

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第12期

Vol.35 No.12

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

北京雾霾天气生物气溶胶浓度和粒径特征	高敏,仇天雷,贾瑞志,韩梅琳,宋渊,王旭明(4415)
杭州大气颗粒物散射消光特性及霾天气污染特征	徐昶,叶辉,沈建东,孙鸿良,洪盛茂,焦荔,黄侃(4422)
太原市采暖季 PM _{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价	李丽娟,温彦平,彭林,白慧玲,刘凤娴,史美鲜(4431)
成都市城区 PM _{2.5} 中二次水溶性无机离子污染特征	李友平,周洪,张智胜,王启元,罗磊(4439)
北京市臭氧的时空分布特征	王占山,李云婷,陈添,张大伟,孙峰,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,潘丽波(4446)
南京北郊大气 VOCs 变化特征及来源解析	安俊琳,朱彬,王红磊,杨辉(4454)
祁连山中段降水化学的环境意义研究	李宗杰,李宗省,田青,宋玲玲,贾冰,郭瑞,宋耀选,苏索南,韩春坛(4465)
中亚热带典型林分不同层次氮硫湿沉降动态变化	孙涛,马明,王定勇,黄礼昕(4475)
本底大气 CO ₂ 观测分析过程中 QA/QC 方法的建立与评估	刘立新,周凌晔,夏玲君,王红阳,方双喜(4482)
轻型汽油车 CH ₄ 和 N ₂ O 排放因子研究	何立强,宋敬浩,胡京南,解淑霞,祖雷(4489)
煤燃烧超细微粒粒径谱演变及排放因子的实验研究	孙在,杨文俊,谢小芳,陈秋方,蔡志良(4495)
春、夏季长江口及其邻近海域溶解 N ₂ O 的分布和海-气交换通量	王岚,张桂玲,孙明爽,任景玲(4502)
珠江口水体组分的吸收特性分析	王珊珊,王永波,扶卿华,尹斌,李云梅(4511)
河流汇合处水体磷素形态特征及紫外光照的影响:以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江交汇为例	闫金龙,江韬,魏世强,李玲,郭念,李璐璐,刘江(4522)
基于太湖微囊藻毒素的叶绿素 a 阈值研究	魏代春,苏婧,纪丹凤,伏小勇,王骥,霍守亮,崔驰飞,唐军,席北斗(4530)
百花湖周边城市近郊小流域氮、磷输出时空特征	冯源嵩,林陶,杨庆媛(4537)
自然光照对淹水条件下三峡库区消落带典型土壤磷释放影响	郭念,江韬,魏世强,闫金龙,梁俭,卢松,高洁(4544)
垂直流人工湿地 LDHs 覆膜改性沸石基质强化除磷效果及其机制	张翔凌,陈俊杰,郭露,陈巧珍,王晓晓(4553)
三峡库区消落带 3 种植物淹水后汞的动态变化及其对水体的影响	张翔,张成,孙荣国,王定勇(4560)
纳米 TiO ₂ 对底泥中汞释放及活化的影响	张金洋,李楚娴,王定勇,周雄,孙荣国,张成,梁丽(4567)
首都水源地——洋河流域人为源多环芳烃(PAHs)排放清单估算及其影响分析	高佳佳,罗维,奚晓霞(4573)
石化工业园区有毒废水来源识别研究	杨茜,于茵,周岳溪,陈学民,伏小勇,王淼(4582)
污水处理厂中红霉素抗药性基因的污染特征及选择性因子	李侃竹,吴立乐,黄圣琳,何势,刘振鸿,薛罡,高品(4589)
2 种填料 BAF 深度处理印染废水沿程污染物变化规律研究	刘俊峰,范举红,刘锐,陈吕军,张永明(4596)
硫酸盐还原型甲烷厌氧氧化菌群驯化及其群落特征	席婧茹,刘素琴,李琳,刘俊新(4602)
MBR 处理腈纶废水的效能及微生物群落结构分析	魏健,宋永会,赵乐(4610)
制革废水的厌氧氨氧化 ABR 脱氮工艺研究	曾国驱,贾晓珊(4618)
生物滤池工艺的数值模拟与运行优化	邹宗森,施汉昌,陈向强,谢小青(4627)
气升装置对厌氧氨氧化污泥形态及性能的影响	李祥,黄勇,袁怡,周呈,陈宗短,张大林(4636)
给水厂污泥改良生物滞留填料除磷效果的研究	王建军,李田,张颖(4642)
北京地区不同城镇污水处理厂堆肥污泥的营养含量和重金属污染	白莉萍,齐洪涛,伏亚萍,李萍(4648)
电子垃圾拆解区污染池塘中鱼类多氯联苯及其代谢产物的组织分配及暴露风险	唐斌,罗孝俊,曾艳红,麦碧娴(4655)
广东罗非鱼养殖区水体和鱼体中重金属、HCHs、DDTs 含量及风险评价	谢文平,朱新平,郑光明,马丽莎(4663)
崇明典型水生生物中雌激素含量和分布特征	耿婧婧,叶爱丽,杨毅,刘敏,张婧,周俊良(4671)
啮虫脒光催化降解动力学的优化及其降解产物的分析	周文常,阳海,胡志斌,兰世林(4678)
氮添加对生长季寒温带针叶林土壤有效氮和酸化的影响	陈高起,傅瓦利,罗亚晨,高文龙,李胜功,杨浩(4686)
土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响	李鉴霖,江长胜,郝庆菊(4695)
上海市郊设施大棚次生盐渍化土壤盐分含量调查及典型对应分析	唐冬,毛亮,支月娥,张进忠,周培,柴晓彤(4705)
某铅酸蓄电池污染场地表层土壤重金属 Pb 空间分布预测研究	刘庚,牛俊杰,张朝,赵鑫,郭观林(4712)
海泡石对镉-铅复合污染钝化修复效应及其土壤环境质量影响研究	孙约兵,王朋超,徐应明,孙扬,秦旭,赵立杰,王林,梁学峰(4720)
盐碱区不同开发年限水田温室气体排放规律及影响因素	汤洁,方天儒,侯克怡,赵仁竹,梁爽(4727)
不同热解温度生物炭对 Cd(II) 的吸附特性	王震宇,刘国成,Monica Xing,李锋民,郑浩(4735)
碱土金属钙沉积对 Mn-Ce/TiO ₂ 低温 SCR 催化剂脱硝性能的影响	周爱奕,毛华峰,盛重义,谭月,杨柳(4745)
国内外水泥工业大气污染物排放标准比较研究	江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4752)
我国水泥工业大气污染物排放标准的修订历程与思考	江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4759)
《环境科学》第35卷(2014年)总目录	(4767)
《环境科学》征订启事(4617) 《环境科学》征稿简则(4654) 信息(4474, 4529, 4536, 4744)	

