

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第11期

Vol.37 No.11

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

承德市大气污染源排放清单及典型行业对 PM _{2.5} 的影响	陈国磊, 周颖, 程水源, 杨孝文, 王晓琦 (4069)
浙江省木制品行业挥发性有机物排放特征及排放系数	姚轶, 王浙明, 何志桥, 徐志荣, 顾震宇 (4080)
山西省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献	闫雨龙, 彭林 (4086)
某化工区典型高污染过程 VOCs 污染特征及来源解析	高松, 崔虎雄, 伏晴艳, 高爽, 田新愿, 方方, 衣学文 (4094)
加油 VOCs 排放因子测试方法研究与应用	黄玉虎, 常耀卿, 任碧琪, 秦建平, 胡玮, 刘明宇 (4103)
北京市生活垃圾填埋场氨排放特征研究	崔彤, 李金香, 杨妍研, 程刚 (4110)
西安市人为源大气氨排放清单及特征	苏航, 闫东杰, 黄学敏, 宋文斌, 王惠琴, 宋雪娟 (4117)
佛山市冬夏季非甲烷烃污染特征研究	周雪明, 项萍, 段菁春, 贺克斌, 马永亮, 邓思欣, 司徒淑婷, 谭吉华 (4124)
天津市道路环境大气颗粒物水溶性无机离子分析	赵梦雪, 吴琳, 方小珍, 杨志文, 李凤华, 毛洪钧 (4133)
戴云山国家级自然保护区大气氮沉降特点	袁磊, 李文周, 陈文伟, 张金波, 蔡祖聪 (4142)
青岛近海冬季大气生物气溶胶中微生物活性研究	孟祥斌, 李孟哲, 李鸿涛, 高冬梅, 祁建华 (4147)
玉米秸秆烟尘中正构脂肪酸的分子与碳同位素组成	刘刚, 孙丽娜, 徐慧, 李久海, 李中平, 李立武 (4156)
极低风速条件下水-气界面甲烷气体传输速率分析	张成, 吕新彪, 龙丽, 张军伟, 穆晓辉, 李迎晨, 王圣瑞, 张文丽, 肖尚斌 (4162)
典型水库型湖泊中 CDOM 吸收及荧光光谱变化特征: 基于沿岸生态系统分析	陈雪霜, 江韬, 卢松, 白薇扬, 张成, 王定勇, 魏世强 (4168)
西苕溪支流河口水体营养盐的特征及源贡献分析	陈诗文, 袁旭音, 金晶, 李正阳, 许海燕 (4179)
周村水库主库区热分层初期氮素降低的驱动因子分析	张春华, 黄廷林, 方开凯, 周石磊, 夏超 (4187)
太湖湖泛易发区沉积物中有机磷形态分布特征	董丹萍, 章婷曦, 张丁予, 王巧云, 李德芳, 王国祥 (4194)
多重扰动对湖泊内源磷迁移转化的影响	蔡顺智, 李大鹏, 王忍, 刘焱见, 徐垚, 于胜楠, 黄勇 (4203)
丹江口库区覆膜耕作土壤氮素淋失随夏玉米生长期的变化	王伟, 于兴修, 汉强, 刘航, 徐苗苗, 任瑞, 张家鹏 (4212)
营养盐恢复对氮磷饥饿铜绿微囊藻生长的影响	岳冬梅, 李洁, 肖琳 (4220)
氯灭活地下水源中 3 种优势真菌的效能与机制	文刚, 朱红, 黄廷林, 赵建超, 任崑, 徐向前 (4228)
净水工艺对饮用水中微生物多重耐药性的影响与分析	马晓琳, 陆洋, 王钰, 侯誉, 白晓慧 (4235)
单过硫酸氢钾复合粉在饮用水消毒过程中的副产物生成特性及遗传毒性变化	敖秀玮, 李豪杰, 刘文君, 余京儒 (4241)
三维有序介孔 Co ₃ O ₄ 非均相活化单过硫酸氢钾降解罗丹明 B	冯善方, 邓思萍, 杜嘉雯, 马晓雁, 卢遇安, 高乃云, 邓靖 (4247)
调控絮体形态强化电絮凝减缓膜污染	赵凯, 杨春风, 孙境求, 李静, 胡承志 (4255)
初始 pH 值对序批式 CANON 工艺脱氮效果和 N ₂ O 释放的影响	付昆明, 王会芳, 苏雪莹, 周厚田 (4261)
3DBER-S-Fe 同步脱氮除磷及去除邻苯二甲酸酯的工艺特性	张娅, 郝瑞霞, 徐鹏程, 徐忠强 (4268)
基于反硝化脱氮的硫铁复合填料除磷机制	范军辉, 郝瑞霞, 李萌, 朱晚霞, 万京京 (4275)
基于 ABR-MBR 组合工艺优化反硝化除磷性能的研究	程朝阳, 赵诗惠, 吕亮, 吴鹏, 沈耀良 (4282)
中常温变化对 PN-ANAMMOX 联合工艺脱氮效果的影响	袁硯, 朱亮 (4289)
生物活性炭对不同 C/N 比废水同步硝化反硝化脱氮效果的影响	崔延瑞, 邱鑫, 张庆荣, 王琦, 吴青, 孙剑辉 (4296)
ANAMMOX 菌利用零价铁还原硝酸盐脱氮研究	周健, 完颜德卿, 黄勇, 刘忻, 袁怡, 李祥, 姚鹏程, 杨朋兵, 薛鹏程 (4302)
间歇曝气 SBR 与传统 SBR 处理养猪沼液的比较研究	董宝刚, 宋小燕, 刘锐, 川岸朋树, 张永明, 陈吕军 (4309)
应用解蛋白菌生物预水解剩余污泥	何晶晶, 王颖, 胡洁, 吕凡, 邵立明 (4317)
应用环境多介质逸度模型研究废旧电器拆解区多溴联苯醚的迁移及归趋	薛南冬, 陈宣宇, 杨兵, 秦普丰, 龙雨 (4326)
南宁市多环境介质中多环芳烃分布特征	苗迎, 孔祥胜 (4333)
杭州城区室内灰尘中多溴联苯醚的含量及人体暴露水平	金漫彤, 滕丹丹, 郑艳霞, 胡张璇, 沈学优, 金赞芳 (4341)
应用线性自由能关系估算药用活性化合物的生物碳质-水吸附系数	王佳怡, 毕二平 (4349)
表流湿地细菌群落结构特征	魏佳明, 崔丽娟, 李伟, 雷茵茹, 于菁菁, 秦鹏, 穆泳林, 梁钊瑞 (4357)
城市污水中硝化菌群落结构与性能分析	于莉芳, 杜倩倩, 傅学焘, 张茹, 李文江, 彭党聪 (4366)
DNA 和 cDNA 水平对比研究施肥对稻田土壤细菌多样性的影响	王聪, 吴讷, 侯海军, 汤亚芳, 沈健林, 秦红灵 (4372)
培养条件下双酚 A 对稻田土壤微生物群落特征的影响	刘畅, 黄雅丹, 张莹, 靳振江, 梁月明, 宋昂, 王腾, 郭佳怡, 李强 (4380)
1 株兼具好、厌氧汞甲基化能力细菌的分离鉴定	陶兰兰, 向玉萍, 王定勇, 黄曼琳, 申鸿 (4389)
北京地区菜田土壤抗生素抗性基因的分布特征	张兰河, 王佳佳, 哈雪姣, 邱孟超, 高敏, 仇天雷, 王旭明 (4395)
梅花鹿养殖场抗生素抗性基因分布特征	黄福义, 安新丽, 陈青林, 任红云, 苏建强 (4402)
几种高硅质矿物细颗粒的 A549 细胞毒性对比	霍婷婷, 董发勤, 邓建军, 张青碧, 贺小春, 孙东平 (4410)
添加复合吸附剂对土壤吸附菲和 Cr(VI) 的影响	李文斌, 孟昭福, 吴琼, 许绍娥, 刘泽 (4419)
生物炭对西北黄土吸附壬基酚的影响	张振国, 蒋煜峰, 慕仲锋, 孙航, 周琦, 展惠英 (4428)
集雨种植下不同沟垄比对土壤呼吸的影响及其对水热因子的响应	王昌江, 施成晓, 冯帆, 陈婷, 张磊, 吕晓康, 王伟, 廖允成 (4437)
秸秆还田与化肥减量配施对稻-菜轮作下土壤养分及酶活性的影响	黄容, 高明, 万毅林, 田冬, 陶睿, 王芳丽 (4446)
《环境科学》征稿简则 (4161) 《环境科学》征订启事 (4365) 信息 (4123, 4132, 4409)	

承德市大气污染源排放清单及典型行业对 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响

陈国磊, 周颖, 程水源*, 杨孝文, 王晓琦

(北京工业大学环境与能源工程学院, 区域大气复合污染防治北京市重点实验室, 北京 100124)

