

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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>3</sub> 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 <sub>2</sub> 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 <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> PW <sub>12</sub> O <sub>40</sub> 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, 郭跃利, 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)                                                                       |                                                       |



# 烟台市环境受体 $\text{PM}_{2.5}$ 四季污染特征与来源解析

刘童<sup>1</sup>, 王晓军<sup>2</sup>, 陈倩<sup>2</sup>, 温杰<sup>1</sup>, 黄渤<sup>3</sup>, 朱红霞<sup>4</sup>, 田瑛泽<sup>1\*</sup>, 冯银厂<sup>1</sup>

(1. 南开大学环境科学与工程学院, 国家环境保护城市空气颗粒物污染防治重点实验室, 天津 300071; 2. 烟台市环境监控中心, 烟台 264003; 3. 广州禾信仪器股份有限公司, 广州 510530; 4. 中国环境监测总站, 北京 100012)

**摘要:** 于2016~2017年四季在烟台市3个点位采集了 $\text{PM}_{2.5}$ 样品, 分析了其质量浓度和化学组分特征. 利用CMB模型对受体进行解析, 并利用后向轨迹和PSCF对传输气流和潜在源区进行了分析. 结果表明, 烟台市监测点位冬季、春季、夏季和秋季的 $\text{PM}_{2.5}$ 平均质量浓度分别为 $(89.45 \pm 56.80)$ 、 $(76.78 \pm 28.44)$ 、 $(32.65 \pm 17.92)$ 和 $(57.32 \pm 24.60) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ .  $\text{PM}_{2.5}$ 浓度表现出明显的季节变化特征( $P < 0.01$ ). 全年 $\text{PM}_{2.5}$ 各源类分担率大小依次为: 二次硝酸盐源(20.3%) > 城市扬尘源(15.7%) > 机动车排放源(14.9%) > 燃煤源(13.8%) > 二次硫酸盐源(12.8%) > SOC(6.1%) > 建筑水泥尘源(5.5%) > 海盐源(2.9%), 可以看到烟台市以二次源、扬尘、机动车排放源和燃煤源为主要污染源. 春季硝酸盐源和城市扬尘源是重要贡献源类, 夏季硫酸盐源贡献突出, 燃煤源在秋冬季占比突出. 烟台市气流输送和潜在源区也呈现出明显的季节变化: 冬季主要受烟台市短距离输送的影响; 夏季主要受烟台东部沿海和本地的影响; 春秋季节主要受山东东北部和东部沿海地区的区域传输和烟台市本地源的影响.

**关键词:** 季节差异; 化学质量平衡模型(CMB); 潜在源贡献因子(PSCF);  $\text{PM}_{2.5}$ ; 烟台市

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)03-1082-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201807252

## Pollution Characteristics and Source Apportionment of Ambient $\text{PM}_{2.5}$ During Four Seasons in Yantai City

LIU Tong<sup>1</sup>, WANG Xiao-jun<sup>2</sup>, CHEN Qian<sup>2</sup>, WEN Jie<sup>1</sup>, HUANG Bo<sup>3</sup>, ZHU Hong-xia<sup>4</sup>, TIAN Ying-ze<sup>1\*</sup>, FENG Yin-chang<sup>1</sup>

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Urban Ambient Air Particulate Matter Pollution Prevention and Control, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China; 2. Yantai Environmental Monitoring Center, Yantai 264003, China; 3. Guangzhou Hexin Instrument Company Limited, Guangzhou 510530, China; 4. China Environmental Monitoring Station, Beijing 100012, China)

**Abstract:**  $\text{PM}_{2.5}$  samples were collected at three sites in Yantai City during all four seasons of 2016-2017, and the mass concentration and chemical composition characteristics were analyzed. The CMB model was used to calculate source apportionment of ambient  $\text{PM}_{2.5}$ , and the backward trajectory cluster and PSCF were used to analyze the transport flow and potential source regions. The results showed that the average mass concentrations of  $\text{PM}_{2.5}$  in winter, spring, summer, and autumn in Yantai were  $(89.45 \pm 56.80)$ ,  $(76.78 \pm 28.44)$ ,  $(32.65 \pm 17.92)$  and  $(57.32 \pm 24.60) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , respectively. The  $\text{PM}_{2.5}$  concentration showed a significant seasonal variation ( $P < 0.01$ ). The contribution of  $\text{PM}_{2.5}$  sources was as follows: secondary nitrate (20.3%) > crustal dust (15.7%) > vehicle exhaust (14.9%) > coal combustion (13.8%) > secondary sulphate (12.8%) > SOC (6.1%) > cement dust (5.5%) > sea salt source (2.9%). It can be seen that the predominant sources were secondary sources, crustal dust, vehicle exhaust, and coal combustion. The sources of nitrate in spring and of crustal dust were important contributors. The contribution of sulfate in summer was prominent, and the proportion of coal combustion was high in autumn and winter. Yantai City's airflow transport and potential source regions also showed significant seasonal changes; winters were mainly affected by short-distance transport in Yantai City; summers were mainly affected by the coastal of eastern Yantai City and local areas; springs and autumns were mainly affected by regional transmission in the northeast and in the eastern coastal areas of Shandong Province and by local sources in Yantai City.

**Key words:** seasonal variation; chemical mass balance (CMB) model; potential source contribution function (PSCF);  $\text{PM}_{2.5}$ ; Yantai City

2017年全国空气质量总体改善的同时, 局部时段有所反弹<sup>[1]</sup>. 而细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 在区域和全球尺度都会造成危害, 可以通过影响人体呼吸系统从而增加死亡率<sup>[2]</sup>, 显著降低大气能见度<sup>[3]</sup>, 改变气候, 还会影响太阳辐射平衡<sup>[4]</sup>等. 烟台市近年来全力打造“生态城市、美丽烟台”, 空气质量呈逐年好转趋势, 其中2017年烟台市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度为 $35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 达到国家环境空气二级标准(35

$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )<sup>[5]</sup>, 其作为沿海城市, 在煤炭作为主要能耗的同时依然保持了全国较低的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度水平, 所以探究其污染(生成)与扩散机制将会对其他城市具有很大的启示与借鉴作用.

收稿日期: 2018-07-29; 修订日期: 2018-09-13

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项

作者简介: 刘童(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染防治, E-mail: liutong940119@163.com

\* 通信作者, E-mail: tianyingze@hotmail.com

烟台市已有的颗粒物研究大多集中在在线颗粒物浓度季节性差异<sup>[6]</sup>和污染特征分析<sup>[7,8]</sup>，源解析工作开展不足。目前针对颗粒物来源解析应用最广泛的是受体模型<sup>[9,10]</sup>，其中化学质量平衡模型 (chemical mass balance, CMB) 作为已知源类受体模型的代表，无需气象资料和排放清单的信息，输入为源谱信息  $F$  和受体点成分谱信息  $X$ ，输出为源贡献矩阵  $G$ ，解析得到的物理意义明确，是环境保护部和 USEPA 推荐使用的大气颗粒物来源解析重要方法<sup>[11]</sup>。有研究表明 PM<sub>2.5</sub> 在不同季节的污染特征有差异<sup>[12]</sup>，沿海地区的季节污染特征更是有其鲜明的特征<sup>[13]</sup>，但针对沿海城市进行四季源解析的研究较为缺乏，因此本研究将应用 CMB 模型对烟台市 PM<sub>2.5</sub> 四季来源进行解析，以期探究其四季污染特征。

