

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第9期

Vol.39 No.9

**2018**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                        |                                                       |
|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 长三角区域非道路移动机械排放清单及预测 .....                              | 黄成, 安静宇, 鲁君 (3965)                                    |
| 基于 COPERT 模型的江苏省机动车时空排放特征与分担率 .....                    | 李荔, 张洁, 赵秋月, 李慧鹏, 韩军赞 (3976)                          |
| 上海典型燃烧源铅和汞大气排放趋势分析 .....                               | 杨静, 陈龙, 刘敏, 孟祥周, 张希 (3987)                            |
| 广东省秸秆燃烧大气污染物及 VOCs 物种排放清单 .....                        | 孙西勃, 廖程浩, 曾武涛, 张永波, 梁小明, 叶代启 (3995)                   |
| 重庆市北碚城区气溶胶中水溶性无机离子的质量浓度及其粒径分布 .....                    | 李彦沛, 郝庆菊, 温天雪, 吉东生, 刘子锐, 王跃思, 江长胜 (4002)              |
| 济南市夏、冬季 PM <sub>2.5</sub> 中化学组分的季节变化特征及来源解析 .....      | 刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 李静, 邢继钊, 魏本杰, 张二勋, 刘加珍, 董杰 (4014)      |
| 聊城冬季一重污染过程 PM <sub>2.5</sub> 污染特征及成因分析 .....           | 张敬巧, 吴亚君, 张萌, 王涵, 陈振兴, 胡君, 李慧, 范晓龙, 柴发合, 王淑兰 (4026)   |
| 夏季青岛大气气溶胶中不同形态磷的浓度、来源及沉降通量 .....                       | 王楠, 马森, 石金辉, 高会旺, 姚小红 (4034)                          |
| 晋城市冬季环境空气中挥发性有机物的污染特征及来源解析 .....                       | 杨帆, 闫雨龙, 戈云飞, 李如梅, 李颖慧, 余化龙, 彭林 (4042)                |
| 北京冬季降尘重金属富集程度及综合污染评价 .....                             | 熊秋林, 赵文吉, 李大军, 周涛 (4051)                              |
| 合肥市典型交通干道大气苯系物的特征分析 .....                              | 孟凡昊, 秦敏, 梁帅西, 谢品华, 夏晖晖, 段俊, 方武, 唐科, 李昂, 魏桢, 王凤 (4060) |
| 填埋场作业面 NMOCs 臭氧生成潜势及高贡献物质 .....                        | 李昊, 刘彦君, 陈坦, 闫秋鹤, 代辉祥, 王洪涛, 陆文静 (4070)                |
| 北京市混凝土搅拌站风蚀扬尘排放特征 .....                                | 李贝贝, 韩凯丽, 秦建平, 王鑫, 宋博, 黄玉虎, 张春来 (4078)                |
| 基于源解析的傍河水源地污染风险季节性变化特征分析 .....                         | 高翔, 左锐, 郭学茹, 孟利, 刘鑫, 王膜, 滕彦国, 王金生 (4086)              |
| 透水路面-生物滞留池组合道路的城市面源污染控制效果评估 .....                      | 官曼莉, 左俊杰, 任心欣, 赵洪涛, 罗茜, 廖云杰, 李叙勇 (4096)               |
| 黄河兰州段水体中有色溶解性有机质组成、空间分布特征及来源分析 .....                   | 赵夏婷, 李珊, 王兆炜, 谢晓芸 (4105)                              |
| 黄河干流宁蒙段溶解性有机物组分特征及其与金属离子的相关性 .....                     | 席玥, 王婷, 倪晋仁, 韩鹏, 仪马兰, 郑彤, 蒋咏, 马若绮, 崔锋 (4114)          |
| 伊洛河和浑太河春季水体光学吸收特征的对比 .....                             | 李柳阳, 邵田田, 张鑫, 宋炎炎, 苏东辉, 王涛 (4122)                     |
| 马莲河流域化学风化的季节变化和影响因素 .....                              | 王雨山, 韩双宝, 邓启军, 祁晓凡 (4132)                             |
| 柳江盆地浅层地下水硝化型水特征和成因分析 .....                             | 徐进, 何江涛, 彭毅, 曾颖 (4142)                                |
| 地下水氮污染原位修复缓释碳源材料的研发与物化-生境协同特性 .....                    | 张雯, 尹琳, 周念清 (4150)                                    |
| 三峡水库干流沉积物及消落带土壤磷形态及其分布特征 .....                         | 张志永, 万成炎, 胡红青, 彭建华, 侯娟, 丁庆秋, 袁玉洁 (4161)               |
| 蓄水前后三峡库区香溪河沉积物磷形态分布特征及释放通量估算 .....                     | 刘心愿, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 李欣, 黄佳维, 赵冲, 唐咏春, 平明明 (4169)      |
| 锆改性沸石添加对重污染河道底泥磷释放和钝化的影响 .....                         | 何思琪, 张薇, 林建伟, 詹艳慧, 李娟英, 邢云青, 高春梅, 黄宏, 梁舒静 (4179)      |
| 洱海流域乡镇尺度上人类活动对净氮输入量的影响 .....                           | 李影, 刘宏斌, 雷秋良, 胡万里, 王洪媛, 翟丽梅, 任天志, 连慧妹 (4189)          |
| 我国典型潮间带沉积物-水界面无机氮源汇效应 .....                            | 聂家琴, 王东启, 陈杰, 李杨杰, 陈姝, 陈振楼 (4199)                     |
| 东太湖水产养殖对沉积物中氨氧化原核生物的影响 .....                           | 储瑜, 何肖微, 曾巾, 赵大勇, 孙强, 曹萍, 吴庆龙 (4206)                  |
| 处理采矿废水湿地沉积物中厌氧氨氧化过程 .....                              | 汪海波, 马丁, 岳正波, 陶巍, 陈天虎, 王进 (4215)                      |
| 华东地区某饮用水源地中磺胺类抗性基因的分布特征 .....                          | 胡亚茹, 姜蕾, 张天阳, 雷丹丹, 姜巍巍, 张东, 林匡飞, 崔长征 (4222)           |
| 制革废水处理过程中磺胺类抗生素和抗性细菌的分布特征 .....                        | 花莉, 李璐, 杨春燕 (4229)                                    |
| 人工湿地不同基质和粒径对污水净化效果的比较 .....                            | 赵林丽, 邵学新, 吴明, 姜小三, 陆琳莹 (4236)                         |
| 城市污水管网中不同生化作用的基质流向 .....                               | 姚翔译, 石烜, 桑浪涛, 金鹏康, 王晓昌 (4242)                         |
| 微絮凝对腐殖酸超滤过程膜污染减缓特性 .....                               | 王旭东, 石彩霞, 廖正伟, 贺毓淑, 王磊 (4249)                         |
| UV 强化草酸络合 Fe <sup>3+</sup> 活化过硫酸盐氧化降解苯胺 .....          | 韩东晖, 李瑛, 李开明, 应光国 (4257)                              |
| 焦化废水 A/O <sup>2</sup> 和 A/O/H/O 处理工艺中多环芳烃的削减行为分析 ..... | 吴海珍, 孙胜利, 刘国新, 韦景悦, 吴超飞, 韦朝海, 钟练文, 彭亚环 (4265)         |
| 长期侧流提取对 EBPR 系统除磷及其磷回收性能的影响 .....                      | 俞小军, 李杰, 周猛, 宋璐, 李维维, 王亚娥, 马娟, 吕慧 (4274)              |
| NaCl 盐度对 A <sup>2</sup> /O 工艺缺氧区胞外聚合物及生物絮凝性的影响 .....   | 张兰河, 田蕊, 郭静波, 贾艳萍, 张海丰, 李正, 陈子成 (4281)                |
| 温度和 pH 值对铁盐型氨氧化过程氮素转化的影响 .....                         | 陈方敏, 金润, 袁琨, 李祥, 黄勇, 顾澄伟 (4289)                       |
| 游离氨 (FA) 对氨氧化菌 (AOB) 活性抑制动力学试验 .....                   | 孙洪伟, 于雪, 高宇学, 李维维, 祁国平, 许涓 (4294)                     |
| HRT 对厌氧氨氧化协同异养反硝化脱氮的影响 .....                           | 安芳娇, 赵智超, 黄利, 黄剑明, 邵兆伟, 陈永志 (4302)                    |
| 长期储存亚硝化絮状污泥活性的恢复 .....                                 | 李田, 魏凡凯, 汪裕昌, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (4310)                     |
| 广西西江流域农田土壤重金属含量特征及来源解析 .....                           | 宋波, 张云霞, 庞瑞, 杨子杰, 宾娟, 周子阳, 陈同斌 (4317)                 |
| 紫色土壤有机碳活性组分对生物炭施用量的响应 .....                            | 罗梅, 田冬, 高明, 黄容 (4327)                                 |
| 秸秆及生物炭还田对油菜/玉米轮作系统碳平衡和生态效益的影响 .....                    | 李娇, 田冬, 黄容, 徐国鑫, 黎嘉成, 高明, 王子芳 (4338)                  |
| 低积累水稻品种联合腐殖酸、海泡石保障重镉污染稻田安全生产的潜力 .....                  | 谢晓梅, 方至萍, 廖敏, 黄宇, 黄小辉 (4348)                          |
| 臭氧和干旱交互作用对杨树叶片抗氧化酶活性的影响 .....                          | 周慧敏, 李品, 高峰, 冯兆忠, 张殷波 (4359)                          |
| 再生水不同灌水水平对土壤酶活性及耐热大肠菌群分布的影响 .....                      | 韩洋, 李平, 齐学斌, 崔丙健, 常迪, 马欢欢 (4366)                      |
| 黄淮海地区鸡粪有机肥重金属含量特征及环境风险 .....                           | 李发, 徐应明, 王林, 梁学峰, 孙约兵, 纪艺凝, 栾润宇 (4375)                |
| 村镇生活垃圾重金属含量及其来源分析 .....                                | 靳琪, 高红, 岳波, 黄启飞, 王瑜堂, 吴小丹, 於俊颖, 杨惠媛 (4385)            |
| 《环境科学》征订启事 (3986) .....                                | 《环境科学》征稿简则 (4050) 信息 (4085, 4104, 4337)               |

