ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第1期

Vol.33 No.1

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

中国期刊方阵 双奖期刊 中华人民共和国新闻出版总署

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第33卷 第1期
2012年1月15日

目 次

30年来中国民航运输行业的大气污染物排放 …… 何吉成(1)
北京上甸子站气相色谱法大气 CH_4 和 CO 在线观测方法研究 …… 汪巍,周凌晞,方双喜,张芳,姚波,刘立新(8)
2010年1月北京城区大气消光系数重建及其贡献因子 …… 朱李华,陶俊,陈忠明,赵岳,张仁健,曹军骥(13)
广东东江流域多氯萘的大气沉降研究 …… 王琰,李军,刘向,成志能,张瑞杰,张干(20)
塔克拉玛干沙尘暴源区空气微生物群落的代谢特征 … 段魏巍,娄恺,曾军,胡蓉,史应武,何清,刘新春,孙建,晁群芳(26)
紫外光降解对生物过滤塔去除氯苯性能的影响机制研究 …… 王灿,席劲瑛,胡洪营,姚远(32)
春季黄渤海溶解有机碳的平面分布特征 …… 丁雁雁,张传松,石晓勇, 商荣宁(37)
春季胶州湾海水汞的形态研究 …… 许廖奇,刘汝海,王金玉,汤爱坤,王舒(42)
丽江盆地地表-地下水的水化学特征及其控制因素 …… 蒲焘,何元庆,朱国锋,张蔚,曹伟宏,常丽,王春凤(48)
塔里木河下游输水间歇地下水埋深及化学组分的变化 …… 陈永金,李卫红,董杰,刘加珍 (55)
某危险废物填埋场地下水污染预测及控制模拟 …… 马志飞,安达,姜永海,席北斗,李定龙,张进保,杨昱(64)
北京市城市降雨径流水质评价研究 …… 侯培强,任玉芬,王效科,欧阳志云,周小平(71)
重庆市路面降雨径流特征及污染源解析 …… 张千千,王效科,郝丽岭,侯培强,欧阳志云 (76)
沉水植物床-固定化微生物技术在水源地修复中的应用研究 …… 陈祈春,李正魁,王易超,吴凯,范念文(83)
Pd/TiO_2 对水体中2,4-二氯酚的催化加氢脱氯研究 …… 张寅,邵芸,陈欢,万海勤,万玉秋,郑寿荣(88)
pH值对纳米零价铁吸附降解2,4-二氯苯酚的影响 …… 冯丽, 葛小鹏, 王东升, 汤鸿霄(94)
给水管网中耐氯性细菌的灭活特性研究 …… 陈雨乔,段晓笛,陆品品,王茜,张晓健,陈超(104)
安徽省畜禽粪便污染耕地、水体现状及其风险评价 …… 宋大平,庄大方,陈巍(110)
染整废水深度处理纳滤工艺膜污染成因分析 …… 曹晓兵,李涛,周律,杨海军,王晓(117)
间歇式气水联合反冲洗生物炭池的试验研究 …… 谢志刚,邱雪敏,赵燕玲(124)
pH及表面活性剂对诺氟沙星在海洋沉积物上吸附行为的影响 …… 庞会玲,杨桂朋,高先池,曹晓燕(129)
硅在湖泊沉积物上的吸附特征及形态分布研究 …… 吕昌伟,崔萌,高际玫,张细燕,万丽丽,何江,孟婷婷,白帆,杨旭(135)
农作物残体制备的生物质炭对水中亚甲基蓝的吸附作用 …… 徐仁扣, 赵安珍, 肖双成, 袁金华 (142)
高分子固体废物基活性炭对有机染料的吸附解吸行为研究 …… 廉菲,刘畅,李国光,刘一夫,李勇,祝凌燕(147)
活性污泥对四环素的吸附性能研究 …… 陈瑞萍,张丽,于洁,陶芸,张忠品,李克勋,刘东方(156)
加油站油类污染物自然衰减现场试验研究 …… 贾慧, 武晓峰, 胡黎明, 刘培斌(163)
生物质炭对土壤中氯苯类物质生物有效性的影响及评价方法 …… 宋洋,王芳,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,谢祖彬,蒋新(169)
利用第二缺氧段硝酸盐氮浓度作为MUCT工艺运行控制参数 …… 王晓玲,尹军,高尚(175)
数学模拟好氧颗粒污泥的形成及水力剪切强度对颗粒粒径的影响 …… 董峰, 张捍民, 杨凤林(181)
不同污泥停留时间对城市污泥生物沥浸推流式运行系统的影响 …… 刘奋武,周立祥,周俊,姜峰,王电站(191)
间歇曝气生物滤池生物除磷性能研究 …… 曾龙云, 杨春平, 郭俊元, 罗胜联(197)
鸡粪与互花米草沼渣混合发酵产甲烷的研究 …… 陈广银,常志州,叶小梅,杜静,徐跃定,张建英(203)
北京市生活垃圾填埋场产甲烷不确定性定量评估 …… 陈操操,刘春兰,李铮,王海华 ,张妍,王璐(208)
外加酶强化剩余污泥微生物燃料电池产电特性的研究 …… 杨慧,刘志华,李小明,杨麒,方丽,黄华军,曾光明,李硕(216)
赤潮藻电致化学发光分子探针检测系统的构建 …… 朱霞,甄毓,米铁柱,池振明,徐晓春(222)
邻苯二甲酸二丁酯对短裸甲藻的抑制机制研究 …… 别聪聪,李锋民,王一斐,王昊云,赵雅菡,赵薇,王震宇(228)
纳米 TiO_2 对短裸甲藻的毒性效应 …… 李锋民,赵薇,李媛媛,田志佳,王震宇(233)
苏州河底泥3种内分泌干扰物的空间分布及环境风险 ……
…… 李洋,胡雪峰,王效举,茂木守,大塚宜寿,细野繁雄,杜艳,姜琪,李珊,冯建伟(239)
电子废物拆解区农业土壤中PCNs的污染水平、分布特征与来源解析 ……
…… 王学彤,贾金盼,李元成,孙阳昭,吴明红,盛国英,傅家谟(247)
洛阳市不同功能区道路灰尘重金属污染及潜在生态风险 …… 刘德鸿,王发园,周文利,杨玉建(253)
湘江流域土壤重金属污染及其生态环境风险评价 …… 刘春早,黄益宗,雷鸣,郝晓伟,李希,铁柏清,谢建治(260)
广西铅锑矿冶炼区土壤剖面及孔隙水中重金属污染分布规律 …… 项萌,张国平,李玲,魏晓飞,蔡永兵(266)
缺氧条件下土壤砷的形态转化与环境行为研究 …… 吴锡, 许丽英, 张雪霞, 宋雨, 王新, 贾永锋(273)
可渗透反应复合电极法对铬(Ⅵ)污染土壤的电动修复 …… 付融冰,刘芳,马晋,张长波,何国富(280)
胡敏酸对汞还原能力的测定和表征 …… 江韬,魏世强,李雪梅,卢松,李梦婕,罗畅(286)
Zn(Ⅱ)对生物质碳源处理酸性矿山排水中厌氧微生物活性影响 …… 黎少杰,陈天虎,周跃飞,岳正波,金杰,刘畅(293)
油气田土壤样品中可培养丁烷氧化菌多样性研究 …… 张莹,李宝珍,杨金水,汪双清,袁红莉(299)
利用PCR-DGGE分析未开发油气田地表微生物群落结构 …… 满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强(305)
黄土高原六道沟流域8种植物根际细菌与AMF群落多样性研究 …… 封晔,唐明,陈辉,丛伟(314)
鸡粪与猪粪所含土霉素在土壤中降解的动态变化及原因分析 …… 张健, 关连珠, 颜丽(323)
杂质对废塑料裂解产物及污染物排放的影响 …… 赵磊, 王中慧,陈德珍,马晓波,栾健(329)
《环境科学》征稿简则(7) 《环境科学》征订启事(19) 信息(47,70,202,304)