首都水源地——洋河流域人为源多环芳烃 (PAHs) 排放清单估算及其影响分析

高佳佳^{1,2}, 罗维^{2*}, 奚晓霞¹

(1. 兰州大学大气科学学院, 半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州 730000; 2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 洋河流域位于京西北上风向, 是北京重要水源地和生态保护屏障, 我国北方典型的农牧交错带和生态脆弱敏感区, 也是北京-张家口 2022 年冬奥会的申办地, 具有极重要的战略地位. 建立洋河流域大气 PAHs 排放清单, 分析其可能来源及影响, 通过气团后向轨迹辨识其区域 PAHs 传输途径, 对于北京及张家口地区环境 PAHs 的污染控制具有重要的指导意义. 本研究收集和分析了洋河流域大量工、农业生产和居民生活等相关数据资料, 评估了流域各行业、各县市 PAHs 排放因子, 单体排放量及其影响因素, 通过气团后向轨迹模型分析了 PAHs 的传输轨迹. 结果表明, 洋河流域大气 PAHs 排放量为 4.4×10^2 t. 从排放行业看, 煤炭燃烧源、秸秆燃烧源是洋河流域大气 PAHs 的重要排放源, 其贡献率分别为 76% 和 16%. 从排放地区看, 宣化县的排放量最大, 约 49 t; 其次分别为: 兴和县、天镇县、怀来县、万全县, 排放量分别约为: 36、32、24 和 15 t. 从排放谱看, 低环(2~3 环)与高环分子(4~6 环)PAHs 的排放量相差不大, 分别约占 PAHs 排放总量的 50% 左右. 洋河流域单位 PAHs 总排放量与各县市的工业生产总产值 ($r = 0.96, P < 0.05$)、居民收入 ($r = 0.94, P < 0.05$)、人口密度呈正相关 ($r = 0.92, P < 0.05$), 与单位国土面积呈负相关 ($r = -0.9, P < 0.05$), 与农业生产总值没有显著相关 ($r = 0.026, P > 0.01$). 流域内 PAHs 的较高排放与该地以煤炭为主的能源结构和较高的居民消费水平有关. 基于气团后向轨迹模拟和洋河流域 PAHs 排放, 可以推断洋河流域已成为 PAHs 的高污染风险区, 通过西北气流可将流域高浓度的 PAHs 输送至北京, 对北京的生态环境和人体健康造成潜在风险.

关键词: 优控污染物; 大气污染; 排放量估算; 后向轨迹分析; 排放源谱; 洋河流域

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)12-4573-09 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2014.12.021

Estimation Inventory of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from Anthropogenic Sources and Its Impacts within the Yanghe Watershed, an Important Water-Source Site of Beijing, China

GAO Jia-jia^{1,2}, LUO Wei², XI Xiao-xia¹

(1. Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: The Yanghe Watershed, situated at the upwind of Beijing, is an important water-source site and ecologic protection barrier for Beijing and Zhangjiakou cities. The Yanghe Watershed is also a farming-pastoral transitional area and an ecologically vulnerable and sensitive region, as well as the place applying for Winter Olympic Game in 2022. Establishment of atmospheric emissions inventory of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and identification of its sources within the Yanghe Watershed and its possible transportation paths to Beijing can help us get a better understanding of regional environmental pollution (especially air environmental pollution) in Beijing-Zhangjiakou area. In the present study, PAHs emission from different counties and cities within the Yanghe Watershed in 2012 was calculated based on the statistical data of local industries, agriculture and resident living while PAHs emission factors were estimated. According to the cluster analysis for air transport trajectories, main categories of air masses were obtained. Results indicated that total emission of PAHs in 2012 was 4.4×10^2 t. Coal combustion and crop-straw burning were the most important emission sources of PAHs, accounting for 76% and 16% of total emission of PAHs, respectively. Xuanhua county had the greatest emission of PAHs (49 t), followed by Xinghe (36 t), Tianzhen (32 t), Huailai (24 t) and Wanquan (15 t). In emission of 16 isomers of PAHs, the emission of high molecular weight isomers containing 4-6 rings was approximate to that of low molecular weight isomers containing 2-3 rings, accounting for approximately 50% of total emission of PAHs. Emission of PAHs had positive correlations with gross industrial

收稿日期: 2014-04-30; 修订日期: 2014-07-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41271502, C031001); 中国科学院战略性先导科技专项 (B 类) (XDB03000000, XDB03020400, XDB03020404, XDB03030504); 科技部科技基础性工作专项 (2013FY111100)

作者简介: 高佳佳 (1986 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境化学, E-mail: gaojj12@lzu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: luow@rcees.ac.cn

production (GIP) ($r=0.96$, $P<0.05$) and resident income (RI) ($r=0.94$, $P<0.05$) and population density (PD) ($r=0.92$, $P<0.05$), but negatively correlated with land area (LA) ($r=-0.9$, $P<0.05$) and no significant correlation with gross output value of agriculture (GOA) ($r=0.026$, $P>0.01$). The high emission of PAHs within the Yanghe Watershed was associated with local energy structure and residents' consumption level. Combined the back trajectory analysis with PAHs emission, high amount of PAHs could be transported to Beijing by northwest airflow, suggesting its potential ecological risk and human health effect in Beijing.

Key words: priority pollutants; air pollution; emission estimation; back trajectory analysis; emission profiles; the Yanghe Watershed

多环芳烃(PAHs)是美国环境保护署(US EPA)公布的129种优控污染物之一,包括16种单体^[1].其致癌性、大气的长距离迁移及光化学反应等理化性质受到国内外学者的广泛关注^[2~7].因此,科学、详尽的PAHs排放清单是建立空气质量模型、模拟长距离迁移的前提,也是制定大气复合污染控制措施的基础.国内外学者在PAHs来源识别、排放因子、源特征等方面做了大量工作,也对PAHs排放清单做了一些研究^[8~15],但是这些清单多以国家或省为研究对象,缺少针对生态敏感区PAHs排放特征的研究,使得一些特殊区域的PAHs污染控制政策制定和管理缺乏针对性.

洋河流域位于北京上风向,是北京天然生态保护屏障和水源地,是我国北方典型的农牧交错带和生态脆弱和敏感区,而且流域腹地张家口也是2022年冬奥会的申办地,因而洋河流域的生态环境保护对于京津冀首都经济圈的可持续发展具有极其重要的战略地位.由于洋河河道两岸工业及厂矿企业集中分布,农业活动强度较高,PAHs排放可能严重影响当地及其下风向——首都北京的环境质量和人体健康安全.已有研究表明,洋河流域及官厅水库地区的水体^[16]、沉积物、土壤^[17, 18]、大气^[19]均受到PAHs污染,企业污水、废弃物排放可能是其主要来源^[20].洋河水体及沉积物中的苯并[a]芘(BaP)含量^[21]已明显高于国际致癌中心规定的致癌标准,可能对于区域生态环境产生潜在的风险和危害.国内学者运用污染物空间多介质迁移模型对北京附近区域BaP进行的模拟,结果发现BaP主要迁移类型为大气迁移及沉降(大气-土壤,大气-河流)^[22];有学者从天气流场方面进一步模拟了北京外来污染物输送,得出在西北及偏西气流作用下污染物可从太原、包头等地途经张家口地区,并与张家口地区所排放的PAHs进行二次反应,最后输送至北京,影响首都环境质量^[23~27],因而估算和分析洋河流域PAHs排放清单及其影响、辨识流域大气PAHs向北京的传输途径,以期京津冀经济圈大气污染治理、生态环境保护 and 人体健康风险的防范和控制提供重要的数据支持,也为北京-张家口申办2022年冬奥会的

举办场地的环境质量安全评价及其调控提供重要的决策支持.

1 材料与方法

1.1 研究区域

洋河流域是首都北部永定河上游的两大支流,属于海河流域.洋河发源于内蒙古自治区乌兰察布市的兴和县和山西省大同市的阳高县,汇合南洋河、西洋河后称洋河,全长262 km,流域面积15 078 km².洋河流域共包括9个县区,总人口达509.66万.主要流经张家口市怀安、万全、宣化县和张家口市南部,进入宣化区,又经下花园区,在怀来县夹河村附近与桑干河汇合,注入官厅水库(图1).洋河流域的核心区域——张家口是北方早期重要的工业城市,这里有大型国有热电企业、石油化工企业以及国家重点大型钢铁企业、煤矿企业等,包括一些以煤炭为主的传统产业.张家口市工业区主要包括桥东区装备制造区、下花园工业区、宣化县工业区、怀来县工业区.洋河流域总体地势呈现出西北高,东南低的趋势,平均海拔1 000 m以上.流域大部分地区属于典型大陆性气候,具有寒暑剧变的特点,即冬季漫长寒冷,夏季短暂温热,春季干旱风大,常年主导风向为西北风.