# 上海典型燃烧源铅和汞大气排放趋势分析

杨静<sup>1</sup>, 陈龙<sup>1</sup>, 刘敏<sup>1</sup>, 孟祥周<sup>2</sup>, 张希<sup>1</sup>

(1. 华东师范大学地理科学学院, 上海 200241; 2. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 上海百年来快速的城市化进程导致资源能源的大量消耗, 并向城市环境中排放了大量有毒有害污染物. 为探寻上海典型燃烧源重金属大气排放历史及趋势, 基于上海化石燃料(煤炭和汽油)的历史消耗量及其大气铅(Pb)和汞(Hg)的排放因子, 估算了上海主要燃煤部门(燃煤电厂、工业部门和居民生活)和机动车燃油大气 Pb 和 Hg 的历史排放量. 结果表明, 1949~2015 年间大气 Pb 和 Hg 的燃煤排放量随时间推进均呈现先增长后下降趋势, 即 1949 年解放后快速增长的煤炭消耗和较少的烟尘控制措施使其排放量出现急剧地波动式增长, 至 20 世纪 80~90 年达到高峰, 此后上海采取了各种减排和控制措施, 使得目前三大燃煤源的大气 Pb 和 Hg 排放量出现大幅度下降. 1980~2015 年间上海大气 Hg 的燃煤排放比例一直占据主导地位(87.5%~99.7%). 含铅汽油自 1997 年完全退出上海市场之后, 燃煤排放替代其成为大气 Pb 的主要贡献源(78.2%~83.5%), 然而自 2005 年起随着汽油消耗的急速增长, 汽油燃烧排放又成为其主要贡献源(55.5%~79.1%).

**关键词:** 化石燃料; 铅(Pb); 汞(Hg); 大气排放量; 历史趋势

中图分类号: X51; X820.6 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)09-3987-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201802133

## Historical Trends of Atmospheric Pb and Hg Emissions from Fossil Fuel Combustion in Shanghai

YANG Jing<sup>1</sup>, CHEN Long<sup>1</sup>, LIU Min<sup>1</sup>, MENG Xiang-zhou<sup>2</sup>, ZHANG Xi<sup>1</sup>

(1. School of Geographic Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Rapid urbanization in Shanghai over the past century has led to increased resource and energy consumption, in turn leading to the release of significant amounts of toxic pollutants into the urban environment. In order to investigate historical variations in atmospheric metal emissions from typical combustion sources in Shanghai, historical emissions of Pb and Hg from coal-fired sectors (coal-fired power plant, industrial sector, and domestic use) and vehicle exhaust in Shanghai during the period 1949-2015 were estimated, based on consumption of fossil fuels (coal and gasoline) and emission factors. Results showed that Pb and Hg emissions exhibited rapidly fluctuating increases from 1949 to the 1980s or 1990s, before beginning to decrease sharply due to various pollution control measures. Hg emissions from coal-fired sources played a dominant role during the 1980-2015 period, contributing a high proportion (87.5%-99.7%) to the total. The dominant sources of atmospheric Pb emissions have experienced historical variations. Coal-fired emissions became the major contributor (78.2%-83.5% of total) following omission of leaded gasoline from the Shanghai market since 1997. However, the rapid increase of gasoline consumption since 2005 has led to gasoline-fired emissions again becoming the main contributor (55.5%-79.1%).

**Key words:** fossil fuels; Pb; Hg; atmospheric emission; historical trend

重金属大都广泛存在于化石燃料、金属矿石及工业产品等的原材料中, 它们会在化石燃料燃烧、工业产品的高温生产以及市政和工业废物焚烧等过程中释放出来, 以气态或颗粒态形式进入大气环境, 随大气环流在区域乃至全球范围内的进行迁移和循环. 有研究表明, 城市区域土壤、灰尘、湖泊沉积物中的重金属主要来自大气干湿沉降<sup>[1~3]</sup>. 近年来, 大气排放源重金属对生态系统和公众健康的不利效应和日益增长的中毒事件已引起全世界范围内的普遍关注<sup>[4]</sup>. 据报道, 中国城市区域大气气溶胶中重金属浓度出现逐年增长趋势<sup>[4, 5]</sup>. 为遏制重金属增长的排放和污染, 我国政府于 2011 年制定了《重金属污染综合防治“十二五”规划》, 然而到

目前为止, 针对有毒有害重金属大气排放的详细调查在中国还比较欠缺, 尤其是在一些大都市区域对其历史排放趋势的了解更是迫在眉睫.

上海作为近现代中国最重要的工业中心和经济中心, 同时也是国际上重要的工业城市, 其工业发展具有 150 多年的历史, 当前境内工业门类齐全, 涵盖了煤炭、冶金、化工、机械、电子等传统及新兴工业. 目前上海的整体城市化率高达 90%, 是中

收稿日期: 2018-02-26; 修订日期: 2018-03-13

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41730646); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41601526)

作者简介: 杨静(1987~), 女, 博士, 工程师, 主要研究方向为区域环境质量演变与生物地球化学过程, E-mail: jyang@geo.ecnu.edu.cn

国城市化程度最高的城市,同时也是世界上城镇人口最多的城市之一<sup>[6]</sup>.上海工业化和城市化的快速发展虽然推动了其经济的持续增长和人均生活水平的提高,但其产生的大量资源、能源消耗不可避免地带来了大范围的大气、土壤和水体环境污染<sup>[7]</sup>.诸多研究都发现当前上海局部地区(主要为工业区和交通区)大气<sup>[8,9]</sup>、土壤<sup>[10]</sup>、灰尘<sup>[10]</sup>、植物<sup>[11]</sup>乃至儿童血液<sup>[12]</sup>中重金属污染较为严重,而湖泊沉积柱<sup>[13]</sup>、土壤柱<sup>[14]</sup>和苔藓<sup>[15]</sup>中重金属含量随时间推进也未出现下降态势.尤其是在20世纪90年代中后期第二产业比例逐年下降的情况下<sup>[6]</sup>,上海经济重工业化的趋势却越来越明显,这使得重金属的工业废气排放源大大增加.

