

目次

复合污染条件下人为源 VOCs 的 SOA 生成研究进展	陈天增, 刘俊, 马庆鑫, 楚碧武, 张鹏, 刘永春, 刘昌庚, 贺泓 (1201)
全氟和多氟烷基化合物微生物降解与转化研究进展	孙红文, 方博, 陈浩, 赵茂森, 张耀之, 乔碧汀, 喻蒙 (1214)
湖泊水质参数遥感监测研究进展	王思梦, 秦伯强 (1228)
淡水环境中微塑料与重金属的“木马效应”研究进展	赵伟高, 田一梅, 赵鹏, 赵令铨, 金超 (1244)
长江经济带二氧化碳净排放时空演变特征及脱钩效应	吴一帆, 许杨, 唐洋博, 贾宁, 李玮, 李翀, 殷国栋 (1258)
中国土地利用碳排放变化及协调分区	李缘缘, 魏伟, 周俊菊, 郝瑞军, 陈帝伯 (1267)
基于 STIRPAT 模型天津减污降碳协同效应多维度分析	刘茂辉, 岳亚云, 刘胜楠, 李婧, 刘佳泓, 孙猛 (1277)
基于燃料生命周期的中国铁路排放趋势	佟惠, 范朝阳, 梁晓宇, 孙露娜, 门正宇, 赵肖阳, 毛洪钧 (1287)
浙江省大气颗粒物 PM _{2.5} 化学组分污染特征分析	周菁清, 余磊, 陈书鑫, 陆佳峰, 许亚璐, 季海冰, 张柳芳, 刘劲松, 王静 (1297)
南京亚微米级颗粒物化学组成的季节变化、粒径分布和来源	徐振麒, 尚玥, 丁峰, 谢鸣捷, 王勤耕 (1310)
洛阳地区碳质组分季节特征及来源解析: 棕碳的重要贡献	闫广轩, 侯明阳, 张朴真, 王洁琦, 王虎, 李崇浩, 王跃思 (1319)
江苏省 2019 年 S/IVOCs 排放清单及分布特征	宋童艾, 张佳颖, 关璐, 胡建林, 于兴娜 (1328)
珠三角典型工业区挥发性有机物 (VOCs) 组成特征: 含氧挥发性有机物的重要性	宋鑫, 袁斌, 王思行, 何贤俊, 李小兵, 彭钰雯, 陈钰彬, 齐吉朋, 蔡嘉骅, 黄山, 胡丹, 魏文, 刘可旋, 邵敏 (1336)
2000 ~ 2020 年天津市机动车全过程 VOCs 排放特征及演变	孙露娜, 仲崇智, 孙世达, 刘妍, 佟惠, 吴亚君, 宋鹏飞, 张丽娜, 黄旭, 吴琳, 毛洪钧 (1346)
港口自有移动源大气污染物排放清单	徐小凡, 王宝庆, 吴俊成, 李怡诺 (1357)
基于改进水资源生态足迹模型的中国水资源可持续利用仿真及调控	欧阳兴涛, 廖浩宇, 姜秋香, 王子龙 (1368)
黄河流域入海口典型区域有机磷酸酯分布特征和风险评估	曹渺, 郭昌胜, 张恒, 刘士清, 陈苗, 吕佳佩, 侯嵩, 尤新军, 徐建 (1378)
桂林会仙岩溶湿地水体与沉积物中有机氯农药污染特征	余悦, 邢新丽, 程铖, 刘威杰, 张标, 孔祥胜, 李森, 余海阔, 罗为群, 祁士华 (1387)
广东茂名主要水系表层沉积物重金属风险评估及源解析	陈小霞, 张敏, 李蓓, 温鹏翀, 丁平, 姚玲爱, 马千里, 李廷真, 蔡丹, 胡国成 (1397)
宁波市地表水重金属时空分布特性和健康风险评价	徐美娟, 杨佳, 任晓景, 赵红燕, 高夫燕, 蒋跃军 (1407)
典型西北山地-绿洲系统不同水体水化学特征及其水力关系分析	王诗语, 孙从建, 陈伟, 周思捷, 张鑫 (1416)
牟汶河中上游孔隙水化学特征及控制因素	刘元晴, 周乐, 吕琳, 李伟, 王新峰, 邓启军, 郑一迪, 李常锁 (1429)
石河子-昌吉地区地下水水质时空变化及污染源解析	丁启振, 周金龙, 季彦桢, 杨方源, 张淑霞 (1440)
北方富营养分层型水库藻类季节性暴发机制及其阈值分析	温成成, 黄廷林, 孔昌昊, 张志刚, 田鹏飞 (1452)
拉林河流域底栖硅藻群落结构特征及水生态健康评价	单涛, 袁安龙, 黄子芮, 周静怡, 陆欣鑫, 范亚文 (1465)
南昌市湖泊丰水期浮游细菌群落结构及影响因素	高鹏飞, 王鹏, 黄伟, 丁明军, 张华, 聂明华, 黄高翔 (1475)
调蓄水库细菌群落季节变化特征与影响因素	丁宁, 杨莹莹, 万年新, 徐爱玲, 葛建华, 宋志文 (1484)
典型城市内河细菌群落组成与氮循环功能垂直分布及溯源分析	谭秋阳, 吕金燕, 白献宇, 程莉蓉, 李晓艳, 郭蕾 (1497)
滇中高原水库外源污染负荷贡献解析与环境容量核算	郭玉静, 李红兵, 王树明, 白乙娟, 任良锁, 丁爱中 (1508)
窄孔径含磷棉秆生物质炭的制备及对四环素的吸附机制	曾少毅, 李坤权 (1519)
高比表面疏脲改性花生壳炭的制备及对四环素和铜的吸附	闵炳坤, 李坤权 (1528)
不同供水管材生物膜抗生素抗性基因分布特征	刘晨旭, 白晓慧 (1537)
水蚀环境植被恢复对土壤有机碳固存和团聚体稳定的影响: Meta 分析	杨睿哲, 杨世龙, 翁希哲, 徐灵颖, 刘雪健, 杜运田, 张雪辰, 郑伟, 翟丙年, 王朝辉, 李紫燕 (1542)
增温施肥对稻麦农田土壤有机碳及其活性组分的影响	邓旭哲, 韩晨, 薛利祥, 侯朋福, 薛利红, 杨林章 (1553)
三江源地区高寒草地土壤功能的水平分异特征及其沿发生层的垂直变化	李柏键, 申聪聪, 刘四义, 吴华勇, 王继琛, 赵冬辉, 葛源 (1562)
鄱阳湖平原直播稻 CH ₄ 通量及其与 CO ₂ 通量的综合温室效应	时元智, 崔远来, 时硕, 洪大林, 程婕 (1572)
不同土地利用类型土壤多环芳烃的纵向污染特征及来源解析	周芷嫣, 张秀秀, 王飞, 朱昌达, 潘剑君 (1583)
石家庄道路灰尘中全氟/多氟化合物及其新型替代品的污染特征及健康风险评估	李鹏飞, 王媛, 杨晨, 史亚利, 崔建升 (1593)
南方典型矿区农业小流域耕地土壤重金属空间分布特征及污染评价	杨宇, 郭婷婷, 刘孝利, 铁柏清 (1602)
三峡库区(重庆段)菜地土壤重金属污染特征、潜在生态风险评估及源解析	石雨佳, 方林发, 方标, 叶莘莘, 范晓霞, 高坤鹏, 陈征, 肖然 (1611)
兰州市耕地表层土壤重金属的积累特征及其影响因素分析	康乐, 彭鑫波, 马延龙, 张利瑞, 张妍娥, 王泉灵, 张松林 (1620)
粤北典型工矿区土壤重金属富集特征、来源解析及风险评价	王越, 莫莉, 余新晓, 师华定, 费杨 (1636)
三门峡某铝厂遗留场地土壤重金属空间分布特征及来源解析	卢小慧, 余方中, 范一鸣, 杨阳 (1646)
某试验场土壤重金属分布特征及其污染评价	王诗雨, 李淳, 赵洪伟, 陈希, 张慧君, 朱勇兵, 赵三平, 计超, 刘晓东 (1657)
化学淋洗联合电动技术修复重金属污染土壤的效果及其机制	马强, 卫泽斌, 吴启堂 (1668)
再生铜冶炼过程中重金属排放特征和控制	林炳丞, 吴广龙, 郑明辉, 刘国瑞 (1678)
长江流域(安徽段)土壤-作物系统重金属污染特征及健康风险评价	刘海, 魏伟, 黄健敏, 赵国红 (1686)
稻-麦轮作模式下不同钝化材料对镉污染农田土壤的原位钝化效应	张路, 唐婵, 余海英, 李廷轩, 张锡洲, 黄化刚 (1698)
巯基化蒙脱石用于镉污染农田安全生产的效果及其持久性	冯先翠, 陈亚刚, 焦洪鹏, 曹鹏, 朱凤榕, 李媛媛, 江海燕 (1706)
蚯蚓、秸秆和柠檬酸对少花龙葵与韭菜菊修复铅镉污染土壤的影响	陈敏妮, 袁小奇, 张金峰, 何川黔, 高波 (1714)
地质高背景区富 Se 耕地可利用性研究及区划建议	王锐, 李瑜, 余京, 周蛟, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (1727)
张家口市北新屯地区蔬菜种植区锆元素富集特征及成因分析	安永龙, 殷秀兰, 金爱芳, 李文娟, 鲁青原 (1735)
三峡库区消落带落叶杉人工林土壤细菌群落结构多样性及动态变化	谭雪, 董智, 张丽苗, 袁中勋, 李昌晓 (1748)
黄土丘陵区退耕还林对土壤真菌群落的影响	张蕾, 王强, 杨新月, 吕俊平 (1758)
化肥减量配施有机肥对土壤功能微生物和柠檬产量及品质的影响	王蕊燕, 熊子怡, 罗东海, 王子芳, 高明 (1768)
鸡粪和猪粪生物发酵过程中抗生素抗性基因的动态变化	张丹, 彭双, 王丹青, 王一鸣, 林先贵 (1780)
牛粪还田对土壤微生物群落特征的影响	张雅丽, 郭晓明, 胡慧, 郭暖, 徐小涛, 李建林 (1792)
《环境科学》征订启事(1406) 《环境科学》征稿简则(1592) 信息(1635, 1667, 1677)	

