostimulation effects on PAH dissipation and soil ecotoxicity under controlled conditions [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, **39** (8): 1926-1935.
- [3] Lewis T A, Newcombe D A, Crawford R L. Bioremediation of soils contaminated with explosives [J]. *Journal of Environmental Management*, 2004, **70** (4): 291-307.
- [4] Entry J A, Donnelly P K, Emmingham W H. Mineralization of atrazine and 2, 4-D in soils inoculated with *Phanerochaete chrysosporium* and *Trappea darkeri* [J]. *Applied Soil Ecology*, 1996, **3** (1): 85-90.
- [5] 姜昌亮,孙铁珩,李培军,等.石油污染土壤长料堆式异位生物修复技术研究 [J]. *应用生态学报*, 2001, **12** (2): 279-282.
- [6] 贾建丽,李广贺,张旭.石油污染土壤生物修复的中试系统构建与运行效果 [J]. *中国环境科学*, 2005, **25** (3): 339-342.
- [7] 徐金兰,黄廷林,唐智新,等.高效石油降解菌的筛选及石油污染土壤生物修复特性的研究 [J]. *环境科学学报*, 2007, **27** (4): 622-628.
- [8] Thompson I P, van der Gast C J, Ciric L, et al. Bioaugmentation for bioremediation: the challenge of strain selection [J]. *Environmental Microbiology*, 2005, **7** (7): 909-915.
- [9] Saylor G S, Ripp S. Field applications of genetically engineered

- microorganisms for bioremediation processes[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2000, **11**(3): 286-289.
- [10] 陆光华, 万蕾, 苏瑞莲. 石油烃类污染土壤的生物修复技术研究进展[J]. *生态环境*, 2003, **12**(2): 220-223.
- [11] 刘春, 黄霞, 杨景亮. 废水生物强化中基因工程菌的流失和环境生存状况研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(9): 2571-2575.
- [12] Gargiulo G, Bradford S, Šimůnek J, *et al.* Bacteria transport and deposition under unsaturated conditions: The role of the matrix grain size and the bacteria surface protein [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2007, **92**(3-4): 255-273.
- [13] Foppen J W, van Herwerden M, Schijven J. Measuring and modelling straining of *Escherichia coli* in saturated porous media [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2007, **93**(1-4): 236-254.
- [14] Ford R M, Harvey R W. Role of chemotaxis in the transport of bacteria through saturated porous media[J]. *Advances in Water Resources*, 2007, **30**(6-7): 1608-1617.
- [15] Foppen J W, van Herwerden M, Schijven J. Transport of *Escherichia coli* in saturated porous media: Dual mode deposition and intra-population heterogeneity[J]. *Water Research*, 2007, **41**(8): 1743-1753.
- [16] Kim H N, Walker S L, Bradford S A. Coupled factors influencing the transport and retention of *Cryptosporidium parvum* oocysts in saturated porous media [J]. *Water Research*, 2010, **44**(4): 1213-1223.
- [17] Syngouna V I, Chrysikopoulos C V. Transport of biocolloids in water saturated columns packed with sand: Effect of grain size and pore water velocity [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2012, **129-130**: 11-24.
- [18] Han P, Shen X F, Yang H Y, *et al.* Influence of nutrient conditions on the transport of bacteria in saturated porous media [J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2013, **102**: 752-758.
- [19] Shea P J, Machacek T A, Comfort S D. Accelerated remediation of pesticide-contaminated soil with zerovalent iron [J]. *Environmental Pollution*, 2004, **132**(2): 183-188.
- [20] Ribeiro A B, Rodríguez-Maroto J M, Mateus E P, *et al.* Removal of organic contaminants from soils by an electrokinetic process: the case of atrazine. : Experimental and modeling [J]. *Chemosphere*, 2005, **59**(9): 1229-1239.
- [21] Newcombe D A, Crowley D E. Bioremediation of atrazine-contaminated soil by repeated applications of atrazine-degrading bacteria [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1999, **51**(6): 877-882.
- [22] Topp E. A comparison of three atrazine-degrading bacteria for soil bioremediation [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2001, **33**(6): 529-534.
- [23] Rousseaux S, Hartmann A, Lagacherie B, *et al.* Inoculation of an atrazine-degrading strain, *Chelatobacter heintzii* Cit1, in four different soils: effects of different inoculum densities [J]. *Chemosphere*, 2003, **51**(7): 569-576.