鉴于目前较少有研究涉及上海重金属大气排放量的估算及其历史变化趋势的分析,本文选择了两种与人类活动密切相关的重金属铅(Pb)和汞(Hg)为研究对象,同时考虑到相关统计数据的可得性,重点调查了两种典型燃烧源(煤炭和汽油燃烧)活动数据的历史变化,并首次估算了长时间尺度内(1949~2015年)上海城市环境中这两种释放源的Pb和Hg大气排放量,并分析了其时间演变趋势,以期对未来上海重金属的污染排放管控提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 上海燃煤过程重金属排放量估算

#### 1.1.1 计算公式

燃煤过程中重金属的大气排放量不仅取决于煤炭消耗量和重金属释放速率,还与末端大气污染控制装置对重金属的去除效率有关,其计算公式如下:

$$E_i = Q \times C_i \times R_i \times (1 - f_{PM})(1 - f_{FGD}) \quad (1)$$

式中,  $E_i$  表示燃煤引起的重金属  $i$  向大气中的排放量(t);  $Q$  表示煤炭消耗量( $10^4$  t);  $C_i$  表示煤中重金属  $i$  的含量( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ );  $R_i$  表示燃烧过程中重金属  $i$  从煤中的释放比率(%);  $f_{PM}$  表示颗粒物除尘装置对重金属  $i$  的去除效率(%);  $f_{FGD}$  表示湿法烟气脱硫装置对重金属  $i$  的去除效率(%).

#### 1.1.2 上海燃煤消耗量及金属含量

上海的化石燃料主要由煤炭、焦炭和石油这三大品种构成,而煤炭消耗在初级能源消耗中所占比重一直偏高,如2000年为65.7%,2007年为51.3%,远高于当今世界平均水平(25%)<sup>[6]</sup>.本研究使用的活动数据(上海市1949~2015年煤炭消

耗量)来自文献[16, 17].如图1所示,随着城市化的推进,上海总煤炭消耗量也猛增,由1949年的372万t增长到2011年的6142万t,年均增长率达4.55%,尤其是1964年后其年均增长率高达6.22%,自2011年后煤炭消耗量才开始出现下降趋势.上海燃煤消耗主要是燃煤电厂、工业部门和居民生活,其消耗量的时间变化趋势揭示出前两者消耗的比例之和超过了70%(图1).尽管工业部门和燃煤电厂的煤炭消耗自解放后出现了高增长,但工业部门煤炭消耗所占比例从1958年的64.7%下降到2015年的39.8%,而燃煤电厂消耗所占比例从1954年的24.9%增长到2015年的58.1%,尤其是1990年后燃煤电厂成为上海最主要的煤炭消耗源.居民生活煤炭消耗量也呈现出先增长后下降的趋势,1991~2015年其消耗量从316万t下降到30.2万t,主要归因于液化石油气和天然气等清洁能源的使用.

上海市所需的煤炭主要来自于山西、山东、安徽、河南、河北、江苏和东北等18个省市,前7个地区的供应占消耗总量的90%以上.有研究表明,前7个地区煤炭中重金属Pb和Hg含量的加权平均值分别为 $20.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[18, 19]</sup>,因此本研究以其作为上海市煤炭中Pb和Hg含量的代表值.

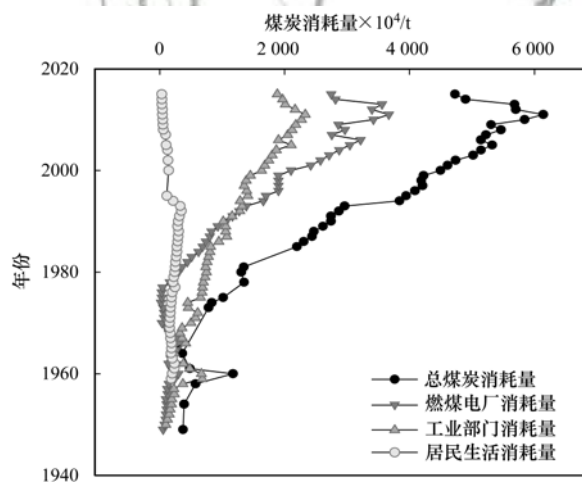


图1 1949~2015年上海煤炭消耗量随时间的变化

Fig. 1 Historical variations in coal consumption in Shanghai, 1949-2015

#### 1.1.3 上海燃煤装置和污染控制装置下重金属的释放比率和去除效率

煤燃烧过程中重金属向气相和飞灰中的转移,即重金属的释放比率取决于燃煤技术和操作条件,不同燃煤装置会导致重金属释放比率不一致.燃煤

装置目前主要分为 4 种类型：煤粉燃烧炉、流化床炉、机械加煤锅炉和焦炭炉。燃煤电厂主要采用煤粉燃烧炉，而工业部门主要采用机械加煤锅炉。上海煤粉燃烧炉和机械加煤锅炉中 Pb 和 Hg 的释放比率借鉴了前人对不同燃煤装置中重金属释放速率的研究结果<sup>[19, 20]</sup>，如表 1 所示。

表 1 燃煤装置和空气污染控制装置下重金属的释放比率和去除效率<sup>1)</sup>/%

| Table 1 Release rate and removal efficiency of heavy metals from coal combustion facilities and air pollution control devices/% |         |                    |                           |                    |                           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|--------------------|---------------------------|--------------------|---------------------------|
| 参数                                                                                                                              | 类别      | Pb                 |                           | Hg                 |                           |
|                                                                                                                                 |         | 算术均值               | 范围                        | 算术均值               | 范围                        |
| 释放比率                                                                                                                            | 煤粉燃烧炉   | 96.3 <sup>a</sup>  | 94.0 ~ 99.0 <sup>a</sup>  | 99.4 <sup>b</sup>  | 99.1 ~ 99.77 <sup>b</sup> |
|                                                                                                                                 | 机械加煤燃烧炉 | 40.1 <sup>a</sup>  | 30.9 ~ 48.14 <sup>a</sup> | 83.2 <sup>b</sup>  | 83.2 <sup>b</sup>         |
| 去除效率                                                                                                                            | 旋风除尘    | 12.1 <sup>a</sup>  | 12.1 <sup>a</sup>         | 6 <sup>b</sup>     | 0 ~ 12 <sup>b</sup>       |
|                                                                                                                                 | 静电除尘    | 97.16 <sup>a</sup> | 94.0 ~ 99.1 <sup>a</sup>  | 33.17 <sup>b</sup> | 24 ~ 49.6 <sup>b</sup>    |
|                                                                                                                                 | 湿法烟气脱硫  | 78.4 <sup>a</sup>  | 76.8 ~ 80.0 <sup>a</sup>  | 57.22 <sup>b</sup> | 30.9 ~ 75 <sup>b</sup>    |

1) a 和 b 分别表示数据出自文献[19]和文献[20]

末端的除尘设备和脱硫设备会部分去除结合在细小飞灰颗粒上的重金属。如表 1 所示，不同类型的颗粒物及 SO<sub>2</sub> 控制装置对重金属的去除效率并不一致<sup>[19, 20]</sup>。1958 年大跃进之后，上海市工业生产突飞猛进，工厂锅炉烟尘污染日渐引起注意，1960 年初开始实施烟尘污染治理，到 1973 年全市共有 7 600 多只烟囱，已安装消烟除尘设备的仅占 31.6%，平均除尘效率为 50%。从 1986 年起，上海开始有组织、有计划、全面大规模地限期淘汰了一批低效除尘器，使全市的工业锅炉除尘器的平均除尘效率提高到 70%。从 1995 年起上海市燃煤电厂都经历了大规模烟尘处理，绝大部分设备都改成了静电除尘器，国家“十一五”期间，燃煤电厂又实施了大规模的脱硫改造，大部分燃煤机组都安装了湿法脱硫装置，湿法脱硫又进一步提高了除尘效率。

上海市居民生活用煤在 1959 ~ 2011 年间所占比例平均为 15.6%。然而，家庭生活中所用的煤炉主要为传统型炉灶和改良过的炉灶，两者都是直接填煤并没有配备任何颗粒物控制装置，因而煤燃烧释放出的重金属直接排放到周围空气中。赵霞芳等<sup>[21]</sup>报道了天津市传统型和改善型家庭煤炉燃烧过程中重金属 Pb 和 Hg 的释放因子(1.08 × 10<sup>-5</sup> ~ 6.73 × 10<sup>-5</sup> g·kg<sup>-1</sup> 和 4.0 × 10<sup>-4</sup> ~ 4.8 × 10<sup>-4</sup> g·kg<sup>-1</sup>)，本研究取其算术平均值，分别为 3.91 × 10<sup>-5</sup> g·kg<sup>-1</sup> 和 4.4 × 10<sup>-4</sup> g·kg<sup>-1</sup>。

