

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第11期

Vol.34 No.11

**2013**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

北京不同污染事件期间气溶胶光学特性 ..... 施禅臻,于兴娜,周斌,项磊,聂皓浩 (4139)

秋季渤海、北黄海大气气溶胶中水溶性离子组成特性与来源分析 ..... 张岩,张洪海,杨桂朋 (4146)

中国北部湾地区夏季大气碳气溶胶的空间分布特征 ..... 杨毅红,陶俊,高健,李雄,施展,韩保新,谢文彰,曹军骥 (4152)

改进的大气 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、CO 在线观测 FTIR 系统 ..... 夏玲君,刘立新,周凌晔,方双喜,王红阳,张振波 (4159)

长沙市郊大气 CH<sub>4</sub> 浓度变化特征 ..... 刘鲁宁,王迎红,徐小娟,王卫东,王跃思 (4165)

麦草及其烟尘中正构烷烃的组成 ..... 刘刚,李久海,徐慧,吴丹 (4171)

过二硫酸盐降解碱液吸收的甲硫醇恶臭 ..... 杨世迎,王雷雷,冯琳玉,赵腊娟,石超 (4178)

污泥堆肥及其土地利用全过程的温室气体与氨气排放特征 ..... 钟佳,魏源送,赵振凤,应梅娟,周国胜,熊建军,刘培财,葛振,丁刚强 (4186)

长江口滨岸及近海水体中胶体的分布和理化性质研究 ..... 顾丽军,杨毅,刘敏,聂明华,李涛,侯立军 (4195)

海河流域主要河口区域沉积物中重金属空间分异及生态风险评价 ..... 吕书丛,张洪,单保庆,李立青 (4204)

汾河流域太原段河水及沉积物中 PFOS 和 PFOA 的浓度分布特征 ..... 东口朋宽,史江红,张晖,刘晓薇 (4211)

基于 L-THIA 模型的市桥河流域非点源氮磷负荷分析 ..... 李凯,曾凡棠,房怀阳,林澍 (4218)

合流制排水系统雨天溢流污染 CMB 法源解析 ..... 戴梅红,李田,张伟 (4226)

微藻脂肪酸在中国近海缺氧海水-沉积物界面中的降解模拟研究 ..... 随伟伟,丁海兵,杨桂朋,陆小兰,李文娟,孙立群 (4231)

太湖两种水生植物群落对沉积物中氮素的影响 ..... 马久远,王国祥,李振国,许宽,周锋,张佳 (4240)

表面流人工湿地中硫丹的去除规律研究 ..... 秦晶,高甫威,谢慧君 (4251)

带菌盐藻对不同形态砷的富集和转化研究 ..... 王亚,张春华,王淑,申连玉,葛滢 (4257)

镧改性沸石活性覆盖控制重污染河道底泥溶解性磷酸盐和铵释放研究 ..... 李佳,林建伟,詹艳慧 (4266)

底栖动物扰动对河床渗透性的影响研究 ..... 任朝亮,宋进喜,杨小刚,薛健 (4275)

铜绿微囊藻胞内物消毒副产物生成:氯化化和溴化比较 ..... 田川,郭婷婷,刘锐平,William Jefferson,刘会娟,曲久辉 (4282)

天然有机物对混凝效果影响机制及絮体特性分析 ..... 徐磊,俞文正,梁亮,王彤 (4290)

DOM 纳滤膜污染及对膜截留卡马西平性能的影响 ..... 丰桂珍,董秉直 (4295)

零价铁去除废水中的汞 ..... 周欣,张进忠,邱昕凯,王定勇 (4304)

Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 稳定化纳米 Pd/Fe 对水中 2,4-D 的催化还原脱氯研究 ..... 周红艺,梁思,雷思思,雷双健 (4311)

不同粒径粉末活性炭对水中天然有机物吸附性能的比较研究 ..... 李政剑,石宝友,王东升 (4319)

氯化十六烷基吡啶改性活性炭对水中硝酸盐的吸附作用 ..... 郑雯婧,林建伟,詹艳慧,方巧,杨孟娟,王虹 (4325)

改性石墨烯对水中亚甲基蓝的吸附性能研究 ..... 吴艳,罗汉金,王侯,张子龙,王灿,王雨微 (4333)

经典等温吸附模型在重金属离子/硅藻土体系中的应用及存在问题 ..... 朱健,吴庆定,王平,李科林,雷明婧,张伟丽 (4341)

硝酸盐对矿化垃圾中兼/厌氧甲烷氧化的影响 ..... 刘妍妍,龙焰,尹华,叶锦韶,何宝燕,张娜 (4349)

硫酸盐/氨的厌氧生物转化试验研究 ..... 张丽,黄勇,袁怡,李祥,刘福鑫 (4356)

硫酸盐还原-氨氧化反应的特性研究 ..... 袁怡,黄勇,李祥,张春蕾,张丽,潘杨,刘福鑫 (4362)

UASB 系统低 pH 运行时对产氢性能的分析 ..... 赵健慧,张百惠,李宁,王兵,李永峰 (4370)

响应面法优化赤泥负载 Co 催化剂制备及活性评价 ..... 李华楠,徐冰冰,齐飞,孙德智 (4376)

高浓度氨氮胁迫对纤细裸藻的毒性效应 ..... 刘炎,石小荣,崔益斌,李梅 (4386)

NAPLs 污染物垂向指流迁移分形表征中图像处理的影响研究 ..... 李慧颖,杜晓明,杨宾,伍斌,徐竹,史怡,房吉敦,李发生 (4392)

近 50 年浙江省耕作土壤有机质和酸碱度的变化特征 ..... 章明奎,常跃畅 (4399)

浙中典型富硒土壤区土壤硒含量的影响因素探讨 ..... 黄春雷,宋明义,魏迎春 (4405)

黄河口新生湿地土壤 Fe 和 Mn 元素的空间分布特征 ..... 孙文广,甘卓亭,孙志高,李丽丽,孙景宽,孙万龙,牟晓杰,王玲玲 (4411)

崇明岛土壤中 MCCPs 的污染水平、组成与来源研究 ..... 孙阳昭,王学彤,张媛,孙延枫,李梅,马中 (4420)

福建戴云山脉土壤有机氯农药残留及空间分布特征 ..... 瞿程凯,祁士华,张莉,黄焕芳,张家泉,张原,杨丹,刘红霞,陈伟 (4427)

电子垃圾拆解地周边土壤中二噁英和二噁英类多氯联苯的浓度水平 ..... 邵科,尹文华,朱国华,巩宏平,周欣,王玲,刘劲松 (4434)

外源水溶性氟在茶园土壤中赋存形态的转化及其生物有效性 ..... 蔡荟梅,彭传燧,陈静,侯如燕,宛晓春 (4440)

丛枝菌根真菌在不同类型煤矸石山植被恢复中的作用 ..... 赵仁鑫,郭伟,付瑞英,赵文静,郭江源,毕娜,张君 (4447)

丛枝菌根真菌在矿区生态环境修复中应用及其作用效果 ..... 李少朋,毕银丽,孔维平,王瑾,余海洋 (4455)

超积累植物垂序商陆 (*Phytolacca americana* L.) 吸收锰机制的初步探讨 ..... 徐向华,李仁英,刘翠英,施积炎,林佳 (4460)

*Shewanella oneidensis* MR-1 对硫化汞的生物利用性研究 ..... 陈艳,王卉,司友斌 (4466)

基于我国西南地区儿童行为模式的 IEUBK 模型本地化研究 ..... 蒋宝,崔晓勇 (4473)

不同结构有机磷在(氢)氧化铝表面的吸附与解吸特征 ..... 柳飞,张延一,严玉鹏,刘凡,谭文峰,刘名茗,冯雄汉 (4482)

煤中铁元素赋存状态的超声逐级化学提取研究 ..... 熊金钰,李寒旭,董众兵,张颂,钱宁波,武成利 (4490)

植物对纳米颗粒的吸收、转运及毒性效应 ..... 杨新萍,赵方杰 (4495)