浙江省大气颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分污染特征分析

周菁清, 余磊, 陈书鑫, 陆佳锋, 许亚璐, 季海冰, 张柳芳, 刘劲松, 王静*

(浙江省生态环境监测中心, 浙江省生态环境监测预警及质控研究重点实验室, 杭州 310012)

摘要: 为探究浙江省城市大气颗粒物的组分污染特征, 基于2019年10月1日至2020年9月30日浙江省内11个点位4个区域的手工采样监测数据, 分析了浙江省 $\text{PM}_{2.5}$ 组分不同区域不同季节的污染特征。结果表明, 采样期内浙江省各地区 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值范围为 $34.3 \sim 46.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 其中浙西和浙北内陆地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相对较高, 分别高出均值 15.1% 和 13.2%, 浙东和浙南沿海地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相对较低, 分别低于均值 8.4% 和 14.9%。季节性特征呈现秋季和冬季较高, 夏季最低, 空间分布来看, 浙南地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度春季、秋季和冬季季节变化不明显, 浙西地区为: 秋季 > 冬季 > 春季 > 夏季, 浙北和浙东地区均呈现冬季 > 秋季 > 春季 > 夏季的季节变化特征。内陆地区采样期内, 风景名胜、行政区、居民区和商业交通居民混合区的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 分别为: (40.2 ± 10.2) 、 (46.3 ± 9.6) 、 (50.1 ± 10.6) 和 $(46.7 \pm 10.2) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 居民区点位的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染水平均值最高。沿海地区采样期内, 文化娱乐区和商业交通居民混合区的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 分别为: $(27.4 \pm 5.8) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(37.2 \pm 5.6) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。采样期间浙江省 $\text{PM}_{2.5}$ 组分中有机物(OM)、硝酸盐(NO_3^-)、硫酸盐(SO_4^{2-})、铵盐(NH_4^+)、微量元素和地壳物质贡献率分别为: 26.4%、15.4%、12.4%、9.0%、7.1% 和 5.7%。二次无机气溶胶(SNA(硫酸盐、硝酸盐和铵盐))贡献率达到 36.8%。秋季、春季和夏季 OM 对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献高于其他组分, 贡献率分别为 28.3%、27.7% 和 26.3%, 而冬季却表现为硝酸盐的贡献最为显著, 贡献率达 24.3%。空间分布上, SNA 对各地区 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献均最大, 贡献率范围为 32.8%~39.7%, 浙北地区最高, 浙南地区最低, 各地区 SNA 均呈现: 硝酸盐 > 硫酸盐 > 铵盐。利用后向轨迹聚类分析发现, 浙北地区秋季、冬季、春季和夏季主要气团来源分别为黄海江苏南部、安徽北部、东海和黄海江苏西部, 贡献率分别为 38.11%、35.28%、37.46% 和 27.87%。浙西地区秋季、冬季、春季和夏季分别受来自黄海江苏南部(38.11%)、安徽南部(37.50%)、浙江东部(46.55%) 和浙北(32.58%) 方向的气团影响。浙东地区秋季、冬季、春季和夏季则分别受来自河北北部(36.07%)、山东东部(38.06%)、东海(30.17%) 和广东南部(34.43%) 方向的气团影响。浙南地区秋季、冬季、春季和夏季分别受来自黄海(35.66%)、安徽东北部(34.44%)、东海(26.72%) 和福建南部沿海(35.00%) 方向的气团影响。浙江省各区域气团后向轨迹季节性差异较大, 而各区域间 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 西北最高值与东南最低值之间的差值在秋季和冬季分别为 $21.0 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $20.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 春季和夏季分别为 $10.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $6.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 北方气团对浙江省秋季和冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 存在一定的外源性贡献, 春季和夏季北方气团对浙江省气团轨迹的减弱, 以及南方和东海海上气团对浙江省气流贡献的增大, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度也存在好转的趋势。