1.2 上海汽油燃烧过程重金属排放量估算

机动车汽油燃烧产生的重金属排放量主要基于汽油消耗量和特定的排放因子来进行估算，已有研究只报道了汽油燃烧过程中 Pb 和 Hg 排放因子<sup>[22, 23]</sup>，因此基于数据可得性，本研究仅估算了上海市 1980 ~ 2015 年汽油燃烧排放的 Pb 和 Hg，计算公式如式(2)和(3)。

$$E_{\text{Pb-Gi}} = 0.76 \times [Q_{\text{Gi}} \times C_{\text{LG}} \times K_{\text{LGi}} + Q_{\text{Gi}} \times C_{\text{ULG}} \times K_{\text{ULGi}}]$$

(2)

式中， $E_{\text{Pb-Gi}}$  代表汽油燃烧排放的 Pb(t)， $Q_{\text{Gi}}$  表示  $i$  年汽油消耗量(t)， $C_{\text{LG}}$  表示含铅汽油中 Pb 浓度(g·L<sup>-1</sup>)， $K_{\text{LGi}}$  表示含铅汽油在  $i$  年汽油消耗总量中所占的比例(%)， $C_{\text{ULG}}$  表示不含铅汽油中 Pb 浓度(g·L<sup>-1</sup>)， $K_{\text{ULGi}}$  表示不含铅汽油在  $i$  年汽油消耗总量中所占的比例(%)，0.76 表示汽油中的 Pb 在燃烧过程中约有 76% 释放到大气中<sup>[22]</sup>。

$$E_{\text{Hg-Gi}} = Q_{\text{Gi}} \times \text{EF}_{\text{Hg}}$$

(3)

式中， $E_{\text{Hg-Gi}}$  表示汽油燃烧排放的 Hg(t)， $\text{EF}_{\text{Hg}}$  表示汽油燃烧过程中 Hg 的排放因子(0.058 g·t<sup>-1</sup>)<sup>[23]</sup>。

在过去 30 年间，上海汽油消耗量从 1980 年的 15.2 万 t 增加到 2011 年的 472.9 万 t，年均增速高达 11.3% (图 2)。上海自 1992 年起开始使用无铅汽油，当年为 3 000 t，1993 ~ 1995 年每年为 10 000 t，1996 年消耗 15 000 t。1997 年 10 月 1 日

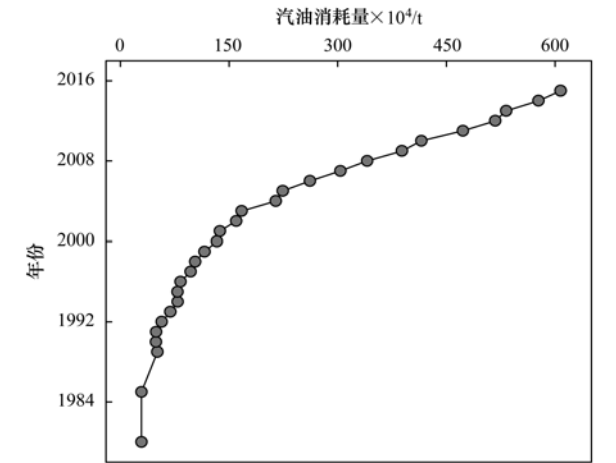


图 2 1980 ~ 2015 年上海汽油消耗量随时间的变化  
Fig. 2 Historical variations in gasoline consumption in Shanghai, 1980-2015

起,上海全面推广使用无铅汽油,1997 年底彻底实行汽油无铅化,至此含铅汽油完全退出上海市场.2006 年之前上海消耗的汽油主要来自于本地炼油厂且含铅量也逐年下降,从 1994 年的  $0.18 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  降到 1998 年的不足  $0.0025 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  [24]. 因此,本研究取 1980 ~ 1994 年间含铅汽油 Pb 浓度为  $0.18 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 1995 ~ 1998 年间含铅汽油 Pb 浓度分别为  $0.15$ 、 $0.14$ 、 $0.04$  和  $0.01 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 1998 年以后无铅汽油 Pb 浓度为  $0.0025 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ .

## 2 结果与讨论

### 2.1 上海燃煤源重金属大气排放的历史趋势

燃煤电厂、工业部门及居民生活消耗的煤炭量约占上海煤炭消耗总量的 77.3% ~ 99.2%, 因此,上海燃煤源重金属 Pb 和 Hg 排放量可近似用这三者排放的重金属总量代替. 1959 ~ 2015 年,这三部分来源 Pb 和 Hg 的排放总量分别为 3 193 t 和 176 t,其中燃煤电厂和工业部门产生的 Pb 排放所占比例之和历年来均超过 99%, Hg 自 1994 年起两者排放比例超过 80% 且有逐年升高的趋势,至 2000 年后所占比例超过 98%.

上海燃煤电厂、工业部门及居民生活燃煤导致的重金属 Pb 和 Hg 的大气排放量随时间的变化趋势如图 3 所示. 1949 年解放后燃煤电厂和工业部门的 Pb 排放量都呈现出相似的阶段性变化. 1949 ~

1985 年燃煤电厂和工业部门的大气 Pb 排放量都出现急剧地波动式增长,首先在 1960 年因为煤耗量激增出现一个小峰值,并于 1985 年达到最大值 (130.4 t 和 64.6 t),这主要是由解放后快速增长的燃煤消耗和较少的烟尘控制措施所导致的. 此外,虽然 1949 ~ 1985 年间工业部门的燃煤消耗量要高于燃煤电厂,但其大气重金属排放量的增长速率要比燃煤电厂低,这主要与工业锅炉燃煤过程中重金属的释放比率相对较低有关.

自 20 世纪 80 年代中后期上海开始开展创建基本无黑烟区活动,大规模提高除尘器效率,使得燃煤电厂和工业部门的大气 Pb 排放量在短期内急剧下降,但这一时期持续增长的燃煤消耗使得这两大来源的大气 Pb 排放量很快又继续增长,到 1994 年出现次高峰 (102.7 t 和 33.2 t),并且仍然是燃煤电厂增速高于工业部门. 1995 ~ 2015 年间燃煤电厂和工业部门的大气 Pb 排放量再次出现大幅度下降,这主要是由于 1995 年后在燃煤部门大规模安装了高效静电除尘器,尤其是自 2005 年起实施的大规模脱硫改造使得湿法烟气脱硫与静电除尘技术相结合,进一步降低了烟气和飞灰中重金属向大气的排放量. 在第五轮三年环保行动计划期间 (2012 ~ 2014 年),上海基本实现了全市燃煤电厂脱硫、脱硝和高效除尘全覆盖,完成了 3 000 多台燃煤锅炉清洁能源替代,实现燃煤消耗