1.2 排放源及排放因子

首先确定研究区域PAHs的主要排放源,然后收集PAHs排放源相关数据和各种排放因子,据此估算流域内PAHs的排放量及贡献率.

涉及人为的排放源主要包括热电及工业燃煤、家庭燃煤、炼焦用煤、非交通油、交通油、天然气等.相关数据主要引自于河北、山西、内蒙古、张家口、乌兰察布、大同市统计年鉴和统计局数据以及相关省市国民经济和社会发展公报^[28].根据人口和人均用煤量,估算生活燃煤.依据机动车保有量、单车耗油量和里程数估算交通燃油量.结合各地区秸秆的谷草比^[29]、秸秆产生量和粮食种植面积估算各地区秸秆露天焚烧量.相关的排放因子主要引自于Vardar等^[30]、Chen等^[31]、Xu等^[32]的研究成果.

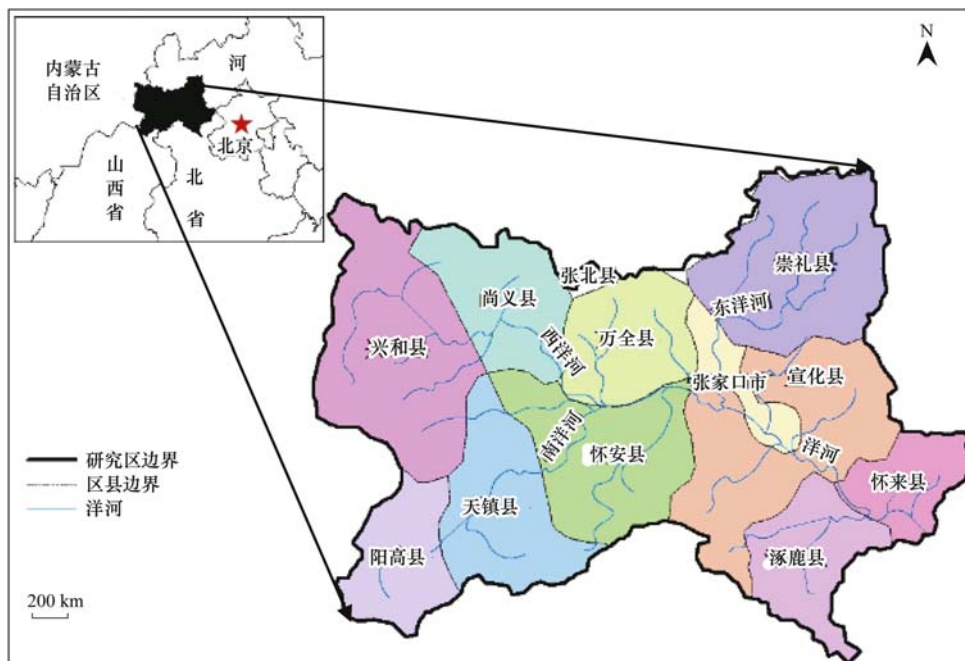


图1 洋河地理位置示意

Fig. 1 Location of the Yanghe Watershed, China

PAHs 排放量的计算公式如下:

$$E_{i,j} = \sum_{k=1}^n EF_{i,j,k} EA_{i,j,k}$$

式中, $E_{i,j}$ 、 $EF_{i,j,k}$ 和 $EA_{i,j,k}$ 分别为排放量、排放因子及排放消耗量, i 为地区(县、市、区); j 为能源类型; n 为能源消耗种类, $n=7$; k 为 PAHs 种类, $k=16$.

1.3 数据处理与统计

运用 Origin 9.0 软件和 SPSS 13.0 软件对数据进行统计分析. 为了使数据服从正态分布, 对所有数据进行对数转换. 对回归系数进行了 T 检验, 如果 $P < 0.05$, 则回归系数具有显著性.

1.4 后向轨迹模型及参数

后向轨迹模式是美国国家海洋大气局开发的具有处理多种气象输入场, 多种物理过程和不同类型排放源的较完整的输送、扩散和沉降的综合模式系统. 气象资料为全球资料同化系统(GDAS)资料, 该资料水平分辨率为 191 km, 垂直方向从 1 000 ~ 50 hPa 分为 12 个等压面层, 时间间隔为 6 h.

聚类分析在气团轨迹分析软件中完成. 设将 n 个样本分为 k 类, 首先从 n 个数据对象任意选择 k 个对象作为初始聚类中心, 而对于所剩下其它对象根据它们与这些聚类中心的相似度(距离)分别将它们分配给与其最相似的(聚类中心所代表的)聚类, 然后再计算每个所获新聚类的聚类中心(该聚

类中所有对象的均值). 不断重复这一过程, 直到标准测度函数开始收敛为止. 一般都采用均方差作为标准测度函数. k 个聚类本身尽可能地紧凑, 而各聚类之间尽可能地分开.

2 结果与讨论

2.1 洋河流域与 PAHs 相关能源的年消耗量

由表 1 说明: 2012 年洋河流域煤炭消耗量为 7.6×10^7 t. 发电及工业总耗煤量占煤炭耗煤量 85%, 成为主要的煤耗污染源; 家庭用煤量和炼焦用煤量所占煤炭消耗量的比例分别为 11% 和 3.5%. 机动车保有量为 6.9×10^5 辆, 农业机械总动力为 72×10^4 kW·h.

洋河流域不同市县的能源消耗量及其结构是不同的. 张家口、兴和、天镇县能源总消耗量分别占洋河流域能源总消耗量的 86%、6.8% 和 5.9%. 由于张家口面积占洋河流域面积 80% 以上, 且是洋河流域工业聚集区, 因而能源消耗占洋河流域能源总消耗量的比例最大.

张家口煤炭消耗量、秸秆燃烧量、交通和非交通用油分别占张家口总耗能量的 86%、5%、2.2% 和 2.6%. 张家口所辖市县中宣化、怀来、怀安和万全县分别占张家口总耗能量的 12%、7.7%、4.6% 和 4.2%. 宣化和怀来县的煤炭消耗量为 8.1×10^6 t 和 5.1×10^6 t, 分别占张家口总耗能量的 14% 和 7.2%.

表 1 2012 年洋河流域与 PAHs 相关的能源消耗量

Table 1 Energy consumption within the Yanghe Watershed in 2012

地区	能源消耗量 ¹⁾						
	发电及工业用煤	家庭燃煤	炼焦用煤	非交通用油	交通用油	天然气	秸秆燃烧
兴和县	4.9×10^6	33×10^4	2.4×10^4	—	15×10^4	—	13×10^4
天镇县	3.4×10^6	55×10^4	—	1.4×10^4	73×10^4	0.002 6	9.9×10^4
宣化县	6.5×10^6	64×10^4	90×10^4	2.0×10^4	64×10^4	—	26×10^4
怀安县	2.6×10^6	40×10^4	3.5×10^4	0.54×10^4	14×10^4	—	6.8×10^4
万全县	2.2×10^6	32×10^4	1.8×10^4	0.36×10^4	32×10^4	—	11×10^4
怀来县	4.5×10^6	55×10^4	6.4×10^4	7.8×10^4	20×10^4	—	8.4×10^4
流域其余县、区	3.7×10^7	5.6×10^6	1.6×10^6	1.7×10^6	24×10^4	0.53	4.0×10^6
合计	6.1×10^7	8.4×10^6	2.6×10^6	1.8×10^6	2.4×10^6	0.53	4.8×10^6

