

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



2020

Vol.41 No.4
第41卷 第4期

目次

基于深度学习的华东地区 PM _{2.5} 浓度遥感反演	刘林钰, 张永军, 李彦胜, 刘欣怡, 万一 (1513)
秋冬季区域性大气污染过程对长三角北部典型城市的影响	李瑞, 李清, 徐健, 李亮, 葛朝军, 黄凌, 孙登红, 刘子义, 张坤, 周国柱, 王杨君, 胡子梅, 宋燕西, 陈勇航, 李莉 (1520)
基于 GAM 模型的西安市 O ₃ 浓度影响因素解析	黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 曹军骥, 吕晓虎 (1535)
北京及周边 6 个城市大气 PM _{2.5} 中左旋葡聚糖及其异构体的时空分布特征	朱红霞, 陶雪梅, 王超, 张霖琳, 郑晓燕 (1544)
典型沿海城市采暖期细颗粒物组分特征及来源解析	李明燕, 杨文, 魏敏, 朱红晓, 刘厚凤 (1550)
成都地区黑碳气溶胶变化特征及其来源解析	王璐, 袁亮, 张小玲, 贾月涛 (1561)
天津夏季郊区 VOCs 对臭氧生成的影响	姚青, 韩素芹, 张裕芬, 毕晓辉, 王晓佳, 蔡子颖 (1573)
涂料制造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	吴健, 高松, 陈曦, 杨勇, 伏晴艳, 车祥, 焦正 (1582)
典型超低排放燃煤电厂可凝颗粒物特征和成因	邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 蒋靖坤 (1589)
中国地表水硝酸盐分布及其来源分析	张鑫, 张妍, 毕直磊, 山泽萱, 任丽江, 李琦 (1594)
中、韩滨海城市化区域水体全氟化合物的空间特征及生态风险	杨洪法, 史斌, 周云桥, 杨璐, 孟晶, 陈礼强, 王铁宇 (1607)
小清河入海口近十年水质变化及驱动因素分析	范新风, 韩美, 王磊, 李秀萍, 周璟 (1619)
浙江省 H 市水处理及供水系统 4 种人工甜味剂的分布特征	马晓雁, 胡慧, 陆思嘉, 李青松, 薛乐飞, 李雪纯, 邓靖 (1629)
三峡库区支流梅溪河附石藻类群落变化及其与环境因子的关系	米文梅, 施军琼, 杨燕君, 杨宋琪, 何书哈, 吴忠兴 (1636)
骆马湖浮游植物演替规律及驱动因子	张庆吉, 王业宇, 王金东, 王日昕, 邓建明, 蔡永久, 彭凯, 陈业, 龚志军 (1648)
拉鲁湿地水生植物群落多样性与水环境因子的关系	王佳俊, 田瀚鑫, 周磊, 徐德福, 张建伟, 彭措次仁 (1657)
基于网络分析解析水源水库春季水体反硝化群落演变特征及驱动因素	周石磊, 孙悦, 张艺冉, 黄廷林, 张春华, 方凯开, 曾明正, 李再兴, 崔建升 (1666)
岱海水体氮、磷时空分布特征及其差异性分析	赵丽, 陈俊伊, 姜霞, 郑朔方, 王书航 (1676)
巢湖滨岸水塘洼地沉积物反硝化速率及对外源碳氮的响应	李如忠, 王莉, 刘超 (1684)
镁改性芦苇生物炭控磷效果及其对水体修复	丁玉琴, 李大鹏, 张帅, 陈丽媛, 徐楚天, 陈姝彤, 朱企, 黄勇 (1692)
氢氧化镁对水体内源磷释放的控制作用	杨春懿, 詹艳慧, 林建伟, 邱波, 徐文隆, 俞阳, 黄良君 (1700)
北京市道路雨水径流溶解性有机物化学组分特性	陈梦瑶, 杜晓丽, 于振亚, 朱英杰, 梁卉, 吴凡 (1709)
新型三维多孔光热材料制备及其高盐废水处理应用	黄乐, 徐颖峰, 谢茜青, 赵炯, 冯华军 (1716)
Ni 掺杂 Sb-SnO ₂ 瓷环粒子电极电催化氧化磺胺嘧啶	石秋俊, 刘安迪, 唐柏彬, 魏世强, 张进忠 (1725)
磁性 Fe ₃ O ₄ -CuO 非均相活化过碳酸钠降解 AO7	徐劫, 王琳, 陈家斌, 许芬, 王柯晴, 侯梓峰, 黄天寅 (1734)
赤泥活化过一硫酸盐降解环丙沙星: 性能和机制	史京转, 魏红, 周孝德, 李克斌, 史颖娟 (1743)
工业废水水质对微气泡臭氧氧化深度处理影响	张静, 张守敬, 刘春, 施佳泽, 陈晓轩, 张磊, 张瑞娜 (1752)
污泥水热炭对亚甲基蓝的吸附特性	陈丽媛, 李大鹏, 朱文娟, 徐楚天, 丁玉琴, 黄勇 (1761)
改性西瓜皮生物炭的制备及其对 Pb(II) 的吸附特性	毕景望, 单锐, 韩静, 袁浩然, 史月月, 张兴庆 (1770)
A ² /O 短程硝化耦合厌氧氨氧化系统构建与脱氮特性	刘小钗, 荣懿, 汶丽杰, 李党勇, 金鹏康 (1779)
基于甲烷氧化菌的城镇污水厂尾水极限脱氮系统构建及机制	杨娅男, 李彦澄, 李江, 吴攀, 杨钊, 向福亮 (1787)
HRT 对 CSTR 亚硝化颗粒污泥性能影响	王建芳, 齐泽坤, 钱飞跃, 刘文如, 张俊, 王伟, 沈聪 (1794)
低基质颗粒污泥反应器中亚硝化的实现过程及其污泥变化特征	朱琳, 程诚, 宋家俊, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良 (1801)
不同 HRT 下污水中有机物在 ABR 中的转化过程及污泥形态特征	程诚, 朱琳, 郭凯成, 汪倩, 宋家俊, 刘文如, 沈耀良 (1808)
投加颗粒活性炭和二氧化锰对剩余污泥厌氧消化的影响	杨波, 贾丽娟, 徐辉, 李方, 刘艳彪 (1816)
中国 193 个城市规划区土壤微量元素污染与健康风险	李括, 彭敏, 杨峥, 杨柯, 刘飞, 赵传冬, 成晓梦, 马宏宏, 郭飞, 唐世琪, 刘应汉, 成杭新 (1825)
基于随机森林评价的兰州市主城区校园地表灰尘重金属污染	胡梦瑶, 王佳, 张亚云, 李春艳, 李娜娜 (1838)
扬州市不同功能区表层土壤中多环芳烃的含量、来源及其生态风险	姚成, 倪进治, 刘瑞, 杨柳明, 陈卫锋, 魏然 (1847)
桂西南土壤镉地质异常区水稻种植安全性评估	陈同斌, 庞瑞, 王佛鹏, 周浪, 宋波 (1855)
重庆市主要农耕地土壤 Cd 生物有效性及影响因素	王锐, 胡小兰, 张永文, 余飞, 朱海山, 李瑜 (1864)
棉秆炭对碱性水稻土壤-水稻中镉迁移转化的阻控作用	刘师豆, 朱新萍, 韩耀光, 赵一, 金航, 贾宏涛 (1871)
连续 4 a 施有机肥降低紫泥田镉活性与稻米镉含量	薛毅, 尹泽润, 盛浩, 马颖榴, 周清, 宋达清, 张杨珠 (1880)
纳米氢氧化镁对不同类型土壤镉形态的影响	邓继宝, 张春来, 徐卫红 (1888)
矿业废弃地复垦土壤-作物硒吸收特征及其对重金属拮抗效应	尹炳, 汪建飞, 师胜, 卜中原, 霍天满, 张世文 (1904)
不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响	杨彩迪, 宗玉统, 卢升高 (1914)
化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响	朱浩宇, 高明, 龙翼, 徐国鑫, 王富华, 王子芳 (1921)
紫色土旱坡地氮流失通量对减肥施肥秸秆的响应	熊子怡, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 高明 (1930)
浒苔生物炭对滨海盐碱土壤改良的效果及途径	吴丹, 孙萍, 路鹏展, 陈友媛, 郭嘉梦, 刘明, 王磊, 张彩杰 (1941)
极端干旱区咸水灌溉人工防护林土壤可溶性碳的垂直分布及其影响因素	孟天歌, 吴路遥, 张少磊, 徐燕莹, 李雄, 张建国 (1950)
红松人工林土壤酶活性与化学性质对氮添加的响应	吕来新, 宋蕾, 刘志理, 张金波, 金光泽 (1960)
稻田土壤 N ₂ O 消纳能力及 nosZ-I 型功能种群应答机制	郭俊丽, 田美洁, 葛体达, 魏文学, 王光军, 孙志龙, 刘毅 (1968)
京津冀电子废弃物回收利用潜力预测及环境效益评估	陈盼, 施晓清 (1976)
中国城市工业化发展与 PM _{2.5} 的关系: 兼论 EKC 曲线形成的内在机制	李雅男, 丁振民, 邓元杰, 侯孟阳, 姚顺波 (1987)
《环境科学》征订启事 (1618) 《环境科学》征稿简则 (1635) 信息 (1724, 1769, 1800)	

秋冬季区域性大气污染过程对长三角北部典型城市的影响

李瑞^{1,2}, 李清², 徐健², 李亮³, 葛朝军⁴, 黄凌², 孙登红⁵, 刘子义², 张坤², 周国柱⁴, 王杨君², 胡子梅⁴, 宋燕西^{1*}, 陈勇航¹, 李莉^{2*}

(1. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620; 2. 上海大学环境与化学工程学院, 上海 200444; 3. 蚌埠市生态环境局, 蚌埠 233040; 4. 蚌埠市环境监测站, 蚌埠 233040; 5. 蚌埠市环境监察支队, 蚌埠 233040)

摘要: 本文基于空气质量及气象监测数据, 运用层次聚类分析法、后向轨迹法、潜在源贡献分析等方法, 选取长三角北部地区2018~2019年秋冬季的典型污染过程进行分析, 并选取该区域代表性的城市(蚌埠)进行深入分析。结果表明, 长三角北部地区大气污染受地面弱气压、高湿、低温和静小风等不利气象条件及传输的影响较大。长三角秋冬季区域性污染具有影响范围广和持续时间长等特征, 污染类型主要为区域外传输型与区域内累积型。在EP1和EP2两次污染过程中, 长三角北部城市PM_{2.5}浓度均值分别达到131.6 μg·m⁻³和115.4 μg·m⁻³, 前者污染过程较短, 但污染物浓度累积较快造成的污染强度大和范围广。利用PSCF和CWT对PM_{2.5}潜在源定性和定量分析表明, EP1过程PM_{2.5}由临沂、徐州、宿迁和连云港等污染轨迹密集区域传输到受体城市蚌埠, CWT值处于80以上, 最高可达200以上, 区域传输实际浓度值较高; EP2过程PM_{2.5}浓度受宿迁、宿州和徐州等区域内部邻近城市影响, CWT值处于60以上, 最高达160以上, 说明研究区域内城市间相互影响较大。因此, 秋冬季重污染过程中的跨区域大气污染联动, 对于缓解长三角北部区域污染程度尤为重要。

关键词: PM_{2.5}; 层次聚类; 后向轨迹; 潜在源贡献; 长三角(YRD)

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)04-1520-15 DOI: 10.13227/j.hjxx.201908087

Regional Air Pollution Process in Winter over the Yangtze River Delta and Its Influence on Typical Northern Cities

LI Rui^{1,2}, LI Qing², XU Jian², LI Liang³, GE Chao-jun⁴, HUANG Ling², SUN Deng-hong⁵, LIU Zi-yi², ZHANG Kun², ZHOU Guo-zhu⁴, WANG Yang-jun², HU Zi-mei⁴, SONG Yan-xi^{1*}, CHEN Yong-hang¹, LI Li^{2*}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 3. Bengbu Municipal Bureau of Ecology and Environment, Bengbu 233040, China; 4. Bengbu Environmental Monitoring Station, Bengbu 233040, China; 5. Bengbu Environmental Monitoring Team, Bengbu 233040, China)

Abstract: In this study, we analyzed several pollution episodes that occurred in the autumn and winter of 2018-2019 using multiple methods including the hierarchical clustering analysis, backward trajectory, and potential source contribution analysis based on monitored air quality and meteorological data. Bengbu, being a representative city to the north of the Yangtze River Delta (YRD) region and located in a heavily polluted area during these two pollution processes, is the focus of this work. The results indicated that the northern part of the YRD region is affected because of unfavorable meteorological conditions such as weak ground pressure, high humidity, low temperature, low wind speeds, and regional transport. The regional pollution processes over the YRD region in the autumn and winter seasons exhibit characteristics of wide influence and long duration with mainly two types of pollution: regional transport and intra-regional accumulation. During the two selected pollution episodes, the average PM_{2.5} concentration in the northern YRD region reached 131.6 μg·m⁻³ and 115.4 μg·m⁻³, respectively. The former type had a shorter duration but exhibited rapid accumulation of pollutants in a short period of time with greater pollution intensity, wider pollution range, and deeper pollution intrusion. Qualitative and quantitative analysis of the potential sources of PM_{2.5} based on PSCF and CWT showed that the PM_{2.5} concentration during EP1 was due to transport from cities such as Linyi, Xuzhou, Suqian, and Lianyungang to the pollution trajectory. The CWT value generally exceeded 80 with the highest value near 200. In contrast, EP2 was affected by the neighboring cities such as Suqian, Suzhou, and Xuzhou, and the CWT value was over 60 with the highest approaching 160, indicating that the interaction among cities in the study area is significant. This study shows that cross-regional air pollution control strategies are particularly important for alleviating the pollution situation in the northern part of the YRD region.