北京市生活垃圾填埋场产甲烷不确定性定量评估

陈操操[1],刘春兰[1],李铮[1],王海华[1],张妍[2],王璐[3]

(1. 北京市环境保护科学研究院,北京 100037; 2. 清华大学环境学院,北京 100084; 3. 北京市可持续发展科技促进中心,北京 100101)

摘要: 为了提高北京市生活垃圾填埋场产 CH_4 评估精度,联合 FOD 模型和 Monte Carlo 方法,依靠本地和国家数据及专家经验,对模型进行不确定性识别和敏感性分析,量化各参数对模型输出结果的影响. 结果表明,2008 年北京市因填埋产 CH_4 量 95% 的概率分布范围为(11.80~19.76)$\times 10^4$ t·a^{-1},均值为 15.58$\times 10^4$ t·a^{-1},排放的不确定范围为 -24.26% ~26.83%. FOD 模型中甲烷修正因子 MCF(2000 年后)对 2008 年排放结果的影响最大,其结果不确定性的贡献率为 41.4%. 研究提高了北京市生活垃圾填埋场 CH_4 排放量评估精度和质量,为指导填埋场温室气体清单改进和数据收集提供科学依据.

关键词:不确定性分析; Monte Carlo; FOD 模型; 生活垃圾填埋场; 温室气体; 甲烷

中图分类号: X16 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2012)01-0208-08

Uncertainty Analysis for Evaluating Methane Emissions from Municipal Solid Waste Landfill in Beijing

CHEN Cao-cao[1], LIU Chun-lan[1], LI Zheng[1], WANG Hai-hua[1], ZHANG Yan[2], WANG Lu[3]

(1. Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China; 2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Beijing Sustainable Development Center, Beijing 100101, China)

Abstract: In order to improve the accurate evaluation of CH_4 emissions from municipal solid waste landfill in Beijing, FOD-model and Monte Carlo method were conducted. Based on local data, national data and experts' experience, the uncertainty of FOD-model and parameters' sensitivity analysis were identified. And we quantified effect of various parameters on model output. The results showed that 95% probability distribution range of CH_4 emission from landfill was (11.8-19.76)$\times 10^4$ t·a^{-1} in Beijing. The mean value was 15.58 $\times 10^4$ t·a^{-1} with uncertainty range of -24.26%-26.83%. Among all the parameters MCF(after 2000) showed the greatest impact on landfill CH_4 emission in 2008, and its contribution to the uncertainty of emission result was 41.4%. This research can improve the assessment accuracy and quality on CH_4 emission from municipal solid waste landfill in Beijing, as providing scientific basis to improve the landfill greenhouse gas inventory and data collection.

Key words: uncertainty analysis; Monte Carlo; FOD model; municipal solid waste landfill; greenhouse gas; methane

气候变化成为目前国际社会普遍关注的重大全球性问题. 政府间气候变化专门委员会(IPCC)发布的第四次综合评估报告得出明确结论,自 20 世纪中期至今观测到的全球变暖现象,超过 90% 的可能是由人类活动排放温室气体形成的增温效应导致[1]. 要降低气候变化不利影响的危害,必须联合和消减全球温室气体排放量,特别是人为温室气体排放量.

城市垃圾填埋场是温室气体的一个重要的人为排放源. 城市固体废物(MSW)在填埋处置时,甲烷菌能够使填埋废物中的有机碳发生生物降解,从而产生甲烷. 甲烷(CH_4)是一种强效的温室气体,其全球增温潜势(GWP)相当于相同单位质量 CO_2 的 25 倍,对全球温室效应的总贡献为 18.1%,仅次于 CO_2 的 63.5%[2]. 2010 年最新的研究报道显示[2],当前大气中的 CH_4 浓度自从 1750 年以来上升了 158%,是过去 40 万年以来的最高水平. 全世界每年 CH_4 排放量约 5×10^8 t,其中有(2 200~3 600)$\times 10^4$ t 来自垃圾填埋场. 美国 2008 年生活垃圾填埋产生的 CH_4 占其人为甲烷排放总量的 22.3%,是美国 CH_4 的第二大人为甲烷排放源[3]. 中国在颁布的国家应对气候变化方案中也将加强城市垃圾管理作为减缓温室气体排放的重点领域之一[4]. 可见,垃圾填埋在全球温室气体排放中贡献很大,引起了多方重视,而控制填埋场 CH_4 排放是缓解甲烷排放最有效和便捷的措施[5],填埋场 CH_4 产量评估成为一个关键步骤.

目前从国内外对填埋气产量评估方法的研究来看,模型评估法是研究的重点和热点[6]. 模型评估法通常建立在经验公式或产气动力学的基础上. 尤

收稿日期: 2011-02-14; **修订日期**: 2011-04-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41001380); 北京市科技新星计划项目(2010B023); 北京市科技计划项目(Z08000602620801)

作者简介: 陈操操(1980~),男,博士,主要研究方向为全球变化与碳排放,E-mail:ecoduron@163.com

其是动力学评估模型精确程度更高，它从机制上解释 CH_4 产生的实质，考虑了填埋场长期而非短期的产气规律，模型参数多，涉及填埋气产量及产气速率等多方面因素[7]. 其中 IPCC 推荐的 FOD 模型属于动力学产气模型，已经成为国际上普遍认可的填埋场 CH_4 估算模型，被众多国家和地区广泛采用[8~10].《IPCC1996 年国家温室气体清单指南》首先给出填埋场产气的动力学一阶衰减模型（FOD）的基本数学形式[11]，紧接着《IPCC 国家温室气体清单优良作法指南与不确定性管理》以及《IPCC2006 年国家温室气体清单指南》进一步完善 FOD 产气模型，推荐其作为清单编制的优先使用方法（Tier2），并定义了 FOD 模型参数选择范围和选择方式[12, 13]. 但由于 FOD 模型的提出是基于欧美地区的生活垃圾特性，在预测我国的垃圾填埋气体产生速率方面会存在系统误差，需要对参数进行调整和修改.

填埋是北京市最主要的垃圾处理方式，生活垃圾填埋处理率高达 93%. 生活垃圾填埋场也是北京市关键的甲烷排放源之一[14]. 生活垃圾填埋场产气受垃圾成分、温度、含水量、微生物等多种条件因素影响. 在评估北京市生活垃圾填埋产 CH_4 过程中，不可避免地存在随机误差、关键数据缺乏以及数据代表性不足等固有不确定因素，如果这些不确定因素不能被正确识别和量化，有可能对排放趋势、重要不确定性源的识别等产生错误认识，甚至可能因此制定错误的策略，因此应对模型排放评估进行不确定分析.