1) 天然气单位为 10^8 m^3 , 其余单位为 t

内蒙的兴和县和山西天镇县的产业结构主要以农牧业为主,但对煤炭消耗量依然很大,分别占兴和、天镇县总耗电量的 95% 和 82%。兴和、天镇县的交通用油量分别占兴和、天镇县总耗电量的 2.7% 和 15%。兴和县和天镇县的秸秆燃烧比例较低,占兴和、天镇县总耗电量的 2.4% 和 2.1%,其排放量仅次于宣化县(2.9%)。这可能与耕地面积相关,兴和、天镇的农业种植面积分别为 $6.7 \times 10^3 \text{ m}^2$ 和 $2.4 \times 10^4 \text{ m}^2$,均小于宣化县的种植面积($2.6 \times 10^4 \text{ m}^2$),因而其秸秆焚烧量比宣化地区少。

2.2 洋河流域 PAHs 的排放清单

由表 2 说明:2012 年洋河流域大气 16 种 PAHs 总排放量约为 $4.4 \times 10^2 \text{ t}$,其中来自煤炭燃烧的 PAHs 排放量约为 $3.4 \times 10^2 \text{ t}$ 。占洋河流域 PAHs 总排放量的 76%,秸秆燃烧占流域 PAHs 总排放量的 16%,其余不足 10%。这与全国 PAHs 排放清单的研究结果基本一致^[11]。

发电及工业用煤是煤炭燃烧的主要 PAHs 排放源,占洋河流域煤炭燃烧 PAHs 总排放量 53%;其次是家庭用煤,占流域煤炭燃烧 PAHs 总排放量的

表 2 2012 年洋河流域不同能源消耗排放的 PAHs 估算清单/t

Table 2 Emission inventory of PAHs from different energy-consumptions within the Yanghe Watershed in 2012/t

地区	PAH 排放量/t							总排放量
	发电及工业用煤	家庭燃煤	炼焦用煤	非交通用油	交通用油	天然气	秸秆燃烧	
兴和县	13	8	0.00	0.09	6.4	0.27	1.5	29
天镇县	24	4.8	0.34	0.00	1.4	0.00	2	32
宣化县	17	9.3	13	0.12	5.6	0.00	3.9	49
怀来县	12	8	0.89	0.46	1.8	0.00	1.3	24
万全县	5.8	4.7	0.25	0.02	2.8	0.00	1.7	15
怀安县	7	5.8	0.49	0.03	1.2	0.54	1	16
流域其余县、区	1.0×10^2	81	22	10	2.1	0.00	60	2.8×10^2
合计	1.8×10^2	1.2×10^2	37	11	21	0.81	71	4.4×10^2

36%,炼焦用煤占流域煤炭燃烧 PAHs 总排放量的 11%。

总体而言,张家口的 PAHs 排放量占洋河流域 PAHs 总排放量的 86%,天镇和兴和县分别占流域 PAHs 总排放量的 7.2%、6.6%。

张家口煤炭燃烧、秸秆燃烧、交通和非交通用油产生的 PAHs 排放量分别占张家口 PAHs 总排放量的 75%、18%、3.5% 和 2.7%。宣化县 PAHs 总排放量在张家口地区最高,占张家口 PAHs 总排放量的 13%,其次是怀来、怀安、万全县,分别占张家口 PAHs 总排放量的 6.2%、4.2% 和 3.9%。

兴和县煤炭燃烧、交通、非交通用油产生的

PAHs 排放量分别占兴和县 PAHs 总排放量的 73%、22%、0.02%,其余不足 10%。

天镇县煤炭燃烧、秸秆燃烧产生的 PAHs 排放量占天镇县 PAHs 总排放量的 91%、6.3%,其余不足 5%。

不同地区、不同排放源会导致不同的排放结果,这主要是与当地的经济发展程度和能源结构有关。以天镇、兴和、宣化县为例,天镇、兴和县的生物质燃烧(秸秆燃烧)和煤燃烧所产生的 PAHs 均大于宣化县的生物质燃烧(秸秆燃烧)和煤燃烧所产生的 PAHs 排放量。主要是因为宣化县经济发展和人民生活对高耗能、高污染产业的依赖程度远低于

天镇、兴和县。虽同处于煤炭高消耗区,但煤炭的质地和燃烧方式不同,也会造成排放量的不同,例如,蜂窝煤和煤块两种煤的地质成熟度不同,造成排放差别幅度高达 1~2 个数量级^[12, 33]。另外,能源消耗与气象要素,纬度也有一定的联系,天镇、兴和县海拔约 1 400 m,较宣化海拔高,靠近草原地区,因此冬季采暖用煤量大^[34]。

各地区不同的 PAHs 排放量与地区的支柱产业相关。研究表明:长江三角洲^[35]多环芳烃排放量为 22 t,其支柱产业热电、纺织是其主要排放源。珠江三角洲^[36, 37] PAHs 年排放量为 55 t,其支柱产业家具制造业占总排放量 23%,而快速发展的房地产业促使建筑涂料使用,产生大量污染物,占排放总量 21%。成都作为西南地区典型城市^[38],其支柱产业电力和冶金行业对 PAHs 的年贡献量分别为 0.02×10^4 t、 0.1×10^4 t,照明电器行业由于大量使用天然气导致 PAHs 年排放量上万吨,所有这些支柱产业产生的 PAHs 年排放量占全部排放量的 84%。洋河流域作为北方重工业典型区域,PAHs 年排放总量远远高于长三角和珠三角地区。其排放源煤炭和石化等大量不完全燃烧所导致的 PAHs 也不同于全国其他地区。因而,针对洋河流域 PAHs 的排放,应当制定不同于其他地区的管理对策。

2.3 洋河流域大气中 PAHs 排放源谱分析

由洋河流域各县市 PAHs 排放谱(图 2)可知: Nap 的排放量最高,贡献率达到 21%, Nap 的排放可能与重工业燃油、煤焦油或金属冶炼有关。Phe、

Flu、Pyr 和 BaP 排放贡献率分别占 12%、9.1%、8.4% 和 7.4%。Phe 和 Flu 的排放与燃煤、垃圾焚烧及汽车尾气相关,而 BaP 是煤炭等不完全燃烧的典型代表^[39]。本研究中洋河流域大部分地区作为重工业基地,燃煤燃油消耗量大,且粮食作物种植面积广大,因此 PAHs 排放量大,这与实际情况符合。

洋河流域向大气排放的高环 PAHs(4~6 环)占 PAHs 总排放量的 49%,低环 PAHs(2~3 环)占 PAHs 总排放量的 51%。发电及工业用煤、炼焦用煤对流域高环 PAHs 的贡献率高达 24%;家庭燃煤、交通用油和非交通用油、生物质燃烧对流域高环 PAHs 排放的贡献率分别为 22% 和 3.6%。值得注意的是,兴和县[图 2(c)]生物质燃烧排放的高环 PAHs 对 PAHs 总排放量的贡献率为 19%,低于张家口[图 2(b)](29%)和天镇县[图 2(d)](26%)的生物质燃烧排放的高环 PAHs 对 PAHs 总排放量的贡献率。其他能源燃烧排放的高环 PAHs 对 PAHs 总排放量的贡献率为 28%。Zhang 等^[8]对全球大气 PAHs 排放量估算,得出 5~6 环的 PAHs 仅占总排放量的 2.4%。尽管如此,也会对人体健康产生很大危害^[40]。美国 EPA 规定了 7 种具有致癌作用的 PAHs:荧蒽(Flu)、苯芘蒽(BaA)、苯并[b]荧蒽(BbF)、苯并[k]荧蒽(BkF)、苯并[a]芘(BaP)、茚芘(InP)、二苯并蒽(DBA),这 7 种致癌物质在洋河流域的排放量达到 1.5×10^2 t(表 3),占总排放量 34%,其中荧蒽(Flu)和苯并[a]芘(BaP)分别约为 40 t 和 32 t。