- [24] Silva E, Fialho A M, Sá-Correia I, *et al.* Combined bioaugmentation and biostimulation to cleanup soil contaminated with high concentrations of atrazine [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**(2): 632-637.
- [25] 刘春, 黄霞, 王慧. 绿色荧光蛋白标记阿特拉津降解基因工程菌的特性 [J]. *环境科学*, 2006, **27**(7): 1439-1443.
- [26] 中国标准出版社第二编辑室编. 环境监测方法标准汇编——土壤环境与固体废物 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2007.

CONTENTS

Characterization of Water-soluble Ions in PM _{2.5} of Beijing During 2014 APEC	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4325)
PM _{2.5} Background Concentration at Different Directions in Beijing in 2013	LI Yun-ting, CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4331)
Comparative Analysis on the Improvement of Air Quality in Beijing During APEC	LI Wen-tao, GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, <i>et al.</i> (4340)
Weekend Effect in Distributions of Particulate Matters, Main Gas Pollutants and Aerosol Size in Spring of Jiaying	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (4348)
Influence of Burning Fireworks on Air Quality During the Spring Festival in the Pearl River Delta	ZHAO Wei, FAN Shao-jia, XIE Wen-zhang, <i>et al.</i> (4358)
Characteristic of Mercury Emissions and Mass Balance of the Typical Iron and Steel Industry	ZHANG Ya-hui, ZHANG Cheng, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4366)
Magnetic Response of Dust-loaded Leaves in Parks of Shanghai to Atmospheric Heavy Metal Pollution	LIU Fei, CHU Hui-min, ZHENG Xiang-min (4374)
Characteristics and Resources of Fly Ash Particles in the Snowpack of Jinfo Mountain, Chongqing	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, JING Wei-li, <i>et al.</i> (4381)
Removal of Mixed Waste Gases by a Biotrickling Filter Packed with a Novel Combined Packing Material	MEI Yu, CHENG Zhuo-wei, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (4389)
Low-Concentration CO ₂ Adsorption on Polyaniline/Zeolite Y Composites	LIU Feng-ling, LU Xia, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4396)
Chemical Characteristics of Atmospheric Wet Deposition in Winter and Its Forestry Canopy Interception Mechanism in Red Soil Hilly Area	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4403)
Dynamic Characteristics of Base Cations During Wet Deposition in Evergreen Broad-leaf Forest Ecosystem	AN Si-wei, SUN Tao, MA Ming, <i>et al.</i> (4414)
Estimation of Diffuse Attenuation Coefficient of Photosynthetically Active Radiation in Xin'anjiang Reservoir Based on Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> (4420)
Spatial Distribution of Stable Isotopes in Particle Organic Matters and Sediments from Baishi Reservoirs	GUO Kai, ZHAO Wen, WANG Shan, <i>et al.</i> (4430)
Response of Phytoplankton Functional Groups to Eutrophication in Summer at Xiaoguan Reservoir	LI Lei, LI Qiu-hua, JIAO Shu-lin, <i>et al.</i> (4436)
Environmental Effect of Substrate Amelioration on Lake; Effects on <i>Phragmites communis</i> Growth and Photosynthetic Fluorescence Characteristics	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (4444)
Variation Characteristics of Cave Water Hydrogeochemistry in Naduo Cave of Guizhou and Its Implications for Environment Research	SHEN Wei, WANG Jian-li, WANG Jia-lu, <i>et al.</i> (4455)
Response Mechanism of Trace Metals in the Bishuiyan Subterranean River to the Rainfall and Their Source Analysis	ZOU Yan-e, JIANG Ping-ping, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4464)
Residue Concentration and Distribution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Surface Water from Qiantang River in Hangzhou Section	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (4471)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Surface Sediments from Middle Reaches of the Yangtze River	TIAN Qi-chang, TANG Hong-bo, XIA Dan, <i>et al.</i> (4479)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Urban Surface Water Sediments from Yongkang	QI Peng, YU Shu-quan, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4486)
Effects of Citric Acid on Activation and Methylation of Mercury in the Soils of Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	QIN Cai-qing, LIANG Li, YOU Rui, <i>et al.</i> (4494)
