中方知库
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.9
第40卷 第9期

中国期刊方阵 双奖期刊 中华人民共和国新闻出版总署

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第40卷 第9期
2019年9月15日

目 次

气溶胶中不同类型碳组分粒径分布特征 …… 杜翔, 赵普生, 董群, 苏捷(3849)
郑州市2014~2017年大气污染特征及气象条件影响分析 …… 郭蒙蒙, 姜楠, 王申博, 段时光, 张瑞芹(3856)
济南市背景区域大气$PM_{2.5}$污染特征及其对能见度的影响 …… 别淑君, 杨凌霄, 高颖, 姜盼, 李岩岩, 杨雨蒙, 赵彤, 王文兴(3868)
聊城市冬季$PM_{2.5}$中多环芳烃来源解析及健康风险评估 …… 刘晓迪, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 周贝贝, 刘子亭, 衣雅男, 李静, 魏本杰, 伏梦璇(3875)
2001~2017年全国气溶胶光学厚度时空分布及变化趋势 …… 刘海知, 郭海燕, 马振峰, 徐辉, 包红军, 徐成鹏(3886)
长三角地区吸收性气溶胶时空分布特征 …… 赵楠, 曹梵诗, 田晴, 陈勇航, 刘琼, 黄艺伟, 王羽佳(3898)
燃煤锅炉颗粒物化学组成排放特征 …… 杨艳蓉, 周雪明, 秦娟娟, 谭吉华, 胡京南, 陈荣志, 段菁春, 李艳(3908)
高速公路沿线$PM_{2.5}$中重金属污染特征 …… 李晓宝, 廖祖文, 赵红, 彭成辉, 谭腾飞, 黄萍(3916)
北京市道路扬尘重金属污染特征及潜在生态风险 …… 胡月琪, 郭建辉, 张超, 王铮, 颜旭, 杨懂艳, 刘兆莹(3924)
风蚀扬尘抑尘剂效率测试方法与应用 …… 秦建平, 李贝贝, 杨涛, 宋博, 黄玉虎, 张春来(3935)
京津冀地区典型印刷企业VOCs排放特征及臭氧生成潜势分析 …… 刘文文, 方莉, 郭秀锐, 聂磊, 王敏燕(3942)
成都市典型工艺过程源挥发性有机物源成分谱 …… 周子航, 邓也, 吴柯颖, 谭钦文, 周小玲, 宋丹林, 黄凤霞, 曾文骁(3949)
工业园区恶臭污染源排放特征和健康风险评估 …… 孟洁, 翟增秀, 荆博宇, 崔焕文, 王亘(3962)
典型华北农村地区冬季HONO的浓度水平及来源分析 …… 王玉征, 薛朝阳, 张成龙, 刘鹏飞, 张圆圆, 陈晖, 陈建民, 牟玉静, 刘俊锋(3973)
不同方法制备Co_3O_4催化剂CO-SCR性能及机制 …… 仲雪梅, 张涛, 李佳荫, 秦萱, 王亚洲, 曾洁, 张光明, 常化振(3982)
全氟烷基物质在胶州湾海水、沉积物及生物中污染特征 …… 崔文杰, 彭吉星, 谭志军, 翟毓秀, 郭萌萌, 李兆新, 牟海津(3990)
江苏水源地型水库异味物质发生风险及影响因素 …… 史鹏程, 朱广伟, 杨文斌, 许海, 朱梦圆, 邹伟, 胡林娜, 笪文怡, 季鹏飞(4000)
城镇流域水体-沉积物中溶解性有机质的荧光特性及影响因素:以宁波市小浃江为例 …… 高凤, 邵美玲, 唐剑锋, 曹昌丽, 易辉(4009)
水华对沉积物中氮的转化和去除的影响 …… 肖琳, 杨佳怡(4018)
沉积物有效态磷对湖库富营养化的指示及适用性 …… 刘辉, 胡林娜, 朱梦圆, 赵林林, 许海, 邹伟, 史鹏程, 韩慧洁, 季鹏飞, 朱广伟(4023)
汾河下游雨季硝酸盐污染源解析 …… 汪银龙, 冯民权,董向前(4033)
新疆喀什三角洲地下水化学特征及演化规律 …… 魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌(4042)
基于多个扩增子的DNA metabarcoding技术探究黄海微型真核浮游植物多样性 …… 张莉, 张远, 林佳宁, 王书平(4052)
FG、MFG和MBFG浮游植物功能群的比较:以贵州三座水库为例 …… 陈倩, 李秋华, 马欣洋, 熊梅君, 何应, 韩孟书(4061)
天然含铁矿物对砷的吸附效果及机制 …… 邵金秋, 温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 杨林生, 杨硕(4072)
镁-钙羟基磷灰石吸附剂对水中Pb^{2+}的去除 … 何豪, 朱宗强, 刘杰, 朱义年, 阎起明, 刘阳, 莫南, 玄惠灵, 魏婉莹(4081)
2,6-二氨基蒽醌/石墨烯复合电极强化电吸附Pb^{2+} …… 晋圣珧, 向阳, 张隽瑀, 张凯, 吉庆华(4091)
钙掺杂四氧化三铁回收水中磷的实验 …… 白润英, 刘建明, 郝俊峰, 徐慧, 胡文斌, 宋蕾, 刘宇红, 李会东, 周琦善(4098)
大型城市污水处理厂处理工艺对微塑料的去除 …… 贾其隆, 陈浩, 赵昕, 李磊, 聂云汉, 叶建锋(4105)
A^2/O流量分配处理低C/N污水性能与微生物结构优化 …… 荣懿, 刘小钗, 何音旋, 章武首, 金鹏康(4113)
上向流厌氧滤池(UAF)处理城市生活污水的运行效能 …… 杨忠启, 刘秀红, 李海鑫, 刘智斌, 刘润雨, 杨庆(4121)
微氧条件下自养-异养联合反硝化工艺的电子平衡分析 …… 张若晨, 陈川, 邵博, 王威, 徐熙俊, 任南琪(4128)
基于反硝化除磷的低温启动与稳定运行的中试试验 …… 张帆, 于德爽, 刘杰, 王晓霞, 宋新新, 李传举, 赵峰辉(4136)
聚己内酯与聚羟基丁酸戊酸酯的脱氮性能对比 …… 易成豪, 秦伟, 陈湛, 文湘华(4143)
厌氧氨氧化颗粒污泥快速培养及其抑制动力学 …… 唐鹏, 于德爽, 陈光辉, 张培玉, 王晓霞, 吕廷廷, 黄硕, 刘诚诚(4152)
Ca^{2+}对污泥硝化活性和絮凝沉降性能的影响 …… 张兰河, 赵倩男, 张海丰, 贾艳萍, 李正, 陈子成, 郭静波, 赵天鹏(4160)
从剩余污泥厌氧发酵上清液中以鸟粪石形式回收磷 …… 畅萧, 曾薇, 王保贵, 许欢欢(4169)
信号分子联合脱氮硫杆菌对同步脱氮除硫的影响 …… 徐金兰, 陈紫薇, 张少枫, 魏旖旎(4177)
海水养殖尾水直排对河道沉积物细菌群落的影响 …… 胡越航, 宣丽霞, 裘琼芬(4185)
耦合短程硝化反硝化的垃圾渗滤液厌氧氨氧化处理系统构建及微生物群落分析 …… 赵晴, 刘梦莹, 吕慧, 梁俊宇, 刁兴兴, 张鑫, 孟了(4195)
稻秸添加对两种水稻土产甲烷古菌及细菌的影响 …… 保琼莉, 王凤花, 保万魁, 黄益宗(4202)
地膜覆盖对稻-油轮作农田温室气体排放的影响 …… 陈世杰, 江长胜, 倪雪, 李晓茜, 郝庆菊(4213)
氮肥深施及间种白三叶草对茶园N_2O排放的影响 …… 吕天新, 伍延正, 沈健林, 陈丹, 姜文倩, 王娟, 李勇, 吴金水(4221)
三峡库区及其下游溶解氧化亚氮(N_2O)分布和释放 …… 程芳, 丁帅, 刘素美, 宋国栋, 张桂玲(4230)
沉降除藻协同沉积物覆盖对藻华水体甲烷释放的影响 …… 朱琳, 于江华, 施文卿, 易齐涛, 曹华勇, 蒲寅羽(4238)
新建铅蓄电池集聚区对周边土壤环境的影响:基于重金属空间特征 …… 丁亚丽, 廖敏, 方至萍, 陈树森, 张云, 郭佳雯, 梁雨琦(4244)
不同碳氮磷源改良剂对铅锌尾矿废弃地植被与土壤性质的影响 …… 杨胜香, 李凤梅, 彭禧柱, 曹建兵, 高智席(4253)
基于农产品安全的土壤重金属有效态含量限值推定方法 …… 张云慧, 杜平, 何赢, 仲小飞, 罗会龙, 秦晓鹏, 徐刚(4262)
缙云山不同土地利用方式下土壤植硅体碳的含量特征 …… 罗东海, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 李娇, 高明(4270)
西南喀斯特土地利用变化对植物凋落物-土壤C、N、P化学计量特征和土壤酶活性的影响 …… 田静, 盛茂银, 汪攀, 温培才(4278)
调理剂+淹水措施对Cd污染稻田控Cd效果分析 …… 彭鸥, 刘玉玲, 铁柏清, 何钟响, 杨蕊嘉, 李丹阳, 刘寿涛, 罗海艳(4287)
海螺沟植物和积雪中有机磷酸酯的分布及来源 …… 陈阳, 印红玲, 吴迪, 罗怡, 邓旭, 徐维新, 柳锦宝(4295)
《环境科学》征订启事(3923) 《环境科学》征稿简则(3941) 信息(4041, 4051, 4229)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第 40 卷 第 9 期 2019 年 9 月
Vol. 40, No. 9 Sep., 2019

郑州市 2014～2017 年大气污染特征及气象条件影响分析

郭蒙蒙[1,2], 姜楠[1,2*], 王申博[1,2], 段时光[1,2], 张瑞芹[1,2*]
(1. 郑州大学化学与分子工程学院, 郑州 450001; 2. 郑州大学环境科学研究院, 郑州 450001)

摘要: 根据郑州市 2014～2017 年大气主要污染物和气象数据的在线监测数据, 分析了各污染物的浓度水平、季节变化、比值特征及气象条件影响. 结果表明, 2014～2017 年郑州市大气中 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的年均质量浓度分别为(88.1±49.8)、(95.8±60.2)、(78.6±70.3)、(72.0±53.5) μg·m^{-3} 和(158.5±65.3)、(167.7±82.6)、(144.5±91.5)、(132.7±70.3) μg·m^{-3}, 均超过我国年度二级标准限值的两倍左右. 4 年来, 郑州市空气质量虽有所改善, 但颗粒污染问题仍旧没有从根本上解决, 且夏季 $O_{3\text{-}8h}$ 超标问题日益突出. 利用特征比值法进行来源判断, 结果表明燃烧源和二次生成是郑州市大气中 $PM_{2.5}$ 的主要贡献源, 其中燃煤的贡献逐年下降, 移动源的贡献逐年上升. 此外, 低风速、高湿度和降水少是造成大气污染严重的重要气象因素. 利用潜在源贡献因子法(PSCF)和浓度权重轨迹法(CWT)分析了郑州市 $PM_{2.5}$ 潜在来源分布及其贡献特征, 结果表明, $PM_{2.5}$ 污染源区主要分布在河南省内的周边城市以及山西南部、陕西东部、湖北北部、山东西北部、河北南部等相邻省份, 其中, 近距离传输对郑州市 $PM_{2.5}$ 的质量浓度贡献更为显著.