关键词: 浙江省; $\text{PM}_{2.5}$; 化学组分; 后向轨迹; 聚类分析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)03-1297-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.202203118

Pollution Characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ Chemical Composition in Zhejiang Province

ZHOU Jing-qing, YU Lei, CHEN Shu-xin, LU Jia-feng, XU Ya-lu, JI Hai-bing, ZHANG Liu-fang, LIU Jin-song, WANG Jing*

(Zhejiang Key Laboratory of Ecological and Environmental Monitoring, Forewarning and Quality Control, Zhejiang Ecological and Environmental Monitoring Center, Hangzhou 310012, China)

Abstract: To investigate the seasonal and regional pollution characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ chemical composition in Zhejiang province, this study was based on manual sampling monitoring data from 11 sampling sites of four regions in Zhejiang province from October 1, 2019 to September 30, 2020. The results showed that during the observation period, the average $\rho(\text{PM}_{2.5})$ of the four regions ranged from $34.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ to $46.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. The $\text{PM}_{2.5}$ mass concentrations in the hinterland areas of western Zhejiang and northern Zhejiang were relatively high, 15.1% and 13.2% higher than the mean value, respectively. The $\text{PM}_{2.5}$ mass concentrations in the coastal areas of eastern Zhejiang and southern Zhejiang were relatively low, 8.4% and 14.9% lower than the average, respectively. The seasonal characteristics showed a higher concentration in autumn and winter and lowest concentration in summer. The seasonal variation in $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration from autumn to spring was not obvious in southern Zhejiang, whereas in western Zhejiang, the $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration followed a descending sequence of autumn > winter > spring > summer. In northern Zhejiang and eastern Zhejiang, the trend was winter > autumn > spring > summer. During the observation period in the inland area, the $\rho(\text{PM}_{2.5})$ of the scenic area, administrative area, residential area, and mixed area of commercial traffic and residents were (40.2 ± 10.2) , (46.3 ± 9.6) , (50.1 ± 10.6) , and $(46.7 \pm 10.2) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, respectively. The highest value of $\rho(\text{PM}_{2.5})$ was in the residential area. During the sampling period in coastal areas, the $\rho(\text{PM}_{2.5})$ of the cultural and entertainment area and mixed area of commercial traffic and residents were $(27.4 \pm 5.8) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ and $(37.2 \pm 5.6) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, respectively. The contribution rates of organic matter (OM), NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ , trace elements, and crustal matter in $\text{PM}_{2.5}$ were 26.4%, 15.4%, 12.4%, 9.0%, 7.1%, and 5.7%, respectively. The SNA, including SO_4^{2-} , NO_3^- , and NH_4^+ , contributed 36.8% in $\text{PM}_{2.5}$. In terms of seasons, the contribution of OM to $\text{PM}_{2.5}$ in autumn, spring, and summer was higher than that of other compositions, which accounted for 28.3%, 27.7%, and 26.3%, respectively. The contribution rate of NO_3^- in $\text{PM}_{2.5}$ was the largest in winter, reaching 24.3%. In terms of spatial distribution, SNA contributed the

收稿日期: 2022-03-14; 修订日期: 2022-06-07

基金项目: 浙江省重点研发计划项目(2021C03176); 浙江省生态环境科研和成果推广项目(2021HT0019, 2021HT0020, 2021HT0005)

作者简介: 周菁清(1990~), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为大气颗粒物组分, E-mail: 549748841@qq.com

* 通信作者, E-mail: 1347480699@qq.com

most to $\text{PM}_{2.5}$ in all regions, ranging from 32.8% to 39.7%, with the highest in northern Zhejiang and the lowest in southern Zhejiang. The SNA of all regions presented $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NH}_4^+$. Based on the backward trajectory clustering analysis, the main air sources of northern Zhejiang were the Yellow Sea-southern Jiangsu (autumn), northern Anhui (winter), East China Sea (spring), and western Jiangsu (summer) areas, with contribution rates of 38.11%, 35.28%, 37.46%, and 27.87%, respectively. The main air sources of western Zhejiang were the Yellow Sea-southern Jiangsu (autumn), southern Anhui (winter), eastern Zhejiang (spring), and northern Zhejiang (summer), with contribution rates of 38.11%, 37.50%, 46.55%, and 32.58%, respectively. The air of autumn, winter, spring, and summer in eastern Zhejiang were influenced by air masses from northern Hebei (36.07%), eastern Shandong (38.06%), East China Sea (30.17%), and southern Guangdong (34.43%), respectively. In autumn, winter, spring, and summer, southern Zhejiang was affected by air masses from the Yellow Sea (35.66%), northeast Anhui (34.44%), East China Sea (26.72%), and southern Fujian coast (35.00%), respectively. The regions in Zhejiang province showed large seasonal differences. The difference value between the maximum value of $\rho(\text{PM}_{2.5})$ in the northwest and the lowest value in the southeast was $21.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and $20.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in autumn and winter, respectively; the difference values in spring and summer were $10.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and $6.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Thus, the northern air mass had a certain exogenous contribution to $\text{PM}_{2.5}$ in autumn and winter in Zhejiang province. However, with the weakening of the northern air mass trajectory in spring and summer and the increasing contribution of the southern and east China Sea air mass to the air flow in Zhejiang province, $\text{PM}_{2.5}$ pollution showed a trend of improvement.

Key words: Zhejiang province; $\text{PM}_{2.5}$; chemical composition; backward trajectory; cluster analysis

我国持续高速的经济增长和城市化进程的推进在取得显著社会经济发展成果的同时,也付出了空气污染问题加剧的巨大代价.有研究表明^[1~4], $\text{PM}_{2.5}$ 和臭氧污染逐渐成为阻碍我国城市和区域空气质量达标的主要瓶颈.大气中大量的颗粒物不仅影响人类日常社会活动还会危及人类健康^[5~9].摸清 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要化学组成变化特征^[10~12],是研究大气环境质量状况的基础^[13].

$\text{PM}_{2.5}$ 的组分较为复杂^[14],主要由水溶性离子、无机元素和碳组分等组成,其中水溶性离子主要有水溶性阳离子和水溶性阴离子^[15,16],无机元素主要为金属元素^[17,18],碳组分主要包括有机碳(OC)和元素碳(EC)^[19,20].国内外学者对不同地区不同时间段的大气 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度及组分污染特征开展了诸多研究^[21~24].杨复沫等^[25]以北京2个采样点的 $\text{PM}_{2.5}$ 样品进行组分分析,发现有机物含量分别为27.8%和30.9%,其次是二次无机粒子(23%~24%)、土壤尘(11%)、元素碳和微量元素.有研究对北京城区 $\text{PM}_{2.5}$ 及其组分进行多次污染特征及来源分析^[26~29],对比多次研究发现北京城区 $\text{PM}_{2.5}$ 碳质组分占比下降,具有较强的二次污染特征,目前二次源是北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 的最主要来源.任娇等^[30]对太原冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 组成研究发现随着 $\text{PM}_{2.5}$ 污染程度的增加,OM和矿物尘的占比下降,而SNA的占比显著增加.孙友敏等^[31]研究了济南市不同季节不同功能区的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度及化学组成,发现 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度大小为:工业区>城乡结合部>城市市区,各功能区秋季和冬季明显高于春季,工业区各季节水溶性离子浓度较高.杨梦蓉等^[32]研究了宁波市春节期间的水溶性离子,结果发现二次无机离子(NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^+)是主要的水溶性离子,爆竹燃烧、二次生成(北京、工业源)和扬尘源是宁波春节 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要污染来源.蒋琦清等^[33]研究发现杭州城区 $\text{PM}_{2.5}$ 受外源输送污染具有明显的季节性变化特征. Liu