国外在分析填埋场 CH_4 排放[7, 15]、温室气体[16~18]和污染物排放清单[19]，以及机动车排放模型等研究中[20, 21]，广泛地运用概率分析方法识别和量化分析的不确定性，将环境模型与不确定分析结合到一起，以提高评估的精确程度. 国内环境模型不确定分析工作刚刚起步，相关研究较少，与国外研究具有较大的差距[22]. 根据检索文献发现，国内目前将填埋场 CH_4 排放评估与不确定分析相结合的研究还很少，处于初步探索阶段.

本研究采用 IPCC 一阶衰减模型（FOD）对北京市生活垃圾填埋产 CH_4 进行评估，基于北京市典型生活垃圾填埋场长期监测数据、专家经验判断和已有国内同类研究，确定模型输入参数，选取 Monte Carlo 随机模拟方法客观评估生活垃圾填埋 CH_4 排放量，对模型参数进行不确定性识别和敏感性分析，量化各参数对模型输出结果的影响，以期为提高填埋场 CH_4 排放评估精度与质量，指导填埋场温室气体清单改进和数据采集提供了科学依据.

1　北京市生活垃圾填埋处置概况

北京市垃圾处理起步于 20 世纪 70 年代后期，在 70 年代之前，城市固体废物随意倾倒，没有实施卫生填埋，缺乏污染防范措施，许多固体废物堆放场地多为城市周边废坑和低洼坑地，如采沙坑、采石坑、采矿坑和天然沟堑. 1981 年北京市成立了环境卫生科研所，专门从事城市垃圾、粪便处理的研究工作. 1982 年开始建设垃圾转运站和垃圾堆放场. 直到 1990 年，北京市非正式的垃圾填埋和倾倒仍非常普遍，许多填埋场没有专门的设计和采取任何工程措施，缺乏底部、侧部防渗层和顶部盖层. 1991 年北神树垃圾综合处理厂、石景山垃圾简易处理厂投入使用. 1994 年北京市才建成并投入使用第一座垃圾卫生填埋场（阿苏卫），日处理垃圾2 000 t，随着城市生活垃圾填埋场日渐增多，填埋逐渐成为北京市生活垃圾处理处置最主要方式. 到 2000 年北京市共建成垃圾卫生填埋场 6 座，垃圾无害化处理率 81.5%，卫生填埋方式占总处理能力的 85.5%. 截至目前，北京市共拥有垃圾卫生填埋场 15 座，无害化处理率 95.9%，填埋处置占总处理能力比例上升到 93%.

2　方法与数据

2.1　IPCC 一阶衰减模型

本研究选择 IPCC 推荐的固体废物产甲烷一阶衰减模型（FOD）进行评估. 此方法假设在 CH_4 形成过程中，填埋场中可降解有机碳（DOC）分解缓慢，在条件恒定情况下，CH_4 产生量取决于固体废物的含碳量. 在填埋处置后最初的若干年，CH_4 产气量会逐渐达到顶点，随着固体废物中可降解有机物含碳量被甲烷菌消耗，CH_4 排放量也会逐渐下降. 模型中逐年填埋场 CH_4 排放量计算可见公式（1）.

$$CH_{4排放} = \left[\sum_{x} CH_{4产生量x,T} - R_T\right] \times (1 - OX_T) \quad (1)$$

式中，$CH_{4排放}$ 为 T 年城市固体废物填埋排放的 CH_4 量（t）；X 为填埋的固体废物种类；R_T 为 CH_4 在 T 年的回收量（t）；OX_T 为 T 年的氧化因子；OX_T 反映固体废物填埋释放的 CH_4 在土壤中被氧化的部分；$CH_{4产生量x,T}$ 为废物中可降解有机碳可产生 CH_4 的量（t）.

$$CH_{4产生量T} = DDOCm_{降解T} \times F \times 16/12 \quad (2)$$

式中,$DDOCm_{降解T}$为 T 年降解的有机碳(t); F 为填埋气中 CH_4 所占体积分数,16/12 为甲烷和碳的摩尔质量比值. 一阶衰减公式可用公式(3)、(4)表示.

$$DDOCma_T = DDOCmd_T + (DDOCma_{T-1} \times e^{-k}) \quad (3)$$

$$DDOCm_{降解T} = DDOCma_{T-1} \times (1 - e^{-k}) \quad (4)$$

式中,$DDOCma_T$ 为 T 年末生活垃圾填埋场累积的可降解有机碳(t); $DDOCma_{T-1}$ 为($T-1$)年年终时填埋场累积的可降解有机碳(t); $DDOCmd_T$ 为 T 年新增到生活垃圾填埋场的可降解有机碳(t); k 为反应常量,$k = \ln(2)/t_{1/2}$; $t_{1/2}$ 为半衰期时间(a). 可分解有机碳的估算公式如公式所示.

$$DDOCm = W \times DOC \times DOC_f \times MCF \quad (5)$$

式中,DDOCm 为可降解有机碳质量(t); W 为生活垃圾填埋质量(t); DOC 为该年生活垃圾中可降解有机碳(C/生活垃圾)的比例(t/t); DOC_f 为可降解有机碳分解的百分比; MCF 为该年填埋释放 CH_4 的氧化修正因子.

2.2 不确定性评估方法

生活垃圾填埋场产 CH_4 评估的不确定性来源于 2 个方面:①方法的不确定性; ②活动水平数据和模型各参数的不确定性. 本研究中生活垃圾填埋场产 CH_4 的不确定性主要考虑活动水平数据观测随机误差分布、模型中参数优化方法导致的不确定性,没有考虑方法引起的不确定性.

本研究采用了 Monte Carlo 方法研究 FOD 一阶衰减模型中各参数对产气模拟结果的不确定性影响. Monte Carlo 方法是一种采用统计抽样理论近似地求解数学问题或物理问题的方法,其基本步骤为[20]:① 选择需进行不确定性分析的输入参数; ②确定输入参数的概率分布与范围(probability distribution functions, PDF); ③产生模型输出值的概率分布,包括输入参数随机变量抽样和参数不确定性在模型中增值传播的模拟. 本研究参照这样的程序,其中输入参数包括北京生活垃圾填埋处置的相关活动水平和排放因子,可用统计分析或专家判断法利用监测数据或经验数据获取,数据分布代表了参数的变化范围,用概率分布模型描述. 常用的概率分布模型包括正态分布(Normal)、对数正态分布(Binomial)、伽马分布(Gamma)、贝塔分布(Beta)、韦伯分布(Weibull)、均匀分布(uniform)和三角分布(triangle)等. Monte Carlo 方法最终利用所得参数概率密度分布结果作为输入变量,从模型输入中随机抽取值并计算相应模型输出大小,经过 n 次重复抽样,由 n 次模型输出构成的概率分布代表了模型输出的不确定性.

同时,研究采用敏感性分析(sensitivity analysis)方法识别 FOD 模型的输入参数变化对模型输出变化的影响排序,通过皮尔逊(Pearson)相关系数法评估模型输入和输出的线性相关程度,将所有相关系数归一到 100%[20],从而解释模型输入参数对生活垃圾填埋 CH_4 不确定性贡献.