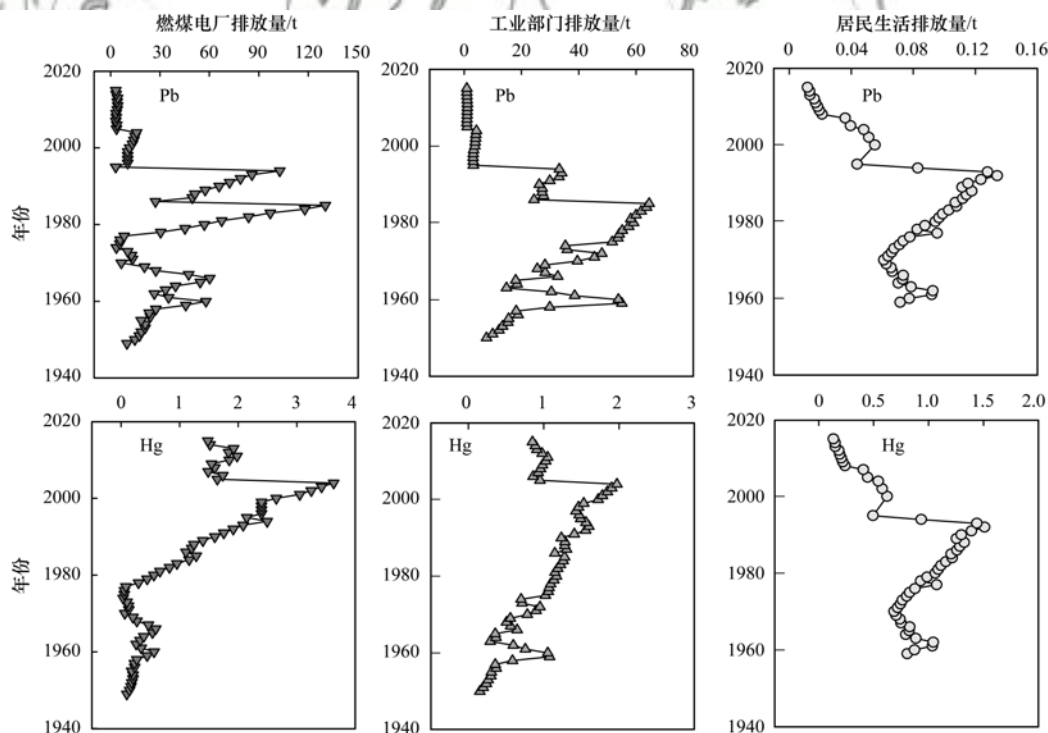


图 3 1949 ~ 2015 年上海各部门燃煤排放的大气 Pb 和 Hg 随时间的变化

Fig. 3 Historical variations in Pb and Hg emissions from coal-fired sectors in Shanghai, 1949-2015

负增长,自此之后燃煤电厂和工业部门大气 Pb 排放开始出现下降趋势。

燃煤电厂和工业部门燃煤 Hg 排放量自解放后也随时间出现剧烈地波动式增长,但其变化类型与 Pb 略有不同,这两者的最大 Hg 排放量(3.63 t 和 1.97 t)出现在 2004 年,次高峰(2.49 t 和 1.60 t)出现在 1994 年,这主要是因为 Hg 是一种高挥发性金属元素,静电除尘和脱硫技术对 Hg 的去除率仅分别为 33.2% 和 57.2%,远远低于对 Pb 的去除率。因而在 2005 年之后,大气 Hg 排放量的降低幅度并不大而且燃煤电厂和工业部门 Hg 排放均出现了明显上升态势。自 2011 年后由于燃煤电厂和工业部门耗煤量持续降低,这两部分来源的 Hg 排放量也出现下降趋势。

由于居民生活燃煤释放出的重金属直接排放到周围空气中,由此导致的 Pb 和 Hg 大气排放量与其煤炭消耗量变化趋势基本一致,均自 1959 年起出现急剧地波动式增长至 1992 年出现最大值(0.13 t 和 1.51 t)。尽管 1959~1992 年间上海居民生活用煤量以 1.86% 的年均增速一直保持低速增长,但其使用面广并且直接的烟尘排放高度过低,因此它对

大气造成的污染逐渐引起了人们的重视。从 1980s 起,上海城市煤气得到迅速发展,家庭用气普及率从 1950 年的 1.9% 上升至 1995 年的 86.6%,家庭炉灶烟尘污染由于清洁能源的使用而基本得到解决,同时也使得生活燃煤产生的重金属 Pb 和 Hg 的大气排放量自 1992 年后持续下降,到 2010 年上海全市已实现天然气化,到 2015 年这两种重金属的生活燃煤排放量仅为 0.01 t 和 0.13 t。

## 2.2 上海汽油燃烧源重金属大气排放的历史趋势

如图 4 所示,随着含铅汽油的大量使用,机动车尾气产生的 Pb 排放由 1980 年的 28.6 t 快速增长到 1994 年的 146.8 t。1991~1997 年间由于含铅汽油的大量使用使得每年有 108 t 的 Pb 排放到大气中。自 1997 年后含铅汽油完全退出上海市场,再加上上海当地炼油行业不断降低汽油中 Pb 含量,上海汽油燃烧产生的 Pb 排放迅速降低到 1998 年的 2.70 t。之后随着汽油消耗量的持续增长,燃油 Pb 排放呈现出微弱的增长态势,但排放量基本维持在较低的水平(2.70~15.9 t)。然而自 1980 年起汽油燃烧导致 Hg 排放一直保持高速增长,到 2015 年达到 0.35 t。

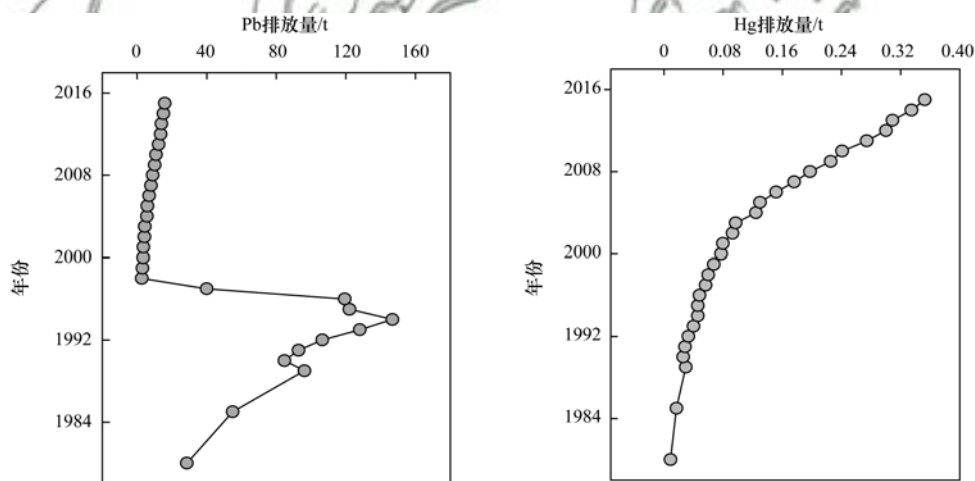


图 4 1980~2015 年上海汽油燃烧排放的大气 Pb 和 Hg 随时间的变化

Fig. 4 Historical variations in Pb and Hg emissions from gasoline consumption in Shanghai, 1980-2015

钱华等<sup>[24]</sup>通过监测和调研数据的比较,确定了 1973~2000 年上海大气主要铅污染源并估算了各污染源的贡献,发现上海大气 Pb 污染源发生了历史性变迁过程,即由局地工业污染源逐渐转变为含铅汽油机动车尾气排放为主,后随着含铅汽油的禁用转变为燃煤排放为主。Liang 等<sup>[25]</sup>通过对 1991~2005 年上海大气总悬浮颗粒物(TSP)中 Pb 浓度的分析,发现由于政府对含铅汽油的控制使得大气 TSP 中 Pb 浓度从 1995 年的  $0.57 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  急剧下降

到 2000 年的  $0.16 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,然而此后随着燃煤消耗量的持续增长,大气 TSP 中 Pb 浓度又出现上升态势,其浓度的时间变化趋势与上海化石燃料燃烧产生的 Pb 排放量之间具有显著的正相关性( $P < 0.05$ )。Li 等<sup>[26, 27]</sup>从上海公园湖泊采集了 5 根沉积柱研究 1949~2008 年间 Pb 和 Hg 污染及其来源,利用 Pb 同位素的三元混合模型估算出沉积柱中 52%~69% 的 Pb 来自于燃煤排放,含铅汽油排放所占比例不到 30%,而 Hg 和 Pb 浓度具有高度相

关性且 Hg 沉积通量与年均煤炭消耗也显著相关,暗示了燃煤消耗是上海 Hg 排放的主要来源. Xiu 等<sup>[28]</sup>也证实了 2000 年后燃煤消耗对上海大气 Hg 排放的贡献高达 80%. 基于上述已有资料研究发现,化石燃料(煤和石油)燃烧源是上海大气 Pb 和 Hg 的主要排放源. 因此,本研究进一步比较了 1980 ~ 2015 年上海燃煤和燃油对大气 Pb 和 Hg 排放贡献的比例变化(图 5). 如图 5 所示,1989 年以前燃煤 Pb 排放比例相对较高(78.0% ~ 80.2%),1990 ~ 1997 年含铅汽油的大量使用导致燃油 Pb 排放所占比例逐渐升高(47.8% ~ 74.7%),而自 1997 年含铅

汽油完全退出上海市场后,燃油 Pb 排放所占比例急剧下降(<20%),1997 ~ 2004 年上海大气 Pb 排放的主要贡献源转变成燃煤源(78.2% ~ 83.5%),然而自 2005 年起燃油 Pb 排放所占比例逐渐由 55.5% 升至 2015 年的 79.1%,汽油燃烧排放又成为上海大气 Pb 的主要贡献源. 1980 ~ 2015 年间上海大气 Hg 排放的燃煤源贡献一直占据主导地位(87.5% ~ 99.7%),然而自 2005 年后随着机动车汽油消耗量的急速增长,机动车燃油源所占比例出现轻微增长(4.10% ~ 12.5%),燃煤源所占比例出现轻微下降,但仍然占据主导地位.

