

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.3
第40卷 第3期

目次

2014~2017北京市气象条件和人为排放变化对空气质量改善的贡献评估	尹晓梅, 李梓铭, 熊亚军, 乔林, 邱雨露, 孙兆彬, 寇星霞 (1011)
利用多元线性回归方法评估气象条件和控制措施对 APEC 期间北京空气质量的影响	李颖若, 汪君霞, 韩婷婷, 王焱, 何迪, 权维俊, 马志强 (1024)
京津冀郊区站点秋冬季大气 PM _{2.5} 来源解析	王彤, 华阳, 许庆成, 王书肖 (1035)
四川省典型工业行业 PM _{2.5} 成分谱分析	冯小琼, 陈军辉, 熊文朋, 梅林德, 徐雪梅, 尹寒梅, 范武波, 姜涛, 钱骏, 叶宏 (1043)
典型物流城市 2016 年冬季 2 次污染过程 PM _{2.5} 污染特征及来源解析	赵雪艳, 杨文, 王静, 刘盈盈, 白雯宇, 徐艳萍, 王歆华, 白志鹏 (1052)
沈阳市采暖期与非采暖期空气 PM _{2.5} 污染特征及来源分析	张显, 田莎莎, 刘盈盈, 赵雪艳, 余浩, 张辉, 陈莉, 王歆华 (1062)
新乡冬季 PM _{2.5} 中金属元素与水溶性离子年际变化及其来源解析	闫广轩, 雷豪杰, 张靖雯, 唐明双, 张佳羽, 曹治国, 李云蓓, 王跃思, 樊静, 李虎 (1071)
烟台市环境受体 PM _{2.5} 四季污染特征与来源解析	刘童, 王晓军, 陈倩, 温杰, 黄渤, 朱红霞, 田瑛泽, 冯银厂 (1082)
常州市冬季 PM _{2.5} 中类腐殖质昼夜特征分析	顾远, 李清, 黄爱倩, 赵竹子, 马帅帅, 叶招莲 (1091)
西北某电子垃圾拆解厂室内外重金属污染特征及暴露风险	曹红梅, 赵留元, 穆熙, 李尧捷, 毛潇萱, 黄韬, 马建民, 高宏 (1101)
京津冀一次污染过程的星地同步动态监测分析	邱昀, 李令军, 姜磊, 王新辉, 赵文慧, 张立坤, 鹿海峰 (1111)
中国城市 O ₃ 浓度时空变化特征及驱动因素	黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 宋永永 (1120)
基于卫星和地面观测的 2013 年以来我国臭氧时空分布及变化特征	张倩倩, 张兴赢 (1132)
舟山市臭氧污染分布特征及来源解析	王俏丽, 董敏丽, 李素静, 吴成志, 王刚, 陈必新, 李伟, 高翔, 叶荣民 (1143)
中国建筑涂料使用 VOCs 排放因子及排放清单的建立	高美平, 邵霞, 聂磊, 王海林, 安小桂 (1152)
异戊二烯和甲苯二次有机硫踪物的臭氧非均相氧化	黄亚娟, 曹罡, 朱荣淑, 欧阳峰 (1163)
兰州市农牧业源氨排放清单及其时空分布特征	栗世学, 郭文凯, 何昕, 朱玉凡, 陈强 (1172)
成都降水稳定氢氧同位素特征及水汽来源分析	胡月, 刘国东, 孟玉川, 张文江, 夏成城 (1179)
基于 TBL 模型的闽江口围垦养虾塘水-大气界面 CO ₂ 扩散通量估算	张逸飞, 杨平, 赵光辉, 李玲, 谭立山, 全川 (1188)
渤海和北黄海有色溶解有机物 (CDOM) 的分布特征和季节变化	刘兆冰, 梁文健, 秦礼萍, 唐建辉 (1198)
思林水库荧光溶解性有机质的特征、来源及其转化动力学	劳心宇, 原杰, 刘瑜, Khan M. G. Mostofa (1209)
厦门湾海滩微塑料污染特征	刘启明, 梁海涛, 锡桂莉, 胡欣, 葛健 (1217)
高分辨率监测下的漓江省里断面生物地球化学特征分析	王奇岗, 肖琼, 赵海娟, 王健力, 郭永丽, 张清华 (1222)
鲜水河断裂带拉沁盆地断面地下水化学特征及控制因素	何锦, 张幼宽, 赵雨晴, 韩双宝, 刘元晴, 张涛 (1236)
成都市锦江表层水和沉积物中有机磷酸酯的污染特征	吴迪, 印红玲, 李世平, 王增武, 邓旭, 罗怡, 罗林 (1245)
丹江口库区表层浮游细菌群落组成与 PICRUS1 功能预测分析	张菲, 田伟, 孙峰, 陈彦, 丁传雨, 庞发虎, 姚伦广, 李玉英, 陈兆进 (1252)
蓝藻水华对太湖水柱反硝化作用的影响	刘志迎, 许海, 詹旭, 朱广伟, 秦伯强, 张运林 (1261)
基于微生物生物完整性指数的城市河道生态系统健康评价	苏瑶, 许育新, 安文浩, 王云龙, 何振超, 楼颖雯, 沈阿林 (1270)
生物炭添加对湿地植物菖蒲根系通气组织和根系泌氧的影响	黄磊, 梁根坤, 梁岩, 罗星, 陈玉成 (1280)
城市不同材料屋面径流的污染负荷特性	何湖滨, 陈诚, 林育青, 严晗璐, 董建玮, 陈求稳 (1287)
BiOCl-(NH ₄) ₃ PW ₁₂ O ₄₀ 复合光催化剂制备及其光催化降解污染物机制	张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (1295)
微米铁复合生物碳源对地下水中 1,2-二氯乙烷的高效去除	吴乃瑾, 宋云, 魏文侠, 王海见, 孙仲平 (1302)
鸟粪石天然沸石复合材料对水中铅离子的去除	邓曼君, 王学江, 成雪君, 景焕平, 赵建夫 (1310)
Ca/Mg 负载改性沼渣生物炭对水中磷的吸附特性	易蔓, 李婷婷, 李海红, 黄巧, 杨金娥, 陈玉成, 杨志敏 (1318)
两种生物炭的制备及其对水溶液中四环素去除的影响因素	程扬, 沈启斌, 刘子丹, 杨小莹, 张太平, 廖志钟 (1328)
静止和水动力扰动状态下铅改性沸石添加对河道底泥磷迁移转化的影响	俞阳, 林建伟, 詹艳慧, 何思琪, 吴小龙, 王艳, 赵钰颖, 林莹, 刘鹏茜 (1337)
4 种磺胺类药物及乙酰化代谢物在污水处理厂的去除及机制	王大鹏, 张烟, 颜昌宙 (1347)
以膜分离为主的物化法对城市污水中污染因子的去除特性分析	徐婷, 李勇, 朱怡嘉, 薛梦娜, 汤同欢 (1353)
进水氨氮浓度对生物除磷颗粒系统的影响	李冬, 曹美忠, 郭跃礼, 梅宁, 李帅, 张杰 (1360)
除磷亚硝化颗粒工艺启动及性能恢复	李海玲, 李冬, 张杰, 刘博 (1367)
CAST 工艺高温短程硝化的实现及其除磷性能	马娟, 杨蕊春, 俞小军, 周猛, 陈永志 (1375)
不同曝气量 and 好氧时间下 SPNDPR 系统处理低 C/N 城市污水的脱氮除磷性能	袁梦飞, 于德爽, 巩秀珍, 王晓霞, 陈光辉, 杜世明, 甄建国 (1382)
ABR 除碳-亚硝化耦合厌氧氨氧化处理城市污水	李田, 曹家炜, 谢凤莲, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (1390)
室温低氨氮基质单级自养脱氮颗粒污泥启动效能与污泥特性	谢璐琳, 王建芳, 钱飞跃, 张泽宇, 沈耀良, 齐泽坤 (1396)
不同种泥的厌氧氨氧化反应器的启动及动力学特征	任君怡, 陈林艺, 李慧春, 秦玉洁, 曹雁, 王桐屿, 周少奇 (1405)
降温过程中生物膜 CANON 反应器的运行特征	付昆明, 廖敏华, 周厚田, 付巢, 姜娜, 仇付国, 曹秀芹 (1412)
IEM-UF 同步分离反硝化系统脱氮特性及种群结构分析	刘子奇, 张岩, 马翔山, 张博康, 曹孟京, 曹昌明 (1419)
温度对硝化杆菌 (Nitrobacter) 活性动力学影响	于雪, 孙洪伟, 李维维, 祁国平, 马娟, 陈永志, 吕心涛 (1426)
零价铁和微波预处理组合强化污泥厌氧消化	牛雨彤, 刘吉宝, 马爽, 李亚明, 解立平, 魏源送, 孟晓山 (1431)
牛粪堆肥系统环境因子对抗性基因的影响	彭磊, 王科, 谷月, 王爱杰 (1439)
环境因子对土壤微生物呼吸及其温度敏感性变化特征的影响	张彦军, 郭胜利 (1446)
三峡库区典型林分土壤呼吸及其组分对模拟酸雨响应	李一凡, 王玉杰, 王彬, 王云琦 (1457)
三峡库区柑橘园施肥量对土壤氮淋失及残留量的影响	王甜, 黄志霖, 曾立雄, 肖文发, 宋文梅 (1468)
长期施肥下水稻根际和非根际土壤微生物碳源利用特征	宁赵, 程爱武, 唐海明, 葛体达, 邓扬悟, 苏以荣, 陈香碧 (1475)
不同碳负荷梯度下稻田土壤有机碳矿化特征	童瑶瑶, 王季斐, 祝贞科, 邓扬悟, 陈珊, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1483)
桂林会仙喀斯特湿地水位梯度下不同植物群落土壤有机碳及其组分特征	徐广平, 李艳琼, 沈育伊, 张德楠, 孙英杰, 张中峰, 周龙武, 段春燕 (1491)
缙云山 4 种森林植被土壤团聚体有机碳分布特征	王富华, 吕盛, 黄容, 高明, 王子芳, 徐畅 (1504)
大气污染对居民健康影响研究进展	秦耀辰, 谢志祥, 李阳 (1512)
《环境科学》征订启事 (1042)	《环境科学》征稿简则 (1162)
信息 (1208, 1235, 1286)	