摘要: 以承德市为研究对象, 基于拉网式实地调查, 获得了该地区 2013 年各典型行业污染源详细的活动水平数据, 以大气污染物排放清单编制指南为参考, 辅以排放因子研究的系统梳理, 建立了 2013 年承德市各行业区县分辨率大气污染源排放清单, 并结合人口、路网、土地利用等数据进行了 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 网格分配。在此基础上建立气象-空气质量模型系统 (WRF-CAMx), 应用颗粒物来源识别技术 (PSAT), 选取 2013 年典型季节代表月 1、4、7、10 月, 针对承德市电力、建材、冶金等典型行业对 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响进行了定量评估。结果表明, 2013 年承德市 SO_2 、 NO_x 、TSP、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、CO、VOCs、 NH_3 的总排放量分别为 81 134、72 556、368 750、119 974、51 152、1 281 371、170 642、81 742 t。工业源是 SO_2 、 NO_x 、CO、VOCs 的主要排放源, 分别占总排放量的 89.5%、51.9%、82.5% 和 45.6%, NO_x 的主要排放源还包括道路移动源和非道路移动源, 分别占总排放量的 26.7% 和 10.8%; TSP、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要排放源是无组织扬尘, 分别占总排放量的 76.7%、65.6%、46.5%; 畜禽养殖、化肥施用是 NH_3 的主要排放源, 分别占总排放量的 67.1%、15.8%。数值模拟结果表明, 无组织扬尘、其他行业、冶金、锅炉行业对环境 $\text{PM}_{2.5}$ 影响较大, 浓度贡献分别为 23.1%、20.6%、13.3% 和 11.2%, 制定具体控制措施时应得到重点关注。

关键词: 排放清单; 承德; 空间分布; CAMx-PSAT; $\text{PM}_{2.5}$

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)11-4069-11 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201605088

Air Pollutant Emission Inventory and Impact of Typical Industries on $\text{PM}_{2.5}$ in Chengde

CHEN Guo-lei, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan*, YANG Xiao-wen, WANG Xiao-qi

(Key Laboratory of Beijing on Regional Air Pollution Control, College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In this study, detailed activity level of typical sector in Chengde in 2013 was obtained through a full-coverage investigation. A comprehensive emission inventory with county-level resolution in 2013 was developed based on guide of atmospheric pollutant emission inventory and updated emission factors. Then, the emission inventory within $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ grid was generated using source-based spastial surrogates including population, road network and landuse date. Furthermore, meteorology-air quality modeling system (WRF-CMAx) including Particulate Source Apportionment Technology (PSAT) module was established in order to evaluate the impact of topical sector (e. g., electric power, the production of construction materials, the metallurgical industry, etc.) on $\text{PM}_{2.5}$ concentration in January, April, July and October which were considered as the representative months of winter, spring, summer and autumn. The results showed the total emission of SO_2 , NO_x , TSP, PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, CO, VOCs and NH_3 in Chengde in 2013 was respectively 81 134 t, 72 556 t, 368 750 t, 119 974 t, 51 152 t, 1 281 371 t, 170 642 t and 81 742 t. Industrial source was the main emission contributor of SO_2 , NO_x , CO, VOCs, accounting for 89.5%, 51.9%, 82.5% and 45.6% of total emissions, respectively. The major emission source of NO_x also included on-road and non-road mobile source, respectively accounting for 26.7% and 10.8%. The major emission source of TSP, PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ was fugitive dust, accounting for 76.7%, 65.6% and 46.54%, respectively. Ammonia emissions from animals and farm accounted for 67.1% and 15.8% of total emissions, respectively. The numerical simulation result showed that the fugitive dust, the others, the metallurgical industry and boilers industry had relatively higher contributions to $\text{PM}_{2.5}$ concentration, accounting for 23.1%, 20.6%, 13.3% and 11.2%, respectively. These emission sources should be paid more attention during the decision-making with respect to control strategies.

Key words: emission inventory; Chengde; spatial allocation; CAMx-PSAT; $\text{PM}_{2.5}$

大气污染源排放清单是解决大气污染问题的基础, 不仅可体现各类污染源污染物排放的分布特征以及历年变化趋势, 也是空气质量模式的重要输入数据^[1]。近年来, 国内学者对排放清单进行了大量的研究, 排放源涵盖温室气体^[2]、天然源 VOCs^[3]、固定燃烧源^[4]、移动源^[5]、生物质燃烧源^[6]、扬尘源^[7]、人为源 VOCs^[8]等; 研究内容包括清单编制

方法^[9]、排放因子本地化^[10]、空间分配方法^[9]、不确定性分析^[11]等。

收稿日期: 2016-05-13; 修订日期: 2016-06-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (91544232, 51638001); 国家环境保护公益性行业科研专项 (201409006); 北京市科技计划项目 (Z141100001014002)

作者简介: 陈国磊 (1990 ~), 男, 硕士, 主要研究方向为环境规划管理与污染防治, E-mail: S201405131@emails.bjut.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: chengsy@bjut.edu.cn

承德地处河北省东北部,处于华北和东北两个地区的连接过渡地带,地近京津,背靠蒙辽,是首都重要的生态涵养区和生态屏障,在京津冀协同发展战略中具有举足轻重的地位.承德市环境空气质量具有明显的季节性特征,冬季和春季污染物浓度较高,空气质量较差,而夏季和秋季因气象条件有利于污染物扩散,污染物浓度相对较低,空气质量较好.当前承德市PM_{2.5}污染日益严重,2013年PM_{2.5}年均浓度为50 μg·m⁻³,2014年略有增长,年均浓度为52 μg·m⁻³,2015年有所下降,年均浓度为43 μg·m⁻³,但仍超过国家二级标准22.9%.随着经济的发展、机动车的迅猛增长,导致大量的VOCs、NO_x等污染物排放,传统的煤烟型污染与光化学污染相叠加.承德与周边地区屡屡发生持续多日的区域性重污染灰霾天气,持续时间可达5~10 d.为了研究承德市乃至北京及周边地区空气污染状况,改善环境质量,建立完善细致的高分辨率大气污染源排放清单十分必要.

本文以承德市为研究对象,基于拉网式实地调查,获得了该地区2013年各类典型行业污染源区县级详细活动水平,以大气污染物排放清单编制指南为参考,辅以排放因子研究的系统梳理,建立了2013年承德市市区县级大气污染源排放清单,并结合人口、路网、土地利用等数据进行了1 km×1 km排放数据网格化分配,对地区排放源清单数据进行有效补充及完善.深入分析承德市的污染源各类污染物排放特征.在此基础上,建立气象-空气质量模型系统(WRF-CAMx),应用颗粒物来源识别技术(PSAT),选取2013年典型季节代表月1、4、7、10月,针对承德市电力、建材、冶金、无组织扬尘等典型行业对PM_{2.5}的影响进行了定量评估,得到承德市典型行业对PM_{2.5}浓度的贡献,以期对承德市的大气污染控制提供参考,并为京津冀地区制定区域大气污染协同控制方案提供支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区域和对象

本研究以2013年为基准年,估算承德市共计26类排放源的SO₂、NO_x、TSP、PM₁₀、PM_{2.5}、CO、VOCs、NH₃的排放量,并分析典型污染源环境质量影响.排放源分类详见表1.

1.2 清单建立方法

1.2.1 排放量估算方法

本研究中,电厂、锅炉、部分非道路排放源SO₂

表1 污染源分类

Table 1 Classification of emission sources			
存在形式	具体类别		
固定源	工业源	电力 冶金 建材 化工 锅炉	
		居民源 居民生活	
	道路移动源	机动车	
移动源	非道路移动源	工程机械 农用机械 农用运输车 火车	
		无组织扬尘 交通扬尘 施工扬尘 料堆扬尘 裸地扬尘 工业无组织尘	
		溶剂涂料 加油站 印刷 植物 VOCs	
无组织源	VOCs 排放	人为源 VOCs 排放 天然源 VOCs 排放	
		人体氨排放 畜牧业氨排放 农业氨排放	
	生物质燃烧	秸秆露天焚烧 秸秆室内燃烧 森林火灾	

排放量主要采用物料衡算法[公式(1)]估算,其他污染源各类污染物采用排放因子法[公式(2)]进行估算.

$$E = 2 \times S \times Y \times C \times (1 - \eta) \tag{1}$$

$$E_{i,j,k} = A_{i,k} \times EF_{i,j} \times 10^{-3} \tag{2}$$

式(1)中, E 为污染物排放量(t);2为SO₂和S的分子量之比; S 为燃料含硫率(%)[¹²]; Y 为燃料消耗量(t); C 为燃料中硫的转化率(%),其中,燃煤取80%,燃油取100%[⁹], η 为SO₂控制效率;式(2)中, $E_{i,j,k}$ 为第*i*类排放源,第*j*种污染物,在*k*区/县的排放量; $A_{i,k}$ 为第*i*类排放源,在*k*区/县的活动水平; $EF_{i,j}$ 为第*i*类排放源,第*j*种污染物的排放因子.详细估算方法参考大气污染物排放清单编制指南和课题组已有研究成果[¹³].