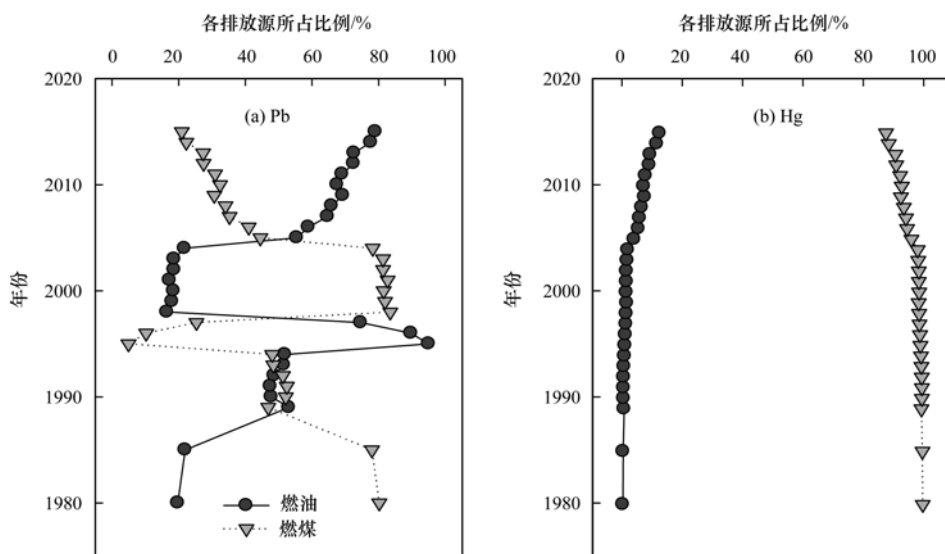


图 5 1980 ~ 2015 年上海燃煤和燃油排放的大气 Pb 和 Hg 比例随时间的变化

Fig. 5 Historical variations in the proportion of Pb and Hg emissions from coal and gasoline consumption in Shanghai, 1980-2015

### 2.3 不确定性分析

理想情况下,对诸多来源的大气重金属排放量的准确估算需要借助于恰当的采样和计算方法. 但在该法不可行时,研究者们常利用实际活动数据和排放因子来计算排放量,而影响大气重金属排放量估算准确性的主要因子包括活动数据、金属含量、排放因子和空气污染控制装置的去除效率<sup>[19, 20]</sup>. 相比于其它 3 种因子,统计资料记录的活动数据(如能源消耗量)具有较小的不确定性. 本研究中化石燃料燃烧源重金属排放估算结果的不确定性在于:①上海燃油中 Pb 和 Hg 排放因子借鉴了国外的研究数据,但在油品品质、燃烧效率和控制装置不同的情况下,对上海汽油燃烧过程中 Pb 和 Hg 排放量的估算存在一定的偏差;②上海燃煤中 Pb 和 Hg 的空气污染控制装置去除效率也是借鉴了区域性研究结果,对上海进行估算也存在一定程度的偏差. 因此,为了更好地了解排放量的不确定性,本研究

基于重金属释放比率和去除效率应用蒙特卡洛模型在 Matlab 中实现了对 Pb 和 Hg 的不确定性分析,结果发现上海燃煤源 Pb 和 Hg 排放的总体不确定性分别为 -39.8% ~ 49.4% 和 -17.4% ~ 21.4%. 因汽油燃烧过程中 Pb 和 Hg 的排放因子数据过少,本研究未估算汽油燃烧源排放的不确定性. 未来在对上海大气重金属排放量进行估算时,为了获得更好、更可靠的估算结果,需要进一步实施各种排放源的长期野外测试和连续监测.

### 3 结论

(1) 1959 ~ 2015 年上海燃煤电厂、工业部门及居民生活煤耗导致 Pb 和 Hg 的大气排放总量分别为 3 193 t 和 176 t, 其中燃煤电厂和工业部门排放贡献超过 80%. 这三部分燃煤源的 Pb 和 Hg 排放量均随时间推进呈现出先增长后下降的趋势,即 1949 年解放后燃煤消耗的快速增长和烟尘控制措施的缺

乏导致其排放量出现急剧地波动式增长,于 20 世纪 80~90 年达到峰值,此后上海采取的各种减排和控制措施使得其排放量出现大幅度下降.蒙特卡罗模型分析结果表明上海燃煤源 Pb 和 Hg 排放的总体不确定性分别为 -39.8%~49.4% 和 -17.4%~21.4%.

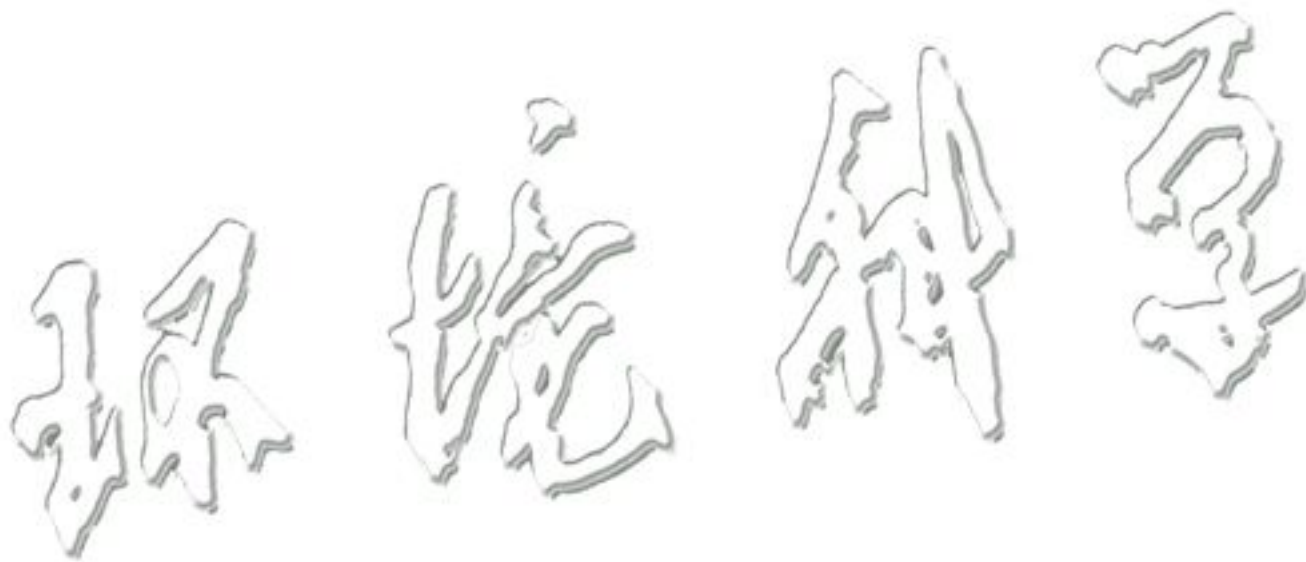
(2)1980~2015 年间上海机动车燃油导致大气 Pb 排放量出现先增长后下降再增长的趋势,即含铅汽油的大量使用导致 Pb 排放从 1980 年的 28.6 t 快速增长到 1994 年的 146.8 t,此后随着汽油含铅比例下降至完全退出上海市场,燃油 Pb 排放迅速降低到 1998 年的 2.70 t,之后随着汽油消耗量的持续增长,燃油 Pb 排放又呈现出微弱的增长态势(2.70~15.9 t).汽油燃烧导致的 Hg 排放 1980~2015 年间一直保持高速增长(0.01~0.35 t).

(3)通过对 1980~2015 年上海两大主要燃烧源(燃煤和燃油)对大气 Pb 和 Hg 排放贡献的比较,发现含铅汽油燃烧排放是 1990~1997 年间上海大气 Pb 最主要的排放源(47.8%~74.7%),自 1997 年含铅汽油完全退出上海市场之后,燃煤排放成为主要贡献源(78.2%~83.5%),然而自 2005 年起随着汽油消耗的急速增长,燃油排放又成为主要贡献源(55.5%~79.1%).与 Pb 不同,1980~2015 年间上海大气 Hg 的燃煤源排放比例一直占据主导地位(87.5%~99.7%).