京津冀郊区站点秋冬季大气 PM_{2.5} 来源解析

王彤^{1,2}, 华阳^{1,2}, 许庆成^{1,2}, 王书肖^{1,2*}

(1. 清华大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084; 2. 国家环境保护大气复合污染来源与控制重点实验室, 北京 100084)

摘要: 为了增进对京津冀地区大气 PM_{2.5} 来源情况的认识, 于 2014~2015 年秋冬季在京津冀地区 4 个郊区站点进行了 PM_{2.5} 的采样, 并用化学质量平衡模型 (chemical mass balance model, CMB) 进行了 PM_{2.5} 源解析工作. 结果表明: 二次颗粒物 (36%~58%)、交通 (8%~26%)、民用燃煤 (8%~16%) 和生物质燃烧 (5%~16%) 是京津冀郊区站点秋冬季 PM_{2.5} 的主要贡献源. 其中, 二次硝酸盐是大部分站点秋冬季 PM_{2.5} 的首要贡献源 (11%~27%). 不同污染程度的源解析显示, 冬季各站点各污染源在重污染天的贡献变化趋势的同步性不如秋季明显, 且秋季二次源在重污染天的贡献增加值 (47.2~115.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 明显高于一次源 (29.5~43.4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 但此现象在冬季不显著. 对比北京市城区源解析结果, 发现郊区燃煤总贡献率较为相似, 但郊区燃煤源中多以民用燃煤为主, 这说明对于京津冀城郊地区, 控制民用燃煤源对 PM_{2.5} 污染控制有重要意义.

关键词: 源解析; 化学质量平衡模型 (CMB); 京津冀; PM_{2.5} 重污染; 民用燃煤

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)03-1035-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201808007

Source Apportionment of PM_{2.5} in Suburban Area of Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter

WANG Tong^{1,2}, HUA Yang^{1,2}, XU Qing-cheng^{1,2}, WANG Shu-xiao^{1,2*}

(1. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Sources and Control of Air Pollution Complex, Beijing 100084, China)

Abstract: To identify the main sources of PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region, PM_{2.5} samples were collected at four suburban sites in BTH region during autumn and winter in 2014-2015. Source apportionment of PM_{2.5} was conducted using the chemical mass balance model (CMB). It shows that the main sources of PM_{2.5} in autumn and winter were secondary aerosols (36%-58%), traffic (8%-26%), residential coal combustion (8%-16%), and biomass burning (5%-16%). Secondary nitrate was the most important source of PM_{2.5} at most sites during autumn and winter (11%-27%). The source apportionment at different pollution levels indicates that the coherence of the increasing trend of different sources among the four sites were much more obvious in autumn than in winter. Also, the increasing contribution of secondary sources (47.2-115.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) was much higher than that of primary sources (29.5-43.4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) in autumn, but such trend was not significant in winter. The total contribution of coal combustion at suburban sites was quite similar to that in urban sites, but in suburban areas residential coal combustion dominates the contribution from coal combustion. Thus, it is very necessary for suburban areas of the BTH region to control emissions from residential coal combustion.

Key words: source apportionment; chemical mass balance model (CMB); Beijing-Tianjin-Hebei region; heavy PM_{2.5} pollution; residential coal combustion

京津冀地区细颗粒物 (PM_{2.5}) 污染频发, 污染程度重. 2015 年北京市、天津市和河北省环境质量公报显示^[1~3], 京津冀 PM_{2.5} 年均浓度值 (81、70 和 77 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 严重超过国家环境空气质量二级标准的年均限值 (35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 污染形势严峻. 京津冀地区 PM_{2.5} 重污染过程多发生在秋冬两季. 据统计, 京津冀地区在 2013~2014 年期间长时间大范围的重污染过程共发生 31 次, 其中 23 次均发生在秋冬两季^[4].

细颗粒物来源解析对 PM_{2.5} 减排和污染控制具有重要意义. 受体模型作为主要的源解析方法在京津冀地区源解析工作中被广泛使用^[5~14]. 受体模型解析结果表明, 燃煤、交通、扬尘以及二次气溶胶

是京津冀地区 PM_{2.5} 的主要来源, 且近年来京津冀地区 PM_{2.5} 污染从燃煤主导^[5,6] 的煤烟型污染发展为燃煤和机动车^[7~14] 复合型污染. 污染源构成的复杂性与变化性, 要求大气 PM_{2.5} 源解析工作不断更新, 以反映污染源的实际情况.

现有京津冀地区的源解析研究多集中在城市地区^[6~12], 针对郊区或者农村地区的源解析^[5,13,14] 工作较少. 然而因为生产、生活方式的不同, 城镇和

收稿日期: 2018-08-01; 修订日期: 2018-09-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21625701); 大气重污染成因与治理攻关项目 (DQGG0301)

作者简介: 王彤 (1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气颗粒物污染控制, E-mail: tong-wan16@mails.tsinghua.edu.cn

* 通信作者, E-mail: shxwang@tsinghua.edu.cn

郊区的大气 $\text{PM}_{2.5}$ 来源可能有较大差异^[5,13]. 为识别京津冀郊区大气 $\text{PM}_{2.5}$ 的来源, 本研究在京津冀地区布置了 4 个郊区站点, 开展了秋冬季大气 $\text{PM}_{2.5}$ 的样品采集工作, 并利用化学质量平衡模型 (chemical mass balance, CMB) 进行了分季节以及分污染程度的源解析, 旨在为京津冀郊区地区大气 $\text{PM}_{2.5}$ 的控制提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究在北京、天津、廊坊设置了 4 个站点 (如图 1), 其中北京市包括琉璃河和永乐店站. 琉璃河站位于北京市西南部房山区的琉璃河镇, 与河北省涿州市接壤, 交通发达. 永乐店站位于北京市东南部通州区的永乐店镇, 交通上临近首都环线高速 (1.6 km). 天津市的站点位于宁河区岳龙镇 (宁河站), 是天津市与河北东部交界处. 河北省的站点则位于廊坊市大城县 (廊坊站), 地处河北省与天津市东南部交界处. 以上 4 个站点均位于郊区, 周围村庄较为密集.