《环境科学》征订启事 (4239) 《环境科学》征稿简则 (4369) 信息 (4225, 4265, 4303, 4375)

# 基于我国西南地区儿童行为模式的 IEUBK 模型本地化研究

蒋宝<sup>1</sup>, 崔晓勇<sup>2\*</sup>

(1. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 2. 中国科学院大学生命科学学院, 北京 100049)

**摘要:** IEUBK(Integrated Exposure Uptake Biokinetic Model for Lead in Children)模型是美国环保署开发并推荐使用的儿童铅暴露风险评价模型,该模型的本地化是将其应用到我国的基础。本研究通过对儿童行为模式参数的敏感性分析,确定了儿童血铅含量对以手口接触为主要方式的土壤/灰尘暴露途径最为敏感。以我国西南 Y 省某污染区域为试点地区,采用问卷调查和环境介质分析等方法,对 IEUBK 模型中的儿童行为模式参数、环境介质铅浓度参数、土壤和灰尘摄入量参数进行了本地化。采用本地化后的模型预测了相邻的 G 省某重金属冶炼项目投产前及投产后 5、10 和 20 a 的儿童血铅含量,其几何平均值分别为 5.28、5.77、6.03 和 6.32  $\mu\text{g}\cdot\text{dL}^{-1}$ ; 如果直接引用基于美国的模型默认参数,预测出的 20 a 后儿童血铅含量偏低 61.39%。

**关键词:** IEUBK 模型; 儿童行为模式; 儿童血铅含量; 铅污染; 本地化

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)11-4473-09

## Study on IEUBK Model Localization Based on Behavior Parameters of Children from Southwestern China

JIANG Bao<sup>1</sup>, CUI Xiao-yong<sup>2</sup>

(1. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2. College of Life Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** IEUBK(Integrated Exposure Uptake Biokinetic Model for Lead in Children) model was developed and recommended by the US Environmental Protection Agency. In order to apply IEUBK model to China, we firstly performed sensitivity analysis, which showed that simulated blood Pb (PbB) concentration was most sensitive to soil/dust exposure pathway. In-home surveys were conducted in Y province of China to gather information on children's behavior parameters and environmental samples for parameters localization. Finally the verified model was applied to predict children's PbB level in comparison with that modeled by default parameter values. Results showed that geometric mean values of children's PbB concentration were 5.28  $\mu\text{g}\cdot\text{dL}^{-1}$ , 5.77  $\mu\text{g}\cdot\text{dL}^{-1}$ , 6.03  $\mu\text{g}\cdot\text{dL}^{-1}$  and 6.32  $\mu\text{g}\cdot\text{dL}^{-1}$  before and 5, 10 and 20 years after the establishment of a new factory in the neighboring G province. The simulated PbB after 20 years was 61.39% lower by original model than that by the localized model.

**Key words:** IEUBK model; children's behavior parameters; children's blood lead concentrations; lead pollution; localization

铅污染引发了日益严重的健康关切,儿童是铅中毒最敏感的人群,铅污染暴露可能影响其生长发育、神经心理及行为<sup>[1]</sup>。据美国环保署调查,2岁幼儿主要通过食物(占47%)和尘土(占45%)摄入铅,其次为饮水(6%)、空气(1%)和土壤(1%)<sup>[2,3]</sup>。血铅含量是表征铅暴露的主要指标<sup>[4]</sup>,为全面评估和预测儿童的铅暴露状况,美国环保署开发并推荐使用“暴露吸收生物动力学模型(Integrated Exposure Uptake Biokinetic Model for Lead in Children, IEUBK)”。该模型包含了暴露、摄入、体内代谢动力学过程和血铅含量的概率分布这4个模块,通过对描述上述过程的一组复杂方程的综合计算,预测0~84个月龄儿童暴露于铅污染介质后的血铅含量水平<sup>[5]</sup>。

IEUBK模型在美国和其他地区应用较多<sup>[6~9]</sup>,

近年引入我国,主要根据美国EPA推荐的儿童暴露参数,开展了儿童环境铅暴露后血铅含量变化的尝试性研究<sup>[3,10,11]</sup>。由于我国铅污染区的地理位置、社会经济发展水平及文化特征的差异,使得受影响儿童的生活方式、行为模式与国外儿童有很大的差别,直接采用美国默认参数进行预测可能造成不容忽视的误差。因此,在我国使用IEUBK模型时必须对儿童行为模式参数进行本地化,再结合实测的环境污染数据,才能获得准确的模拟预测值。郝汉舟等<sup>[12]</sup>应用美国EPA人体暴露风险评估方法对武汉市儿童多途径暴露进行了风险评估,确定了经呼吸

收稿日期: 2013-02-22; 修订日期: 2013-04-08

基金项目: 环境保护部公益性行业科研专项(200909103)

作者简介: 蒋宝(1988~),女,硕士研究生,主要研究方向为环境生态学, E-mail: jiangbao1988@sina.com

\* 通讯联系人, E-mail: cuixy@ucas.ac.cn

道、消化道和皮肤吸收 3 条途径的铅暴露风险,董婷等<sup>[13]</sup>总结了儿童手口接触暴露参数的 3 种调查方法,张红振等<sup>[14]</sup>总结出了可适用于我国的关键参数的取值范围,为 IEUBK 模型的本地化提供了重要资料. 目前,急需对儿童行为模式参数开展实际调查,将一定区域内的铅暴露相关的儿童行为模式参数进行本地化,为利用 IEUBK 模型在类似区域进行铅污染影响、铅危害归责、铅污染治理效果评价和预测等奠定基础,本研究就是基于这一目的开展的.

本研究采用问卷的方法调查了西南地区(Y 省为代表)儿童的行为模式,对 IEUBK 模型中的相关参数进行了本地化;在此基础上,选择在该省以某铅锌矿厂为主要污染源的污染区域内,结合环境介质铅污染调查和儿童血铅含量调查的实测数据,对模型进行了验证;采用本地化后的模型在相邻的 G 省模拟预测了某新建铅锌冶炼厂周围区域儿童的血铅含量.

## 1 材料与方法

### 1.1 儿童行为参数调查方法

以问卷<sup>[15~17]</sup>方式进行儿童行为模式调查,包括自填式和访问式问卷调查两种. 前者以该省小学为单位,涵盖 8 个地级市 5 个少数民族自治州,共发放问卷 2 000 份,回收有效问卷 1 357 份,回收率 67.85%,调查内容包括 3~7 岁儿童基本信息,饮用水、食物的种类及数量,每日活动时间分配,手口行为频率等;后者与环境样品及儿童血铅含量采集同步进行,包括家庭基本情况,饮用水和食物类型,居住条件以及是否存在异常的手口行为等.

采用 SPSS 18.0 软件对调查问卷获得的数据进行分类汇总,个案分析和频率计算,以及模型模拟评价指标的计算分析.

### 1.2 环境污染参数研究方法

选择 Y 省某铅锌矿厂为主要污染源、半径约 7 km 的污染区内,同步开展环境样品与儿童血铅含量的采集. 根据预调查的土壤铅浓度分布,将研究范围划分为 3 个污染程度不同的区域;同时选择远离污染区约 30 km,自然条件、社会因素与污染区相近,但无铅污染区域作为对照区. 按照自然村落的分布和各村在家生活的儿童总数,采用分层随机抽样的方法确定各年龄段儿童的具体调查对象,以入户的方式进行问卷调查和环境样品采集.

样品共采自 8 个自然村,对应于 4 种污染程度各两个村落,其中污染区的 6 个村落都处在污染源

常年主风向的下风向一侧,离污染源的距离为:轻度污染区的村落约 7 km,中度污染区的约 5 km,重度污染区的约 2 km. 每村 13~19 户,样品包括饮用水(井水、池塘饮用水和瓶装水)、食物、土壤和灰尘. 其中井水和自种蔬菜从被调查者的家中直接采集;灰尘样品是以客厅、厨房、卧室内墙面根部的死角用 400 W 的手持式吸尘器采集<sup>[18]</sup>,样品放入收集袋(长 13.5 cm,开口端 7.0 cm、封口端 3.5 cm 的 400 目梯形尼龙收集袋)中带回;土壤样品从大门正前方、左右 5 m 内收集 1 m<sup>2</sup> 的表层浮土;非自产食物和饮料样品从当地市场购买. 所有样品 3 个重复.

