

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第9期

Vol.33 No.9

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国4个WMO/GAW本底站大气CH ₄ 浓度及变化特征	方双喜,周凌晔,许林,姚波,刘立新,夏玲君,王红阳	(2917)
我国东北地区大气降水稳定同位素特征及其水汽来源	李小飞,张明军,马潜,李亚举,王圣杰,汪宝龙	(2924)
2010年广州亚运期间空气质量与污染气象条件分析	李婷苑,邓雪娇,范绍佳,吴兑,李菲,邓涛,谭浩波,蒋德海	(2932)
厦门市冬春季灰霾期间大气PM ₁₀ 中多环芳烃的污染特征及来源分析	钱冉冉,闫景明,吴水平,王新红	(2939)
气溶胶OCEC切割点确定方法改进及应用	王莉华,董华斌,闫才青,曾立民,郑玫,张延君,刘久萌,Weber R J	(2946)
松花江上游夹皮沟金矿土壤与大气汞污染特征	张刚,王宁,王媛,刘特,艾建超	(2953)
河北农居环境颗粒态汞污染特征及健康评估研究	赵亚娟,龚巍巍,栾胜基	(2960)
印刷电路板(PCB)厂挥发性有机物(VOCs)排放指示物筛选	马英歌	(2967)
烹调油烟中挥发性有机物的排放初探	何万清,田刚,聂磊,曲松,李靖,王敏燕	(2973)
生物滴滤塔降解甲苯废气长期运行生物膜相特性研究	胡俊,郑江玲,吴越新,张丽丽,陈建孟	(2979)
分期布液生物滴滤床净化H ₂ S废气性能研究	刘春敬,李坚,刘佳,彭淑婧,李超,陈英,何洪	(2987)
粉煤灰综合利用过程中汞的二次释放规律研究	孟阳,王书肖	(2993)
太湖、巢湖水体总悬浮物浓度半分析反演模型构建及其适用性评价	刘忠华,李云梅,檀静,郭宇龙,周莉,刘阁	(3000)
巢湖水质与流域农业投入的关联性研究	张燕,高翔,张洪	(3009)
巢湖十五里河水花生生长区沉积物及间隙水中营养盐的基本特性	李如忠,李峰,周爱佳	(3014)
巢湖沉积物中磷蓄积时空变化及人为污染定量评价	刘恩峰,杜臣昌,羊向东,沈吉	(3024)
巢湖周边表土中有机质、全氮和全磷空间分布及其相关性	陈书琴,储昭升,胡社荣,刘俊,王长春,王曼	(3031)
丹江口水库典型入库支流氮磷动态特征研究	雷沛,张洪,单保庆	(3038)
水温分层对三峡水库香溪河库湾春季水华的影响	刘流,刘德富,肖尚斌,孔松,陈媛媛,方小凤	(3046)
平水期和丰水期殷村港污染物浓度时空变异比较研究	杨晓英,罗兴章,郑正,方淑波	(3051)
江苏西部湖泊沉积物营养盐赋存形态和释放潜力差异性分析	刘涛,胡志新,杨柳燕,肖琳,席北斗,许其功	(3057)
太湖西岸湖滨带沉积物氮磷有机质分布及评价	甘树,卢少勇,秦普丰,金相灿,焦伟,王佩	(3064)
南四湖流域种植业面源污染氮磷源解析研究	刘静,路风,杨廷钊,徐娜,王田妮	(3070)
珠江水体中有机物分布、组成及与消毒副产物生成的关系	何洪威,周达诚,王保强,梁艳红	(3076)
东江流域典型乡镇饮用水源地重金属污染健康风险评价	王若师,许秋瑾,张炯,魏群山,颜昌宙	(3083)
深圳茅洲河表层沉积物卤代多环芳烃污染研究	孙建林,倪宏刚,丁超,曾辉	(3089)
福建罗源湾潮间带沉积物重金属含量空间分布及其环境质量影响	高文华,杜永芬,王丹丹,高抒	(3097)
渤海湾大型底栖生物群落结构变化及原因探讨	蔡文倩,刘录三,乔飞,林岍璇,周娟	(3104)
地下水污染防治区划体系构建研究	王俊杰,何江涛,陆燕,刘丽雅,张小亮	(3110)
北京市平原区地下水污染防治区划不确定性分析	陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮	(3117)
川东平行岭谷区典型岩溶含水系统中NO ₃ ⁻ 的存储和运移	杨平恒,袁道先,任幼蓉,谢世友,贺秋芳,胡晓风	(3124)
改性活性炭对水中PFOS的吸附去除研究	董锡臻,石宝友,解岳,王东升	(3132)
水溶液中臭氧和溴离子的反应研究	俞潇婷,张家辉,潘循哲,张仁熙,侯惠奇	(3139)
HPSEC-UV-TOC联用技术测定有机物相对分子质量分布	张晗,董秉直	(3144)
不同有机基质诱发的水体黑臭及主要致臭物(VOCs)产生机制研究	卢信,冯紫艳,商景阁,范成新,邓建才	(3152)
不同pH下纳米铁镍颗粒对生物降解苯酚的影响	况烨,周琰,王清萍,陈祖亮	(3160)
多级微氧生物流化床预处理高浓度丙烯酸废水	李莎,郑盛之,宋玉栋,周岳溪,朱长军,刘淑玲,潘玲,蒲文晶	(3167)
三级生物膜深度处理腈纶废水生化出水的脱氮研究	徐少阳,蒋进元,周岳溪,崔俊涛,段妮妮	(3172)
改性花生壳对水中镉的动态吸附研究	龙腾,易筱筠,党志	(3177)
硫氰酸根在粒状镁铝复合氧化物上的吸附性能	王秀娟,王海增,孙宝维,韩文军	(3182)
海水生物滤器氨氮沿程转化规律模型	罗荣强,侯沙沙,沈加正,陈珠,刘鹰	(3189)
营养物质缺乏引起的好氧颗粒污泥膨胀及其恢复	张著,高大文,袁向娟,勾倩倩	(3197)
生物表面活性剂强化污泥水解的研究	易欣,罗琨,杨麒,李小明,邓伟光,张植平	(3202)
厌氧氨氧化菌的富集培养与分子鉴定	刘冬英,邱艳玲,袁宪正,师晓爽,郭荣波	(3208)
阿特拉津降解菌株的分离、鉴定及降解特性研究	李绍峰,朱静,李铁晶	(3214)
农业废物堆肥中高产漆酶菌株的分离鉴定及酶学性质研究	任秀娟,范长征,鲁伦慧,王聪,曾光明	(3220)
糖蜜酒精废水脱色微生物的筛选及鉴定	李必金,刘幽燕,贺锴,滕芳明,何熙璞,李青云	(3228)
餐厨垃圾乳酸发酵过程中的微生物多样性分析	刘建国,汪群慧,王爽,孙晓红,仇天雷,李焕	(3236)
共价功能化对单壁碳纳米管产生DNA损伤和活性氧的影响研究	吴仁人,陶雪琴,党志,李开明,蔡美芳	(3241)
<i>Geobacter sulfurreducens</i> 对汞的甲基化及其影响因素研究	邹嫣,司友斌,颜雪,陈艳	(3247)
单一与复合胁迫下油菜对镉、铅的吸收效应	武文飞,南忠仁,王胜利,赵转军,周婷	(3253)
金铜矿下游农户家养番鸭体内重金属分布特征及其评价	杭小帅,梁斌,王文林,王霞,李维新	(3261)
环境激素氯菊酯对萼花臂尾轮虫繁殖的影响	董学兴,杨家新,吕林兰,赵卫红,於叶兵	(3266)
地聚物固化生活垃圾焚烧飞灰固化体抗氧化硫杆菌腐蚀性能的研究	金漫彤,孙鑫,董海丽,金赞芳	(3272)
焚烧飞灰高温过程中重金属的挥发及其氯化特征	刘敬勇,孙水裕	(3279)
城市废弃物处理温室气体排放研究:以厦门市为例	于洋,崔胜辉,林剑艺,李飞	(3288)
NPEOs及其代谢产物在城市污水处理厂中的归趋分析	连静,刘俊新	(3295)
《环境科学》征订启事(3037)	《环境科学》征稿简则(3151)	信息(2999,3030,3096,3227)

