

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第5期

Vol.36 No.5

**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

深圳大气颗粒物中卤代多环芳烃污染研究 ..... 孙建林,常文静,陈正侠,曾辉(1513)

北京市典型餐饮企业 VOCs 排放特征研究 ..... 崔彤,程婧晨,何万清,任培芳,聂磊,徐东耀,潘涛(1523)

2006~2010年珠三角地区 SO<sub>2</sub> 特征分析 ..... 李菲,谭浩波,邓雪娇,邓涛,徐婉筠,冉靓,赵春生(1530)

环境空气 PM<sub>2.5</sub> 连续监测系统手工采样比对测试 ..... 王强,钟琪,迟颖,张杨,杨凯(1538)

燃煤电厂可凝结颗粒物的测试与排放 ..... 裴冰(1544)

南海水域不同深度非光合微生物的固碳潜能及其对不同电子供体的响应 ..... 方峰,王磊,席雪飞,胡佳俊,付小花,陆兵,徐殿胜(1550)

基于 GOCI 影像和水体光学分类的内陆湖泊叶绿素 a 浓度遥感估算 ..... 冯驰,金琦,王艳楠,赵丽娜,吕恒,李云梅(1557)

贵州清水江流域丰水期水化学特征及离子来源分析 ..... 吕婕梅,安艳玲,吴起鑫,罗进,蒋浩(1565)

东莞石马河流域水化学特征时空差异及来源辨析 ..... 高磊,陈建耀,王江,柯志庭,朱爱萍,许凯(1573)

河南鸡冠洞洞穴水对极端气候的响应及其控制因素研究 ..... 刘肖,杨琰,彭涛,赵景耀,任小凤,张银环,聂旭东,李建仓,凌新有,张志钦(1582)

石漠化治理对岩溶地下水水化学和溶解无机碳稳定同位素的影响 ..... 肖时珍,熊康宁,蓝家程,张晖,杨龙(1590)

旱季不同土地利用类型下岩溶碳汇效应差异 ..... 赵瑞一,梁作兵,王尊波,于正良,江泽利(1598)

有机氯农药在岩溶区上覆土壤中的垂直迁移特征及对地下水的影响 ..... 孙玉川,王永启,梁作兵,袁道先(1605)

山东南四湖沉积物中汞的污染现状及迁移研究 ..... 曹霏霏,杨丽原,庞绪贵,王炳华,王云倩(1615)

摇蚊幼虫扰动下沉沉积物微环境和微界面对物理扰动强度的响应 ..... 史晓丹,李勇,李大鹏,王忍,邓猛,黄勇(1622)

南方红壤区氮湿沉降特征及其对流域氮输出的影响 ..... 郝卓,高扬,张进忠,徐亚娟,于贵瑞(1630)

不同紫色母岩对景观水体氮磷及有机物去除的影响 ..... 黄雪娇,刘晓晨,李振轮,石纹豪,杨珊(1639)

荔枝落叶对铜绿微囊藻生长和光合作用的影响 ..... 汪小雄,姜成春,李锦卫,汪晓军(1648)

黄连根茎浸提物对绿藻的毒理作用 ..... 陈亚楠,袁玲(1655)

饮用水中消毒副产物 1,1-二氯丙酮的形成机制 ..... 丁春生,孟壮,徐洋洋,缪佳(1662)

水中利谷隆氯化降解动力学和消毒副产物生成特性 ..... 凌晓,胡晨燕,程明,谷建(1668)

化学消毒的中和剂对水中内毒素活性检测的影响 ..... 张灿,刘文君,史文,安代志,白森,徐稳(1674)

牛粪生物炭对水中氨氮的吸附特性 ..... 马锋锋,赵保卫,刁静茹,钟金魁,李安邦(1678)

丁二酸改性茶油树木屑吸附附的研究 ..... 张晓峰,陈迪云,彭燕,刘永胜,熊雪莹(1686)

SPG 膜表面润湿性对膜污染和化学耐受性的影响 ..... 张静,肖太民,张晶,曹丽亚,杜亚威,刘春,张磊(1694)

TiO<sub>2</sub> 诱导下左旋氧氟沙星的可见光降解及其机制 ..... 郭宏生,刘亚楠,乔琪,魏红,董呈幸,薛洁,李克斌(1700)

新型高分子絮凝剂对废水中 Cr(VI) 的捕集性能 ..... 王刚,杜凤龄,常青,徐敏(1707)

基于 OUR-HPR 测量在线估计活性污泥合成 PHA 量 ..... 曾善文,王泽宇,高敬,刘东,张代钧,卢培利(1713)

分离高浓度污泥产酸发酵液的自生动态膜形成机制 ..... 黄帅,刘宏波,殷波,马惠君,符波,刘和,白洁(1720)

通风强度对市政污泥生物干化中试效果的影响 ..... 张喻,韩融,陆文静,王洪涛,明中远,王强,夏伟(1727)

生物可降解螯合剂谷氨酸 N,N-二乙酸四钠对污泥中重金属萃取效率的研究 ..... 吴青,崔延瑞,汤晓晓,杨慧娟,孙剑辉(1733)

百乐克(BIOLAK)活性污泥宏基因组的生物多样性及功能分析 ..... 田美,刘汉湖,申欣,赵方庆,陈帅,姚永佳(1739)

异养硝化-好氧反硝化菌 YL 的脱氮特性 ..... 梁贤,任勇翔,杨垒,赵思琪,夏志红(1749)

菌株 *Arthrobacter* sp. CN2 降解对硝基苯酚的特性与动力学 ..... 任磊,史延华,贾阳,姚雪松,Ruth Nahurira,弥春霞,闫艳春(1757)

短短芽胞杆菌及其芽胞对苜蓿的降解 ..... 刘芷辰,叶锦韶,彭辉,刘则华,邓庭进,尹华,廖丽萍(1763)

垃圾填埋场抗生素抗性基因初探 ..... 李蕾,徐晶,赵由才,宋立岩(1769)

不同构型人工湿地基质中土著菌的耐药性及整合子丰度调查 ..... 麦晓蓓,陶然,杨扬,张敏,林剑华,满滢(1776)

硝酸盐和甲烷对覆土中苯系物厌氧氧化的影响 ..... 柳蓉,龙焰,王立立,何婷,叶锦韶(1785)

山西高原落叶松人工林土壤呼吸的空间异质性 ..... 严俊霞,李洪建,李君剑,武江星(1793)

施氮对黄土旱塬区春玉米土壤呼吸和温度敏感性的影响 ..... 姜继韶,郭胜利,王蕊,刘庆芳,王志齐,张彦军,李娜娜,李如剑,吴得峰,孙棋棋(1802)

宣威街道尘中重金属的分布特征及其健康风险评估 ..... 张文超,吕森林,刘丁或,刘品威,米持真一,王效举,王青耀(1810)

宝鸡市街道尘埃磁学特征空间分布及环境意义 ..... 张俊辉,王瑾,张健,房妮,夏敦胜(1818)