1.2.2 活动水平数据收集

活动水平数据获取方面首先查阅了各类统计信息[^{14~16}],在此基础上与承德市各行业部门协调合作,通过拉网式调查获得更为详细的数据作为补充和验证.工业源得到有效点源信息1 219个,主要包括位置信息,烟囱参数,燃料与产品信息,污染控制效率.其他行业得到区县分辨率的活动水平信息.

主要包括居民、餐饮行业的燃料和食用油消耗量；机动车保有量,累计行驶里程；建筑施工面积,道路信息,料堆信息,裸地面积；污水处理量,垃圾处理量；不同类别森林、果园、农作物面积；牲畜、家禽出栏、存栏量；农田面积,秸秆用量,化肥施用量等,主要活动水平信息见表 2.

表 2 承德市 2013 年主要活动水平

Table 2 Major activity level of Chengde in 2013

类别	燃煤量 /万 t	机动车保有量 /万辆	摩托车保有量 /万辆	公路通车里程 /万 km	裸地面积 /万 km ²	大牲畜年末 存栏量 /百头	猪年末存栏 /百头	加油站汽油 销售量 /万 t	加油站柴油 销售量 /万 t
活动水平	1 346	59	26	2	226	8 729	15 952	22	35

1.2.3 排放因子选取

排放因子的获取基于大气污染物排放清单编制指南给出的推荐值,结合最新文献调研进行综合考虑. 排放因子优先采用国内实测以及本地化研究成果,对于无国内研究成果的情况选用国外类似排放条件下排放因子(表 3~9). 氨排放的排放因子参考研究团队已发表研究成果^[17].

工业源 SO₂、NO_x、TSP 排放量主要基于承德市环保部门提供数据,结合文献[9,18,19]给出的排放系数进行工业源各类污染物估算和校核. 居民源中 PM₁₀、PM_{2.5}、VOCs 的排放因子参考大气污染物排放清单编制指南^[20~22],其他污染物参考文献[9,

13,23]. 道路移动源中 SO₂ 排放因子参考文献[13],其他污染物参考大气污染物排放清单编制指南^[24]. 非道路移动源中的铁路内燃机车、农业机械、工程机械的排放因子参考大气污染物排放清单编制指南^[25],农用运输车参考文献[26]. 施工扬尘和交通扬尘的排放因子按照文献[27]提供的方法,结合本地化参数计算得到,其中交通扬尘排放因子为不同道路类型的平均值. 料堆扬尘和裸地扬尘的排放因子参考文献[13]. 工业无组织尘排放因子参考文献[18,20~21]. 生物质燃烧源的排放因子参考文献[28]. 人为源 VOCs 的排放因子参考文献[13,22].

表 3 居民源污染物排放因子^[9,13,20~23]

Table 3 Emission factors of various residential fuels

主要污染因子	燃煤 /kg·t ⁻¹	柴油 /kg·t ⁻¹	汽油 /kg·t ⁻¹	燃气(LPG) /kg·t ⁻¹	燃气(天然气) /g·m ⁻³
SO ₂	11.06	2.75	1.60	0.18	0.18
NO _x	1.88	3.21	16.70	2.10	1.76
TSP	10.58	0.50	0.50	0.17	0.03
PM ₁₀	9.52	0.50	0.25	0.17	0.03
PM _{2.5}	7.35	0.50	0.13	0.17	0.03
CO	52.30	0.60	0.47	0.36	0.35
VOCs	6.48	3.34	0.09	5.36	0.13

1.2.4 排放清单时空分配

空气质量模型需要高时间分辨率的排放清单作为输入数据,因此需对排放清单进行时间分配. 排放清单的时间分配主要包括两个过程:污染源排放的时间特征识别;数据收集和时间变化系数的建立. 污染源排放特征识别是分析并找出影响大气污染源排放强度并能够反映出其排放时间变化特征参数^[29]. 课题组进行了大量的实地调查和文献调研,获取到京津冀地区各行业的月变化系数^[30],本研究按照该系数将承德市不同行业的排放量分配至 1、4、7、10 月.

根据污染源的特点,采用不同的空间分配依据,通过地理信息系统对各污染物的排放信息按照

1 km×1 km 分辨率进行空间分配. 具有详细经纬度信息的电厂、锅炉、工业企业等点源,直接根据坐标信息将排放量定位至对应网格. 机动车和道路扬尘排放量以网格内道路长度为权重分配到对应网格. 其他无组织扬尘排放以 GDP 为依据分配至对应网格. 居民源、人体氨、人为 VOCs 排放量以网格内人口数量为权重分配到对应网格. 非道路移动源、生物质燃烧、裸地扬尘、农牧氨、植物 VOCs 根据土地利用类型,分配至网格.

1.3 典型源环境质量影响数值模型

1.3.1 模型选取

建立气象-空气质量模型系统(WRF-CAMx),应用颗粒物来源识别技术(PSAT),分析承德市典型行

表 4 道路移动源排放因子^[13,24]/g·km⁻¹

Table 4 Emission factors of vehicle with different emission standards/g·km⁻¹

车型	燃油类型	标准	SO ₂	NO _x	PM ₁₀	PM _{2.5}	CO	HC
小型客车	汽油	国 0	0.008	1.971	0.031	0.028	25.72	2.685
		国 I	0.009	0.409	0.029	0.026	6.71	0.663
		国 II	0.009	0.324	0.012	0.011	2.52	0.314
		国 III	0.009	0.100	0.008	0.007	1.18	0.191
		国 IV	0.009	0.032	0.003	0.003	0.68	0.075
		国 V	0.009	0.017	0.003	0.003	0.46	0.056
大型客车	柴油	国 0	0.030	12.421	1.429	1.286	10.53	2.668
		国 I	0.029	11.156	1.092	0.983	9.86	0.576
		国 II	0.028	9.892	0.980	0.882	8.68	0.351
		国 III	0.029	9.892	0.439	0.395	6.74	0.283
		国 IV	0.027	9.892	0.280	0.252	3.25	0.107
		国 V	0.027	8.640	0.140	0.126	1.62	0.054
轻型货车	汽油	国 0	0.011	3.310	0.110	0.099	47.83	4.987
		国 I	0.013	2.006	0.067	0.060	26.16	3.324
		国 II	0.013	1.656	0.020	0.018	21.54	2.210
		国 III	0.013	0.534	0.012	0.011	5.61	0.610
		国 IV	0.013	0.229	0.007	0.006	2.37	0.169
		国 V	0.013	0.172	0.007	0.006	2.37	0.169
	柴油	国 0	0.097	6.758	0.483	0.435	3.28	2.097
		国 I	0.009	5.578	0.299	0.269	4.19	2.040
		国 II	0.009	5.578	0.290	0.261	3.22	1.305
		国 III	0.009	3.765	0.144	0.130	1.88	0.368
		国 IV	0.009	2.636	0.064	0.058	1.48	0.186
		国 V	0.009	2.240	0.013	0.012	1.48	0.186
重型货车	柴油	国 0	0.229	13.823	1.450	1.322	13.60	4.083
		国 I	0.194	9.589	0.692	0.623	5.79	0.897
		国 II	0.012	7.934	0.558	0.502	3.08	0.520
		国 III	0.012	7.934	0.270	0.243	2.79	0.255
		国 IV	0.012	5.554	0.153	0.138	2.20	0.129
		国 V	0.012	4.721	0.030	0.027	2.20	0.129
摩托车	汽油	国 0	0.003	0.130	0.033	0.030	14.20	2.010
		国 I	0.003	0.140	0.020	0.018	8.96	0.990
		国 II	0.003	0.150	0.009	0.008	2.58	0.530
		国 III	0.003	0.100	0.003	0.003	1.11	0.210

表 5 非道路移动源排放因子^[25,26]/kg·t⁻¹

Table 5 Emission factors of non-road mobile source/kg·t⁻¹

设备类型	NO _x	PM ₁₀	PM _{2.5}	CO	HC
铁路内燃机车	55.73	2.07	1.97	8.29	3.11
农业机械	35.04	1.74	1.74	10.94	3.37
农用运输车	42.85	5.80	3.10	23.33	5.71
工程机械	66.10	6.30	63.10	41.56	7.76

表 6 无组织扬尘排放因子^[13,27]