#### 参考文献:

- [1] Hu X, Sun Y Y, Ding Z H, *et al.* Lead contamination and transfer in urban environmental compartments analyzed by lead levels and isotopic compositions [J]. *Environmental Pollution*, 2014, **187**: 42-48.
- [2] Landis M S, Vette A F, Keeler G J. Atmospheric mercury in the Lake Michigan Basin: influence of the Chicago/Gary urban area [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36** (21): 4508-4517.
- [3] Tanner P A, Ma H L, Yu P K N. Fingerprinting metals in urban street dust of Beijing, Shanghai, and Hong Kong [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42** (19): 7111-7117.
- [4] Tian H Z, Zhu C Y, Gao J J, *et al.* Quantitative assessment of atmospheric emissions of toxic heavy metals from anthropogenic sources in China: historical trend, spatial distribution, uncertainties, and control policies [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15** (17): 10127-10147.
- [5] Wang K, Tian H Z, Hua S B, *et al.* A comprehensive emission inventory of multiple air pollutants from iron and steel industry in China: temporal trends and spatial variation characteristics [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **559**: 7-14.
- [6] Shanghai Statistics Bureau. Shanghai statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2016. 12-13.
- [7] 汪军英. 上海快速城市化过程中地表水、大气和土壤环境质量的时空变迁研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2007. 65-66.  
Wang J Y. Study on the spatial and temporal variations of surface water, air and soil environmental quality during rapid urbanization in Shanghai [D]. Shanghai: East China Normal University, 2007. 65-66.
- [8] Huang H, Jiang Y, Xu X Y, *et al.* In vitro bioaccessibility and health risk assessment of heavy metals in atmospheric particulate matters from three different functional areas of Shanghai, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **610-611**: 546-554.
- [9] Duan L, Wang X H, Wang D F, *et al.* Atmospheric mercury speciation in Shanghai, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **578**: 460-468.
- [10] Bi C J, Zhou Y, Chen Z L, *et al.* Heavy metals and lead isotopes in soils, road dust and leafy vegetables and health risks via vegetable consumption in the industrial areas of Shanghai, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **619-620**: 1349-1357.
- [11] 周雅, 毕春娟, 周泉潇, 等. 上海市郊工业区附近蔬菜中重金属分布及其健康风险 [J]. *环境科学*, 2017, **38** (12): 5292-5298.  
Zhou Y, Bi C J, Zhou X X, *et al.* Distribution characteristics and health risk for heavy metals in vegetables near the industrial areas in Shanghai [J]. *Environmental Science*, 2017, **38** (12): 5292-5298.
- [12] Cao J, Li M M, Wang Y, *et al.* Environmental lead exposure among preschool children in Shanghai, China: blood lead levels and risk factors [J]. *PLoS One*, 2014, **9** (12): e113297.
- [13] Yang J, Chen L, Steele J C, *et al.* An extended study on historical mercury accumulation in lake sediment of Shanghai: The contribution of socioeconomic driver [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **219**: 612-619.
- [14] Wang G, Liu Y, Chen J, *et al.* Magnetic evidence for heavy metal pollution of topsoil in Shanghai, China [J]. *Frontiers of Earth Science*, 2018, **12** (1): 125-133.
- [15] Cao T, An L, Wang M, *et al.* Spatial and temporal changes of heavy metal concentrations in mosses and its indication to the environments in the past 40 years in the city of Shanghai, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42** (21): 5390-5402.
- [16] 中国国家统计局. 中国能源统计年鉴 [EB/OL]. <http://cyfd.cnki.com.cn/N2017110016.htm>, 2016-12.  
National Bureau of Statistics of China. China energy statistical yearbook [EB/OL]. <http://cyfd.cnki.com.cn/N2017110016.htm>, 2016-12.
- [17] 上海地方志办公室. 上海物资流通志 [EB/OL]. <http://www.sh tong.gov.cn/Newsite/node2/node2245/node76895/index.html>, 2007-09-06.
- [18] Shao X, Cheng H G, Li Q, *et al.* Anthropogenic atmospheric emissions of cadmium in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **79**: 155-160.
- [19] Tian H Z, Cheng K, Wang Y, *et al.* Temporal and spatial variation characteristics of atmospheric emissions of Cd, Cr, and Pb from coal in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **50**: 157-163.
- [20] Tian H Z, Wang Y, Xue Z G, *et al.* Trend and characteristics of

- atmospheric emissions of Hg, As, and Se from coal combustion in China, 1980-2007 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(23): 11905-11919.
- [21] 赵霞芳, 于洪国, 刘良燕, 等. 天津市家庭燃煤污染物测定与分析[J]. *辐射防护通讯*, 1994, **14**(4): 98-99.
- [22] Li Q, Cheng H G, Zhou T, *et al.* The estimated atmospheric lead emissions in China, 1990-2009 [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **60**: 1-8.
- [23] Streets D G, Hao J M, Wu Y, *et al.* Anthropogenic mercury emissions in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(40): 7789-7806.
- [24] 钱华, 伏晴艳, 陈明华, 等. 上海大气中铅污染源及估算[A]. 见: 中国环境科学学会. 发展循环经济 落实科学发展观——中国环境科学学会2004年学术年会论文集[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004. 826-835.
- [25] Liang F, Zhang G L, Tan M G, *et al.* Lead in children's blood is mainly caused by coal-fired ash after phasing out of leaded gasoline in Shanghai[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(12): 4760-4765.
- [26] Li H B, Yu S, Li G L, *et al.* Lead contamination and source in Shanghai in the past century using dated sediment cores from urban park lakes[J]. *Chemosphere*, 2012, **88**(10): 1161-1169.
- [27] Li H B, Yu S, Li G L, *et al.* Spatial distribution and historical records of mercury sedimentation in urban lakes under urbanization impacts [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **445-446**: 117-125.
- [28] 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.