铅元素含量测定:蔬菜和水样采用浓硝酸-双氧水、微波消解仪(Mars6 Microwave Accelerated Reaction System, CEM, USA)消解<sup>[19, 20]</sup>,使用 ICP-MS (Plasma Quad 3, Agilent Technologies, USA)测定;600 W,首先 55℃ 保持 10 min,然后 75℃ 保持 10 min,最后 95℃ 保持 30 min. 生物成分分析标准物质——大米(GBW-10010, GSB-1)和菠菜(GBW-10015, GSB-6)做回收检验<sup>[21, 22]</sup>,铅的回收率在 95%~100% 之间. 土壤和灰尘样品采用王水-高氯酸消煮法,用消煮炉湿法消解<sup>[23]</sup>,使用 ICP-OES (OPTIMA 2000, Agilent Technologies, USA)测定元素含量,测定条件:600 W, 80℃ 保持 1 h 后,然后 120℃ 并保持至第 2 d,最后 140℃ 保持至液体无色澄清. 铅元素含量采用土壤成分分析标准物质——黄红壤(GBW-07405, GSS-5)做回收检验,回收率在 100%~120% 之间.

### 1.3 敏感性分析

为检验模型输出结果对一些参数和状态变量初始值的灵敏程度,进行敏感性分析,通过逐步改变参数、初始值或子模型,观察模型输出的相应变化来判断. 由于各变量的量纲不同,采用通常的敏感性分析不能直接比较血铅含量相对敏感度. 本研究选用 Lenhart 等<sup>[24]</sup>提出的标准化敏感性计算方法,即在保持其它参数值不变的情况下,针对某个待检验的参数,在原有值( $x_0$ )的基础上分别增加或者降低 2%、5%、10%、15%、20%、25%、30%、35%、40%、50%;然后计算该参数增加和降低相同百分率时的模型输出值之差除以参数的变动范围( $\Delta x$ ),即得到该参数标准化的敏感度( $|I|$ ). 据此可将参数分为极敏感参数( $|I| \geq 1.0$ ),比较敏感参数( $0.2 \leq |I| \leq 1.0$ ),一般敏感参数( $0.05 \leq |I| \leq 0.2$ )和不敏感参数( $0.0 \leq |I| \leq 0.05$ ).

#### 1.4 模型本地化、验证和应用

IEUBK 模型是以美国儿童及其生活环境为基础建立的,其中关于儿童体内铅吸收和代谢、儿童呼吸率等参数需要深入的基础研究和广泛的卫生学调查才能确定,本研究对上述参数仍然采用模型默认值;本地化的参数包括实测获得的环境介质中铅的浓度,通过问卷调查方法确定的儿童行为模式参数,以及通过对比预测和实测的血铅含量而确定的土壤和灰尘摄入量参数。

在污染区选择污染源下风向 7 km 的轻度污染、5 km 的中度污染和 2 km 的重度污染的 6 个自然村,在对照区选择两个自然村,获取儿童行为模式数据;并实地采集环境和生物样品,用于大气、食物、饮水、尘土摄入这 4 个模型模块的本地化。

食物、饮用水和大气摄入模块的外部参数均来自调查问卷和环境样品的实测数据。其中,食物和饮用水的铅浓度采用实测数据;食物摄入量是以摄入量及食用频率,采用加权平均的方法求得的;饮水量是以不同饮水量在回收的调查问卷中出现的比例为权重的加权平均值;污染区空气的铅浓度采用高斯大气扩散模型对已知源强的污染源估算得到的;室外活动时间是以不同室外活动时间在回收的调查问卷中出现的比例为权重的加权平均值。由于“尘土摄入量”问卷调查法的准确度不高,而同位素示踪法采样困难,因此尘土摄入量参数采用生物动力学模型对照法获取。本研究将上述 8 个自然村落分成两组,每组包括 3 个污染程度不同的区域和一个对照区域,其中一组数据用于模型本地化,即根据儿童血铅含量实测值,采用生物动力学模型对照法确定尘土摄入量<sup>[25]</sup>,另一组数据用于验证本地化后的模型。

本研究中选用 3 种统计数据对模型验证的结果进行评价<sup>[26, 27]</sup>:EF 指模型效率;RMSE 指均方根误差,用来衡量模型模拟的偶然误差;RMD 指相对平均偏差,是衡量模型模拟的系统误差<sup>[28]</sup>。RMSE 和 RMD 是检测模拟值和实测值之间的差异是否平稳,越接近于 0 说明模拟效果越好。

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{O} - O_i)^2}$$

$$RMSE = \frac{1000}{\bar{O}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}$$

$$RMD = \frac{1000}{\bar{O}} \sum_{i=1}^n \frac{P_i - O_i}{n}$$

式中, $P_i$  为模拟血铅含量值; $O_i$  为实测血铅含量值; $\bar{O}$  为实测血铅含量平均值; $n$  为样本量。

在相邻 G 省选择某新建铅锌冶炼厂,比较本地化后的模型与原模型的预测效果。该厂区周围 5 km 范围内没有需要特殊保护的风景名胜、自然保护区、文物古迹,因此选择厂址周边 3 km 范围内的 16 个自然村作为环境敏感点,分别用本地化后的模型和完全采用默认值的模型模拟预测投产后不同年限环境敏感点儿童的血铅含量。该地区的社会经济方式和儿童行为模式与 Y 省研究地区相似,因此只采样检测环境背景铅浓度,并以该冶炼厂正常生产和排放控制措施达标为基础预测铅沉降的空间分布,对沉降量最大的地点,采用土壤中污染物累积模式分别计算本项目投产后的第 5、10 和 20 a 的铅污染物累积贡献值,计算方法为:

$$W_n = RK(1 - K^n)/(1 - K)$$

式中, $W_n$  为  $n$  年后的土壤中铅污染物累积贡献值,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $R$  为污染物的年输入量,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $n$  为年数;  $K$  为污染物在土壤中年残留率, 90%<sup>[29]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 儿童行为模式

儿童铅暴露的主要方式有呼吸、饮食和手口接触,为确定 3 种方式对儿童铅摄入的相对贡献,通过问卷调查获取了儿童的饮食习惯、活动习惯等行为模式参数。Dixon 检验法剔除了离群数据,标准差在 [0.45, 1.93] 之间,说明剔除后的数据都较为集中,有出现频率较低的最小和最大值采用 Dixon 检验法没有剔除,通过加权的方法消除其影响,其加权均值与美国暴露参数对比如表 1 所示。

由于食物的多样性,在儿童行为模式调查中对食物进行了更为详尽的调查,得到每个年龄段调查对象各种代表性食品的消费量和摄入情况,与美国暴露参数对比如表 2 所示。

根据上述调查结果,饮用水量的变异系数在 0.56 ~ 0.66 之间,室外活动时间的变异系数在 0.40 ~ 0.79 之间,食物摄入量的变异系数在 0.31 ~ 0.76 之间;3 ~ 6 岁儿童的饮水量和 6 ~ 7 岁的食物摄入量与美国相差较大,并且随着年龄增大,生活习惯差异逐渐明显,与美国暴露参数的相差越来越大,因此如果采用美国暴露参数会导致系统性误差。考虑到儿童生活习惯和环境的差异,采用加权平均的方法消除个别较高或较低值的影响,对模型模块进行了初步本地化。

表 1 调查地区 3~7 岁儿童饮水和室外活动时间情况

Table 1 Daily water intake and outdoor activity time data for children of 3-7 years old