长期施肥下浙江稻田不同颗粒组分有机碳的稳定特征 ..... 毛霞丽,陆扣萍,孙涛,张小凯,何丽芝,王海龙(1827)

矿区植被恢复方式对土壤微生物和酶活性的影响 ..... 李君剑,刘峰,周小梅(1836)

三江平原典型湿地类型土壤微生物特征与土壤养分的研究 ..... 肖焯,黄志刚,武海涛,吕宪国(1842)

钠盐类型对表面活性剂清洗煤油污染土壤的强化效应 ..... 黄昭露,陈泉源,周娟,谢墨函(1849)

石油污染土壤的生物修复技术及微生物生态效应 ..... 杨茜,吴蔓莉,聂麦茜,王婷婷,张明辉(1856)

可生物降解螯合剂 GLDA 诱导东南景天修复重金属污染土壤的研究 ..... 卫泽斌,陈晓红,吴启堂,谭蒙(1864)

绿洲土 Pb-Zn 复合胁迫下重金属形态特征和生物有效性 ..... 金诚,赵转军,南忠仁,王胜利,武文飞,王厚成(1870)

硫酸对水稻根系铁锰胶膜形成及吸收的影响 ..... 王丹,李鑫,王代长,饶伟,杜光辉,杨军,化党领(1877)

臭氧对几种楠木气体交换参数的影响 ..... 李苗苗(1888)

某货车侧翻水污染事件的环境损害评估方法探索 ..... 蔡锋,赵士波,陈刚才,鲜思淑,杨清玲,周贤杰,余海(1902)

《环境科学》征订启事(1543) 《环境科学》征稿简则(1756) 信息(1667,1726,1809,1848)

# 垃圾填埋场抗生素抗性基因初探

李蕾<sup>1</sup>, 徐晶<sup>1</sup>, 赵由才<sup>2</sup>, 宋立岩<sup>1,3\*</sup>

(1. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 环境微生物与生态研究中心, 重庆 400714; 2. 同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092; 3. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 水库水环境重点实验室, 重庆 400714)

**摘要:** 不同环境介质中抗生素抗性基因普遍存在, 但是在垃圾填埋场中抗生素抗性基因尚无相关报道. 本实验以西安江村沟垃圾填埋场为研究对象, 采集不同方位不同深度垃圾样品, 分析垃圾理化性质, 用荧光定量 PCR 检测磺胺类抗生素抗性基因 (*sulI* 和 *sulII*)、抗氯霉素类抗生素抗性基因 (*cat*)、 $\beta$ -内酰胺类抗生素抗性基因 (*bla-SHV*), 以及四环素类抗生素抗性基因 (*tetW*) 等 5 种抗生素抗性基因的含量, 以相关性分析垃圾理化性质与抗性基因的关联. 结果表明, 5 种抗生素抗性基因均存在于垃圾中, 基因拷贝数 (以干土计) 最大值分别为:  $(3.70 \pm 0.06) \times 10^8 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$  (*sulII*)、 $(9.33 \pm 0.06) \times 10^6 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$  (*sulI*)、 $(2.27 \pm 0.08) \times 10^5 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$  (*tetW*)、 $(3.68 \pm 0.09) \times 10^4 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$  (*bla-SHV*) 和  $(1.39 \pm 0.10) \times 10^4 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$  (*cat*), 说明垃圾填埋场是抗生素抗性基因潜在的储存库. 抗性基因 *sulI*、*sulII* 和 *cat* 与含水率呈明显的正相关, 同时 *sulI* 和 *cat* 基因含量与 pH 值呈负相关.

**关键词:** 垃圾填埋场; 理化因子; 荧光定量 PCR; 抗生素抗性基因; 相关性分析

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)05-1769-07 DOI: 10.13227/j.hjcx.2015.05.036

## Investigation of Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in Landfill

LI Lei<sup>1</sup>, XU Jing<sup>1</sup>, ZHAO You-cai<sup>2</sup>, SONG Li-yan<sup>1,3\*</sup>

(1. Environmental Microbiology and Ecology Research Center, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Key Laboratory of Reservoir Aquatic Environment, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China)

**Abstract:** Antibiotic resistant genes (ARGs), an emerging contaminant, have been detected worldwide in various environments such as sediments and river. However, little is known about ARGs distribution in landfill. In this study, we investigated five ARGs [sulfonamides resistant genes (*sulI* and *sulII*), chloramphenicols resistant gene (*cat*),  $\beta$ -lactams resistant gene (*bla-SHV*), and tetracyclines resistant gene (*tetW*)] in refuse samples collected from jiangcungou landfill (Xi'an, China) by real-time PCR. We then correlated the ARGs and physicochemical properties of refuse to examine the link between them. Results showed that all tested ARGs have been detected in all samples, suggesting that landfill served as ARGs reservoir. The highest copies numbers of *sulII*, *sulI*, *tetW*, *bla-SHV*, and *cat* were  $(3.70 \pm 0.06) \times 10^8 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$  (dry refuse),  $(9.33 \pm 0.06) \times 10^6 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$  (dry refuse),  $(2.27 \pm 0.08) \times 10^5 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$  (dry refuse),  $(3.68 \pm 0.09) \times 10^4 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$  (dry refuse), and  $(1.39 \pm 0.10) \times 10^4 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$  (dry refuse), respectively. Further, *sulI*, *sulII*, and *cat* positively correlated to moisture and *sulI* and *cat* negatively correlated to pH.

**Key words:** landfill; physicochemical factors; fluorescence quantitative PCR; antibiotic resistance gene (ARGs); relevance analysis

抗生素大量使用进入环境介质中诱导抗性基因产生, 导致大量耐药细菌出现, 威胁公众安全. 2006年, Pruden 等<sup>[1]</sup> 提出将抗生素抗性基因作为一种新型污染物. 抗性基因已经在不同的环境介质中 (河流<sup>[2]</sup>、土壤<sup>[3]</sup>、污水处理厂<sup>[4]</sup> 及污泥<sup>[5]</sup> 等) 得到广泛检测, 但是在垃圾填埋场中还没有相关的报道. 过期或者不用的抗生素不可避免地进入环境, 因此需要相关的法律法规来减少其对环境的污染. 美国很多州规定过期或者不用的抗生素必须丢弃到下水道<sup>[6]</sup>, 但是这种方式会导致污水处理厂抗性基因升高. 在我国, 过期或者不用的抗生素的去向没有明确的路线, 但是很多过期或者不用的抗生素随着生活垃圾进入到垃圾填埋场中 (尚无具体数据), 使垃

圾填埋场成为潜在的抗生素抗性基因储存库. 同时, 填埋场中抗生素抗性基因的存在, 会通过基因水平转移<sup>[7]</sup>、雨水冲刷、垃圾渗滤液、地表径流等方式污染周边的土壤、地下水和地表水.