等^[34]对杭州市 $\text{PM}_{2.5}$ 中的水溶性离子、金属元素和总碳(TC)进行分析发现,水溶性离子对 $\text{PM}_{2.5}$ 的总贡献率在32.3%~36.7%,TC贡献率为27.8%,元素对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献率在1.7%~2.0%之间. Xu等^[35]选取杭州和宁波作为浙北地区,对 $\text{PM}_{2.5}$ 及其水溶性离子(WSII)的时空变化特征及来源进行了研究,发现城市 $\text{PM}_{2.5}$ 污染较郊区和农村严重,离子浓度大小呈现: $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{Cl}^- > \text{K}^+$,工业排放、生物质燃烧和二次无机气溶胶的形成是浙北地区WSII的主要来源.目前长三角地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 的研究主要集中在城市细颗粒物的化学成分分析^[36,37],粒径分布及来源解析^[38],区域污染过程颗粒物的来源及光学特征^[39~41].

目前已有的对颗粒物的组分特征的大区域尺度研究集中在京津冀及其周边地区、珠三角^[42,43]、四川盆地^[44]和长三角地区等.浙江省各地作为长三角南部城市,处于长三角污染区域边缘^[45],目前对浙江省全省区域的颗粒物的相关研究仅仅局限于杭州和宁波等个别城市,针对全省大区域尺度以及宽时间轴范围的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度及组分污染特征却鲜见报道.基于此本研究在浙江省全省区域内采集时间序列为1a的大气 $\text{PM}_{2.5}$ 样品,通过摸清浙江省城市大气颗粒物的组分特征,掌握浓度水平和变化规律,进而开展全省颗粒物污染治理和防控工作,提升大气环境质量.

1 材料与方法

1.1 样品采集

按照全省监测全覆盖的原则,本研究将浙江省分为浙东地区、浙北地区、浙西地区和浙南地区,共选取11个点位作为大气颗粒物的样品采集点.为保证监测数据具有代表性、可比性和准确真实地反映城市环境空气颗粒物的污染状况,各城市在人口密集区布设监测点位,具体点位信息见表1.

本研究采样时间为2019年10月1日至2020

年 9 月 30 日,所有点位监测频次为每 3 d 1 次,其中每次样品连续采集 23 h,采集时间为 09:00 至次日 08:00. 每个点位使用 1 台 4 通道小流量采样器采集 4 个 PM_{2.5} 样品(2 个为石英滤膜样品,2 个为特氟龙滤膜样品),采样流量分别为 16.7 L·min⁻¹,采样周期内每个月各地市分别于月初及月中各采集 1 个石英滤膜空白样品及 1 个为特氟龙滤膜空白样品,共采集有效滤膜样品 536 个. 为获得各地大气颗粒物组分污染随季节变化的规律,将观测时间段分为秋季(2019 年 10~11 月)、冬季(2019 年 12 月~2020 年 2 月)、春季(2020 年 3~5 月)和夏季(2020 年 6~9 月)^[46].

1.2 样品分析

监测项目主要包括 PM_{2.5} 浓度、9 种水溶性离

子、24 种无机元素和碳组分等 46 项,具体分析项目、分析方法和仪器见表 2.

其中 PM_{2.5} 浓度采用重量法进行测定,质量保证和控制关键环节包括:滤膜平衡时间不少于 24 h,滤膜采样前后在相同温、湿度条件下进行称重前的平衡;称重过程中,首次称重后在相同平衡条件下平衡 1h 后再称重,因采样为小流量采样,同一滤膜两次称重质量差均小于 0.04 mg,否则重新进行平衡、称重,采样前后滤膜称量使用同一台天平;采样后样品滤膜于 4℃ 密封冷藏保存,20 d 内完成称重.

水溶性离子采用离子色谱法进行分析,剪取 1/4 PTFE 滤膜于样品管中,加入去离子水超声提取、经离子交换色谱柱分离后,用抑制型电导检测器检测. 分析过程中质量控制措施主要包括:离子色谱法所用去离子水的电导率应小于 0.5 μS·cm⁻¹,样品经 0.45 μm 微孔滤膜过滤,除去样品中颗粒物,防止系统堵塞;环境整个系统不要进气泡,尤其每次更换淋洗液,及时排气,以免气泡进入系统.

无机元素组分测试选用 X 射线荧光光谱法,利用 X 射线管产生的初级 X 射线照射到滤膜样品表面,被测元素释放出特征 X 射线经晶体分光后,探测器在选择特征波长相对应 20 角处测量 X 射线荧光强度. 聚四氟乙烯滤膜在 WD-XRF 测定过程中,受 X 射线照射时容易产生裂纹,甚至破损. 为避免采样膜的破损,在分析过程中降低 X 光管功率并减少照射时间,控制测量时间在 20 min 以内.

表 1 浙江省各地区大气颗粒物监测点位

Table 1 PM_{2.5} sampling sites of regions in Zhejiang province

地区	点位编号	点位功能区
浙北地区	1	风景名胜区
	2	行政区
	3	居民区
浙东地区	4	商业交通居民混合区
	5	商业交通居民混合区
	6	文化娱乐区
浙西地区	7	商业交通居民混合区
	8	行政区
浙南地区	9	商业交通居民混合区
	10	商业交通居民混合区
	11	商业交通居民混合区

表 2 颗粒物组分分析项目、方法和仪器

Table 2 PM_{2.5} chemical composition items, methods, and instruments

组分类别	滤膜类型	具体项目	分析方法	分析仪器
PM _{2.5} 质量浓度	47 mm 石英滤膜(Whatman)	PM _{2.5} 浓度	重量法(HJ 618-2011)	全自动恒温恒湿称重系统(微智兆 CR-4)
水溶性阳离子	46.2 mm PTFE 滤膜(Whatman)	Na ⁺ 、NH ₄ ⁺ 、K ⁺ 、Mg ²⁺ 和 Ca ²⁺	离子色谱法(HJ 800-2016)	离子色谱仪(Thermo)
水溶性阴离子	46.2 mm PTFE 滤膜(Whatman)	SO ₄ ²⁻ 、NO ₃ ⁻ 、F ⁻ 和 Cl ⁻	离子色谱法(HJ 799-2016)	ICS-5000)
无机元素	46.2 mm PTFE 滤膜(Whatman)	钒(V)、铁(Fe)、锌(Zn)、镉(Cd)、铬(Cr)、钴(Co)、砷(As)、铝(Al)、锡(Sn)、锰(Mn)、镍(Ni)、硒(Se)、硅(Si)、钛(Ti)、钡(Ba)、铜(Cu)、铅(Pb)、钙(Ca)、镁(Mg)、钠(Na)、硫(S)、氯(Cl)、钾(K)和锑(Sb)	波长色散 X 射线荧光光谱法(HJ 830-2017)	X 射线荧光仪(BRUKER S4 pioneer)
碳组分	47 mm 石英滤膜(Whatman)	元素碳(EC)和有机碳(OC)	热光法 ^[47]	波段有机碳/元素碳分析仪(DRI Model 2015)