图 1 京津冀地区 4 个站点分布情况

Fig. 1 Site location in Beijing-Tianjin-Hebei region

本研究于 2 个采样时间段进行 $\text{PM}_{2.5}$ 的采集 (2014 年 10 月 10 日 ~ 11 月 14 日和 2015 年 1 月 4 日 ~ 2 月 4 日), 分别代表京津冀地区秋冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 的污染情况. 采样仪器为 Thermo RP2300 (琉璃河、永乐店、宁河) 和 Thermo RP2000 (廊坊). 采样器设两通道, 其中一通道置 Teflon 膜 (47 mm), 采样流量 $16.7 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$; 二通道置石英膜 (47 mm), 采样流量 $10 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$. 采样时间为每天上午 10:00 至次日 9:30, 时长共计 23.5 h. 采样前, 将铝箔纸包覆的石英膜放入马弗炉里在 550°C 的条件下加热 6 h 以上, 去除膜上的残留的杂质. 将 Teflon 膜在采样前后分别使用精度为 0.01 mg 或 0.001 mg 的电子天平在恒温、恒湿控制实验室中进行称重, 用于测定 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度. 在离线采样的同时, 采用美国热电公司生产的 Thermo 42/43/48/49 I (琉璃河、永乐店、宁河) 和

美国 Teledyne 公司生产的 API T100/200/300/400 (廊坊) 进行常规六项气体污染物的监测 (SO_2 、 NO_2 、 O_3 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 CO), 监测分辨率分别为 5 min (琉璃河、永乐店) 和 1 h (宁河、廊坊).

1.2 $\text{PM}_{2.5}$ 样品中碳组分、无机离子组分和无机元素的化学分析

$\text{PM}_{2.5}$ 样品中的碳组分分析选用美国沙漠研究所 (desert research institute, DRI) 开发的 Model2001A 型热/光碳分析仪, 并按照 IMPROVE-A 分析程序和反射修正法 (TOR) 进行炭化校正. 取石英膜超声 1 h 后的上清液, 采用美国 DIONEX 公司的 Dionex ICS-3000 离子色谱仪进行无机离子的分析, 共分析了包括 F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 在内的 9 种离子. 无机元素的测定采用 X 射线荧光法 (X-ray fluorescence spectrometer, XRF), 分析仪器为日本 Rigaku 公司生产的 RIX3000, 测定了包括 Mg、Al、Si、P、S、K、等 27 种元素.

1.3 $\text{PM}_{2.5}$ 样品质量控制

将各站点秋冬季离线样品称重结果和颗粒物在线监测质量浓度进行对比, 发现各站点二者相关性均较好, 秋季 R^2 在 0.79 以上, 冬季永乐店 R^2 略低为 0.66, 其他站点 R^2 均在 0.89 以上. 将 $\text{PM}_{2.5}$ 离线质量和各组分质量浓度加和相比较, 发现各站点秋冬季两者相关性均良好, 秋季 R^2 在 0.79 ~ 0.98, 冬季 R^2 在 0.86 ~ 0.97. 阴阳离子平衡分析显示, 各站点秋冬两季阴阳离子相关性较好, R^2 在 0.90 ~ 0.99. 基于以上分析, 剔除离群点, 得到秋季各站点有效样品 109 个, 冬季有效样品 112 个.

1.4 来源解析模型

CMB 模型由一组线性方程组的最小二乘解组成, 它表示受体颗粒物中某种化学组分的浓度等于所有污染源中该化学组分的质量分数和该污染源对受体的贡献浓度值的乘积的线性和^[15], 其数学表达式为:

$$c_i = \sum_{j=1}^J F_{ij} \times S_j$$

式中, c_i 为大气颗粒物中化学组分 i 的质量浓度, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; F_{ij} 为污染源 j 排放的颗粒物中化学组分 i 的质量分数, $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; S_j 为颗粒物污染源 j 贡献的质量浓度, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 将颗粒物污染源中化学成分的质量分数及其不确定度与大气颗粒物样品中化学成分的浓度及其不确定度输入到 CMB 模型中, 采用有效方差最小二乘法^[15] 进行计算, 可以得到各污染源对大气颗粒物中不同化学组分的贡献浓度值与总贡献率以及不确定度.

1.5 颗粒物源成分谱

根据 2012 年京津冀地区 PM_{2.5} 排放清单^[16] 可知, 京津冀地区 PM_{2.5} 的主要一次污染源有工业、机动车、扬尘等. 其中工业部门以工业燃煤为主, 同时考虑钢铁和水泥生产. 由于郊区存在秋季秸秆焚烧现象以及冬季散煤采暖现象, 污染源也考虑了民用燃煤和生物质燃烧源. 基于以上, 本研究考虑的一次污染源有城市扬尘、工业燃煤、钢铁生产、民用燃煤、汽油车、柴油车以及生物质燃烧. 对于二次气溶胶没有直接对应的源, 则考虑二次硫酸盐以及二次硝酸盐的虚拟源谱. 对于二次有机物, 采用最小 OC/EC 比值法^[12] 进行估算.

通过调研^[11,16,18~29], 收集以上污染源源谱, 结果见表 1. 其中城市扬尘、民用燃煤、生物质燃烧直接采用文献^[11,22,23] 中的结果. 由于汽油车 PM_{2.5} 排放较低, 很少有本地 PM_{2.5} 全组分研究, 所以参考美国环保署 Speciate4.4 源谱库中汽油车排放的综合源谱^[24]. 在搜集已有相关研究结果^[25~28] 的基础上, 根据京津冀地区清单结果中不同排放标准柴油车对柴油车总 PM_{2.5} 排放量的贡献比例^[16], 对不同排放标准的柴油车源谱进行加权平均, 得到了柴油车综合源谱. 针对钢铁生产, 根据各个生产环节(烧结、高炉、炼钢以及配料、整粒等)PM_{2.5} 的排放量^[16] 对各环节排放颗粒物的源谱^[20,21] 进行了加权平均.

表 1 京津冀地区 PM_{2.5} 主要污染源源谱/%
Table 1 Source profiles of PM_{2.5} of Beijing-Tianjin-Hebei region/%

项目	城市扬尘 ^[11]	工业燃煤 ^[18,19]	钢铁生产 ^[16,20,21]			民用燃煤 ^[22]	生物质燃烧 ^[23]	汽油车 ^[24]	柴油车 ^[26,25~28]	水泥生产 ^[18,22,29]
			北京	天津	河北					
OC	6.9±2.3	11±3.8	3.2±0.9	6.5±3.2	5.7±2.7	18±28	34±14	55±6.3	23±4.1	13±13
EC	1.7±1.7	2.0±1.6	0.7±0.7	1.7±1.3	1.3±1.1	0.2±0.1	3.0±0.7	19±14	55±9.0	2.4±3.0
NH ₄ ⁺	0.7±0.1	2.0±1.7	0.0±0.0	0.2±0.2	0.2±0.2	0.3±0.3	3.0±0.8	1.7±1.2	0.8±1.0	0.2±0.1
NO ₃ ⁻	0.6±0.9	0.4±0.4	0.3±0.2	0.6±0.5	0.7±0.5	0.4±0.6	0.6±0.2	0.2±0.1	1.3±0.9	0.2±0.1
SO ₄ ²⁻	6.5±9.0	46±9.3	9.5±4.3	9.8±4.6	11±4.2	15±21	1.9±1.1	0.9±3.6	3.4±3.4	1.7±1.1
Cl ⁻	0.7±0.5	0.8±0.3	2.9±0.7	3.7±1.5	3.3±1.2	2.7±3.8	23±7.1	0.1±0.3	0.5±0.0	2.9±1.8
Al	5.5±0.3	0.4±0.2	0.5±0.1	2.8±2.2	2.8±2.4	0.1±0.1	0.0±0.0	0.2±0.1	0.1±0.0	0.4±0.3
Si	16±1.8	2.3±1.2	2.7±0.2	6.1±2.8	5.9±3.0	0.4±0.2	0.1±0.0	0.4±0.1	0.1±0.0	3.7±2.9
Na	1.5±0.2	9.3±2.3	2.8±0.8	3.1±0.9	3.4±0.8	0.9±1.4	0.2±0.1	0.0±0.1	0.7±0.0	5.5±4.9
Mg	1.2±0.6	0.1±0.1	0.9±0.7	1.3±0.4	1.3±0.4	0.0±0.0	0.1±0.0	0.1±0.1	0.0±0.0	2.2±2.2
K	0.9±0.7	2.1±1.6	6.0±2.2	6.7±2.4	5.8±2.2	5.0±7.1	6.9±3.5	0.1±0.0	0.3±0.0	0.7±0.2
Ca	8.0±1.3	0.6±0.1	6.5±0.1	6.6±0.1	6.5±0.1	0.2±0.2	0.1±0.0	0.4±0.6	0.8±0.1	0.4±0.5
Ti	0.6±0.3	0.0±0.0	0.5±0.2	0.5±0.3	0.6±0.2	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0	0.1±0.0	6.1±1.4
Cr	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0	0.1±0.1	0.1±0.1	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0	0.1±0.0	0.6±0.7
Mn	0.0±0.0	0.0±0.0	2.1±1.3	1.0±0.9	1.1±0.9	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0	0.1±0.0	0.3±0.4
Fe	2.7±0.2	1.4±0.8	34±26	24±9.4	25±8.7	0.2±0.1	0.0±0.0	0.4±0.9	0.5±0.1	0.4±0.5
Ni	0.0±0.0	0.0±0.0	0.1±0.0	0.1±0.0	0.1±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0	0.3±0.1	1.1±0.9
Cu	0.0±0.1	0.0±0.0	0.0±0.0	0.2±0.1	0.2±0.1	0.0±0.0	0.0±0.0	0.1±0.1	0.0±0.0	0.0±0.0
Zn	0.1±0.0	1.7±0.7	4.1±0.3	1.8±1.8	2.1±1.8	0.4±0.5	0.0±0.0	0.3±0.3	0.1±0.1	0.0±0.0
Pb	0.0±0.0	0.8±0.4	0.2±0.1	1.8±2.1	1.2±1.8	0.7±0.7	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0	0.2±0.2