Key words: PM_{2.5}; hierarchical clustering; backward trajectory; potential source contribution; Yangtze River Delta (YRD)

收稿日期: 2019-08-10; 修订日期: 2019-11-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41875161); 上海市青年科技英才扬帆计划项目(19YF1415600); 国家重点研发计划项目(2018YFC0213600); 蚌埠市大气重污染成因及达标规划编制项目(皖C-2018-ZF-CG-Z-563)

作者简介: 李瑞(1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染成因和来源, E-mail: 941107@shu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: syx@dhru.edu.cn; Lily@shu.edu.cn

近年来,随着我国经济社会的高速发展,空气污染问题日益突显,区域性大气污染频发. 由于燃煤、工业和机动车等污染源密集排放以及不利天气条件影响,我国东部地区时常出现持续时间长、影响范围广的重污染天气,京津冀和长三角等重点城市群地区尤其严重^[1-6]. 大气细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)是导致灰霾天气的主要污染物,其在大气中滞留时间长,降低能见度、危害人体健康^[7-10]. 已有诸多学者对形成区域大气重污染的气象条件作了大量研究^[11,12],表明在区域污染源排放相对稳定的情况下,污染物浓度的高低主要取决于大气的扩散能力,与地面天气形势尤其密切. 区域气象条件的变化直接影响污染物累积以及重污染天气的形成、发展和消散^[13,14]. 江琪等^[15]的研究发现,低温高湿环境和静稳天气条件可加剧灰霾污染的生成,且 $\text{PM}_{2.5}$ 对相对湿度和风速的响应较快. 徐冉等^[16]对北京地区 2016 ~ 2017 年多个重污染过程的研究发现,地面弱气压、高湿度、低风速和较低的混合层高度以及不同强度的逆温层结构是北京地区秋冬季节重污染的主要气象特征,污染累积阶段本地源排放居多. 程念亮等^[17]对北京及周边省市 $\text{PM}_{2.5}$ 进行空间分布的插值和层次聚类分析发现,污染高区由南部(河南北部以及河北南部)逐渐向北蔓延. 李莉等^[18]利用后向轨迹结合潜在源贡献分析模型对 2013 年冬季不同源区对上海污染的潜在贡献进行分析,明确了不同污染过程中区域对上海的贡献.

上述研究对深化认识秋冬季区域大气污染传输等科学问题提供了重要参考. 大量研究表明^[19-23],秋冬季长三角区域性污染时常发生,且许多城市空气污染达到重度以上. 其中,长三角北部地区城市,既有区域内污染的交互影响,又有受到京津冀鲁豫等长三角以北城市群的跨区域传输影响,污染特征较为复杂. 蚌埠市作为长三角北部区域代表性城市,冬季大气污染频发,在区域性大气污染过程的影响中具有代表性. 本文选取 2019 年 1 月发生的两次区域性污染过程,利用空气质量指数和常规污染物浓度等数据结合气象条件、层次聚类分析、后向轨迹和潜在源贡献函数等进行了深入分析,同时对蚌埠地区 $\text{PM}_{2.5}$ 污染特征及来源做了进一步地研究. 理论上,空气污染物的来源可由污染源的排放和气象条件的影响这两个因子确定,但不同方向的气流途经的区域污染源强度不同,携带的污染物浓度也会有较大差异^[24],因此,综合使用潜在源贡献因子分析法(PSCF)和浓度权重轨迹分析法(CWT)^[25,26]能更好地确定污染物的潜在源区以及半定量污染物的来源^[27],更加深入地判别区域性大气污染对长三角北

部城市的影响.

1 材料与方法

1.1 数据来源

大气污染物浓度数据(包括 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 CO 、 NO_2 和 SO_2)来自生态环境部官方发布的实时数据(<http://106.37.208.233:20035/>). 气象数据来源于中国国家气象中心(<http://data.cma.cn/>)及蚌埠市环境监测站点常规地面观测数据,包括天气形势图、温度、相对湿度、气压、能见度、风向和风速等. 潜在源贡献分析采用全球资料同化系统(GDAS)提供的分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的再分析资料.

1.2 研究方法

1.2.1 层次聚类分析

系统层次聚类法在解决实际问题时,将每个分类对象称为样品,并根据对象的性质和分类目的选定若干指标(特征变量),测出每个样品所有的指标值. 将得到的结果列成一个数据矩阵,这个矩阵就是聚类分析的出发点^[28],即公式(1).

$$X = (x_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, n 为样品数, m 为特征变量数,则 i 第个样品的观测值为: $(x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{im})^T$, $i = 1, 2, \cdots, n$.

使用聚类水平算法对原始数据矩阵进行运算,得到其聚类水平矩阵,最后再以聚类水平矩阵作为聚类的依据. 在计算得到聚类水平矩阵后,就可以对样本进行聚类分析. 子集与子集之间的差异的衡量有很多种方法,其中离差平方和法是最常用的方法.

聚类结果的解释性方差可以用来衡量聚类效果的好坏,它定义为子集内的方差比上总体样本的方差. 通过要求解释性方差小于某一阈值来确定聚类的子集数. 方差由公式(2)和(3)定义:

$$\text{总方差} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - X)^2}{N} \quad (2)$$

$$\text{子集内方差} = \frac{\sum_{i=1}^{N_h} (x_i - X_h)^2}{N_h} \quad (3)$$

式中, x_i 是每小时的平均浓度, X_h 是子集内的浓度平均值, X 是所有样本的浓度平均值, N 是样本的总数, N_h 是每个子集内的样本总数.

最优子集数(k)可由平均轮廓法和肘方法两种方法确定. 平均轮廓系数法是用来评估聚类质量的方法,高的轮廓系数指标意味着好的聚类效果,聚类

的最佳数量 k , 是在 k 的可能值范围内使平均轮廓系数最大的数量. 肘方法将 k 从 1 计算到指定子集数 (此处根据经验值, 取 10). 对于每个 k , 分别计算群内的平方总和 (WSS), 根据聚类数 k 绘制 WSS 曲线, 曲线中的拐点位置就是最适合的子集数指标.

1.2.2 后向轨迹模型

后向轨迹模型即混合型单粒子拉格朗日综合轨迹 (hybrid single particle Lagrangian integrated trajectory model, HYSPLIT) 模型 (<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>), 由美国国家海洋局与大气管理局 (NOAA) 和澳大利亚气象局联合开发. 该模型是拉格朗日和欧拉混合扩散模式, 可对大气气流方向进行识别, 进而进行轨迹模拟^[29]. 本文利用后向轨迹模型对长三角区域污染中的典型城市蚌埠 (32.929 25°N, 117.356 8°E) 进行污染过程时间段内 500 m 高度的 48 h 气团后向轨迹模拟, 探究大气污染期间的气团来源.

1.2.3 PM_{2.5} 潜在源分析

潜在源贡献因子 (potential source contribution function, PSCF) 是一种基于气流轨迹识别计算大气污染来源区域的方法^[30~33], 该方法可根据网格颜色一定程度上反映源区域对受体点污染程度的贡献大小. 利用经过网格 ij 的污染轨迹数 (m_{ij}) 与在此网格的所有轨迹数 (n_{ij}) 的占比确定 PSCF 大小, 计算公式如下:

$$\text{PSCF}_{ij} = m_{ij}/n_{ij} \quad (4)$$

由于 PSCF 的误差会随网格与受体间的距离不同而变化^[34], 为降低网格的不确定性, 引入权重函数 W_{ij} , 权重函数的确定参考文献^[35~37] 的研究成果. 引入 W_{ij} 后的潜在源贡献因子函数 (WPSCF) 定义为:

$$\text{WPSCF}_{ij} = \text{PSCF}_{ij} \times W_{ij} \quad (5)$$

PSCF 在一定程度上可以反映网格对受点污染程度的贡献大小, 然而无法区分相同 PSCF 值的网

格对受点污染物浓度贡献大小. 为了弥补不足, 本文在 PSCF 的基础上引入了浓度权重轨迹分析 (concentration weighted trajectory, CWT), 用 CWT 方法^[38] 计算轨迹的权重浓度, 以表征不同轨迹的污染程度. PSCF 及 CWT 的网格均为 $0.2^\circ \times 0.2^\circ$, CWT 计算公式如下:

$$\text{CWT}_{ij} = \frac{\sum_{L=1}^M C_L \tau_{ijL}}{\sum_{L=1}^M \tau_{ijL}} \quad (6)$$

式中, L 是轨迹; C_L 是轨迹 L 经过网格 (i, j) 时对应的要素浓度; τ_{ijL} 是轨迹 L 在网格停留时间. 值越大, 说明网格 (i, j) 区域对受体区域的污染物的潜在贡献能力越大.

2 结果与讨论

2.1 区域污染过程

2.1.1 层次聚类

本文选取了 2018 年 10 月至 2019 年 1 月期间长三角地区 13 次区域性大气污染过程 (污染时长总计 1 498 h), 并对其首要污染物 PM_{2.5} 小时浓度均值进行了区域间的层次聚类. 由平均轮廓系数法得到子集数 (k) 为 4 时, 聚类的结果最合理 (如图 1). 区域聚类结果如图 2 所示, 4 类子集依次为: ①长三

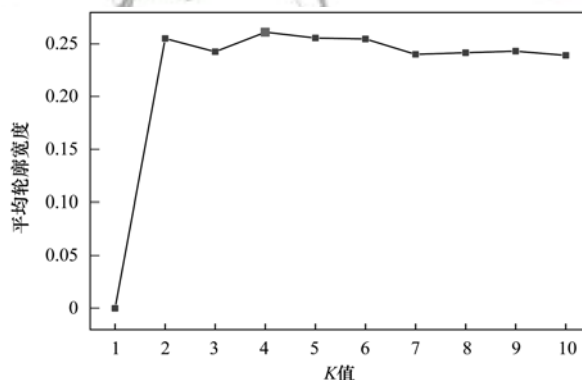


图 1 平均轮廓系数法子集 (k) 分布

Fig. 1 Number of clusters (k) of the average contour coefficient

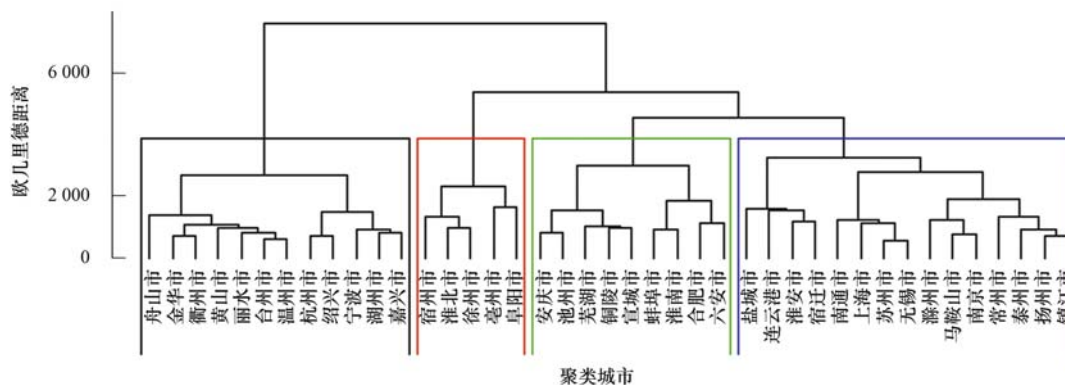


图 2 层次聚类结果

Fig. 2 Hierarchical clustering result

角南部城市,包括浙江省全部区域以及安徽省黄山市;②长三角北部城市,包括安徽省北部四城市以及江苏省徐州市;③长三角中西部城市,主要为安徽省部分城市;④长三角中东部城市,包括上海市,安徽省滁州市、马鞍山市以及江苏省大部分城市. 每类子集中城市在所有大气污染过程的 $\text{PM}_{2.5}$ 均值分别为 46.9、112.7、76.6 和 87.6 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 可见,长三角北部城市污染最为严重,南部城市处于污染区域边缘,污染物浓度最低.

秋冬季是长三角区域性大气污染频发时段,受温度、湿度及风速风向等气象条件和污染源变化特征的影响,每次污染过程的发生、累积、扩散、消除也存在差异. 为了解不同大气污染过程的差异性,选取了 2019 年 1 月两次区域污染过程作为主要研究对象. 根据两次污染过程中的气象条件、污染的形成及扩散等特征对其归类如下.

EP1 (Episode 1): 跨区域传输过程, 2019-01-01 ~ 2019-01-08; EP2 (Episode 2): 区域内累积污染过程, 2019-01-11 ~ 2019-01-15.