1.3 组分分析方法

本研究采用质量平衡方法分析浙江省 PM_{2.5} 化学组分特征分析,将所测定的化学组分划分为以下 9 个部分^[48]:

- ①有机物(OM):以 1.6 × OC 浓度计^[49];
- ②元素碳(EC):以 EC 浓度计;
- ③硫酸盐:SO₄²⁻ 浓度计;

- ④硝酸盐:以 NO₃⁻ 浓度计;
- ⑤铵盐:以 NH₄⁺ 浓度计;
- ⑥氯盐:以 Cl⁻ 浓度计;
- ⑦地壳物质:2.20(Al) + 2.49(Si) + 1.63(Ca) + 2.42(Fe) + 1.94(Ti)^[50];
- ⑧微量元素:K + Mg + F⁻ + Ba + Cd + Sn + V + Cr + Mn + Co + Ni + Cu + Zn + As + Se + Pd + Cl + Sb

+ Na⁺[29];

⑨其他: PM_{2.5} 质量浓度、OM、硝酸盐、硫酸盐、铵盐、元素碳、氯盐、地壳物质和微量元素.

1.4 大气颗粒物输送路径分析方法

大气颗粒物的污染受区域内人为排放源的同时,也受气流轨迹输送产生的外源性影响^[45,51-52]. 本研究利用 TrajStat 软件和全球资料同化系统 (GDAS) 气象数据,采用聚类分析方法对 2019 年 10 月至 2020 年 9 月期间抵达浙江省各季节的气流资料进行处理,设定距地高度 500 m,以每日 00:00、06:00、12:00 和 18:00 的 48h 气流后向轨迹进行归类,以期从区域传输影响的角度来解析浙江省各区域 PM_{2.5} 的输送路径.

2 结果与讨论

2.1 PM_{2.5} 质量浓度水平污染特征

2.1.1 整体概况

2019 年 10 月至 2020 年 9 月,就浙江省全省而言, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值为 $(40.3 \pm 12.4) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 各地区 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值范围为 $34.3 \sim 46.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 见图 1, 其中以浙西和浙北内陆地区 PM_{2.5} 质量浓度较高, 分别高出均值 15.1% 和 13.2%, 浙东和浙南沿海地区 PM_{2.5} 质量浓度较低, 分别低于均值 8.4% 和 14.9%. 一方面是由于浙东南沿海地区的气候条件更加有利于颗粒物的扩散, 另一方面是由于浙西和浙北地区的高浓度可能受其它地区外来源的影响. 另外除浙南地区外, 其余各区域平均浓度均超过国家环境空气质量标准 (GB 3095-2012) 的二级限值 ($35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$).

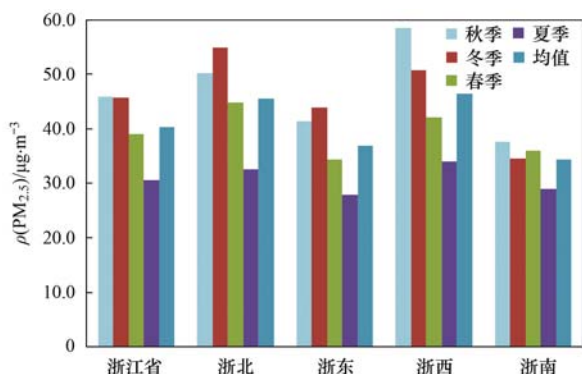


图 1 浙江省各地区 PM_{2.5} 浓度平均值

Fig. 1 Average mass concentration of PM_{2.5} in each region

2.1.2 时间变化特征

基于 2019 年 10 ~ 11 月 (秋季)、2019 年 12 月至 2020 年 2 月 (冬季)、2020 年 3 ~ 5 月 (春季) 和 2020 年 6 ~ 8 月 (夏季) 采样期间 PM_{2.5} 的监测结果, 对全省各地区 PM_{2.5} 的浓度分季节进行分析, 从全省

范围看, PM_{2.5} 浓度呈现了较明显的季节性差异, 秋季和冬季 PM_{2.5} 浓度最高, 超出平均值 13.9%; 夏季 PM_{2.5} 浓度最低, 低于均值 24.3%. 除夏季 ($30.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 外, 秋季、冬季和春季浓度平均值均超过 $35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$.

就各地区而言, 除浙南地区的 PM_{2.5} 浓度秋季、冬季和春季季节变化不明显外, 其余各地区秋季和冬季 PM_{2.5} 浓度明显是高于春季和夏季. 主要是由于秋季和冬季较低的气温和相对较弱的日照导致边界层高度的降低从而易造成污染物的累积, 同时也可能与污染物的季节性排放有关. 各地区夏季 PM_{2.5} 浓度均小于秋季、冬季和春季, 且夏季浓度均小于 $35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 以浙东地区夏季浓度最低, 仅为 $27.9 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 主要是因为夏季大气扩散条件较好, 且降水较多, 能一定程度地降低环境空气中 PM_{2.5}. 采样期间, 浙西地区秋季浓度最高, 达到 $58.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 浙北和浙东地区均呈现冬季 > 秋季 > 春季 > 夏季的季节变化特征.

图 2 给出了采样期间 PM_{2.5} 浓度随月份变化的趋势. 从浙江省不同月份来看, 2020 年 1 月 (冬季) $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 最高, 达到 $52.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 超出均值 34.1%, 其次是 2019 年 12 月 (冬季); 2020 年 6、7 和 8 月 (夏季) $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 最低, 分别为 26.6、26.2 和 $30.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$.

对各地区来说, PM_{2.5} 浓度均在 6 ~ 8 月 (夏季) 出现较低值, 在 2019 年 12 月和 2020 年 1 月出现较高值. 受春节和新冠疫情 (2020 年 2 ~ 3 月) 的影响, 各地区 2020 年 2 月 PM_{2.5} 浓度相较于采样期间冬季的其他月份 (2019 年 12 月和 2020 年 1 月), 2020 年 3 月 PM_{2.5} 浓度相较于采样期间春季的其他月份 (2020 年 4 月和 5 月) 均出现较大幅度的降低.