关键词: $PM_{2.5}$; 空气质量; 气象条件; 后向轨迹; 潜在源分析
中图分类号: X51 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2019)09-3856-12 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201901118

Analysis of Air Pollution Characteristics and Meteorological Conditions in Zhengzhou from 2014 to 2017

GUO Meng-meng[1,2], JIANG Nan[1,2*], WANG Shen-bo[1,2], DUAN Shi-guang[1,2], ZHANG Rui-qin[1,2*]
(1. College of Chemistry and Molecular Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Research Institute of Environmental Science, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Online monitoring data of atmospheric pollutants and meteorological parameters in Zhengzhou from 2014 to 2017 were collected to analyze the concentration levels, seasonal variations, and the ratio characteristics of atmospheric pollutants, as well as the effects of meteorological conditions on these pollutants. Results show that the annual average concentrations of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in the four years were (88±49.8), (95.8±60.2), (78.6±70.3), and (72.0±53.5) μg·m^{-3}, and (158.5±65.3), (167.7±82.6), (144.5±91.5), and (132.7±70.3) μg·m^{-3}, respectively, and were approximately two times higher than the grade II annual limits set by China. Fuel combustion and the formation of secondary pollutants were the main sources of $PM_{2.5}$ in Zhengzhou. Moreover, the contribution of coal combustion was found to be decreased, while that of traffic sources increased year by year. Low wind speed, high humidity, and reduced precipitation are important meteorological factors that contribute to serious air pollution. In addition, the Potential Source Contribution Function and the Concentration-Weighted Trajectory were used to analyze the potential sources, and the contribution of these sources to the distribution of $PM_{2.5}$. The potential source areas of $PM_{2.5}$ were mainly distributed in neighboring cities and provinces, such as Shanxi, Shaanxi, Hubei, Shandong, and Hebei. The short-distance transmission was found to contribute significantly to the mass concentration of $PM_{2.5}$.

Key words: $PM_{2.5}$; air quality; weather condition; backward trajectories; potential source analysis

近年来, 随着城市化和工业化的快速发展, 以煤炭为主的能源消耗大幅增加, 机动车保有量以及工业污染物排放量急剧增长, 我国大气环境逐渐演变为一次和二次、本地和区域并存的复合型污染[1～3], 颗粒物特别是细颗粒物 $PM_{2.5}$ 是导致大气能见度下降、灰霾加重、环境恶化的根本原因, 严重危害人体健康[4～7]. 且夏季臭氧污染逐年加剧, 我国大气环境面临着巨大挑战.

目前, 我国大气空气质量相关研究主要集中在京津冀、长江三角洲和珠江三角洲区域. 王莉莉等[8]利用在线观测数据分析了天津滨海新区秋冬季大气污染物的浓度水平及污染来源, 指出滨海新区大气污染与局地排放和外源输送相关. 肖娴等[9]对珠江三角洲区域性空气污染过程进行了分析, 发现重污染主要受气象因素影响. 余倩楠等[10]利用大气污染物监测数据结合气象资料和后向轨迹模式, 发现长三角地区大气重污染主要受低风速、高湿度和逆温层的影响. 杨复沫等[11]分析了北京城

收稿日期: 2019-01-14; **修订日期**: 2019-03-21
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0212400)
作者简介: 郭蒙蒙(1991～), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境化学, E-mail: mengmengguo2017@163.com
* 通信作者, E-mail: jiangn@zzu.edu.cn; rqzhang@zzu.edu.cn

区和居住区 $PM_{2.5}$的浓度水平、季节变化及 $PM_{2.5}$与 PM_{10}、TSP 的比值特征，指出冬季燃烧源和春季沙尘天气分别对细颗粒物和粗颗粒物的贡献较大. 目前大量研究多针对短期重大污染事件和季节差异，对于污染物长期的综合分析涉及较少，中部地区的空气质量相关研究更是鲜有. 根据国家环境保护部及生态环境部发布的重点区域和 74 城市空气质量排名显示[12,13]，2014～2017 年郑州市始终处于倒数 10 名中，空气质量堪忧，因此对郑州市大气进行研究是非常有必要的.

郑州市作为中国中部地区典型的发展中城市，是京津冀及周边“2＋26”城市中重要的综合交通枢纽. 根据文献[14]的统计，2016 年末郑州市常住人口 972.4 万人，城镇化率为 71.0%，比河南省和全国城镇化率分别高出 22.5% 和 13.7%，机动车保有量为 342.8 万辆，经济结构依赖于第二产业(占比 47.3%)，工业能源消费长期以煤炭为主导地位. 另一方面，郑州市属北温带大陆性季风气候，降雨少，风速小，尤其冬季易出现静风和逆温现象，不利于污染物的迁移、扩散. 近年来，郑州市政府加大了对大气污染物的管控，空气质量整体有所好转，但颗粒污染问题仍就没有从根本上解决，$PM_{2.5}$仍然是最大的首要污染物，且夏季臭氧超标问题日益严重.

目前，郑州市大气污染物的相关研究主要集中在单一污染物短期的时空分布特征及气象条件分析[15～19]，缺乏对污染物进行长时间全面、系统、综合的研究分析. 本研究采用 2014～2017 年郑州市国控空气质量自动监测站的常规空气质量数据，分析郑州市大气污染物的浓度水平和污染特征，评估该地区的空气质量状况，利用特征比值法进行来源判断. 并结合气象参数(温度、相对湿度、降水、风速和气压)分析气象条件对大气空气质量的影响，为了进一步研究城市区域间的传输影响，基于后向轨迹模型(HYSPLIT)，利用潜在源贡献因子(potential source contribution function，PSCF)和浓度权重轨迹法(concentration-weighted trajectory，CWT)综合分析郑州市大气中首要污染物 $PM_{2.5}$的潜在污染源区，以期为郑州市大气环境的治理提供有效的科学依据.

1　材料与方法

本研究选择郑州市自动国控空气质量监测站(图 1). 2014～2017 年主要大气主要污染物 $PM_{2.5}$、PM_{10}、NO_2、SO_2、CO 和 $O_{3\text{-}8h}$的质量浓度数据来自中国空气质量在线监测分析平台(https://www.aqistudy.cn). 温度、湿度、气压、风速和降水量的气象数据来自 Weather Underground 气象网站(https://www.wunderground.com). 后向轨迹模型所用的气象数据来自美国国家环境预报中心(NCEP)的全球资料同化系统(GDAS)气象数据(ftp://arlftp.arlhq.noaa.gov/pub/archives/gdas1).