对 EP1 和 EP2 两次污染过程分别进行层次聚类,利用肘方法选择 $k=4$ 为两次污染过程的区域聚类的子集数,如图 3 所示. 聚类结果城市分布如图 4 所示. EP1 中,子集 1 包含安徽北部城市和江苏的徐州市;子集 2 包含安徽中部,江苏北部和中部城市;子集 3 包含安徽东南部、江苏东南部、上海及浙江东部等城市;子集 4 包含安徽的黄山市和浙江的南部城市及舟山.

EP2 中,子集 1 在 EP1 结果基础上增加了安徽中部和江苏北部等城市,子集 2 包含城市范围则有所缩小,子集 3 主要包括上海市及江苏东南部几个

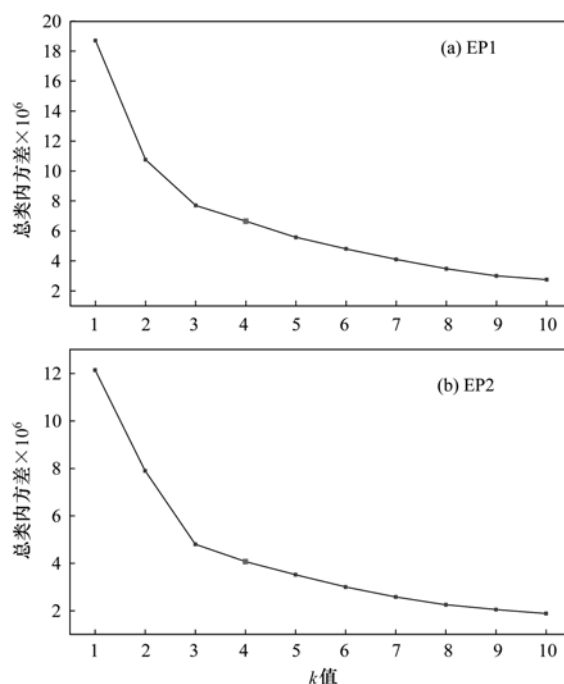


图 3 肘方法子集(k)分布

Fig. 3 Number of clusters (k) of the elbow method

城市, EP2 影响范围较为集中, 浙江全部地区及安徽黄山市受此次污染影响小, 为子集 4.

根据 2019 年 1 月 1 ~ 16 日空气质量指数 (air quality index, AQI) 空间分布 (图 5) 可知, EP1 持续时间较长, 并且经历了 1 月的 6、7 日部分区域污染消散的过程以及 8 日污染的反弹和 9 日的污染过程完全结束. EP1 中长三角北部地区污染最为严重, 苏北和皖北地区达到中度污染, 其中皖北几个城市甚至达到重度及其以上污染.

EP2 持续时间较 EP1 短, 然而影响范围更广, 随着时间的变化, 污染从苏北、皖北一直蔓延至整个江苏、安徽和上海地区, 浙江北部也受到

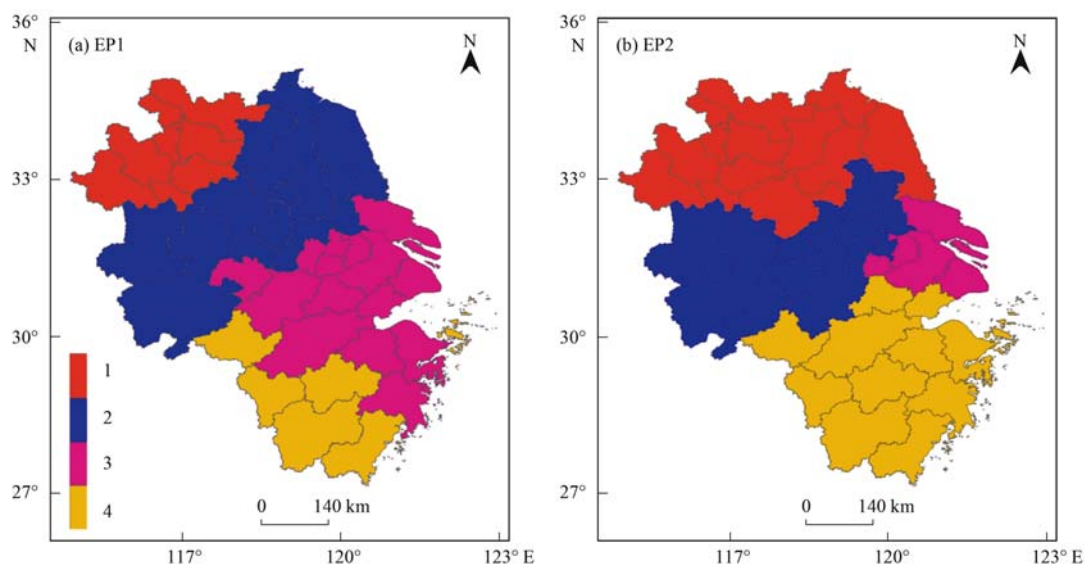


图 4 污染过程层次聚类空间分布

Fig. 4 Map of pollution process hierarchical clustering results

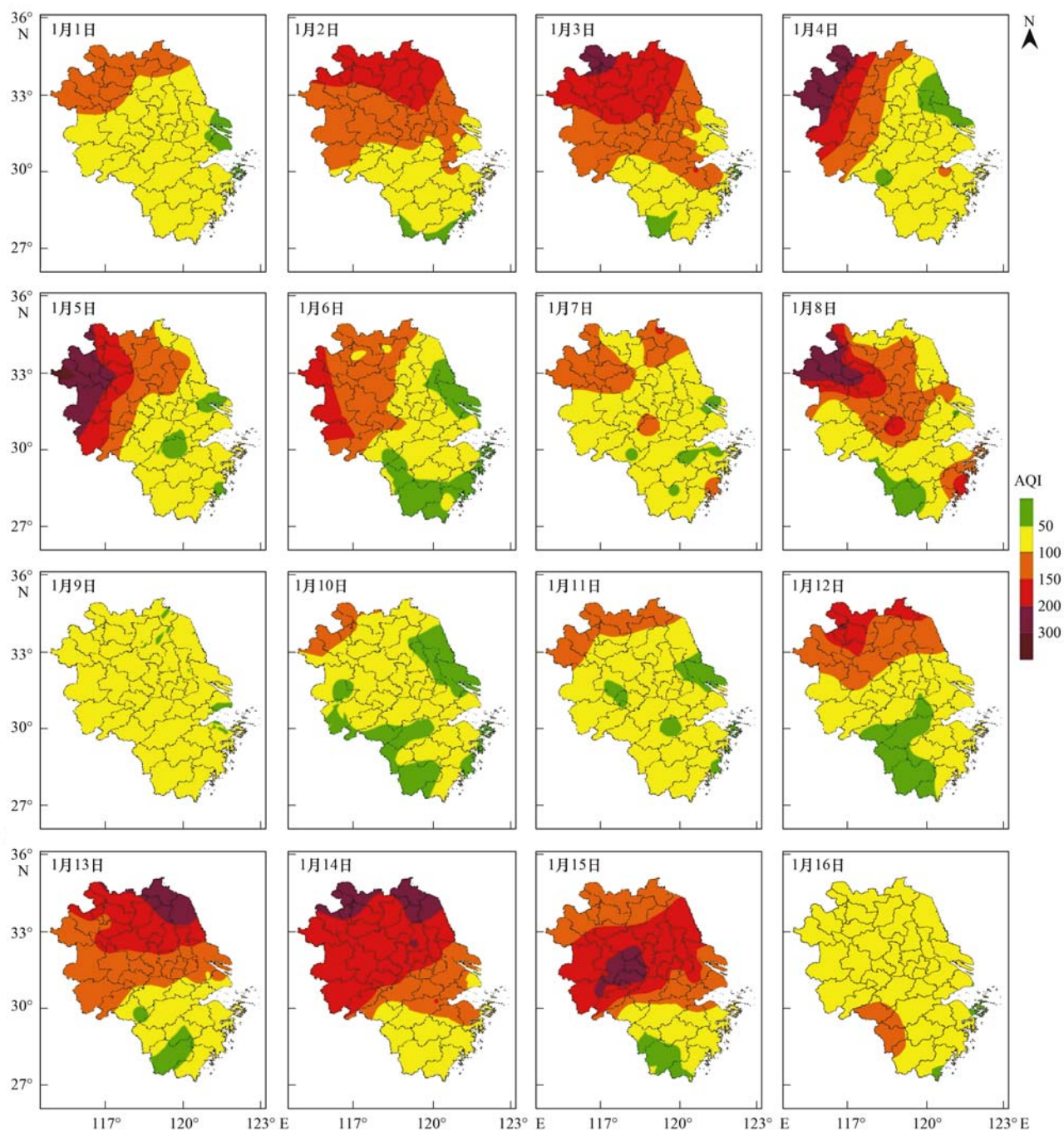


图5 污染期间 AQI 等级空间分布

Fig. 5 Map of AQI level during the pollution period

小范围影响. EP2 更多的是区域内污染物积累的贡献.

根据 AQI 日均变化及聚类结果可以看出,两次污染过程都是子集 1~4 污染强度由北向南依次减弱,即子集 1 为污染最为严重区域,子集 4 为清洁区. EP1 中,子集 1~4 污染强度递减规律更为明显,受北方污染气团影响,污染侵入的更加深入,影响范围大;EP2 则主要为区域内交互污染,污染严重区域东西向延伸,污染较为集中,且污染较轻及清洁区域范围大于 EP1 过程. 聚类结果与污染过程及污染强度范围相符合.

2.1.2 天气形势

图 6 和图 7 分别为 2019 年 1 月的 7~9 日 (EP1) 及 13~15 日 (EP2) 每天 08:00 (UTC 时间 00:00) 的气压场和地面风场图,结合地面天气形势和风场可对污染传输进行定性分析.

气象条件与天气形势的演变对大气污染尤其是重污染过程的产生与变化具有直接影响^[39~41]. EP1 中,1 月 7~9 日,高压中心由蒙古国向我国内蒙古地区及京津冀地区推进,且伴随着新高压中心的产生,1 月 7~8 日长三角地区气压梯度不明显,高压中心向南推进. 由地面风场图可得知,长三角地区存

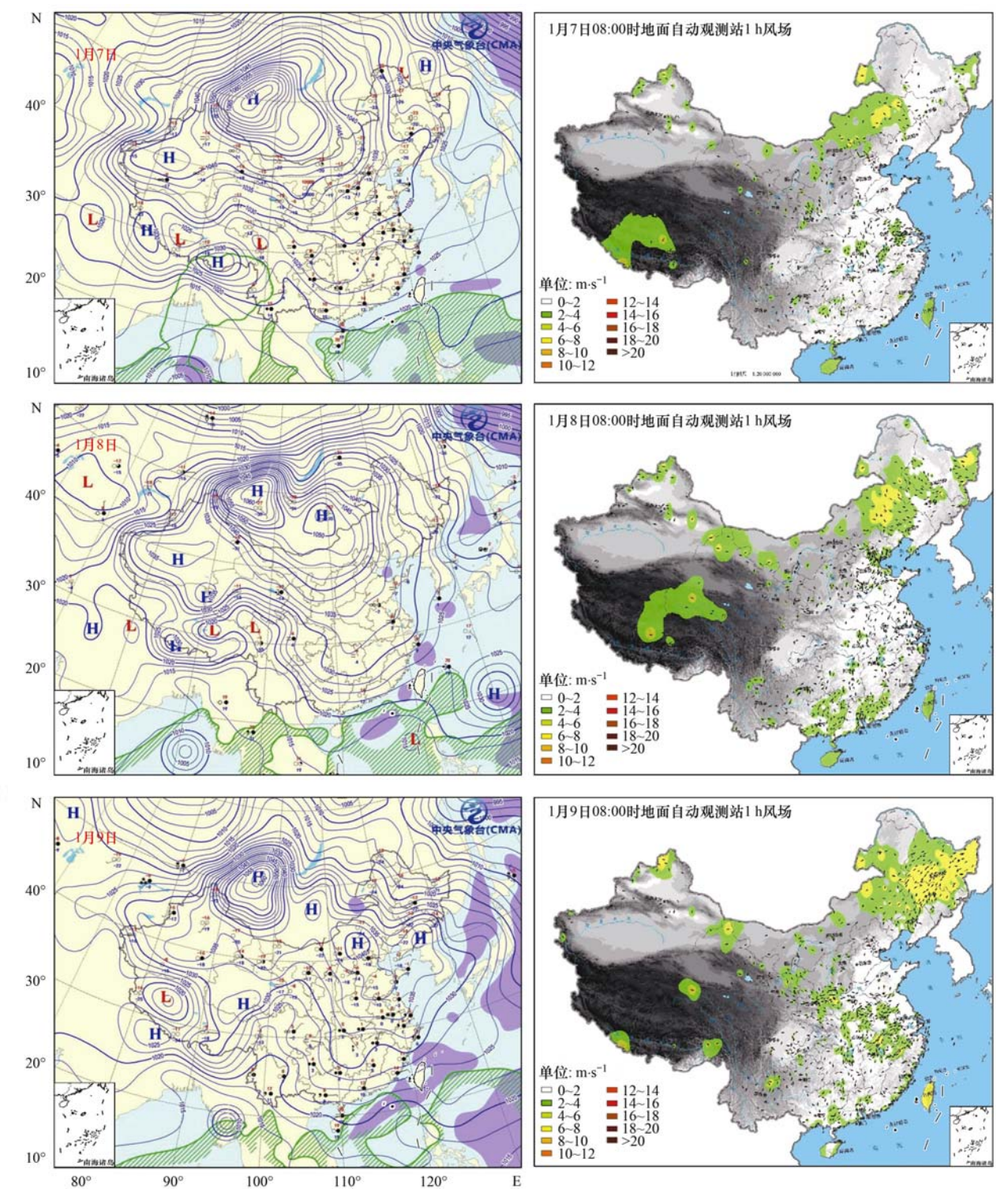


图6 EPI 天气形势

Fig. 6 Surface pressure field and wind field during pollution EPI

在弱东北风和北风, 8 日出现静稳天气, 风量减少, 天气形势不利于污染物的扩散. 1 月 8~9 日高压中心南下, 京津冀地区位于新产生的高压中心前部, 长三角气压梯度变化大, 气象条件对污染物扩散有利, 长三角受到东北强风影响, 污染物被驱散, 本次污染过程结束.