抗生素抗性基因与抗生素水平<sup>[8]</sup> 显著相关, 同时还与环境介质本身的理化性质 (温度、光照、溶解氧等) 以及污染物等 (如有机物、重金属<sup>[9]</sup> 等) 密切相关. Engemann 等<sup>[10]</sup> 研究发现高温可使抗生素

收稿日期: 2014-10-08; 修订日期: 2014-12-25

基金项目: 重庆市前沿与应用基础研究项目 (cstc2014jcyjA20006); 中国科学院“西部行动计划”项目 (KZCX2-XB3-14)

作者简介: 李蕾 (1990 ~), 女, 硕士, 主要研究方向为抗生素抗性基因, E-mail: lilei@cigit.ac.cn

\* 通讯联系人, E-mail: songliyan@cigit.ac.cn

降解速率加快,诱导产生的抗性也随之减少. Peak 等<sup>[11]</sup>研究了养牛场蓄粪池中 6 种四环素抗性基因在夏秋两季的含量水平,结果显示,抗性基因的浓度在秋季明显高于夏季. Pei 等<sup>[12]</sup>检测了经过不同温度生物处理后的牛奶厂废水中 4 种抗生素抗性基因 (*tetW*、*tetO*、*sulI*、*sulII*) 的含量,结果发现 20℃ 处理后的抗性基因含量显著低于 4℃ 处理后的含量. Rysz 等<sup>[13]</sup>评估了氧气可利用率对四环素抗性基因增值速率的影响,研究发现厌氧条件可以消减抗性基因. Graham 等<sup>[14]</sup>对哈瓦那西部 Almendares 河流底泥中抗性基因与环境因子关联进行了调查,发现底泥中抗性基因的丰度与抗生素、重金属 (特别是 Cu) 的含量呈显著正相关性. 了解环境因子与抗性基因的关系,有助于有效防控环境介质中抗性基因.

本研究以西安江村沟垃圾填埋场为对象,遵循国标采取 3 个地点 3 个深度的垃圾样品,分析垃圾的理化指标,用荧光实时定量 PCR 技术调查了 5 种抗生素抗性基因的存在和污染水平,同时以相关性分析探讨了抗性基因与垃圾理化性质的相关关系,以期为我国垃圾填埋场中抗生素抗性基因的污染状况提供信息.

## 1 材料与方 法

### 1.1 样品采集与处理

垃圾采集于西安江村沟垃圾填埋场,如图 1 所示取 3 点分别为 S1、S2、S3,然后每一点分 3 层取样,P1、P2、P3 分别代表垃圾填埋场表层、中层和深层的土样. P1 采集自地表下 0~5 m,P2 采集自地表下 10~15 m,P3 采集自地表下 20~35 m. S1 区是 2 期扩建区,填埋龄为 1~3 a. S2 和 S3 区域为 10~15 a 填埋区,表层 5 米区域为填埋场 2 期扩建新填埋的垃圾,相应的填埋龄 S2 表层为 0.3 a,而 S3 表层为 1 a. 3 个取样点遵循填埋龄随着深度增加而增加的规律. 样品采集遵照国标生活垃圾填埋场岩土工程技术规范(CJJ 176-2012),用 XY-100 型液压型钻机进行钻孔,相应的套筒收集相应深度部位的垃圾.

所采集的样品带回实验室后混匀后一部分用于测定 pH 和含水率,一部分超低温(-80℃)保存,以备样品 DNA 提取,一部分低温(-4℃)保存,用于 FDA 水解酶活性的测定,剩余的垃圾固体放在实验室通风处进行风干后过 140 目筛,用于其他理化性质的测定.

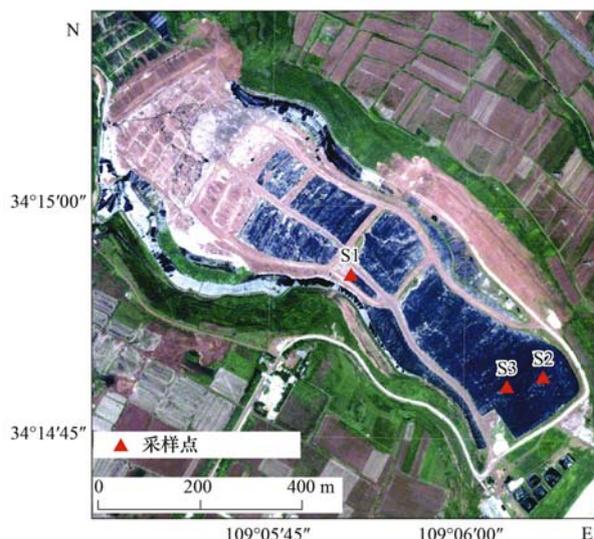


图 1 西安江村沟垃圾填埋场采样点

Fig. 1 Sampling locations at Jiangucungou landfill, Xi'an China

### 1.2 垃圾固体理化性质的测定

垃圾固体理化性质的检测按照文献[15]的方法进行检测. 60℃ 烘箱内烘干 24 h 后恒重测定含水率<sup>[16]</sup>; pH 值按 1:5 加水过滤后用 pH 计测定; 有机质采用重铬酸钾外加加热法; 总氮采用半微量凯氏定氮; 总磷采用氢氧化钠熔融法; 铵态氮采用靛酚比色法; 硝态氮采用酚二磺酸比色法; FDA 水解酶活性以荧光素二乙酸酯为底物培养垃圾微生物,用分光光度法检测荧光素浓度变化<sup>[17]</sup>.

### 1.3 垃圾固体 DNA 提取

称取 5 g 垃圾于 25 mL 离心管中,加入 20 mL PBS 缓冲液涡旋振荡 10 min,以 12 000 r·min<sup>-1</sup> 转速离心 3 min,倒掉上清液,重复 3 次后,采用试剂盒 PowerSoil® DNA Isolation Kit(MO-BIO, USA),按照生产厂商说明的方法提取 0.25 g 垃圾固体中所含微生物 DNA. 提取的 DNA 用超微量紫外分光光度计 NanoVue( GE, USA)检测浓度.

### 1.4 PCR

实验选择了磺胺类抗生素抗性基因(*sulI*和*sulII*)、抗氯霉素类抗生素抗性基因(*cat*)、β-内酰胺类抗生素抗性基因(*bla-SHV*)、以及四环素类抗生素抗性基因(*tetW*)等 5 种抗生素抗性基因,这 5 种抗生素抗性基因的引物、退火温度以及片段大小见表 1.

PCR 反应体系为: 10 × *Taq* DNA 聚合酶 buffer (Mg<sup>2+</sup>), 5 μL; MgSO<sub>4</sub> (25 mmol·L<sup>-1</sup>), 3 μL; dNTPs, 每种脱氧核苷酸 2.5 mmol·L<sup>-1</sup>; *rTaq* DNA 酶, 每个反应 2.5 Unit; DNA 模板, 2 μL; ddH<sub>2</sub>O, 34.95 μL; 总体积为 50 μL.