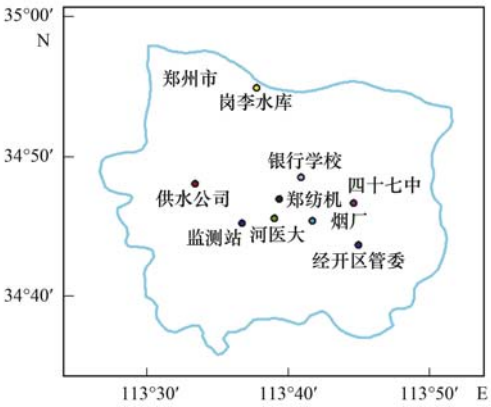


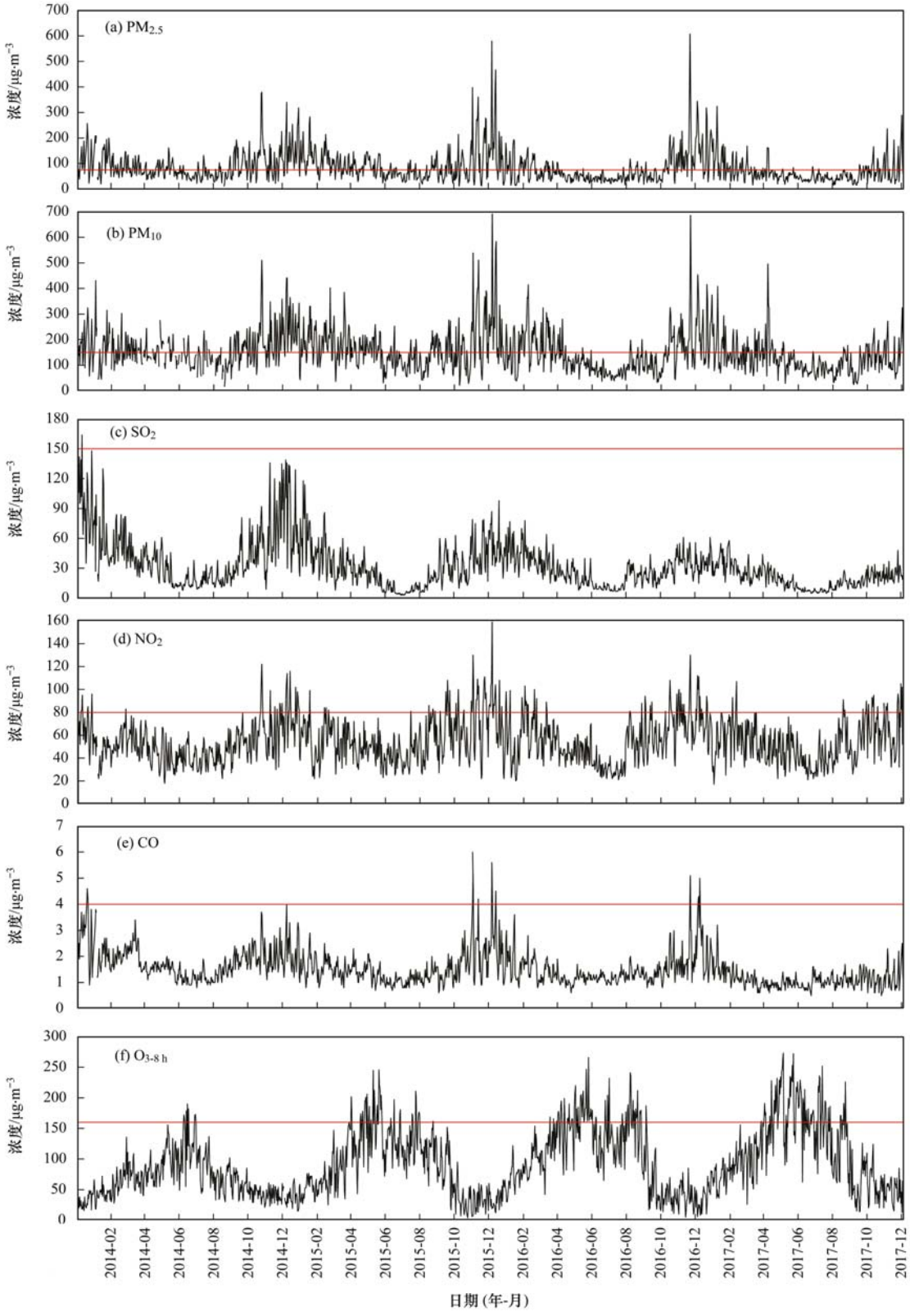
图 1　郑州市国控空气质量监测站点示意

Fig. 1　Spatial distribution of air quality monitoring stations in Zhengzhou

2　结果与讨论

2.1　污染物质量浓度变化特征

图 2 展示了 2014～2017 年郑州市主要大气污染物的逐日变化. $PM_{2.5}$和 PM_{10}的日均浓度范围分别为 11～380、11～398、14～607、15～344 $\mu g \cdot m^{-3}$和 17～510、21～539、32～692、24～496 $\mu g \cdot m^{-3}$，最高值分别高达国家 24h 平均二级标准限值(75 $\mu g \cdot m^{-3}$和 150 $\mu g \cdot m^{-3}$)的 5.1、5.3、8.1、4.6 和 3.4、3.6、4.6、3.3 倍，超标率分别高达 49%、56%、36%、28% 和 45%、52%、34%、30%. $O_{3\text{-}8h}$的日均浓度范围为 16～190、4～246、5～266 和 6～273 $\mu g \cdot m^{-3}$，最高值分别是国家日最大 8h 平均二级标准限值(160 $\mu g \cdot m^{-3}$)的 1.2、1.5、1.7 和 1.7 倍. 超标天数分别为 8、37、68 和 81d，逐年增加，表明臭氧污染逐年加重. 本研究期间，NO_2、SO_2 以及 CO 的污染问题较小. 图 3 是 2014～2017 年郑州市主要大气污染物的月度变化，$PM_{2.5}$、PM_{10}、NO_2、SO_2 以及 CO 的月均浓度变化趋势大致相似，均呈“U”型分布，最高值出现在采暖期 1 月和 12 月，最低值出现在 7 月和 8 月，而 $O_{3\text{-}8h}$的变化趋势与其相反，月均浓度分布呈现倒“U”型，最高值均出现在 6 月和 7 月. 据统计，2014～2017 年 $PM_{2.5}$的年均浓度分别为(88.1±49.8)、(95.8±60.2)、(78.6±70.3)和(72.0±53.5) $\mu g \cdot m^{-3}$，分别是 GB 3095-2012《环境空气质量标准》年均二级



红线为国家二级标准

图 2 郑州市 2014 ~ 2017 主要污染物的日均浓度变化

Fig. 2 Daily average concentration of major pollutants in Zhengzhou during 2014-2017

标准限值(35 μg·m^{-3})的 2.5、2.7、2.3 和 2.1 倍. PM_{10}是郑州市仅次于 $PM_{2.5}$的主要大气污染物, 2014 ~ 2017 年 PM_{10}的年均浓度分别为(158.5 ± 65.3)、(167.7 ± 82.6)、(144.5 ± 91.5)和(132.7 ± 70.3) μg·m^{-3}, 分别是国家年均二级标准限值(70 μg·m^{-3})的 2.3、2.4、2.1 和 1.9 倍. 由此可以看出, 郑州市颗粒物污染问题仍旧严峻, 且臭氧超标问题日益突出.

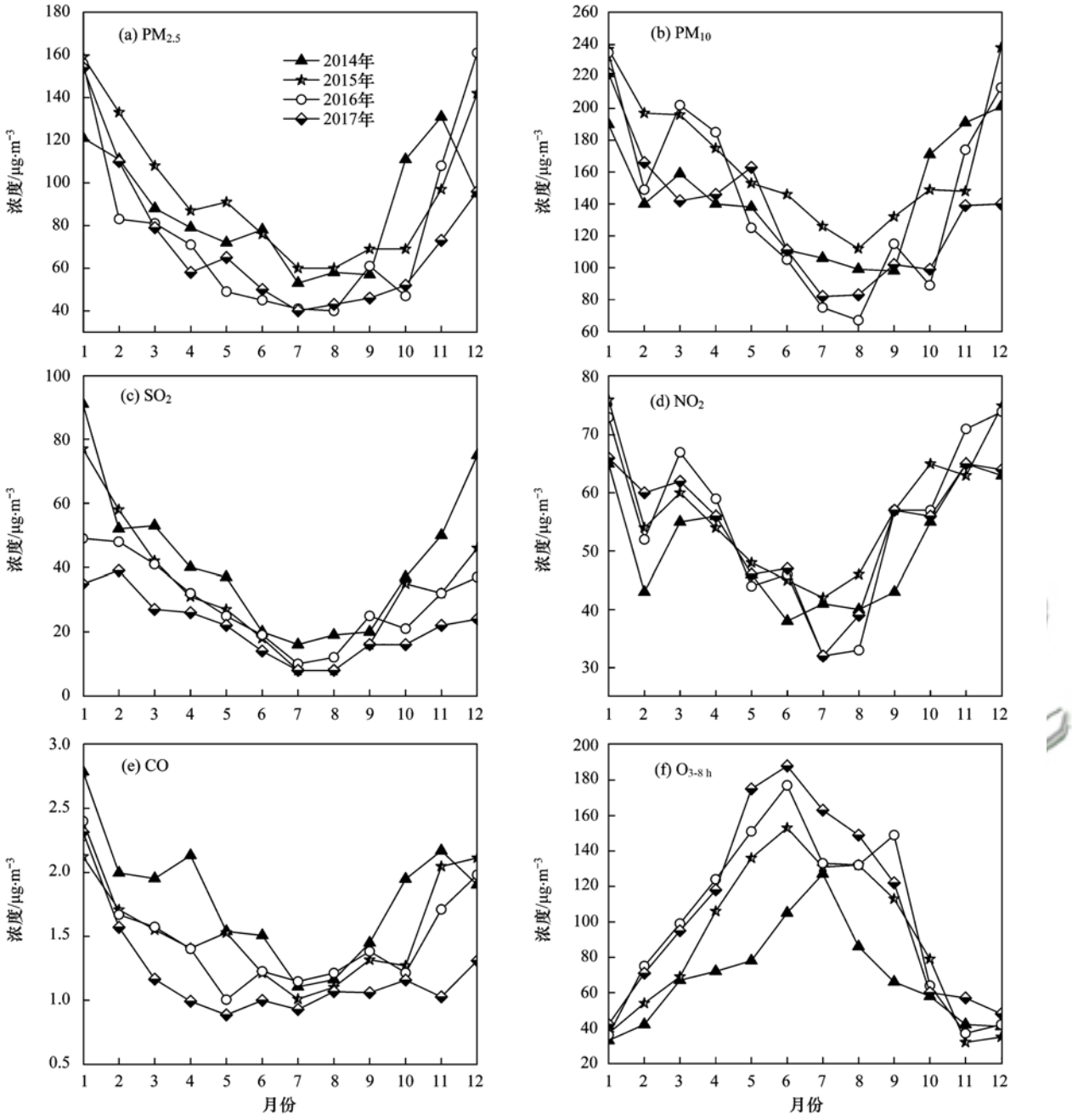
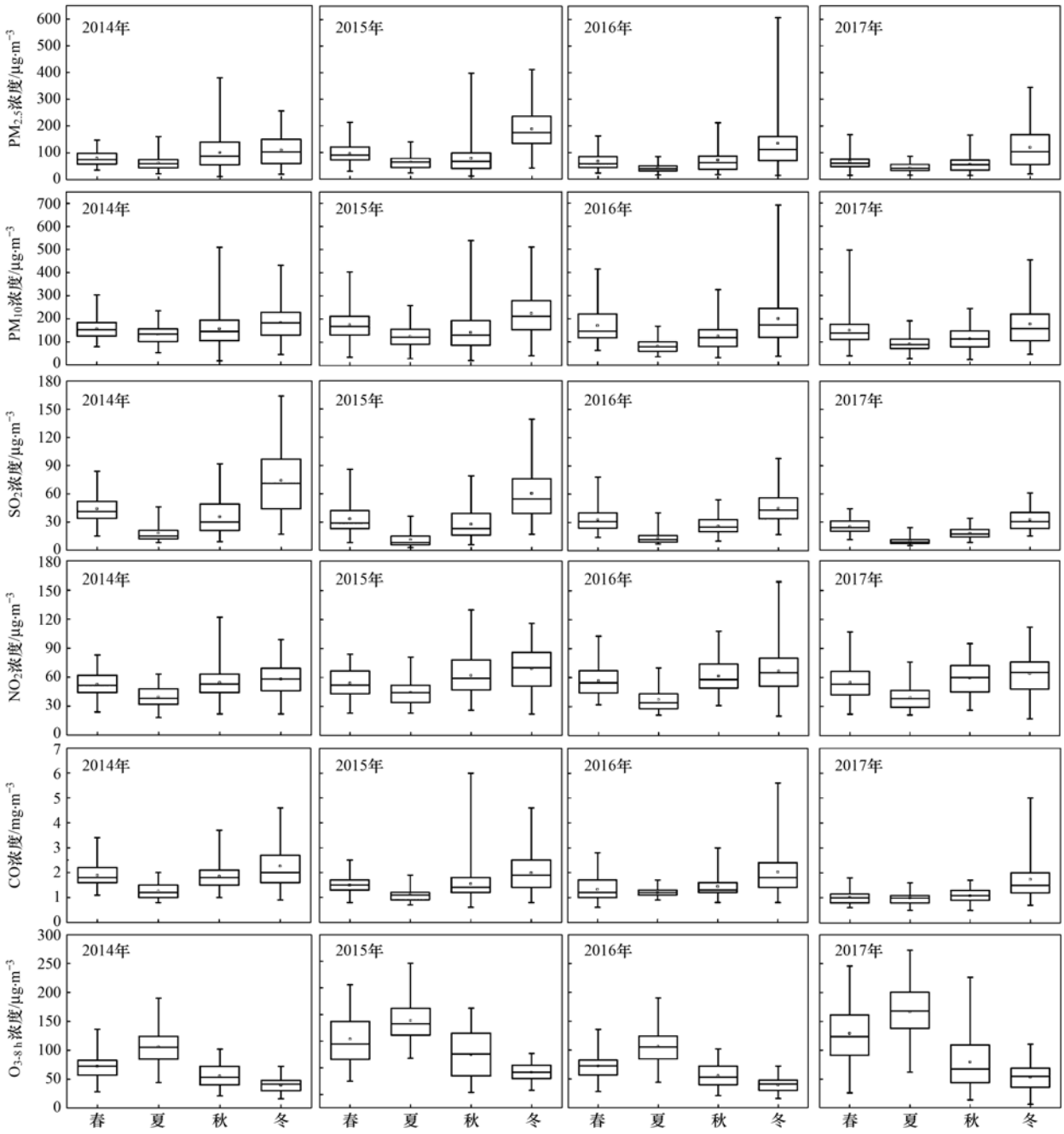