2.3 数据与模型参数界定

研究中城市生活垃圾产生和填埋处理数据主要来自历年北京市环境质量公报、统计年鉴和研究报告[23, 24]. 生活垃圾组分结构数据源于课题组对阿苏卫、六里屯等北京市生活垃圾填埋场垃圾组分监测数据,以及已有北京市生活垃圾相关研究数据[25~29]的统计与归并. FOD 模型输入关键参数的界定与概率分布来源于国内垃圾填埋场长期监测实验分析、IPCC 推荐值范围以及专家经验判断.

1991 年之前北京市的垃圾处理基本是采用简易堆放的方式进行处理,产甲烷量较少,因此本研究的时间段为 1991~2008 年.

2.3.1 城市生活垃圾产生量与填埋量

我国习惯上以城市环卫部门的清运垃圾量作为城市生活垃圾的产生量. 在 2000 年以前,北京市历年垃圾清运量基本是按照车载吨位数计算和统计而成[30]. 2000 年开始各垃圾处理场安装了地磅,生活垃圾清运量才开始通过实际称重获得. 当以车载吨位数统计时,由于垃圾的比重低,车辆的实际装载量通常达不到额定载重量,因此统计到的清运量与实际值有较大差距[31],需要对 2000 年以前清运数据按车载吨位校正. 北京市环境卫生研究所曾对各种垃圾运输车型的实际装载量进行抽样过磅称重,得到全市垃圾清运量的平均修正系数为 35%[30, 31]. 生活垃圾无害化处理量为生活垃圾清运量与垃圾无害化处理率乘积. 生活垃圾无害化处理方法主要有卫生填埋、焚烧、堆肥等 3 种符合垃圾无害化处理标准的处理方法. 因此城市生活垃圾填埋量是无害化处理量与填埋处理率的乘积.

由于统计口径的不一致,本研究首先根据历年环境状况公报、统计数据以及文献数据,对北京市逐年垃圾清运量、无害化处理量、填埋量数据进行重新核对与校正[23, 24],如图 1 所示. 可见,从 1990~2008 年北京市生活垃圾产生量和处理量呈逐年增长趋势. 前 10 a 生活垃圾清运量、无害化处理量和填埋量呈现平稳增长,平均增幅分别为 2.2%、2.9% 和

2.8%. 然而最近 5 a 垃圾清运与填埋处理的增速加快，平均增幅达到 13.2%、14.6% 和 15.4% 的水平.

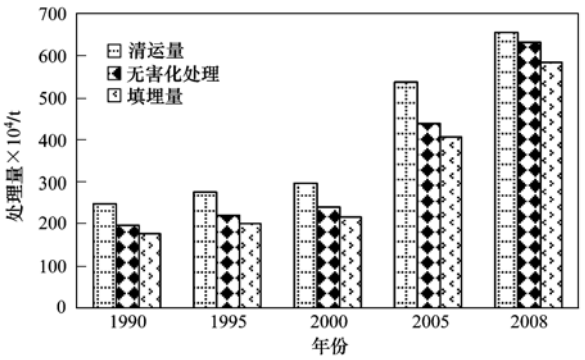

图 1　北京市生活垃圾处理量变化

Fig. 1　Variation in municipal solid waste disposal in Beijing

2.3.2　FOD 模型参数界定

根据公式(1)~(5)，FOD 模型关键参数主要包括甲烷修正因子(MCF)、可降解有机碳(DOC)、填埋场可降解有机碳分解的百分比(DOC_f)、填埋气中 CH_4 的比重(F)、甲烷回收利用量(R)、氧化因子(OX)以及反应常数(k). 本研究中关键参数界定有 2 种途径，一类数据如可降解有机碳 DOC，通过对北京市 2000~2007 年典型垃圾填埋场阿苏卫和六里屯垃圾成分按月划分连续监测数据进行重新整理和分析，利用极大似然估计(maximum likelihood estimation)方法，评估确定 DOC 概率分布和参数估值. 另一类数据如甲烷修正因子 MCF，综合了监测实验数据、文献调研与专家经验，依靠北京市或国内其他地区垃圾填埋场已有的测量实验分析、发表的论文和研究报告、IPCC 推荐参数取值范围以及专家咨询，综合得到参数概率分布和估值.

表 1 各参数选取解释如下. 甲烷修正因子(MCF)取值按照 2 个阶段划分，反映北京市填埋场管理状况发生的改变. 在 2000 年以前北京存在相当数量的非正规垃圾填埋场，垃圾简易填埋或无序堆放居多，没有按照规范操作，未深埋的生活垃圾在上层易发生有氧分解，产甲烷率低. 由于国家在 1997 年颁布“生活垃圾填埋场控制标准”(GB 16889-1997)，研究认为 2000 年以后，北京市填埋场管理逐渐规范化，因此 MCF 取值发生相应改变.

可降解有机碳 DOC 取值由估算经验公式以及生活垃圾成分特征确定. 本研究充分参考北京市生活垃圾已有相关研究[25~29, 32]，选取了适合中国生活垃圾特点的 DOC 估算公式. 北京生活垃圾成分特征采用阿苏卫、六里屯等北京市生活垃圾填埋场垃圾组分长期监测数据，确定 DOC 的取值与分布.

表 1　适合北京市特点的 FOD 模型参数均值、置信区间和概率分布

Table 1　Parameters of means, confidence intervals and probability distributions in FOD model adapted to characteristics of Beijing city

模型输入参数	均值	95% 置信区间	概率分布
MCF(2000 之前)	0.65	−15% ~23%	三角分布
MCF(2000 以后)	0.85	−20% ~20%	正态分布
DOC	0.11	−13% ~13%	正态分布
DOC_f	0.7	−10% ~10%	三角分布
OX	0.05	−20% ~20%	正态分布
k	0.17	−30% ~40%	三角分布
W	/	/	垃圾填埋实际修正值

由于 IPCC 模型提出的可降解有机碳计算公式是基于欧美地区的生活垃圾特性，在评估我国垃圾填埋 CH_4 产生量方面会存在误差，需要采用修正后的符合我国城市垃圾特点的可降解有机碳比例结果. 潘玲阳等[25]按建设部颁发的分类标准，对北京市转运站垃圾进行采样和手工分拣，称重计算各组分所占的质量分数，然而各组分有机碳含量比重参考了 IPCC 的推荐值. 吉崇喆[33]和高庆先[34]等建立了中国城市生活垃圾可降解有机碳的估算公式，以沈阳和武汉作为国内城市生活垃圾可降解有机碳组分的采样、制备和有机碳含量测定地点. 本研究参考文献[33,34]的研究结果，将中国垃圾可降解有机碳划分为 5 类：纸类(A)、竹木(B)、织物(C)、厨余(D)、灰渣(E). IPCC 提出 DOC 公式修正为式.

$$DOC = 0.259\,4A + 0.282\,9B + 0.302C + 0.072\,3D + 0.037\,1E \quad (6)$$

反应常数 k 随半衰期变化. 在 FOD 模型中，垃圾降解的半衰期($t_{1/2}$)是影响填埋气体产量变化趋势的关键参数，模型推荐的取值范围为 5~10 a. 但是由于该模型是基于欧美地区的生活垃圾特性，在预测我国的垃圾填埋气体产生速率方面会存在系统误差，我国城市生活垃圾特性与国外相比，最大的差异在于垃圾中易降解的有机物含量较多(食品、厨余)，中等易降解有机物含量较少(纸张、织物). 因此，半衰期取值需要重新设定. 袁光钰等[35]对北京海淀区 4 个不同填埋时间的典型垃圾填埋场开展长期现场取样监测，估算城市垃圾降解速率，结论是垃圾稳定周期可能约 10 a. 罗钰翔等[36]采用改进的现场抽气方法获取生活垃圾填埋场封场后填埋气体的实际产量，同时选择 IPCC 推荐模型不同的半衰期参数进行对比，结果发现中国城市垃圾降解速率较

快,半衰期 <5 a,深圳市生活垃圾填埋场取值为 2.5 a. k 值与降雨、温度等气象因素具有密切的联系,深圳降雨量和温度均高于北京,半衰期值应小于北京. 综合已有国内同类研究和专家经验,本研究半衰期均值取 4 a. k 值参考半衰期均值,概率密度为三角分布.