## CONTENTS

|                                                                                                                                                                             |                                                                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Emission Inventory and Prediction of Non-road Machineries in the Yangtze River Delta Region, China .....                                                                    | HUANG Cheng, AN Jing-yu, LU Jun (3965)                                  |
| Vehicle Exhaust Emission Characteristics and Their Contributions in Jiangsu Province .....                                                                                  | LI Li, ZHANG Jie, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (3976)                    |
| Historical Trends of Atmospheric Pb and Hg Emissions from Fossil Fuel Combustion in Shanghai .....                                                                          | YANG Jing, CHEN Long, LIU Min, <i>et al.</i> (3987)                     |
| Emission Inventory of Atmospheric Pollutants and VOC Species from Crop Residue Burning in Guangdong Province .....                                                          | SUN Xi-bo, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (3995)            |
| Mass Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing .....                                      | LI Yan-pei, HAO Qing-ju, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (4002)             |
| Analysis of Seasonal Variations in Chemical Characteristics and Sources of PM <sub>2.5</sub> During Summer and Winter in Ji'nan City .....                                  | LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (4014)        |
| PM <sub>2.5</sub> Pollution Characterization and Cause Analysis of a Winter Heavy Pollution Event, Liaocheng City .....                                                     | ZHANG Jing-qiao, WU Ya-jun, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (4026)            |
| Concentrations, Sources, and Dry Deposition Fluxes of Different Forms of Phosphorus in Qingdao Aerosols in Summer .....                                                     | WANG Nan, MA Miao, SHI Jin-hui, <i>et al.</i> (4034)                    |
| Characteristics and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Winter in Jincheng .....                                                                  | YANG Fan, YAN Yu-long, GE Yun-fei, <i>et al.</i> (4042)                 |
| Enrichment Levels and Comprehensive Pollution Assessment of Dust Heavy Metals in Winter in Beijing .....                                                                    | XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, LI Da-jun, <i>et al.</i> (4051)             |
| Characteristics of Atmospheric BTX near a Main Road in Hefei City .....                                                                                                     | MENG Fan-hao, QIN Min, LIANG Shuai-xi, <i>et al.</i> (4060)             |
| Ozone Generation Potential and Highly Contributing Substances of NMOCs from Landfill Working Face .....                                                                     | LI Hao, LIU Yan-jun, CHEN Tan, <i>et al.</i> (4070)                     |
| Emission Characteristics of Wind-Eroded Dust from Concrete Batching Plants in Beijing .....                                                                                 | LI Bei-bei, HAN Kai-li, QIN Jian-ping, <i>et al.</i> (4078)             |
| Seasonal Variation Characteristics of Pollution Risk in a Riverside Source Area Based on Source Apportionment .....                                                         | GAO Xiang, ZUO Rui, GUO Xue-ru, <i>et al.</i> (4086)                    |
| Evaluation of Effect of Urban Non-point Source Pollution Control on Porous Asphalt-Bio-retention Combined Roads .....                                                       | GONG Man-li, ZUO Jun-jie, REN Xin-xin, <i>et al.</i> (4096)             |
| Composition, Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Lanzhou Reach of the Yellow River .....               | ..... ZHAO Xia-ting, LI Shan, WANG Zhao-wei, <i>et al.</i> (4105)       |
| Characterization of Dissolved Organic Matter Fractions in the Ning-Meng Section of the Yellow River and Relationship with Metal Ions .....                                  | ..... XI Yue, WANG Ting, NI Jin-ren, <i>et al.</i> (4114)               |
| Comparative Characteristics of Optical Absorption in Waters from Yiluo River and Huntai River in Spring .....                                                               | ..... LI Liu-yang, SHAO Tian-tian, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4122)      |
| Seasonal Variations in River Water Chemical Weathering and Its Influence Factors in the Malian River Basin .....                                                            | ..... WANG Yu-shan, HAN Shuang-bao, DENG Qi-jun, <i>et al.</i> (4132)   |
| Characteristics and Genesis of NO <sub>3</sub> Type Water in Shallow Groundwater in Liujiang Basin .....                                                                    | ..... XU Jin, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i> (4142)             |
| Development and Evaluation of a Sustainable Long-release Carbon Material Applied for In-Situ Remediation of Groundwater Nitrogen Pollution .....                            | ..... ZHANG Wen, YIN Lin, ZHOU Nian-qing (4150)                         |
| Phosphorus Forms and Distribution Characteristics in the Sediment and Soil of the Water-Level-fluctuating Zone in the Main Stream of the Three Gorges Reservoir .....       | ..... ZHANG Zhi-yong, WAN Cheng-yan, HU Hong-qing, <i>et al.</i> (4161) |
| Distribution Characteristics and Release Fluxes of Phosphorus Forms in Xiangxi Bay Sediments in the Three Gorges Reservoir Before and After Impoundment .....               | ..... LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4169)       |
| Effect of Zirconium-modified Zeolite Addition on Phosphorus Release and Immobilization in Heavily Polluted River Sediment .....                                             | ..... HE Si-qi, ZHANG Wei, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (4179)           |
| Impact of Human Activities on Net Anthropogenic Nitrogen Inputs (NANI) at Township Scale in Erhai Lake Basin .....                                                          | ..... LI Ying, LIU Hong-bin, LEI Qiu-liang, <i>et al.</i> (4189)        |
| Simulation of Inorganic Nitrogen Fluxes at the Sediment-water Interface in a Typical Intertidal Zone, Eastern China .....                                                   | ..... NIE Jia-qin, WANG Dong-qi, CHEN Jie, <i>et al.</i> (4199)         |
| Effects of Aquaculture on Ammonia-oxidizing Prokaryotes in Sediments of Eastern Lake Taihu .....                                                                            | ..... CHU Yu, HE Xiao-wei, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4206)               |
| Transformation of Ammonia in Wetland Sediments for Treatment of Mining Wastewater .....                                                                                     | ..... WANG Hai-bo, MA Ding, YUE Zheng-bo, <i>et al.</i> (4215)          |
| Distribution Characteristics of Sulfonamide Antibiotic Resistance Genes in a Drinking Water Source in East China .....                                                      | ..... HU Ya-ru, JIANG Lei, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (4222)        |
| Distribution Characteristics of Sulfonamides and Sulfamethoxazole-Resistant Bacteria in Tannery Wastewater Treatment Processes .....                                        | ..... HUA Li, LI Lu, YANG Chun-yan (4229)                               |
| Effects of Different Substrates and Particle Sizes on Wastewater Purification .....                                                                                         | ..... ZHAO Lin-li, SHAO Xue-xin, WU Ming, <i>et al.</i> (4236)          |
| Substrate Flow by Different Biochemical Activities in the Urban Sewage Network .....                                                                                        | ..... YAO Xiang-yi, SHI Xuan, SANG Lang-tao, <i>et al.</i> (4242)       |
| Reducing Membrane Fouling from Micro-Flocculation in a Humic Acid Ultrafiltration Process .....                                                                             | ..... WANG Xu-dong, SHI Cai-xia, LIAO Zheng-wei, <i>et al.</i> (4249)   |
| Enhanced Degradation of Aniline by PS Oxidation in the Presence of UV and Ferric Oxalate .....                                                                              | ..... HAN Dong-hui, LI Ying, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (4257)          |
| Behavior and Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Coking Wastewater of A/O <sup>2</sup> and A/O/H/O Processes .....                                    | ..... WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, LIU Guo-xin, <i>et al.</i> (4265)      |
| Effects of Long-term Side Stream Extracton on Phosphorus Removal and Recovery Performance of EBPR System .....                                                              | ..... YU Xiao-jun, LI Jie, ZHOU Meng, <i>et al.</i> (4274)              |
| Effect of NaCl Salinity on Extracellular Polymeric Substances and Bioflocculation of Anoxic Sludge in A <sup>2</sup> /O Process .....                                       | ..... ZHANG Lan-he, TIAN Rui, GUO Jing-bo, <i>et al.</i> (4281)         |
| Effect of Temperature and pH on Nitrogen Conversion in Feammox Process .....                                                                                                | ..... CHEN Fang-min, JIN Run, YUAN Yan, <i>et al.</i> (4289)            |
| Inhibitory Kinetics of Free Ammonia (FA) on Ammonia-oxidizing Bacteria (AOB) .....                                                                                          | ..... SUN Hong-wei, YU Xue, GAO Yu-xue, <i>et al.</i> (4294)            |
| Effect of HRT on Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Heterotrophic Denitrification .....                                                                                     | ..... AN Fang-jiao, ZHAO Zhi-chao, HUANG Li, <i>et al.</i> (4302)       |
| Reactivation Performance of Nitrosation Flocculent Sludge After Long-term Storage .....                                                                                     | ..... LI Tian, WEI Fan-kai, WANG Yu-chang, <i>et al.</i> (4310)         |
| Analysis of Characteristics and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils in the Xijiang River Draining of Guangxi .....                                                    | ..... SONG Bo, ZHANG Yun-xia, PANG Rui, <i>et al.</i> (4317)            |
| Soil Organic Carbon of Purple Soil as Affected by Different Application of Biochar .....                                                                                    | ..... LUO Mei, TIAN Dong, GAO Ming, <i>et al.</i> (4327)                |
| Effects of Straw and Biochar Addition on Soil Carbon Balance and Ecological Benefits in a Rape-maize Rotation Planting System .....                                         | ..... LI Jiao, TIAN Dong, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4338)              |
| Potential to Ensure Safe Production from Rice Fields Polluted with Heavy Cadmium by Combining a Rice Variety with Low Cadmium Accumulation, Humic Acid, and Sepiolite ..... | ..... XIE Xiao-mei, FANG Zhi-ping, LIAO Min, <i>et al.</i> (4348)       |
| Interactive Effects of Ozone and Drought on Antioxidant Enzyme Activities of Poplar Leaves .....                                                                            | ..... ZHOU Hui-min, LI Pin, GAO Feng, <i>et al.</i> (4359)              |
| Effects of Different Levels of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Enzyme Activity and Distribution of Thermotolerant Coliforms .....                                   | ..... HAN Yang, LI Ping, QI Xue-bin, <i>et al.</i> (4366)               |
| Characteristics of Heavy Metals in Chicken Manure Organic Fertilizers in the Huang-Huai-Hai Region and related Environmental Risk Assessment .....                          | ..... LI Fa, XU Ying-ming, WANG Lin, <i>et al.</i> (4375)               |
| Heavy Metal Content of Rural Living Solid Waste and Related Source and Distribution Analysis .....                                                                          | ..... JIN Qi, GAO Hong, YUE Bo, <i>et al.</i> (4385)                    |