图 3　郑州市 2014～2017 主要污染物的月均浓度变化

Fig. 3　Monthly average concentration of major pollutants in Zhengzhou during 2014-2017

郑州市 2014～2017 年主要大气污染物具有明显的季节差异(见图 4). $PM_{2.5}$、PM_{10}、SO_2、NO_2 和 CO 均表现出冬高夏低的变化特征，而 $O_{3\text{-}8h}$ 呈相反的变化趋势，最高值均出现在夏季，可能是由于夏季温度高，光照强度大，加剧光化学反应，有利于臭氧的生成. 近年来，郑州市颗粒污染问题最为严峻. 本研究期间，除夏季外，$PM_{2.5}$、PM_{10} 的平均质量浓度均处于较高污染水平[$PM_{2.5}$：春(77.5 ± 34.2) μg·m^{-3}，夏(53.5 ± 23.6) μg·m^{-3}，秋(76.8 ± 51.8) μg·m^{-3}，冬(127.6 ± 83.8) μg·m^{-3}；PM_{10}：春(163.8 ± 63.1) μg·m^{-3}，夏(107.0 ± 44.2) μg·m^{-3}，秋(134.5 ± 68.2) μg·m^{-3}，冬(196.5 ± 101.1) μg·m^{-3}]. 冬季 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的平均质量浓度分别是夏季的 1.8、2.2、3.2、2.7 和 1.4、1.8、2.4、1.9 倍，可以看出郑州市细颗粒物 $PM_{2.5}$ 的季节变化特征显著高于粗颗粒物 PM_{10}. 造成颗粒污染季节差异的原因可能是供暖期间燃煤量大幅增加，使 $PM_{2.5}$、PM_{10} 质量浓度急剧上升，加之冬季气温低，易出现静风和逆温现象，导致颗粒污染频发. 而夏季气温高，大气对流活动加强，有利于大气污染物的扩散，降水量充足，对大气污染物也具有较好的清除作用. 2015 年郑州市颗粒污染最严重，尤其冬季 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的日均值分别高达(145.1 ± 77.2) μg·m^{-3} 和(224.8 ± 98.6) μg·m^{-3}，



从上至下依次为最大值、75% 分位数、中位数、25% 分位数、最小值

图 4 郑州市 2014 ~ 2017 主要污染物的季节浓度箱式图

Fig. 4 Box plots showing seasonal concentrations of major pollutants in Zhengzhou during 2014-2017

是国家 24 h 平均二级标准限值的 1.9 和 1.5 倍. 2016 和 2017 年颗粒污染略有好转，但臭氧超标问题逐年加重. 据统计，2017 年夏季 $O_{3\text{-}8h}$的日均值高达(166.3 ± 49.2) μg·m^{-3}，逐渐成为夏季最大的污染物. 本研究期间，NO_2 在 2015 年浓度水平较高，其他年份变化不大，而 SO_2 和 CO 的浓度水平逐年均有所改善.

2.2 污染物间的相关性及特征比值分析

郑州市大气污染物 $PM_{2.5}$、PM_{10} 与 CO、NO_2、SO_2 均成显著正相关，表明它们来源相似(见表 1). $PM_{2.5}$与 PM_{10}的相关性最好，尤其冬季相关性高达 0.923($P < 0.01$). 2014 ~ 2017 年两者全年相关系数分别为 0.855、0.869、0.892 和 0.887 ($P < 0.01$)，表明二者在大气中具有相似的来源及迁移转化规律. 图 5 是大气污染物季节浓度比值分布($PM_{2.5}/PM_{10}$、$PM_{2.5}/CO$、$PM_{2.5}/SO_2$ 和 SO_2/NO_2). $PM_{2.5}/PM_{10}$能够反映可吸入颗粒物中细颗粒物的含量以及细颗粒物的二次形成，利用二者比值变化，可以对大气污染状况进行评估[20,21]. 郑州市 $PM_{2.5}/PM_{10}$的 4 a 年均比值为 0.56，高于济南年均值 0.52，低于北京年均值 0.69[22]. 两者比值呈现秋冬高，春夏低的季节差异，表明秋冬季细颗粒物的

二次形成对郑州市 $PM_{2.5}$ 的贡献更高. 本研究期间 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 始终处于较高水平，表明郑州市细颗粒污染的状况依旧严峻.

CO 是惰性气体，$PM_{2.5}/CO$ 常用于分析 $PM_{2.5}$ 二次形成的时间变化[23]. 2014～2017 年郑州市大气污染物 $PM_{2.5}/CO$ 年均值为 0.05～0.06，最高值均出现在冬季，表明冬季二次形成对 $PM_{2.5}$ 的贡献更高. SO_2 是燃煤排放的主要污染物，$PM_{2.5}/SO_2$ 用于研究燃煤对 $PM_{2.5}$ 的贡献[23]. 本研究期间，$PM_{2.5}/SO_2$ 年均值分别为 2.4、3.7、2.8 和 3.6，最高值均出现在夏季，特别是 2015 年夏季两者比值高达 7.8，可能是夏季燃煤大量减少导致 SO_2 的绝对质量浓度相对 $PM_{2.5}$ 减少得更多. NO_2 是机动车尾气排放的主要污染物，SO_2/NO_2 可作为固定源和移动源的空气污染指标[24～26]. 2014～2017 年 SO_2/NO_2 的年均值分别为 0.8、0.6、0.5 和 0.4，呈现逐年下降的趋势，表明郑州市燃煤源对 $PM_{2.5}$ 的贡献逐渐减少，移动源对 $PM_{2.5}$ 的贡献逐渐增加. 本研究期间，SO_2/NO_2 具有明显的季节变化特征，呈现出冬 > 春 > 秋 > 夏的变化趋势，表明冬季取暖期燃煤源对郑州市大气污染的贡献较高. 2014 年冬季两者比例高达 1.3，后逐年降低，2017 年冬季两者比例降至 0.5，一方面说明政府对燃煤的管控有效，另一方面，可能是郑州市机动车数量大幅度上升导致移动源对 $PM_{2.5}$ 的贡献增大.

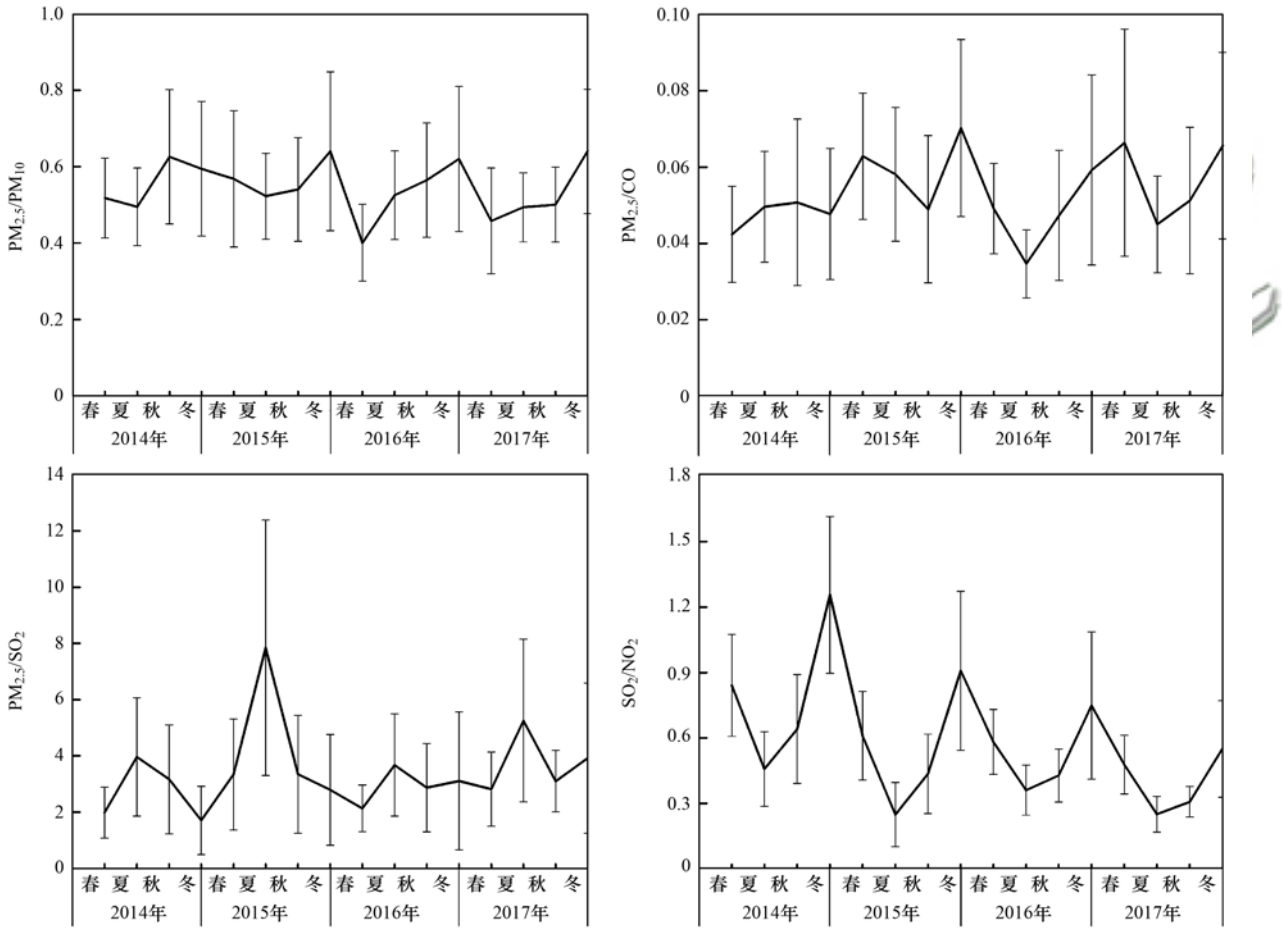


图 5　郑州市 2014～2017 大气污染物的季节比值

Fig. 5　Seasonal average ratio of various atmospheric pollutants in Zhengzhou during 2014-2017

2.3　气象条件影响

图 6 展示了郑州市 2014～2017 年气象参数的月度变化，平均温度变化范围是：2.4～28.0、3.0～27.1、0.4～28.4 和 2.3～29.1℃；平均相对湿度变化范围是：32.2%～80.2%、48.8%～83.0%、37.9%～75.3% 和 38.4%～80.9%；平均气压变化范围是：1 004.7～1 028.4、1 005.0～1 028.3、1 004.0～1 028.6 和 1 004.2～1 028.1 hPa；平均降水量变化范围是：0～120.4、0.8～120.1、0.3～212.4 和 0.5～140.0 mm；平均风速变化范围是：2.1～3.1、1.9～2.7、2.2～3.2 和 1.6～2.8 $m \cdot s^{-1}$. 平均温度和平均气压分别倒“U”型和“U”型分布，最高平均温度和最低平均气压均出现在 7 月.