河北农居环境颗粒态汞污染特征及健康评估研究

赵亚娟¹, 龚巍巍^{2*}, 栾胜基^{2,3}

(1. 中国环境科学出版社, 北京 100062; 2. 北京大学深圳研究生院环境与能源学院, 城市人居环境科学与技术重点实验室, 深圳 518055; 3. 深港产学研基地环境模拟与污染控制重点实验室, 深圳 518057)

摘要: 近年来, 我国农村环境问题日渐加重, 大气颗粒态汞对人体健康的危害逐渐凸现出来, 而已有研究对我国农居环境中的汞污染状况关注较少. 以颗粒态汞为研究对象, 于 2009 年 7、8 月及 2010 年 10~12 月, 对河北省 6 个村庄中的 34 个典型农居环境进行 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 膜采样, 采用冷原子荧光法测定颗粒态汞质量浓度. 结果表明, 同一季节时, 厨房 PM_{10} 中汞质量浓度约是庭院 PM_{10} 中汞质量浓度的 2 倍; 在同一空间内, PM_{10} 中汞质量浓度大小依次是冬季 ($3.004 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$) > 秋季 ($1.550 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$) > 夏季 ($1.127 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$); 同一季节时, $PM_{2.5}$ 中汞质量浓度大小依次是厨房 ($0.795 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3} \pm 0.337 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$) > 客厅 ($0.398 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3} \pm 0.159 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$) > 庭院 ($0.321 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3} \pm 0.143 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$); $PM_{2.5}$ 中的汞质量浓度占 PM_{10} 中汞质量浓度的百分比为 (52.4 ± 13.5)%. 对农居环境 $PM_{2.5}$ 中汞的健康风险度水平进行评价, 不同人群中儿童的暴露水平最高, 其年均超额危险度 < 10^{-8} . 可知农居环境 $PM_{2.5}$ 中汞对农户的健康风险在可以忽略的水平.

关键词: 农居环境; 颗粒态; 汞; 健康风险; 暴露

中图分类号: X513; X820.4 文献标识码: 文章编号: 0250-3301(2012)09-2960-07

Pollution Characteristics and Health Assessment of Particulate Mercury in Hebei Rural Households

ZHAO Ya-juan¹, GONG Wei-wei², LUAN Sheng-ji^{2,3}

(1. China Environmental Science Press, Beijing 100062, China; 2. Key Laboratory for Urban Habitat Environmental Science and Technology, School of Environment and Energy, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China; 3. PKU-HKUST Shenzhen-Hong Kong Institution Key Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Shenzhen 518057, China)

Abstract: Environment problems in rural areas have been increasing dramatically in recent years. Atmospheric particulate mercury has posed increasingly obvious threats to human health. However, there were few studies attaching importance on mercury pollution in rural residential environment. Taking particulate mercury as research objects, the studies in six villages of Hebei Province were carried out in July/August 2009 and October/September 2010. A number of PM_{10} and $PM_{2.5}$ samples were taken in 34 typical households, using cold vapor atomic fluorescence to determine the content of particulate mercury. The results showed that the mercury concentration in PM_{10} in kitchen was about twice that in the courtyard. In the same space, the mercury contents in PM_{10} in a descending order were as follows: winter ($3.004 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$), autumn ($1.550 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$), summer ($1.127 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$); in the same season, the mercury levels in $PM_{2.5}$ in a descending order were as follows: kitchen ($0.795 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3} \pm 0.337 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$), living room ($0.398 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3} \pm 0.159 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$), yard ($0.321 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3} \pm 0.143 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$); the Mercury content in $PM_{2.5}$ accounted for (52.4 ± 13.5)% of that in PM_{10} . Evaluation of the health risks of mercury in $PM_{2.5}$ revealed that children were exposed to the highest level, whose average annual excess risk was below 10^{-8} . Therefore, the health risk of peasants living in rural residential environment was at a negligible level.

Key words: rural residential environment; particulate matter; mercury; health risk; exposure

汞是典型的重金属元素, 属人体非必需元素, 广泛存在于水体、土壤和大气中, 可以通过消化系统、呼吸系统和皮肤进入人体并富集, 长期损害神经系统、生殖系统、肾功能和免疫功能等^[1]. 美国环境保护署(EPA)将汞定义为一种具有高度危险的元素. 大气环境中汞的来源主要有两种, 一是自然源, 二是人为源, 人为源主要来自煤燃烧、医药垃圾焚烧和城市垃圾焚烧等, 其约占总来源的 10% ~ 30%^[2]. 其中, 大量煤的燃烧所逸出的汞占人类活动所释放汞的较大部分^[3~7]. 大气中的汞可以分为气态汞和颗粒态汞, 颗粒态汞约占总汞的 4%^[8], 然

而它却能长距离输送, 也能为气态汞提供吸附和化学转化的场所, 也是大气汞干湿沉降的重要组成部分^[9~11]. 更为重要的是, 大气颗粒态汞有 60% ~ 80% 集中在可吸入颗粒物中^[12~14], 而可吸入颗粒物中的汞在人体肺部的吸附效率接近 100%, 会对人体健康造成较大影响^[15,16].

关于大气环境汞污染的已有研究主要集中在城

收稿日期: 2011-12-27; 修订日期: 2012-04-09

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2007BAC16B04)

作者简介: 赵亚娟(1985~), 女, 硕士, 主要研究方向为环境化学, E-mail: zhaoyj2004@163.com

* 通讯联系人, E-mail: weiwong@163.com

市地区,对广大农村地区的汞污染状况研究较少,尤其是针对包括室内空气在内的农居环境中颗粒态汞污染状况的研究更少。本研究比较系统地分析了河北高邑县农村地区室内外空气中不同时期不同空间内颗粒态汞的质量浓度特征,并初步评估了农居环境中颗粒态汞的健康风险。本研究可在一定程度上弥补我国农村环境空气中汞污染信息的缺失,以期为我国农村环境改善提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样点概况

本研究以河北省石家庄市高邑县(东经 $114^{\circ}26'$ ~ $114^{\circ}43'$, 北纬 $37^{\circ}33'$ ~ $37^{\circ}42'$)西富村乡农村的大气环境为对象。该地区农户燃料类型多样,主要以蜂窝煤、电、液化气作为主要燃料,偶尔也以秸秆为燃料。燃烧秸秆的灶台均配有固定的烟囱,而煤炉的使用中只有少数家庭为其安装了排烟系统。周边有几家乡镇企业,如纺织厂、瓷砖厂等,这些小工厂以煤炭作为主要燃料,排放到大气中的烟气虽经过初步净化,但仍有少量污染产生。所选农户在取暖和炊事期间所用燃料类型与当地大多农户的状况一致,能够代表该地区农户家用燃料的使用现状。