2.1.3 不同类型点位的 PM_{2.5} 浓度差异

由于浙西北内陆地区和浙东南沿海地区本身 PM_{2.5} 浓度水平不同, 为消除地域间的差异性, 将不同类型点位差异分析分为内陆地区和沿海地区, 具体结果见图 3. 比较同一区域内不同类型点位的 PM_{2.5} 浓度水平发现, 内陆地区采样期内, 风景名胜区、行政区、居民区和商业交通居民混合区的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 分别为 (40.2 ± 10.2) 、 (46.3 ± 9.6) 、 (50.1 ± 10.6) 和 $(46.7 \pm 10.2) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 居民区点位的 PM_{2.5} 污染水平在均值上是最高的. 对于各类型的采样点位的季节分布来说, 均为夏季浓度最低, 秋季和冬季浓度较高. 冬季和春季均为居民区 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 最高, 分别为 $59.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $52.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 而秋季和夏季的最高值均出现在商业交通居民混合区, 分

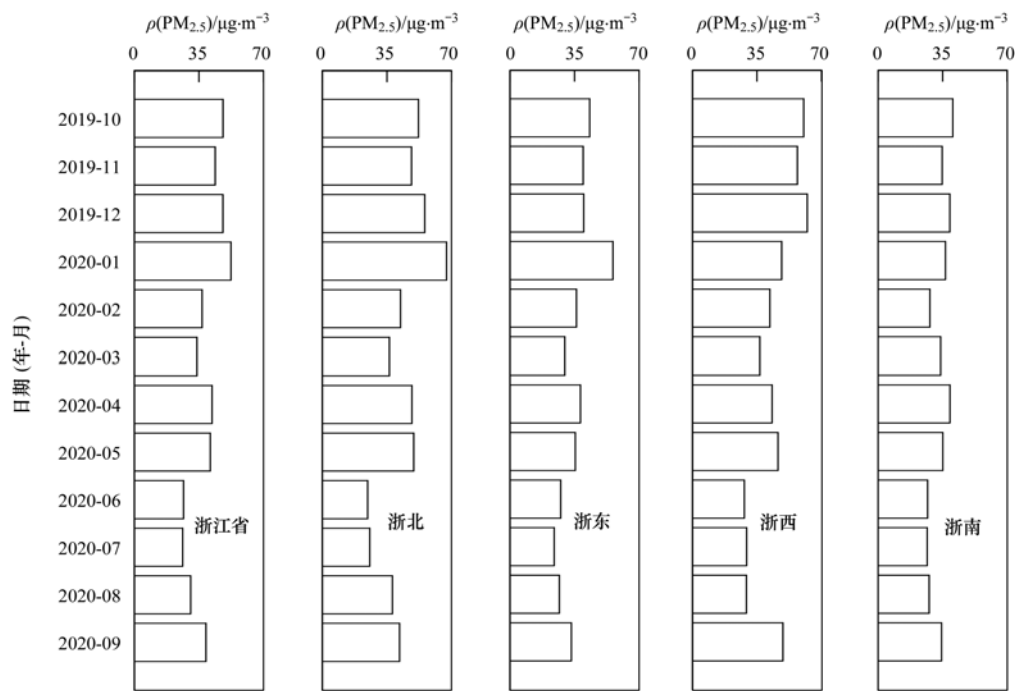


图 2 浙江省各区域 PM_{2.5} 浓度分月变化情况

Fig. 2 Monthly changes in PM_{2.5} mass concentration in each region

别为 $57.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $36.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 需要特别指出的是,春季居民区高出所有类型点位 PM_{2.5} 浓度均值的比例是最大的,超出均值的 20.8%,这很大可能是由于 2020 年春季由于新冠肺炎的影响,社会生产活动和人员流动降低,机动车排放减弱,导致活动场所集中在居民区,使得居民区 PM_{2.5} 浓度高于其他区.沿海地区采样期内,文化娱乐区和商业交通居民混合区的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 分别为 $(27.4 \pm 5.8) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(37.2 \pm 5.6) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,2 个类型的点位 PM_{2.5} 浓度都具有明显的季节特征,其中文化娱乐区冬季 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 最高,达到 $35.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,超出均值 29.5%. 商业交通居民混合区秋季 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 略高于冬季,分别为 $42.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $40.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

2.2 PM_{2.5} 化学组分特征

2.2.1 整体概况

图 4 给出了各区域 PM_{2.5} 主要化学组成结果,从全省范围看,浙江省环境大气 PM_{2.5} 的主要组分为有机物(OM)、硝酸盐(NO_3^-)、硫酸盐(SO_4^{2-})、铵盐(NH_4^+)、微量元素和地壳物质,其对 PM_{2.5} 总浓度的贡献率分别为 26.4%、15.4%、12.4%、9.0%、7.1% 和 5.7%,其他未确定的组分的贡献率为 18.7%. 二次无机气溶胶 SNA(硫酸盐、硝酸盐和铵盐)为主要的水溶性无机离子,其在 PM_{2.5} 的贡献率达到 36.8%,OM 和硝酸盐贡献次之. 由于酸盐、硝酸盐和铵盐主要是由二次反应生成的,因此浙江省 PM_{2.5} 的二次转化反应较为活跃,来源贡献较大.

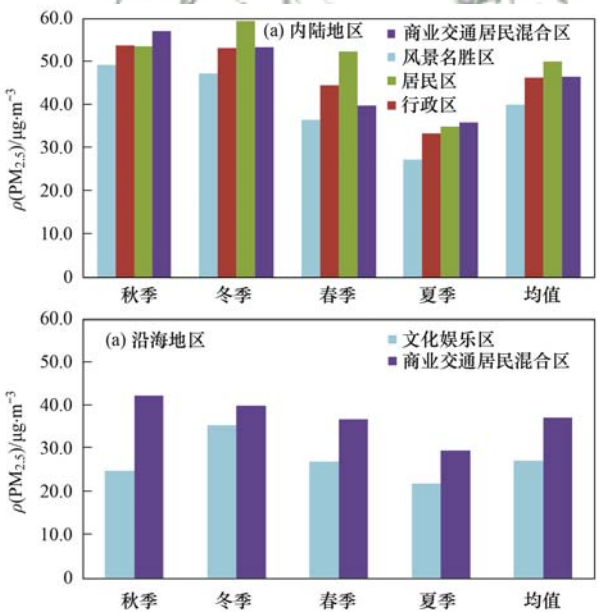


图 3 浙江省不同类型点位的 PM_{2.5} 浓度情况

Fig. 3 PM_{2.5} mass concentration in different sampling sites

从 PM_{2.5} 组分空间分布的情况来看,各区域 PM_{2.5} 组分构成基本一致,对 PM_{2.5} 贡献率比较大的物种主要是 SNA、OM、微量元素和地壳物质. 其中 SNA 对各地区 PM_{2.5} 的贡献均最大,贡献率范围为 32.8%~39.7%,浙北地区 SNA 贡献率最高,浙南地区 SNA 贡献率最低. OM 作为各地区 PM_{2.5} 的第二组分,浙南地区 PM_{2.5} 中 OM 贡献率最高,达 29.3%;浙北地区最低,为 22.6%. 各地区 PM_{2.5} 中微量元素、地壳物质、EC 及氯盐的贡献差异较小,贡献率范围分别为 6.8%~7.6%、5.8%~6.0%、3.8%~

4.5% 和 1.0%~1.4%。

而对于各地区来说,均呈现硝酸盐>硫酸盐>铵盐的情况,硝酸盐主要是煤炭化石燃料燃烧及机动车尾气排放的 NO_x 二次反应生成^[53],硫酸盐主要是由煤炭燃料燃烧产生的 SO_2 二次反应生成,铵盐则是主要来源于 NH_3 与大气中酸性气体反应生成,因此浙江省各区域均应进一步从控制硝酸盐、硫酸盐的前体物 NO_x 和 SO_2 方面来削减 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放。