EP2 中, 1 月 13 日, 长三角地区处于静稳天气状态下, 高压中心位于京津冀以北地区, 气压梯度不

明显, 且大部分地区基本无风, 气象条件不利于污染物扩散. 1 月 14 日气象扩散条件进一步变差, 京津冀地区位于新出现的低压槽控制区域, 长三角地区相邻等压线之间距离扩大, 整个区域以静风为主, 部分地区有微弱东风, 静稳等不利气象条件使污染物进一步累积. 1 月 15 日天气条件转好, 低压槽消失, 受高压中心影响, 京津冀及长三角地区等压线分布密集, 气压梯度较大, 地面风力增强, 长三角地区受

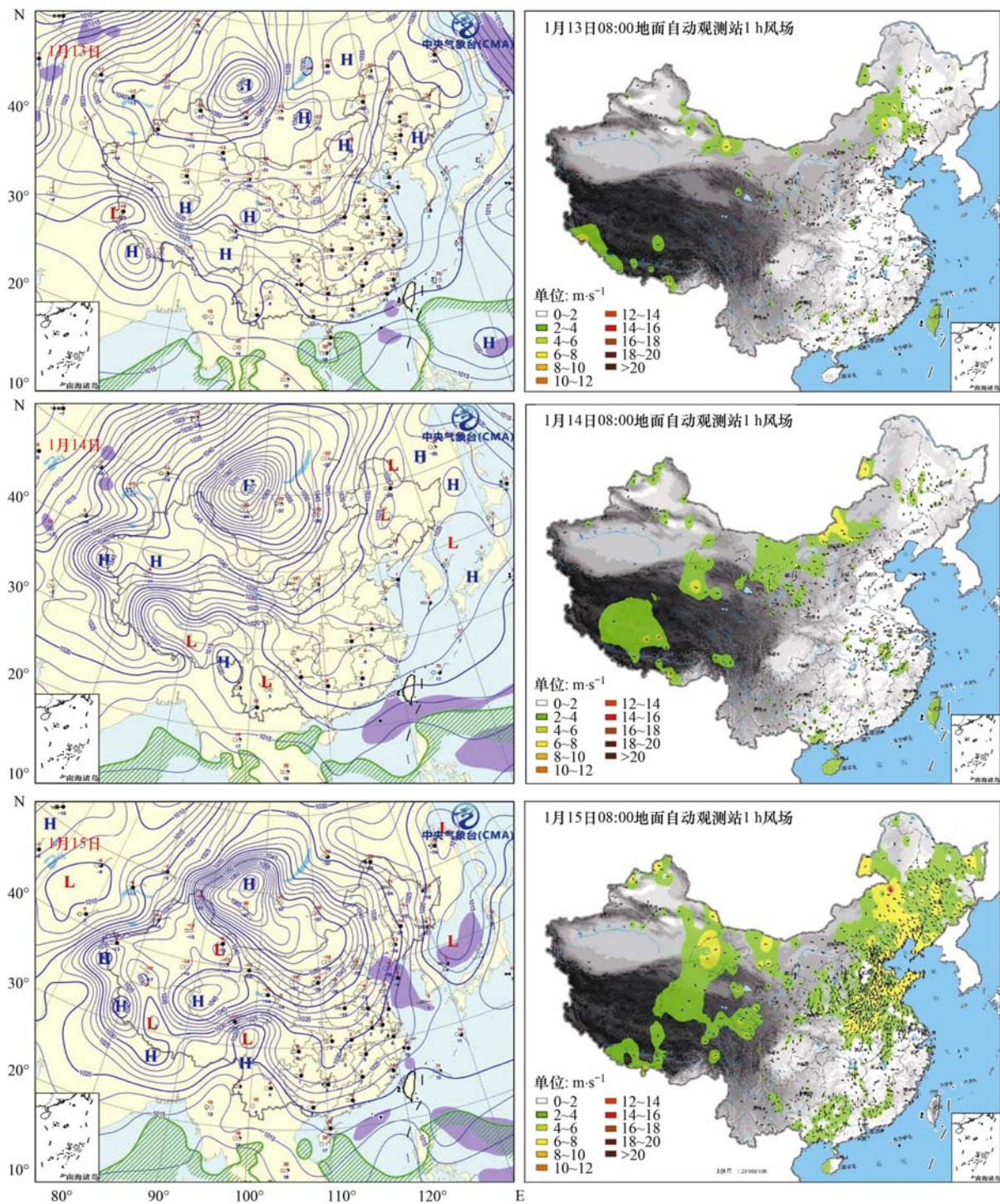


图7 EP2天气形势

Fig. 7 Surface pressure field and wind field during pollution EP2

北方强风影响. 由于1月13~14日长三角地区及京津冀地区一直处于静稳天气状态, 导致污染物不断累积, 15日受北方强风影响, 长三角地区污染物浓度迅速上升再快速消散, EP2污染过程结束.

2.2 污染物浓度变化特征

秋冬季由于我国北方及中部地区存在燃煤供暖和生物质燃烧活动, 污染物排放量骤增^[42]. 同时冬季高湿静稳等不利气象因素也大大提高了重污染发生的可能性, 导致区域性污染过程频率远高于其他

季节^[16]. 受季风气候影响, 我国东部地区冬季主要以偏北风为主, 长三角城市除本地污染物累积, 还受北方污染气团传输的影响. 并且, 冬季污染物“缓慢积累快速消散”的特点较为突出, 污染物浓度通常呈多个非对称的“锯齿状”结构变化^[43].

2019年1月1~16日期间长三角地区发生的两次污染过程中各污染物平均浓度如表1所示. 本研究时间段内代表性城市PM_{2.5}小时浓度变化如图8所示. 两次污染过程中聚类区域PM_{2.5}均值浓度比

较,长三角北部地区城市污染明显较重,两次污染过程聚类子集 1 区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值分别达到 $(131.7 \pm 53.2) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(115.4 \pm 54.2) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,中部地区污染较轻,南部城市受污染影响小,为清洁区。 PM_{10} 浓度 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 和 CO 浓度 ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) 变化与 $\text{PM}_{2.5}$ 呈现一致性的变化趋势,污染严重地区分别达到 166.3 ± 60.7 、 157.1 ± 66.4 和 1.3 ± 0.4 、 1.3 ± 0.5 。

由于两次污染过程类型不同, NO_2 浓度变化在两次污染过程也不同。EP1 受北方传输影响大,子集 1 中 NO_2 浓度最高,而子集 3 中包含城市的 NO_2 浓度大于子集 2 和子集 4 中 NO_2 浓度,主要是因为 NO_2 浓度受机动车排放等本地一次来源影响大^[44,45],子集 3 中包含了上海、杭州等省会城市,机动车排放大于其他地区。EP2 偏向于区域污染累积型, NO_2 的区域性排放特征更为明显,子集 3 所含城市的 NO_2 平均浓度在 4 个子集中最大。 SO_2 浓度受污染类型的影响较大,污染过程 1 中各子集 SO_2 浓度均值皆大于污染过程 2 各子集,主要因为污染过程 1 更偏向于区外传输型,受北方燃煤所排放的

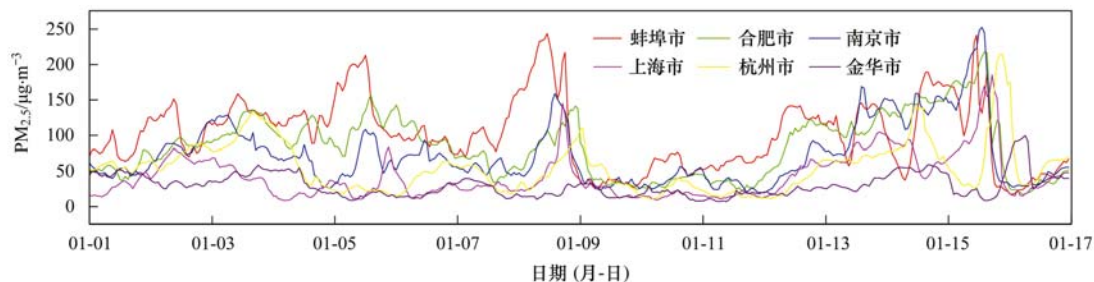
SO_2 气团传输影响较大,因此,污染过程 1 污染严重区域 SO_2 浓度为污染过程 2 对应聚类结果子集所含区域的 1.7 倍。

此外,通过计算不同污染过程时间段内大气颗粒物中细颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$) 的比重可进一步判别污染所属类型。有研究发现^[46],当 $\text{PM}_{2.5}$ 在 PM_{10} 中的比重大于 0.6 时,重污染的发生主要是由人为原因产生的细颗粒物起主导作用。经计算统计,两次污染过程各个区域及代表性城市 $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} 的比值在 0.7 ~ 0.9 范围内波动,总体均值达到 0.7 以上,污染类型已逐渐转型为细颗粒物污染,需要加强人为源排放的控制。

综上,EP1 为跨区域传输型,EP2 为区域内(累积)交互影响型。研究期间内,每个污染过程 $\text{PM}_{2.5}$ 小时质量浓度呈小振幅持续上升,大部分浓度上升峰值增长速率^[47]处于 $3.9 \sim 14.6 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ 不等,且污染严重区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值及两次污染过程 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度峰值均表现为 EP1 > EP2,即长三角区域交互型污染过程污染强度小于跨区域传输型污染。另外,EP2 污染结束前,受污染类型及天气条件影

表 1 2019 年 1 月 1 ~ 16 日污染期间长三角地区各污染物浓度
Table 1 Pollutant concentrations in the YRD region from January 1 to 16, 2019

项目	日期 (月·日)	$\text{PM}_{2.5}$ $/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	PM_{10} $/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	CO $/\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	NO_2 $/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	SO_2 $/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$
子集 1	01-01 ~ 01-08	131.7 ± 53.2	166.3 ± 60.7	1.3 ± 0.4	48.4 ± 16.9	14.9 ± 7.4	0.78
子集 2	01-01 ~ 01-08	82.5 ± 37.5	103.5 ± 51.2	1.1 ± 0.4	44.7 ± 16.3	11.6 ± 7.7	0.79
子集 3	01-01 ~ 01-08	53.5 ± 29.1	66.2 ± 36.3	1.0 ± 0.3	47.5 ± 15.6	9.2 ± 4.1	0.76
子集 4	01-01 ~ 01-08	27.4 ± 16.3	39.3 ± 22.7	0.9 ± 0.3	$37.0 \pm 12.$	6.2 ± 2.3	0.68
子集 1	01-11 ~ 01-15	115.4 ± 54.2	157.1 ± 66.4	1.3 ± 0.5	40.6 ± 16.7	8.7 ± 5.0	0.73
子集 2	01-11 ~ 01-15	93.8 ± 54.5	110.3 ± 65.3	1.2 ± 0.4	48.5 ± 16.3	9.3 ± 5.2	0.81
子集 3	01-11 ~ 01-15	69.1 ± 43.3	86.2 ± 56.4	1.1 ± 0.4	49.1 ± 17.9	7.9 ± 3.1	0.83
子集 4	01-11 ~ 01-15	41.0 ± 32.9	58.0 ± 43.7	1.1 ± 0.3	43.8 ± 13.7	6.8 ± 2.3	0.70
蚌埠市	01-01 ~ 01-16	102.5 ± 49.1	135.1 ± 55.6	1.1 ± 0.4	45.0 ± 15.1	12.8 ± 5.8	0.75
	01-01 ~ 01-08	121.3 ± 41.1	152.9 ± 46.9	1.2 ± 0.3	49.7 ± 16.0	15.1 ± 7.0	0.79
	01-11 ~ 01-15	107.6 ± 47.2	144.3 ± 54.5	1.2 ± 0.4	41.5 ± 12.5	10.5 ± 3.0	0.75
合肥市	01-01 ~ 01-16	85.0 ± 42.6	92.4 ± 39.8	1.1 ± 0.4	48.6 ± 13.4	6.1 ± 3.2	0.79
	01-01 ~ 01-08	90.2 ± 28.1	91.3 ± 30.6	1.2 ± 0.3	48.7 ± 11.9	6.4 ± 3.7	0.86
	01-11 ~ 01-15	106.0 ± 50.6	108.5 ± 46.4	1.2 ± 0.4	51.7 ± 15.7	6.2 ± 2.7	0.86
南京市	01-01 ~ 01-16	73.1 ± 43.6	99.5 ± 54.7	1.0 ± 0.4	51.7 ± 13.9	10.0 ± 4.4	0.73
	01-01 ~ 01-08	72.2 ± 27.0	96.1 ± 36.3	1.0 ± 0.3	53.6 ± 13.3	11.6 ± 5.3	0.76
	01-11 ~ 01-15	96.2 ± 59.7	128.1 ± 73.7	1.2 ± 0.5	52.4 ± 15.3	8.6 ± 2.6	0.74
上海市	01-01 ~ 01-16	42.3 ± 30.8	47.8 ± 32.6	0.7 ± 0.3	49.8 ± 14.8	7.4 ± 2.3	0.82
	01-01 ~ 01-08	37.2 ± 22.1	43.0 ± 23.7	0.6 ± 0.2	47.1 ± 14.3	7.6 ± 2.7	0.83
	01-11 ~ 01-15	62.1 ± 39.3	64.7 ± 43.4	1.0 ± 0.3	56.7 ± 14.9	7.7 ± 1.9	0.90
杭州市	01-01 ~ 01-16	55.1 ± 35.2	74.9 ± 45.6	1.2 ± 0.3	50.9 ± 11.6	8.5 ± 1.5	0.74
	01-01 ~ 01-08	56.4 ± 28.9	76.9 ± 40.4	1.2 ± 0.3	52.0 ± 12.3	8.5 ± 1.5	0.75
	01-11 ~ 01-15	59.6 ± 45.7	79.6 ± 55.6	1.2 ± 0.3	50.4 ± 10.1	8.2 ± 1.3	0.75
金华市	01-01 ~ 01-16	29.9 ± 16.3	41.3 ± 22.9	1.0 ± 0.3	45.4 ± 7.8	6.8 ± 1.9	0.73
	01-01 ~ 01-08	30.4 ± 13.7	39.7 ± 18.6	1.0 ± 0.3	46.1 ± 7.4	6.5 ± 1.6	0.77
	01-11 ~ 01-15	28.3 ± 15.1	40.6 ± 21.6	1.0 ± 0.2	46.2 ± 7.8	7.8 ± 2.1	0.71