PM<sub>2.5</sub> 来源广泛，区域输送会对本地造成一定的影响<sup>[14,15]</sup>，任传斌等<sup>[16]</sup>研究了北京城区不同季节 PM<sub>2.5</sub> 的潜在源区分布及其贡献特性，发现输送途径的季节特征明显，不同输送途径对北京城区 PM<sub>2.5</sub> 的贡献差异显著，因此对监测点位四季分别进行后向轨迹模拟以判断气流轨迹和潜在源贡献分析，从而判断潜在污染源区以期更好地探究其区域输送模式。

本研究于 2016 ~ 2017 年在烟台市 3 个点位采集了 4 个季节的 PM<sub>2.5</sub> 样品，分析了浓度时间变化，主要组分变化特征、四季的气团传输路径和较大概率的潜在污染源地区，揭示了以烟台市为代表的沿海城市的四季污染源变化特征、污染成因和来源。

1 材料与方法

1.1 采样点设置

根据烟台市功能区划和污染源排放特征，选取了福山环境保护局、盛泉工业园和百盛商城这 3 个观测点位采集了 PM<sub>2.5</sub> 样品。福山环保局为混合功

能区，位于市区中心，集商业、交通、住宅为一体，该监测点位周边主要是办公楼；盛泉工业园为工业区，在莱山区工业园内，紧邻龙珠路；百盛商城为混合功能区，位于市区中心，是集商业、交通、住宅为一体，周边为商业区。

1.2 PM<sub>2.5</sub> 样品的采集

样品采集时间为 2016 年 12 月 19 ~ 21 日、2017 年 1 月 4 ~ 19 日 (冬季) 和 2017 年 3 月 13 ~ 27 日 (春季)、2017 年 8 月 22 日 ~ 9 月 8 日 (夏季)、2017 年 10 月 16 ~ 30 日 (秋季)。采样时长 22 h。采样仪器为智能中流量采样器 (武汉天虹, TH-150C 型)，流量 100 L·min<sup>-1</sup>，切割粒径 2.5 μm。本研究采样选择有机滤膜和石英滤膜，分析离子、碳组分采用石英滤膜，有机滤膜用来分析无机元素。采样期间共采集 PM<sub>2.5</sub> 滤膜样品共 194 个，其中有效滤膜共 186 个。

1.3 源样品的采集

根据烟台市颗粒物排放特征和现场调查，选择了城市扬尘源 (毛刷收集法)、燃煤源 (稀释通道法)、建筑水泥尘 (毛刷收集和稀释通道法) 等进行采集。稀释通道法采集的滤膜进行保存和分析，其他采集的样品经过筛通过南开大学自主研发的 NK-ZXF 再悬浮采样器将全粒径样品中的 PM<sub>2.5</sub> 样品捕集到滤膜后进行分析<sup>[17,18]</sup>。硫酸盐和硝酸盐源成分谱采用了纯硫酸铵和硝酸铵化学组成建立的虚拟成分谱<sup>[19]</sup>。机动车尾气尘采用南开大学和美国 EPA 源成分谱中的机动车成分谱。

1.4 样品化学组分分析

本研究中颗粒物质量浓度通过重量法进行测定，分析组分包括 17 种无机元素、8 种水溶性离子和 OC、EC 等。具体分析方法和仪器见表 1。为了实现受体采样的全过程跟踪和问题可追溯性，本研究针对现场采样、滤膜称重、滤膜交接、滤膜保存和每批次样品分析等环节实行全过程质控。

表 1 化学组分分析方法及项目<sup>1)</sup>

Table 1 Chemical composition analysis methods and parameters

| 分析项目                                                                                                                                                                            | 分析方法        | 所用仪器                                                                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|---------------------------------------------------------------------------|
| PM <sub>2.5</sub> 质量浓度                                                                                                                                                          | 重量法         | 百万分之一天平                                                                   |
| OC、EC                                                                                                                                                                           | 热光反射法       | 热/光碳分析仪 DRI-2001A <sup>[20]</sup>                                         |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 、NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 、NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 、Cl <sup>-</sup> 、Na <sup>+</sup> 、K <sup>+</sup> 、Mg <sup>2+</sup> 、Ca <sup>2+</sup> | 离子色谱法       | Dionex 2000 <sup>[21]</sup>                                               |
| Mg、Al、Si、K、Ca、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Cu、Zn、Pb、Ni、As、Na、Ba                                                                                                                                | 等离子发射光谱/质谱法 | ICP-OES/ICP-MS (Agilent 5110、Horiba GY2000-2/Agilent7900) <sup>[22]</sup> |

1.5 CMB 模型

化学质量平衡受体模型 (CMB) 是由一组线性方程构成的，表示每种化学组分的受体浓度等于各种排放源类的成分谱中这种化学组分的含量值和各

种排放源类对受体的贡献浓度值乘积的线性和<sup>[23]</sup>。由于该模型物理意义明确，算法日趋成熟而成为目前最重要最实用的受体模型。其基本原理如公式 (1) 所示：



$$C_i = \sum_{j=1}^J F_{ij} \cdot S_j \quad (1)$$

式中,  $C_i$  为受体大气颗粒物中化学组分  $i$  的质量浓度测量值,  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $F_{ij}$  为第  $j$  类源的颗粒物中化学组分  $i$  的含量(质量分数)测量值,  $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ;  $S_j$  为第  $j$  类源贡献的浓度计算值,  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

### 1.6 后轨迹和潜在源贡献

后向轨迹模式利用多种气象要素,如温度、气压、相对湿度、地面沉降、水平和垂直风速等,并将输送、扩散和沉降过程全面考虑,广泛应用于污染物的传输和扩散研究中<sup>[24]</sup>. 本文采用美国国家环境预报中心(NCEP)气象要素数据,利用后向轨迹分析软件 TrajStat<sup>[25]</sup>, 计算和分析大气污染物的来源、输送、扩散轨迹. 将烟台市福山环保局点位(121.3°E, 37.5°E)作为后向轨迹的起始点, 500 m 高度的气团作为大气边界层的平均流场<sup>[26]</sup>, 对每天 00:00、06:00、12:00、18:00 进行 48 h 后轨迹聚类分析.