$\text{PM}_{2.5}$ 中含碳组分 TCA 包含有机碳 OM 和元素碳 EC,由各地区的监测结果可以看出,浙北、浙东、浙西和浙南地区的 TCA 对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献率分别为 26.4%、31.0%、32.9% 和 33.7%,甚至在浙南地区出现 $\text{TCA} > \text{SNA}$,说明浙江地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 中碳污染较为严重。EC 通常被作为认为是一次污染物的是示踪物,OC 除了来源于一次有机碳排放源,同时还来源于二次有机物的转化。有研究表明,OC/EC 可以用来表征 $\text{PM}_{2.5}$ 中碳元素的排放来源及转化的特性^[9,54]。通常 $\text{OC/EC} > 2.0$,表明 $\text{PM}_{2.5}$ 中 OC 主要来源于二次有机物的转化^[55,56]。采样期间浙江省 OC/EC 均值为 3.9,其中区域间差异较小,浙南地区最高(4.1),浙北地区最低(3.8),其余两个区域为 3.9,表明浙江省 $\text{PM}_{2.5}$ 中有机碳主要来源于二次有机物的转化。

2.2.2 $\text{PM}_{2.5}$ 组分时间变化特征

不同季节采样期间浙江省 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要组分贡

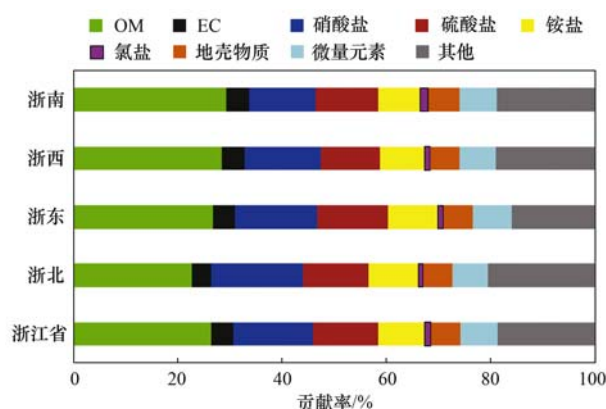


图4 浙江省各区域 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分特征

Fig. 4 Regional pollution characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ chemical composition

献率如图5所示。秋季、春季和夏季 OM 对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献高于其他组分,贡献率分别为 28.3%、27.7% 和 26.3%。而冬季硝酸盐对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献大幅上升,对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献率超过 OM,达到 24.3%,浙江冬季多偏西北风,可能是由于冬季受北方采暖期的煤炭燃料燃烧产生的 NO_x 排放的影响。同时冬季氯盐的贡献率(1.6%)也是明显高于秋季、春季和夏季,主要是由于氯盐来自于燃烧过程和工业排放,可能受北方燃煤排放的影响,冬季氯盐浓度大幅升高。冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 中地壳物质的平均贡献率(3.9%)明显小于其他季节,说明冬季扬尘贡献明显下降,推测主要是春节及疫情等因素使得建筑活动及机动车流量大幅减

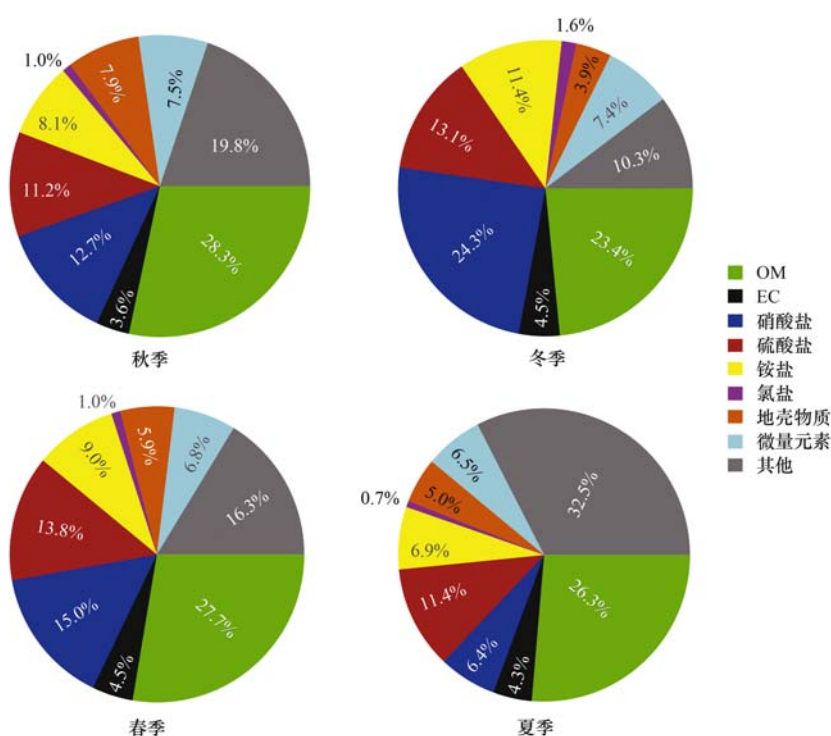


图5 浙江省 $\text{PM}_{2.5}$ 的组分特征的季节变化情况

Fig. 5 Seasonal pollution characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ chemical composition in Zhejiang province

少,从而产生的建筑尘和道路尘等也明显减少.

各地区 PM_{2.5} 的主要组分贡献率如图 6 所示. 对于浙北和浙东地区,秋季、春季和夏季 OM 对 PM_{2.5} 的贡献均最高,其中浙北地区三季贡献率分别为 22.9%、24.6% 和 26.1%,浙东地区贡献率分别为 29.2%、28.2% 和 27.4%,冬季则是硝酸盐对浙北和浙东地区 PM_{2.5} 浓度贡献率最大,分别为 28.7% 和 24.5%. 对于浙西和浙南地区,秋季、冬季、春季和夏季 OM 对 PM_{2.5} 的贡献均最高,其中浙西地区四

季贡献率分别为 30.4%、27.4%、30.5% 和 23.8%,浙南地区贡献率分别为 32.2%、28.1%、28.7% 和 27.4%. 各地区二次无机气溶胶 SNA 对 PM_{2.5} 的贡献率最高值均出现在冬季,浙北、浙东、浙西和浙南地区冬季 SNA 分别为 53.1%、51.1%、42.4% 和 45.4%. 另外氯盐在各地区的冬季也都呈现较大幅度的增长,浙北、浙东、浙西和浙南地区冬季氯盐分别高出均值 68.2%、48.5%、76.0% 和 29.8%. 各地区的组分特征季节变化基本一致.