研究中氧化因子(OX)的取值和概率分布源于专家咨询. 生活垃圾填埋处理量(W)为根据城市环境状况公报、统计数据实际修正值. 此外,填埋气中 CH_4 比重(F)根据惯例取 50%. 目前北京市生活垃圾填埋场填埋气中甲烷回收利用率不高,从便于核算的角度出发,研究假设甲烷回收利用百分比(R)取值为 0.

3 生活垃圾填埋场产甲烷量及不确定性分析

3.1 北京市生活垃圾填埋场产甲烷量变化

根据上文 FOD 模型参数的概率分布,随机抽取 10 000次样本进行 Monte Carlo 模拟,该步骤重复 18 次(研究时间段为 18 a,1991 ~ 2008 年),以获得 FOD 模型逐年输出值的统计分布信息,最终得到北京市生活垃圾填埋场产甲烷排放量的不确定性范围. 表 2 为 2001 ~ 2008 年北京市生活垃圾填埋场甲烷排放的详细统计特征,图 2 为 1991 ~ 2008 年北京市生活垃圾填埋甲烷排放变化. 结果表明,当历年生活垃圾填埋甲烷排放处于 95% 置信区间时,基于均值的相对随机误差区间为 -24.3% ~ 27.6%,说明

表 2 北京市近年来生活垃圾填埋场产甲烷统计特征变化 $\times 10^4$/t·a^{-1}

Table 2 Statistical characteristics of Beijing landfill gas methane emissions in recent years $\times 10^4$/t·a^{-1}

项目	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年
均值	6.36	7.05	7.91	9.17	10.50	12.03	13.77	15.58
中位数	6.34	7.02	7.88	9.13	10.45	11.97	13.70	15.51
方差	0.73	0.82	0.94	1.13	1.33	1.55	1.80	2.06
$P_{2.5\%}$	5.01	5.54	6.17	7.08	8.16	9.17	10.45	11.80
$P_{97.5\%}$	7.86	8.74	9.84	11.50	13.40	15.20	17.45	19.76
最小值	3.83	4.14	4.54	5.13	5.77	6.52	7.39	8.30
最大值	10.33	11.55	13.05	15.25	17.53	20.16	23.14	26.20

FOD 模型在结合北京市特征参数进行评估时拥有较高精度.

从多年北京市生活垃圾填埋场产气变化趋势看,可划分 2 个阶段. 第一阶段(1991 ~ 1999 年)填埋场产甲烷均值增长相对平缓,从 1991 年的 0.95 $\times 10^4$ t·a^{-1}上升到1999 年的5.05 $\times 10^4$ t·a^{-1}; 第二阶段(2000 ~ 2008 年)填埋场产气呈线性增长,由 2000 年 5.66 $\times 10^4$ t·a^{-1} 上升到 15.58 $\times 10^4$ t·a^{-1}. 20 世纪 90 年代初北京市生活垃圾刚开始无害化处理,截至 2000 年相继建成和投入使用了阿苏卫、安定、高安屯等生活垃圾填埋场 6 座,但是仍然存在相当数量的非正规垃圾填埋场. 由于这些非正规垃圾填埋场管理水平不高,操作不规范,比一般正规卫生垃圾填埋场甲烷产生率低,因此城市生活垃圾填埋年排放甲烷量增幅不快. 2000 年以后,随着经济快速发展和市民生活水平提高,生活垃圾产生量和填埋处理负荷相应增加,同时提升的还有垃圾填埋场数量和填埋操作管理水平,这些因素都导致城市生活垃圾填埋场年产甲烷量显著提升.

3.2 北京市生活垃圾填埋场产甲烷量不确定性评估

图 3 为北京市生活垃圾填埋场 2008 年产 CH_4 量的直方图与累积频率曲线. 直方图代表了北京市生活垃圾填埋场 CH_4 排放的概率分布,即不确定性分布. 由图 3 可见,2008 年由生活垃圾填埋产生 CH_4 量的 95% 的概率分布范围为(11.8 ~ 19.76) $\times 10^4$ t·a^{-1},以均值为估算基准,2008 年填埋产生 CH_4 量为 15.58 $\times 10^4$ t·a^{-1}, 排放的不确定范围为 -24.26% ~ 26.83%. FOD 模型输出不确定范围并

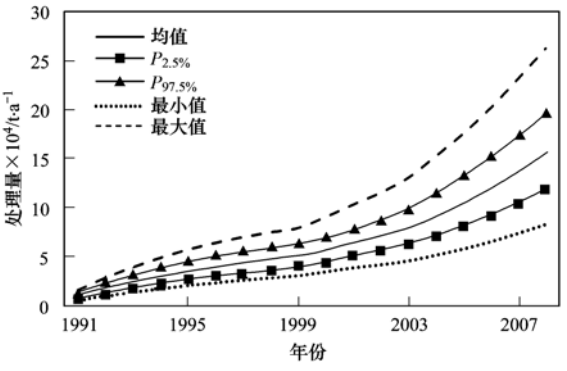

图 2 北京市生活垃圾填埋产甲烷变化(1991 ~ 2008 年)

Fig. 2 Variation of landfill gas methane emissions from Beijing municipal solid waste disposal (1991-2008)

不沿平均值对称分布，这是由模型输入参数不确定性范围的分布特点决定. 此外，对比 FOD 模型输出与表 1 模型输入参数的不确定性范围，可以发现 FOD 整体模型输出的不确定性范围要小于单一输入参数的不确定性范围，文献[7]认为当输入参数概率分布在 FOD 模型中结合、传递和输出过程，可能存在正负估计偏差相互影响，不确定性的相互抵消而降低整体的不确定性.

本研究采用非参数检验方法（Kolmogorov-Smirnov 检验），分析了 2008 年 FOD 模型 Monte Carlo 模拟输出结果概率分布状况，重复模拟样本数 10 000. 经过 SPSS 软件检验分析，给出检验变量的均值与标准差，其中单样本分布的 Z 值 2.208 > 0.5，Sig. 值为 0，拒绝原假设，样本分布近似为正态分布（表 3）. 因此采用 Monte Carlo 法模拟的 2008 年生活垃圾甲烷排放近似服从正态分布，其均值在 95% 概率范围之内，均值对当年甲烷排放分布具有良好的代表性，采用 Monte Carlo 方法得到了相对更为准确的评估结果及范围.