PSCF (potential source contribution function, 潜在源贡献因子)是一种基于气流轨迹分析识别源区的方法<sup>[27]</sup>. 利用经过某一网格  $ij$  的污染轨迹数( $m_{ij}$ )占经过此网格的所有轨迹数( $n_{ij}$ )的比值来确定 PSCF 值的大小, 网格颜色越深, 代表经过此网格的气团对接受点的空气质量影响的概率越大, 也即 PSCF 值越大. 具体公式如下:

$$\text{PSCF}_{ij} = \frac{m_{ij}}{n_{ij}} \quad (2)$$

利用 PSCF 对  $\text{PM}_{2.5}$  浓度进行分析, 将研究区域分成  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  的水平网格, 并对  $\text{PM}_{2.5}$  阈值设定为各个季节的浓度平均值, 以此计算每个网格内的 PSCF 值. 由于距离起始点较远的地区,  $n_{ij}$  值较小, 所以会带来很大的不确定性, 当  $n_{ij}$  值小于所有网格中的平均轨迹端点数的 3 倍时, 引入  $W_{ij}$  来减少不确定性, 即 WPSCF (weighted potential source contribution function, 权重潜在源贡献因子) =  $W_{ij} \times \text{PSCF}$ .  $W_{ij}$  定义如下:

$$W_{ij} = \begin{cases} 1.00 & (80 < n_{ij}) \\ 0.70 & (20 < n_{ij} \leq 80) \\ 0.42 & (10 < n_{ij} \leq 20) \\ 0.05 & (n_{ij} \leq 10) \end{cases}$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度季节变化特征

监测期间, 烟台市监测点位冬季、春季、夏季、秋季和全年的  $\text{PM}_{2.5}$  平均质量浓度分别为  $(89.45 \pm$

$56.80) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $(76.78 \pm 28.44)$ 、 $(32.65 \pm 17.92)$ 、 $(57.32 \pm 24.60)$  和  $(64.05 \pm 43.18) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 分别为《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)  $\text{PM}_{2.5}$  的全年平均质量浓度二级标准限制 ( $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 1.54、1.19、0、0.64 和 0.83 倍. 烟台市  $\text{PM}_{2.5}$  浓度相对较低, 如从中国空气在线监测分析平台上  $\text{PM}_{2.5}$  数据来看, 采样期间济南市均大幅高于烟台市; 沿海城市天津市高于烟台, 但总体差距相对较小 ([www.aqistudy.cn](http://www.aqistudy.cn)). 根据 ANOVA 表(表 2),  $\text{PM}_{2.5}$  浓度各季节之间在 95% 置信水平上有显著差异.

由图 1 可知, 烟台市  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度在季节变化上呈现冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季的趋势, 其中冬季  $\text{PM}_{2.5}$  浓度是夏季的 2.74 倍. 这可能与各季节主要污染源与排放量的差异有关, 以及不同季节的平均风速和风向概率分布所造成的污染物扩散程度不同有关. 其中采样期间, 风速 ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ): 春季 (2.10) > 冬季 (1.97) > 夏季 (1.70) > 秋季 (1.60); 降水量 (mm): 冬季 (45) > 夏季 (21) > 春季 (7) > 秋季 (0) ([https://rp5.ru](http://rp5.ru)). 以燃煤为主的采暖方式 (2017 年烟台民用煤炭消费高达 200 万 t) 会直接产生大量的颗粒物、氧化硫和氮氧化物, 其中硫氧化物在大气中进行复杂的光化学反应生成硫酸盐<sup>[7]</sup>. 冬季边界层较低和较多的静稳天气导致的污染物浓度的累积也使得冬季成为四季  $\text{PM}_{2.5}$  浓度最高的季节; 春季错峰生产(水泥行业)的结束使得工业污染物排放增多, 多风(主导风向为北风和东北风)的季节使得扬尘源变得突出; 而夏季大气边界层较高利于扩散且由于雨季的降水冲刷作用, 使得浓度较低. 秋季发生了一次周期为一周的污染过程(10 月 23 ~ 30 日), 使得浓度较夏季有明显升高.

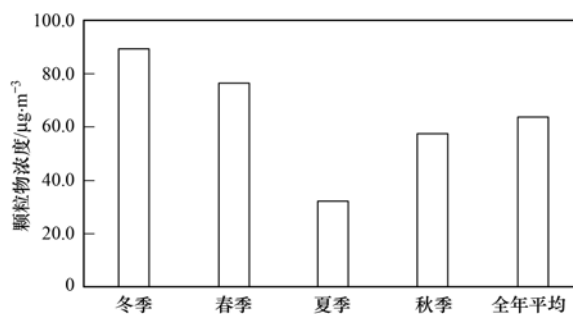


图 1 烟台市不同季节的  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度

Fig. 1  $\text{PM}_{2.5}$  mass concentration in different seasons in Yantai City

### 2.2 主要化学组分季节变化特征

烟台市环境受体颗粒物中主要化学组分的质量浓度和质量分数见图 2. 颗粒物化学组成方面,  $\text{NO}_3^-$ 、OC、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、EC 和 Si 是  $\text{PM}_{2.5}$  主要组分, 在  $\text{PM}_{2.5}$  中的质量分数加和为 46.98%

表 2 季节变化对 PM<sub>2.5</sub> 浓度影响的方差分析<sup>1)</sup>

Table 2 Analysis of variance of the effect of seasonal variation on PM<sub>2.5</sub> concentration

| 项目 | 平方和        | df    | 平均值平方     | F      | 显著性      |
|----|------------|-------|-----------|--------|----------|
| 参数 | 86 920. 39 | 3. 00 | 28973. 46 | 20. 44 | 0. 00 ** |

1) \* 表示  $P < 0. 05$ , \*\* 表示  $P < 0. 01$

(春季)、23. 11% (夏季)、34. 77% (秋季) 和 56. 31% (冬季)。水溶性离子占比 (37. 60%) 最大, 其次是碳组分 (OC、EC; 22. 61%), 元素占比 (8. 06%) 最小。其中水溶性离子浓度和质量分数占比季节差异明显,  $\text{NO}_3^-$  浓度在夏季 ( $4. 48 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 最低, 这可能与夏季温度较高, 硝酸盐易挥发有关<sup>[28]</sup>; 而冬季的浓度最高 ( $14. 79 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 这是由于稳定的大气层结构使得污染物滞留时间增长, 加剧了二次反应, 且  $\text{NO}_3^-$  在低温环境下易于以颗粒态形式存在<sup>[29,30]</sup>。  $\text{SO}_4^{2-}$  质量分数在夏季 (18. 08%) 最高, 在秋季 (8. 57%) 最低, 这可能与夏季光照时间长且辐射强度大, 使得气态前体物  $\text{SO}_2$  在颗粒物表面易发生非均相反应生成  $\text{SO}_4^{2-}$  有关, 以及光化学反应产生的自由基以及  $\text{O}_3$  可以作为氧化剂加速硫酸盐的生成有关<sup>[31]</sup>;  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度在冬季最高, 冬季盛行北风和西南风, 西南方向的山东其他地区也存在冬季大量使用燃煤的情况, 因此导致的气态前体物的增多, 而在传输过程不断被氧化成硫酸盐<sup>[32]</sup>。元素 Si 占比和浓度在春季最高, 结合北风和东北风主导的风向表明内蒙等地区的沙尘传输和本地扬尘再悬浮在春季加强<sup>[13]</sup>。

$\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$  质量浓度的比值常被用来反映移动源 (如汽车尾气) 和固定源 (如燃煤) 对大气颗粒物