为了进一步探讨大气 PAHs 排放对人体健康的

表 3 洋河流域 2012 年 PAHs 排放清单
Table 3 Emission inventory of PAHs within the Yanghe Watershed in 2012

PAHs	排放量/t								占流域 PAHs 比例/%
	兴和	天镇	怀来	怀安	万全	宣化	张家口(县区)	合计	
Nap	6.7	7.3	4.5	2.9	2.9	8.2	79	1.1×10^2	25
Acy	1.8	0.78	0.94	0.69	0.67	2.2	18	25	5.8
Ace	1.4	1.3	0.92	0.62	0.57	2.1	17	24	5.5
Fl	1.6	1.7	1.2	0.78	0.76	2.6	19	28	6.1
Phe	4.0	4.7	3.0	1.9	1.8	5.5	45	66	15
Ant	1.5	1.1	1.1	0.75	0.73	2.4	16	24	5.4
Flu	2.9	3.5	2.4	1.5	1.4	4.4	34	50	11
Pyr	2.5	3.5	2.3	1.5	1.3	4.1	31	46	10
BaA	1.3	0.94	0.98	0.67	0.64	2.1	15	22	4.9
Cha	1.3	0.83	0.92	0.65	0.64	2.1	14	20	4.7
BbF	1.3	1.1	1.0	0.71	0.66	2.2	15	22	5
BkF	0.93	0.42	0.65	0.47	0.46	1.6	10	15	3.4
BaP	2.0	3.2	2.1	1.3	1.1	3.8	27	41	9.2
InP	1.0	0.58	0.8	0.56	0.53	1.8	12	17	4
DBA	0.99	0.78	0.87	0.61	0.54	1.8	13	19	4.2
BgP	1.1	0.79	0.88	0.61	0.58	2.0	14	20	1.4

危害,通过计算苯并[a]芘(BaP)的量来表征 PAHs 对环境及人体的危害程度.我国大气中 BaP 的含量与 PAHs 总量有较好相关性($P < 0.001$),因此可通

过 BaP 来反映大气中 PAHs 污染及潜在风险^[41]. 洋河流域排放的 PAHs 中 BaP 的量为 0.04 t ~ 21 t. BaP 排放量最高的行业是发电或石油化工行业,其

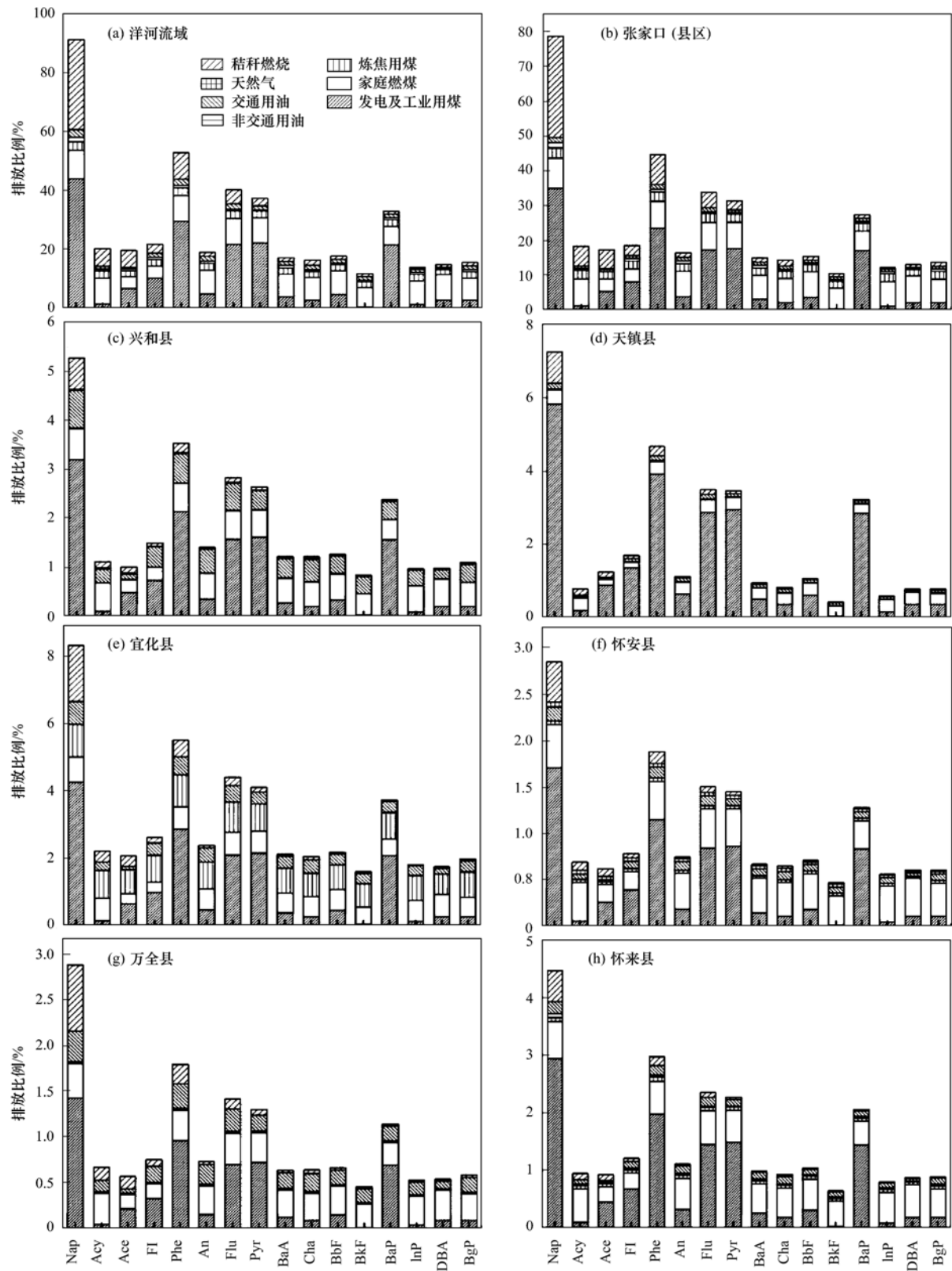


图 2 2012 年洋河流域 PAHs 排放谱

Fig. 2 PAH emission profiles within the Yanghe Watershed in 2012

次是家庭冬季采暖或薪柴燃烧,最低是天然气燃烧。BaP 排放量最高的地区在宣化县[图 2(e)],为 3.8 t,这与该地区大量燃煤及秸秆燃烧有关。其次是天镇和兴和县,分别为 3.2 t 和 2 t,排放量最小的地区出现在万全[图 2(g)]、怀安县[图 2(f)],分别为 1.3 t 和 1.1 t。目前,国际上对 BaP 没有设立统一的标准,但是我国主要工业城市的大气中 BaP 的含量普遍较高。有研究显示,太原大气中 BaP 的含量高达 $36.7 \mu\text{g} \cdot 1000 \text{ m}^{-3}$,估算年排放量为 5.1 t,存在较大的环境风险。环渤海西部地区大气中 BaP 含量为 $0 \sim 31 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$,土壤中 BaP 含量 $35 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,沉积物中 BaP 含量均值为 $34 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ [16, 17, 33]。辽河流域[42]沉积物 BaP 含量为 $1.4 \sim 14 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$;成渝经济区[43]河流表层沉积物中 BaP 含量 $2.1 \sim 9.1 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 。无论在大气还是土壤、沉积物中,洋河流域的 BaP 含量均处于高值区,对下游官厅水库的水源补给和生态环境可能造成严重威胁。