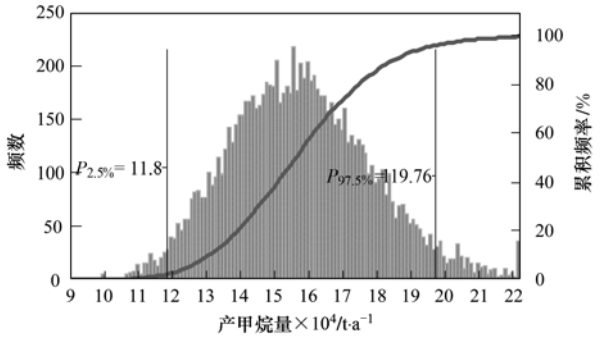

图 3　北京市生活垃圾填埋场 2008 年产甲烷量直方图和累积频率曲线

Fig. 3　Histograms and cumulative frequency curve of Beijing landfill gas methane emissions in 2008

表 3　北京市生活垃圾填埋场 2008 年产甲烷量非参数正态性检验[1)]

Table 3　Non-parametric test of normality of Beijing landfill gas methane emissions in 2008

N	均值	标准差	Z	Sig.
10 000	15.58	2.06	2.208	0.000

1）分析采用 SPSS 统计软件

3.3　模型输入参数敏感性分析

研究还采用皮尔逊相关系数法识别对 2008 年生活垃圾填埋 CH_4 排放中不确定性贡献最大的参数（图 4），检验显著性水平 95%. 结果表明，其中 MCF（2000 年后）对填埋排放 CH_4 不确定性相对贡献最大，达 41.4%，与 CH_4 排放的相关系数为 0.64；而氧化因子 OX 对填埋排放 CH_4 不确定性贡献最低，仅为 −0.1%，与排放相关系数为 −0.05. 相关系数越高，意味着该参数对输出不确定性的贡献越大. 按不确定性相对贡献大小排序，FOD 模型输入参数依次为：MCF 2000 年后（41.4%）> 生活垃圾中厨余所占质量分数（23.9%）> 反应常数 k（18.3%）> 可降解有机碳分解的百分比 DOC_f（11.3%）> 垃圾中非厨余类有机物所占质量分数（2.8%）> 纸张织物所占质量分数（1.6%）> MCF2000 年前（0.4%）> 垃圾中木材秸秆所占质量分数（0.3%）> 氧化因子 OX（−0.1%）. 由于厨余垃圾中的有机碳含量比例高且容易分解，是填埋气中 CH_4 的主要来源，因此相对于 k 值，生活垃圾中厨余所占质量分数对排放影响更显著.

敏感性分析的结果还表明，对北京市生活垃圾填满场产甲烷量影响最大的前 4 类参数相对贡献之和高于 90%. 在北京应用 FOD 模型时，如果能够降低敏感性贡献高于 10% 的 MCF2000 年后、生活垃圾中厨余所占质量分数、k 以及 DOC_f 等 4 类参数的不确定性，能够明显地提高生活垃圾填埋产 CH_4 量估算的精度水平. 所以在采用 IPCC-FOD 模型评估生活垃圾填埋 CH_4 排放而进行活动水平数据的收集或监测时，应重点提高甲烷修正因子 MCF、厨余垃圾质量分数、k 和可降解有机碳百分比 DOC_f 参数活动水平数据的精度.

4　结论

（1）本研究针对北京市生活垃圾填埋场特点，使用典型填埋场长期观测数据，根据专家经验和国内同类研究确定 FOD 模型输入参数合理范围，将 Monte Carlo 模拟应用于填埋场产 CH_4 评估，计算所得排放量不是一个固定的绝对值，而是具有一定概率分布的范围，提高了评估精度.

（2）据测算 2008 年北京市因填埋产 CH_4 量 95% 的概率分布范围为（11.8 ~ 19.76）$\times 10^4$ t·a^{-1}，均值为 15.58 $\times 10^4$ t·a^{-1}，排放 CH_4 的不确定范围为 −24.26% ~ 26.83%，FOD 整体模型输出的不确定性范围要小于单一输入参数的不确定性范围. 从时间趋势看，从 1991 ~ 2008 年，生活垃圾填埋产 CH_4 增幅明显，由 0.95 $\times 10^4$ t·a^{-1} 上升到 15.58 $\times 10^4$ t·a^{-1}（均值），当处于 95% 置信区间时，历年生活垃圾填埋甲烷排放与当年均值的相对随机误差区间为 −24.3% ~ 27.6%.

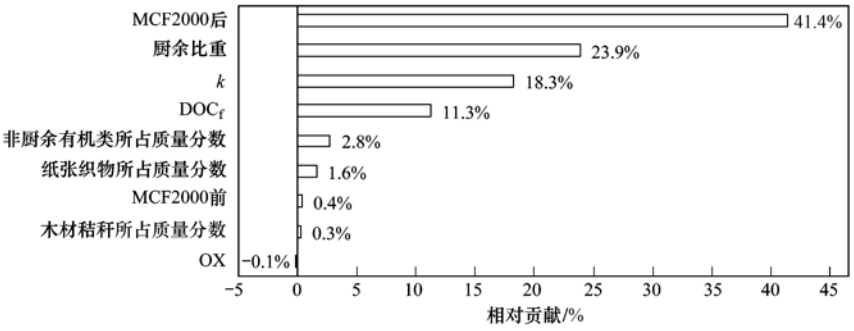

图 4 FOD 各模型参数对 2008 年城市生活垃圾产甲烷量不确定性的相对贡献

Fig. 4 Uncertainty contributions of FOD model parameters on Beijing landfill gas methane emissions in 2008

(3)从 FOD 模型输入参数对评估不确定贡献划分,甲烷修正因子 MCF(2000 年后)对 2008 年排放结果的影响最大,贡献率为 41.4%. 对模型输入参数敏感性的识别,有助于指导生活垃圾填埋场产 CH_4 评估改进和数据收集工作,针对排放估算不确定贡献性最大类别,收集更多、更具代表性的数据,从而提高生活垃圾填埋产 CH_4 量估算的精度水平.

参考文献:

[1] Solomon S. Climate change 2007: the physical science basis: contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 1-10.

[2] WMO. WMO statement on the status of the global climate in 2009 [R]. Geneva: World Meteorological Organization, 2010. 1-4.

[3] EPA. Overview of LMOP and the landfill gas energy field 2010 [R]. EPA, 2010. 1-5.

[4] 中国国家发展和改革委员会. 中国应对气候变化国家方案 [R]. 北京: 中国国家发展和改革委员会, 2007. 29-44.

[5] 王伟, 韩飞, 袁光钰, 等. 垃圾填埋场气体产量的预测 [J]. 中国沼气, 2001,**19**(2): 20-24.

[6] 刘玉强, 黄启飞, 王琪, 等. 生活垃圾填埋场不同填埋方式填埋气特性研究 [J]. 环境污染与防治, 2005, **27**(5): 333-337.

[7] Szemesova J, Gera M. Uncertainty analysis for estimation of landfill emissions and data sensitivity for the input variation [J]. Climatic Change, 2010, **103**(1-2): 37-54.

[8] Kumar S, Gaikwad S A, Shekdar A V, *et al*. Estimation method for national methane emission from solid waste landfills [J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(21): 3481-3487.

[9] Gentil E, Christensen T H, Aoustin E. Greenhouse gas accounting and waste management [J]. Waste Management & Research, 2009, **27**(8): 696-706.