中水溶性组分相对贡献的重要指标<sup>[33]</sup>。烟台市  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$  在春夏秋冬的比值分别是 0. 49、1. 32、0. 52 和 0. 74, 不同的季节比值的变化显示出排放源的变化, 春秋冬季比值均依次增大推测烟台市冬季燃煤的贡献升高, 这与源解析结果相一致 (见图 2)。夏季比值较高, 可能与夏季高温和光照加速了硝酸盐的挥发和  $\text{SO}_2$  向硫酸盐的气相转化有关<sup>[13]</sup>。  $\text{NO}_3^-$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  相关性在冬季最高 ( $r = 0. 931$ , 表 3) 推测冬季  $\text{NO}_3^-$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  同源性好, 可能二者共同来自液相的二次氧化反应加强。冬春季  $\text{NO}_3^-$  与  $\text{NH}_4^+$  相关系数高于  $\text{SO}_4^{2-}$  与  $\text{NH}_4^+$ , 夏秋季相反, 这与  $\text{NH}_4^+$  先与  $\text{SO}_4^{2-}$  反应不一致, 但与 Liu 等<sup>[34]</sup> 在 2017 年研究相一致。  $\text{NH}_4^+$  与  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  相关系数在春季最低, 但  $\text{K}^+$  与二者在春季有强相关性, 推测二者在春季存在  $\text{KNO}_3$ 、 $\text{K}_2\text{SO}_4$  或  $\text{KHSO}_4$  形式。夏季  $\text{Na}^+$  与  $\text{Cl}^-$  在 0. 01 水平下有显著弱相关 ( $r = 0. 353$ ), 与其他地壳类物质相关性差, 可能与夏季海风 (新鲜海盐) 输送有关。

OC/EC 的比值可以表征二次有机气溶胶的生成, 烟台市 OC/EC 的比值在冬春夏秋季分别为 2. 93、3. 20、2. 47 和 2. 38, 结合四季源解析 (见 2. 3 节) 均发现有解析出二次有机气溶胶的贡献 (均高

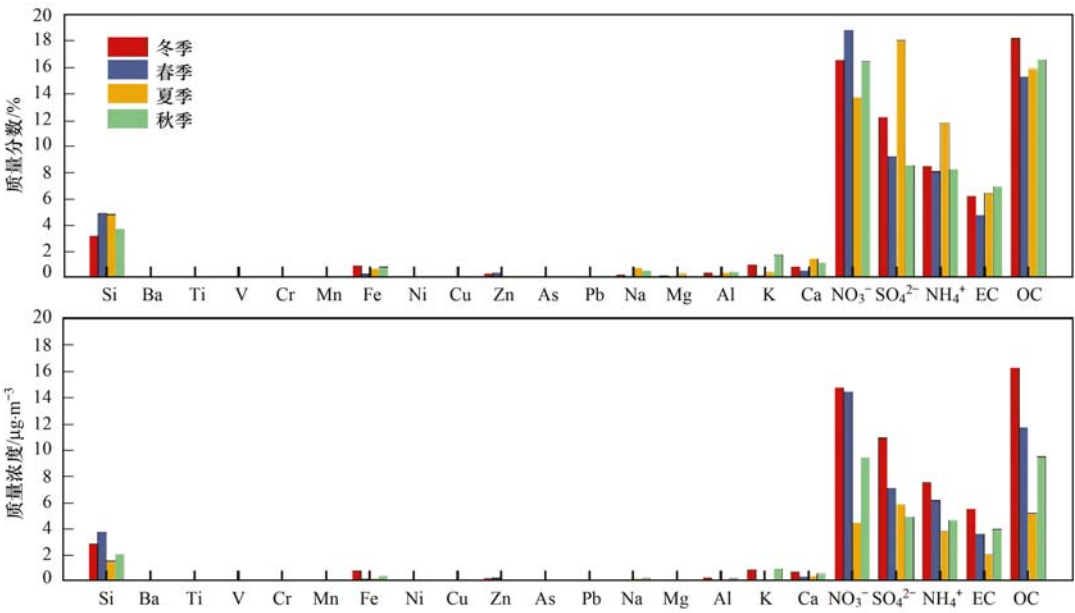


图 2 烟台市四季 PM<sub>2.5</sub> 中主要化学组分的质量分数和质量浓度

Fig. 2 Percentage and mass concentration of main chemical components in the four seasons of PM<sub>2.5</sub> in Yantai City



于6). OC 和 EC 在冬春夏秋季的相关性系数(图3)分别为0.59、0.52、0.69和0.59,且成显著性相关( $P < 0.01$ ),冬春夏秋季 OC 和 EC 的 Pearson 相关系数分别为0.770、0.721、0.828和0.768.春季的相关性最差也显示出春季 OC、EC 的排放源较为

复杂,这与2011年在南京地区的研究相一致<sup>[35]</sup>,且 OC/EC 比值在春季最高,推测可能是春季二次转化提高导致 OC 增大,加上春季风速较大且多变,携带其他地区的污染物传输至烟台地区,使得 OC、EC 来源相对复杂.

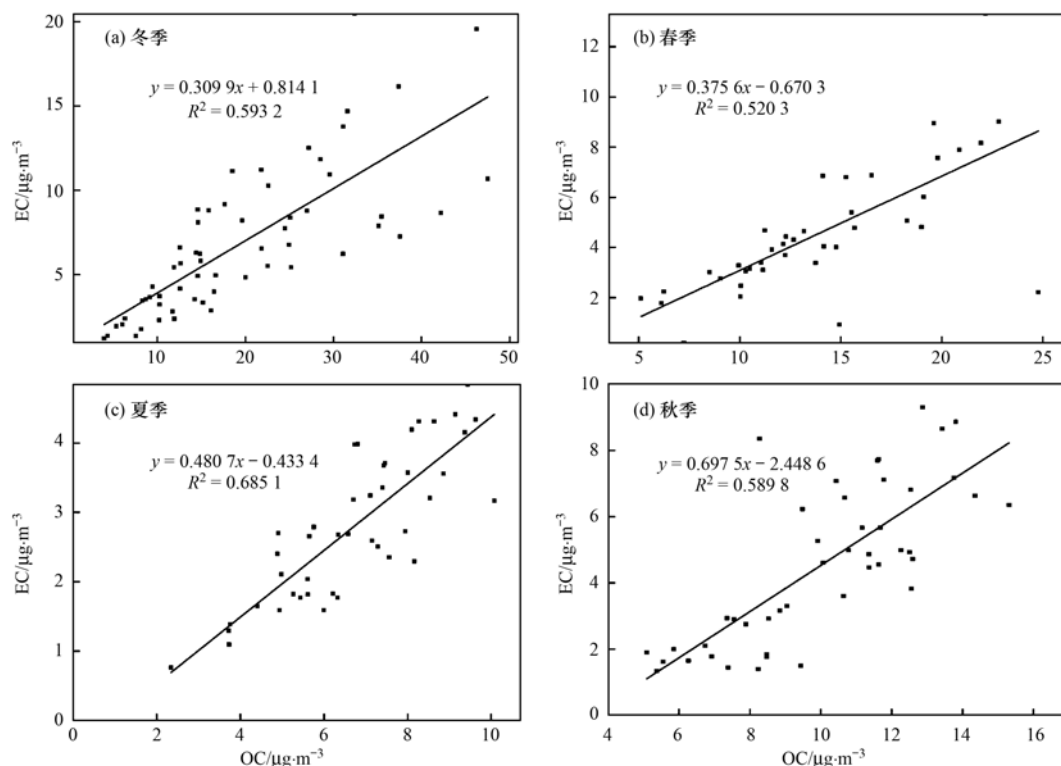


图3 烟台市  $PM_{2.5}$  中 OC 和 EC 相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis of OC and EC in  $PM_{2.5}$  in Yantai City