表 1 抗生素抗性基因引物

Table 1 Antibiotic resistance genes used in this research

引物名称 <sup>1)</sup>	序列(5'-3')	退火温度/°C	片段大小/bp	目的基因	文献
<i>sulI</i> , F <i>sulI</i> , R	CGCACCGGAAACATCGCTGCAC TGAAGTTCCGCCGCAAGGCTCG	65.0	163	<i>sulI</i>	[12]
<i>sulII</i> , F <i>sulII</i> , R	TCCGGTGGAGGCCGGTATCTGG CGGGAATGCCATCTGCCTTGAG	57.7	191	<i>sulII</i>	[12]
<i>cat</i> , F <i>cat</i> , R	ATGGCAATGAAAGACGGTGAGC TGCCGGAAATCGTCGTGGTATT	64.0	122	<i>cat</i>	[18]
<i>bla-SHV</i> , F <i>bla-SHV</i> , R	CGCTTTCCCATGATGAGCACCTTT TCCTGCTGGCGATACTGGATCTTT	64.0	110	<i>bla-SHV</i>	[18]
<i>tetW</i> , F <i>tetW</i> , R	GAGAGCCTGCTATATGCCAGC GGGCGTATCCACAATGTTAAC	60.0	168	<i>tetW</i>	[19]

1) F: forward primer; R: reverse primer

PCR 反应程序为: 95°C 预变性 10 min; 然后 95°C 15 s, 退火 30 s, 72°C 30 s, 35 个循环; 接着 72°C 7 min; 4°C 保存。

### 1.5 目的基因片段测序及序列比对

将 PCR 扩增出来的目的基因, 采用琼脂糖凝胶回收试剂盒 (Tiangen, Beijing) 进行切胶回收后, 连接到 pMD19 T-vector (TaKaRa, Japan) 载体上, 然后转化感受态大肠杆菌细胞 (DH5a, Biomed)。将转化的感受态细胞涂平板后于 37°C 培养 16 h 左右, 放入冰箱 4°C 2 h 后, 挑选出白斑, 用含有 Ampicillin 的 LB (Ampicillin 终浓度 50  $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ ) 培养液 (3~5 mL) 扩大培养, 取 1 mL 菌液送样至北京六合华大基因科技股份有限公司进行测序, 其余菌液用来提取质粒, 稀释标线备用。测序结果用 DNASTar 软件对序列进行拼接、编辑后, 在 NCBI 网站 (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/blast/>) 上进行 BLASTn 同源性检索比对。

### 1.6 荧光定量 PCR

使用 Realplex2 定量 PCR 仪 (Eppendorf, Germany) 对目标抗性基因进行 SYBR Green 荧光定量。定量 PCR 反应程序: 95°C, 15 min; [95°C 15 s (变性), Tm 30 s (引物退火), 72°C 30 s (引物延伸)]  $\times$  40 次; 95°C 15 s, 60°C 15 s, 升温 20 min, 95°C 15 s (溶解曲线添加)。反应体系为 20  $\mu\text{L}$ , 包含 Go Taq Q-PCR Master Mix 10  $\mu\text{L}$ , 引物 (10  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 的各 0.4  $\mu\text{L}$ , DNA 模板 1  $\mu\text{L}$ , Nuclease-Free Water 8.2  $\mu\text{L}$ 。

标准曲线的制备: 将制备的菌液用质粒提取试剂盒 MiniBEST Plasmid Purification Kit Ver 2.0 (TaKaRa, Japan) 按照生产商说明的方法进行提取, 然后将提取的质粒用超微量紫外分光光度计

(Nanodrop, UK) 检测其浓度。然后以此浓度的质粒 DNA 10 倍梯度稀释制定标准曲线。5 种标准曲线的系数  $R^2$  在 0.993~0.999 之间; 扩增效率  $E$  在 75.8%~112.7% 之间; 斜率在 -3.05~4.08 之间, 表明线性相关良好, 可用于计算各基因的拷贝数。

拷贝数计算公式:

$$\text{gene copy DNA} = (c \times 6.022 \times 10^{23}) / (660 \times N)$$

式中,  $c$  代表 DNA 浓度 ( $\text{ng}\cdot\mu\text{L}^{-1}$ ),  $N$  代表 DNA 片段的长度。

### 1.7 统计分析

所得的结果用 Spss 19.0 进行分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 垃圾理化性质

实验测得垃圾固体的理化性质由表 2 所示数据可以看出: 随着填埋深度的增加, 含水率、pH、TN、TP、有机质、硝态氮、铵态氮含量以及 FDA 水解酶活性都呈现出无规律变化。为了进一步清晰地描述垃圾填埋场不同深度垃圾理化性质的综合差异, 应用主成分分析 (principal components analysis, PCA) 对各样点的 8 个理化指标进行分析, 提取出特征值贡献最大的两个主成分 (PC1 和 PC2, 贡献率分别为 47.64% 和 29.52%) 来作为样点垃圾固体理化特性的变量, 不同样点第 1 和第 2 主成分得分的散布图如图 2 所示。同时计算理化因子的载荷, 如表 3 所示 (因子载荷是理化因子与相应主成分之间的相关系数, 其绝对值就越大, 对主成分的得分影响越大): PC1 代表含水率, pH 值, TN, 有机质, 硝态氮, 铵态氮以及 FDA 水解酶活性的综合指标, PC2 主要代表 TP 的综合指标。图 2 同样显示了垃圾填埋场

不同深度垃圾的理化因子没有明显的规律. 垃圾理化性质的无规律变化是由于垃圾成分复杂不均一的原因导致的, Barlaz 等<sup>[20]</sup>总结美国垃圾的特点也得出相同的结果.

表 2 垃圾固体的理化性质结果与 5 种抗生素抗性基因拷贝数对数值

Table 2 Physicochemical properties and copies of five antibiotic resistance genes of refuse

项目	指标	S1P1	S2P1	S3P1	S1P2	S2P2	S3P2	S1P3	S2P3	S3P3
理化性质	含水率( $x_1$ )/%	36.95	45.59	44.16	29.67	29.44	35.90	31.15	21.07	28.81
	pH( $x_2$ )	8.52	7.82	8.44	8.31	8.26	7.99	8.61	9.42	8.36
	总 N( $x_3$ )/g·kg <sup>-1</sup>	3.80	3.89	12.34	5.66	6.94	6.52	6.66	3.86	8.16
	总 P( $x_4$ )/g·kg <sup>-1</sup>	1.85	7.14	2.22	2.29	2.16	3.68	2.30	3.60	1.64
	有机质( $x_5$ )/g·kg <sup>-1</sup>	87.08	84.14	223.12	123.15	160.07	120.27	165.50	78.67	133.34
	硝态氮( $x_6$ )/mg·kg <sup>-1</sup>	21.6	91.7	89.9	22.8	37.7	68.9	89.7	23.3	83.4
	铵态氮( $x_7$ )/mg·kg <sup>-1</sup>	166.9	28.8	10.7	252.3	178.3	15.3	287.8	250.1	12.8
抗生素抗性基因	FDA(荧光素/土壤)( $x_8$ )/μg·(g·30 min) <sup>-1</sup>	0.86	2.35	6.42	3.90	4.10	1.53	1.17	0	5.50
	<i>sulI</i> ( $y_1$ )/lg(copies)	6.17	5.55	5.17	5.70	5.23	5.74	5.75	2.64	3.49
	<i>sulIII</i> ( $y_2$ )/lg(copies)	7.57	7.23	7.71	7.14	7.32	6.66	6.86	4.98	4.52
	<i>cat</i> ( $y_3$ )/lg(copies)	2.37	3.28	3.02	2.77	1.86	2.76	2.33	2.02	2.24
	<i>bla-SHV</i> ( $y_4$ )/lg(copies)	3.71	2.18	3.71	1.99	2.05	3.68	2.08	2.02	2.25
<i>tetW</i> ( $y_5$ )/lg(copies)	4.10	4.27	4.50	4.37	3.74	4.26	4.17	4.46	3.66	