Table 6 Emission factors of fugitive dust

主要污染因子	施工扬尘 /g·(m ² ·a) ⁻¹	料堆扬尘(自然风蚀) /g·(m ² ·a) ⁻¹	料堆扬尘(作业) /kg·t ⁻¹	裸地扬尘 /g·(m ² ·a) ⁻¹	交通扬尘 /g·km ⁻¹
TSP	2 195.04	1 806.41	0.026 32	331.00	10.53
PM ₁₀	1 154.66	425.67	0.004 62	77.70	2.91
PM _{2.5}	235.64	170.27	0.001 45	12.10	0.88

表 7 工艺无组织扬尘排放因子^[18,20,21]/kg·t⁻¹

类别	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}
焦化(焦)	5.67	4.30	3.73
炼铁(铁)	1.86	1.22	0.73
炼钢(钢)	10.55	5.27	3.77
烧结(烧结矿)	0.41	0.24	0.10
水泥转窑(水泥)	0.40	0.10	0.06
水泥立窑(水泥)	11.93	2.75	1.94

表 8 生物质燃烧排放因子^[28]/kg·t⁻¹

主要污染因子	水稻秸秆露天焚烧	玉米秸秆露天焚烧	小麦秸秆露天焚烧	其他农作物秸秆露天焚烧	秸秆室内燃烧	薪柴室内燃烧	森林火灾
SO ₂	0.53	0.44	0.85	0.53	1.38	0.40	1.00
NO _x	1.42	4.30	3.31	2.92	0.62	0.97	3.00
PM ₁₀	5.78	11.95	7.73	6.93	7.05	3.48	13.27
PM _{2.5}	5.67	11.71	7.58	6.79	6.56	3.24	13.00
CO	27.70	53.00	59.60	49.90	95.30	29.00	107.00
VOCs	8.45	10.40	7.48	8.45	8.27	3.13	5.70
NH ₃	0.53	0.68	0.37	0.53	0.53	1.30	2.90

表 9 溶剂涂料、印刷及加油站 VOCs 排放因子^[13,22]/kg·t⁻¹

类别	建筑内墙涂料	建筑其他	防腐涂料	其他溶剂	印刷油墨	汽油	柴油
排放因子	120	450	540	500	750	3.243	0.075

酸盐离子、铵盐离子、汞离子、一次和二次有机气溶胶、元素碳、地壳离子以及其它颗粒物^[32]。当前 CAMx-PSAT 模型工具已经广泛应用到颗粒物模拟研究当中^[34,35]。模拟所需要的气象场由中尺度气象模型 WRF 提供,WRF 模型的初始背景边界条件选用美国国家环境预报中心(NCEP)提供的 1°×1°分辨率的全球 FNL 数据集。WRF 物理过程参数方案如下:简单冰 3 级微物理过程方案、RRTM 长波辐射方案、Dudhia 短波辐射方案、NOAH 近地层

业对 PM_{2.5} 浓度的影响。CAMx 模式将“科学级”空气质量模型所需要的所有技术特征合成为单一的系统,可以用来对气态和颗粒物态的大气污染物在城市和区域的多种尺度上进行综合评估^[31]。CAMx 模型中的颗粒物来源示踪模块 PSAT,能够针对不同种类的颗粒物,进行不同地区污染源贡献识别,进而确定排放源对目标区域污染物浓度的贡献情况^[32,33]。PSAT 追踪的颗粒物种类主要包括硫酸盐离子、硝

方案。

1.3.2 模型设置

模型设置为两层嵌套,如图 1 所示,两层嵌套区域由外而内分别设置为:外层嵌套为 9 km×9 km 网格分辨率,网格数 67×91;内层嵌套为 3 km×3 km 网格分辨率,网格数 102×96。CAMx 空气质量模拟区域垂直方向设为 14 层,层间距自下而上逐渐增大。CAMx 气象化学机制选用 CB05,水平扩散采用 PPM 机制,气溶胶化学采用 EBI 机制,光解速率



图 1 承德市两层嵌套模拟及监测点位置示意

Fig. 1 Chengde two-level nested-grid modeling domain and the location monitoring point

常数由 TOMS 臭氧浓度资料计算,初始浓度采用大气背景值. 选取 2013 年典型季节代表月 1、4、7、10 月,分别代表冬、春、夏、秋季进行模拟. 区域污染源清单分为无组织扬尘、冶金、建材、电力、锅炉、机动车、生物质燃烧、其他排放源八组,其中其他排放源包括化工、居民、人为 VOCs、植物 VOCs、人为 NH₃. 选取人为活动较为密集的承德市市区作为受体点,以受体点模拟值表征各类排放源对承德市的总体影响. 通过模拟值与监测值的对比进行模

型验证.

2 结果与讨论

2.1 承德市 2013 年大气污染物排放清单

承德市 2013 年大气污染物排放清单如表 10 所示. 2013 年 SO₂、NO_x、TSP、PM₁₀、PM_{2.5}、CO、VOCs、NH₃ 的总排放量分别为 81 134、72 556、36 8750、119 974、51 152、1 281 371、170 642、81 742 t.

表 10 2013 年承德市大气污染物排放清单/(t·a⁻¹)

Table 10 Total emissions by sector in Chengde in 2013/(t·a⁻¹)

污染源分类	SO ₂	NO _x	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	CO	VOCs	NH ₃
工业	72 611	37 650	67 609	25 275	17 705	1 057 287	77 763	580
居民源	7 266	4 214	4 740	3 755	2 870	14 300	5 639	602
道路移动源	128	19 351	920	920	794	95 660	10 058	200
非道路移动源	624	7 861	2 594	2 594	667	3 568	2 195	—
无组织扬尘	—	—	282 649	78 735	23 792	—	—	—
农畜氨	—	—	—	—	—	—	—	74 763
人体氨	—	—	—	—	—	—	—	4 888
人为 VOCs	—	—	—	—	—	—	7 917	—
植物 VOCs	—	—	—	—	—	—	57 515	—
生物质	505	3 481	10 238	8 695	5 324	110 556	9 555	710
各类源合计	81 134	72 556	368 750	119 974	51 152	1 281 371	170 642	81 742

2.2 排放源贡献率分析

图 2 和图 3 展示了主要排放源的贡献率. 工业源和居民源是 SO₂ 最主要的排放源,分别占总排放量的 89.5%、9.0%,工业源主要来自电厂和钢铁企业的煤炭等化石燃料燃烧,居民源主要来自居民对能源的燃烧利用. NO_x 主要排放源是工业源及移动源,分别占总排放量的 51.9%、37.5%. 除了工业源之外,随着机动车保有量的增加,移动源已经成为 NO_x 的重要排放源. TSP、PM₁₀、PM_{2.5} 的主要排放

源是无组织扬尘,分别占总排放量的 76.7%、65.6%、46.5%,应加强对承德地区无组织扬尘的控制. CO 排放主要来源于工业、生物质燃烧和移动源,分别占总排放量的 90%、8.6%、7.7%. VOCs 的排放主要来自工业、植被和溶剂涂料,分别占到 VOCs 排放总量的 45.6%、33.7%、4.6%. NH₃ 的排放主要来自畜禽养殖、化肥施用和人体排放,分别占总排放量的 67.1%、15.8%、6.0%.

在工业行业中,冶金是承德市的主要工业行业,

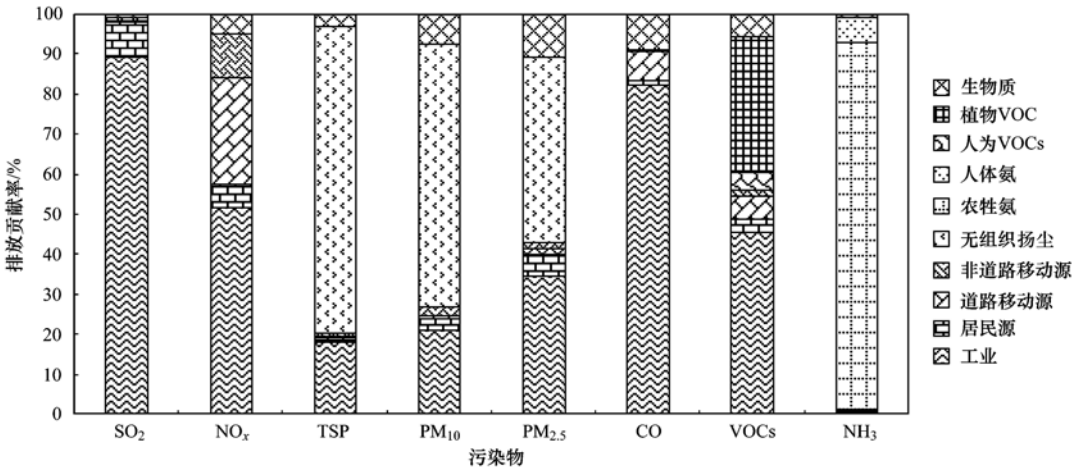


图 2 2013 年承德市不同排放源排放贡献率

Fig. 2 Contributions of different sources by categories

SO_2 、 NO_x 、TSP、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、CO、VOCs 的排放量均占工业总排放的 30% 以上。其次是电力行业, SO_2 、 NO_x 、TSP、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、CO、VOCs 的排放量分别占工业总排放的 20.7%、21.4%、16.5%、30.1%、30.1%、1.0%、6.6%。此外, 对于工业源 NO_x 、TSP、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 的贡献率, 建材行业贡献率