## 2.3 颗粒物源解析

四季源解析结果如图4所示.燃煤源在秋冬季高,夏季最低,可能与冬季燃煤取暖和不利的气象条件有关;机动车排在夏季分担率最高,冬季分担率最低;二次硫酸盐的分担率呈现夏季最高、春季最低,夏季相对较强的光化学反应使二次反应速率加快,硫酸盐贡献提升;二次硝酸盐分担率夏季最低,其他季节较高,可能与其在夏季平均气温高,颗粒物中的硝酸盐易分解有关.海盐源贡献在夏季最高,结合 Na 在夏季占比最高,推测与夏季受海洋气团影响为主,海陆循环较盛行有关.结合图6可以看到夏季有10.94%的气团来自海洋,与结果相一致.二次有机气溶胶质量浓度在春季最大( $4.68 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ),推测 OC 在春季二次转化更强烈.其中二次有机碳的计算公式为:

$$\text{SOC} = \text{TOC} - \text{EC} \times (\text{OC}/\text{EC})_{\min}$$

式中,TOC 为总有机碳;EC 为元素碳;  $(\text{OC}/\text{EC})_{\min}$  为监测期间最小的 OC/EC 比值.

全年  $PM_{2.5}$  的来源分担率(图5)大小依次为:二次硝酸盐源(20.3%) > 城市扬尘源(15.7%) > 机

动车排放源(14.9%) > 燃煤源(13.8%) > 二次硫酸盐源(12.8%) > 二次有机碳(SOC, 6.1%) > 建筑水泥尘源(5.5%) > 海盐源(2.9%),其中贡献源类以二次颗粒物,城市扬尘和机动车排放源为主导(分担率均 > 14%).其中城市扬尘主要来自道路运输、裸露土地等;二次硫酸盐、二次硝酸盐、二次有机碳分别为  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、VOCs 等污染物经大气(光)化学反应生成的二次颗粒物<sup>[36]</sup>.二次颗粒物的累计贡献(二次硝酸盐 + 二次硫酸盐 + 二次有机碳)达39.2%,二次硫酸盐的高分担率也一定程度上反映了燃煤污染依旧严重的现状;二次硝酸盐为首要贡献源反映出机动车污染是重要的污染源,而机动车在行驶过程中带起的次生扬尘对城市扬尘源的贡献也不容忽视<sup>[37]</sup>.

## 2.4 区域输送

### 2.4.1 后轨迹聚类分析

污染物输送过程也会影响当地的空气质量.本研究对观测点位进行后向轨迹模拟和聚类,得到不同季节的主要气团流向,结果如图6结果显示,冬季(2016年12月~2017年1月)气团主要来自内蒙

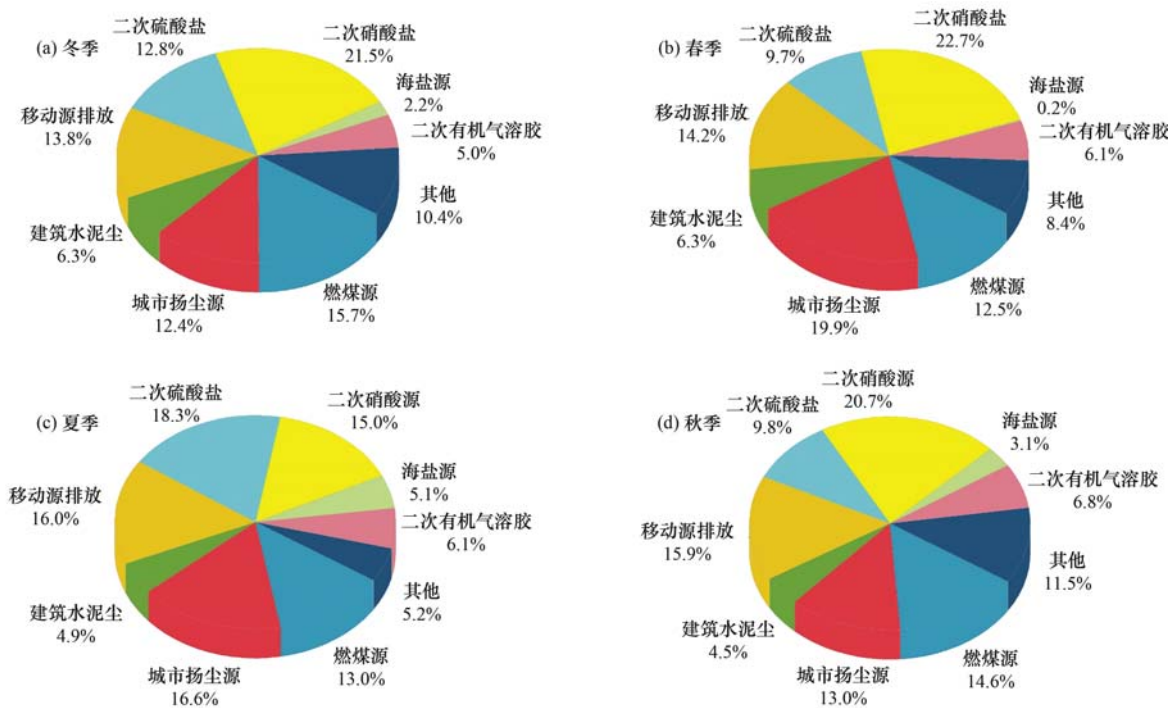


图 4 烟台市 2017 年四季 PM<sub>2.5</sub> 污染源类解析结果

Fig. 4 Analytical results of PM<sub>2.5</sub> pollution sources in the four seasons in Yantai City

表 3 烟台市四季水溶性离子间相关系数矩阵<sup>1)</sup>

Table 3 Correlation coefficient matrix of water-soluble ions of four seasons in Yantai City