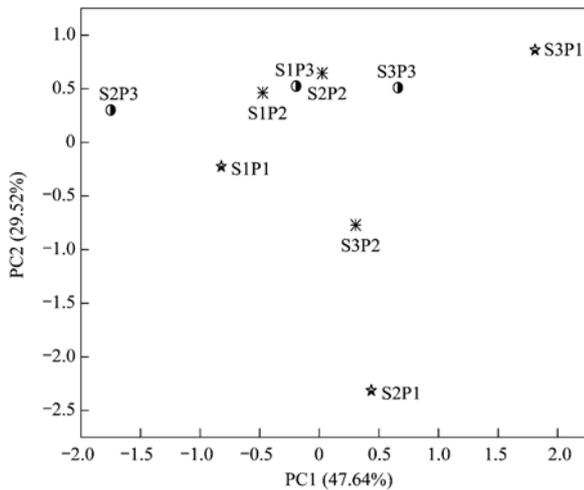


图 2 垃圾填埋场不同深度理化性质主成分分析的散布  
Fig. 2 PCA analysis of different depths landfill based on physicochemical properties

表 3 各个理化因子的载荷矩阵

Table 3 Physicochemical factors of loading

理化因子	Print1 载荷	Print2 载荷
含水率	0.691	-0.53
pH	-0.614	0.535
TN	0.819	0.539
TP	0.004	-0.896
有机质	0.72	0.599
硝态氮	0.759	-0.24
铵态氮	-0.749	0.384
FDA 水解酶活性	0.793	0.372

2.2 抗生素抗性基因分析

为了证明荧光定量 PCR 检测结果的可靠性,将所制的目标抗性基因质粒标准品测序结果与 NCBI 数据库进行对比,如表 4 所示,实验所选引物具有极好的专一性,所得到的基因序列与已有报道大小一致,相似度达 99% 以上.

表 4 5 种抗生素抗性基因的 BLASTn 结果

Table 4 BLASTn results of five antibiotic resistance genes

名称	描述	NCBI 编号	覆盖率/%	相似性/%
<i>SulI</i> (磺胺类耐药基因/二氢喋酸合成酶基因)	<i>Klebsiella pneumoniae</i> DNA, <i>SulI</i> dihydropteroate synthase, insertion sequence; ISCR1, QnrB2, strain; KUN-8056	AB933355.1	100	100
<i>SulIII</i> (磺胺类耐药基因/二氢喋酸合成酶基因)	<i>Stenotrophomonas maltophilia</i> strain LIM54-3 dihydropteroate synthase type II ( <i>sul2</i> ) gene, partial cds	KF307597.1	100	99
<i>cat</i> (氯霉素乙酰转移酶基)	<i>Pseudomonas</i> sp. C-D-MA7 <i>catA1</i> gene for chloramphenicol acetyltransferase, partial cds	AB826493.1	100	100
<i>bla-SHV</i> (广谱内酰胺酶基因)	<i>Klebsiella pneumoniae</i> strain 1830-2 beta-lactamase SHV-1 gene, complete cds	KF585134.1	100	99
<i>tetW</i> (核糖体保护基因)	Uncultured organism clone WW3as-52 tetracycline resistance protein ( <i>tetW</i> ) gene, partial cds	GU117055.1	100	100