1.2 样品采集

本研究主要采用滤膜法采集大气中颗粒态汞。采用 2 台 ChemComb 采样器 (Model 3500, RP, 美国)对农户居室内外和不同时段(做饭与否)大气环境中的 $PM_{2.5}$ 进行采样,同步使用 1 台 HY-100 智能采样器(山东青岛恒远科技发展有限公司)采集 PM_{10} 。ChemComb 采样器的采样膜为 $\Phi 47$ mm, $2\ \mu m$ 孔径的石英膜(Whatman International Ltd.),采样流量设置为 $16.7\ L\cdot min^{-1}$ 。HY-100 智能采样器的采样膜采用同样材质的 $\Phi 90$ mm 石英膜,采样流量设置为 $53.6\ L\cdot min^{-1}$ 。对农户厨房和庭院进行采样时, HY-100 和 1 台 ChemComb 采样器同时置于庭院空旷处,另 1 台 ChemComb 采样器置于厨房内中间位置,如图 1 所示。采样头位于距地面约 1 m 的位置,做饭时段采样持续 1 ~ 2 h,采集室外或非做饭时段厨房样品时连续采样 12 h。

1.3 样品分析

1.3.1 仪器及试剂

仪器:冷原子荧光测汞仪 (Analytik Jena, German);微波消解仪 (Ethos1, Milestone Ltd., Italy)。



图 1 膜采样现场

Fig. 1 Membrane sampling scene

试剂: HNO_3 (65%, BV-III, 北京化学试剂研究所); HCl (38%, BV-III, 北京化学试剂研究所); H_2O_2 (GR, 广州化学试剂厂); K_2CrO_7 (GR, 天津凯通化学试剂有限公司); $SnCl_2$ (GR, 天津光复精细化工研究所); 汞标准溶液 ($100\ mg\cdot L^{-1}$, 国家标准物质中心)。

1.3.2 分析方法

选用浓 HNO_3 和 H_2O_2 [$V(\text{浓 } HNO_3): V(H_2O_2) = 4:1$] 作为消解试剂,采用微波消解仪对待测样品进行湿法消解。利用冷原子荧光测汞仪测定消解液中的汞质量浓度。测汞仪采用 2% $SnCl_2$ 作为还原剂, 2% HCl 作为稀释剂和酸化剂,选用金汞齐二次富集以及快速基线 (FBR) 程序进行痕量汞的测定。配制 0、0.05、0.1、0.3、0.5、1.0、2.0、4.0 $\mu g\cdot L^{-1}$ 系列汞标准溶液。为保证汞标和待测样品酸度一致,配制汞标时加入 65% HNO_3 ,并定容。每个标样平行测定 3 次,并利用系统程序绘制标准曲线,相关系数 R^2 达 0.999 8 以上即可。测定每批汞样品时添加一个过程空白样,样品中汞质量浓度为样品测定值扣除过程空白值。

1.4 QA/QC

采样前,用四通道采样器 (Anderson) 对 2 台 ChemComb 采样器进行比对和校准。将 2 台 ChemComb 采样器放在同一地点连续 24 h 采集 $PM_{2.5}$, 比对结果如图 2 所示。相关系数 R^2 为 0.989, 可认为 2 台 ChemComb 采样器所采集的样品具有可比性。HY-100 智能采样器由深圳市计量局校准,其校正后流量为 $53.6\ L\cdot min^{-1}$ 。

为最大限度的减少采样误差:采样前将石英膜和铝箔置于马弗炉中,在 $550^{\circ}C$ 条件下灼烧 4 h 后置于干燥器中保存待用;采样所用不锈钢镊子于 $450^{\circ}C$ 下灼烧 4 h 且装、卸采样膜动作迅速;样品膜对折并用铝箔包好,装进密封袋,放在专用冰箱中 $-20^{\circ}C$ 冷冻保存待分析。实验前将所用的器皿用 10% HNO_3 溶液浸泡 24 h,再经超声、清洗、烘干

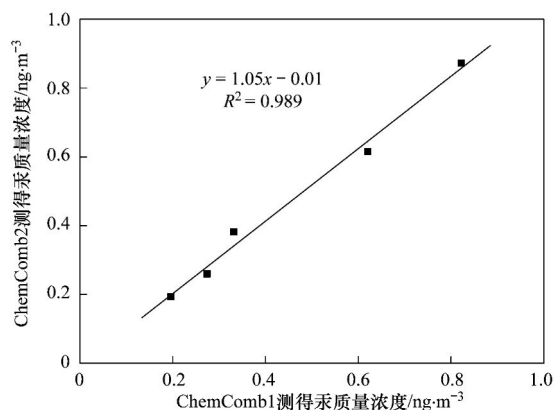


图2 两台 ChemComb 采样器的数据比对

Fig. 2 Comparison of data collected by two ChemComb samplers

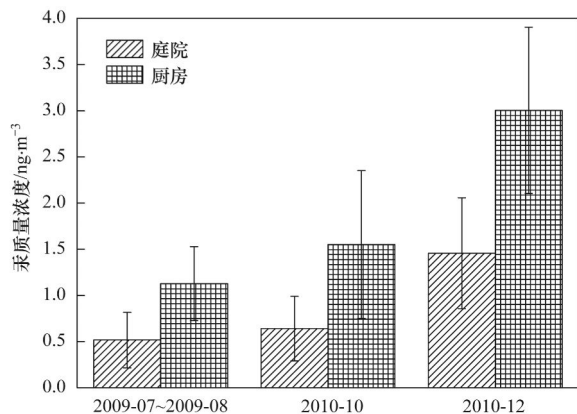
等. 向消解罐中加入 65% HNO_3 , 运行“程序升温”程序进行清洗, 再用去离子水清洗罐子, 晾干. 分析阶段, 实验方法的检测限为 $0.0015 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 加标回收率 R 在 95% ~ 102% 之间, 分析试剂的溶液背景质量浓度为 $0.004 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$.

2 结果与讨论

2.1 农居环境颗粒态汞的质量浓度特征

2.1.1 不同时期颗粒态汞的质量浓度特征

分别于 2009 年 7、8 月和 2010 年 10、12 月对河北省高邑县农户家庭空气中的颗粒物 PM_{10} 进行采样, 经实验室分析后得到了 PM_{10} 中颗粒态汞的质量浓度. 结果如图 3 所示.