| 季节 |                               | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | Cl <sup>-</sup> | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Ca <sup>2+</sup> |
|----|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------|------------------------------|-----------------|----------------|------------------|------------------|
| 冬季 | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 1                            |                               |                 |                              |                 |                |                  |                  |
|    | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | 0.931 **                     | 1                             |                 |                              |                 |                |                  |                  |
|    | Cl <sup>-</sup>               |                              |                               | 1               |                              |                 |                |                  |                  |
|    | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | 0.985 **                     | 0.968 **                      |                 | 1                            |                 |                |                  |                  |
| 春季 | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 1                            |                               |                 |                              |                 |                |                  |                  |
|    | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | 0.891 **                     | 1                             |                 |                              |                 |                |                  |                  |
|    | Cl <sup>-</sup>               | 0.504 **                     | 0.313                         | 1               |                              |                 |                |                  |                  |
|    | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | 0.920 **                     | 0.893 **                      | 0.409 **        | 1                            |                 |                |                  |                  |
|    | Na <sup>+</sup>               | 0.255                        | 0.18                          | 0.308           | 0.205                        | 1               |                |                  |                  |
|    | K <sup>+</sup>                | 0.897 **                     | 0.780 **                      | 0.657 **        | 0.819 **                     | 0.244           | 1              |                  |                  |
|    | Mg <sup>2+</sup>              | 0.315                        | 0.088                         | 0.484 **        | 0.273                        | 0.143           | 0.487 **       | 1                |                  |
| 夏季 | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 1                            |                               |                 |                              |                 |                |                  |                  |
|    | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | 0.896 **                     | 1                             |                 |                              |                 |                |                  |                  |
|    | Cl <sup>-</sup>               | 0.692 **                     | 0.730 **                      | 1               |                              |                 |                |                  |                  |
|    | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | 0.962 **                     | 0.967 **                      | 0.725 **        | 1                            |                 |                |                  |                  |
|    | Na <sup>+</sup>               | 0.644 **                     | 0.566 **                      | 0.353 *         | 0.658 **                     | 1               |                |                  |                  |
|    | K <sup>+</sup>                | 0.158                        | 0.269                         | 0.103           | 0.229                        | -0.153          | 1              |                  |                  |
|    | Mg <sup>2+</sup>              | 0.051                        | 0.008                         | -0.125          | 0.005                        | 0.193           | -0.267         | 1                |                  |
| 秋季 | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 1                            |                               |                 |                              |                 |                |                  |                  |
|    | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | 0.923 **                     | 1                             |                 |                              |                 |                |                  |                  |
|    | Cl <sup>-</sup>               | 0.608 **                     | 0.559 **                      | 1               |                              |                 |                |                  |                  |
|    | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | 0.962 **                     | 0.971 **                      | 0.538 **        | 1                            |                 |                |                  |                  |
|    | Na <sup>+</sup>               | 0.415 **                     | 0.330 *                       | 0.28            | 0.362 *                      | 1               |                |                  |                  |
|    | K <sup>+</sup>                | 0.800 **                     | 0.749 **                      | 0.647 **        | 0.801 **                     | 0.285           | 1              |                  |                  |
|    | Mg <sup>2+</sup>              | 0.115                        | 0.076                         | 0.319 *         | 0.007                        | 0.029           | 0.166          | 1                |                  |
|    | Ca <sup>2+</sup>              | 0.108                        | -0.034                        | 0.261           | -0.045                       | 0.052           | 0.065          | 0.551 **         | 1                |

1) \* 表示  $P < 0.05$ , \*\* 表示  $P < 0.01$



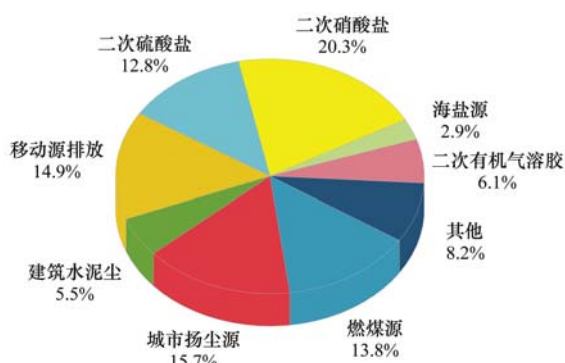
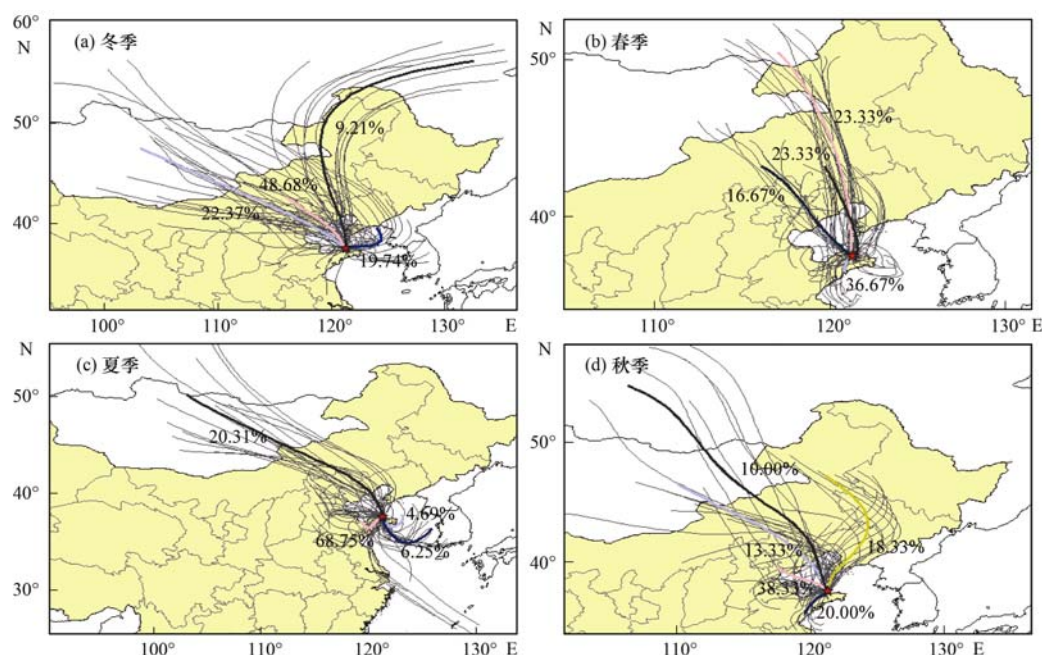
图5 全年PM<sub>2.5</sub>污染源类解析结果Fig. 5 Analytical results of PM<sub>2.5</sub> pollution sources in Yantai City

图6 烟台市四季后向轨迹聚类分析

Fig. 6 Cluster analysis of backward orbits in Yantai City

(38.33%)来自天津市中部经东部沿海抵达烟台；一部分来自俄罗斯途径蒙古国东部、内蒙古和河北东北部，东北南部沿海抵达烟台；一部分从山东东部沿海和中北部抵达烟台。

#### 2.4.2 污染气流潜在源区分析

为对烟台市污染输送源进一步研究，利用PSCF对烟台市PM<sub>2.5</sub>进行分析，结果如图7。结果显示，冬季WPSCF的较大值主要集中在本地。春季WPSCF的较大值主要集中在烟台市的东部(WPSCF > 0.5)，东北部沿海和山东中部；还有一部分来自山东东南部沿海和东部。夏季WPSCF的较大值来自烟台东部沿海(WPSCF > 0.5)，还有一部分来自当地。秋季WPSCF的较大值主要集中在烟台市的西部腹地和山东中部(WPSCF > 0.6)；一部分集中在烟台本地；还有一部分在山东东南部和东部。通过PSCF结果可以看到，潜在源区存在明显的季节变化，但也存在长时间影响的潜在源区，如

古东北部途经河北北部，河北东部沿海，后经渤海抵达烟台，对应于轨迹占比48.68%；还有一部分来自蒙古国中部，途经内蒙古中部、河北北部、东部等地到达烟台，占比22.37%。春季(2017年3月)气团主要来自俄罗斯、内蒙古东北部，经东北南部抵达烟台(占比46.66%)；一部分来自山东东南部沿海经烟台中部抵达监测点，占比36.67%。因内蒙古是风沙区域，所以春季可能会受土壤风沙尘的长距离运输。夏季(2017年8~9月)气团主要来自山东中部进入烟台，轨迹占比68.75%。秋季(2017年10月)气团较为分散，占比最大的轨迹