以证明的抗性基因引物对垃圾样品中抗性基因进行荧光定量扩增,实验结果如图 3 所示. 可以看

出,所采的垃圾中都检测到了这 5 种抗生素抗性基因,说明这 5 种抗生素抗性基因广泛存在于西安江

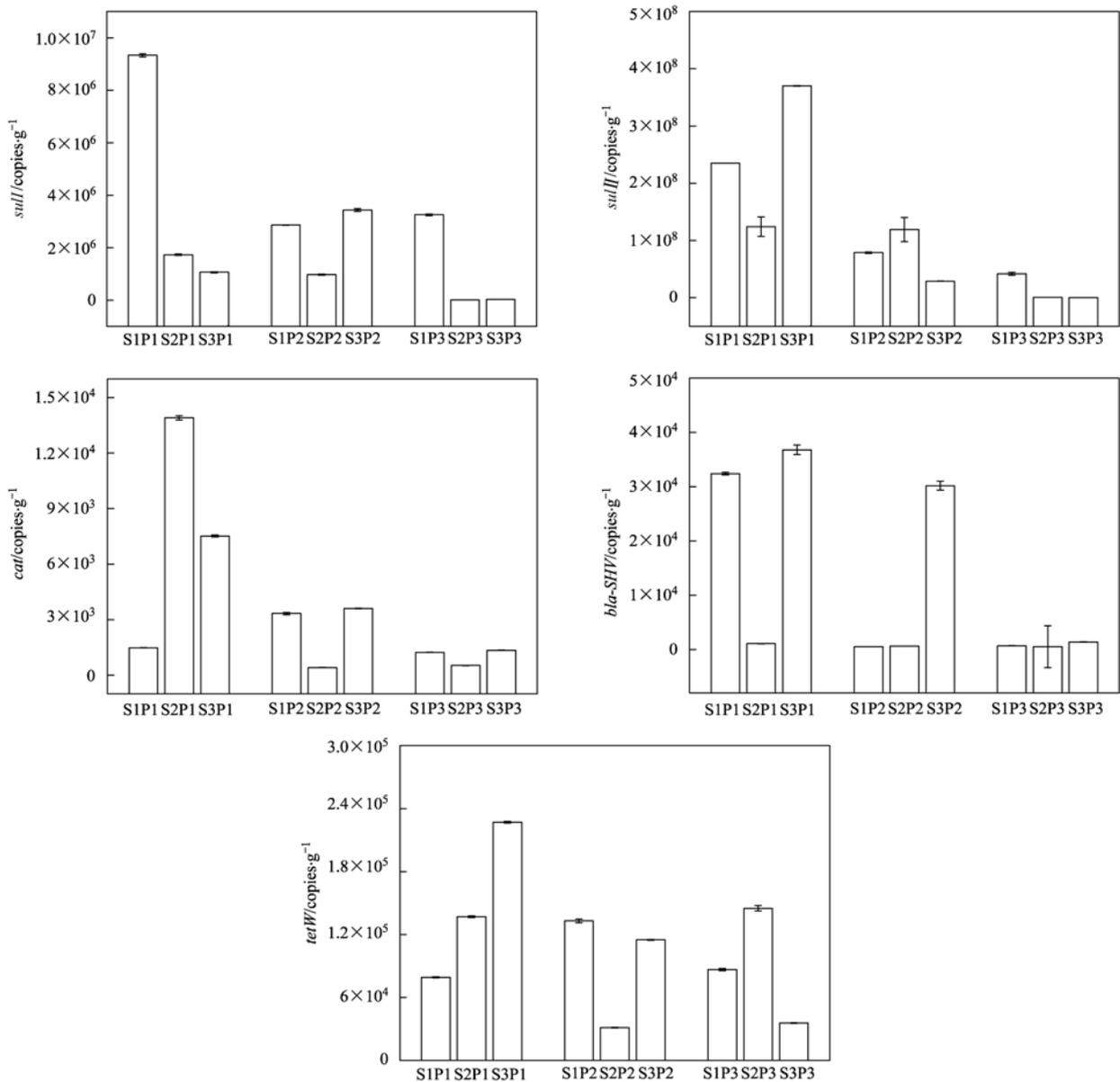


图3 垃圾固体中5种抗生素抗性基因拷贝数

Fig. 3 Copies of five antibiotic resistance genes in landfill

村沟垃圾填埋场中. 在这5种抗生素抗性基因中, 磺胺类抗性基因(*sulI*和*sulII*)含量最高, 四环素类抗性基因次之, 而抗氯霉素类抗性基因和 $\beta$ -内酰胺类抗性基因含量较低. 其中*sulII*基因拷贝数(以干土计, 下同)最高可达 $(3.70 \pm 0.06) \times 10^8$  copies·g<sup>-1</sup>, *sulI*基因拷贝数最高亦可达 $(9.33 \pm 0.06) \times 10^6$  copies·g<sup>-1</sup>, *tetW*最高基因拷贝数为 $(2.27 \pm 0.08) \times 10^5$  copies·g<sup>-1</sup>, *bla-SHV*基因拷贝数最高为 $(3.68 \pm 0.09) \times 10^4$  copies·g<sup>-1</sup>, 而*cat*基因拷贝数最高为 $(1.39 \pm 0.10) \times 10^4$  copies·g<sup>-1</sup>. 同时, 这5种基因的基因拷贝数最高值都出现在表层垃圾中, 可能原因是表层垃圾尚处于稳定化早期, 仅

有小量抗生素被降解或者迁移转化而保持较大的选择压力, 有利于ARGs的增长传播.

抗生素抗性基因普遍存在于中国的环境介质中, 尤其是磺胺类抗生素抗性基因与四环素类抗生素抗性基因. Gao等<sup>[21]</sup>对海河水体和沉积物进行了抗性基因的检测, 发现*sulI*和*sulII*在沉积物中拷贝数为 $10^9 \sim 10^{12}$  copies·g<sup>-1</sup>, 是水环境中的120~2000倍. Wu等<sup>[22]</sup>对畜禽养殖场周边土壤进行了抗性基因的检测, 检测出15种四环素类抗性基因, 建立了四环素类抗性基因从养殖场到周边土壤迁移的途径. 黄智婷<sup>[23]</sup>调查了上海两个垃圾中转站渗滤液中抗生素抗性基因的分布, 结果表明磺胺类抗生

素抗性基因与四环素类抗生素抗性基因均存在于渗滤液中,其中 *sulII* 含量最高可达到  $10^{11}$  copies·mL<sup>-1</sup>.

中国是世界最大的抗生素生产和消费国,2007年抗生素产量 21 万 t,其中 46.1% 用于畜禽养殖<sup>[24]</sup>. 过期或者不用的抗生素以及不被动物吸收的抗生素进入环境介质,在环境中迁移转化. 当抗生素进入垃圾填埋场后,导致抗性基因在填埋场的大量出现. 同时一些非法进入垃圾填埋场的医疗垃圾或者污水厂污泥由于本身携带大量的抗生素与抗生素抗性基因,也会导致抗性基因在垃圾填埋场的传播. 例如垃圾中转站渗滤液中检测到抗生素抗性基因是其进入垃圾填埋场的直接证据<sup>[23]</sup>.

### 2.3 抗生素抗性基因丰度与理化性质相关关系分析

表 5 垃圾固体 5 种抗生素抗性基因与理化性质相关性分析结果<sup>1)</sup>

Table 5 Correlation analysis between physicochemical properties and copies of five antibiotic resistance genes of refuse

	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$
$x_1$	0.611 *	0.661 *	0.824 **	0.550	0.241
$x_2$	-0.647 *	-0.462	-0.592 *	-0.199	0.251
$x_3$	-0.008	0.121	0.164	0.329	-0.018
$x_4$	0.045	0.087	0.572	-0.159	0.342
$x_5$	0.175	0.317	0.069	0.205	-0.024
$x_6$	0.090	-0.002	0.488	0.096	-0.052
$x_7$	-0.010	0.020	-0.519	-0.512	0.130
$x_8$	-0.024	0.087	0.219	0.056	-0.258

1) \* 表示在 0.05 水平上显著相关, \*\* 表示在 0.01 水平上显著相关

### 3 结论

(1) 5 种抗生素抗性基因 (*sulII*、*sulI*、*tetW*、*bla-SHV* 和 *cat*) 均存在于垃圾填埋场垃圾中,显示垃圾填埋场是抗生素抗性基因的一个重要储存库.

(2) 磺胺类抗性基因含量最高,四环素类抗性基因次之.

(3) 抗性基因 *sulI*、*sulII* 和 *cat* 与含水率呈明显的正相关,同时 *sulI* 和 *cat* 基因含量与 pH 值呈负相关.

#### 参考文献:

- [ 1 ] Pruden A, Pei R T, Storteboom H, *et al.* Antibiotic resistance genes as emerging contaminants: studies in northern Colorado [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40** (23): 7445-7450.
- [ 2 ] 杨颖. 北江水环境中抗生素抗性基因污染分析[D]. 广州: 中山大学, 2010.
- [ 3 ] Knapp C W, Dolfing J, Ehlert P A I, *et al.* Evidence of increasing antibiotic resistance gene abundances in archived soils since 1940[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44** (2): 580-587.
- [ 4 ] 李佳楠. 城市污水系统中典型抗生素、抗性基因和抗性细菌的丰度与关联性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [ 5 ] Zhang T, Zhang M, Zhang X X, *et al.* Tetracycline resistance genes and tetracycline resistant lactose-fermenting *Enterobacteriaceae* in activated sludge of sewage treatment plants [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43** (10): 3455-3460.
- [ 6 ] Kotchen M, Matthew J, Kallaos K, *et al.* Pharmaceuticals in wastewater: Behavior, preferences, and willingness to pay for a disposal program [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, **90**(3): 1476-1482.
- [ 7 ] Hill K E, Top E M. Gene transfer in soil systems using microcosms[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 1998, **25** (4): 319-329.
- [ 8 ] 周启星, 罗义, 王美娥, 等. 抗生素的环境残留、生态毒性及抗性基因污染[J]. *生态毒理学报*, 2007, **2**(3): 243-251.
- [ 9 ] Knapp C W, McCluskey S W, Singh B K, *et al.* Antibiotic resistance gene abundances correlate with metal and geochemical conditions in archived Scottish soils [J]. *PLoS One*, 2011, **6** (11): e27300.
- [ 10 ] Engemann C A, Keen P L, Knapp C W, *et al.* Fate of tetracycline resistance genes in aquatic systems; Migration from the water column to peripheral biofilms [J]. *Environmental*