图3 东张村不同时期庭院与厨房 PM_{10} 中汞质量浓度比较Fig. 3 Comparison of mercury concentration in PM_{10} in yards and kitchens at different times

从图 3 可以看出, 在夏(7、8 月)、秋(10 月)、冬(12 月)这 3 个不同的季节, 河北省高邑县农村地区厨房 PM_{10} 中的汞质量浓度远高于庭院 PM_{10} 中的汞质量浓度, 前者质量浓度约为后者的两倍(分别为 2.2、2.4、2.1 倍). 冬季厨房 PM_{10} 中的汞质量浓

度最高(平均为 $3.004 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$), 相当于夏季时厨房平均质量浓度($1.127 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$)的 3 倍, 秋季厨房平均质量浓度($1.550 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$)介于两者之间. 农户家庭燃煤是厨房内颗粒态汞的一个重要来源, 而室外的主要污染源是当地工厂燃煤排放烟气和当地建筑施工扬尘. 由图 3 可知, 农户燃煤造成的室内汞污染, 高于室外的颗粒态汞污染. 该地区取暖期从 11 月 ~ 次年 3 月, 冬季采暖期农户家庭燃烧煤炭取暖做饭, 为了保暖需要, 通风状况不佳, 含汞颗粒物弥漫在空气中无法排出, 导致质量浓度最高. 在夏季, 农户燃烧煤炭只用于做饭, 燃烧量相比秋冬季节较小, 且由于气候原因, 夏季厨房通风状况较好, 燃烧释放的颗粒物仅有少部分残留在空气中, 因此夏季厨房汞质量浓度较小. 结合文献调研, 对国内外不同地区大气颗粒态汞质量浓度进行比较, 结果如表 1.

表1 国内外不同地区大气中颗粒态汞的质量浓度比较

Table 1 Comparison of mercury concentration in particles in domestic and foreign regions

采样点	采样时间 (年-月)	样品 类型	质量浓度 / $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$	文献
墨西哥墨西哥卡利郊区	1992 ~ 1993	TSP	0.5	[17]
美国卡莱克斯考郊区	1992 ~ 1993	TSP	0.3	[17]
意大利托斯卡纳地区	1998	TSP	0.056	[18]
长春市	2000-01	TSP	0.145	[19]
日本东京	2001	TSP	0.099	[20]
美国塔斯卡卢萨	2002	TSP	0.016	[21]
美国圣路易斯地区	2002	TSP	0.090	[22]
加拿大魁北克乡村	2003	TSP	0.026	[23]
美国黄石国家公园	2003	TSP	0.030	[24]
贵阳市	2004	TSP	1.09	[25]
美国内华达州北部地区	2005 ~ 2006	TSP	0.011	[26]
西班牙塞维利亚	2000 ~ 2001	PM_{10}	0.07	[27]
北京市近郊	2003	PM_{10}	1.28 ± 1.30	[28]
北京市远郊	2003	PM_{10}	0.79 ± 0.68	[28]
北京市	2003	PM_{10}	$0.38 \sim 3.02$	[29]
上海市	2003-08	PM_8	0.184	[30]
台南	2000	$\text{PM}_{2.5}$	$0.34 \sim 5.8$	[31]
北京市	2003	$\text{PM}_{2.5}$	$0.24 \sim 1.79$	[29]
深圳市	2009	$\text{PM}_{2.5}$	0.072	[32]
河北省高邑县农村	2010	PM_{10}	$0.516 \sim 3.004$	本研究
河北省高邑县农村	2010	$\text{PM}_{2.5}$	$0.303 \sim 1.631$	本研究

由于冬季室内和室外空气中汞质量浓度水平较高(见图 3), 特选取东张村冬季时农居大气颗粒物为研究对象, 评估当地居民在冬季颗粒态汞的暴露水平. 采集了非取暖期、取暖期、降雪前以及降雪后 4 个过程, 15 个农户庭院中大气颗粒物膜样, 在实验室分析结果如图 4 所示.

庭院 1 ~ 3 在 2010 年 10 月完成了采样过程, 庭院 4 ~ 15 则是在 11 月之后完成. 在采集完庭院 8

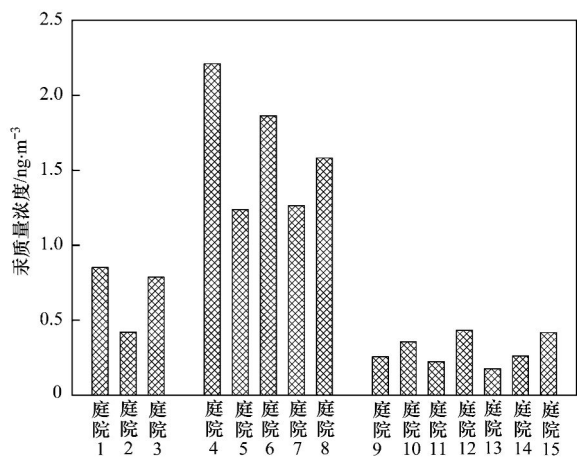


图4 农户室外环境空气 PM₁₀ 中汞的质量浓度对比
Fig. 4 Comparison of mercury concentration in PM₁₀ among rural outdoor sampling sites

的膜样后,该地区经历了一场降雪,降雪当天采集了庭院9的膜样,采集庭院10~15时则不再降雪。可见,降雪对室外颗粒物中汞质量浓度影响较大,这是因为降雪通过吸收沉降大气中的可吸入颗粒物,从而有效地捕集了大气中的汞,是大气汞湿沉降的重要途径。在秋季观测期间,该地区室外空气中PM₁₀中汞的质量浓度为 $(0.686 \pm 0.231) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$,冬季未下雪前汞质量浓度为 $(1.631 \pm 0.413) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$,下雪后为 $(0.303 \pm 0.099) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$,均高于全球背景地区大气颗粒态汞质量浓度 $0.001 \sim 0.086 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[12],也高于加拿大、美国、墨西哥、西班牙等乡村地区的颗粒态汞质量浓度(见表1),同北京、台南等污染较严重地区的颗粒态汞质量浓度相近,这说明该地区大气可吸入颗粒物中的汞,受到了人为源的较大影响。

2.1.2 不同空间颗粒态汞的质量浓度特征

为研究蜂窝煤燃烧对农户日常生活造成的汞污染,于冬季采暖期(2010年12月)采集了农户厨房和客厅中PM_{2.5}样品44个,其中厨房22个,客厅10个,室外12个。该地区客厅和卧室通常是同一房间,采样时统一记为客厅。分析得到农户室内空气中汞的日均质量浓度,具体结果如表2所示。

表2 冬季农户不同空间 PM_{2.5} 中含汞量/ $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$
Table 2 Mercury concentration in PM_{2.5} at different spaces in winter/ $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$

采样空间	Min	Max	Mean	SD
厨房	0.368	1.407	0.795	0.337
客厅	0.169	0.582	0.398	0.159
室外	0.184	0.570	0.321	0.143

由表2可知,厨房空气中PM_{2.5}中汞质量浓度平均为 $0.795 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$,约是客厅空气中汞质量浓度的2倍,约是室外大气中汞质量浓度的2.5倍。这是由于厨房燃料燃烧产生较多颗粒物所致,此次实验中燃料为蜂窝煤,其是该地区农户室内环境中颗粒汞的主要来源。客厅的质量浓度要高于户外汞质量浓度,这是因为该地区农户住宅内,厨房多与客厅以一门相隔,冬季厨房内为保温,门窗多紧闭,产生的烟气虽然大部分能通过烟囱排放出去,但仍有少量颗粒物逸散到客厅或卧室内。该地区冬季室外大气PM_{2.5}中汞质量浓度为 $0.321 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$,高于表1提到的美国卡莱克斯考^[17]、长春^[19]、加拿大魁北克^[23]、上海^[30]等地颗粒物中的汞质量浓度。这除了与采暖季节该地区农户多以煤炭作为主要燃料来取暖之外,还与该地区周边众多乡镇企业、小工厂燃煤有关。