图 7 是郑州市 2014～2017 年气象参数的季节变化，可以看出，平均温度均为夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季，气压均呈现冬季 > 秋季 > 春季 > 夏季的季

表 1 2014 ~ 2017 年郑州市基于日均值各污染物与气象参数的皮尔逊相关系数[1)]

Table 1 Pearson correlation coefficient of various pollutants and meteorological parameters based on daily average value in Zhengzhou during 2014-2017

春季	$PM_{2.5}$	PM_{10}	SO_2	NO_2	CO	$O_{3\text{-}8h}$	温度	相对湿度	气压	风速	降水量
$PM_{2.5}$	1	0.663**	0.358**	0.502**	0.567**	−0.138**	−0.093	0.317**	−0.012	−0.359**	−0.134**
PM_{10}		1	0.359**	0.481**	0.275**	0.012	0.020	−0.093	−0.022	−0.177**	−0.347**
SO_2			1	0.512**	0.542**	−0.270**	−0.155**	−0.265**	0.148**	−0.235**	−0.268**
NO_2				1	0.408**	−0.095	−0.214**	0.074	0.119**	−0.554**	−0.237**
CO					1	−0.388**	−0.164**	0.301**	0.056	−0.195**	0.001
$O_{3\text{-}8h}$						1	0.605**	−0.177**	−0.449**	−0.149**	−0.104*
夏季	$PM_{2.5}$	PM_{10}	SO_2	NO_2	CO	$O_{3\text{-}8h}$	温度	相对湿度	气压	风速	降水量
$PM_{2.5}$	1	0.744**	0.266**	0.369**	0.583**	0.152**	0.037	−0.237**	−0.089	−0.281**	−0.168**
PM_{10}		1	0.374**	0.571**	0.298**	0.373**	0.197**	−0.456**	−0.180**	−0.270**	−0.226**
SO_2			1	0.473**	0.380**	0.122**	−0.099	−0.669**	0.049	−0.045	−0.185**
NO_2				1	0.190**	0.323**	−0.062	−0.371**	0.047	−0.555**	−0.135**
CO					1	−0.066	−0.198**	−0.083	0.051	−0.018	−0.033
$O_{3\text{-}8h}$						1	0.359**	−0.470**	−0.250**	−0.177**	−0.245**
秋季	$PM_{2.5}$	PM_{10}	SO_2	NO_2	CO	$O_{3\text{-}8h}$	温度	相对湿度	气压	风速	降水量
$PM_{2.5}$	1	0.905**	0.555**	0.601**	0.803**	−0.131*	−0.257**	0.080	0.138**	−0.250**	−0.208**
PM_{10}		1	0.632**	0.740**	0.683**	−0.025	−0.184**	−0.111*	0.124*	−0.321**	−0.349**
SO_2			1	0.544**	0.553**	−0.175**	−0.301**	−0.320**	0.248**	−0.113*	−0.284**
NO_2				1	0.412**	−0.032	−0.191**	−0.156**	0.131*	−0.495**	−0.340**
CO					1	−0.249**	−0.291**	0.242**	0.144**	−0.100	−0.076
$O_{3\text{-}8h}$						1	0.731**	−0.220**	−0.583**	−0.279**	−0.146**
冬季	$PM_{2.5}$	PM_{10}	SO_2	NO_2	CO	$O_{3\text{-}8h}$	温度	相对湿度	气压	风速	降水量
$PM_{2.5}$	1	0.923**	0.205**	0.691**	0.786**	−0.363**	0.053	0.571**	−0.252**	−0.467**	−0.038
PM_{10}		1	0.315**	0.727**	0.746**	−0.322**	0.124*	0.411**	−0.277**	−0.445**	−0.112*
SO_2			1	0.392**	0.429**	−0.189**	0.135*	−0.178**	−0.232**	−0.250**	−0.125*
NO_2				1	0.634**	−0.409**	0.137**	0.288**	−0.195**	−0.596**	−0.088
CO					1	−0.513**	−0.049	0.514**	−0.232**	−0.351**	0.094
$O_{3\text{-}8h}$						1	0.356**	−0.450**	−0.058	0.227**	−0.085

1) * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关，** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关

节差异. 除 2014 年，降水量最大值均出现在夏季，降水是大气污染物去除的主要方式之一. 相对湿度表现为夏季、秋季 > 春季、冬季，而风速最高值均出现春季和冬季，最低值均出现在秋季和夏季.

表 1 同时展示了 2014 ~ 2017 年郑州市四季各污染物日均浓度与气象参数的皮尔逊相关系数. 统计结果显示，风速、降水量、温度和相对湿度是影响大气污染物浓度的主要气象参数，气压对污染物浓度的影响较小. 其中，温度与 $O_{3\text{-}8h}$ 均呈显著正相关(R:0.356 ~ 0.731，$P < 0.01$)，与其他污染物相关性较弱. 因为温度是光化学反应的重要影响因子，温度较高时大气光化学反应加剧，有利于大气中 O_3 的生成，夏季午后温度高，有利于污染物的扩散[27]. 夏季相对湿度与污染物浓度均呈负相关，因为夏季相对湿度过大，空气中的水蒸气易凝结成核发生湿沉降，有利于大气污染物的去除[28]. 除 O_3 外，秋季气压与污染物均呈正相关，冬季气压与污染物均呈负相关. 湿沉降是大气颗粒物去除的主要方式，冬季降水少，与各污染物的相关性最差. 除冬季 O_3 外，风速与污染物均呈负相关，春、冬季风速与污染物相关性最强($P < 0.01$)，因为风能够加强大气流动，有利于大气污染物的扩散、稀释与传输，有效地降低大气污染物的浓度[29].

图 8 是根据研究阶段风向(θ)、风速(r)和首要污染物 $PM_{2.5}$ 的小时值绘制的玫瑰图. 据统计，春、夏、秋、冬静风(< 1 $m \cdot s^{-1}$)频率分布为 17.70%、16.07%、27.57% 和 25.86%. 春季大气污染主要与风速有关，当风速 < 3 $m \cdot s^{-1}$ 时，不利于污染物的扩散，导致大气中 $PM_{2.5}$ 的平均质量浓度升高. 夏季空气质量整体较好，污染程度不高. 秋季在西南、东北方向和极低风速(< 2 $m \cdot s^{-1}$)与较高的 $PM_{2.5}$ 浓度相关. 冬季大气污染频繁发生，北风、西北风、东北风、东南风和西南风在风速 < 4 $m \cdot s^{-1}$ 时极易引发严重污染，尤其当北风为主导方向且风速较高(3 ~ 4 $m \cdot s^{-1}$)时，大气污染最重，可能是经过山西、京津冀和山东重污染城市的长距离传输会带

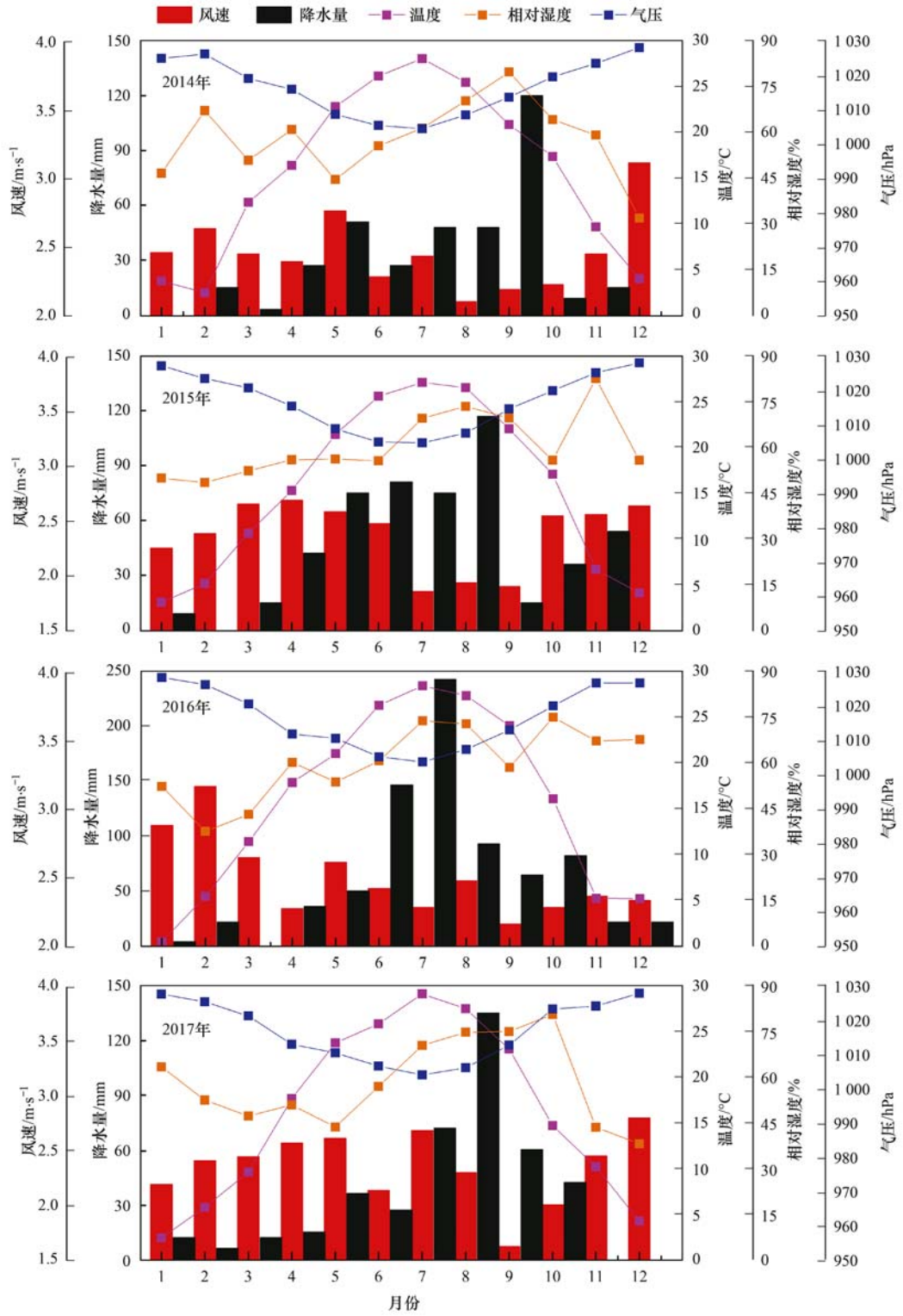


图 6　郑州市 2014～2017 年气象参数的月度变化

Fig. 6　Monthly variations in meteorological parameters in Zhengzhou during 2014-2017

来高浓度的 $PM_{2.5}$.