2 结果与讨论

2.1 NO₂ 与 PM_{2.5} 中 NO₃⁻、SO₂ 与 PM_{2.5} 中 SO₄²⁻ 相关性分析

秋冬季各站点 NO₂ 与 NO₃⁻、SO₂ 与 SO₄²⁻ 均显示出一定的时间同步性(图 2, 以琉璃河站秋季样品为例). 相关性分析发现(表 2), NO₂ 与 NO₃⁻ 相关性较强, 除宁河站点秋季受样品数量影响外, 其他站点秋冬两季二者的相关性系数均在 0.628 ~ 0.869 ($P < 0.05$), 且冬季相关性较秋季更为明显. 此相关性与下文提到的二次硝酸盐对大气 PM_{2.5} 的贡献较为突出相吻合. SO₂ 与 SO₄²⁻ 之间的相关性较 NO₂ 与 NO₃⁻ 弱, 除宁河、廊坊站点秋季, 琉璃河

冬季样品外, 弱或中等相关性显著 (R^2 为 0.394 ~ 0.636, $P < 0.05$).

2.2 京津冀地区各站点秋冬季源解析结果

秋季各站点源解析结果如图 3(a) 所示. 二次源对 PM_{2.5} 的贡献明显 (38.2 ~ 59.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 占 PM_{2.5} 总质量的 36% ~ 56%. 其中, 二次硝酸盐在各站点均为首要的污染源 (19.4 ~ 31.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 其贡献率在 19% ~ 27%; 其次是二次有机物 (14.9 ~ 19.4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 贡献率在各站点较为相似 (14% ~ 17%). 对于琉璃河和永乐店站点, 汽油车的贡献十分显著 (15% 和 16%). 这可能是由于琉璃河站点和永乐店站点位于省间边界, 临近省间运输要道 (琉璃河站点距 G107 国道约 2 km, 永乐店站点距

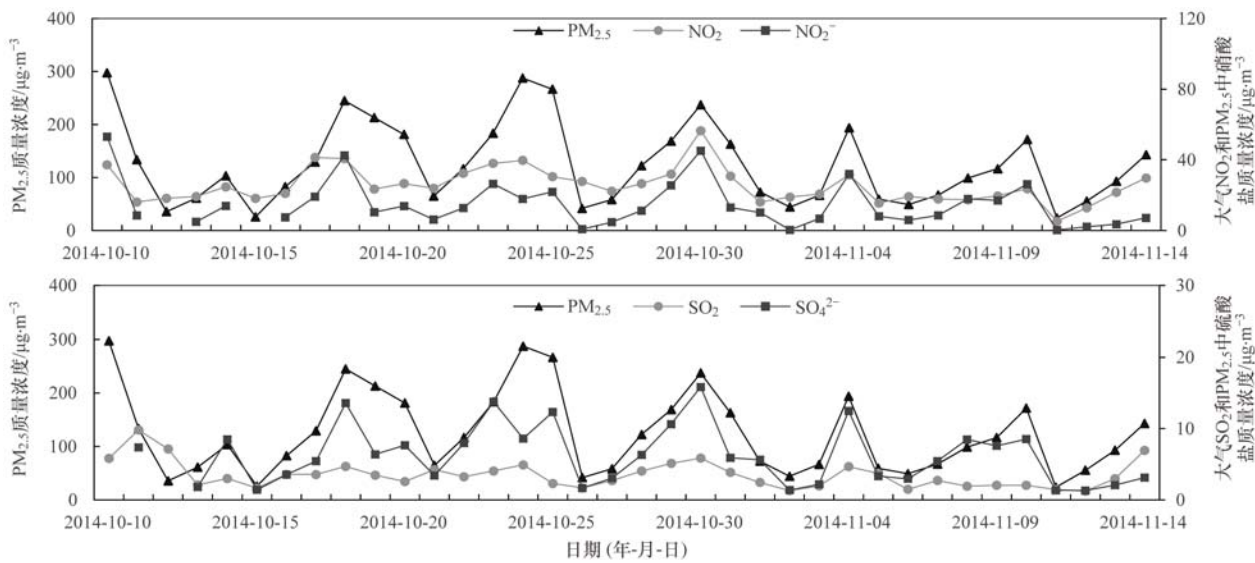


图2 秋季琉璃河站点大气SO₂、NO₂和PM_{2.5}中硫酸根、硝酸根日均浓度

Fig. 2 Daily average concentration of SO₂, NO₂, sulfate and nitrate in PM_{2.5} at the Liulihe site in autumn

表2 秋冬季各站点SO₂、NO₂与PM_{2.5}中硫酸根、硝酸根相关性分析

Table 2 Correlation analysis of SO₂, NO₂ and sulfate, and nitrate in PM_{2.5} at all sites

站点	SO ₂ 与SO ₄ ²⁻				NO ₂ 与NO ₃ ⁻			
	秋季		冬季		秋季		冬季	
	R ²	P	R ²	P	R ²	P	R ²	P
琉璃河	0.421	0.013 2	0.295	0.102	0.739	6.02 × 10 ⁻⁷	0.869	1.10E-10
永乐店	0.594	0.000 132	0.513	0.003 18	0.713	1.05 × 10 ⁻⁶	0.755	9.33E-07
宁河	0.101	0.608	0.394	0.0311	0.435	0.020 7	0.641	0.000 137
廊坊	0.348	0.0647	0.636	9.29 × 10 ⁻⁵	0.628	0.000 269	0.838	2.19E-09

离首都环线高速 1.5 km), 省际运输排放强度较高^[30]导致的. 对于宁河和廊坊站点, 生物质燃烧是主要的一次贡献源, 其贡献值和贡献率分别为 14.5 ~ 17.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 15% ~ 16%. 参考美国国家航空航天局公布的卫星火点图可知[图 4(a)], 较高的生物质燃烧贡献可能与京津冀地区秋季秸秆开放燃烧现象有关. 同时廊坊站点的工业燃煤贡献(13%)明显高于其他站点(3% ~ 6%), 这与河北省高污染重工业较为密集相一致.

冬季, 二次气溶胶对 PM_{2.5} 的贡献仍旧明显[图 3(b)], 贡献值为 50.1 ~ 82.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 分担率为 41% ~ 58%. 其中, 永乐店和宁河站的二次硝酸盐贡献仍最为显著(23% 和 18%), 但琉璃河和廊坊站, 二次有机物的贡献(24% 和 17%) 凸显. 相比秋季, 宁河和廊坊站冬季二次气溶胶的贡献无明显变化, 但北京两站点冬季二次气溶胶的贡献明显增加, 增加值分别为 19.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 19.2 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 冬季 PM_{2.5} 的主要一次污染源仍是汽油车、民用燃煤和生物质燃烧, 其贡献值分别为 15.4 ~ 32.7、14.4 ~ 18.7 和 7.2 ~ 12.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 相比秋季, 冬季汽油车和民用燃煤对 PM_{2.5} 的贡献值增加明显(5 ~ 17 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 5 ~ 11 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). 这可能是因为冬季

气温较低, 机动车排放因子有所增加^[31], 民用散煤燃烧量增加, 且因为冬季静稳性天气形势频繁出现, 扩散条件较差^[32], 导致近地面污染源对 PM_{2.5} 贡献较显著. 由于冬季采暖, 民用燃煤源冬季贡献理应增加更显著, 但可能是因为秋季采样时段临近采暖季, 散煤供暖的居民提前供暖导致秋季的结果也包含了采暖的影响, 所以秋冬季结果差异不明显. 北京郊区 PM_{2.5} 排放清单结果^[33] 也表明, 11 月和 1 月民用燃煤对 PM_{2.5} 排放量的贡献仅差 10%, 但和其他月相差 50% 以上. 冬季生物质燃烧源的贡献整体较秋季低(5% ~ 9%), 这与图 4(b) 中火点密度下降相一致. 这说明进入冬季, 仍有一定的生物质开放燃烧现象, 但强度明显下降.