年龄/岁	项目	极小值	极大值	均值 ± 标准误	加权均值	美国暴露参数 <sup>[30]</sup>	与美国暴露参数的比值
3~4	饮水量/L·d <sup>-1</sup>	0.25	2.00	0.86 ± 0.16	0.93	0.53	1.75
	室外活动时间/h·d <sup>-1</sup>	2.00	5.00	3.88 ± 0.55	3.80	4.00	0.95
4~5	饮水量/L·d <sup>-1</sup>	0.15	2.00	1.16 ± 0.16	1.15	0.55	2.09
	室外活动时间/h·d <sup>-1</sup>	2.00	6.50	4.00 ± 0.46	3.93	4.00	0.98
5~6	饮水量/L·d <sup>-1</sup>	0.05	2.00	0.99 ± 0.10	0.99	0.58	1.71
	室外活动时间/h·d <sup>-1</sup>	0.60	6.50	3.20 ± 0.28	3.20	4.00	0.80
6~7	饮水量/L·d <sup>-1</sup>	0.02	2.00	0.68 ± 0.03	0.68	0.59	1.15
	室外活动时间/h·d <sup>-1</sup>	1.00	6.50	2.45 ± 0.13	2.45	4.00	0.61

表 2 调查地区 3~7 岁儿童食物摄入情况汇总

Table 2 Daily food uptake for children of 3-7 years old

年龄/岁	种类	极小值	极大值	均值 ± 标准误	加权均值	美国暴露参数 <sup>[30]</sup>	与美国暴露参数的比值
3~4	主食量/kg·d <sup>-1</sup>	0.03	0.27	0.16 ± 0.04	0.158	0.110	1.44
	蔬菜量/kg·d <sup>-1</sup>	0.07	0.13	0.11 ± 0.02	0.09	0.094	0.96
	水果量/kg·d <sup>-1</sup>	0.07	0.2	0.13 ± 0.02	0.106	0.080	1.33
	肉类量/kg·d <sup>-1</sup>	0.07	0.13	0.09 ± 0.02	0.086	0.067	1.28
4~5	主食量/kg·d <sup>-1</sup>	0.07	0.2	0.14 ± 0.01	0.142	0.124	1.14
	蔬菜量/kg·d <sup>-1</sup>	0.03	0.27	0.12 ± 0.02	0.116	0.106	1.09
	水果量/kg·d <sup>-1</sup>	0.03	0.2	0.11 ± 0.01	0.1	0.091	1.10
	肉类量/kg·d <sup>-1</sup>	0.01	0.13	0.08 ± 0.01	0.074	0.077	0.96
5~6	主食量/kg·d <sup>-1</sup>	0.07	0.27	0.16 ± 0.01	0.146	0.142	1.03
	蔬菜量/kg·d <sup>-1</sup>	0.03	0.2	0.11 ± 0.01	0.1	0.122	0.82
	水果量/kg·d <sup>-1</sup>	0.02	0.27	0.12 ± 0.01	0.102	0.104	0.98
	肉类量/kg·d <sup>-1</sup>	0	0.2	0.08 ± 0.01	0.068	0.088	0.77
6~7	主食量/kg·d <sup>-1</sup>	0.01	0.27	0.13 ± 0.01	0.135	0.157	0.86
	蔬菜量/kg·d <sup>-1</sup>	0.01	0.20	0.10 ± 0.00	0.081	0.134	0.60
	水果量/kg·d <sup>-1</sup>	0.01	0.27	0.09 ± 0.03	0.065	0.115	0.57
	肉类量/kg·d <sup>-1</sup>	0.01	0.13	0.05 ± 0.01	0.037	0.097	0.38

## 2.2 敏感性分析

在儿童行为模式参数中,尘/土总摄入量的标准化敏感性参数 $I$ 明显高于空气、饮用水和食物的摄入量,其对儿童血铅含量变化的影响最大(图 1);而在环境介质中铅浓度参数中,血铅含量对尘/土中铅浓度最敏感(图 2)。因此,通过手口接触方式的土壤/灰尘铅暴露途径是决定儿童血铅含量值差异的主要因素,根据儿童血铅含量实测值来调整该参数是模型本地化以适用于研究地区的关键。

## 2.3 模型本地化及验证

调查问卷得到的儿童行为参数结合环境污染数据,进行模拟预测,与实测结果对比进行模型本地化,结果如图 3 所示。

结合环境污染介质采样分析结果和模型本地化,确定主要儿童行为模式参数,如表 3 所示。

表 3 模型本地化后的儿童行为模式参数

Table 3 Children's behavior parameters determined after model localization

参数	3~4 岁	4~5 岁	5~6 岁	6~7 岁	
饮水量/L·d <sup>-1</sup>	0.93	1.15	1.14	0.88	
食物铅摄入量 /μg·d <sup>-1</sup>	重度污染区	2.11	2.07	1.78	1.71
	中度污染区	1.62	1.62	1.32	1.27
	轻度污染区	1.59	1.59	1.29	1.24
	对照区	1.15	1.15	0.94	0.87
土壤/灰尘总摄入量/g·d <sup>-1</sup>	0.47	0.24	0.32	0.49	
室外活动时间/h·d <sup>-1</sup>	3.80	3.93	3.11	2.76	

以表 3 的主要儿童行为模式参数为基础,结合验证地区的环境介质铅含量参数对模型进行验证,如图 4 所示。

RMSE、RMD、EF 这 3 种模型验证效果指标的计算结果如表 4 所示,显示模型模拟效果满意。模

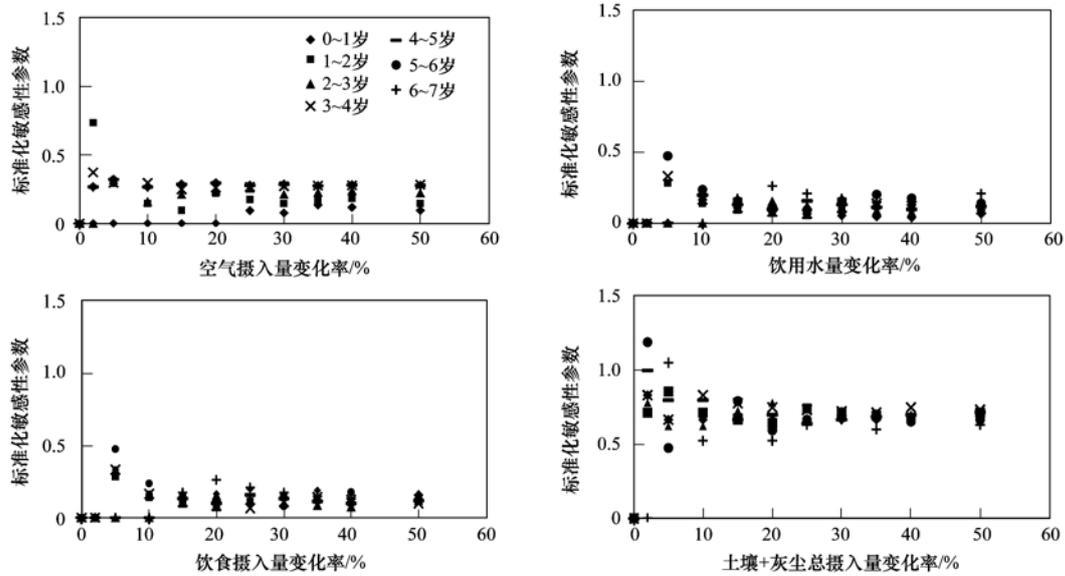


图1 主要儿童行为变量的标准化敏感性分析

Fig. 1 Analysis of standardized sensitivity of children's blood Pb concentration to behavior variables