仅次于冶金行业, 其上述 4 种污染物排放量分别占工业总排放的 21.4%、15.2%、13.3%、12.7%。化工行业对于 NH_3 、VOCs 的排放贡献较大, 排放量占工业总排放的 78.2% 和 16.5%。酿酒、纺织、食品等其他工业对于 VOCs 排放贡献较高, 占工业排放的 27.3%。

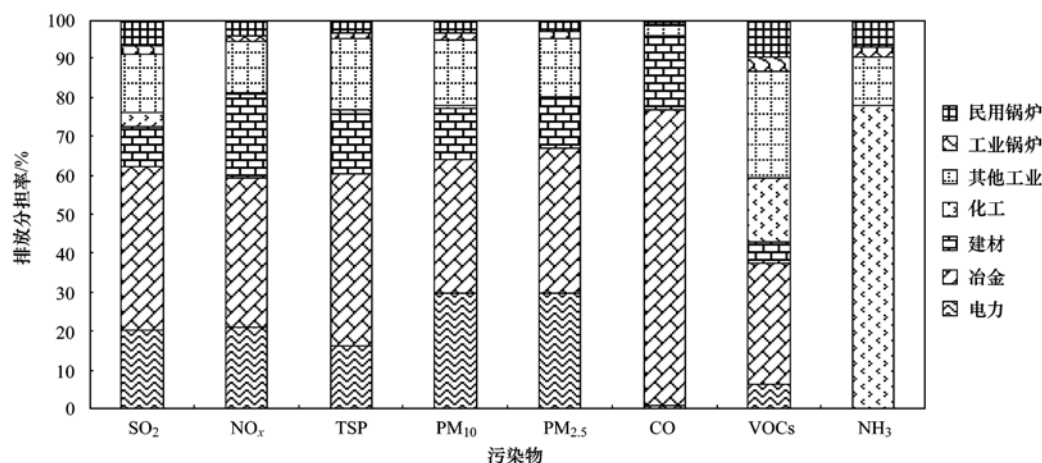


图3 2013年承德市不同工业排放源排放贡献率

Fig. 3 Contributions of different industrial sources by categories

2.3 污染物空间分布特征

将承德市各区县 2013 年各行业污染物排放量按照路网、人口、GDP 和土地利用类型进行 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 网格化分配, 得到污染物空间分布特征, 如图 4。 SO_2 排放量较大的区域主要集中在市区和东南部的平泉县、宽城满族自治县, 这主要是由市区的火电厂和东南部的冶金行业消耗大量的煤炭等化石燃料引起。 NO_x 的排放量主要来自机动车和工业, 路网密集且工业发达的市区、平泉县、宽城满族自治县和隆化县 NO_x 排放量较大。受道路扬尘的影响, 颗粒物一定程度上随路网分布, 同时受工业和施工扬尘的影响, 颗粒物在市区、平泉县、宽城满族自治县、隆化县和承德县排放量较大。CO 排放量较大的网格主要集中在工业发达的市区、平泉县、宽城满族自治县、隆化县和承德县。承德市北部植被丰富地区和东南部工业发达地区 VOCs 排放量均较大。 NH_3 排放主要来自畜牧养殖业和农业施肥, 网格高值出现在平泉、围场、隆化、承德、丰宁、兴隆等农业或农村生活集中的地区。

2.4 典型行业对 $PM_{2.5}$ 的影响评估

本研究通过对比 2013 年 4 个典型季节代表月日均值模拟结果与实际监测值, 对所采用的模式系统进行有效性验证。对比验证选取的模拟时段为 2013 年 1、4、7、10 月, 选择承德市中国银行、铁路

和文化中心这 3 个国控自动站监测点进行监测数据收集, 监测点位置已在图 1 中标出, 这 3 个监测点在承德市市区相对均匀分布, 本文主要研究承德市各典型行业对人员活动较为密集的承德市市区大气 $PM_{2.5}$ 的影响, 模拟受体区域为承德市市区, 因此这 3 个监测点有较好的代表性。本研究采用相关性分析结果反映模拟结果与实际观测值之间的关系, 用平均标准偏差 (NMB) 和相关系数 (RC) 对模型模拟结果进行验证, 通常认为 NMB 误差在 30% 以内为可接受范围, 相关系数越大模拟的趋势越好。图 5 给出 $PM_{2.5}$ 日均值模拟结果与监测值对比趋势。从中可以看出, 1、4、7、10 月 $PM_{2.5}$ 日均值模拟结果均较好, 对 NMB 和 R 值进行计算, 结果显示, 1、4、7、10 月 NMB 分别为 -28.5%、-28.69%、-17.49%、-29.57%, R 值分别为 82%、75%、72%、76%。在统计学意义上具有较好的正相关性, 模拟结果具有较高的可信性和可靠性。

基于 WRF-CAMx-PSAT 的模拟结果, 图 6 给出了春、夏、秋、冬四季代表月模拟区域内无组织扬尘、冶金、建材、电力、锅炉、机动车、生物质、其他污染源排放对承德市总 $PM_{2.5}$ 浓度的贡献情况。结果表明, 对承德市 $PM_{2.5}$ 贡献最大的是无组织扬尘, 春、夏、秋、冬四季代表月贡献率分别为 31.5%、21.9%、20.6% 和 18.4%, 春季贡献较大,