图8 长三角典型城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度时间序列(2019年)Fig. 8 Time series of $\text{PM}_{2.5}$ concentration in typical cities in the YRD(2019)

响,颗粒物出现一次陡增型变化,相应的速率也表现出一致性增大,特别是受污染严重的子集1区域城市最为显著,其 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度达到峰值的增长速率高达 $15.5 \sim 32.0 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$,明显高于其他时间段内的增长率,此特征与王占山等^[48]得出的结论相符合,即污染水平越重 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度跃升幅度越大。

2.3 典型城市污染过程分析

2.3.1 长三角北部城市近地面气象条件分析

稳定的天气形势对于污染物的累积、转化和二次污染生成、消散等具有多方面影响^[49]。长三角北部地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度累积缓慢上升导致的污染通常伴

随较高的相对湿度和偏东的弱风。本研究时期内蚌埠5项污染物浓度及气象条件时间序列如图9所示。EP1和EP2两次污染过程的污染累积阶段,多次出现静小风($< 1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)天气,且受偏东风的影响,污染过程出现;偏北的强风则会导致 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的下降。气压场在污染累积阶段则会有相对稳定的趋势,直到污染物浓度累积到最大值,这与其他课题组研究结果相一致^[50~52]。整个研究时段内气温总体偏低,最高温度不到 6°C ,清洁时段气温会有相对地升高,这可能是因为高浓度的气溶胶会对太阳光产生散射和吸收,使到达地面的太阳辐射减少,进而

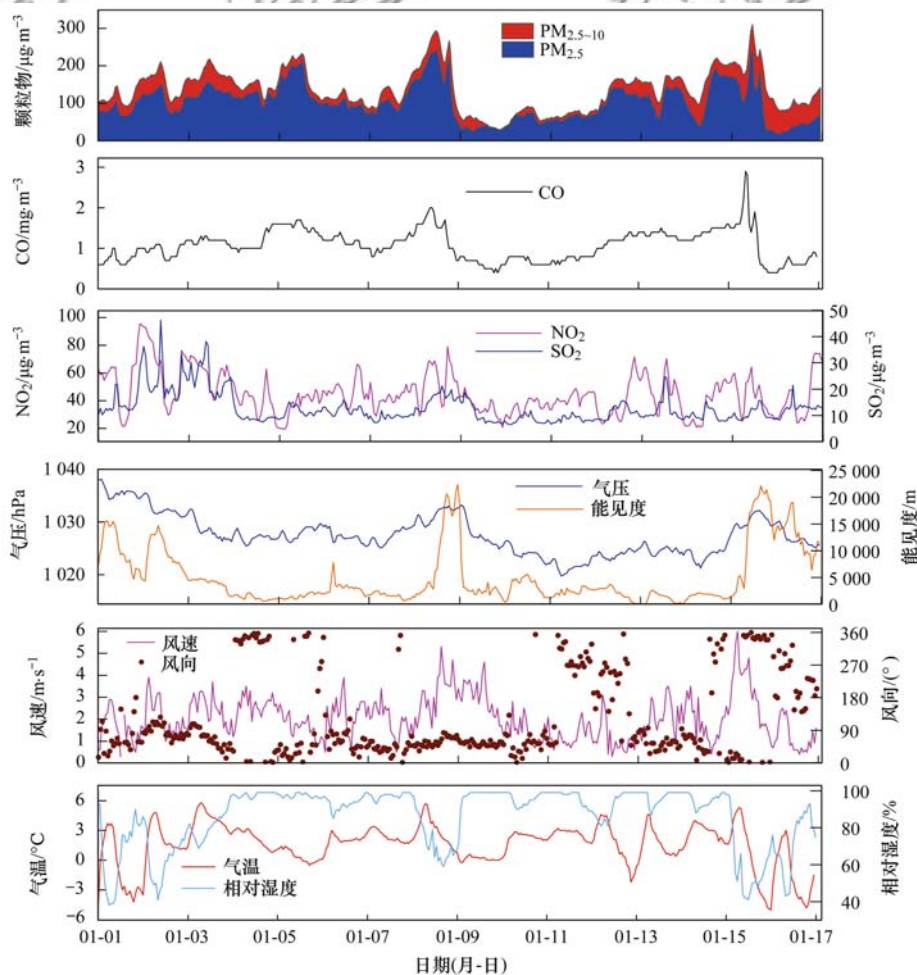


图9 长三角北部城市(蚌埠)各污染物浓度及气象参数时序(2019年)

Fig. 9 Pollutant concentration and meteorological parameters in Bengbu(2019)

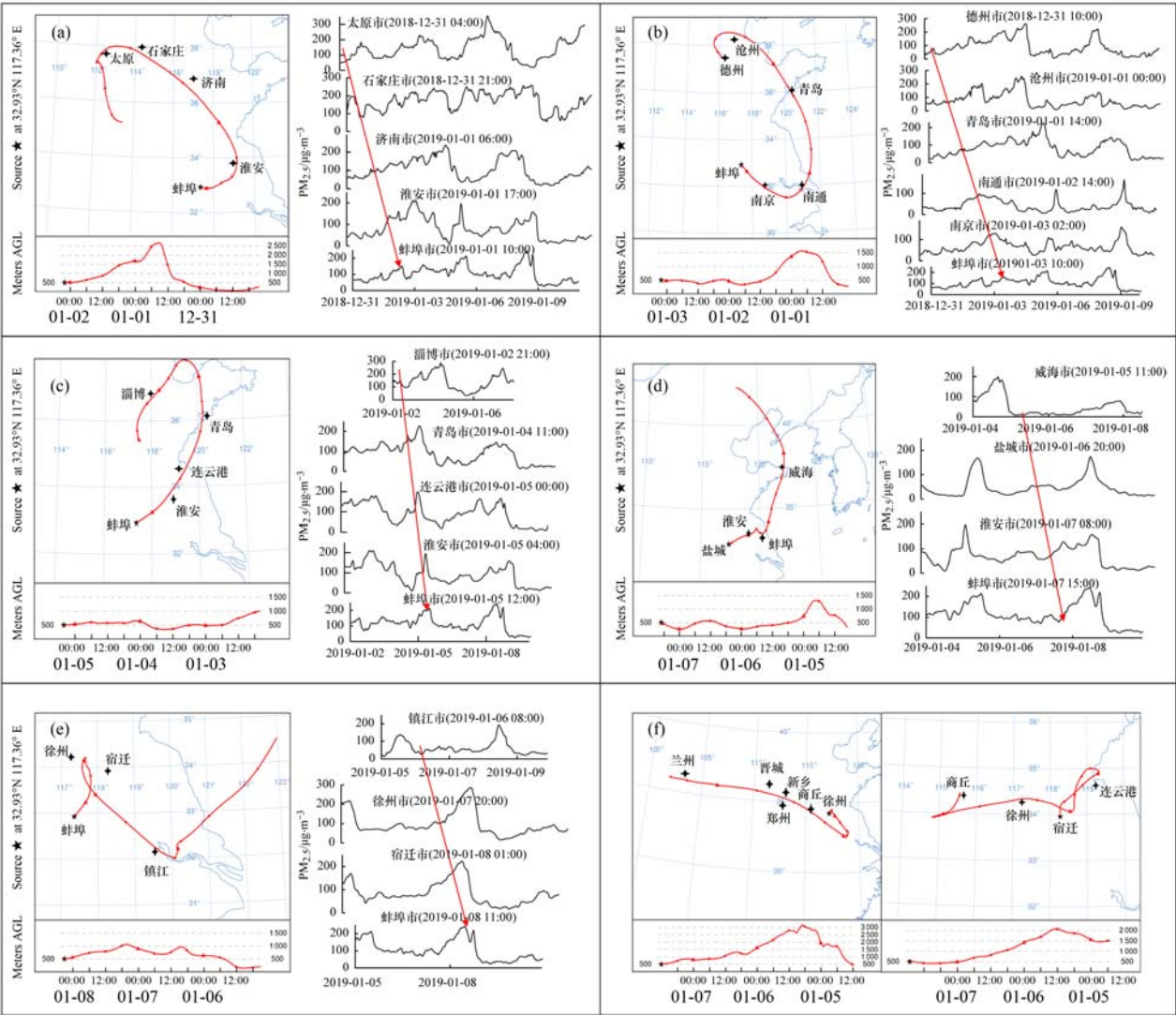
引起地表温度下降^[53]. 整个研究时期内相对湿度较大,平均相对湿度为 58.8%,且较多时段达到 95% 以上,促进颗粒物的吸湿增长,消光性增强,且促进部分气态前体物向二次污染转化. 有研究表明,NO₂ 在高湿环境下的转化速率是干燥条件下的 6 倍,加快硝酸盐的二次生成^[54]. 另外,随着相对湿度的增大能见度降低,可能由于颗粒物中二次无机盐离子的不断吸湿增长加上水汽的消光作用导致大气能见度降低^[55].

2.3.2 长三角北部城市 PM_{2.5} 空间来源

根据蚌埠市 PM_{2.5} 小时浓度将 EP1 污染过程分为 3 个阶段,由图 10 (a) ~ 10(c) 可见,1 月 1 ~ 5 日为污染发生和颗粒物开始累积阶段,该阶段气团主要来源于山西、河北和山东等地,轨迹由北逐渐向南移动. 长三角北部蚌埠、淮安和连云港等城市 PM_{2.5} 浓度达到本阶段峰值的浓度 (μg·m⁻³) 及其增长速率 [μg·(m³·h)⁻¹] 分别为:蚌埠(213.0, 5.9)、

淮安(210.6, 4.5)和连云港(198.5, 8.6).

图 10(d) 为 EP1 过程污染的波动阶段,发生于内蒙古的冷气团,经秦皇岛、大连和威海等城市,经过江苏东部海域到达长三角北部城市上空,由于此阶段为洁净气团,使长三角北部地区各市 PM_{2.5} 浓度皆有所下降,明显小于污染累积阶段,污染得到部分缓解. 由图 10(e) 可见,长三角北部城市 PM_{2.5} 浓度再次累积,期间气团主要来自甘肃、山西、河南等西部地区,长三角再次受到污染的跨区域传输,甚至在以宿迁终点的轨迹中商丘作为气团的发源地,PM_{2.5} 浓度达到了 250.0 μg·m⁻³ 以上,且此时段内长三角内部也发生气流交汇,污染物再次积累,达到 EP1 污染过程的最大值,部分城市达到的 PM_{2.5} 浓度 (μg·m⁻³) 最大值及其增长速率 [μg·(m³·h)⁻¹] 分别为蚌埠(243.7, 8.8)、宿迁(221.7, 7.3)和徐州(285.7, 10.8). 由图 11 可知,1 月 8 日受蒙古和西伯利亚强冷气团南下影响,长三角地区污染物开始



(a) ~ (c) 污染发生-累积阶段; (d) 污染波动阶段; (e) 污染物再次累积阶段

图 10 EP1 气团来源及其途经城市的 PM_{2.5} 浓度

Fig. 10 Air mass source and route city PM_{2.5} concentration during pollution EP1

消散,北部宿迁、蚌埠和徐州等城市空气质量于1月8日夜间到9日白天回到优良等级. 总体来看,EP1过程主要受北方河北、山东等地来的气团携带的污染物的影响,属于污染物跨区域传输型污染,侵入长三角区域叠加长三角污染累积造成.