实验测得垃圾固体的理化性质的均值以及 5 种抗生素抗性基因 copies 均数的对数值如表 2 所示,记垃圾固体理化性质的数据位  $x_1 \sim x_8$ , 5 种抗生素抗性基因的数据位  $y_1 \sim y_5$ . 采用统计分析软件 Spass 19.0 对表 2 中的数据进行 Pearson 相关性分析,结果如表 5 所示,可以发现抗性基因 *sulI*、*sulII* 和 *cat* 与含水率呈明显的正相关;同时 *sulI* 和 *cat* 基因含量与 pH 值呈负相关. 目前关于环境因子与抗性基因关联的研究尚处于起步阶段,一些研究证明抗性基因与抗性素的传播具有一致性和相似性<sup>[8]</sup>,但研究也表明环境因子会影响抗性基因的传播,例如环境介质中的重金属等污染物对抗性基因的水平转移有一定促进作用<sup>[9]</sup>. 而在本实验中含水率与 pH 影响抗性基因的丰度,但是具体机制尚不清楚.

- Science & Technology, 2008, **42**(14): 5131-5136.
- [11] Peak N, Knapp C W, Yang R K, *et al.* Abundance of six tetracycline resistance genes in wastewater lagoons at cattle feedlots with different antibiotic use strategies[J]. Environmental Microbiology, 2007, **9**(1): 143-151.
- [12] Pei R T, Kim S C, Carlson K H, *et al.* Effect of river landscape on the sediment concentrations of antibiotics and corresponding antibiotic resistance genes (ARG) [J]. Water Research, 2006, **40**(12): 2427-2435.
- [13] Rysz M, Alvarez P J J. Amplification and attenuation of tetracycline resistance in soil bacteria: aquifer column experiments[J]. Water Research, 2004, **38**(17): 3705-3712.
- [14] Graham D W, Olivares-Rieumont S, Knapp C W, *et al.* Antibiotic resistance gene abundances associated with waste discharges to the Almendares River near Havana, Cuba [J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(2): 418-24.
- [15] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- [16] 朱勇. 基于异化铁还原作用的准好氧填埋场 CH<sub>4</sub> 控制技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.
- [17] 马星竹. 长期施肥土壤的 FDA 水解酶活性[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2010, **36**(4): 451-455.
- [18] Xi C W, Zhang Y L, Marrs C Y, *et al.* Prevalence of antibiotic resistance in drinking water treatment and distribution systems [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2009, **75**(17): 5714-5718.
- [19] Chee-Sanford J C, Aminov R I, Krapac I J, *et al.* Occurrence and diversity of tetracycline resistance genes in lagoons and groundwater underlying two swine production facilities [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2001, **67**(4): 1494-1502.
- [20] Barlaz M A. Microbial studies of landfills and anaerobic refuse decomposition [J]. Manual of Environmental Microbiology, 1997. 541-557.
- [21] Gao P P, Mao D Q, Luo Y, *et al.* Occurrence of sulfonamide and tetracycline-resistant bacteria and resistance genes in aquaculture environment [J]. Water Research, **46**(7): 2355-2364.
- [22] Wu N, Qiao M, Zhang B, *et al.* Abundance and diversity of tetracycline resistance genes in soils adjacent to representative swine feedlots in China [J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(18): 6933-6939.
- [23] 黄智婷. 抗生素残留及抗性基因在生活垃圾转运填埋过程中的迁移转化和去除研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2014.
- [24] Hvistendahl M. China takes aim at rampant antibiotic resistance [J]. Science, 2012, **336**(6083): 795-795.