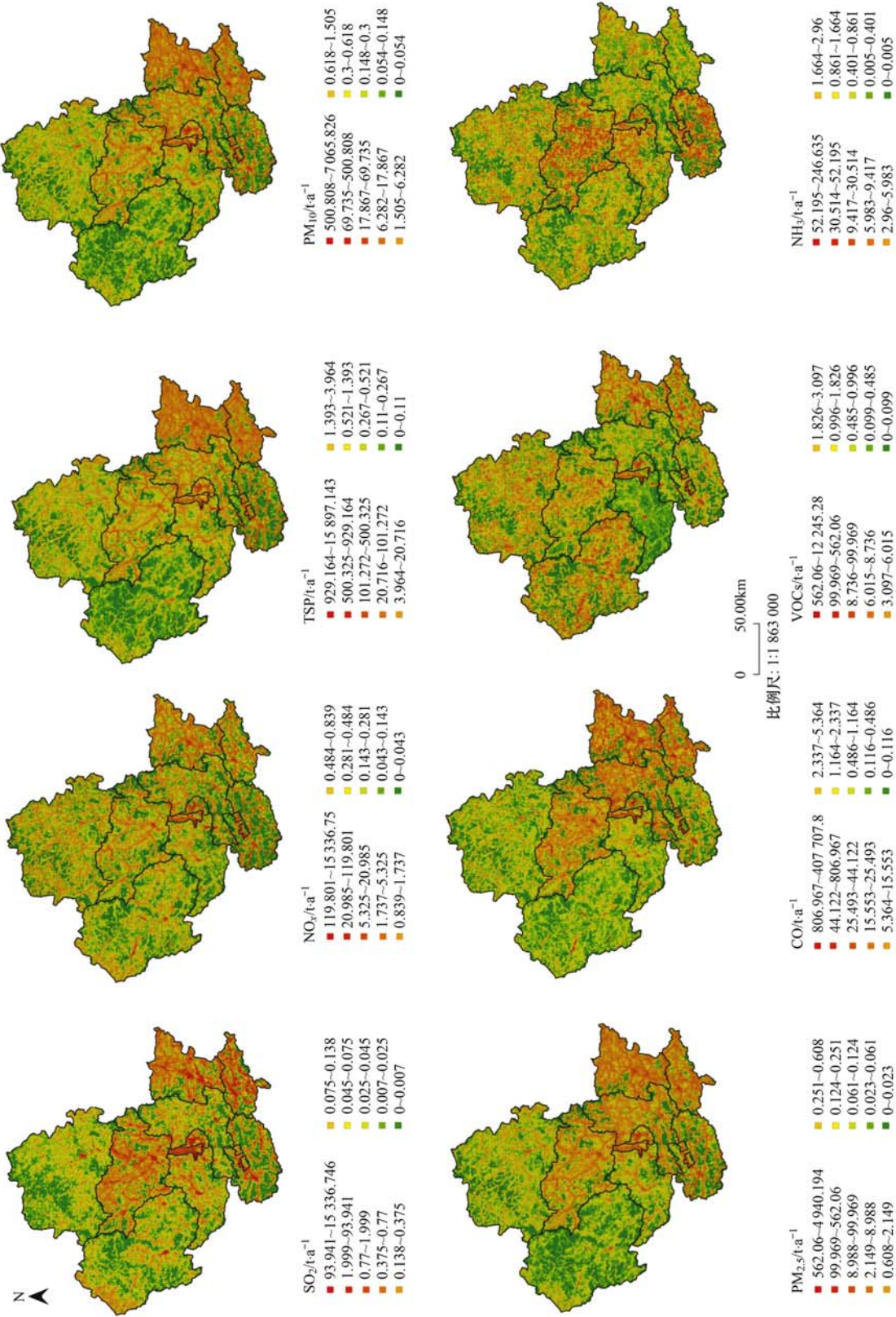


图 4 承德市 2013 年大气污染物排放空间分布

Fig. 4 Spatial allocation of air pollutant emissions in Chengde in 2013

主要是由于春季风速较大,无组织扬尘更易扬起. 其次是化工、居民、植物 VOCs 等其他行业,春、

夏、秋、冬四季代表月贡献率分别为 18.8%、22.0%、23.0% 和 18.5%. 冶金行业对承德市

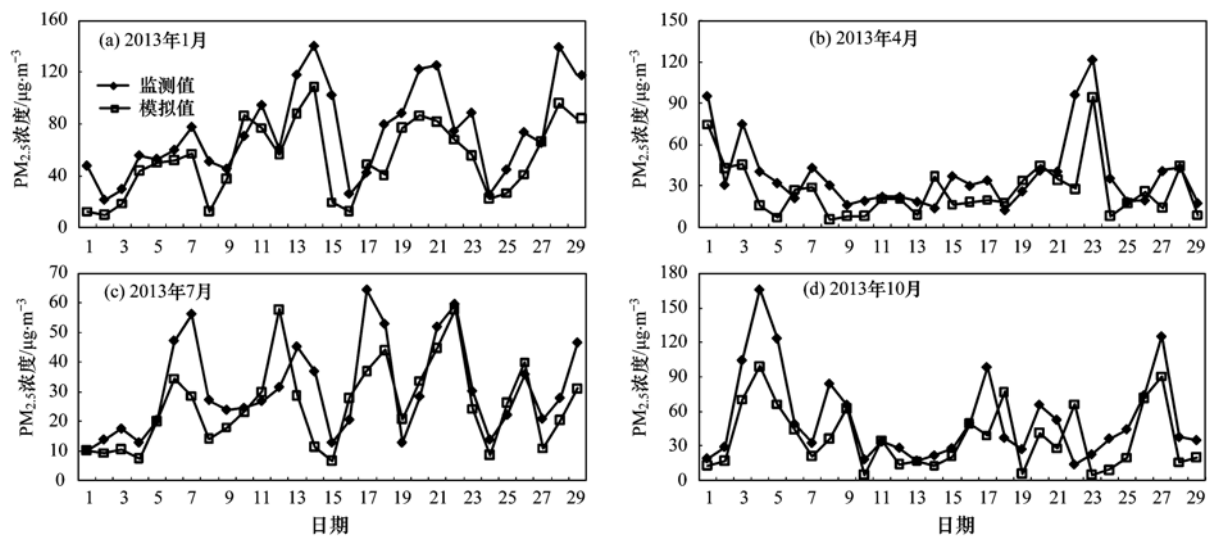


图5 模拟结果与监测结果对比

Fig. 5 Comparison between simulated results and monitored data

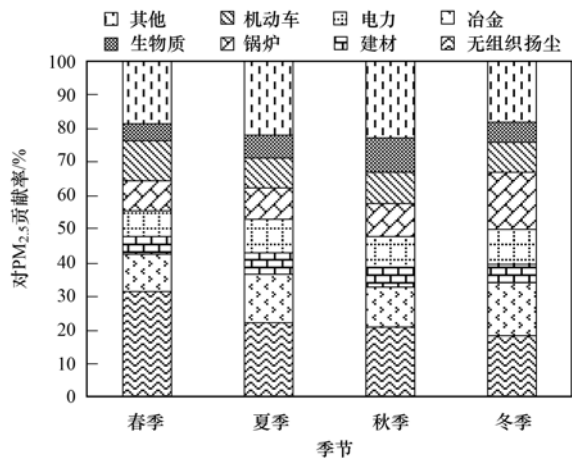


图6 主要行业对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献

Fig. 6 Contribution percentages of major sources to $\text{PM}_{2.5}$

$\text{PM}_{2.5}$ 贡献也较大,春、夏、秋、冬四季代表月贡献率分别为 11.1%、14.4%、12.0% 和 15.6%。由于受采暖活动的影响,冬季承德市燃煤锅炉的污染物排放较多,其对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度贡献率为 16.9%,春、夏、秋季的贡献率分别为 8.8%、9.6%、9.6%。另外,机动车和电力行业排放对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度贡献率也比较大,其中机动车行业春、夏、秋、冬四季代表月的贡献率分别为 12.1%、8.8%、9.5% 和 8.8%,电力行业春、夏、秋、冬四季代表月的贡献率分别为 7.5%、9.6%、9.3% 和 10.4%。生物质燃烧和建材行业排放对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的贡献率分别为 5.0% ~ 10.1% 和 5.1% ~ 6.8%。

2.5 排放贡献与浓度贡献对比

图 7 给出了承德市典型行业 $\text{PM}_{2.5}$ 排放贡献和

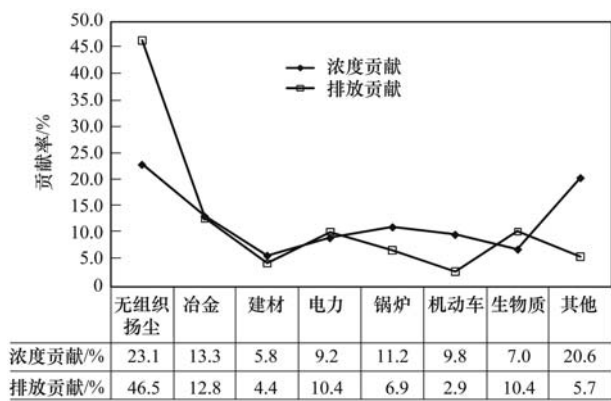


图7 $\text{PM}_{2.5}$ 排放贡献和浓度贡献对比

Fig. 7 Contribution of emission and concentration of $\text{PM}_{2.5}$

浓度贡献的对比。各行业对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度贡献和排放贡献具有较好的一致性,相关系数为 0.66。冶金、建材、电力行业 $\text{PM}_{2.5}$ 排放贡献和浓度贡献均相差不大。无组织扬尘对 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放贡献为 46.5%,浓度贡献为 23.1%,这主要是由于无组织扬尘的排放只有一次颗粒物,没有 NO_x 、VOCs 等的二次转化。锅炉行业对 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放贡献为 6.9%,浓度贡献达到 11.2%,这主要由于承德市锅炉行业大多为低矮源排放,且分布较为分散,这使得锅炉排放对地面浓度贡献较高。机动车 $\text{PM}_{2.5}$ 排放占总排放的 2.9%,但对大气 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度贡献达到了 9.8%。说明机动车排放对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献除了一次排放之外,更多的是 NO_x 、VOCs 等前体物在大气当中发生复杂二次反应带来的贡献。需要说明的是,生物质燃烧 $\text{PM}_{2.5}$ 排放占总排放量的 10.4%,但对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度贡献为 7.0%,这主要由于本研究对排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 环境贡献

主要关注人员活动较为密集的城区,而生物质燃烧排放多集中在农村,故而对城区的影响较小. 其他行业对 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放贡献为 5.7%, 浓度贡献为 20.6%. 其他行业包括化工、居民、人为 VOCs、植物 VOCs、人为 NH_3 , 其中只有化工和居民源有 $\text{PM}_{2.5}$ 排放, VOCs 排放量较大, 在大气当中发生复杂二次反应带来较大的贡献, 故其他行业对 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度贡献较大.

3 结论

(1) 2013 年承德市 SO_2 、 NO_x 、TSP、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、CO、VOCs、 NH_3 的总排放量分别为 81 134、72 556、36 8750、119 974、51 152、1 281 371、170 642、81 742 t.

(2) 工业源是 SO_2 、 NO_x 、CO、VOCs 的主要排放源, 分别占总排放量的 89.5%、51.9%、82.5% 和 45.6%, NO_x 的主要排放源还包括道路移动源和非道路移动源, 分别占总排放量的 26.7% 和 10.8%. TSP、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要排放源是无组织扬尘, 分别占总排放量的 76.7%、65.6%、46.5%, 应加强对承德地区无组织扬尘的控制. 冶金是承德市的主要工业行业, SO_2 、 NO_x 、TSP、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、CO、VOCs 的排放量均占工业排放总的 30% 以上. 畜禽养殖、化肥施用是 NH_3 的主要排放源.