2.3 区分污染程度的京津冀郊区源解析结果

根据国家“环境空气质量指数 (air quality index, AQI) 技术规定 (试行)”中 PM_{2.5} 在良和重度污染级别下的标准浓度 (75 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 150 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 将 PM_{2.5} 样品分为三类: PM_{2.5} 质量浓度为 0 ~ 75、75 ~ 150 和大于 150 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 分别对这三类样品做源解析, 得到区分污染程度的秋冬季源解析结果 (如图 5 和图 6).

秋季, 对比重污染天和清洁天, 各站点二次污

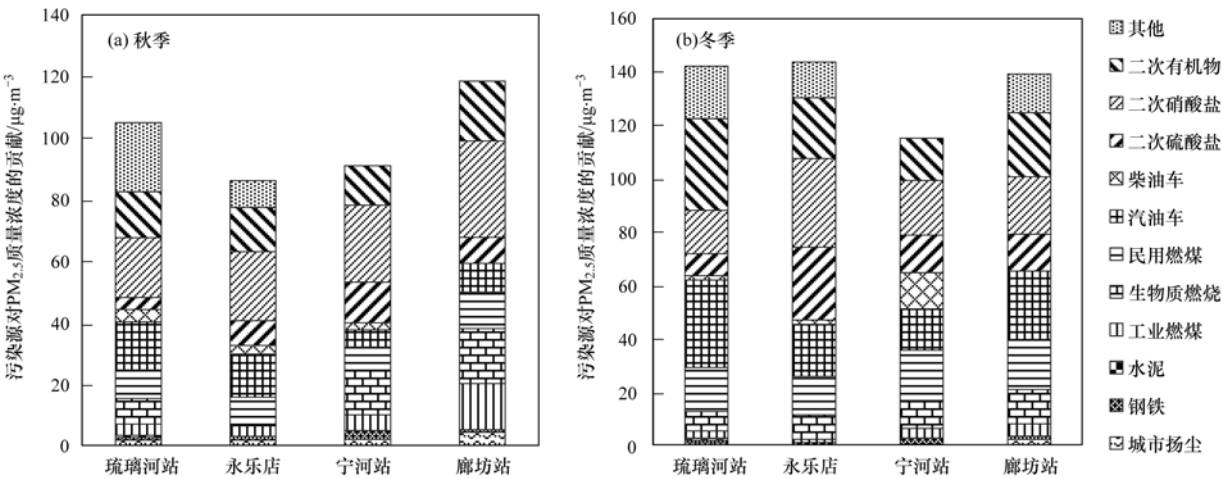


图3 京津冀地区4个郊区站点秋冬季PM_{2.5}来源解析

Fig. 3 Source apportionment of PM_{2.5} at four suburban sites of Beijing-Tianjin-Hebei region in autumn and winter

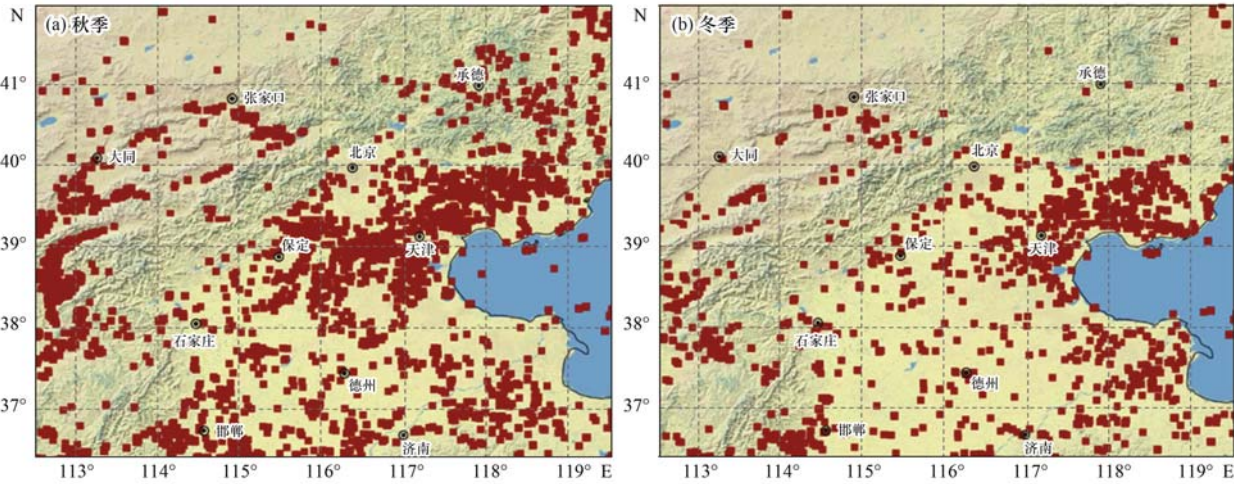


图4 秋冬季采样期间京津冀地区卫星火点图^[34]

Fig. 4 Firemap of Beijing-Tianjin-Hebei region during the sampling period in autumn and winter

染源的贡献值增加幅度($47.2 \sim 115.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)明显高于一次源($29.5 \sim 43.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 相应地重污染天的二次源PM_{2.5}总质量分担率(38%~71%)也

明显高于清洁天(33%~47%). 这表明了SO₂和NO_x等气态前体物的二次转化是重污染天气PM_{2.5}的重要成因. 4个站点二次硝酸盐的贡献在重污染

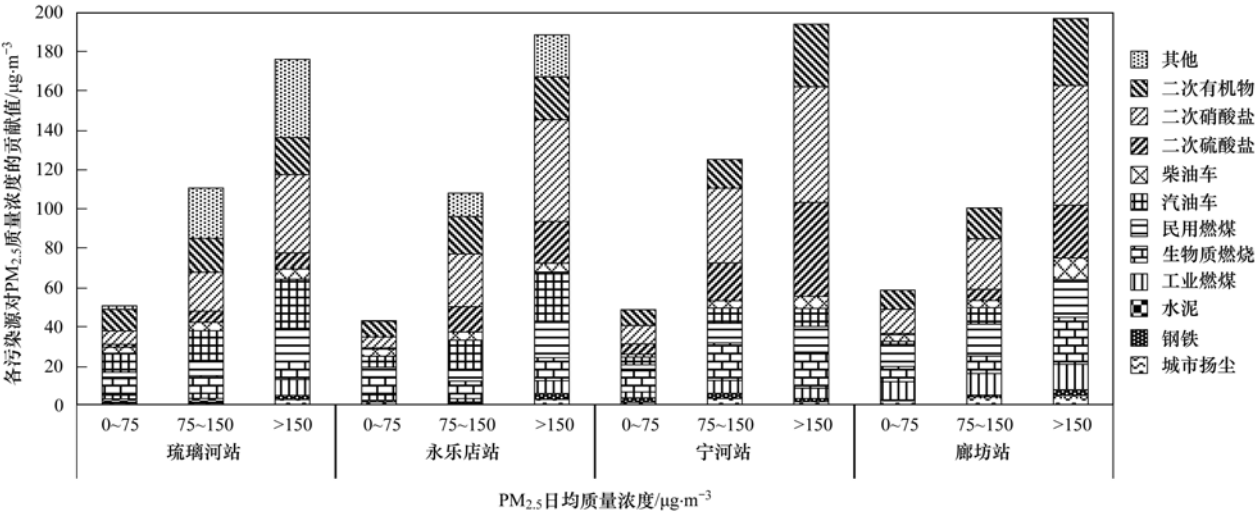


图5 秋季京津冀地区4个郊区站点不同污染水平大气PM_{2.5}来源解析

Fig. 5 Source apportionment of PM_{2.5} in four suburban areas of the Beijing-Tianjin-Hebei region in autumn based on different pollution levels