图12和图13为EP2污染期间气团来源、途经

城市和相应时刻的受体城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度. 由图12(a)~12(c)可见,EP2污染的发生及污染物的累积过程为1月11~13日,主要受长三角区域内部交互气团及西方气团影响,本地及附近地区污染物累积占主要 $\text{PM}_{2.5}$ 污染贡献,期间长三角北部受体点城市 $\text{PM}_{2.5}$ 达到的峰值分别为:淮安 $164.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、宿迁 $158.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和蚌埠 $145.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,区域内部污染物累积到达峰值小于EP1域外传输导致 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度累积到达的峰值.

由图12(c)和12(d)可知,1月13日夜间到14日上午,气团由区域内部交互来源逐渐转为由北方的来源,污染物累积出现波动, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度出现一段时间的下降,紧接着污染物再一次累积,其中宿迁于本次累积阶段达到此次污染过程的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最大值 $225.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 由图12(e)可见,1月15日凌晨污染物浓度下降而后上升,受北方来的气团的传输作用,部分城市达到本次污染的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最大值,其 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 最大值及其增长速率 [$\mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$] 分别为蚌埠 (241.5, 28.4) 和淮安 (255.0, 20.8); 由图12(f)可知,受西伯利亚和蒙古地区强冷气团南下的影响,污染物逐渐开始清除,EP2污染过程结束.

综上,EP2污染发生及污染物累积都是在区域

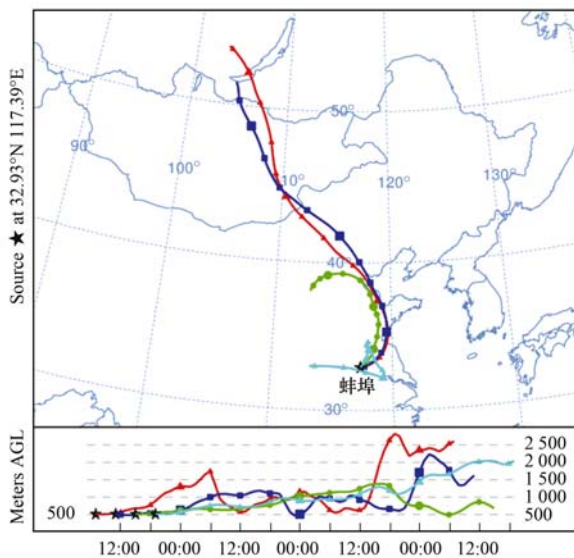
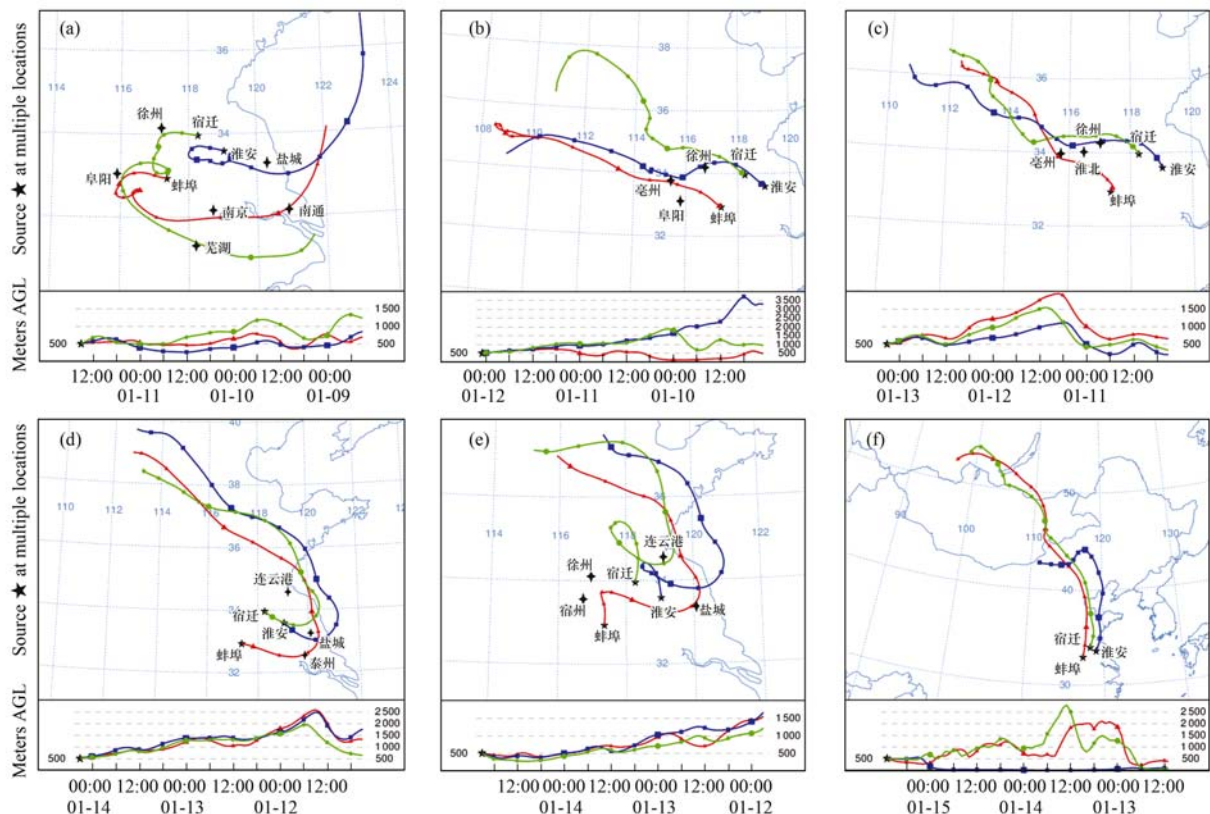


图11 EP1污染清除阶段气团轨迹

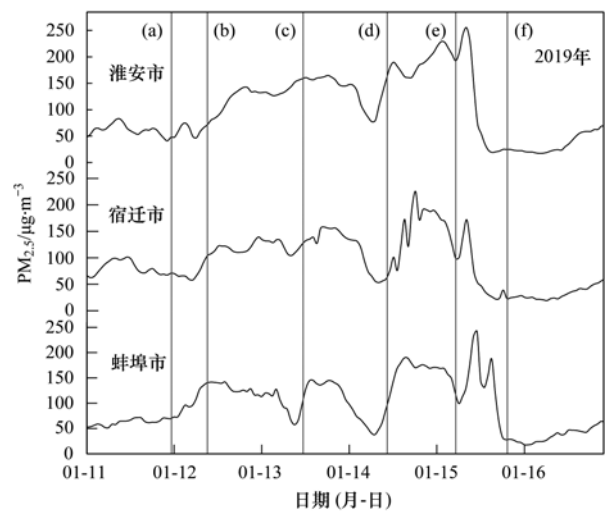
Fig. 11 Air mass source in the pollution removal stage during pollution EP1



(a)~(c) 污染发生-累积阶段; (d) 污染波动阶段; (e) 污染物再次累积阶段; (f) 污染清除阶段

图12 EP2气团来源及途径城市

Fig. 12 Air mass source and route city during pollution EP2



(a) ~ (c) 污染发生-累积阶段; (d) 污染波动阶段;
(e) 污染物再次累积阶段; (f) 污染清除阶段

图 13 EP2 受体城市 $PM_{2.5}$ 浓度变化

Fig. 13 Receptor cities of $PM_{2.5}$ concentration during pollution EP2

内交互气团及同纬度气团的作用下进行的,属于区域内部污染物累积型污染过程,其达到的污染浓度峰值小于跨区域传输而导致的污染,污染结束前受到域外传输污染的影响,使污染进一步加重,最后在北方来的强冷空气的作用下污染得以消除。

为进一步探讨两次污染过程中长三角北部城市污染的来源特征,利用 PSCF 和 CWT 对 EP1 和 EP2 两次过程的 $PM_{2.5}$ 进行定性和定量分析^[56],在 PSCF 中, $PM_{2.5}$ 的阈值设为 75。图 14 和图 15 分别给出了潜在源贡献因子分析和浓度权重轨迹分析结果,图 14 中网格颜色越深代表污染轨迹占比越高,图 15 中网格颜色越深表示潜在源区对长三角北部城市 $PM_{2.5}$ 浓度贡献越大。对比 PSCF 和 CWT 结果发现,潜在源区域污染轨迹占比与 $PM_{2.5}$ 浓度贡献并没有呈现绝对的一致性。

由图14(a)可见,EP1污染过程中,蚌埠地区的

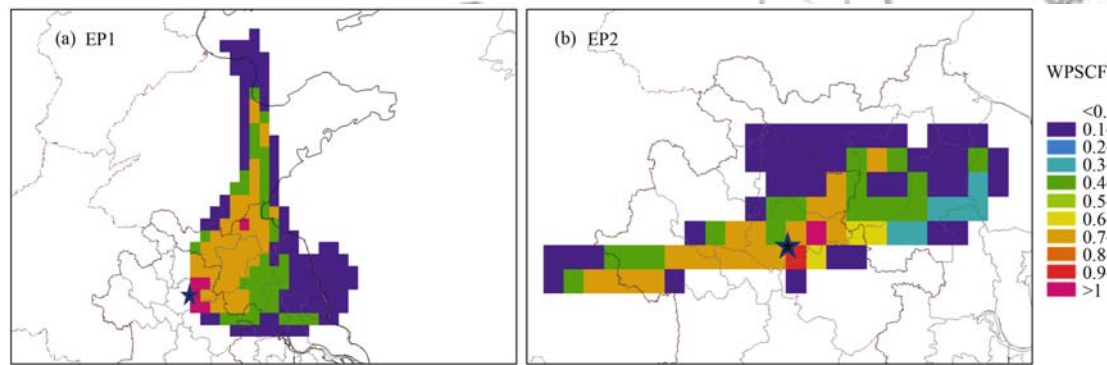


图 14 潜在源贡献因子分析 (PSCF)

Fig. 14 Distribution of potential source contribution function (PSCF)

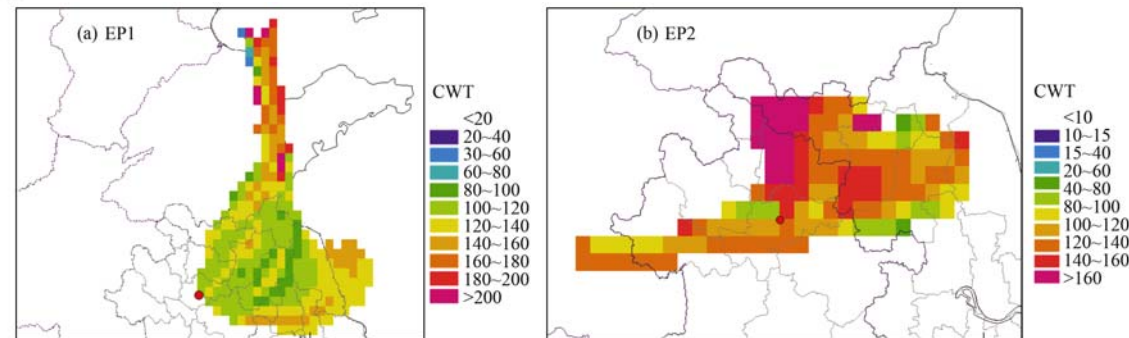


图 15 潜在源浓度权重轨迹分析 (CWT)

Fig. 15 Distribution of potential source concentration-weighted trajectories (CWT)

潜在影响源区主要包括 3 类:①本地潜在源区以受体城市市区县与相邻时接壤的区域为主,分布在研究点位的东及东北方向,其 WPSCF 在 0.9 以上;②区域潜在源位于受体城市蚌埠北部及东北部城市,主要包括安徽省北部城市宿州,江苏省北部城市徐州、宿迁、连云港和淮安,以及山东省与江苏省相邻的部分区域,WPSCF 在 0.7 以上;③远距离传输源,主要包括山东省部分地区,安徽省滁州市部分地

区和江苏省中部淮安、扬州和盐城等部分区域,其 WPSCF 在 0.4 以上。可以看出,EP1 过程受污染类型及气流来源的影响,潜在源区域主要分布在长三角北部受体城市的北方,受区域间传输影响。

图 14(b)给出了 EP2 污染过程中蚌埠地区的潜在影响源区,主要包括:①本地潜在源区域,主要包括长三角北部受体城市蚌埠与滁州市相邻区域和蚌埠市区与五河县中间区域,WPSCF 在 0.9 以上;

②区域潜在源分为两个区域,位于研究点位的东北和西边,主要包括安徽省内的宿州、蚌埠、淮南、亳州和阜阳等城市部分地区,其 WPSCF 在 0.6 以上;
③区域潜在源位于蚌埠市东边江苏省宿迁和淮安等城市部分区域,其 WPSCF 在 0.3 以上,EP2 潜在源区域主要分布在与受体点位同纬度的相邻区域,区域内部交互影响。