2.4　潜在源分析(WPSCF 和 WCWT)

为了研究郑州市 2014～2017 年首要污染物 $PM_{2.5}$的潜在污染源的分布特征，进行了潜在源贡献因子和浓度权重轨迹分析. 以郑州市环境空气质量监测站(34.75°N，113.60°E)为受点，设置 500 m 为计算起始高度，每天 00:00、06:00、12:00 和 18:00 为计算起始时间，分别收集研究期间郑州市全年的 48 h 后向轨迹进行计算. 将 HYSPLIT 计算的气团轨迹区域网格化，网格大小设置为 0.5°×0.5°，$PM_{2.5}$限定值为国家二级日均浓度限值 75 $\mu g \cdot m^{-3}$，WPSCF 计算结果见图 9(a). WPSCF 值越大，表示该网格区域污染轨迹占比越高，对郑州市 $PM_{2.5}$污染的影响越大. 2014 年 WPSCF 高值区域主

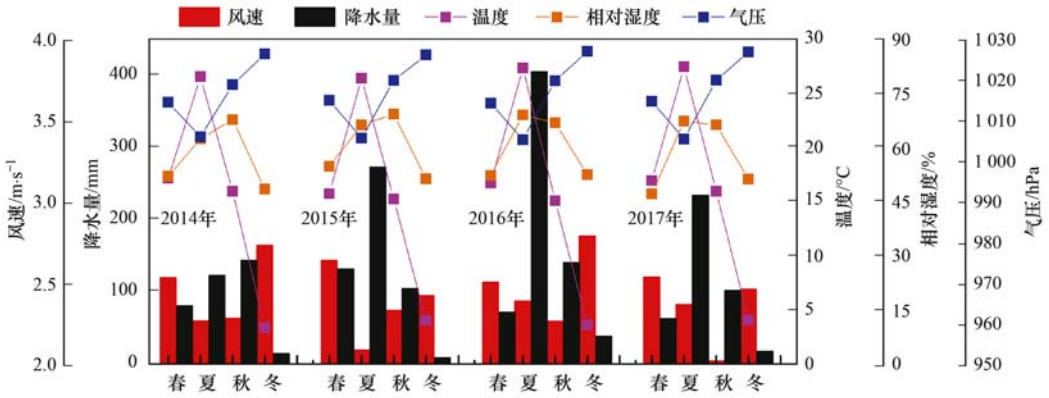
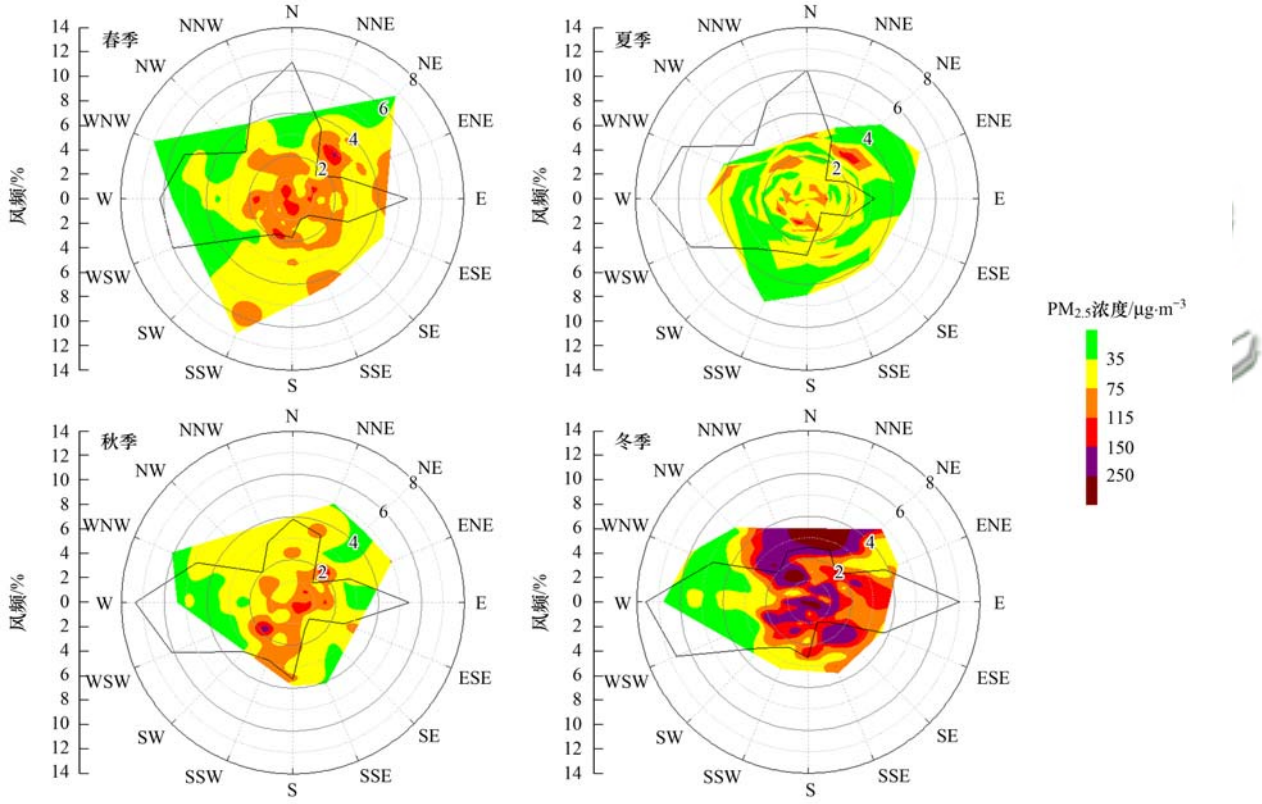


图 7 郑州市 2014～2017 年气象参数的季度变化

Fig. 7 Seasonal variations in meteorological parameters in Zhengzhou during 2014-2017



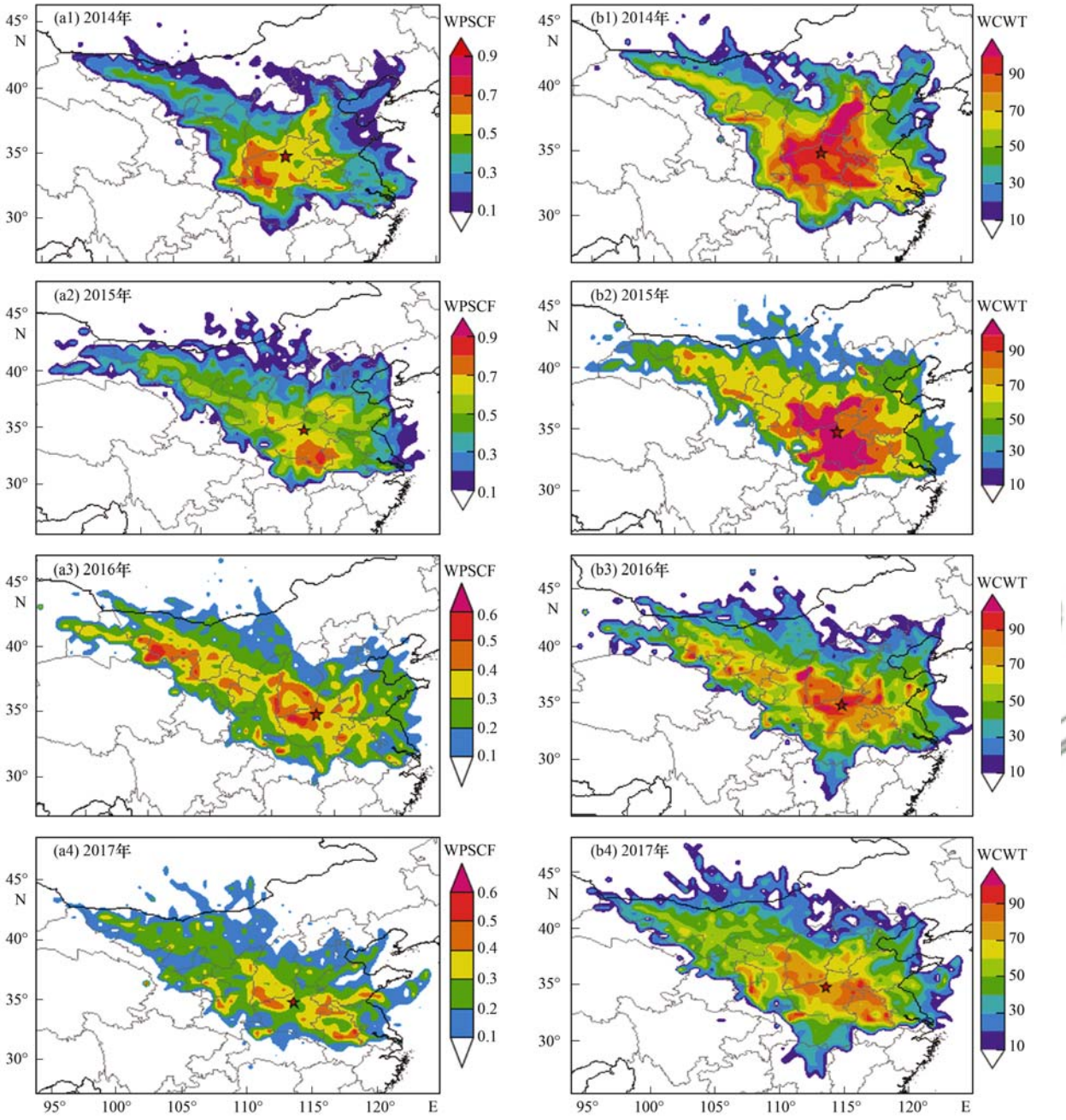
填充颜色代表 $PM_{2.5}$ 的平均质量浓度，圆的半径(即图中数值 2、4、6、8)代表每个方向上风的平均速度($m \cdot s^{-1}$)，轴线数值代表每个方向上风的相对频率

图 8 2014～2017 年郑州市小时数据风向玫瑰图

Fig. 8 Wind rose diagram based on hourly data collected in Zhengzhou during 2014-2017

要集中在河南省西南部，包括济源、三门峡、洛阳、南阳等以及陕西东南部、山西南部和湖北西北部等临省城市，其 WPSCF 值均在 0.6 以上. 2015 年 WPSCF 高值区域转移至河南省南部，主要集中在信阳、驻马店、南阳、漯河、平顶山及湖北北部、安徽西部区域，其 WPSCF 值均在 0.7 以上，表明区域传输对郑州市 $PM_{2.5}$ 浓度的影响增加. 2016 和 2017 年 WPSCF 数值明显降低，且分布散乱. 2016 年 WPSCF 高值区域向西北方向延伸，主要分布在焦作、济源、洛阳、三门峡、平顶山及山东西部、山西南部、宁夏东部和内蒙古西南部，其 WPSCF 值在 0.4～0.6，表明西北方向长距离传输对郑州市 $PM_{2.5}$ 污染具有一定程度的影响. 2017 年 WPSCF 高值区域明显缩小，主要集中在济源、商丘、周口、开封及安徽北部、山西南部和山东西南部，其 WPSCF 值均在 0.5 以下，区域传输影响减弱.