2.4 PAHs 年排放量与其他要素的相关性

为了进一步了解洋河流域大气中 PAHs 排放的空间分布差异,探讨 PAHs 年排放量与其他要素的相关性,本研究采用工业生产总值(gross industrial production, GIP, 单位: 10^9 元)、农业总产值(gross output value of agriculture, GOA; 单位: 10^9 元)、居民收入(residents income, RI, 单位: 10^4 元)、人口密度(population density, PD, 单位: $\text{per} \cdot \text{km}^2$)和单位国土面积(land area, LA; 单位: 10^3 km^2)为指标,计算流域内 PAHs 排放的相关指标的相关性。其中,前 3 个指标是与 PAHs 排放相关、衡量各地区经济发展与人民生活的综合环境成本;后两个指标是单位面积 PAHs 的排放量,反映 PAHs 污染的绝对密度[11]。模拟结果如下:

$$\lg E = -0.35 + 0.31 \lg \text{GIP} + 1.2 \text{RI} + 0.27 \text{PD} - 0.22 \text{LA}$$

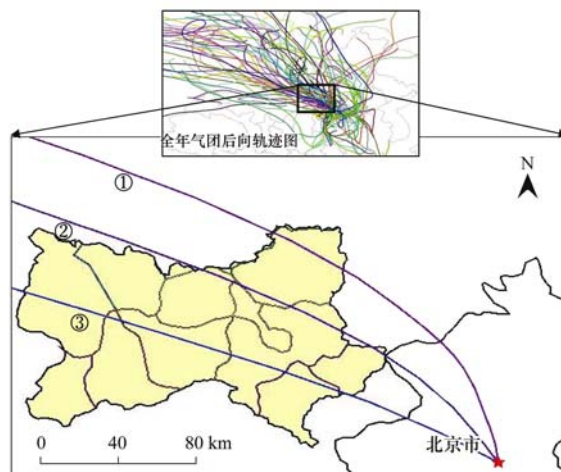
回归方程拟合优度系数 $R^2 = 0.95$,经 F 检验,显著性概率小于 0.05,认为回归方程是显著的。

从图 2 及回归方程可以看出,PAHs 总排放量与工业生产总值($r = 0.96, P < 0.05$)、居民收入($r = 0.94, P < 0.05$)和人口密度($r = 0.92, P < 0.05$)呈正相关性。国土面积与 PAHs 排放量呈负相关性($r = -0.9, P < 0.05$)。而农业总产值与 PAHs 排放量没有显著相关性($r = 0.026, P > 0.01$),因此不列入相关因子考虑范围。这说明随着工业生产总值的增加,煤炭资源消耗量越大,随之产生的不完全燃烧污染物越多;居民人均收入越多,购买的消费品越

多,例如塑料的使用,饮食中的烧烤,都会产生 PAHs,例如美国大气 PAHs 排放量中,5.8% 的苯并芘含量来自于居民消费品[8]。人口密度越大则产生的 PAHs 越多。国土面积越大,单位面积排放的 PAHs 相对较小。

2.5 大气中 PAHs 传输轨迹分析

本研究运用气团后向轨迹模型,对北京地区的气团轨迹进行了初步模拟(图 3)。



①、②、③分别表示距地 500 m、1 000 m、1 500 m 高度的气流

图 3 2012 年 10 月~2013 年 10 月北京西北方向
全年气团后向轨迹图模拟

Fig. 3 Air mass back trajectories in north-west of Beijing
from October 2012 to October, 2013

结果表明:不同高度时的气团在西北及偏西气流控制下,均会有西北气流影响北京城区。通过聚类分析得出,到达北京的后向轨迹气流中,西北气流占全年气流的 47%,即冬春季节,偏西气流控制下的流场是污染物输送的主要流场。国内一些研究也得出相同结论,气团途径大同、张家口时,将大量近地层排放的颗粒物和烃类污染物输送至北京地区,对北京的环境造成不同程度影响[44~46]。Kumar 等[47]研究印度 PAHs 健康风险时指出,在工业区下风向会出现 PAHs 最高值且对居住在下风向的居民身体健康产生严重影响。根据相关文献数据,北京 PAHs 的平均致癌风险为 $3.1 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$,人群对 PAHs 暴露已超过最大可接受风险水平[48]。因此控制洋河流域工农业生产和居民生活的 PAHs 排放,对治理北京大气环境尤其是外来污染物可能对北京造成的二次污染极其重要。

3 结论

(1) 洋河流域大气 PAHs 排放量为 $4.4 \times 10^2 \text{ t}$ 。

煤炭和秸秆燃烧是 PAHs 的主要排放源,其对 PAHs 排放的贡献分别为 76% 和 10%。PAHs 排放量最大的是宣化县,其次是兴和和天镇县,最小的是万全县。洋河流域排放的 PAHs 中 7 种致癌物质(Flu、BaA、BbF、BkF、BaP、InP、DBA)的排放量为 1.5×10^2 t, BaP 的总排放量为 41 t。宣化县是 BaP 排放的高值区,其次是天镇、怀来县。

(2)在 PAHs 排放谱中, Nap 排放量最大,其次是 Phe 和 Flu。这与洋河流域的燃煤,金属冶炼,垃圾焚烧,汽车尾气相关。高环分子量(4~6 环)和低环分子量(2~3 环)的 PAHs 在洋河流域 PAHs 的排放中分别占 49% 和 51%。工业生产总产值、居民收入和人口密度与 PAHs 总排放量呈正相关关系,单位国土面积与 PAHs 总排放量呈负相关关系,农业生产总产值与 PAHs 总排放量相关性不大。

(3)结合洋河流域 PAHs 排放谱和气团后向轨迹模拟可知:洋河流域是 PAHs 的高污染风险区,且在西北及偏西气流控制下气团途经洋河流域时,可将流域内所排放的高浓度 PAHs 输送至北京,对首都北京的环境和人体健康造成潜在风险。

参考文献:

- [1] Keith L H, Telliard W A. Priority pollutants I-A perspective view [J]. *Environmental Science and Technology*, 1979, **13**(4): 416-423.
- [2] Wania F, Mackay D. Tracking the distribution of persistent organic pollutants [J]. *Environmental Science and Technology*, 1996, **30**(9): 390A-396A.
- [3] Lundstedt S, White P A, Lemieux C L, *et al.* Sources, fate, and toxic hazards of oxygenated polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) at PAH-contaminated sites [J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2007, **36**(6): 475-485.
- [4] Shen G F, Tao S, Chen Y C, *et al.* Emission characteristics for polycyclic aromatic hydrocarbons from solid fuels burned in domestic stoves in rural China [J]. *Environmental Science and Technology*, 2013, **47**(24): 14485-14494.
- [5] Shen H Z, Huang Y, Wang R, *et al.* Global atmospheric emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons from 1960 to 2008 and future predictions [J]. *Environmental Science and Technology*, 2013, **47**(12): 6415-6424.
- [6] Fang Y, Naik V, Horowitz L W, *et al.* Air pollution and associated human mortality: the role of air pollutant emissions, climate change and methane concentration increases from the preindustrial period to present [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(3): 1377-1394.
- [7] Inomata Y, Kajino M, Sato K, *et al.* Emission and atmospheric transport of particulate PAHs in Northeast Asia [J]. *Environmental Science and Technology*, 2012, **46**(9): 4941-4949.
- [8] Zhang Y X, Tao S. Global atmospheric emission inventory of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) for 2004 [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(4): 812-819.
- [9] Tang N, Hattori T, Taga R, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons and nitropolycyclic aromatic hydrocarbons in urban air particulates and their relationship to emission sources in the Pan-Japan Sea countries [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(32): 5817-5826.
- [10] Ohara T, Akimoto H, Kurokawa J, *et al.* An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980-2020 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, **7**(16): 4419-4444.
- [11] 许姗姗, 许明珠, 刘文新, 等. 全国多环芳烃排放的时空变异特征 [J]. *农业环境科学学报*, 2006, **25**(4): 1084-1088.
- [12] Liu W X, Dou H, Wei Z C, *et al.* Emission characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons from combustion of different residential coals in North China [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(4): 1436-1446.
- [13] 蒋秋静, 李跃宇, 胡新新, 等. 太原市多环芳烃(PAHs)排放清单与分布特征分析 [J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(1): 14-20.
- [14] Bond T C, Streets D G, Yarber K F, *et al.* A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, **109**(D14): D14203.
- [15] Zhang T, Claeys M, Cachier H, *et al.* Identification and estimation of the biomass burning contribution to Beijing aerosol using levoglucosan as a molecular marker [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(29): 7013-7021.
- [16] 魏全伟, 刘钰, 田在锋, 等. 区域水源地水体多环芳烃健康风险评价 [J]. *水资源与水工程学报*, 2009, **20**(2): 15-18.
- [17] 焦文涛, 王铁宇, 吕永龙, 等. 环渤海北部沿海地区表层土壤中 PAHs 的污染特征及风险评价 [J]. *生态毒理学报*, 2010, **5**(2): 193-201.
- [18] 李新荣, 赵同科, 刘宝存, 等. 官厅水库周边蔬菜地土壤中多环芳烃的污染 [J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(7): 1492-1498.
- [19] 刘书臻. 环渤海西部地区大气中的 PAHs 污染 [D]. 北京: 北京大学, 2008.
- [20] 左谦, 刘文新, 陶澍, 等. 环渤海西部地区表层土壤中的多环芳烃 [J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(4): 667-671.
- [21] 河北工业大学. 张家口市宣化洋河的历史和现状 [EB/OL]. <http://wenku.baidu.com/link?url=VEoPRR7nOLMRcgmdoqdUXUcw6vWUVpycFQtZAE5mUCXjfhfAGpfExKN2AbBXnZRQ3jBTBzRQWjg1UVJo5FFKeHmGHfHF3snvFWJn3xbrle>, 2009-08-15.
- [22] Liu S J, Lu Y L, Wang T Y, *et al.* Using gridded multimedia model to simulate spatial fate of Benzo[α]pyrene on regional scale [J]. *Environment International*, 2014, **63**: 53-63.
- [23] 苏福庆, 高庆先, 张志刚, 等. 北京边界层外来污染物输送通道 [J]. *环境科学研究*, 2004, **17**(1): 26-29.
- [24] 吴莹, 吉东生, 宋涛, 等. 夏秋季北京及河北三城市的大气

- 污染联合观测研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(9): 2741-2749.
- [25] 刘希文. 北京及周边地区气态污染物区域特征及输送研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2010.
- [26] 邵平, 王莉莉, 安俊琳, 等. 河北张家口市大气污染观测研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(8): 2538-2550.
- [27] 贺克斌, 贾英韬, 马永亮, 等. 北京大气颗粒物污染的区域性本质[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(3): 482-487.
- [28] 张家口市. 张家口市 2012 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. <http://jh.zjknews.com/news/201303/13/373704.html>, 2013-03-13.
- [29] 苏继峰, 朱彬, 康汉青, 等. 长江三角洲地区秸秆露天焚烧大气污染物排放清单及其在空气质量模式中的应用[J]. 环境科学, 2012, **33**(5): 1418-1424.
- [30] Vardar N, Esen F, Tasdemir Y. Seasonal concentrations and partitioning of PAHs in a suburban site of Bursa, Turkey[J]. Environmental Pollution, 2008, **115**(2): 298-307.
- [31] Chen Y J, Sheng G Y, Bi X H, *et al.* Emission factors for carbonaceous particles and polycyclic aromatic hydrocarbons from residential coal combustion in China[J]. Environmental Science and Technology, 2005, **39**(6): 1861-1867.
- [32] Xu S S, Liu W X, Tao S. Emission of polycyclic aromatic hydrocarbons in China [J]. Environmental Science and Technology, 2006, **40**(3): 702-708.
- [33] 海婷婷, 陈颖军, 王艳, 等. 民用燃煤源中多环芳烃排放因子实测及其影响因素研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(7): 2533-2538.
- [34] 赵玥. 北京市能源消费与气象因子的关联性研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
- [35] 吴晓璐. 长三角地区大气污染物排放清单研究[D]. 上海: 复旦大学, 2009.
- [36] 余宇帆, 卢清, 郑君瑜, 等. 珠江三角洲地区重点 VOC 排放行业的排放清单[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(2): 195-201.
- [37] 王翠萍. 广东省主要持久性有机污染物排放状况的初步研究[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2007.
- [38] 陈楠. 成都经济圈(城市群)污染源排放清单研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- [39] Seinfeld J H, Pandis S N. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change [M]. Hoboken, N. J.: Wiley, 2006.
- [40] Zhang Y X, Tao S, Shen H Z, *et al.* Inhalation exposure to ambient polycyclic aromatic hydrocarbons and lung cancer risk of Chinese population[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, **106**(50): 21063-21067.
- [41] 朱利中, 松下秀鹤. 空气中多环芳烃的研究现状[J]. 环境科学进展, 1997, **5**(5): 18-29.
- [42] 许士奋, 蒋新, 王连生, 等. 长江和辽河沉积物中的多环芳烃类污染物[J]. 中国环境科学, 2000, **20**(2): 128-131.
- [43] 汤智, 廖海清, 张亮, 等. 成渝经济区河流表层沉积物中多环芳烃的分布、来源及生态风险评价[J]. 环境科学, 2011, **32**(9): 2639-2644.
- [44] 马锋敏. 北京及周边地区典型大气污染过程的数值模拟研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2007.
- [45] 杨素英, 陈东升, 赵秀勇. 周边污染对北京大气 PM₁₀ 的影响研究[J]. 环境科学与技术, 2009, **32**(3): 13-17.
- [46] Wang R, Tao S, Wang B, *et al.* Sources and pathways of polycyclic aromatic hydrocarbons transported to Alert, the Canadian high Arctic [J]. Environmental Science and Technology, 2010, **44**(3): 1017-1022.
- [47] Kumar B, Verma V K, Kumar S, *et al.* Probabilistic health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls in urban soils from a tropical city of India[J]. Journal of Environmental Science and Health Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering, 2013, **48**(10): 1253-1263.
- [48] 李新荣, 赵同科, 于艳新, 等. 北京地区人群对多环芳烃的暴露及健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(8): 1758-1765.