[10] Mor S, Ravindra K, De Visscher A, *et al*. Municipal solid waste characterization and its assessment for potential methane generation: a case study [J]. Science of the Total Environment, 2006, **371**(1-3): 1-10.

[11] IPCC. Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [R]. OECD, 1996. 1-10.

[12] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [R]. Japan: IGES, 2006. 1-10.

[13] IPCC. Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories [R]. Japan: IGES, 2001. 1-15.

[14] 蔡博峰, 刘春兰, 陈操操, 等. 北京市温室气体排放因子及排放量核算 [R]. 北京: 北京市环境保护科学研究院, 2008. 145-150.

[15] Zacharof A, Butler A. Stochastic modelling of landfill processes incorporating waste heterogeneity and data uncertainty [J]. Waste Management, 2004, **24**(3): 241-250.

[16] Monni S, Syri S, Savolainen I. Uncertainties in the Finnish greenhouse gas emission inventory [J]. Environmental Science & Policy, 2004, **7**(2): 87-98.

[17] Lo S C, Ma H W, Lo S L. Quantifying and reducing uncertainty in life cycle assessment using the Bayesian Monte Carlo method [J]. Science of the Total Environment, 2005, **340**(1-3): 23-33.

[18] Ramirez A, De Keizer C, Van der Sluijs J P, *et al*. Monte Carlo analysis of uncertainties in the Netherlands greenhouse gas emission inventory for 1990- 2004 [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(35): 8263-8272.

[19] Sonnemann G W, Schuhmacher M, Castells F. Uncertainty assessment by a Monte Carlo simulation in a life cycle inventory of electricity produced by a waste incinerator [J]. Journal of Cleaner Production, 2003, **11**(3): 279-292.

[20] EPA. Guiding principles for Monte Carlo analysis [R]. Washington DC: US Environmental Protection Agency, 1997.

[21] NARSTO. Improving emission inventories for effective air quality management across north America: a NARSTO assessment [EB/OL]. http://www.narsto.org, 2005.

[22] 邢可霞, 郭怀成. 环境模型不确定性分析方法综述 [J]. 环境科学与技术, 2006, **29**(5): 112-114.

[23] 北京市环境保护局. 北京市环境状况公报: 1995 ~ 2009 [R]. 北京: 2010.

[24] 北京市统计局. 北京市统计年鉴: 1989 ~ 2009 [M]. 北京:

中国统计出版社，2010.

[25] 潘玲阳，叶红，黄少鹏，等. 北京市生活垃圾处理的温室气体排放变化分析［J］. 环境科学与技术，2010，**33**(9)：116-124.

[26] 李玉春. 北京市生活垃圾厌氧发酵技术应用潜力分析[EB/OL]. http://www.bjmac.gov.cn/pub/guanwei/I/I4/I4_6/200901/t20090109_12654.html，2009-01-09.

[27] 周翠红，路迈西，吴文伟. 北京市城市生活垃圾组分预测［J］. 安全与环境学报，2004，**4**(5)：37-40.

[28] 李国学，黄斌，姜华. 北京市生活垃圾处理与利用现状的调查和评价［J］. 中国农业大学学报，1999，**4**(S1)：103-108.

[29] 荣波，卫潘明，李彦富，等. 北京市生活垃圾成分分析及对应处理方式对策研究［J］. 环境保护，2004，(10)：30-33.

[30] 梁广生，吴文伟，赵桂瑜，等. 北京市 2002～2007 年生活垃圾产生量预测分析［J］. 环境科学研究，2003，**16**(5)：48-51.

[31] 吴文伟. 北京市城市生活垃圾产量和成份的预测分析［J］. 预测，1994，(6)：40-44.

[32] 田文栋，魏小林，黎军，等. 北京市城市生活垃圾特性分析［J］. 环境科学学报，2000，**20**(4)：435-438.

[33] 吉崇喆，刘桐武，张恩琛. 城市生活垃圾可降解有机碳估算方法的研究［J］. 环境卫生工程，2005，**13**(3)：7-9.

[34] 高庆先，杜吴鹏，卢士庆，等. 中国典型城市固体废物可降解有机碳含量的测定与研究［J］. 环境科学研究，2007，**20**(3)：10-15.

[35] 袁光钰，匡胜利，曹丽云. 我国城市垃圾填埋场降解速率的分析［J］. 新疆环境保护，2000，**22**(1)：11-15.

[36] 罗钰翔，王伟，高兴保. 生活垃圾填埋气体产量的现场测试及 IPCC 推荐模型的校验［J］. 环境科学，2009，**30**(11)：3427-3431.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 33 No. 1

Jan. 15, 2012

CONTENTS

Air Pollutant Emissions of Aircraft in China in Recent 30 Years ····· HE Ji-cheng (1)

Study on the *in-situ* Measurement of Atmospheric CH_4 and CO by GC-FID Method at the Shangdianzi GAW Regional Station ····· WANG Wei, ZHOU Ling-xi, FANG Shuang-xi, *et al.* (8)

Reconstructed Ambient Light Extinction Coefficient and Its Contribution Factors in Beijing in January, 2010 ····· ZHU Li-hua, TAO Jun, CHEN Zhong-ming, *et al.* (13)

Atmospheric Deposition of Polychlorinated Naphthalenes in Dongjiang River Basin of Guangdong Province ····· WANG Yan, LI Jun, LIU Xiang, *et al.* (20)

Metabolic Characteristics of Air Microbial Communities from Sandstorm Source Areas of the Taklamakan Desert ··· DUAN Wei-wei, LOU Kai, ZENG Jun, *et al.* (26)

Mechanisms of UV Photodegradation on Performance of a Subsequent Biofilter Treating Gaseous Chlorobenzene ··· WANG Can, XI Jin-ying, HU Hong-ying, *et al.* (32)

Distribution of Dissolved Organic Carbon in the Bohai Sea and Yellow Sea in Spring ····· DING Yan-yan, ZHANG Chuan-song, SHI Xiao-yong, *et al.* (37)

Research on the Mercury Species in Jiaozhou Bay in Spring ····· XU Liao-qi, LIU Ru-hai, WANG Jin-yu, *et al.* (42)

Geochemistry of Surface and Ground Water in the Lijang Basin, Northwest Yunnan ····· PU Tao, HE Yuan-qing, ZHU Guo-feng, *et al.* (48)

Variations in Depth and Chemistry of Groundwater in Interval of Water Delivery at the Lower Tarim River ····· CHEN Yong-jin, LI Wei-hong, DONG Jie, *et al.* (55)

Simulation on Contamination Forecast and Control of Groundwater in a Certain Hazardous Waste Landfill ····· MA Zhi-fei, AN Da, JIANG Yong-hai, *et al.* (64)

Research on Evaluation of Water Quality of Beijing Urban Stormwater Runoff ····· HOU Pei-qiang, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, *et al.* (71)

Characterization and Source Apportionment of Pollutants in Urban Roadway Runoff in Chongqing ····· ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, *et al.* (76)

Applied Study of the Submerged Macrophytes Bed-Immobilized Bacteria in Drinking Water Restoration ····· CHEN Qi-chun, LI Zheng-kui, WANG Yi-chao, *et al.* (83)