为了更直接地说明室内及室外污染源对农户的主要活动空间客厅的影响,本研究选取了几个典型案例,对比、分析室内外汞污染情况,如图5所示。

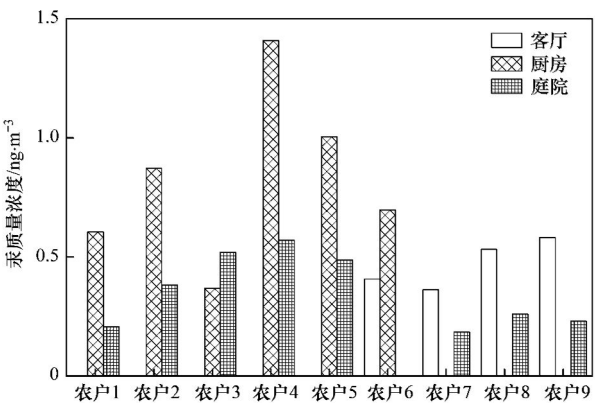


图5 不同农户的客厅、厨房及庭院 PM_{2.5} 中汞质量浓度对比
Fig. 5 Comparison of mercury concentration in PM_{2.5} in rural household indoors and outdoors

在大部分农居环境内,厨房的PM_{2.5}中汞质量浓度都远高于客厅和庭院内汞质量浓度。不同家庭内,尽管都使用蜂窝煤作为燃料,但各个家庭使用的炉灶类型不同,每种炉灶类型的热燃烧效率不同^[33~35],从而导致颗粒物产生量不同,而最终引起单位体积空气PM_{2.5}中汞质量浓度差异。此外,厨房的通风状况也是一个影响汞质量浓度的重要因素。在农户3中,该农户的厨房较小,仅 2 m^2 左右,是在客厅外临时用石棉瓦围墙和房顶搭建的一个棚子,棚子的一面没有墙,与户外空气直接接触,因此该农户的厨房颗粒态汞质量浓度略小于其他家庭厨房中

汞质量浓度. 客厅与庭院内的颗粒态汞主要来自 3 个方面:一是从农户厨房中逸散到客厅和厨房的含汞颗粒物;二是居民在取暖期使用暖气供暖时,通过烟囱向外界排放的含汞烟气;三是周围工厂使用煤炭为燃料时释放的烟气. 在同一地区,第三因素对各个农户的影响基本一致. 因此,前两个因素的共同作用是影响不同农户之间客厅与庭院内的汞质量浓度的差异的重要原因.

2.1.3 不同粒径颗粒态汞的质量浓度特征

在河北省高邑县地区,能源结构中煤炭比例占 80% 以上,蜂窝煤作为农户炊事及取暖的主要燃料时会产生大量的汞污染,炊事期间蜂窝煤燃烧产生的 PM_{10} 中汞的质量浓度高达 $5.524 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$. 研究表明,细粒子富集汞的能力远远高于粗粒子^[12],可吸入颗粒物中的汞主要以细粒子为主^[36],细粒子中的汞占可吸入颗粒物中汞的百分比在 60% 以上,平均为 76.3%^[12~14]. 将 3 台采样器放置在农户庭院内同一地点,采集同一段时间内的颗粒态汞. 共采集到 9 组颗粒态汞膜样,分析其中的汞质量浓度,结果见表 3.

表 3 汞在不同粒径颗粒物中的分布¹⁾

Table 3 Distribution of mercury concentration

in particles of different diameters				
$PM_{10}(\text{HY-100})$ / $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$	$PM_{2.5}/\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$			$PM_{2.5}/PM_{10}$ /%
	ChemComb1	ChemComb2	Mean	
0.599	0.274	0.260	0.267	44.6
1.47	0.621	0.615	0.618	41.9
0.334	0.196	0.194	0.195	58.5
2.46	0.822	0.872	0.847	34.5
0.852	0.332	0.382	0.357	41.9
0.358	0.198	—	0.198	55.3
0.432	—	0.280	0.280	64.8
8.78	—	6.86	6.86	78.2
5.46	2.82	—	2.82	51.7

1) “—”表示由于仪器故障未进行数据采集

由表 3 可以看出,细粒子 $PM_{2.5}$ 中的汞占可吸入颗粒物 PM_{10} 中汞的百分比为 34.5% ~ 78.2%,平均为 $(52.4 \pm 13.5)\%$,略低于文献^[12~14]中的相关报道.

2.2 农居环境中颗粒态汞健康风险评价

按照美国国家科学院提出的健康风险评价“四步法”,即危害鉴别、暴露评价、剂量-效应关系评价和危险度特征分析,采用美国环境保护署推荐的健康风险评价模型,对农居环境中颗粒态汞进行健康风险评价.

2.2.1 危害鉴定

Yokoo 等^[37]发现人体汞含量与反应速度的视

保留时间呈明显正相关;与反映手工敏捷度的串珠实验结果等呈负相关. 而长期低浓度接触各种形态的汞会引发自身免疫性疾病^[38]. 刘伟等^[39]认为,汞质量浓度的增加会降低胚胎的着床能力. 路小婷等^[40]的研究发现,汞污染区的女性居民的生殖生育功能受到损害.

2.2.2 暴露评价

汞属于非致癌物和有阈化合物(即非致癌物和非遗传毒性的致癌物),通常用日均暴露剂量 ADD (average daily dose)来表示,计算公式为:

$$ADD = (c \times IR \times ED) / (BW \times AT) \quad (1)$$

式中, c 为污染物的质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; IR 为呼吸速率, $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$; ED 为暴露持续时间, d ; BW 为体重, kg ; AT 为平均暴露时间, d .

段小丽等^[41]根据暴露人群特征的差异,将研究对象分为成年男性、成年女性和儿童三类,暴露参数的选取采用 EPA 建议的参数如表 4.

表 4 经呼吸途径进入人体的暴露参数

Table 4 Exposure parameters by inhalation

人群	IR / $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	BW / kg	ED / d	AT (非致癌) / d
成年男性	15.2	70	30×365	30×365
成年女性	11.3	60	30×365	30×365
儿童	8.7	36	18×365	18×365

本研究地区农户对颗粒态汞的暴露,可分成以下几方面:一是日常室内环境,如卧室、客厅;二是典型时段(做饭)的汞暴露;三是户外,如庭院;四是工厂、田地等其他空间. 根据前期研究^[42],可知非采暖期农户室外、客厅和厨房 PM_{10} 中的颗粒态汞的日均质量浓度分别为 0.516、0.413 和 1.127 $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$,且已知 $PM_{2.5}$ 中的汞质量浓度占 PM_{10} 中汞总质量浓度的百分比为 52.4%. 由此可知非采暖期和采暖期 $PM_{2.5}$ 中汞质量浓度,见表 5.

表 5 不同时期不同空间农户的 $PM_{2.5}$ 中汞质量浓度/ $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$

Table 5 Mercury concentration in $PM_{2.5}$ in rural households

at different times and spaces/ $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$			
时期	厨房	客厅	庭院
采暖期	0.795	0.398	0.321
非采暖期	0.590	0.215	0.270

通过入户调研和访谈共发放调查问卷 45 份,获得有效问卷 38 份. 由于不少老式住房还存在某个房间兼具厨房、卧室和客厅功能的情况,而本研究旨在评估燃烧污染对居民健康的影响,因此将有炊事燃烧产生的房间都纳入“厨房”的范畴. 此外该研

究地区大部分民居不具备独立的客厅和卧室,通常情况客厅与卧室是同一房间,研究中将在客厅和卧室的时间都统一为客厅里的时间. 最终获得农户在不同时期里不同空间的停留时间分布,如表 6.