(3) 承德市市区、平泉县、宽城满族自治县、隆化县和承德县是主要的 SO_2 、 NO_x 、颗粒物、CO 排放区域, VOCs 排放集中于北部和东南部, NH_3 排放主要分布在平泉、围场、隆化、承德、丰宁、兴隆等农业或农业生活集中的地区.

(4) 无组织扬尘、其他行业、冶金、锅炉行业对环境 $\text{PM}_{2.5}$ 影响较大, 浓度贡献分别为 23.1%、20.6%、13.3% 和 11.2%.

参考文献:

- [1] Zhou Y, Cheng S Y, Chen D S, *et al.* A new statistical approach for establishing high-resolution emission inventory of primary gaseous air pollutants[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **94**: 392-401.
- [2] 覃小玲, 卢清, 郑君瑜, 等. 深圳市温室气体排放清单研究[J]. *环境科学研究*, 2012, **25**(12): 1378-1386.
Qin X L, Lu Q, Zheng J Y, *et al.* Study on greenhouse gases emissions inventory in Shenzhen city [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, **25**(12): 1378-1386.
- [3] 胡泳涛, 张远航, 谢绍东, 等. 区域高时空分辨率 VOC 天然源排放清单的建立[J]. *环境科学*, 2001, **22**(6): 1-6.
Hu Y T, Zhang Y H, Xie S D, *et al.* Development of biogenic VOC emissions inventory with high temporal and spatial resolution [J]. *Environmental Science*, 2001, **22**(6): 1-6.
- [4] 丁青青, 魏伟, 沈群, 等. 长三角地区火电行业主要大气污染物排放估算[J]. *环境科学*, 2015, **36**(7): 2389-2394.
Ding Q Q, Wei W, Shen Q, *et al.* Major air pollutant emissions of coal-fired power plant in Yangtze River Delta [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(7): 2389-2394.
- [5] 李伟, 傅立新, 郝吉明, 等. 中国道路机动车 10 种污染物的排放量[J]. *城市环境与城市生态*, 2003, **16**(2): 36-38.
Li W, Fu L X, Hao J M, *et al.* Emission inventory of 10 kinds of air pollutants for road traffic vehicles in China [J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2003, **16**(2): 36-38.
- [6] 田贺忠, 郝吉明, 陆永琪, 等. 中国生物质燃烧排放 SO_2 、 NO_x 量的估算[J]. *环境科学学报*, 2002, **22**(2): 204-208.
Tian H Z, Hao J M, Lu Y Q, *et al.* Evaluation of SO_2 and NO_x emissions resulted from biomass fuels utilization in China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, **22**(2): 204-208.
- [7] 谢绍东, 齐丽. 料堆风蚀扬尘排放量的一个估算方法[J]. *中国环境科学*, 2004, **24**(1): 49-52.
Xie S D, Qi L. An estimation method for wind erosion dust emissions from storage piles [J]. *China Environmental Science*, 2004, **24**(1): 49-52.
- [8] 刘金凤, 赵静, 李湉湉, 等. 我国人为源挥发性有机物排放清单的建立[J]. *中国环境科学*, 2008, **28**(6): 496-500.
Liu J F, Zhao J, Li T T, *et al.* Establishment of Chinese anthropogenic source volatile organic compounds emission inventory [J]. *China Environmental Science*, 2008, **28**(6): 496-500.
- [9] 潘月云, 李楠, 郑君瑜, 等. 广东省人为源大气污染物排放清单及特征研究[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(9): 2655-2669.
Pan Y Y, Li N, Zheng J Y, *et al.* Emission inventory and characteristics of anthropogenic air pollutant sources in Guangdong Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(9): 2655-2669.
- [10] 陈绍刚. 重型柴油车辆排放因子和排放特性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
- [11] 魏巍, 王书肖, 郝吉明. 中国人为源 VOC 排放清单不确定性研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(2): 305-312.
Wei W, Wang S X, Hao J M, *et al.* Uncertainty analysis of emission inventory for volatile organic compounds from anthropogenic sources in China [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(2): 305-312.
- [12] 中国节能产业网. 工业企业节能减排指标解释[EB/OL]. <http://www.china-esi.com/Article/8157.html>, 2009-01-08.
- [13] 周颖. 区域大气污染源清单建立与敏感源筛选研究及示范应用[D]. 北京: 北京工业大学, 2012.
- [14] 河北省统计局. 河北经济年鉴—2014[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
- [15] 河北省统计局. 河北农村统计年鉴—2014[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
- [16] 承德市统计局. 承德统计年鉴—2014[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
- [17] Zhou Y, Cheng S Y, Lang J L, *et al.* A comprehensive ammonia emission inventory with high-resolution and its evaluation in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **106**: 305-317.
- [18] 国务院第一次全国污染源普查领导小组办公室. 第一次全国污染源普查工业污染源产排污系数手册[M]. 北京: 中国环

- 境科学出版社, 2008.
- [19] 赵斌, 马建中. 天津市大气污染源排放清单的建立[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(2): 368-375.
Zhao B, Ma J Z. Development of an air pollutant emission inventory for Tianjin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, **28**(2): 368-375.
- [20] 中华人民共和国环境保护部. 大气细颗粒物一次源排放清单编制技术指南(试行) [EB/OL]. <http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201408/W020140828351293619540.pdf>, 2014-08-20.
- [21] 中华人民共和国环境保护部. 大气可吸入颗粒物一次源排放清单编制技术指南 [EB/OL]. <http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/W020150107594587771088.pdf>, 2014-12-31.
- [22] 中华人民共和国环境保护部. 大气挥发性有机物源排放清单编制技术指南(试行) [EB/OL]. <http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201408/W020140828351293705457.pdf>, 2014-08-20.
- [23] 田贺忠, 郝吉明, 陆永琪, 等. 中国氮氧化物排放清单及分布特征[J]. 中国环境科学, 2001, **21**(6): 493-497.
Tian H Z, Hao J M, Lu Y Q, *et al.* Inventories and distribution characteristics of NO_x emissions in China [J]. China Environmental Science, 2001, **21**(6): 493-497.
- [24] 中华人民共和国环境保护部. 道路机动车大气污染物排放清单编制技术指南(试行) [EB/OL]. <http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/W020150107594587831090.pdf>, 2014-12-31.
- [25] 中华人民共和国环境保护部. 非道路移动源大气污染物排放清单编制技术指南(试行) [EB/OL]. <http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/W020150107594587960717.pdf>, 2014-12-31.
- [26] 张礼俊, 郑君瑜, 尹沙沙, 等. 珠江三角洲非道路移动源排放清单开发[J]. 环境科学, 2010, **31**(4): 886-891.
Zhang J L, Zheng J Y, Yin S S, *et al.* Development of non-road mobile source emission inventory for the Pearl River Delta Region [J]. Environmental Science, 2010, **31**(4): 886-891.
- [27] 中华人民共和国环境保护部. 扬尘源颗粒物排放清单编制技术指南(试行) [EB/OL]. <http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/W020150107594588131490.pdf>, 2014-12-31.
- [28] 中华人民共和国环境保护部. 生物质燃烧源大气污染物排放清单编制技术指南(试行) [EB/OL]. <http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/W020150107594588071383.pdf>, 2014-12-31.
- [29] 郑君瑜, 王水胜, 黄志炯, 等. 区域高分辨率大气排放源清单建立的技术方法与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014. 162-174.
- [30] 隗潇. 我国大气污染源清单建立与典型区域空气质量相互影响[D]. 北京: 北京工业大学, 2013.
- [31] 薛文博, 王金南, 杨金田, 等. 国内外空气质量模型研究进展[J]. 环境与可持续发展, 2013, **38**(3): 14-20.
Xue W B, Wang J N, Yang J T, *et al.* Domestic and foreign research progress of air quality model [J]. Environment and Sustainable Development, 2013, **38**(3): 14-20.
- [32] 安静宇, 李莉, 黄成, 等. 2013年1月中国东部地区重污染过程中上海市细颗粒物的来源追踪模拟研究[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(10): 2635-2644.
An J Y, Li L, Huang C, *et al.* Source apportionment of the fine particulate matter in Shanghai during the heavy haze episode in eastern China in January 2013 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(10): 2635-2644.
- [33] ENVIRON International Corporation. User's guide comprehensive air quality model with extensions version 6. 0 [M]. Novato, California: ENVIRON International Corporation, 2013.
- [34] Zhang Y, Olsen K M, Wang K. Fine scale modeling of agricultural air quality over the Southeastern United States using two air quality models. Part I. application and evaluation[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2013, **13**: 1231-1252.
- [35] Wu D W, Fung J C H, Yao T, *et al.* A study of control policy in the pearl River Delta region by using the particulate matter source apportionment method [J]. Atmospheric Environment, 2013, **76**: 147-161.

CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory and Impact of Typical Industries on PM _{2.5} in Chengde	CHEN Guo-lei, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (4069)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Woodwork-making Industry in Zhejiang Province	YAO Yi, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, <i>et al.</i> (4080)
Emission Inventory of Anthropogenic VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Shanxi Province	YAN Yu-long, PENG Lin (4086)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs of High Pollution Process at Chemical Industrial Area in Winter of China	GAO Song, CUI Hu-xiong, FU Qing-yan, <i>et al.</i> (4094)
Study and Application of Test Method for VOCs Emission Factor of Refueling in Service Station	HUANG Yu-hu, CHANG Yao-qing, REN Bi-qi, <i>et al.</i> (4103)
NH ₃ Emission Characteristics in Landfill Sites in Beijing	CUI Tong, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan, <i>et al.</i> (4110)
Inventory and Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emission in Xi'an	SU Hang, YAN Dong-jie, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (4117)
Pollution Characteristics of Non-methane Hydrocarbons During Winter and Summer in Foshan City	ZHOU Xue-ming, XIANG Ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (4124)
Water-soluble Inorganic Ions in the Road Ambient Atmospheric Particles of Tianjin	ZHAO Meng-xue, WU Lin, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4133)
Characteristics of Nitrogen Deposition in Daiyun Mountain National Nature Reserve	YUAN Lei, LI Wen-zhou, CHEN Wen-wei, <i>et al.</i> (4142)
Microbial Activity in Bioaerosols in Winter at the Coastal Region of Qingdao	MENG Xiang-bin, LI Meng-zhe, LI Hong-tao, <i>et al.</i> (4147)
Molecular and Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Smoke from Maize Straw Combustion	LIU Gang, SUN Li-na, XU Hui, <i>et al.</i> (4156)
Gas Transfer Velocity of CH ₄ at Extremely Low Wind Speeds	ZHANG Cheng, LÜ Xin-biao, LONG Li, <i>et al.</i> (4162)
Spectral Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake from Inland of Three Gorges Reservoir Areas: In the View of Riparian Ecosystem Analysis	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (4168)
Characteristics and Pollution Source Analysis of Nutrients in Tributary Outlets of Xitaoxi Watershed	CHEN Shi-wen, YUAN Xu-yin, JIN Jing, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Driving Factors on the Nitrogen Decrease in the Early Stage of the Thermal Stratification in Main Area of Zhoucun Reservoir	ZHANG Chun-hua, HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, <i>et al.</i> (4187)
Characteristics of Organic Phosphorus Fractions in the Sediments of the Black Water Aggregation in Lake Taihu	DONG Dan-ping, ZHANG Ting-xi, ZHANG Ding-yu, <i>et al.</i> (4194)
Impacts of Multiple Disturbance on Migration and Transformation of Endogenous Phosphorus in Lake	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (4203)
Change of Soil Nitrogen Leaching with Summer Maize Growing Periods Under Plastic Film Mulched Cultivation in Danjiangkou Reservoir Area, China	WANG Wei, YU Xing-xiu, HAN Qiang, <i>et al.</i> (4212)
Nutrients Recovery on the Growth of Nitrogen and Phosphorus Starved <i>Microcystis aeruginosa</i>	YUE Dong-mei, LI Jie, XIAO Lin (4220)
Inactivation Efficiency and Mechanism of Three Dominant Fungal Spores in Drinking Groundwater by Chlorine	WEN Gang, ZHU Hong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (4228)
Effect of Water Treatment Process on the Bacterial Multidrug Resistance in Drinking Water	MA Xiao-lin, LU Yang, WANG Yu, <i>et al.</i> (4235)
Characteristics of Disinfection By-products and Genotoxicity During Drinking Water Disinfection with Potassium Monopersulfate Compound Powder	AO Xiu-wei, LI Hao-jie, LIU Wen-jun, <i>et al.</i> (4241)
Heterogeneous Activation of Peroxymonosulfate with Three-dimensional Ordered Mesoporous Co ₃ O ₄ for the Degradation of Rhodamine B	FENG Shan-fang, DENG Si-ping, DU Jia-wen, <i>et al.</i> (4247)
Enhanced Mitigation of Membrane Fouling by Regulations on Floc Morphology in Electrocoagulation	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4255)
Effect of Initial pH on Nitrogen Removal Performance and N ₂ O Emission of a Sequencing Batch CANON Reactor	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (4261)
Operational Characteristics of the Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Removal of Phthalate Esters by Three-dimensional Biofilm-electrode Coupled with Iron/Sulfur Reactor	ZHANG Ya, HAO Rui-xia, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (4268)
Phosphorus Removal Mechanism of Sulfur/Sponge Iron Composite Fillers Based on Denitrification	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, LI Meng, <i>et al.</i> (4275)
Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process	CHENG Chao-yang, ZHAO Shi-hui, LÜ Liang, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Moderate and Room Temperature on Nitrogen Removal in PN-ANAMMOX Process	YUAN Yan, ZHU Liang (4289)
Influence of Biological Activated Carbon on Simultaneous Nitrification and Denitrification in Inflow with Different C/N Ratios	CUI Yan-ni, QIU Xin, ZHANG Qing-rong, <i>et al.</i> (4296)
Biotransformation of Nitrate to Nitrogen Gas Driven by ANAMMOX Microbes via Zero-valent Iron Under Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, WANYAN De-qing, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4302)
A Comparative Study on Performance of an Intermittent Aeration SBR and a Traditional SBR for Treatment of Digested Piggery Wastewater	DONG Bao-gang, SONG Xiao-yan, LIU Rui, <i>et al.</i> (4309)
Biological Pre-treatment of Surplus Sludge Using the Protease-secreting Bacteria	HE Pin-jing, WANG Ying, HU Jie, <i>et al.</i> (4317)
Transfer and Fate of Polybrominated Diphenyl Ethers in an Electrical Equipment Dismantling Area Using a Multimedia Fugacity Model	XUE Nan-dong, CHEN Xuan-yu, YANG Bing, <i>et al.</i> (4326)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Environmental Media in Nanning City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng (4333)
PBDEs Levels in House Dust and Human Exposure to PBDEs via Dust Ingestion in Hangzhou	JIN Man-tong, TENG Dan-dan, ZHENG Yan-xia, <i>et al.</i> (4341)
Evaluating Biochar-Water Sorption Coefficients of Pharmaceutically Active Compounds by Using a Linear Free Energy Relationship	WANG Jia-yi, BI Er-ping (4349)
Characteristics of Bacterial Communities in Surface-flow Constructed Wetlands	WEI Jia-ming, CUI Li-juan, LI Wei, <i>et al.</i> (4357)
Community Structure and Activity Analysis of the Nitrifiers in Raw Sewage of Wastewater Treatment Plants	YU Li-fang, DU Qian-qian, FU Xue-tao, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Fertilization on Soil Microbial Abundance and Community Structure at DNA and cDNA Levels in Paddy Soils	WANG Cong, WU Ne, HOU Hai-jun, <i>et al.</i> (4372)
Effects of Bisphenol A on Characteristics of Paddy Soil Microbial Community Under Different Cultural Conditions	LIU Chang, HUANG Ya-dan, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (4380)
Identification of a Facultative Bacterium Strain with the Ability to Methylate Mercury Under Both Aerobic and Anaerobic Conditions	TAO Lan-lan, XIANG Yu-ping, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4389)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Vegetable Soils in Beijing	ZHANG Lan-he, WANG Jia-jia, HA Xue-jiao, <i>et al.</i> (4395)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Sika Deer Farm	HUANG Fu-yi, AN Xin-li, CHEN Qing-lin, <i>et al.</i> (4402)
Comparison of Toxic Effect of Siliceous Mineral Dusts on Lung Epithelial A549 Cells	HUO Ting-ting, DONG Fa-qin, DENG Jian-jun, <i>et al.</i> (4410)
Effect of Adding Compound Adsorbent on Phenanthrene and Cr(VI) Absorption by Lou Soil	LI Wen-bin, MENG Zhao-fu, WU Qiong, <i>et al.</i> (4419)
Effect of Biochar on Adsorption Behavior of Nonylphenol onto Loess Soil in Northwest China	ZHANG Zhen-guo, JIANG Yu-feng, MU Zhong-feng, <i>et al.</i> (4428)
Soil Respiration in Response to Different Ridge/Furrow Ratios and Its Relationship with Soil Moisture and Temperature Under Ridge-Furrow Planting Patterns	WANG Chang-jiang, SHI Cheng-xiao, FENG Fan, <i>et al.</i> (4437)
Effects of Straw in Combination with Reducing Fertilization Rate on Soil Nutrients and Enzyme Activity in the Paddy-Vegetable Rotation Soils	HUANG Rong, GAO Ming, WAN Yi-lin, <i>et al.</i> (4446)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 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)

2016年11月15日 第37卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 11 Nov. 15, 2016

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行