CONTENTS

Concentration and Size Distribution of Bioaerosols at Non-haze and Haze Days in Beijing	GAO Min, QIU Tian-lei, JIA Rui-zhi, <i>et al.</i> (4415)
Light Scattering Extinction Properties of Atmospheric Particle and Pollution Characteristics in Hazy Weather in Hangzhou	XU Chang, YE Hui, SHEN Jian-dong, <i>et al.</i> (4422)
Characteristic of Elements in PM _{2.5} and Health Risk Assessment of Heavy Metals During Heating Season in Taiyuan	LI Li-juan, WEN Yan-ping, PENG Lin, <i>et al.</i> (4431)
Pollution Characteristics of Secondary Water-soluble Inorganic Ions of PM _{2.5} in Urban Chengdu, China	LI You-ping, ZHOU Hong, ZHANG Zhi-sheng, <i>et al.</i> (4439)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Ozone in Beijing	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, CHEN Tian, <i>et al.</i> (4446)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Northern Suburb of Nanjing	AN Jun-lin, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4454)
Environmental Significance of Wet Deposition Composition in the Central Qilian Mountains, China	LI Zong-jie, LI Zong-xing, TIAN Qing, <i>et al.</i> (4465)
Dynamics of Nitrogen and Sulfur Wet Deposition in Typical Forest Stand at Different Spatial Levels in Simian Mountain, Mid-subtropical Region	SUN Tao, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4475)
Establishment and Assessment of QA/QC Method for Sampling and Analysis of Atmosphere Background CO ₂	LIU Li-xin, ZHOU Ling-xi, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (4482)
An Investigation of the CH ₄ and N ₂ O Emission Factors of Light-duty Gasoline Vehicles	HE Li-qiang, SONG Jing-hao, HU Jing-nan, <i>et al.</i> (4489)
Experimental Study on the Size Spectra and Emission Factor of Ultrafine Particle from Coal Combustion	SUN Zai, YANG Wen-jun, XIE Xiao-fang, <i>et al.</i> (4495)
Distributions and Air-Sea Fluxes of Dissolved Nitrous Oxide in the Yangtze River Estuary and Its Adjacent Marine Area in Spring and Summer	WANG Lan, ZHANG Gui-ling, SUN Ming-shuang, <i>et al.</i> (4502)
Spectral Absorption Properties of the Water Constituents in the Estuary of Zhujiang River	WANG Shan-shan, WANG Yong-bo, FU Qing-hua, <i>et al.</i> (4511)
Characteristics of Phosphorus Forms and the Effects of UV Light in the Confluences Water of Qujiang-Jialing River and Fujiang-Jialing River	YAN Jin-long, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4522)
Research on the Threshold of Chl-a in Lake Taihu Based on Microcystins	WEI Dai-chun, SU Jing, JI Dan-feng, <i>et al.</i> (4530)
Temporal and Spatial Characteristic of Nitrogen and Phosphorus Output in the Suburb Watershed Around the Baihua Lake	FENG Yuan-song, LIN Tao, YANG Qing-yuan (4537)
Effects of Light Irradiation on Phosphorous Releases from Typical Submerged Soils of Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoirs Areas	GUO Nian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4544)
Analysis on the Removal Efficiency and Mechanisms of Phosphorus by Modified Zeolites Substrates Coated with LDHs Reacted by Different Metal Compounds in Laboratory-Scale Vertical-Flow Constructed Wetlands	ZHANG Xiang-ling, CHEN Jun-jie, GUO Lu, <i>et al.</i> (4553)
Mercury Dynamics of Several Plants Collected from the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area During Flooding and Its Impact on Water Body	ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (4560)
Effect of Nano-TiO ₂ on the Release and Activation of Mercury in Sediment	ZHANG Jin-yang, LI Chu-xian, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4567)
Estimation Inventory of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from Anthropogenic Sources and Its Impacts within the Yanghe Watershed, an Important Water-Source Site of Beijing, China	GAO Jia-jia, LUO Wei, XI Xiao-xia (4573)
Source Identification of Toxic Wastewaters in a Petrochemical Industrial Park	YANG Qian, YU Yin, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (4582)
Investigation of Pollution Characteristics of Erythromycin Resistance Genes in a Sewage Treatment Plant and the Relevant Selective Factors	LI Kan-zhu, WU Li-le, HUANG Sheng-lin, <i>et al.</i> (4589)
Variation of Pollutants Along the Height of Two Media BAF During Advanced Treatment of Dyeing Wastewater	LIU Jun-feng, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i> (4596)
Acclimatization and Characteristics of Microbial Community in Sulphate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation	XI Jing-ru, LIU Su-qin, LI Lin, <i>et al.</i> (4602)
Capability and Microbial Community Analysis of a Membrane Bioreactor for Acrylic Fiber Wastewater Treatment	WEI Jian, SONG Yong-hui, ZHAO Le (4610)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX ABR Process in Tannery Wastewater Treatment	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan (4618)
Numerical Simulation and Operation Optimization of Biological Filter	ZOU Zong-sen, SHI Han-chang, CHEN Xiang-qiang, <i>et al.</i> (4627)
Effect of Gas-lift Device on the Morphology and Performance of ANAMMOX Sludge	LI Xiang, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4636)
Water Treatment Residual as a Bioretention Media Amendment for Phosphorus Removal	WANG Jian-jun, LI Tian, ZHANG Ying (4642)
Nutrient Contents and Heavy Metal Pollutions in Composted Sewage Sludge from Different Municipal Wastewater Treatment Plants in Beijing Region	BAI Li-ping, QI Hong-tao, FU Ya-ping, <i>et al.</i> (4648)
Polychlorinated Biphenyls and Their Methylsulfonyl Metabolites in Fish from an Electronic Waste Recycling Site in South China: Tissue Distribution and Human Dietary Exposure	TANG Bin, LUO Xiao-jun, ZENG Yan-hong, <i>et al.</i> (4655)
Residues and Health Risk Assessment of HCHs, DDTs and Heavy Metals in Water and <i>Tilapia</i> s from Fish Ponds of Guangdong	XIE Wen-ping, ZHU Xin-ping, ZHENG Guang-ming, <i>et al.</i> (4663)
Concentration and Distribution Characteristics of Estrogen in Aquatic Organism from Chongming Island	GENG Jing-jing, YE Ai-li, YANG Yi, <i>et al.</i> (4671)
Photocatalytic Degradation of Acetamidipid by TiO ₂ and Xe Lamp: Kinetics and Degradation Intermediates	ZHOU Wen-chang, YANG Hai, HU Zhi-bin, <i>et al.</i> (4678)
Effects of Nitrogen Addition on Available Nitrogen Content and Acidification in Cold-temperate Coniferous Forest Soil in the Growing Season	CHEN Gao-qi, FU Wa-li, LUO Ya-chen, <i>et al.</i> (4686)
Impact of Land Use Type on Stability and Organic Carbon of Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Jian-lin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4695)
Investigation and Canonical Correspondence Analysis of Salinity Contents in Secondary Salinization Greenhouse Soils in Shanghai Suburb	TANG Dong, MAO Liang, ZHI Yue-e, <i>et al.</i> (4705)
Spatial Distribution Prediction of Surface Soil Pb in a Battery Contaminated Site	LIU Geng, NIU Jun-jie, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4712)
Immobilization Remediation of Cd and Pb Contaminated Soil: Remediation Potential and Soil Environmental Quality	SUN Yue-bing, WANG Peng-chao, XU Ying-ming, <i>et al.</i> (4720)
Rules and Impact Factors of Greenhouse Gases Emission in the Saline-Alkali Paddy Fields in Different Years	TANG Jie, FANG Tian-ru, HOU Ke-yi, <i>et al.</i> (4727)
Adsorption of Cd(II) Varies with Biochars Derived at Different Pyrolysis Temperatures	WANG Zhen-yu, LIU Guo-cheng, Monica Xing, <i>et al.</i> (4735)
Poisoning Effect of Ca Depositing Over Mn-Ce/TiO ₂ Catalyst for Low-temperature Selective Catalytic Reduction of NO by NH ₃	ZHOU Ai-yi, MAO Hua-feng, SHENG Zhong-yi, <i>et al.</i> (4745)
A Comparative Study on Domestic and Foreign Emission Standards of Air Pollutants for Cement Industry	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4752)
Revision Process and Thinking of Emission Standard of Air Pollutants for Cement Industry	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4759)

《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)

2014年12月15日 第35卷 第12期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 12 Dec. 15, 2014

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