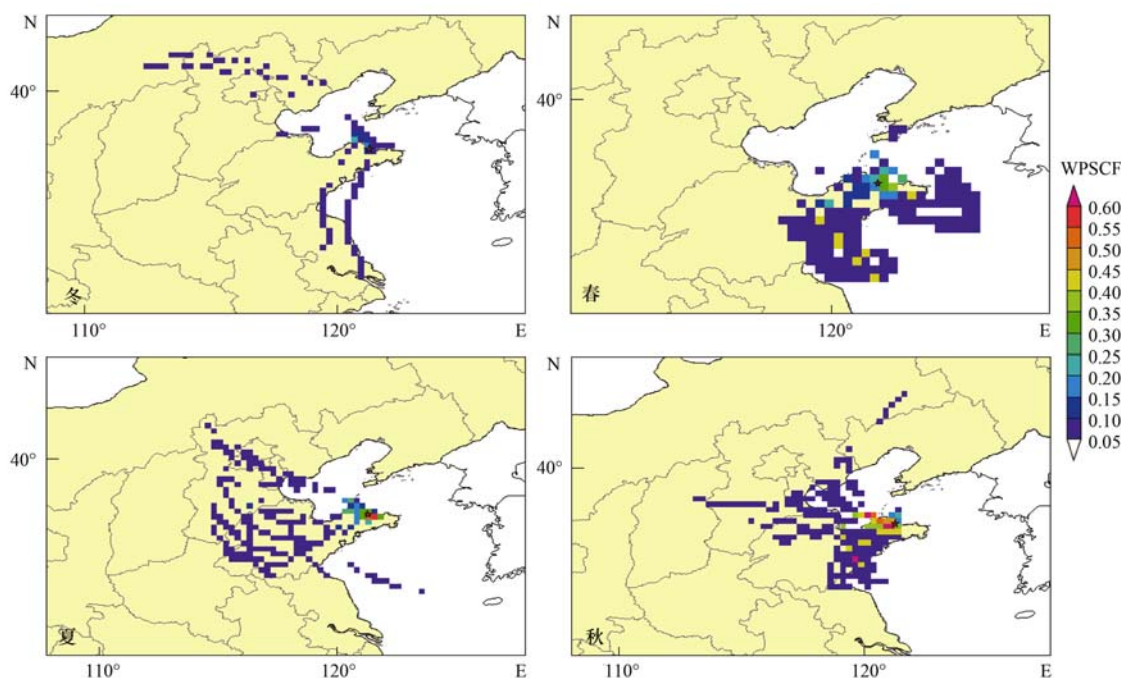
山东中部和东南部沿海在春秋季节PSCF值均较高；烟台市东部沿海在春夏季影响概率均较高。

### 3 结论

(1)烟台市PM<sub>2.5</sub>质量浓度在季节变化上呈现冬季(89.45 μg·m<sup>-3</sup>) > 春季(76.78 μg·m<sup>-3</sup>) > 秋季(64.05 μg·m<sup>-3</sup>) > 夏季(32.65 μg·m<sup>-3</sup>)的趋势。

(2)颗粒物化学组成方面，NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、OC、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、EC和Si是PM<sub>2.5</sub>主要组分，水溶性离子占比最大，其次是碳组分(OC、EC)，元素占比最小。其中水溶性离子质量浓度季节差异明显，NO<sub>3</sub><sup>-</sup>和SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>质量浓度均在冬季最高且液相反应加剧，NO<sub>3</sub><sup>-</sup>在夏季最低，SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>在秋季最低。OC和EC的相关性在春季最低，表明春季OC、EC来源较复杂。

(3)全年源解析贡献大小为二次硝酸盐源(20.3%) > 城市扬尘源(15.7%) > 机动车排放源

图7 烟台市四季  $\text{PM}_{2.5}$  的 WPSCF 分布特征Fig. 7 Distribution characteristics of WPSCF for  $\text{PM}_{2.5}$  in the four seasons in Yantai City

(14.9%) > 燃煤源 (13.8%) > 二次硫酸盐源 (12.8%) > SOC (6.1%) > 建筑水泥尘源 (5.5%) > 海盐源 (2.9%); 从季节差异来看, 燃煤源在秋冬季较高, 机动车排放在夏季最为突出, 二次硫酸盐在夏季最显著。

(4) 烟台市气流输送和潜在源区季节变化特征明显, 冬季主要受烟台市短距离输送的影响; 夏季主要受烟台东部沿海和本地的影响; 春秋季主要受山东中部、东南部沿海的区域传输和烟台市本地源的影响。

#### 参考文献:

- [1] 肖悦, 田永中, 许文轩, 等. 近 10 年中国空气质量时空分布特征[J]. 生态环境学报, 2017, **26**(2): 243-252.  
Xiao Y, Tian Y Z, Xu W X, *et al.* Spatiotemporal pattern changes of air quality in China from 2005 to 2015[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, **26**(2): 243-252.
- [2] WHO, 2018. COP24 Special report: Health & Climate Change [EB/OL]. <https://www.who.int/globalchange/publications/COP24-report-health-climate-change/en/>. accessed on 5 December 2018.
- [3] Deng X J, Tie X X, Wu D, *et al.* Long-term trend of visibility and its characterizations in the Pearl River Delta (PRD) region, China[J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(7): 1424-1435.
- [4] Xia X, Chen H, Goloub P, *et al.* A compilation of aerosol optical properties and calculation of direct radiative forcing over an urban region in northern China[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, **112** (D12): D12203, doi: 10.1029/2006JD008119.
- [5] 烟台市环境保护局. 烟台市环境保护局 2017 年度政府信息公开工作报告[EB/OL]. [http://hbj.yantai.gov.cn/art/2018/3/30/art\\_23557\\_1958229.html](http://hbj.yantai.gov.cn/art/2018/3/30/art_23557_1958229.html), 2017.
- [6] 姜滨, 李博, 杨冬铭. 烟台市区  $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  浓度季节性分布规律研究[J]. 环境科学与管理, 2015, **40**(1): 150-152.
- [7] 胡子超, 吴广芬, 郭旭, 等. 采暖期和非采暖期  $\text{PM}_{2.5}$  污染特征分析——以烟台市为例[J]. 四川环境, 2016, **35**(2): 72-75.  
Hu Z C, Wu G F, Guo X, *et al.* Pollution characteristics of  $\text{PM}_{2.5}$  in heating and Non-heating season——take Yantai as an example[J]. Sichuan Environment, 2016, **35**(2): 72-75.
- [8] 胡子超, 吴广芬.  $\text{PM}_{2.5}$  污染特征分析及其与气象因子的相关性[J]. 科技通报, 2017, **33**(4): 36-39, 163.  
Hu Z C, Wu G F. The relevance between pollution characteristics of  $\text{PM}_{2.5}$  and meteorological factor[J]. Bulletin of Science and Technology, 2017, **33**(4): 36-39, 163.
- [9] Hopke P K. Review of receptor modeling methods for source apportionment[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2016, **66**(3), doi: 10.1080/10962247.2016.1140693.
- [10] Pant P, Harrison R M. Critical review of receptor modelling for particulate matter; a case study of India[J]. Atmospheric Environment, 2012, **49**: 1-12.
- [11] Lee S, Liu W, Wang Y H, *et al.* Source apportionment of  $\text{PM}_{2.5}$ : comparing PMF and CMB results for four ambient monitoring sites in the southeastern United States [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(18): 4126-4137.
- [12] 赵小宁, 席冬冬, 席奔野, 等. 新乡市冬、春季  $\text{PM}_{2.5}$  中水溶性离子及重金属的污染特征与源解析[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(8): 3210-3219.  
Zhao X N, Xi D D, Xi B Y, *et al.* The pollutant character and source apportionment of water-soluble ions and heavy metals in  $\text{PM}_{2.5}$  in winter-spring time of Xinxiang [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(8): 3210-3219.
- [13] Tian Y Z, Liu J Y, Han S Q, *et al.* Spatial, seasonal and diurnal patterns in physicochemical characteristics and sources of  $\text{PM}_{2.5}$  in both inland and coastal regions within a megacity in