表 6 不同时期农户在不同空间的活动时间/h						
Table 6 Time spent at different spaces in different seasons/h						
性别	样本数	不同季节	厨房	客厅	庭院	其他
男	20	采暖期	1. 98	10. 09	2. 37	9. 56
		非采暖期	1. 36	9. 59	2. 44	10. 61
女	18	采暖期	4. 83	10. 56	0. 97	7. 64
		非采暖期	3. 45	9. 34	1. 69	9. 52

表 7 不同时间农户的 PM _{2.5} 的暴露质量浓度和 ADD						
Table 7 Exposure concentration of PM _{2.5} and ADD in rural houses at different times						
指标	采暖期			非采暖期		
	成年男性	成年女性	儿童	成年男性	成年女性	儿童
质量浓度/ng·m ⁻³	0. 463	0. 525	0. 525	0. 305	0. 525	0. 509
ADD/mg·(kg·d) ⁻¹	0. 101 × 10 ⁻⁶	0. 099 × 10 ⁻⁶	0. 127 × 10 ⁻⁶	0. 066 × 10 ⁻⁶	0. 062 × 10 ⁻⁶	0. 080 × 10 ⁻⁶

2. 2. 3 剂量-反应关系评价

有阈化合物的剂量-反应关系通常用该污染物的参考剂量(reference dose, RfD) 来表示,其计算公式如下:

$$RfD = NOAEL / (UF_s \times MF) \tag{3}$$

式中, NOAEL 为无可见有害作用的水平, mg·(kg·d)⁻¹; UF_s 为不确定系数; MF 为修饰系数.

对于关注度较高的有毒有害物质,其 RfD 可以从综合危险度数据库(integrated risk information system, IRIS) 直接获得. 在 IRIS 数据库中,汞的 RfD 为 0. 1 × 10⁻³ mg·(kg·d)⁻¹.

2. 2. 4 危险度特征分析

危险度特征通常用人群年均超额危险度来表示. 而有阈化合物的人群年均超额危险度计算公式为:

$$R = ADD \times 10^{-6} \div RfD \div 70 \tag{4}$$

将所得 ADD 和 RfD 值代入式(4),知受颗粒态汞暴露最大的儿童的年均超额危险度 < 10⁻⁸,故农户生活行为产生的颗粒态汞对其身体健康造成的危害较小,其健康风险在可以忽略的水平.

3 结论

本研究采集了河北省农居环境中具有代表性的颗粒物膜样品 88 个,其中包括室外样品 36 个,室内样品 52 个(厨房 38 个). 实验室测定样品中的汞质量浓度,分析发现颗粒物中汞质量浓度主要受燃煤

由于儿童一般是由母亲照看,所以认为儿童与成年女性的生活规律基本相同,结合表 6 数据则可将式(1)转化为:

$$ADD = \frac{(P_k \times T_k + P_b \times T_b + P_y \times T_y)}{T_k + T_b + T_y} \times \frac{ED \times IR}{BW \times AT} \tag{2}$$

式中, P_k、P_b、P_y 分别代表厨房、客厅、庭院 PM_{2.5} 中汞质量浓度,而 T_k、T_b、T_y 分别代表不同人群在厨房、客厅、庭院的停留时间. 汞属于非致癌物,在数值上 ED = AT,据式(2)得以下结果,如表 7 所示.

影响,通风条件和气候对其影响也较大. 不同空间和季节汞质量浓度均不同,而颗粒物中的汞主要集中在 PM_{2.5} 中. 健康风险评估表明,农居环境颗粒态汞对农户的健康风险处于可以忽略的水平.

参考文献:

[1] Schuurs A H B. Reproductive toxicity of occupational mercury. A review of the literature [J]. Journal of Dentistry, 1999, **27** (4): 249-256.

[2] Bullock Jr O R. Current methods and research strategies for modeling atmospheric mercury [J]. Fuel Processing Technology, 2000, **65-66**: 459-471.

[3] Krishnan S V, Gullett B K, Jozewicz W. Mercury control in municipal waste combustors and coal-fired utilities [J]. Environmental Progress, 1997, **16**(1): 47-53.

[4] Zheng C G, Liu J, Liu Z H, et al. Kinetic mechanism studies on reactions of mercury and oxidizing species in coal combustion [J]. Fuel, 2005, **84**(10): 1215-1220.

[5] Wilcox J. A kinetic investigation of high-temperature mercury oxidation by chlorine [J]. The Journal of Physical Chemistry A, 2009, **113**(24): 6633-6639.

[6] Liu J, Qu W Q, Yuan J Z, et al. Theoretical studies of properties and reactions involving mercury species present in combustion flue gases [J]. Energy Fuels, 2010, **24**(1): 117-122.

[7] Liu J, He M F, Zheng C G, et al. Density functional theory study of mercury adsorption on V₂O₅ (001) surface with implications for oxidation [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, **33**(2): 2771-2777.

[8] Molnár A, Mészáros E, Polyák K. Atmospheric budget of different elements in aerosol particles over Hungary [J]. Atmospheric Environment, 1995, **29**(15): 1821-1828.