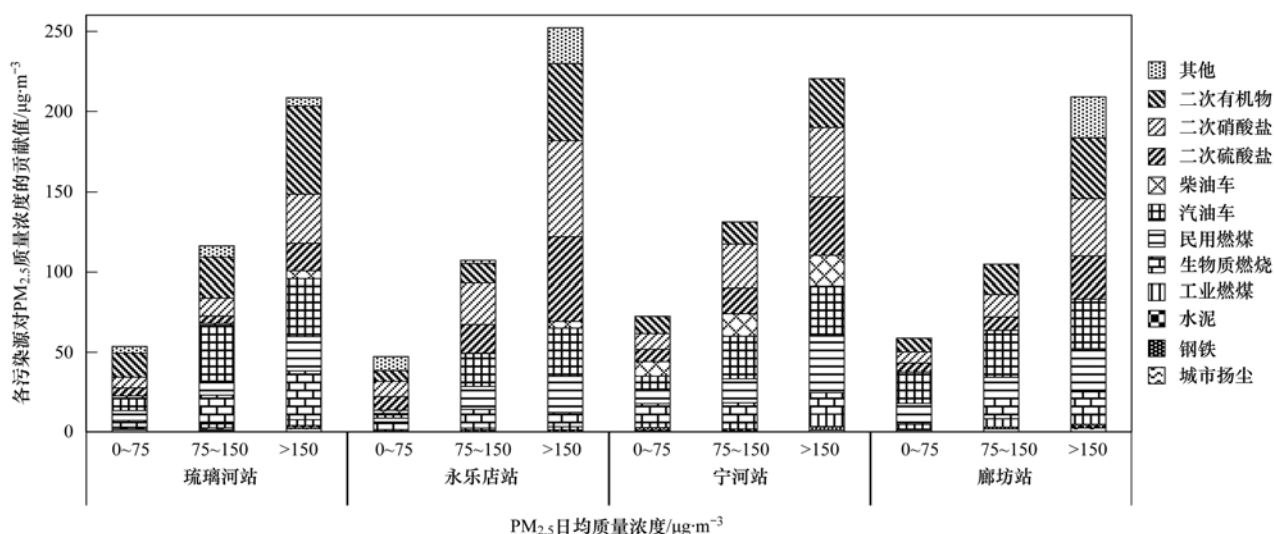


图6 冬季京津冀地区4个郊区站点不同污染水平下的大气 $PM_{2.5}$ 来源解析

Fig. 6 Source apportionment of $PM_{2.5}$ in four suburban areas of the Beijing-Tianjin-Hebei region in winter based on different pollution levels

时均有明显增加(清洁 13% ~ 21%, 重污染 23% ~ 31%), 二次硫酸盐的贡献除琉璃河站点外, 均有明显增加(清洁 1% ~ 11%, 重污染 11% ~ 25%)。琉璃河站点的二次硫酸盐贡献无论是清洁天(3%)还是重污染天(4%)均不明显, 这与琉璃河站点大气 SO_2 浓度($3.6 \mu g \cdot m^{-3}$)较低有关。一次污染源中, 琉璃河和永乐店站民用燃煤和汽油车贡献在重污染天增加明显($13.1 \sim 13.8 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $15.2 \sim 20.1 \mu g \cdot m^{-3}$), 但宁河和廊坊站则是生物质燃烧和民用燃煤在重污染天增加明显($7.8 \sim 16.2 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $7.8 \sim 9.7 \mu g \cdot m^{-3}$)。

冬季重污染期间各污染源的贡献情况明显较秋季复杂。重污染期间, 除永乐店站, 二次源的贡献值增加量($45.3 \sim 79.8 \mu g \cdot m^{-3}$)仍高于一次源($76.1 \sim 82.0 \mu g \cdot m^{-3}$), 但二者间的差异明显小于秋季。对于永乐店站, 重污染天二次源增加值明显($135.6 \mu g \cdot m^{-3}$), 显著高于其他站点, 从增长率来看, 其中二次有机物增长比例最高(约为 6 倍), 这可能是与永乐店地区冬季 VOCs 污染显著有关^[35]。一次污染源中, 所有站点民用燃煤在重污染天的贡献值增加明显($15.3 \sim 26.1 \mu g \cdot m^{-3}$), 其增加值也明显高于秋季。

整体来看, 冬季各站点间重污染天各污染源贡献的变化趋势较秋季同步性下降。这可能是因为冬季气温低, 二次气溶胶转化率下降, 导致冬季重污染过程中二次源贡献增加值不如秋季突出, 与此同时本地一次源的贡献较秋季显著。另一方面, 也可能是因为冬季风速较低, 区域传输影响较秋季小^[36], 导致本地源主导。因此, 秋季重污染应急应在区域层面上调控, 而冬季则更应加强本地污染源控制。

2.4 城区与郊区来源解析结果对比

将本研究北京两郊区站的源解析结果与相似采样时间的研究中北京市城区源解析结果^[8,13]相对比, 发现本研究得到的燃煤总贡献率(12% ~ 15%)与文献中的结果(12% ~ 23%)较为相似。但本研究区分了民用燃煤和工业燃煤的贡献, 发现琉璃河站和永乐店站民用燃煤贡献率均高于工业燃煤, 说明北京市燃煤排放控制的重点是民用散煤。相比已有研究中二次源的贡献率(16% ~ 47%), 本研究二次源贡献(37% ~ 58%)略高, 这可能是由于本研究两站点分别位于北京西南和东南传输通道上, 区域传输的影响比城区站点更明显。另外, 本研究交通源的贡献(15% ~ 24%)略高于文献结果(9% ~ 18%), 这可能是由于本文两郊区站均临近省间交通要道, 省际运输对站点周围大气 $PM_{2.5}$ 的影响较为明显。

3 结论

(1) 4 个郊区站点秋冬季源解析结果显示: 二次颗粒物(36% ~ 58%)、交通(8% ~ 26%)、民用燃煤(8% ~ 16%)和生物质燃烧(5% ~ 16%)是京津冀郊区秋冬季 $PM_{2.5}$ 的主要来源。

(2) 针对重污染天的源解析发现, 二次气溶胶在重污染期间贡献率增加明显, 其中秋季二次源对重污染的贡献比冬季更为显著, 且秋季各站点的污染来源变化呈现出更强的同步性。

(3) 尽管琉璃河和永乐店两个郊区站点燃煤源对 $PM_{2.5}$ 的总贡献率与北京城区较为接近, 但郊区站点的燃煤源以民用燃煤为主, 说明通过清洁能源替代民用散煤对京津冀大气 $PM_{2.5}$ 控制有重要意义。

参考文献:

- [1] 北京市环境保护局. 2015 年北京市环境状况公报[R]. 北京: 北京市环境保护局, 2016. 1-37.
- [2] 天津市环境保护局. 2015 年天津市环境状况公报[R]. 天津: 天津市环境保护局, 2016. 1-31.
- [3] 河北省环保厅. 2015 年河北省环境状况公报[R]. 河北: 河北省环保厅, 2016. 1-33.
- [4] 高愈霄, 霍晓芹, 闫慧, 等. 京津冀区域大气重污染过程特征初步分析[J]. 中国环境监测, 2016, **32**(6): 26-35.
Gao Y X, Huo X Q, Yan H, *et al.* Preliminary analysis on the characteristics of heavy air pollution events in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Environmental Monitoring in China, 2016, **32**(6): 26-35.
- [5] Zheng M, Salmon L G, Schauer J J, *et al.* Seasonal trends in PM_{2.5} source contributions in Beijing, China[J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(22): 3967-3976.
- [6] Wang H L, Zhuang Y H, Wang Y, *et al.* Long-term monitoring and source apportionment of PM_{2.5}/PM₁₀ in Beijing, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, **20**(11): 1323-1327.
- [7] Liu Z R, Hu B, Liu Q, *et al.* Source apportionment of urban fine particle number concentration during summertime in Beijing[J]. Atmospheric Environment, 2014, **96**: 359-369.
- [8] Yang H N, Chen J, Wen J J, *et al.* Composition and sources of PM_{2.5} around the heating periods of 2013 and 2014 in Beijing: implications for efficient mitigation measures[J]. Atmospheric Environment, 2016, **124**: 378-386.
- [9] Wang J, Zhou M, Liu B S, *et al.* Characterization and source apportionment of size-segregated atmospheric particulate matter collected at ground level and from the urban canopy in Tianjin[J]. Environmental Pollution, 2016, **219**: 982-992.
- [10] 杨妍妍, 李金香, 梁云平, 等. 应用受体模型(CMB)对北京市大气 PM_{2.5} 来源的解析研究[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(9): 2693-2700.
Yang Y Y, Li J X, Liang Y P, *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} in Beijing by the chemical mass balance[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(9): 2693-2700.
- [11] 唐邈. 天津市环境空气 PM_{2.5} 来源解析[D]. 天津: 南开大学, 2014. 1-80.
- [12] Huang R J, Zhang Y L, Bozzetti C, *et al.* High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China[J]. Nature, 2014, **514**(7521): 218-222.
- [13] 王琴, 张大伟, 刘保献, 等. 基于 PMF 模型的北京市 PM_{2.5} 来源的时空分布特征[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(10): 2917-2924.
Wang Q, Zhang D W, Liu B X, *et al.* Spatial and temporal variations of ambient PM_{2.5} source contributions using positive matrix factorization[J]. China Environmental Science, 2015, **35**(10): 2917-2924.
- [14] Wang H L, Zhou Y M, Zhuang Y H, *et al.* Characterization of PM_{2.5}/PM_{2.5-10} and source tracking in the juncture belt between urban and rural areas of Beijing[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, **54**(14): 2506-2515.
- [15] Watson J G, Chow J C, Lu Z Q, *et al.* Chemical mass balance source apportionment of PM₁₀ during the southern California air quality study[J]. Aerosol Science and Technology, 1994, **21**(1): 1-36.
- [16] Cai S Y, Wang Y J, Zhao B, *et al.* The impact of the "Air Pollution Prevention and Control Action Plan" on PM_{2.5} concentrations in Jing-Jin-Ji region during 2012-2020[J]. Science of the Total Environment, 2017, **580**: 197-209.
- [17] Lim H J, Turpin B J. Origins of primary and secondary organic aerosol in Atlanta; results of time-resolved measurements during the Atlanta supersite experiment[J]. Environmental Science & Technology, 2002, **36**(21): 4489-4496.
- [18] 马召辉, 梁云平, 张健, 等. 北京市典型排放源 PM_{2.5} 成分谱研究[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(12): 4043-4052.
Ma Z H, Liang Y P, Zhang J, *et al.* PM_{2.5} profiles of typical sources in Beijing[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(12): 4043-4052.
- [19] 郝吉明, 段雷, 易红宏, 等. 燃烧源可吸入颗粒物的物理化学特征[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 116-129.
- [20] 赵浩宁. 黑色金属冶炼(钢铁)行业细颗粒物 PM_{2.5} 排放特性及减排策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014. 1-48.
- [21] 马京华. 钢铁企业典型生产工艺颗粒物排放特征研究[D]. 重庆: 西南大学, 2009. 1-47.
- [22] 孔少飞. 大气污染源排放颗粒物组成、有害组分风险评价及清单构建研究[D]. 天津: 南开大学, 2012. 1-346.
- [23] Li X H, Wang S X, Duan L, *et al.* Particulate and trace gas emissions from open burning of wheat straw and corn Stover in China[J]. Environmental Science & Technology, 2007, **41**(17): 6052-6058.
- [24] US EPA. Speciate version 4.4[DB/OL]. <https://cfpub.epa.gov/speciate/>, 2014-03-20.
- [25] 王刚, 郎建垒, 程水源, 等. 重型柴油车 PM_{2.5} 和碳氢化合物的排放特征[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(12): 3581-3587.
Wang G, Lang J L, Cheng S Y, *et al.* Characteristics of PM_{2.5} and hydrocarbon emitted from heavy-duty diesel vehicle[J]. China Environmental Science, 2015, **35**(12): 3581-3587.
- [26] Wu B B, Shen X B, Cao X Y, *et al.* Characterization of the chemical composition of PM_{2.5} emitted from on-road China III and China IV diesel trucks in Beijing, China[J]. Science of the Total Environment, 2016, **551-552**: 579-589.
- [27] Zhang Y Z, Yao Z L, Shen X B, *et al.* Chemical characterization of PM_{2.5} emitted from on-road heavy-duty diesel trucks in China[J]. Atmospheric Environment, 2015, **122**: 885-891.
- [28] Chiang H L, Lai Y M, Chang S Y. Pollutant constituents of exhaust emitted from light-duty diesel vehicles[J]. Atmospheric Environment, 2012, **47**: 399-406.
- [29] 李松, 郎建垒, 程水源, 等. 典型固定燃烧源颗粒物成分谱特征研究[J]. 安全与环境学报, 2016, **16**(5): 312-319.
Li S, Lang J L, Cheng S Y, *et al.* Analysis of the profiles'characteristic features of the particulate matters in regard to the stationary coal combustion sources[J]. Journal of Safety and Environment, 2016, **16**(5): 312-319.
- [30] 李海萍, 赵颖, 傅毅明. 京津冀国家干线公路污染空间特征分析[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(10): 3515-3526.
Li H P, Zhao Y, Fu Y M. Spatial distribution of air pollutant emissions from national trunk highway in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH)[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(10): 3515-3526.
- [31] Watson J G, Chow J C, Chen L W A, *et al.* Particulate emission factors for mobile fossil fuel and biomass combustion sources[J]. Science of the Total Environment, 2011, **409**(12): 2384-2396.
- [32] Zhu W H, Xu X D, Zheng J, *et al.* The characteristics of abnormal wintertime pollution events in the Jing-Jin-Ji region and its relationships with meteorological factors[J]. Science of the Total Environment, 2018, **626**: 887-898.
- [33] Cai S Y, Li Q, Wang S X, *et al.* Pollutant emissions from residential combustion and reduction strategies estimated via a village-based emission inventory in Beijing[J]. Environmental Pollution, 2018, **238**: 230-237.

- [34] National Aeronautics and Space Administration. Fire information for resource management system [DB/OL]. <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map>, 2018-09-03.
- [35] 王琴, 刘保献, 张大伟, 等. 北京市大气 VOCs 的时空分布特征及化学反应活性[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(10): 3636-3646.
Wang Q, Liu B X, Zhang D W, *et al.* Temporal and spatial distribution of VOCs and their role in chemical reactivity in Beijing[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(10): 3636-3646.
- [36] Chang X, Wang S X, Zhao B, *et al.* Assessment of inter-city transport of particulate matter in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, **18**(7): 4843-4858.

欢迎订阅 2019 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2019 年全年 12 期。

国内统一连续出版物号:CN 11-1895/X

国际标准连续出版物号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205

国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjkk@rcees.ac.cn;网址:www.hjkk.ac.cn