- China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, **342**: 139-149.
- [14] 蒋永成, 赵天良, 王宏, 等. 福州市 PM<sub>2.5</sub> 污染过程中大气边界层和区域传输研究[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(2): 347-355.
- Jiang Y C, Zhao T L, Wang H, *et al.* Analysis on atmospheric boundary layer and regional transport during PM<sub>2.5</sub> pollution episodes in Fuzhou[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(2): 347-355.
- [15] 张艳, 余琦, 伏晴艳, 等. 长江三角洲区域输送对上海市空气质量影响的特征分析[J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(7): 914-923.
- Zhang Y, Yu Q, Fu Q Y, *et al.* Impact of the transport of atmospheric pollutants from the Yangtze River Delta on the air quality in Shanghai[J]. *China Environmental Science*, 2010, **30**(7): 914-923.
- [16] 任传斌, 吴立新, 张媛媛, 等. 北京城区 PM<sub>2.5</sub> 输送途径与潜在源区贡献的四季差异分析[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(9): 2591-2598.
- Ren C B, Wu L X, Zhang Y Y, *et al.* Analyze to the seasonal differences of transport pathways and potential source-zones of Beijing Urban PM<sub>2.5</sub>[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(9): 2591-2598.
- [17] Zhao P S, Feng Y C, Zhu T, *et al.* Characterizations of resuspended dust in six cities of north China[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(30): 5807-5814.
- [18] 陈魁, 白志鹏. 颗粒物再悬浮采样器研制与应用[J]. *环境工程*, 2006, **24**(5): 67-68, 81.
- [19] 肖致美, 毕晓辉, 冯银厂, 等. 宁波市环境空气中 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 来源解析[J]. *环境科学研究*, 2012, **25**(5): 549-555.
- Xiao Z M, Bi X H, Feng Y C, *et al.* Source apportionment of ambient PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in urban area of Ningbo city[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, **25**(5): 549-555.
- [20] Kong S F, Han B, Bai Z P, *et al.* Receptor modeling of PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> and TSP in different seasons and long-range transport analysis at a coastal site of Tianjin, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(20): 4681-4694.
- [21] Wu L, Feng Y C, Wu J H, *et al.* Secondary organic carbon quantification and source apportionment of PM<sub>10</sub> in Kaifeng, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(10): 1353-1362.
- [22] 张霖琳, 王超, 朱红霞, 等. 北京混合功能区夏冬季细颗粒物组分特征及来源比较[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(1): 36-41.
- Zhang L L, Wang C, Zhu H X, *et al.* Characterization and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> in mixed function area during summer and winter, Beijing[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(1): 36-41.
- [23] 朱坦, 冯银厂. 大气颗粒物来源解析: 原理、技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012. 15.
- [24] Chen L L, Carmichael G R, Hong M S, *et al.* Influence of continental outflow events on the aerosol composition at Cheju Island, South Korea[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**(D23): 28551-28574.
- [25] Wang Y Q, Zhang X Y, Draxler R R. TrajStat: GIS-based software that uses various trajectory statistical analysis methods to identify potential sources from long-term air pollution measurement data[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2009, **24**(8): 938-939.
- [26] 王郭臣, 王珏, 信玉洁, 等. 天津 PM<sub>10</sub> 和 NO<sub>2</sub> 输送路径及潜在源区研究[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(12): 3009-3016.
- Wang G C, Wang J, Xin Y J, *et al.* Transportation pathways and potential source areas of PM<sub>10</sub> and NO<sub>2</sub> in Tianjin[J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(12): 3009-3016.
- [27] Begum B A, Kim E, Jeong C H, *et al.* Evaluation of the potential source contribution function using the 2002 Quebec forest fire episode[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(20): 3719-3724.
- [28] 刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 等. 济南市夏、冬季 PM<sub>2.5</sub> 中化学组分的季节变化特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(9): 4014-4025.
- Liu X D, Meng J J, Hou Z F, *et al.* Analysis of seasonal variations in chemical characteristics and sources of PM<sub>2.5</sub> during summer and winter in Ji'nan City[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(9): 4014-4025.
- [29] 曹军骥. PM<sub>2.5</sub> 与环境[M]. 北京: 科学出版社, 2014. 67-154.
- [30] 程渊, 吴建会, 毕晓辉, 等. 武汉市大气 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子污染特征及来源[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(1): 189-196.
- Cheng Y, Wu J H, Bi X H, *et al.* Characteristics and source apportionment of water-soluble ions in ambient PM<sub>2.5</sub> in Wuhan, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(1): 189-196.
- [31] 温杰, 史旭荣, 田瑛泽, 等. 利用 SPAMS 研究天津市夏季环境空气中细颗粒物化学组成特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(8): 3492-3501.
- Wen J, Shi X R, Tian Y Z, *et al.* Analysis of chemical composition of the fine particulate matter in summer in Tianjin city via a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(8): 3492-3501.
- [32] 王念飞, 陈阳, 郝庆菊, 等. 苏州市 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子的季节变化及来源分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4482-4489.
- Wang N F, Chen Y, Hao Q J, *et al.* Seasonal variation and source analysis of the water-soluble inorganic ions in fine particulate matter in Suzhou[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4482-4489.
- [33] Watson J G, Chow J C, Houck J E. PM<sub>2.5</sub> chemical source profiles for vehicle exhaust, vegetative burning, geological material, and coal burning in Northwestern Colorado during 1995[J]. *Chemosphere*, 2001, **43**(8): 1141-1151.
- [34] Liu Z R, Xie Y Z, Hu B, *et al.* Size-resolved aerosol water-soluble ions during the summer and winter seasons in Beijing: formation mechanisms of secondary inorganic aerosols[J]. *Chemosphere*, 2017, **183**: 119-131.
- [35] 姜文娟, 郭照冰, 刘凤玲, 等. 南京地区大气 PM<sub>1.1</sub> 中 OC、EC 特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 774-779.
- Jiang W J, Guo Z B, Liu F L, *et al.* Characteristics and sources apportionment of OC and EC in PM<sub>1.1</sub> from Nanjing[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 774-779.
- [36] Frka S, Grgic I, Turšič J, *et al.* Seasonal variability of carbon in humic-like matter of ambient size-segregated water soluble organic aerosols from urban background environment[J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **173**: 239-247.
- [37] 张彩艳, 吴建会, 张普, 等. 成都市冬季大气颗粒物组成特征及来源变化趋势[J]. *环境科学研究*, 2014, **27**(7): 782-789.
- Zhang C Y, Wu J H, Zhang P, *et al.* Particulate composition and source apportionment trends in winter in Chengdu[J]. *Research of Environmental Science*, 2014, **27**(7): 782-789.



## 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>2</sub> 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 <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> PW <sub>12</sub> O <sub>40</sub> 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) |