## CONTENTS

Pollution of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Particulate Matters of Shenzhen .....	SUN Jian-lin, CHANG Wen-jing, CHEN Zheng-xia, <i>et al.</i> (1513)
Emission Characteristics of VOCs from Typical Restaurants in Beijing .....	CUI Tong, CHENG Jing-chen, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (1523)
Characteristics Analysis of Sulfur Dioxide in Pearl River Delta from 2006 to 2010 .....	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (1530)
Comparison Test Between PM <sub>2.5</sub> Continuous Monitoring System and Manual Sampling Analysis for PM <sub>2.5</sub> in Ambient Air .....	WANG Qiang, ZHONG Qi, CHI Ying, <i>et al.</i> (1538)
Determination and Emission of Condensable Particulate Matter from Coal-fired Power Plants .....	PEI Bing (1544)
Potential Carbon Fixation Capability of Non-photosynthetic Microbial Community at Different Depth of the South China Sea and Its Response to Different Electron Donors .....	FANG Feng, WANG Lei, XI Xue-fei, <i>et al.</i> (1550)
Remote Sensing Estimation of Chlorophyll-a Concentration in Inland Lakes Based on GOCI Image and Optical Classification of Water Body .....	FENG Chi, JIN Qi, WANG Yan-nan, <i>et al.</i> (1557)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Qingshuijiang River Basin at Wet Season in Guizhou Province .....	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (1565)
Temporal-spatial Variation and Source Identification of Hydro-chemical Characteristics in Shima River Catchment, Dongguan City .....	GAO Lei, CHEN Jian-yao, WANG Jiang, <i>et al.</i> (1573)
Response and Control Factors of Groundwater to Extreme Weather, Jiguan Cave, Henan Province, China .....	LIU Xiao, YANG Yan, PENG Tao, <i>et al.</i> (1582)
Impact of Rocky Desertification Treatment on Underground Water Chemistry and Dissolved Inorganic Carbon Isotope in Karst Areas .....	XIAO Shi-zhen, XIONG Kang-ning, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (1590)
Difference of Karst Carbon Sink Under Different Land Use and Land Cover Areas in Dry Season .....	ZHAO Rui-yi, LIANG Zuo-bing, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (1598)
Vertical Migration Characteristics of Organochlorine Pesticides in Overlying Soil in Karst Terranes and Its Impact on Groundwater .....	SUN Yu-chuan, WANG Yong-qi, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i> (1605)
Pollution Status and Migration of Mercury in the Sediments of Nansi Lake in Shandong Province .....	CAO Fei-fei, YANG Li-yuan, PANG Xu-gui, <i>et al.</i> (1615)
Response of Sediment Micro Environment and Micro Interface to Physical Disturbance Intensity Under the Disturbance of <i>Chironomus plumosus</i> .....	SHI Xiao-dan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1622)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition and Associated Impact on N Transport in the Watershed of Red Soil Area in Southern China .....	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1630)
Effect of Different Purple Parent Rock on Removal Rates of Nitrogen, Phosphorus and Organics in Landscape Water .....	HUANG Xue-jiao, LIU Xiao-chen, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1639)
Effects of <i>Litchi chinensis</i> Defoliation on Growth and Photosynthesis of <i>Microcystis aeruginosa</i> .....	WANG Xiao-xiong, JIANG Chen-chun, LI Jin-wei, <i>et al.</i> (1648)
Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to Green Algae .....	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (1655)
Formation Mechanism of the Disinfection By-product 1,1-Dichloroacetone in Drinking Water .....	DING Chun-sheng, MENG Zhuang, XU Yang-yang, <i>et al.</i> (1662)
Degradation Kinetics and Formation of Disinfection By-products During Linuron Chlorination in Drinking Water .....	LING Xiao, HU Chen-yan, CHENG Ming, <i>et al.</i> (1668)
Interference for Various Quench Agents of Chemical Disinfectants on Detection of Endotoxin Activities in Water .....	ZHANG Can, LIU Wen-jun, SHI Yun, <i>et al.</i> (1674)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Dairy Manure Biochar .....	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, DIAO Jing-ru, <i>et al.</i> (1678)
Absorption of Uranium with Tea Oil Tree Sawdust Modified by Succinic Acid .....	ZHANG Xiao-feng, CHEN Di-yun, PENG Yan, <i>et al.</i> (1686)
Effect of Membrane Wettability on Membrane Fouling and Chemical Durability of SPG Membranes .....	ZHANG Jing, XIAO Tai-min, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (1694)
TiO <sub>2</sub> -Induced Photodegradation of Levofloxacin by Visible Light and Its Mechanism .....	GUO Hong-sheng, LIU Ya-nan, QIAO Qi, <i>et al.</i> (1700)
Performance of Novel Macromolecule Flocculant in the Treatment of Wastewater Containing Cr(VI) Ions .....	WANG Gang, DU Feng-ling, CHANG Qing, <i>et al.</i> (1707)
On-line Estimation for the Amount of Stored PHA in Activated Sludge Based on OUR-HPR Measurements .....	ZENG Shan-wen, WANG Ze-yu, GAO Jing, <i>et al.</i> (1713)
Formation Mechanism of Self-forming Dynamic Membrane During Separation of High-concentration Sewage Sludge Fermented for Acid Production .....	HUANG Shuai, LIU Hong-bo, YIN Bo, <i>et al.</i> (1720)
Influence of Air Flux on Municipal Sludge Biodrying in a Pilot Scale Test .....	ZHANG Yu, HAN Rong, LU Wen-jing, <i>et al.</i> (1727)
Extraction of Heavy Metals from Sludge Using Biodegradable Chelating Agent <i>N,N</i> -bis(carboxymethyl) Glutamic Acid Tetrasodium .....	WU Qing, CUI Yan-rui, TANG Xiao-xiao, <i>et al.</i> (1733)
Biodiversity and Function Analyses of BIOLAK Activated Sludge Metagenome .....	TIAN Mei, LIU Han-lu, SHEN Xin, <i>et al.</i> (1739)
Characteristics of Nitrogen Removal by a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium YL .....	LIANG Xian, REN Yong-xiang, YANG Lei, <i>et al.</i> (1749)
Biodegradation Characteristics and Kinetics of <i>p</i> -nitrophenol by Strain <i>Arthrobacter</i> sp. CN2 .....	REN Lei, SHI Yan-hua, JIA Yang, <i>et al.</i> (1757)
Biodegradation of Pyrene by Intact Cells and Spores of <i>Brevibacillus brevis</i> .....	LIU Zhi-chen, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i> (1763)
Investigation of Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in Landfill .....	LI Lei, XU Jing, ZHAO You-cai, <i>et al.</i> (1769)
Investigation of Antibiotic Resistance of Indigenous Bacteria and Abundance of Class I Integron in Matrix of Constructed Wetlands of Different Configurations .....	MAI Xiao-bei, TAO Ran, YANG Yang, <i>et al.</i> (1776)
Effects of Nitrate and CH <sub>4</sub> on Anaerobic Oxidation of BETX in Landfill Cover Soils .....	LIU Rong, LONG Yan, WANG Li-li, <i>et al.</i> (1785)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Planted Larch Forest in Shanxi Plateau .....	YAN Jun-xia, LI Hong-jian, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (1793)
Effects of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration and Temperature Sensitivity in Spring Maize Field in Semi-Arid Regions on Loess Plateau .....	JIANG Ji-shao, GUO Sheng-li, WANG Rui, <i>et al.</i> (1802)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in the Street Dusts in Xuanwei and Their Health Risk Assessment .....	ZHANG Wen-chao, LÜ Sen-lin, LIU Ding-yu, <i>et al.</i> (1810)
Spatial Distribution of Magnetic Properties of Street Dust in Baoji City and Its Implications of Environment .....	ZHANG Jun-hui, WANG Jin, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (1818)
Effect of Long-term Fertilizer Application on the Stability of Organic Carbon in Particle Size Fractions of a Paddy Soil in Zhejiang Province, China .....	MAO Xia-li, LU Kou-ping, SUN Tao, <i>et al.</i> (1827)
Effects of Different Reclaimed Scenarios on Soil Microbe and Enzyme Activities in Mining Areas .....	LI Jun-jian, LIU Feng, ZHOU Xiao-mei (1836)
Soil Microorganism Characteristics and Soil Nutrients of Different Wetlands in Sanjinag Plain, Northeast China .....	XIAO Ye, HUANG Zhi-gang, WU Hai-tao, <i>et al.</i> (1842)
Strengthening Effects of Sodium Salts on Washing Kerosene Contaminated Soil with Surfactants .....	HUANG Zhao-lu, CHEN Quan-yuan, ZHOU Juan, <i>et al.</i> (1849)
Effects and Biological Response on Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil .....	YANG Qian, WU Man-li, NIE Mai-qian, <i>et al.</i> (1856)
Enhanced Phytoextraction of Heavy Metals from Contaminated Soils Using <i>Sedum alfredii</i> Hance with Biodegradable Chelate GLDA .....	WEI Ze-bin, CHEN Xiao-hong, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (1864)
Speciation Characteristics and Bioavailability of Heavy Metals in Oasis Soil Under Pb, Zn Combined Stress .....	JIN Cheng, ZHAO Zhuan-jun, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (1870)
Influence of Sulfur on the Formation of Fe-Mn Plaque on Root and Uptake of Cd by Rice ( <i>Oryza sativa</i> L.) .....	WANG Dan, LI Xin, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (1877)
Effects of Ozone on Photosynthesis of Several Plants .....	LI Miao-miao (1888)
A Method Research on Environmental Damage Assessment of a Truck Rollover Pollution Incident .....	CAI Feng, ZHAO Shi-bo, CHEN Gang-cai, <i>et al.</i> (1902)

# 《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5月15日 第36卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 5 May 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

国内外公开发行