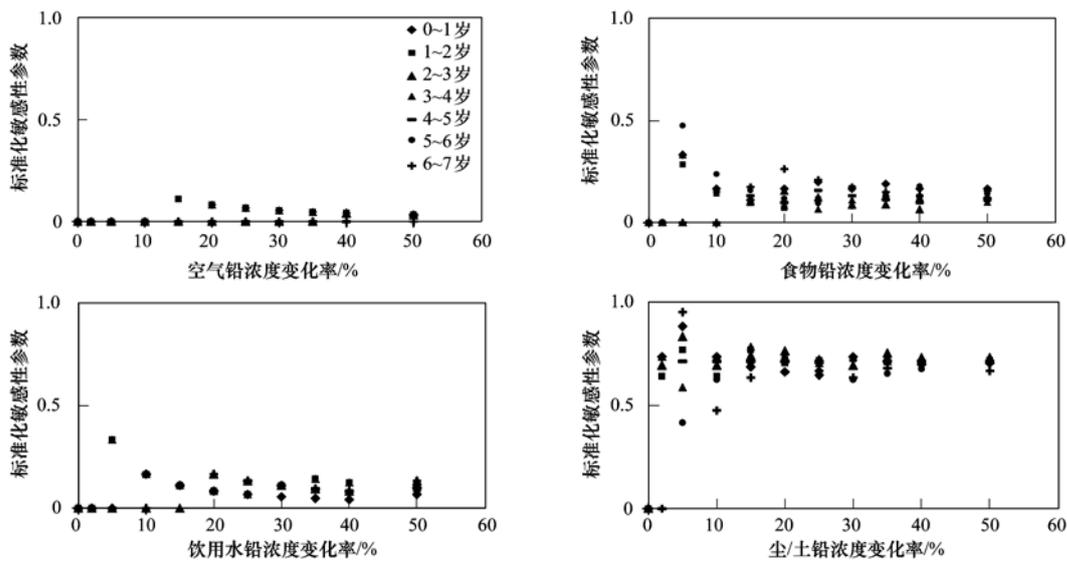


图2 主要环境介质铅浓度的标准化敏感性分析

Fig. 2 Analysis of standardized sensitivity of children's blood Pb content to Pb concentration in main sources

表4 模拟结果评价表

Table 4 Evaluation of model validations

区域	血铅含量平均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{dL}^{-1}$		相对偏差/%	RMSE/%	RMD/%	EF
	实测值	模拟值				
重度污染	24.49	28.99	18.39	6.12	23.23	-9.40
中度污染	24.82	24.23	2.37	2.30	8.29	-0.36
轻度污染	17.54	17.11	2.42	0.77	1.36	0.37
对照区	6.14	6.08	0.93	0.85	0.81	0.56

拟血铅含量平均值与实测血铅含量值的相对偏差由小到大依次为对照区、中度、轻度、重度污染区,但对照区和轻度污染区的 RMSE 和 RMD 指标比较小,

EF 指标都为正值,说明模拟结果都接近实测结果,且模拟结果比平均值更能代表该地区的实际情况;中度污染区 RMSE 和 RMD 也较小,但是 EF 指标为

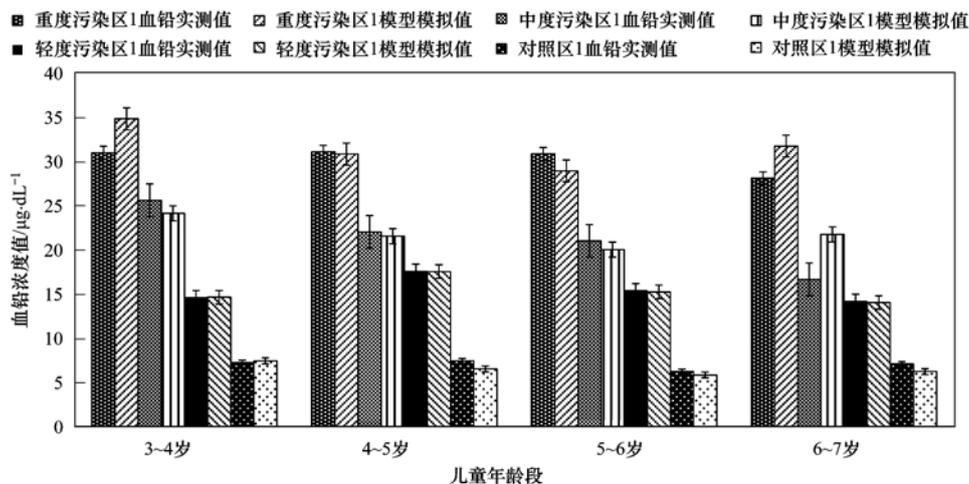


图 3 模拟结果与实测结果对照

Fig. 3 Comparison of the simulated and measured children's blood Pb concentrations

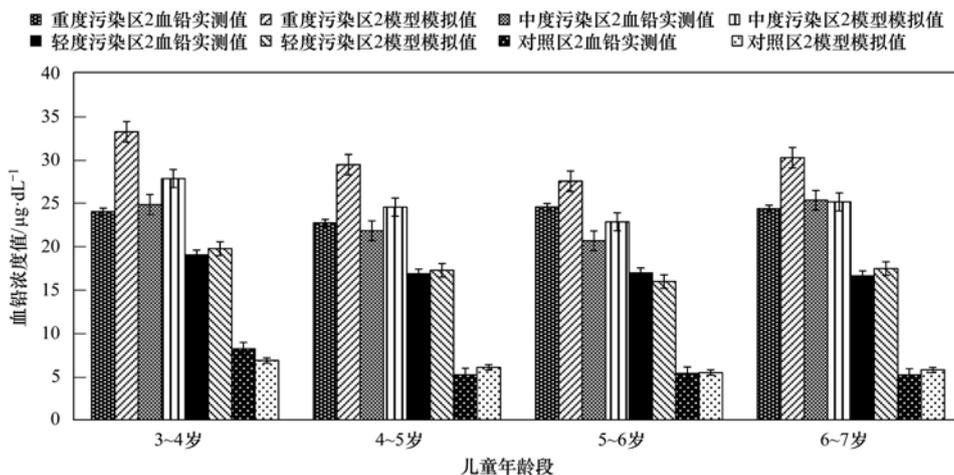


图 4 模型验证的效果

Fig. 4 IEUBK model validation by comparison of simulated and measured children's blood Pb contents in four villages differed in degree of Pb pollution

负值,表明模拟结果比较接近实测结果,但是平均值更能代表该地区实际情况;重度污染区的模拟效果相对较差。

采用 IEUBK 模型对验证地区的血铅含量分布概率进行预测,其结果如图 5 所示:模型通过概率分

布和概率密度分布两种形式输出污染地区儿童血铅含量的分布,以  $10 \mu\text{g}\cdot\text{dL}^{-1}$  为儿童血铅含量超标标准,重度、中度、轻度和对照区儿童血铅含量超标率分别为 98.98%、97.36%、88.39% 和 14.94%,血铅含量实测结果分别为 94.74%、92.86%、

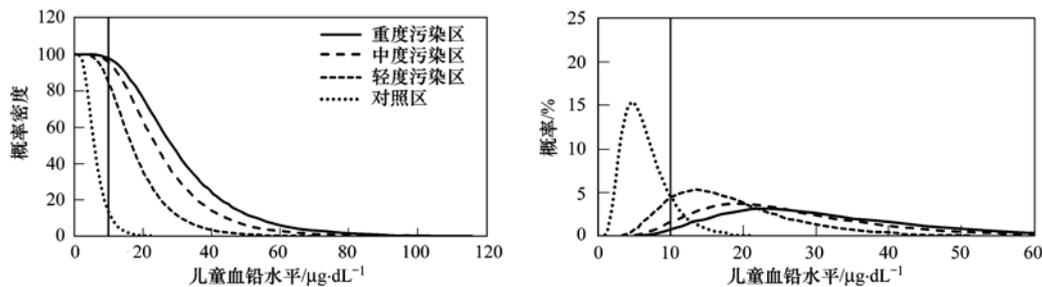


图 5 模型预测的儿童血铅含量分布

Fig. 5 Distribution of predicted children's blood Pb concentration

82.14% 和 7.69%, 两者相比血铅含量实测结果较低.

## 2.4 模型应用

对西南地区 G 省某新建铅矿冶炼厂周边地区进行儿童血铅含量及其分布的预测, 结合污染区实地采样测验分析, 得到该地区的基本输入参数, 如表 5 所示.

从表 5 中可以看出, 该地区的环境本底值较低, 远远低于土壤环境质量标准<sup>[31]</sup> ( $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 与本地化前模型预测结果进行对比结果, 如图 6 所示.