Catalytic Hydrodechlorination of 2,4-Dichlorophenol over Pd/TiO_2 ····· ZHANG Yin, SHAO Yun, CHEN Huan, *et al.* (88)

Effects of pH Value on the Adsorption and Degradation of 2,4-DCP by Nanoscale Zero-Valent Iron ····· FENG Li, GE Xiao-peng, WANG Dong-sheng, *et al.* (94)

Inactivation of the Chlorine-resistant Bacteria Isolated from the Drinking Water Distribution System ····· CHEN Yu-qiao, DUAN Xiao-di, LU Pin-pin, *et al.* (104)

Risk Assessment of the Farmland and Water Contamination with the Livestock Manure in Anhui Province ····· SONG Da-ping, ZHUANG Da-fang, CHEN Wei (110)

Analysis of Membrane Fouling Genesis in Nanofiltration Process for Advanced Treatment of Dyeing and Finishing Wastewater ····· CAO Xiao-bing, LI Tao, ZHOU Lü, *et al.* (117)

Experimental Research on Combined Water and Air Backwashing Reactor Technology for Biological Activated Carbon ····· XIE Zhi-gang, QIU Xue-min, ZHAO Yan-ling (124)

Impacts of pH and Surfactants on Adsorption Behaviors of Norfloxacin on Marine Sediments ····· PANG Hui-ling, YANG Gui-peng, GAO Xian-chi, *et al.* (129)

Adsorption Characteristic and Form Distribution of Silicate in Lakes Sediments ····· LÜ Chang-wei, CUI Meng, GAO Ji-mei, *et al.* (135)

Adsorption of Methylene Blue from Water by the Biochars Generated from Crop Residues ····· XU Ren-kou, ZHAO An-zhen, XIAO Shuang-cheng, *et al.* (142)

Adsorption and Desorption of Dyes by Waste-Polymer-Derived Activated Carbons ····· LIAN Fei, LIU Chang, LI Guo-guang, *et al.* (147)

Study on the Sorption Behavior of Tetracycline onto Activated Sludge ····· CHEN Rui-ping, ZHANG Li, YU Jie, *et al.* (156)

In situ Experimental Research on Natural Attenuation of Oil Pollutants in a Gas Station ····· JIA Hui, WU Xiao-feng, HU Li-ming, *et al.* (163)

Influence and Assessment of Biochar on the Bioavailability of Chlorobenzenes in Soil ····· SONG Yang, WANG Fang, YANG Xing-lun, *et al.* (169)

Control for MUCT Process Operation Using Nitrate Concentration in the Secondary Anoxic Zone ····· WANG Xiao-ling, YIN Jun, GAO Shang (175)

Modeling Formation of Aerobic Granule and Influence of Hydrodynamic Shear Forces on Granule Diameter ····· DONG Feng, ZHANG Han-min, YANG Feng-lin (181)

Effect of Different Sludge Retention Time (SRT) on Municipal Sewage Sludge Bioleaching Continuous Plug Flow Reaction System ····· LIU Fen-wu, ZHOU Li-xiang, ZHOU Jun, *et al.* (191)

Biological Phosphorus Removal in Intermittent Aerated Biological Filter ····· ZENG Long-yun, YANG Chun-ping, GUO Jun-yuan, *et al.* (197)

Methane Production by Anaerobic Co-digestion of Chicken Manure and *Spartina alterniflora* Residue After Producing Methane ····· CHEN Guang-yin, CHANG Zhi-zhou, YE Xiao-mei, *et al.* (203)

Uncertainty Analysis for Evaluating Methane Emissions from Municipal Solid Waste Landfill in Beijing ····· CHEN Cao-cao, LIU Chun-lan, LI Zheng, *et al.* (208)

Electricity Generation of Surplus Sludge Microbial Fuel Cells Enhanced by Additional Enzyme ····· YANG Hui, LIU Zhi-hua, LI Xiao-ming, *et al.* (216)

Construction of Electrochemiluminescence System for Harmful Algae Detection ····· ZHU Xia, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, *et al.* (222)

Mechanism of the Inhibitory Action of Allelochemical Dibutyl Phthalate on Algae *Gymnodinium breve* ····· BIE Cong-cong, LI Feng-min, WANG Yi-fei, *et al.* (228)

Toxic Effects of Nano-TiO_2 on *Gymnodinium breve* ····· LI Feng-min, ZHAO Wei, LI Yuan-yuan, *et al.* (233)

Spatial Distribution of Three Endocrine Disrupting Chemicals in Sediments of the Suzhou Creek and Their Environmental Risks ····· LI Yang, HU Xue-feng, OH Kokyo, *et al.* (239)

Level, Distribution, and Source Identification of Polychlorinated Naphthalenes in Surface Agricultural Soils from an Electronic Waste Recycling Area ····· WANG Xue-tong, JIA Jin-pan, LI Yuan-cheng, *et al.* (247)

Heavy Metal Pollution in Street Dusts from Different Functional Zones of Luoyang City and Its Potential Ecological Risk ····· LIU De-hong, WANG Fa-yuan, ZHOU Wen-li, *et al.* (253)

Soil Contamination and Assessment of Heavy Metals of Xiangjiang River Basin ····· LIU Chun-zao, HUANG Yi-zong, LEI Ming, *et al.* (260)

Characteristics of Heavy Metals in Soil Profile and Pore Water Around Hechi Antimony-Lead Smelter, Guangxi, China ····· XIANG Meng, ZHANG Guo-ping, LI Ling, *et al.* (266)

Speciation Transformation and Behavior of Arsenic in Soils Under Anoxic Conditions ····· WU Xi, XU Li-ying, ZHANG Xue-xia, *et al.* (273)

Remediation of Chromium(Ⅵ) Contaminated Soils Using Permeable Reactive Composite Electrodes Technology ····· FU Rong-bing, LIU Fang, MA Jin, *et al.* (280)

Determination and Characterization on the Capacity of Humic Acid for the Reduction of Divalent Mercury ····· JIANG Tao, WEI Shi-qiang, LI Xue-mei, *et al.* (286)

Effect of Zn (Ⅱ) on Microbial Activity in Anaerobic Acid Mine Drainage Treatment System with Biomass as Carbon Source ····· LI Shao-jie, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, *et al.* (293)

Diversity of Culturable Butane-oxidizing Bacteria in Oil and Gas Field Soil ····· ZHANG Ying, LI Bao-zhen, YANG Jin-shui, *et al.* (299)

Microbial Community Structure Analysis of Unexploited Oil and Gas Fields by PCR-DGGE ····· MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, *et al.* (305)

Community Diversity of Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungi in the Rhizosphere of Eight Plants in Liudaogou Watershed on the Loess Plateau China ····· FENG Ye, TANG Ming, CHEN Hui, *et al.* (314)

Dynamics of Degradation of Oxytetracycline of Pig and Chicken Manures in Soil and Mechanism Investigation ····· ZHANG Jian, GUAN Lian-zhu, YAN Li (323)

Influence of Impurities on Waste Plastics Pyrolysis: Products and Emissions ····· ZHAO Lei, WANG Zhong-hui, CHEN De-zhen, *et al.* (329)

《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 1 月 15 日　33 卷　第 1 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 33　No. 1　Jan. 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. 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：70.00 元　　**国外发行代号**：M 205

国 内 外 公 开 发 行