由于 WPSCF 只能反映潜在源区影响的大小，无法确定对研究区域污染物浓度的贡献水平. 因此，进一步使用浓度权重轨迹分析法来确定不同区域贡献的相对大小. 从图 9(b)中可以看出，WCWT



WPSCF 填充颜色表示该网格区域污染轨迹的占比，WCWT 填充颜色代表该网格污染物的平均质量浓度（$\mu g \cdot m^{-3}$）

图 9　郑州市 2014～2017 年 $PM_{2.5}$ 的潜在来源分析

Fig. 9　Potential sources of $PM_{2.5}$ in Zhengzhou during 2014-2017

相对于 WPSCF 结果具有较好的一致性，但潜在源区的分布更为广泛. 2014 年 WCWT 高值区域主要集中在安阳、焦作、济源、鹤壁、三门峡、南阳、洛阳和新乡等周边城市以及山西南部、安徽北部、山东西部和京津冀地区，其 WCWT 均在 90 $\mu g \cdot m^{-3}$ 以上，表明该区域对郑州市 $PM_{2.5}$ 污染浓度贡献较大. 2015 年 WCWT 数值最高，尤其焦作、平顶山、漯河、许昌、驻马店、周口、南阳等省内城市以及山西南部、湖北北部、安徽东部和河北南部，其 WCWT 均在 100 $\mu g \cdot m^{-3}$ 以上，表明区域污染对郑州市 $PM_{2.5}$ 污染贡献加重，且均为近距离传输. 2016 和 2017 年 WCWT 形态相似，高值区域明显缩小，且分布不集中. 2016 年主要潜在源区分布在新乡、焦作、洛阳、鹤壁、平顶山及山西南部、宁夏东部、甘肃东北部、安徽北部、山东西部和内蒙古西南部，WCWT 达到 70 $\mu g \cdot m^{-3}$ 以上. 2017 年潜在源区 WCWT 值最小（< 90 $\mu g \cdot m^{-3}$），区域污染明显减弱. 潜在源区主要分布在济源、洛阳、焦作、开封、商丘及山西南部、湖北西北部、安徽北部和山东西南部，WCWT 值在 60～90 $\mu g \cdot m^{-3}$. 根据结果分析可知，2014～2017 年 WPSCF 和 WCWT 高值分布范围均呈现先增大后缩小的变化特征，2015 年污染物

的区域传输对郑州市 $PM_{2.5}$ 浓度的贡献最大，随后逐年改善. 此外，短距离传输的 WCWT 值明显高于长距离传输，表明短距离传输对郑州市 $PM_{2.5}$ 浓度的贡献更显著.

3 结论

(1)郑州市大气颗粒物污染虽有所改善，但并未从根本上得到解决，且臭氧污染逐年加剧. 大气污染物的浓度水平、比值分布均具有显著的季节变化特征. 统计分析得出郑州市燃烧源和细颗粒物的二次形成对 $PM_{2.5}$ 的贡献较高，且燃煤的贡献率逐年下降，交通源的贡献率逐年增加.

(2)气象条件对大气污染物的影响具有季节性差异. 夏季温度高、降水多有利于大气污染物的去除，冬季静风频率高、降水少是造成颗粒物污染频发的重要因素.

(3)郑州市 2014～2017 年 WPSCF 和 WCWT 分布特征类似，高值分布区域均呈现先增大后缩小的特征. $PM_{2.5}$ 污染源区主要分布在焦作、济源、洛阳、平顶山、漯河、新乡等省内周边城市以及山西南部、陕西东部、湖北北部、山东西北部、京津冀等相邻省份，其中短距离传输对郑州市 $PM_{2.5}$ 污染的贡献更为显著.

参考文献:

[1] 许亚宣，李小敏，于华通，等. 邯郸市大气复合污染特征的监测研究[J]. 环境科学学报，2015，**35**(9)：2710-2722.
Xu Y X, Li X M, Yu H T, *et al*. Characteristics of air pollution complex in Handan[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(9): 2710-2722.

[2] 胡敏，尚冬杰，郭松，等. 大气复合污染条件下新粒子生成和增长机制及其环境影响[J]. 化学学报，2016，**74**(5)：385-391.
Hu M, Shang D J, Guo S, *et al*. Mechanism of new particle formation and growth as well as environmental effects under complex air pollution in China[J]. Acta Chimica Sinica, 2016, **74**(5): 385-391.

[3] 邓涛，吴兑，邓雪娇，等. 珠江三角洲一次典型复合型污染过程的模拟研究[J]. 中国环境科学，2012，**32**(2)：193-199.
Deng T, Wu D, Deng X J, *et al*. Simulation of a typical complex pollution process over Pearl River Delta area [J]. China Environmental Science, 2012, **32**(2): 193-199.

[4] Gouveia N, Junger W L. Effects of air pollution on infant and children respiratory mortality in four large Latin-American cities [J]. Environmental Pollution, 2018, **232**: 385-391.

[5] Liu Y W, Xie S G, Yu Q, *et al*. Short-term effects of ambient air pollution on pediatric outpatient visits for respiratory diseases in Yichang city, China [J]. Environmental Pollution, 2017, **227**: 116-124.

[6] Zhang C, Ding R, Xiao C C, *et al*. Association between air pollution and cardiovascular mortality in Hefei, China: a time-series analysis[J]. Environmental Pollution, 2017, **229**: 790-797.

[7] Tian Y H, Xiang X, Juan J. Fine particulate air pollution and hospital visits for asthma in Beijing, China[J]. Environmental Pollution, 2017, **230**: 227-233.

[8] 王莉莉，王跃思，吉东生，等. 天津滨海新区秋冬季大气污染特征分析[J]. 中国环境科学，2011，**31**(7)：1077-1086.
Wang L L, Wang Y S, Ji D S, *et al*. Characteristics of atmospheric pollutants in Tianjin Binhai new area during autumn and winter[J]. China Environmental Science, 2011, **31**(7): 1077-1086.

[9] 肖娴，范绍佳，苏冉. 2011 年 10 月珠江三角洲一次区域性空气污染过程特征分析[J]. 环境科学学报，2014，**34**(2)：290-296.
Xiao X, Fan S J, Su R. Characteristics of a regional air pollution process over the Pearl River Delta during October 2011[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(2): 290-296.

[10] 余倩楠，徐茜，周陶治，等. 长三角地区 2015 年大气重污染特征及其影响因素[J]. 环境科学学报，2018，**38**(8)：3185-3196.
She Q N, Xu Q, Zhou T Y, *et al*. Characteristics of heavy air pollution episode and its impacting factors in the Yangtze River Delta during 2015[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(8): 3185-3196.

[11] 杨复沫，贺克斌，马永亮，等. 北京 $PM_{2.5}$ 浓度的变化特征及其与 PM_{10}、TSP 的关系[J]. 中国环境科学，2002，**22**(6)：506-510.
Yang F M, He K B, Ma Y L, *et al*. Variation characteristics of $PM_{2.5}$ concentration and its relationship with PM_{10} and TSP in Beijing[J]. China Environmental Science, 2002, **22**(6): 506-510.

[12] 中华人民共和国环境保护部. 2014-2016 中国环境状况公报[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/hjzl/zghjzkgb/lnzghjzkgb/, 2015-2017.

[13] 中华人民共和国生态环境部. 2017 中国生态环境公报[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201805/W020180531606576563901.pdf, 2018-05-22.

[14] 国家统计局. 河南统计年鉴 2017[M]. 北京：中国统计出版社，2017.

[15] 于世杰，尹沙沙，张瑞芹，等. 郑州市近地面臭氧污染特征及气象因素分析[J]. 中国环境监测，2017，**33**(4)：140-149.
Yu S J, Yin S S, Zhang R Q, *et al*. Analysis on the characteristics of surface ozone pollution and meteorological factors in Zhengzhou[J]. Environmental Monitoring in China, 2017, **33**(4): 140-149.

[16] Jiang N, Guo Y, Wang Q, *et al*. Chemical composition characteristics of $PM_{2.5}$ in three cities in Henan, central China [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2017, **17**(10): 2367-2380.

[17] Jiang N, Li Q, Su F C, *et al*. Chemical characteristics and source apportionment of $PM_{2.5}$ between heavily polluted days and other days in Zhengzhou, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2018, **66**: 188-198.

[18] Wang Q, Jiang N, Yin S S, *et al*. Carbonaceous species in $PM_{2.5}$ and PM_{10} in urban area of Zhengzhou in China: seasonal variations and source apportionment[J]. Atmospheric Research, 2017, **191**: 1-11.

[19] Jiang N, Duan S G, Yu X, *et al*. Comparative major components and health risks of toxic elements and polycyclic aromatic hydrocarbons of $PM_{2.5}$ in winter and summer in Zhengzhou: based on three-year data [J]. Atmospheric Research, 2018,

213：173-184.

[20] 郭家瑜，张英杰，郑海涛，等. 北京 2015 年大气细颗粒物的空间分布特征及变化规律[J]. 环境科学学报，2017，**37**(7)：2409-2419.
Guo J Y，Zhang Y J，Zheng H T，*et al*. Characteristics of spatial distribution and variations of atmospheric fine particles in Beijing in 2015 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae，2017，**37**(7)：2409-2419.

[21] Zhang Y L，Cao F. Fine particulate matter ($PM_{2.5}$) in China at a city level[J]. Scientific Reports，2015，**5**：14884.

[22] He J J，Gong S L，Yu Y，*et al*. Air pollution characteristics and their relation to meteorological conditions during 2014-2015 in major Chinese cities[J]. Environmental Pollution，2017，**223**：484-496.

[23] Song C B，Wu L，Xie Y C，*et al*. Air pollution in China：status and spatiotemporal variations [J]. Environmental Pollution，2017，**227**：334-347.

[24] Aneja V P，Agarwal A，Roelle P A，*et al*. Measurements and analysis of criteria pollutants in New Delhi，India [J]. Environment International，2001，**27**(1)：35-42.

[25] Nirel R，Dayan U. On the ratio of sulfur dioxide to nitrogen oxides as an indicator of air pollution sources[J]. Journal of Applied Meteorology，2001，**40**(7)：1209-1222.

[26] 周海军，刘涛，都达古拉，等. 包头市大气污染特征及其影响因素[J]. 环境科学研究，2017，**30**(2)：202-213.
Zhou H J，Liu T，Dudagula，*et al*. Characteristics of atmospheric pollutants and influencing factors in Baotou [J]. Research of Environmental Sciences，2017，**30**(2)：202-213.

[27] 唐孝炎，张远航，邵敏. 大气环境化学[M]. 北京：高等教育出版社，2006.