Impacts of Microorganisms on Degradation and Release Characteristics of Organic Phosphorus in Lake Sediments During Freezing Season	ZUO Le, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (4501)
Sedimentary Phosphorus Forms Under Disturbances and Algae in Taihu Lake	CHEN Jun, LI Da-peng, ZHU Pei-ying, <i>et al.</i> (4509)
Interception Effect of Vegetated Drainage Ditch on Nitrogen and Phosphorus from Drainage Ditches	ZHANG Shu-nan, XIAO Run-lin, LIU Feng, <i>et al.</i> (4516)
Removal of Phosphate by Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, DIAO Jia-yong, HUANG Li-dong, <i>et al.</i> (4523)
Adsorption of Cu on Core-shell Structured Magnetic Particles: Relationship Between Adsorption Performance and Surface Properties	LI Qiu-mei, CHEN Jing, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4531)
Shortcut Nitrosation-Denitrifying Phosphorus Removal Based on High-quality Carbon Source in Combined Process of CAMBR	CHENG Ji-hui, WU Peng, CHENG Chao-yang, <i>et al.</i> (4539)
Simultaneous Biotransformation of Ammonium and Nitrate via Zero-Valent Iron on Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4546)
Health Risk Assessment of Drinking Water Quality in Tianjin Based on GIS	FU Gang, ZENG Qiang, ZHAO Liang, <i>et al.</i> (4553)
Endotoxin Contamination and Correlation with Other Water Quality Parameters of Groundwater from Self-Contained Wells in Beijing	ZHANG Can, LIU Wen-jun, AO Lu, <i>et al.</i> (4561)
Internal Exposure Levels of PAHs of Primary School Students in Guangzhou	SU Hui, ZHAO Bo, ZHANG Su-kun, <i>et al.</i> (4567)
Construction of Three-Dimensional Isobologram for Ternary Pollutant Mixtures	LIU Xue, LIU Shu-shen, LIU Hai-ling (4574)
Aging Law of PAHs in Contaminated Soil and Their Enrichment in Earthworms Characterized by Chemical Extraction Techniques	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (4582)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Larch Plantation of North China at Different Sampling Scales	YAN Jun-xia, LIANG Ya-nan, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (4591)
Mapping Critical Loads of Heavy Metals for Soil Based on Different Environmental Effects	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (4600)
Stabilization Treatment of Pb and Zn in Contaminated Soils and Mechanism Studies	XIE Wei-qiang, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (4609)
Effects of ZnO Nanoparticles, ZnSO ₄ and Arbuscular Mycorrhizal Fungus on the Growth of Maize	LI Shuai, LIU Xue-qin, WANG Fa-yuan, <i>et al.</i> (4615)
Occurrence Characteristics of Pyrene and Arsenate and Their Interaction in <i>Pteris vittata</i> L.	ZHANG Yu-xiu, MA Xu, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (4623)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Its Uptake by Cabbage	XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, XIE Wen-wen, <i>et al.</i> (4630)
Effect of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhizal on Cd Absorption by Varieties of Tomatoes and Cadmium Forms in Soil	CHEN Yong-qin, JIANG Ling, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4642)
Degradation of Steroidal Hormones by Salt-tolerant <i>Altererythrobacter</i> Strain MH-B5; Degradation Characteristics, Metabolites and Its Immobilization	MA Cong, QIN Dan, SUN Qian, <i>et al.</i> (4651)
Distribution and Diversity of Ammonium-oxidizing Archaea and Ammonium-oxidizing Bacteria in Surface Sediments of Oujiang River	LI Hu, HUANG Fu-yi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4659)
Effects of Different Altitudes on Soil Microbial PLFA and Enzyme Activity in Two Kinds of Forests	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, MAO Qiao-zhi, <i>et al.</i> (4667)
Effects of Cultivation Soil Properties on the Transport of Genetically Engineered Microorganism in Huabei Plain	ZHANG Jing, LIU Ping, LIU Chun, <i>et al.</i> (4676)
Assessment of Emission and Co-Reduction of PCDD/Fs and PCNs in the Secondary Copper Production Sector	TIAN Ya-jing, JIANG Chen, WU Guang-long, <i>et al.</i> (4682)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年12月15日 第36卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 12 Dec. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发刊