采用本地化后模型对投产前及投产后 5、10 和 20 a 的儿童血铅含量的预测结果为: 其几何平均浓度分别是  $5.28$ 、 $5.77$ 、 $6.03$  和  $6.32 \mu\text{g} \cdot \text{dL}^{-1}$ ; 以  $10 \mu\text{g} \cdot \text{dL}^{-1}$  为血铅含量超标限值, 超标率分别为 8.70%、12.08%、14.27% 和 16.41%. 直接引用基于美国的模型默认参数预测出 20 年后儿童血铅含

表 5 模型应用地区输入参数值

Table 5 Input parameters for the site of IEUBK model application		
参数名称	儿童年龄(岁)	输入数值
空气铅浓度/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	3~7	0.18
	3~4	2.00
室外活动时间/ $\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$	4~5	2.06
	5~6	2.52
	6~7	2.93
土壤累积铅浓度/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	背景值	152.62
	累积 5 a	169.74
	累积 10 a	179.85
	累积 20 a	189.35
饮食铅摄入量/ $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$	3~4	6.60
	4~5	8.27
	5~6	7.12
	6~7	6.65
饮用水铅浓度/ $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	3~7	0.12
母亲血铅含量/ $\text{g} \cdot \text{dL}^{-1}$		2.50

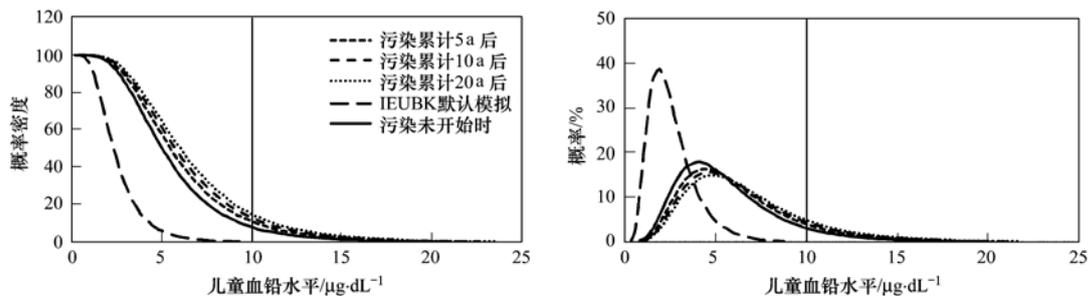


图 6 模型应用地区输出结果

Fig. 6 Simulating results for the site of IEUBK model application

量几何均值仅为  $2.44 \mu\text{g} \cdot \text{dL}^{-1}$ , 与采用本地化参数的预测结果相比, 结果偏低 61.39%.

## 3 讨论

不少国家发布了暴露参数手册, 其中美国是最早开展相关研究的国家, 并于 1989 年出版了《美国暴露参数手册》, 在 2011 年作了重新修订<sup>[30]</sup>. 日本和韩国的暴露参数手册分别于 2007 年和 2009 年发布<sup>[32, 33]</sup>. 我国尚未完成暴露参数的研制, 本研究得到了西南地区儿童的暴露参数, 其中一些参数与美国等国家相比有较大差异. 如我国该地区 3~7 岁儿童饮水量较为集中地分布在  $0.8 \sim 1.2 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$  (表 1), 高于美国的  $0.5 \sim 0.6 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$ <sup>[30]</sup> 和加拿大的  $0.765 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$ <sup>[34]</sup>, 但接近于韩国的  $1.075 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$ <sup>[33]</sup>. 随着儿童年龄的增长, 生活环境和生活习惯的影响逐渐明显, 食物种类及其摄入量等参数与美国的差别越来越大 (表 2), 直接引用美国或其他国家的数据将会带来不容忽视的误差. 因此, 将 IEUBK 模型

应用于我国时, 必须采用我国的暴露参数对模型本地化.

IEUBK 模型的敏感性分析结果表明, 对儿童血铅含量影响最为敏感的摄入途径是通过手口接触的土壤/灰尘铅暴露途径 (图 1 和 2). 另外, 本研究中土壤/灰尘铅浓度与儿童血铅含量呈极显著 ( $P < 0.001$ ) 正相关, 决定系数达  $R^2 = 91.96\%$ , 进一步说明土壤/灰尘铅浓度变化是解释儿童血铅含量差异的重要因素. 土壤/灰尘铅暴露途径不仅是导致儿童血铅含量变化的最敏感途径, 也是儿童血铅含量负荷的最重要来源<sup>[3, 33]</sup>, 因此在 IEUBK 模型的应用中要特别关注与土壤/灰尘暴露途径相关的参数的准确性, 这是保证模型模拟可靠性的关键.

本研究采用 RMSE、RMD、EF 这 3 种指标评价模型模拟效果, 发现对照区和轻度污染区模拟结果好, 中度和重度污染区模拟效果依次降低, 并且实测值低于模型模拟值 (图 4 和表 4), 主要原因是采集血铅样品之前, 在中度和重度污染区进行过排铅治

疗,有效降低了儿童血铅含量,导致实测血铅含量数据偏低.对照区和轻度污染区的模拟血铅含量值和超标率也略高于实测值,其原因可能是模型模拟反映的是该地区儿童的整体水平,而由于血铅含量采集困难,儿童样本抽样量相对较少,实测结果可能与整体水平有所偏离.

模型模拟显示重度、中度和轻度污染区儿童血铅含量超标率分别为 98.98%、97.36% 和 88.39%,远高于对照区 14.94%,表明该区域的铅污染对儿童健康影响大.儿童血铅含量高不仅与环境介质污染有关(图 2),而且受到儿童行为模式的强烈影响(图 1).农村地区儿童的散养方式和房屋结构特点大大增加了手口接触机会,不卫生的进食和饮水习惯也增加儿童铅暴露的机会.

采用本地化参数对 G 省一铅冶炼厂区周边儿童的血铅含量模拟发现,建厂前儿童血铅含量均值与超标率都较低;在仅考虑土壤铅累积的情况下,投产后随着运转时间延长,儿童血铅含量逐渐升高,到 20 a 时血铅含量几何均值将升高到  $6.32 \mu\text{g}\cdot\text{dL}^{-1}$ ,远高于采用美国默认值的模拟结果  $2.44 \mu\text{g}\cdot\text{dL}^{-1}$ .粮食作物和蔬菜对土壤中铅的富集能力有限,如有报道稻米的富集系数为 0.001 8<sup>[35]</sup>,白菜、菠菜和青菜分别为 0.01~0.12、0.05~0.25 和 0.05~0.50<sup>[36]</sup>,随着土壤铅含量逐渐增加,食物铅含量和通过食物摄入铅的量也可能缓慢增加.如果综合考虑各种途径铅摄入量的增加,使用默认值和采用本地化参数之间的差异将更为突出,这种差异会随着预测时间的加长而增大,因此在我国应用 IEUBK 模型进行铅污染的健康风险评估必须重视模型参数的本地化.

#### 4 结论

(1)IEUBK 模型的敏感性分析显示,通过手口接触方式的土壤/灰尘铅暴露途径是铅的主要摄入途径,并且土壤灰尘铅浓度与儿童血铅含量显著线性相关.

(2)通过调查问卷等方法本地化儿童行为模式参数,并结合污染区的环境数据,模型模拟获得的儿童血铅含量预测值与实测值基本相符.

(3)对比本地化前后的模型模拟结果,发现美国默认的儿童行为模式数据不适合我国研究地区的实际情况,其模拟值偏低,在我国应用 IEUBK 模型必须采用本地化后的儿童行为模式参数,才能准确地进行铅污染的健康影响评价和预测.

(4)本研究发现儿童行为模式对于儿童铅暴露的影响很大.由于我国不同地区的经济发展状况和自然地理环境存在很大差异,导致在全国范围内建立一套通用的儿童行为模式数据难度大,也不科学,因此对我国进行合理分区,在各区域内进行广泛的儿童行为模式调查,建立区域性的儿童行为模式数据库,是可行的策略.