[28] Brechtel F J，Kreidenweis S M. Predicting particle critical supersaturation from hygroscopic growth measurements in the humidified TDMA. part I：theory and sensitivity studies[J]. Journal of the Atmospheric Sciences，2000，**57**(12)：1854-1871.

[29] Chen W，Tang H Z，Zhao H M. Diurnal，weekly and monthly spatial variations of air pollutants and air quality of Beijing[J]. Atmospheric Environment，2015，**119**：21-34.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 40 No. 9

Sep. 15, 2019

CONTENTS

Size Distributions of Different Carbonaceous Components in Ambient Aerosols ····· DU Xiang, ZHAO Pu-sheng, DONG Qun, *et al.* (3849)

Analysis of Air Pollution Characteristics and Meteorological Conditions in Zhengzhou from 2014 to 2017 ····· GUO Meng-meng, JIANG Nan, WANG Shen-bo, *et al.* (3856)

Characteristics of Atmospheric $PM_{2.5}$ Pollution and Its Influence on Visibility in Background Areas of Ji'nan ····· BIE Shu-jun, YANG Ling-xiao, GAO Ying, *et al.* (3868)

Source Analysis and Health Risk Assessment of PAHs in $PM_{2.5}$ During Winter in Liaocheng City ····· LIU Xiao-di, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, *et al.* (3875)

Temporal-Spatial Characteristics and Variability in Aerosol Optical Depth over China During 2001-2017 ····· LIU Hai-zhi, GUO Hai-yan, MA Zhen-feng, *et al.* (3886)

Spatial-Temporal Distribution of Absorptive Aerosols in the Yangtze River Delta ····· ZHAO Nan, CAO Fan-shi, TIAN Qing, *et al.* (3898)

Emission Characteristics of Chemical Composition of Particulate Matter from Coal-fired Boilers ····· YANG Yan-rong, ZHOU Xue-ming, QIN Juan-juan, *et al.* (3908)

Pollution Characteristics of Heavy Metals in $PM_{2.5}$ Near Highway ····· LI Xiao-bao, LIAO Zu-wen, ZHAO Hong, *et al.* (3916)

Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Heavy Metals in Road Dust in Beijing ····· HU Yue-qi, GUO Jian-hui, ZHANG Chao, *et al.* (3924)

Application of Test Method for Dust Suppression Efficiency of Wind Erosion Dust Suppressant ····· QIN Jian-ping, LI Bei-bei, YANG Tao, *et al.* (3935)

Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs in Printing Enterprises in Beijing-Tianjin-Hebei ····· LIU Wen-wen, FANG Li, GUO Xiu-rui, *et al.* (3942)

Source Profiles of VOCs Associated with Typical Industrial Processes in Chengdu ····· ZHOU Zi-hang, DENG Ye, WU Ke-ying, *et al.* (3949)

Characterization and Health Risk Assessment of Exposure to Odorous Pollutants Emitted from Industrial Odor Sources ····· MENG Jie, ZHAI Zeng-xiu, JING Bo-yu, *et al.* (3962)

Analysis of HONO Concentration and Source in Typical Rural Area of North China ····· WANG Yu-zheng, XUE Chao-yang, ZHANG Cheng-long, *et al.* (3973)

CO-SCR Performance and Mechanism over Co_3O_4 Catalysts ····· ZHONG Xue-mei, ZHANG Tao, LI Jia-yin, *et al.* (3982)

Pollution Characteristics of Perfluorinated Alkyl Substances (PFASs) in Seawater, Sediments, and Biological Samples from Jiaozhou Bay, China ····· CUI Wen-jie, PENG Ji-xing, TAN Zhi-jun, *et al.* (3990)

Occurrence and Influencing Factors of Odorous Compounds in Reservoirs Used as Drinking Water Resources in Jiangsu Province ····· SHI Peng-cheng, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, *et al.* (4000)

Fluorescence Characteristics and Influencing Factors of Dissolved Organic Matter (DOM) in Water and Sediment of Urban Watershed: A Case Study of Xiaojia River in Ningbo City ····· GAO Feng, SHAO Mei-ling, TANG Jian-feng, *et al.* (4009)

Water Bloom Modified Sediment Nitrogen Transformation and Removal ····· XIAO Lin, YANG Jia-yi (4018)

Applicability of Bioavailable Phosphorus in Sediments to Indicating Trophic Levels of Lakes and Reservoirs ····· LIU Hui, HU Lin-na, ZHU Meng-yuan, *et al.* (4023)

Analysis of Nitrate Pollution Sources in the Rainy Season of the Lower Fenhe River ····· WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (4033)

Hydrochemical Characteristics and Evolution of Groundwater in the Kashgar Delta Area in Xinjiang ····· WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, *et al.* (4042)

Community Diversity of Eukaryotic Nano-phytoplankton in Yellow Sea Using DNA Metabarcoding Technology Based on Multiple Amplicons ····· ZHANG Li, ZHANG Yuan, LIN Jia-ning, *et al.* (4052)

Comparison of Functional Groups of Phytoplankton in FG, MFG, and MBFG: Taking Three Reservoirs as an Example in Guizhou Plateau ····· CHEN Qian, LI Qiu-hua, MA Xin-yang, *et al.* (4061)

Adsorption and Mechanism of Arsenic by Natural Iron-containing Minerals ····· SHAO Jin-qiu, WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, *et al.* (4072)

Removal of Pb^{2+} from Aqueous Solution by Magnesium-Calcium Hydroxyapatite Adsorbent ····· HE Hao, ZHU Zong-qiang, LIU Jie, *et al.* (4081)

Intensified Electrosorption of Pb^{2+} by 2,6-diaminoanthraquinone/Graphene Composite Electrode ····· JIN Sheng-yao, XIANG Yang, ZHANG Jun-yu, *et al.* (4091)

Experiment on Recovery of Phosphorus from Aqueous Solution by Calcium Doped Fe_3O_4 ····· BAI Run-ying, LIU Jian-ming, HAO Jun-feng, *et al.* (4098)

Removal of Microplastics by Different Treatment Processes in Shanghai Large Municipal Wastewater Treatment Plants ····· JIA Qi-long, CHEN Hao, ZHAO Xin, *et al.* (4105)

Enhanced Nutrient Removal and Microbial Community Structure in a Step-feed A^2/O Process Treating Low-C/N Municipal Wastewater ····· RONG Yi, LIU Xiao-chai, HE Yin-xuan, *et al.* (4113)

Performances Analysis of an Upflow Anaerobic Filter for Domestic Sewage Treatment ····· YANG Zhong-qi, LIU Xiu-hong, LI Hai-xin, *et al.* (4121)

Electron Equilibrium Analysis of Integrated Autotrophic and Heterotrophic Denitrification Process Under Micro-aerobic Conditions ····· ZHANG Ruo-chen, CHEN Chuan, SHAO Bo, *et al.* (4128)

Pilot Study on Start-up and Stable Operation at Low Temperature Based on Denitrifying Phosphorus Removal ····· ZHANG Fan, YU De-shuang, LIU Jie, *et al.* (4136)

Comparison of Polycaprolactone and Poly-3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate for Nitrogen Removal ····· YI Cheng-hao, QIN Wei, CHEN Zhan, *et al.* (4143)

Rapid Cultivation of Anaerobic Ammonium Oxidation Granular Sludge and Inhibition Kinetics of Granular Sludge ····· TANG Peng, YU De-shuang, CHEN Guang-hui, *et al.* (4152)

Effect of Ca^{2+} on the Nitrification Activity and the Flocculation and Sedimentation Performances of the Activated Sludge ····· ZHANG Lan-he, ZHAO Qian-nan, ZHANG Hai-feng, *et al.* (4160)

Recovery of Phosphorus in the Form of Struvite from the Anaerobic Fermentation Supernatant of Excess Sludge ····· CHANG Xiao, ZENG Wei, WANG Bao-gui, *et al.* (4169)

Effect of Signal Molecule Combined with *Thiobacillus denitrificans* on Simultaneous Removal of Nitrogen and Sulfur ····· XU Jin-lan, CHEN Zi-wei, ZHANG Shao-feng, *et al.* (4177)

Bacterial Community Composition in Channel Sediment in Response to Mariculture Wastewater Drainage ····· HU Yue-hang, XUAN Li-xia, QIU Qiong-fen (4185)

Setup and Microbial Community Analysis of ANAMMOX System for Landfill Leachate Treatment Coupling Partial Nitrification-Denitrification Process ····· ZHAO Qing, LIU Meng-ying, LÜ Hui, *et al.* (4195)

Effects of Rice Straw Addition on Methanogenic Archaea and Bacteria in Two Paddy Soils ····· BAO Qiong-li, WANG Feng-hua, BAO Wan-kui, *et al.* (4202)

Effect of Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions from Rice-Rapeseed Rotation in Cropland ····· CHEN Shi-jie, JIANG Chang-sheng, NI Xue, *et al.* (4213)

N_2O Emissions from a Tea Field with Deep Application of Nitrogen Fertilizer and Intercropping with White Clover ····· LÜ Tian-xin, WU Yan-zheng, SHEN Jian-lin, *et al.* (4221)

Distribution and Emission of Nitrous Oxide (N_2O) in Three Gorges Reservoir and Downstream River ····· CHENG Fang, DING Shuai, LIU Su-mei, *et al.* (4230)

Synergy of Algal Sedimentation and Sediment Capping for Methane Emission Control in Bloom Waters ····· ZHU Lin, YU Jiang-hua, SHI Wen-qing, *et al.* (4238)

Impact of Newly Build Lead-Acid Battery Agglomeration Area on the Surrounding Soil Environment: A Study Based on the Spatial Characteristics of Heavy Metals ····· DING Ya-li, LIAO Min, FANG Zhi-ping, *et al.* (4244)

Effects of Amendments with Different C/N/P Ratios on Plant and Soil Properties of a Pb-Zn Mine Tailings ····· YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, PENG Xi-zhu, *et al.* (4253)

Derivation of the Thresholds of Available Concentrations of Heavy Metals in Soil Based on Agricultural Product Safety ····· ZHANG Yun-hui, DU Ping, HE Ying, *et al.* (4262)

Content of Soil Phytolith-Occluded Organic Carbon in Different Land Use Patterns at Jinyun Mountain ····· LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LU Chang, *et al.* (4270)

Influence of Land Use Change on Litter and Soil C, N, P Stoichiometric Characteristics and Soil Enzyme Activity in Karst Ecosystem, Southwest China ····· TIAN Jing, SHENG Mao-yin, WANG Pan, *et al.* (4278)

Effect of Conditioning Agent Combined with Flooding Measures on Absorption and Accumulation of Cadmium in Rice ····· PENG Ou, LIU Yu-ling, TIE Bai-qing, *et al.* (4287)

Distribution and Sources of OPEs in Plants and Snow in Hailuogou ····· CHEN Yang, YIN Hong-ling, WU Di, *et al.* (4295)