CONTENTS

Contribution Assessment of Meteorology Conditions and Emission Change for Air Quality Improvement in Beijing During 2014-2017	YIN Xiao-mei, LI Zi-ming, XIONG Ya-jun, <i>et al.</i>	(1011)
Using Multiple Linear Regression Method to Evaluate the Impact of Meteorological Conditions and Control Measures on Air Quality in Beijing During APEC 2014	LI Ying-ruo, WANG Jun-xia, HAN Ting-ting, <i>et al.</i>	(1024)
Source Apportionment of PM _{2.5} in Suburban Area of Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter	WANG Tong, HUA Yang, XU Qing-cheng, <i>et al.</i>	(1035)
Fine Particulate Matter Source Profile of Typical Industries in Sichuan Province	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, XIONG Wen-peng, <i>et al.</i>	(1043)
Source Apportionment and Pollution Characteristics of PM _{2.5} During the Two Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2016 in a Typical Logistics City	ZHAO Xue-yan, YANG Wen, WANG Jing, <i>et al.</i>	(1052)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Heating and Non-heating Periods in Shenyang	ZHANG Xian, TIAN Sha-sha, LIU Ying-ying, <i>et al.</i>	(1062)
Interannual Variation of Metal Elements and Water-Soluble Ions in PM _{2.5} During Wintertime in Xinxiang and Their Source Apportionment	YAN Guang-xuan, LEI Hao-jie, ZHANG Jing-wen, <i>et al.</i>	(1071)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Ambient PM _{2.5} During Four Seasons in Yantai City	LIU Tong, WANG Xiao-jun, CHEN Qian, <i>et al.</i>	(1082)
Day-night Characteristics of Humic-like Substances in PM _{2.5} During Winter in Changzhou	GU Yuan, LI Qing, HUANG Wen-qian, <i>et al.</i>	(1091)
Pollution Characteristics and Occupational Exposure Risk of Heavy Metals in Indoor and Outdoor Ambient Particles at a Scaled Electronic Waste Dismantling Plant, Northwest China	CAO Hong-mei, ZHAO Liu-yuan, MU Xi, <i>et al.</i>	(1101)
Analysis of a Pollution Process in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Satellite and Surface Observations	QIU Yun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i>	(1111)
Spatial-temporal Variation of Ozone Concentration and Its Driving Factors in China	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1120)
Ozone Spatial-temporal Distribution and Trend over China Since 2013: Insight from Satellite and Surface Observation	ZHANG Qian-qian, ZHANG Xing-ying	(1132)
Characteristics of Ozone Pollution Distribution and Source Apportionment in Zhoushan	WANG Qiao-li, DONG Min-li, LI Su-jing, <i>et al.</i>	(1143)
Establishment of VOCs Emissions Factor and Emissions Inventory from Using of Architectural Coatings in China	GAO Mei-ping, SHAO Xia, NIE Lei, <i>et al.</i>	(1152)
Heterogeneous Oxidation of Secondary Organic Tracers of Isoprene and Toluene by Ozone	HUANG Ya-juan, CAO Gang, ZHU Rong-shu, <i>et al.</i>	(1163)
Inventory and Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emission from Agriculture and Animal Husbandry in Lanzhou City	LI Shi-xue, GUO Wen-kai, HE Xin, <i>et al.</i>	(1172)
Analysis of Stable Hydrogen and Oxygen Isotope Characteristics and Vapor Sources of Event-based Precipitation in Chengdu	HU Yue, LIU Guo-dong, MENG Yu-chuan, <i>et al.</i>	(1179)
Diffusive CO ₂ Flux Across the Water-air Interface of Reclaimed Shrimp Ponds in the Minjiang River Estuary Based on the TBL Model	ZHANG Yi-fei, YANG Ping, ZHAO Guang-hui, <i>et al.</i>	(1188)
Distribution and Seasonal Variations of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in the Bohai Sea and the North Yellow Sea	LIU Zhao-bing, LIANG Wen-jian, QIN Li-ping, <i>et al.</i>	(1198)
Sources, Characteristics and Transformation Dynamics of Fluorescent Dissolved Organic Matter in the Silin Reservoir	LAO Xin-yu, YUAN Jie, LIU Yu, <i>et al.</i>	(1209)
Microplastic Pollution of the Beaches in Xiamen Bay, China	LIU Qi-ming, LIANG Hai-tao, XI Gui-li, <i>et al.</i>	(1217)
Biogeochemical Characteristics in Shengli Site of Lijiang River Under the High Resolution Monitoring	WANG Qi-gang, XIAO Qiong, ZHAO Hai-juan, <i>et al.</i>	(1222)
Hydrochemical Characteristics and Possible Controls of Groundwater in the Xialatuo Basin Section of the Xianshui River	HE Jin, ZHANG You-kuan, ZHAO Yu-qing, <i>et al.</i>	(1236)
Pollution Characteristics of OPEs in the Surface Water and Sediment of the Jinjiang River in Chengdu City	WU Di, YIN Hong-ling, LI Shi-ping, <i>et al.</i>	(1245)
Community Structure and Predictive Functional Analysis of Surface Water Bacterioplankton in the Danjiangkou Reservoir	ZHANG Fei, TIAN Wei, SUN Feng, <i>et al.</i>	(1252)
Influence of Cyanobacterial Blooms on Denitrification Rate in Shallow Lake Taihu, China	LIU Zhi-ying, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i>	(1261)
Assessment of Ecosystem Health of an Urban River Based on the Microbe Index of Biotic Integrity (M-IBI)	SU Yao, XU Yu-xin, AN Wen-hao, <i>et al.</i>	(1270)
Influences of Biochar Application on Root Aerenchyma and Radial Oxygen Loss of <i>Acorus calamus</i> in Relation to Subsurface Flow in a Constructed Wetland	HUANG Lei, LIANG Yin-kun, LIANG Yan, <i>et al.</i>	(1280)
Pollution Load Characteristics of Runoff from Urban Roofs of Different Materials	HE Hu-bin, CHEN Cheng, LIN Yu-qing, <i>et al.</i>	(1287)
Preparation of BiOCl-(NH ₄) ₃ PW ₁₂ O ₄₀ Photocatalyst and a Mechanism for Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i>	(1295)
High Efficiency Removal of 1,2-Dichloroethane from Groundwater by Microscale Zero-valent Iron Combined with Biological Carbon Source	WU Nai-jin, SONG Yun, WEI Wen-xia, <i>et al.</i>	(1302)
Removal of Lead Ions from Water by Struvite Natural Zeolite Composite	DEND Man-jun, WANG Xue-jiang, CHENG Xue-jun, <i>et al.</i>	(1310)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution By Ca/Mg-Loaded Biogas Residue Biochar	YI Man, LI Ting-ting, LI Hai-hong, <i>et al.</i>	(1318)
Preparation of Two Kinds of Biochar and the Factors Influencing Tetracycline Removal from Aqueous Solution	CHENG Yang, SHEN Qi-bin, LIU Zi-dan, <i>et al.</i>	(1328)
Effect of Zirconium-Modified Zeolite Addition on Migration and Transformation of Phosphorus in River Sediments Under Static and Hydrodynamic Disturbance Conditions	YU Yang, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1337)
Removal Efficiencies and Mechanism Research on Four Sulfonamides and Their Acetyl Metabolites in a Wastewater Treatment Plant	WANG Da-peng, ZHANG Xian, YAN Chang-zhou	(1347)
Assessing Performance of Pollutant Removal from Municipal Wastewater by Physical and Chemical Methods Based on Membranes	XU Ting, LI Yong, ZHU Yi-jia, <i>et al.</i>	(1353)
Effect of Influent Ammonia Concentration on a Biological Phosphorus Removal Granules System	LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i>	(1360)
Start-up and Performance Recovery of Granular Sludge for Phosphorus Removal and Nitrification	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1367)
Realization of Short-cut Nitrification in a CAST Process at High Temperature and Its Phosphorus Removal Performance	MA Juan, YANG Rui-chun, YU Xiao-jun, <i>et al.</i>	(1375)
Nitrogen and Phosphorus Removal from Low C/N Municipal Wastewater Treated by a SPNDPR System with Different Aeration and Aerobic Times	YUAN Meng-fei, YU De-shuang, GONG Xiu-zhen, <i>et al.</i>	(1382)
ABR Decarbonization-Nitrosation Coupled with ANAMMOX to Treat Municipal Wastewater	LI Tian, CAO Jia-wei, XIE Feng-lian, <i>et al.</i>	(1390)
Start-up Performance and Sludge Characteristics of Single-stage Autotrophic Nitrogen Removal System with Granular Sludge at Low Ammonia Nitrogen Concentration at Room Temperature	XIE Lu-lin, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i>	(1396)
ANAMMOX Reactor with Two Kinds of Inoculated Sludge: Start-up and Kinetics Characteristics	REN Jun-yi, CHEN Lin-yi, LI Hui-chun, <i>et al.</i>	(1405)
Operation Characteristics of the Biofilm CANON Reactor During the Temperature Reduction Process	FU Kun-ming, LIAO Min-hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i>	(1412)
Nitrogen Removal Characteristics and Analysis of Microbial Community Structure in an IEM-UF Simultaneous Separation and Denitrification System	LIU Zi-qi, ZHANG Yan, MA Xiang-shan, <i>et al.</i>	(1419)
Effect of Temperature on the Activity Kinetics of <i>Nitrobacter</i>	YU Xue, SUN Hong-wei, LI Wei-wei, <i>et al.</i>	(1426)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge Based on Microwave Pretreatment Combined with Zero Valent Iron	NIU Yu-tong, LIU Ji-bao, MA Shuang, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Environmental Factors on Tetracyclines and Macrolides Resistance Genes in Cattle Manure Composting Systems	PENG Jing, WANG Ke, GU Yue, <i>et al.</i>	(1439)
Effect of Environmental Factors on Variation Characteristics of Soil Microbial Respiration and Its Temperature Sensitivity	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li	(1446)
Response of Soil Respiration and Its Components to Simulated Acid Rain in a Typical Forest Stand in the Three Gorges Reservoir Area	LI Yi-fan, WANG Yu-jie, WANG Bin, <i>et al.</i>	(1457)
Effects of Fertilization on the Nitrogen Residual Amounts and Leaching from Citrus Orchard Soil in the Three Gorges Reservoir Area	WANG Tian, HUANG Zhi-lin, ZENG Li-xiong, <i>et al.</i>	(1468)
Microbial Carbon Source Metabolic Profile in Rice Rhizosphere and Non-rhizosphere Soils with Different Long-term Fertilization Management	NING Zhao, CHENG Ai-wu, TANG Hai-ming, <i>et al.</i>	(1475)
Characterization of Soil Organic Carbon Mineralization Under Different Gradient Carbon Loading in Paddy Soil	TONG Yao-yao, WANG Ji-fei, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i>	(1483)
Soil Organic Carbon Distribution and Components in Different Plant Communities Along a Water Table Gradient in the Huixian Karst Wetland in Guilin	XU Guang-ping, LI Yan-qiong, SHEN Yu-yi, <i>et al.</i>	(1491)
Distribution of Organic Carbon in Soil Aggregates from Four Kinds of Forest Vegetation on Jinyun Mountain	WANG Fu-hua, LÜ Sheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(1504)
Review of Research on the Impacts of Atmospheric Pollution on the Health of Residents	QIN Yao-chen, XIE Zhi-xiang, LI Yang	(1512)