[9] Lindqvist O, Johansson K, Aastrup M, et al. Mercury in the

- Swedish environment-recent research on causes, consequences and corrective methods[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1991, **55**(1-2): 73-98.
- [10] Chiaradia M, Cupelin F. Gas-to-particle conversion of mercury, arsenic and selenium through reactions with traffic-related compounds? indications from lead isotopes[J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(2): 327-332.
- [11] Ebinghaus R, Slemr F. Aircraft measurements of atmospheric mercury over southern and eastern Germany[J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(6): 895-903.
- [12] Keeler G, Glinsorn G, Pirrone N. Particulate mercury in the atmosphere: its significance, transport, transportation and sources[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1995, **80**(1-4): 159-168.
- [13] Feng X B, Sommar J, Lindqvist O, *et al.* Occurrence, emission and deposition of mercury during coal combustion in the Province Guizhou, China[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2002, **139**(1-4): 311-324.
- [14] Xiu G L, Jin Q X, Zhang D N, *et al.* Characterization of size-fractionated particulate mercury in Shanghai ambient air[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(3): 419-427.
- [15] Hsu S C, Liu S C, Jeng W L, *et al.* Variations of Cd/Pb and Zn/Pb ratios in Taipei aerosols reflecting long-range transport or local pollution emissions[J]. *Science of the Total Environment*, 2005, **347**(1-3): 111-121.
- [16] 张福旺, 赵金平, 陈进生, 等. 滨海城市气溶胶中颗粒态汞的分布特征[J]. *环境科学*, 2010, **31**(10): 2273-2278.
- [17] Chow J C, Watson J G. Zones of representation for PM₁₀ measurements along the US/Mexico border[J]. *Science of the Total Environment*, 2001, **276**(1-3): 49-68.
- [18] Munthe J, Wängberg I, Pirrone N, *et al.* Intercomparison of methods for sampling and analysis of atmospheric mercury species[J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(17): 3007-3017.
- [19] 方凤满, 王起超, 李东侠, 等. 长春市大气颗粒汞及其干沉降通量[J]. *环境科学*, 2001, **22**(2): 60-63.
- [20] Sakata M, Marumoto K. Formation of atmospheric particulate mercury in the Tokyo metropolitan area[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(2): 239-246.
- [21] Gabriel M C, Williamson D G, Brooks S, *et al.* Atmospheric speciation of mercury in two contrasting Southeastern US airsheds[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(27): 4947-4958.
- [22] Manolopoulos H, Snyder D C, Schauer J J, *et al.* Sources of speciated atmospheric mercury at a residential neighborhood impacted by industrial sources[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(16): 5626-5633.
- [23] Poissant L, Pilote M, Beauvais C, *et al.* A year of continuous measurements of three atmospheric mercury species (GEM, RGM and Hg_p) in southern Québec, Canada[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(7): 1275-1287.
- [24] Hall B D, Olson M L, Rutter A P, *et al.* Atmospheric mercury speciation in Yellowstone National Park[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **367**(1): 354-366.
- [25] 郑伟, 冯新斌, 闫海鱼. 贵阳市一居民区大气颗粒态汞的污染状况[J]. *地球与环境*, 2007, **35**(2): 154-158.
- [26] Lyman S N, Gustin M S. Speciation of atmospheric mercury at two sites in northern Nevada, USA[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(5): 927-939.
- [27] Álvarez F F, Rodríguez M T, Espinosa A J F, *et al.* Physical speciation of arsenic, mercury, lead, cadmium and nickel in inhalable atmospheric particles[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2004, **524**(1-2): 33-40.
- [28] 陈作帅, 王章玮, 张晓山. 北京市典型地区大气可吸入颗粒物中汞的浓度水平和粒径分布[J]. *环境化学*, 2007, **26**(5): 680-683.
- [29] 王章玮, 张晓山, 张逸, 等. 北京市大气颗粒物 PM_{2.5}, PM₁₀ 及降雪中的汞[J]. *环境化学*, 2004, **23**(6): 668-673.
- [30] 修光利, 张爱东, 金庆西, 等. 大气中不同粒径颗粒态汞污染的时空分布特征[J]. *华东理工大学学报 (自然科学版)*, 2005, **31**(4): 466-470.
- [31] Tsai Y I, Kuo S C, Lin Y H. Temporal characteristics of inhalable mercury and arsenic aerosols in the urban atmosphere in southern Taiwan[J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(24): 3401-3411.
- [32] 杜金花, 黄晓锋, 何凌燕, 等. 深圳市大气细粒子 (PM_{2.5}) 中汞的污染特征[J]. *环境科学研究*, 2010, **23**(6): 667-673.
- [33] Zhang J, Smith K R. Hydrocarbon emissions and health risks from cookstoves in developing countries[J]. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 1996, **6**(2): 147-161.
- [34] Sinton J E, Smith K R, Peabody J W, *et al.* An assessment of programs to promote improved household stoves in China[J]. *Energy for Sustainable Development*, 2004, **8**(3): 33-52.
- [35] 魏晓明, 魏泉源, 魏秀英, 等. 不同炉灶和燃料类型对改善农户室内空气质量的影响[J]. *农业工程学报*, 2006, **22**(增刊): 236-239.
- [36] 王文华, 刘俊华, 杨淑兰, 等. 汞在北京大气中细颗粒物上的分布[J]. *上海交通大学学报*, 2002, **36**(1): 134-137.
- [37] Yokoo E M, Valente J G, Grattan L, *et al.* Low level methylmercury exposure affects neuropsychological function in adults[J]. *Environment Health: A Global Access Science Source*, 2003, **2**(1): 8.
- [38] Worth R G, Esper R M, Warra N S, *et al.* Mercury inhibition of neutrophil activity: evidence of aberrant cellular signalling and incoherent cellular metabolism[J]. *Scandinavian Journal of Immunology*, 2001, **53**(1): 49-55.
- [39] 刘伟, 申艳青, 肖文. 汞对作业工人生殖功能影响的调查[J]. *卫生毒理学杂志*, 2001, **15**(2): 97-98.
- [40] 路小婷, 李秋营, 郭慧芬, 等. 山西省某地环境汞污染对女性生殖健康影响[J]. *中国公共卫生*, 2010, **26**(5): 600-601.
- [41] 段小丽, 聂静, 王宗爽, 等. 健康风险评价中人体暴露参数的国内外研究概况[J]. *环境与健康杂志*, 2009, **26**(4): 370-373.
- [42] 赵亚娟. 不同燃料类型下农居室内空气污染特征分析[D]. 北京: 北京大学, 2011.