依据气团传输轨迹及污染物观测数据,将 EP1 和 EP2 时期分别做浓度权重分析。由图 15(a) CWT 结果可知,EP1 过程受体城市 PM_{2.5} 的潜在贡献包括山东省中部城市,山东省沿渤海城市以及江苏省中部及沿海城市,污染物由图 14(a) 中污染轨迹密集区域传输到长三角北部受体城市,此期间 C_L 值较高,由公式(6)计算得出的 CWT 值普遍处于 80 以上,最高可达 200 以上,表明区域传输实际浓度值较高。由图 15(b)可知,EP2 过程中潜在贡献区为安徽省及江苏省的中部和北部城市,受体城市 PM_{2.5} 的浓度受区域内部邻近城市影响较大,此期间 CWT 值处于 60 以上,最高达 160 以上,区域内部城市间相互影响较大。

总体来说,长三角北部城市 PM_{2.5} 来源在受区域传输影响的同时,长三角区域内部排放也占有很大比例,安徽省、江苏省贡献最大,大气污染物排放量相对较高^[57]。

3 结论

(1)长三角秋冬季区域性大气污染主要受远距离传输和区域内部污染物累积影响,污染类型为区域污染累积型与区外传输型并存。在研究的两次污染过程中,长三角北部省市地区皆为受污染严重区域,PM_{2.5} 浓度均值分别为 131.6 μg·m⁻³ 和 115.4 μg·m⁻³,中部省市次之,南部浙江省受污染影响最小。

(2)由典型的地区的污染过程分析可知,地面弱气压、高湿度、低温、低风速和低能见度是冬季长三角大气污染过程中的主要气象特征。研究时间段内平均相对湿度为 58.8%,污染过程中多时段高达 95% 以上,冬季低温高湿的气象条件更加加剧污染物的累积。

(3)PSCF 和 CWT 定性和定量分析可知,长三角北部城市 PM_{2.5} 污染由本地及周边区县贡献最大,WPSCF 大于 0.9,属典型的区域性污染,长三角北部省市地区污染物排放量较大。EP1 过程受体城市 PM_{2.5} 的潜在贡献为山东省中部城市,CWT 值高达 200 以上,区域传输实际浓度值较高。EP2 过程中潜在贡献区为长三角北部城市,受邻近城市影响,此期

间 CWT 高达 160 以上,区域内部城市间相互影响较大。因此,秋冬季重污染过程中的跨区域大气污染联动,对于缓解长三角北部区域污染程度尤为重要。

参考文献:

- [1] Zhang Y L, Zhu B, Gao J H, *et al.* The source apportionment of primary PM_{2.5} in an aerosol pollution event over Beijing-Tianjin-Hebei region using WRF-Chem, China[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2017, **17**(12): 2966-2980.
- [2] Li M R, Hu M, Du B H, *et al.* Temporal and spatial distribution of PM_{2.5} chemical composition in a coastal city of southeast China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **605-606**: 337-346.
- [3] 吕喆,魏巍,周颖,等. 2015~2016 年北京市 3 次空气重污染红色预警 PM_{2.5} 成因分析及效果评估[J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 1-10.
Lü Z, Wei W, Zhou Y, *et al.* Cause and effect evaluation of PM_{2.5} during three red alerts in Beijing from 2015 to 2016[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 1-10.
- [4] 贺晋瑜,燕丽,王彦超,等. 我国 PM_{2.5} 浓度分阶段改善目标情景分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2036-2042.
He J Y, Yan L, Wang Y C, *et al.* Scenario analysis of PM_{2.5} concentration targets and milestones in China[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2036-2042.
- [5] 武卫玲,薛文博,王燕丽,等. 《大气污染防治行动计划》实施的环境健康效果评估[J]. *环境科学*, 2019, **40**(7): 2961-2966.
Wu W L, Xue W B, Wang Y L, *et al.* Health benefit evaluation for air pollution prevention and control action plan in China[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(7): 2961-2966.
- [6] 环境保护部. 环境保护部发布《2015 中国环境状况公报》[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201606/t20160602_353078.htm, 2016-06-02.
- [7] 张玉欣,安俊琳,王健宇,等. 南京北郊大气 BTEX 变化特征和健康风险评估[J]. *环境科学*, 2017, **38**(2): 453-460.
Zhang Y X, An J L, Wang J Y, *et al.* Variation characteristics and health risk assessment of BTEX in the atmosphere of northern suburb of Nanjing[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(2): 453-460.
- [8] 程轲,季婉婉,郝炜伟,等. 城市生活垃圾露天焚烧排放 PM_{2.5} 中重金属污染特征及其暴露健康风险[J]. *环境科学*, 2019, **40**(10): 4337-4344.
Cheng K, Ji W W, Hao W W, *et al.* Characteristics of heavy metal pollutants of PM_{2.5} from open burning of municipal solid waste (MSW) and the associated exposure health risks[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(10): 4337-4344.
- [9] Zhou X Y, Zhang W, Zhou X Y, *et al.* PM_{2.5}, PM₁₀ and health risk assessment of heavy metals in a typical printed circuit boards manufacturing workshop[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26**(10): 2018-2026.
- [10] 江晓栋,薛银刚,魏永,等. 基于成组生物毒性测试的 PM_{2.5} 毒性[J]. *环境科学*, 2019, **40**(8): 3840-3848.
Jiang X D, Xue Y G, Wei Y, *et al.* Toxicity of PM_{2.5} based on a battery of bioassays[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3840-3848.
- [11] 杨旭,张小玲,康延臻,等. 京津冀地区冬半年空气污染天气分型研究[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(9): 3201-3209.
Yang X, Zhang X L, Kang Y Z, *et al.* Circulation weather type classification for air pollution over the Beijing-Tianjin-Hebei region during winter[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(9): 3201-3209.

- [12] Zhang Y, Ding A J, Mao H T, *et al.* Impact of synoptic weather patterns and inter-decadal climate variability on air quality in the North China Plain during 1980-2013 [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **124**: 119-128.
- [13] 常树诚, 廖程浩, 曾武涛, 等. 肇庆市一次典型污染天气的污染物来源解析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(10): 4310-4318.
- Chang S C, Liao C H, Zeng W T, *et al.* Source apportionment of air pollutants for a typical pollution event in Zhaoqing [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(10): 4310-4318.
- [14] Dayan U, Erel Y, Shpund J, *et al.* The impact of local sources and meteorological factors on nitrogen oxide and particulate matter concentrations: a case study of the Day of Atonement in Israel [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(19): 3325-3332.
- [15] 江琪, 王飞, 张恒德, 等. 2013~2015 年北京市 PM_{2.5}、反应性气体和气溶胶粒径的特性分析[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(10): 3647-3657.
- Jiang Q, Wang F, Zhang H D, *et al.* The characteristics of PM_{2.5}, reactive gas and aerosol size distributions of Beijing from 2013 to 2015 [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(10): 3647-3657.
- [16] 徐冉, 张恒德, 杨孝文, 等. 北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(8): 3405-3414.
- Xu R, Zhang H D, Yang X W, *et al.* Concentration characteristics of PM_{2.5} and the causes of heavy air pollution events in Beijing during autumn and winter [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3405-3414.
- [17] 程念亮, 张大伟, 陈添, 等. 2015 年北京市两次红色预警期间 PM_{2.5} 浓度特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(7): 2409-2418.
- Cheng N L, Zhang D W, Chen T, *et al.* Concentration characteristics of PM_{2.5} in Beijing during two red alert periods [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(7): 2409-2418.
- [18] 李莉, 蔡黎琳, 周敏. 2013 年 12 月中国中东部地区严重灰霾期间上海市颗粒物的输送途径及潜在源区贡献分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(7): 2327-2336.
- Li L, Cai J L, Zhou M. Potential source contribution analysis of the particulate matters in Shanghai during the heavy haze episode in eastern and middle China in December, 2013 [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(7): 2327-2336.
- [19] Wang M Y, Cao C X, Li G S, *et al.* Analysis of a severe prolonged regional haze episode in the Yangtze River Delta, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **102**: 112-121.
- [20] 徐足飞, 曹芳, 高嵩, 等. 南京北郊秋季 PM_{2.5} 碳质组分污染特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(7): 3033-3041.
- Xu Z F, Cao F, Gao S, *et al.* Characteristics and source analysis of carbonaceous components of PM_{2.5} during autumn in the northern suburb of Nanjing [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3033-3041.
- [21] Tang L L, Yu H X, Ding A J, *et al.* Regional contribution to PM₁ pollution during winter haze in Yangtze River Delta, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **541**: 161-166.
- [22] Wang H L, Zhu B, Shen L J, *et al.* Regional characteristics of air pollutants during heavy haze events in the Yangtze River Delta, China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2016, **16**(9): 2159-2171.
- [23] Hua Y, Cheng Z, Wang S X, *et al.* Characteristics and source apportionment of PM_{2.5} during a fall heavy haze episode in the Yangtze River Delta of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **123**: 380-391.
- [24] 梁丹, 王彬, 王云琦, 等. 重庆市冬季 PM_{2.5} 及气态污染物的分布特征与来源[J]. *环境科学研究*, 2015, **28**(7): 1039-1046.
- Liang D, Wang B, Wang Y Q, *et al.* Distribution characteristics and sources of PM_{2.5} and gaseous pollutants in winter in Chongqing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, **28**(7): 1039-1046.
- [25] Hopke P K, Gao N, Cheng M D. Combining chemical and meteorological data to infer source areas of airborne pollutants [J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 1993, **19**(2): 187-199.
- [26] Payra S, Kumar P, Verma S, *et al.* Potential source identification for aerosol concentrations over a site in Northwestern India [J]. *Atmospheric Research*, 2016, **169**: 65-72.
- [27] 王爱平, 朱彬, 银燕, 等. 黄山顶夏季气溶胶数浓度特征及其输送潜在源区[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(4): 852-861.
- Wang A P, Zhu B, Yin Y, *et al.* Aerosol number concentration properties and potential sources areas transporting to the top of mountain Huangshan in summer [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(4): 852-861.
- [28] Gramsch E, Cereceda-Balic F, Oyola P, *et al.* Examination of pollution trends in Santiago de Chile with cluster analysis of PM₁₀ and Ozone data [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(28): 5464-5475.
- [29] 周敏, 乔利平, 朱书慧, 等. 2013 年 12 月上海市重度污染期间细颗粒物化学特征与输送轨迹影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 1179-1187.
- Zhou M, Qiao L P, Zhu S H, *et al.* Chemical characteristics of particulate matters and trajectory influence on air quality in Shanghai during the heavy haze episode in December, 2013 [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1179-1187.
- [30] Ashbaugh L L, Malm W C, Sadeh W Z. A residence time probability analysis of sulfur concentrations at Grand Canyon National Park [J]. *Atmospheric Environment*, 1985, **19**(8): 1263-1270.
- [31] Zhang K, Zhou L, Fu Q Y, *et al.* Vertical distribution of ozone over Shanghai during late spring: A balloonborne observation [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **208**: 48-60.
- [32] 段时光, 姜楠, 杨留明, 等. 郑州市冬季大气 PM_{2.5} 传输路径和潜在源分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 86-93.
- Duan S G, Jiang N, Yang L M, *et al.* Transport pathways and potential sources of PM_{2.5} during the winter in Zhengzhou [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 86-93.
- [33] 刘童, 王晓军, 陈倩, 等. 烟台市环境受体 PM_{2.5} 四季污染特征与来源解析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1082-1090.
- Liu T, Wang X J, Chen Q, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of ambient PM_{2.5} during four seasons in Yantai city [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1082-1090.
- [34] 杨健, 尹沙沙, 于世杰, 等. 安阳市近地面臭氧污染特征及气象影响因素分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 115-124.
- Yang J, Yin S S, Yu S J, *et al.* Characteristic of surface ozone and meteorological parameters analysis in Anyang City [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 115-124.
- [35] Zeng Y, Hopke P K. A study of the sources of acid precipitation in Ontario, Canada [J]. *Atmospheric Environment*, 1989, **23**(7): 1499-1509.
- [36] Polissar A V, Hopke P K, Paatero P, *et al.* The aerosol at Barrow, Alaska: long-term trends and source locations [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(16): 2441-2458.
- [37] 张晗宇, 程水源, 姚森, 等. 2016 年 10~11 月期间北京市大气颗粒物污染特征与传输规律[J]. *环境科学*, 2019, **40**