#### 参考文献:

- [1] 王金敖,王士相,李延平.关于含铅汽油对人体健康危害情况的探讨[J].污染防治技术,1998,11(2):85-87.
- [2] 刘玉莹.环境铅污染的来源及对儿童的危害[J].职业与健康,2003,19(6):8-9.
- [3] 任慧敏,王金达,张学林,等.沈阳市儿童环境铅暴露评价[J].环境科学学报,2005,25(9):1236-1241.
- [4] Gulson B L, Pounds J G, Mushak P, et al. Estimation of cumulative lead releases (lead flux) from the maternal skeleton during pregnancy and lactation [J]. Journal of Laboratory and Clinical Medicine, 1999, 134(6): 631-640.
- [5] USEPA. User's guide for the integrated exposure uptake biokinetic model for lead in children (IEUBK) [EB/OL]. <http://www.epa.gov/superfund/health/contaminants/lead/products.htm>. 2011-8-10.
- [6] Brattin W, Griffin S. Evaluation of the contribution of lead in soil to lead in dust at superfund sites [J]. Human and Ecological Risk Assessment, 2011, 17(1): 236-244.
- [7] Mushak P. Lead remediation and changes in human lead exposure: some physiological and biokinetic dimensions [J]. Science of the Total Environment, 2003, 303(1-2): 35-50.
- [8] Bergstrom C, Shirai J, Kissel J. Particle size distributions, size concentration relationships, and adherence to hands of selected geologic media derived from mining, smelting, and quarrying activities [J]. Science of the Total Environment, 2011, 409(20): 4247-4256.
- [9] Deshommes E, Prévost M. Pb particles from tap water: bioaccessibility and contribution to child exposure [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(11): 6269-6277.
- [10] 孙广义,闭向阳,李仲根,等.武汉市幼儿园降尘 Pb 污染特征及其生物有效性[J].环境科学学报,2011,32(11): 3305-3311.
- [11] 王波,邵迪初,项张华,等.基于 IEUBK 模型研究环境铅对婴儿血铅的影响[J].卫生研究,2011,40(4): 478-480.
- [12] 郝汉舟,陈同斌,吴基良,等.武汉市儿童多途径铅暴露风险评估[J].环境科学,2012,33(6): 2075-2082.
- [13] 董婷,李天昕,王贝贝,等.儿童手口接触暴露参数调查研究方法的研究进展[J].环境与健康杂志,2012,29(8): 747-751.
- [14] 张红振,骆永明,章海波,等.基于人体血铅指标的区域土壤环境铅基准值[J].环境科学,2009,30(10): 3036-3042.
- [15] 曾五一,黄炳艺.调查问卷的可信度和有效度分析[J].统计与信息论坛,2005,20(6): 11-15.

- [16] 康等银. 关于调查问卷设计应注意几个问题的研究[J]. 科技信息, 2009, (23): 608, 622.
- [17] 邢文昕. 环境影响评价公众参与调查问卷存在问题分析[J]. 环境与可持续发展, 2010, 35(5): 27-30.
- [18] Rich D Q, Yiin L M, Rhoads G G, *et al.* A field comparison of two methods for sampling lead in household dust[J]. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 1999, 9(2): 106-112.
- [19] Altundag H, Tuzen M. Comparison of dry, wet and microwave digestion methods for the multi element determination in some dried fruit samples by ICP-OES [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2011, 49(11): 2800-2807.
- [20] Kovács B, Györi Z, Prokisch J, *et al.* A study of plant sample preparation and inductively coupled plasma emission spectrometry parameters [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1996, 27(5-8): 1177-1198.
- [21] 许贺. 食品中重金属检测的方法研究与仪器研制[D]. 上海: 华东师范大学, 2009. 83-84.
- [22] 杨喜爱, 肖爱平, 冷鹃, 等. 农作物样品重金属检测的试样制备与质量控制[J]. *中国麻业科学*, 2012, 34(5): 226-229.
- [23] Kovács B, Györi Z, Prokisch J, *et al.* Studies on soil and plant sample preparation and ICP parameters[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1996, 27(3-4): 209-215.
- [24] Lenhart T, Eckhardt K, Fohrer N, *et al.* Comparison of two different approaches of sensitivity analysis [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2002, 27(9-10): 645-654.
- [25] 王宗爽, 段小丽, 王贝贝, 等. 土壤/尘健康风险评估中的暴露参数[J]. *环境与健康杂志*, 2012, 29(2): 114-117.
- [26] Huang Y, Yu Y Q, Zhang W, *et al.* Agro-C: A biogeophysical model for simulating the carbon budget of agroecosystems[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(1): 106-129.
- [27] Smith P, Smith J U, Powlson D S, *et al.* A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments[J]. *Geoderma*, 1997, 81(1-2): 153-225.
- [28] Brisson N, Ruget F, Gate P, *et al.* STICS: a generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and maize[J]. *Agronomie*, 2002, 22(1): 69-92.
- [29] 国家环境保护局开发监督司. 环境影响评价技术原则与方法[M]. 北京: 北京大学出版社, 1992.
- [30] USEPA. EPA/600/R-10/030. Exposure factors handbook[R]. Washington: National Center for Environmental Assessment, 2011.
- [31] GB 15618-1995, 土壤环境质量标准[S].
- [32] National Institute of Advanced Industrial Science and Technology. Japanese exposure factors handbook [EB/OL]. [http://unit.aist.go.jp/riss/crm/exposurefactors/english\\_summary.html](http://unit.aist.go.jp/riss/crm/exposurefactors/english_summary.html). 2007-5-11.
- [33] Kim S, Cheong H K, Choi K, *et al.* Development of Korean exposure factors handbook for exposure assessment [J]. *Epidemiology*, 2006, 17(6): S460.
- [34] Canadian Ministry of National Health and Welfare. Tapwater consumption in Canada [R]. Ottawa Canada: Department of National Health and Welfare, 1981.
- [35] 肖小平, 彭科林, 周孟辉. 城市郊区水稻土重金属污染状况调查与评价——以湘潭市郊响水乡为例[J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16(3): 680-685.
- [36] 宗良纲, 孙静克, 沈倩宇, 等. Cd、Pb 污染对几种叶类蔬菜生长的影响及其毒害症状[J]. *生态毒理学报*, 2007, 2(1): 63-68.