CONTENTS

CH ₄ Concentrations and the Variation Characteristics at the Four WMO/GAW Background Stations in China	FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, XU Lin, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation over Northeast China and Its Water Vapor Sources	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (2924)
Study on Air Quality and Pollution Meteorology Conditions of Guangzhou During the 2010 Asian Games	LI Ting-yuan, DENG Xue-jiao, FAN Shao-jia, <i>et al.</i> (2932)
Characteristics and Sources of PM ₁₀ -bound PAHs During Haze Period in Winter-Spring of Xiamen	QIAN Ran-ran, YAN Jing-ming, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (2939)
Improvement and Application of the Method for Determination of OCEC Split	WANG Li-hua, DONG Hua-bin, YAN Cai-qing, <i>et al.</i> (2946)
Characteristics of Mercury Pollution in Soil and Atmosphere in Songhua River Upstream Jia-pi-gou Gold Mining Area	ZHANG Gang, WANG Ning, WANG Yuan, <i>et al.</i> (2953)
Pollution Characteristics and Health Assessment of Particulate Mercury in Hebei Rural Households	ZHAO Ya-juan, GONG Wei-wei, LUAN Sheng-ji (2960)
Composition and Characteristics of Volatile Organic Chemicals Emission from Printed Circuit Board Factories	MA Ying-ge (2967)
Preliminary Study Concerning Emissions of the Volatile Organic Compounds from Cooking Oils	HE Wan-qing, TIAN Gang, NIE Lei, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics of Biofilm Phase During the Long-term Degradation of a Toluene-contaminated Gas Stream Using BTF	HU Jun, ZHENG Jiang-ling, WU Yue-xin, <i>et al.</i> (2979)
Performance of Cross Flow Trickling Filter for H ₂ S Gas Treatment	LIU Chun-jing, LI Jian, LIU Jia, <i>et al.</i> (2987)
Study on Mercury Re-emissions During Fly Ash Utilization	MENG Yang, WANG Shu-xiao (2993)
Construction of Semi-analytical Model for Inversing Total Suspended Matter in Lake Taihu and Assessment of Its Applicability	LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, TAN Jing, <i>et al.</i> (3000)
Association Study Between Water Quality of Chaohu Lake and Resources Input in Agriculture of Basin	ZHANG Yan, GAO Xiang, ZHANG Hong (3009)
Sediment and Pore Water Nutrient Characteristics in Growing Zones of <i>Alternanthera philoxeroides</i> in the Shiwuli River, Chaohu Lake	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia (3014)
Enrichment Characteristic of Phosphorus in Surface and Core Sediments of Chaohu Lake and the Pollution Quantification	LIU En-feng, DU Chen-chang, YANG Xiang-dong, <i>et al.</i> (3024)
Spatial Distribution Characteristics and Correlation Analysis of Organic Matter, Total Nitrogen and Total Phosphorus in Topsoil Around Chaohu Lake	CHEN Shu-qin, CHU Zhao-sheng, HU She-rong, <i>et al.</i> (3031)
Dynamic Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in the Representative Input Tributaries of Danjiangkou Reservoir	LEI Pei, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing (3038)
Effects of Thermal Stratification on Spring Blooms in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	LIU Liu, LIU De-fu, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (3046)
Explore the Spatial and Temporal Patterns of Water Pollution in the Yincungang Canal of the Lake Taihu Basin, China	YANG Xiao-ying, LUO Xing-zhang, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (3051)
Analysis on the Forms and Release Potential of Nutrients in Sediments from Lakes in the West Jiangsu Province	LIU Tao, HU Zhi-xin, YANG Liu-yan, <i>et al.</i> (3057)
Spatial Distribution and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Surface Sediments from Western Lakeside Belt of Lake Taihu	GAN Shu, LU Shao-yong, QIN Pu-feng, <i>et al.</i> (3064)
Source Apportionment of Nitrogen and Phosphorus from Cropping Non-point Source Pollution in Nansi Lake Basin	LIU Jing, LU Feng, YANG Yan-zhao, <i>et al.</i> (3070)
Relationship Between Dissolved Organic Carbon and DBP in the Pearl River Water	HE Hong-wei, ZHOU Da-cheng, WANG Bao-qiang, <i>et al.</i> (3076)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Township Water Sources in Dongjiang River Basin	WANG Ruo-shi, XU Qiu-jin, ZHANG Xian, <i>et al.</i> (3083)
Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments of Maozhou River, Shenzhen	SUN Jian-lin, NI Hong-gang, DING Chao, <i>et al.</i> (3089)
Distribution Patterns of Heavy Metals in Surficial Sediment and Their Influence on the Environment Quality of the Intertidal Flat of Luoyuan Bay, Fujian Coast	GAO Wen-hua, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (3097)
Study on the Changes of Macrobenthos Communities and Their Causes in Bohai Bay	CAI Wen-qian, LIU Lu-san, QIAO Fei, <i>et al.</i> (3104)
Construction of Groundwater Contamination Prevention Mapping System	WANG Jun-jie, HE Jiang-tao, LU Yan, <i>et al.</i> (3110)
Uncertainty Analysis of Groundwater Protection and Control Zoning in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (3117)
Nitrate Storage and Transport Within a Typical Karst Aquifer System in the Paralleled Ridge-valley of East Sichuan	YANG Ping-heng, YUAN Dao-xian, REN You-rong, <i>et al.</i> (3124)
Adsorption of Perfluorooctanesulfonate (PFOS) onto Modified Activated Carbons	TONG Xi-zhen, SHI Bao-you, XIE Yue, <i>et al.</i> (3132)
Investigation of the Oxidation Reaction of O ₃ with Bromide Ion in Aqueous Solution	YU Xiao-ting, ZHANG Jia-hui, PAN Xun-xi, <i>et al.</i> (3139)
Determination of the Distribution of Relative Molecular Mass of Organic Matter by High Pressure Size Exclusion Chromatography with UV and TOC Detectors	ZHANG Han, DONG Bing-zhi (3144)
Black Water Bloom Induced by Different Types of Organic Matters and Forming Mechanisms of Major Odorous Compounds	LU Xin, FENG Zi-yan, SHANG Jing-ge, <i>et al.</i> (3152)
Effect of Fe and Fe/Ni Nanoparticles on the Biodegradation of Phenol by BFN at Different pH Values	KUANG Ye, ZHOU Yan, WANG Qing-ping, <i>et al.</i> (3160)
Pretreatment of High-Concentration Acrylic Acid Wastewater by the Multi-Stage Microaerobic Biological Fluidized Bed Reactor	LI Sha, ZHENG Sheng-zhi, SONG Yu-dong, <i>et al.</i> (3167)
Denitrification on Secondary Effluent of Acrylic Fiber Wastewater by Tri-Stage Biofilm Advanced Reactor	XU Shao-yang, JIANG Jin-yuan, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3172)
Dynamic Adsorption of Cadmium (II) in Water on Modified Peanut Shells	LONG Teng, YI Xiao-yun, DANG Zhi (3177)
Adsorption Properties of Thiocyanate Anion on Granular Mg/Al Mixed Oxides	WANG Xiu-juan, WANG Hai-zeng, SUN Bao-wei, <i>et al.</i> (3182)
Model of Regularity of Ammonia Transformation Along Marine Biological Aerated Filter	LUO Rong-qiang, HOU Sha-sha, SHEN Jia-zheng, <i>et al.</i> (3189)
Aerobic Granular Sludge Bulking Due to the Lack of Nutrient and Its Recovery	ZHANG Zhu, GAO Da-wen, YUAN Xiang-juan, <i>et al.</i> (3197)
Enhanced Hydrolysis of Waste Activated Sludge by Biosurfactant	YI Xin, LUO Kun, YANG Qi, <i>et al.</i> (3202)
Enrichment and Identification of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria	LIU Dong-ying, QIU Yan-ling, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (3208)
Isolation, Identification and Characterization of an Atrazine Degrading Bacterium	LI Shao-feng, ZHU Jing, LI Tie-jing (3214)
Isolation, Identification and Enzymological Characterization of a New Fungal with High Laccase Production from Agricultural Waste Composting	REN Xiu-juan, FAN Chang-zheng, LU Lun-hui, <i>et al.</i> (3220)
Screening and Identification of Microorganisms for Decolorization of Molasses Spent Wash	LI Bi-jin, LIU You-yan, HE Kai, <i>et al.</i> (3228)
Analysis of Microbial Community Structure in Lactic Acid Fermentation from Kitchen Waste	LIU Jian-guo, WANG Qun-hui, WANG Shuang, <i>et al.</i> (3236)
Effect of Covalent Functionalization on DNA Cleavage Activity and ROS Formation of Single-Walled Carbon Nanotubes	WU Ren-ren, TAO Xue-Qin, DANG Zhi, <i>et al.</i> (3241)
Research on Mercury Methylation by <i>Geobacter sulfurreducens</i> and Its Influencing Factors	ZOU Yan, SI You-bin, YAN Xue, <i>et al.</i> (3247)
Uptake Effect of Cd and Pb by Rape Under Single Cd/Pb and Cd-Pb Combined Stress	WU Wen-fei, NAN Zhong-ren, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (3253)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Farming Domestic Muscovy Duck Originated from Au/Cu Mining and Smelting Activities	HANG Xiao-shuai, LIANG Bin, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (3261)
Effects of the Environmental Hormone Cypermethrin on the Reproduction of <i>Brachionus calyciflorus</i>	DONG Xue-xing, YANG Jia-xin, LÜ Lin-lan, <i>et al.</i> (3266)
Research on Anti-Corrosion of <i>Thiobacillus</i> for the Geopolymer Solidification MSWI Fly Ash	JIN Man-tong, SUN Xin, DONG Hai-li, <i>et al.</i> (3272)
Chlorination Transformation and Volatilization of Heavy Metals in Fly Ash from the Incineration During the Disposal Process with Higher Temperature	LIU Jing-yong, SUN Shui-yu (3279)
Study on Greenhouse Gas Emissions from Urban Waste Disposal System; A Case Study in Xiamen	YU Yang, CUI Sheng-hui, LIN Jian-yi, <i>et al.</i> (3288)
Fate Analysis of NPEOs and Their Metabolites in Municipal Wastewater Plants	LIAN Jing, LIU Jun-xin (3295)

《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9月15日 33卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol.33 No.9 Sep. 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

国内外公开发售