- (5): 1999-2009.
Zhang H Y, Cheng S Y, Yao S, *et al.* Pollution characteristics and regional transport of atmospheric particulate matter in Beijing from October to November, 2016 [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 1999-2009.
- [38] Hsu Y K, Holsen T M, Hopke P K. Comparison of hybrid receptor models to locate PCB sources in Chicago [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(4): 545-562.
- [39] 许建明, 常炉予, 马井会, 等. 上海秋冬季PM_{2.5}污染天气形势的客观分型研究[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(12): 4303-4314.
Xu J M, Chang L Y, Ma J H, *et al.* Objective synoptic weather classification on PM_{2.5} pollution during autumn and winter seasons in Shanghai [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(12): 4303-4314.
- [40] 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.
- [41] Bei N F, Wu J R, Elser M, *et al.* Impacts of meteorological uncertainties on the haze formation in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) during wintertime: a case study [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(23): 14579-14591.
- [42] Duncan B N, Martin R V, Staudt A C, *et al.* Interannual and seasonal variability of biomass burning emissions constrained by satellite observations [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**(D2): 4100.
- [43] 江琪, 王飞, 张恒德, 等. 北京市PM_{2.5}和反应性气体浓度的变化特征及其与气象条件的关系[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(3): 829-837.
Jiang Q, Wang F, Zhang H D, *et al.* Analysis of temporal variation characteristics and meteorological conditions of reactive gas and PM_{2.5} in Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(3): 829-837.
- [44] 唐孝炎, 张远航, 邵敏. 大气环境化学[M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2006. 40-41.
- [45] Xie Y Y, Zhao B, Zhang L, *et al.* Spatiotemporal variations of PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations between 31 Chinese cities and their relationships with SO₂, NO₂, CO and O₃ [J]. *Particology*, 2015, **20**: 141-149.
- [46] 邓发荣, 康娜, Kumar K R, 等. 长江三角洲地区大气污染过程分析[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(2): 401-411.
Deng F R, Kang N, Kumar K R, *et al.* Analysis of air pollution episodes over different cities in the Yangtze River Delta [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(2): 401-411.
- [47] 刘超. 典型区域PM_{2.5}污染特征及影响因素研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2014.
- [48] 王占山, 李云婷, 孙峰, 等. 2015年1月下旬北京市大气污染过程成因分析[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(7): 2324-2331.
Wang Z S, Li Y T, Sun F, *et al.* Formation mechanism of air pollution episodes in Beijing in late January 2015 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(7): 2324-2331.
- [49] Wen W, Cheng S Y, Liu L, *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} in Tangshan, China—hybrid approaches for primary and secondary species apportionment [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2016, **10**(5): 6.
- [50] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2013年1月北京市一次空气重污染成因分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1154-1163.
Cheng N L, Li Y T, Zhang D W, *et al.* Formation mechanism of a serious pollution event in January 2013 in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(4): 1154-1163.
- [51] 杨孝文, 周颖, 程水源, 等. 北京冬季一次重污染过程的污染特征及成因分析[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(3): 679-686.
Yang X W, Zhou Y, Cheng S Y, *et al.* Characteristics and formation mechanism of a heavy winter air pollution event in Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(3): 679-686.
- [52] 王跃. 北京PM_{2.5}时空变化特征及重污染时段气象成因研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014.
- [53] Solazzo E, Bianconi R, Pirovano G, *et al.* Operational model evaluation for particulate matter in Europe and North America in the context of AQMEII [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **53**: 75-92.
- [54] 张周祥. 秋冬季北京北部重污染事件PM₁化学组分特征及气象因素的贡献[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2017.
- [55] Sun Y L, Zhang Q, Schwab J J, *et al.* A case study of aerosol processing and evolution in summer in New York City [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(24): 12737-12750.
- [56] 翟华, 朱彬, 赵雪婷, 等. 长江三角洲初冬一次重污染天气成因分析[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(11): 4001-4009.
Zhai H, Zhu B, Zhao X T, *et al.* Analysis of a heavy air pollution event in early winter in the Yangtze River Delta [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(11): 4001-4009.
- [57] Huang C, Chen C H, Li L, *et al.* Emission inventory of anthropogenic air pollutants and VOC species in the Yangtze River Delta region, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(9): 4105-4120.

CONTENTS

PM _{2.5} Inversion Using Remote Sensing Data in Eastern China Based on Deep Learning	LIU Lin-yu, ZHANG Yong-jun, LI Yan-sheng, <i>et al.</i> (1513)
Regional Air Pollution Process in Winter over the Yangtze River Delta and Its Influence on Typical Northern Cities	LI Rui, LI Qing, XU Jian, <i>et al.</i> (1520)
Influencing Factors of Ozone Concentration in Xi'an Based on Generalized Additive Models	HUANG Xiao-gang, SHAO Tian-jie, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> (1535)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Levoglucosan and Its Isomers in PM _{2.5} in Beijing and Six Surrounding Cities	ZHU Hong-xia, TAO Xue-mei, WANG Chao, <i>et al.</i> (1544)
Characteristics and Sources Apportionment of Fine Particulate Matter in a Typical Coastal City During the Heating Period	LI Ming-yan, YANG Wen, WEI Min, <i>et al.</i> (1550)
Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon in Chengdu	WANG Lu, YUAN Liang, ZHANG Xiao-ling, <i>et al.</i> (1561)
Effects of VOCs on Ozone Formation in the Tianjin Suburbs in Summer	YAO Qing, HAN Su-qin, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (1573)
Source Profiles and Impact of Volatile Organic Compounds in the Coating Manufacturing Industry	WU Jian, GAO Song, CHEN Xi, <i>et al.</i> (1582)
Characteristics of Condensable Particulate Matter in Ultra-low Emission Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, WANG Gang, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1589)
Distribution and Source Analysis of Nitrate in Surface Waters of China	ZHANG Xin, ZHANG Yan, BI Zhi-lei, <i>et al.</i> (1594)
Spatial Characteristics and Ecological Risks of Perfluoroalkyl Substances in Coastal Urbanized Areas of China and South Korea	YANG Hong-fa, SHI Bin, ZHOU Yun-qiao, <i>et al.</i> (1607)
Analysis of Water Quality Change and Its Driving Factors of the Xiaoqing River Estuary in Recent Ten Years	FAN Xin-feng, HAN Mei, WANG Lei, <i>et al.</i> (1619)
Distribution of Four Artificial Sweeteners in Water Treatment and Water Supply System in City H of Zhejiang Province	MA Xiao-yan, HU Hui, LU Si-jia, <i>et al.</i> (1629)
Changes in Epilithic Algae Community and Its Relationship with Environmental Factors in the Meixi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir	MI Wen-mei, SHI Jun-qiong, YANG Yan-jun, <i>et al.</i> (1636)
Succession Pattern of Phytoplankton and Its Drivers in Lake Luoma, Jiangsu Province	ZHANG Qing-ji, WANG Ye-yu, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (1648)
Relationship Between Diversity of Aquatic Plant Communities and Water Environmental Factors in Lhalu Wetland	WANG Jia-jun, TIAN Han-xin, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (1657)
Evolution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Community Based on Network Analysis in the Process of Spring Thermal Layer Formation in Zhoucun Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i> (1666)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Nitrogen and Phosphorus in Daihai Lake	ZHAO Li, CHEN Jun-yi, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1676)
Sediment Denitrification Rate and Its Response to Exogenous Carbon and Nitrogen in the Ponds and Bottomland of the Chaohu Lakeshore Zone	LI Ru-zhong, WANG Li, LIU Chao (1684)
Phosphate Control Effect and Water Body Remediation of Magnesium Modified Reed Biochar	DING Yu-qin, LI Da-peng, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (1692)
Efficiency of Magnesium Hydroxide Capping and Amendment to Control Phosphorus Release from Sediments	YANG Chun-yi, ZHAN Yan-hui, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (1700)
Characteristics of Chemical Fractions of Dissolved Organic Matter in Road Runoff in Beijing	CHEN Meng-yao, DU Xiao-li, YU Zhen-ya, <i>et al.</i> (1709)
3D Porous Photothermal Materials for High Salt Wastewater Treatment	HUANG Le, XU Ying-feng, XIE Qian-qing, <i>et al.</i> (1716)
Electrocatalytic Oxidation of Sulfadiazine with Ni-Doped Sb-SnO ₂ Ceramic Ring Particle Electrode	SHI Qiu-jun, LIU An-di, TANG Bo-bin, <i>et al.</i> (1725)
Degradation of A07 with Magnetic Fe ₃ O ₄ -CuO Heterogeneous Catalyzed Sodium Percarbonate System	XU Jie, WANG Lin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (1734)
Red Mud-activated Peroxymonosulfate for Ciprofloxacin Degradation: Efficiency and Mechanism	SHI Jing-zhuan, WEI Hong, ZHOU Xiao-de, <i>et al.</i> (1743)
Influence of Industrial Wastewater Quality on Advanced Treatment of Microbubble Ozonation	ZHANG Jing, ZHANG Shou-jing, LIU Chun, <i>et al.</i> (1752)
Adsorption Properties of Sludge-hydrochar for Methylene Blue	CHEN Li-yuan, LI Da-peng, ZHU Wen-juan, <i>et al.</i> (1761)
Preparation of Modified Watermelon Biochar and Its Adsorption Properties for Pb(II)	BI Jing-wang, SHAN Rui, HAN Jing, <i>et al.</i> (1770)
Construction and Denitrification Performance of A ² /O Based on Partial Nitrification Coupled with an ANAMMOX System	LIU Xiao-chai, RONG Yi, WEN Li-jie, <i>et al.</i> (1779)
Construction and Mechanism of Methanotroph-based Ultimate Denitrification System for Tailwater of Urban Sewage Plants	YANG Ya-nan, LI Yan-cheng, LI Jiang, <i>et al.</i> (1787)
Impact of Hydraulic Retention Time on Performance of Partial Nitrification Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	WANG Jian-fang, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (1794)
Realization Process of Nitrification and Changes in Sludge Characteristics in Granular Sludge Reactor for Low Strength Sewage Treatment	ZHU Lin, CHENG Cheng, SONG Jia-jun, <i>et al.</i> (1801)
Characteristics of Organics Transformation and Sludge Morphology in an ABR for Sewage Treatment with Different HRTs	CHENG Cheng, ZHU Lin, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (1808)
Effect of Adding Granular Activated Carbon (GAC)/Manganese Dioxide (MnO ₂) for the Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge	YANG Bo, JIA Li-juan, XU Hui, <i>et al.</i> (1816)
Trace Metals Pollution and Health Risks for Planning Area Soils of 193 Chinese Cities	LI Kuo, PENG Min, YANG Zheng, <i>et al.</i> (1825)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust of Lanzhou Schools Based on Random Forests	HU Meng-jun, WANG Jia, ZHANG Ya-yun, <i>et al.</i> (1838)
Contents, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Soils of Various Functional Zones in Yangzhou City, China	YAO Cheng, NI Jin-zhi, LIU Rui, <i>et al.</i> (1847)
Safety Assessment of Rice Planting in Soil Cadmium Geological Anomaly Areas in Southwest Guangxi	CHEN Tong-bin, PANG Rui, WANG Fo-peng, <i>et al.</i> (1855)
Bioavailability and Influencing Factors of Soil Cd in the Major Farming Areas of Chongqing	WANG Rui, HU Xiao-lan, ZHANG Yong-wen, <i>et al.</i> (1864)
Control of Cadmium Migration and Transformation in Alkaline Paddy Soil-Rice Using Cotton Stalk Biochar	LIU Shi-dou, ZHU Xin-ping, HAN Yao-guang, <i>et al.</i> (1871)
Reduction of Soil Cadmium Activity and Rice Cadmium Content by 4-year-consecutive Application of Organic Fertilizer	XUE Yi, YIN Ze-run, SHENG Hao, <i>et al.</i> (1880)
Effects of Nano-magnesium Hydroxide on the Forms of Cadmium in Different Types of Soil	DENG Ji-bao, ZHANG Chun-lai, XU Wei-hong (1888)
Selenium Uptake Characteristics of Reclaimed Soil-Crop from Mining Wasteland and Its Antagonistic Effects on Heavy Metals	YIN Bing, WANG Jian-fei, SHI Sheng, <i>et al.</i> (1904)
Dynamic Effects of Different Biochars on Soil Properties and Crop Yield of Acid Farmland	YANG Cai-di, ZONG Yu-tong, LU Sheng-gao (1914)
Effects of Fertilizer Reduction and Application of Organic Fertilizer on Soil Nitrogen and Phosphorus Nutrients and Crop Yield in a Purple Soil Sloping Field	ZHU Hao-yu, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (1921)
Response of Nitrogen Loss Flux in Purple Soil Sloping Field to Reduced Fertilizer and Combining Straw	XIONG Zi-yi, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i> (1930)
Effect and Approach of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar to Improve Coastal Saline Soil	WU Dan, SUN Ping, LU Peng-zhan, <i>et al.</i> (1941)
Vertical Distribution of Soil Dissolved Carbon and Its Influencing Factors in the Artificial Shelterbelt Irrigated with Saline Water in an Extreme Drought Desert	MENG Tian-ge, WU Lu-yao, ZHANG Shao-lei, <i>et al.</i> (1950)
Response of Soil Enzyme Activity and Chemical Properties to Nitrogen Addition in a Korean Pine Plantation	LÜ Lai-xin, SONG Lei, LIU Zhi-li, <i>et al.</i> (1960)
Consumption Capacity of N ₂ O in Paddy Soil and the Response Mechanism of <i>nosZ-I</i> -containing Communities	GUO Jun-li, TIAN Mei-jie, GE Ti-da, <i>et al.</i> (1968)
Predicting the Recycling Potential and Evaluating the Environmental Benefits of Waste Electrical and Electronic Equipment in Beijing-Tianjin-Hebei	CHEN Pan, SHI Xiao-qing (1976)
Relationship Between Urban Industrialization and PM _{2.5} Concentration in China and the Internal Mechanism of EKC	LI Ya-nan, DING Zhen-min, DENG Yuan-jie, <i>et al.</i> (1987)