## CONTENTS

Aerosol Optical Properties During Different Air-Pollution Episodes over Beijing .....	SHI Chan-zhen, YU Xing-na, ZHOU Bin, <i>et al.</i> (4139)
Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Aerosol Ions over the Bohai Sea and the North Yellow Sea in Autumn .....	ZHANG Yan, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (4146)
Spatial Distribution Characteristics of Carbonaceous Aerosol During Summer in Beibu Gulf Zone, China .....	YANG Yi-hong, TAO Jun, GAO Jian, <i>et al.</i> (4152)
Study on the <i>in-situ</i> Measurement of Greenhouse Gas by an Improved FTIR .....	XIA Ling-jun, LIU Li-xin, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (4159)
Distribution of CH <sub>4</sub> in the Suburb of Changsha City, China .....	LIU Lu-ning, WANG Ying-hong, XU Xiao-juan, <i>et al.</i> (4165)
Chemical Composition of <i>n</i> -Alkanes in Wheat Straw and Smoke .....	LIU Gang, LI Jiu-hai, XU Hui, <i>et al.</i> (4171)
Degradation of the Absorbed Methyl Mercaptan by Persulfate in Alkaline Solution .....	YANG Shi-ying, WANG Lei-lei, FENG Lin-yu, <i>et al.</i> (4178)
Emissions of Greenhouse Gas and Ammonia from the Full Process of Sewage Sludge Composting and Land Application of Compost .....	ZHONG Jia, WEI Yuan-song, ZHAO Zhen-feng, <i>et al.</i> (4186)
Distribution and Physicochemical Properties of Aquatic Colloids in the Yangtze Estuarine and Coastal Ecosystem .....	GU Li-jun, YANG Yi, LIU Min, <i>et al.</i> (4195)
Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Estuaries Surface Sediments from the Haihe River Basin .....	..... LÜ Shu-cong, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (4204)
Distribution of Perfluorooctanesulfonate and Perfluorooctanoate in Water and the Sediment in Fenhe River, Shanxi Province .....	Higashiguchi Tomohiro, SHI Jiang-hong, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4211)
Analysis on Nitrogen and Phosphorus Loading of Non-point Sources in Shiqiao River Watershed Based on L-THIA Model .....	LI Kai, ZENG Fan-tang, FANG Huai-yang, <i>et al.</i> (4218)
Pollutant Source Apportionment of Combined Sewer Overflows Using Chemical Mass Balance Method .....	DAI Mei-hong, LI Tian, ZHANG Wei (4226)
Simulated Study of Algal Fatty Acid Degradation in Hypoxia Seawater-Sediment Interface Along China Coastal Area .....	SUI Wei-wei, DING Hai-bing, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (4231)
Influence of Two Different Species of Aquatic Plant Communities on the Concentration of Various Nitrogen Forms in Sediment of Lake Taihu .....	..... MA Jiu-yuan, WANG Guo-xiang, LI Zhen-guo, <i>et al.</i> (4240)
Study on Removal Rule of Endosulfan in Surface Flow Constructed Wetland .....	QIN Jing, GAO Fu-wei, XIE Hui-jun (4251)
Accumulation and Transformation of Different Arsenic Species in Nonaxenic <i>Dunaliella salina</i> .....	WANG Ya, ZHANG Chun-hua, WANG Shu, <i>et al.</i> (4257)
Evaluation of <i>in situ</i> Capping with Lanthanum-Modified Zeolite to Control Phosphate and Ammonium Release from Sediments in Heavily Polluted River .....	..... LI Jia, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui (4266)
Effects of Invertebrate Bioturbation on Vertical Hydraulic Conductivity of Streambed for a River .....	REN Chao-liang, SONG Jin-xi, YANG Xiao-gang, <i>et al.</i> (4275)
Formation of Disinfection By-products by <i>Microcystis aeruginosa</i> Intracellular Organic Matter; Comparison Between Chlorination and Bromination .....	..... TIAN Chuan, GUO Ting-ting, LIU Rui-ping, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Natural Organic Matter on Coagulation Efficiency and Characterization of the Floes Formed .....	XU Lei, YU Wen-zheng, LIANG Liang, <i>et al.</i> (4290)
DOM Membrane Fouling and Effects on Rejection Behaviors of NF Membranes .....	FENG Gui-zhen, DONG Bing-zhi (4295)
Removal of Hg in Wastewater by Zero-Valent Iron .....	ZHOU Xin, ZHANG Jin-zhong, QIU Xin-kai, <i>et al.</i> (4304)
Catalytic Dechlorination of 2,4-D in Aqueous Solution by Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -Stabilized Nanoscale Pd/Fe .....	ZHOU Hong-yi, LIANG Si, ZENG Si-si, <i>et al.</i> (4311)
Comparative Study on Adsorption Behaviors of Natural Organic Matter by Powered Activated Carbons with Different Particle Sizes .....	LI Zheng-jian, SHI Bao-you, WANG Dong-sheng (4319)
Removal of Nitrate from Aqueous Solution Using Cetylpyridinium Chloride (CPC)-Modified Activated Carbon as the Adsorbent .....	ZHENG Wen-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (4325)
Adsorption Properties of Modified Graphene for Methylene Blue Removal from Wastewater .....	WU Yan, LUO Han-jin, WANG Hou, <i>et al.</i> (4333)
Application of Classical Isothermal Adsorption Models in Heavy Metal Ions/Diatomite System and Related Problems .....	ZHU Jian, WU Qing-ding, WANG Ping, <i>et al.</i> (4341)
Effects of Nitrate on Anoxic/Anaerobic Oxidation of Methane in the Aged Refuse .....	LIU Yan-yan, LONG Yan, YIN Hua, <i>et al.</i> (4349)
Study on the Biotransformation of Sulfate and Ammonia in Anaerobic Conditions .....	ZHANG Li, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4356)
Characteristics of Sulfate Reduction-Ammonia Oxidation Reaction .....	YUAN Yi, HUANG Yong, LI Xiang, <i>et al.</i> (4362)
Analysis of Hydrogen-production Performance in a UASB System at Low pH .....	ZHAO Jian-hui, ZHANG Bai-hui, LI Ning, <i>et al.</i> (4370)
Preparation of Red Mud Loaded Co Catalysts; Optimization Using Response Surface Methodology (RSM) and Activity Evaluation .....	LI Hua-nan, XU Bing-bing, QI Fei, <i>et al.</i> (4376)
Toxic Effects of High Concentrations of Ammonia on <i>Euglena gracilis</i> .....	LIU Yan, SHI Xiao-rong, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (4386)
Influence of Image Process on Fractal Morphology Characterization of NAPLs Vertical Fingering Flow .....	LI Hui-ying, DU Xiao-ming, YANG Bin, <i>et al.</i> (4392)
Changing Characteristics of Organic Matter and pH of Cultivated Soils in Zhejiang Province over the Last 50 Years .....	ZHANG Ming-kui, CHANG Yue-chang (4399)
Study on Selenium Contents of Typical Selenium-rich Soil in the Middle Area of Zhejiang and Its Influencing Factors .....	HUANG Chun-lei, SONG Ming-yi, WEI Ying-chun (4405)
Spatial Distribution Characteristics of Fe and Mn Contents in the New-born Coastal Marshes in the Yellow River Estuary .....	SUN Wen-guang, GAN Zhuo-ting, SUN Zhi-gao, <i>et al.</i> (4411)
Level, Composition and Sources of Medium-Chain Chlorinated Paraffins in Soils from Chongming Island .....	SUN Yang-zhao, WANG Xue-tong, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4420)
Distribution Characteristics of Organochlorine Pesticides in Soil from Daiyun Mountain Range in Fujian, China .....	QU Cheng-kai, QI Shi-hua, ZHANG Li, <i>et al.</i> (4427)
Levels of PCDD/Fs and Dioxin-Like PCBs in Soils Near E-Waste Dismantling Sites .....	SHAO Ke, YIN Wen-hua, ZHU Guo-hua, <i>et al.</i> (4434)
Chemical Form Changes of Exogenous Water Solution Fluoride and Bioavailability in Tea Garden Soil .....	CAI Hui-mei, PENG Chuan-yi, CHEN Jing, <i>et al.</i> (4440)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Vegetation Restoration of Different Types of Coal Mine Spoil Banks .....	ZHAO Ren-xin, GUO Wei, FU Rui-ying, <i>et al.</i> (4447)
Effects of the Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Environmental Phytoremediation in Coal Mine Areas .....	LI Shao-peng, BI Yin-li, KONG Wei-ping, <i>et al.</i> (4455)
Preliminary Analysis of Manganese Uptake Mechanism in the Hyperaccumulator <i>Phytolacca americana</i> L. ....	XU Xiang-hua, LI Ren-ying, LIU Cui-ying, <i>et al.</i> (4460)
Research on the Bioaccessibility of HgS by <i>Shewanella oneidensis</i> MR-1 .....	CHEN Yan, WANG Hui, SI You-bin (4466)
Study on IEUBK Model Localization Based on Behavior Parameters of Children from Southwestern China .....	JIANG Bao, CUI Xiao-yong (4473)
Sorption and Desorption Characteristics of Different Structures of Organic Phosphorus onto Aluminum (Oxyhydr)Oxides .....	LIU Fei, ZHANG Yan-yi, YAN Yu-peng, <i>et al.</i> (4482)
Study on the Occurrence of Ferrum in Coal by Ultrasound-assisted Sequential Chemical Extraction .....	XIONG Jin-yu, LI Han-xu, DONG Zhong-bing, <i>et al.</i> (4490)
A Review of Uptake, Translocation and Phytotoxicity of Engineered Nanoparticles in Plants .....	YANG Xin-ping, ZHAO Fang-Jie (4495)

# 《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)

2013年11月15日 34卷 第11期

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 11 Nov. 15, 2013

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行