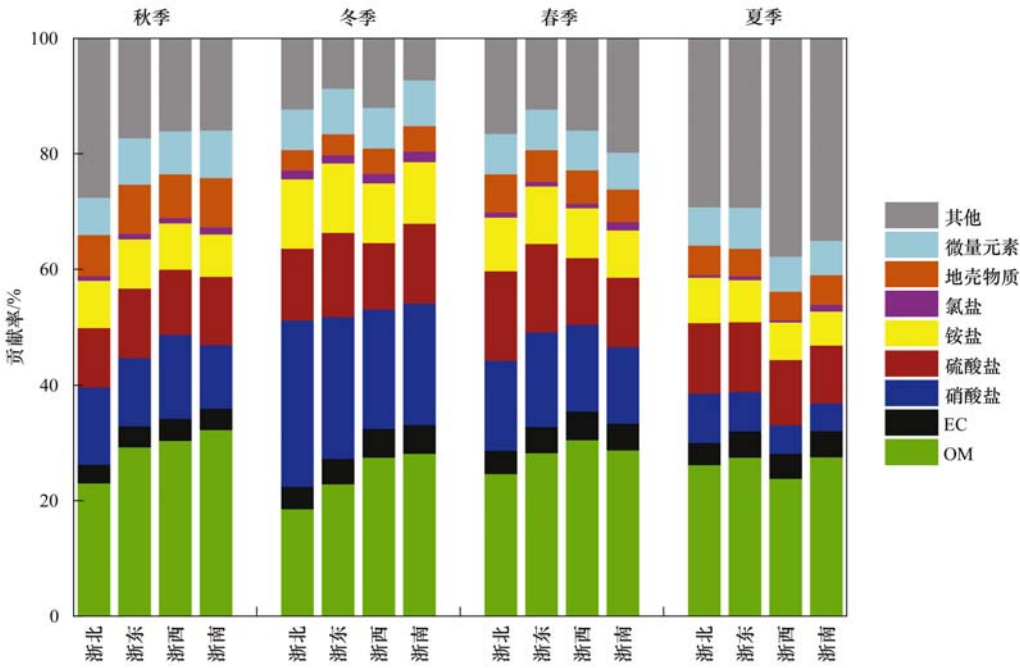


图 6 各地区 PM_{2.5} 组分特征的季节变化情况

Fig. 6 Seasonal pollution characteristics of PM_{2.5} chemical composition in each region

2.2.3 不同类型点位 PM_{2.5} 组分变化特征

图 7 给出了采样期间内陆地区各类型功能区 PM_{2.5} 组分随季节变化的特征. 对于风景名胜区、行政区和居民区,秋季、春季和夏季 OM 对 PM_{2.5} 的贡献均最高,其中风景名胜区的 OM 在 PM_{2.5} 中最高贡献率出现在夏季 (达到 30.2%),但其 $\rho(\text{OM}) = 8.30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 却是最低,主要是由于夏季为该风景名胜区的旅游旺季,带动景区内机动车尾气排放的增加,进而提升夏季风景名胜区的 OM 对 PM_{2.5} 的贡献. 而风景名胜区、行政区和居民区冬季均为硝酸盐贡献率最高,分别为 29.6%、24.5% 和 27.7%. 对于商业交通居住混合区,OM 在秋季、冬季、春季和夏季四季贡献率均为最高,分别是 30.7%、29.1%、31.5% 和 21.7%,主要是由于相对于其他类型的功能区点位来说,商业交通居民混合区的机动车排放来源大,而机动车尾气作为 OM 主要排放源,因此商业交通居民混合区的 PM_{2.5} 中 OM 贡献率四季均为最高. 另外硝酸盐的贡献率在各类型点位的季节性

差异均较大,冬季硝酸盐贡献率为 21.6%~29.6%,而夏季贡献率仅为 5.4%~9.0%,硝酸盐主要是化石燃料燃烧产生,冬季受北方供暖的影响,因此对 PM_{2.5} 的贡献较大.

沿海地区各类型功能区 PM_{2.5} 组分随季节变化的特征见图 8. 同样地,对于商业交通居住混合区,OM 在秋季、冬季、春季和夏季四季对 PM_{2.5} 的贡献率均为最高,分别是 31.2%、26.2%、28.7% 和 28.1%. 文化娱乐区,秋季、春季和夏季 OM 对 PM_{2.5} 的贡献率均最大,分别为 25.9%、26.9% 和 23.4%,冬季则是硝酸盐贡献率最高,为 25.0%. 因此对于内陆地区和沿海地区来说,PM_{2.5} 存在整体浓度上的差异,但是组成特征基本一致.

2.3 基于后向轨迹聚类分析大气颗粒物输送路径

本研究将浙江省各区域各季节的气流轨迹分别聚为五类,后向轨迹聚类分析结果如图 9 所示,并对聚类后的气流轨迹进行统计分析,分析结果见表 3. 秋季浙江省各区域主要受北方及东部沿海地区输入

表3 浙江省各区域气流轨迹聚类分析

区域	秋季			冬季			春季			夏季		
	轨迹类型 编号	出现概率 /%	气团轨迹 方向	轨迹类型 编号	出现概率 /%	气团轨迹 方向	轨迹类型 编号	出现概率 /%	气团轨迹 方向	轨迹类型 编号	出现概率 /%	气团轨迹 方向
浙北	ZB-1	5.33	东海	ZB-1	35.28	豫皖交界安徽北部	ZB-1	12.97	内蒙古东南部	ZB-1	27.87	江苏西部
	ZB-2	28.69	内蒙古南部	ZB-2	21.67	渤海山东东部	ZB-2	19.60	河南东北部	ZB-2	17.83	粤赣交界江西南部
	ZB-3	7.38	蒙古国和西北内陆	ZB-3	23.33	东部沿海	ZB-3	37.46	东海海面	ZB-3	18.44	东海海面
	ZB-4	20.49	安徽南部	ZB-4	13.61	内蒙古北部	ZB-4	21.04	江西中部	ZB-4	22.54	黄海海面
	ZB-5	38.11	黄海江苏南部	ZB-5	6.11	广东北部	ZB-5	8.93	蒙古和北方内陆	ZB-5	13.32	南海海面
浙东	ZD-1	10.25	东海海面	ZD-1	26.94	东部沿海	ZD-1	19.83	蒙古和东北内陆	ZD-1	14.75	浙南
	ZD-2	36.07	河北北部	ZD-2	22.22	豫皖交界安徽北部	ZD-2	30.17	东海	ZD-2	34.43	广东南部沿海
	ZD-3	5.74	蒙古国和西北内陆	ZD-3	38.06	渤海山东东部	ZD-3	18.10	河南东部	ZD-3	15.37	东海海面
	ZD-4	21.72	江苏南部	ZD-4	7.50	福建西南部	ZD-4	20.40	福建北部	ZD-4	25.20	黄海海面
	ZD-5	26.23	黄海海面	ZD-5	5.28	蒙古和东北内陆	ZD-5	11.49	东海海面	ZD-5	10.25	山东北部
浙西	ZX-1	17.62	东海海面	ZX-1	21.11	江苏东南部	ZX-1	12.93	山东东部	ZX-1	32.58	浙北
	ZX-2	38.11	江苏南部	ZX-2	37.50	安徽南部	ZX-2	28.16	江西中部	ZX-2	30.74	广东南部沿海
	ZX-3	15.98	河北北部	ZX-3	18.06	河北南部	ZX-3	46.55	浙东	ZX-3	11.27	黄海海面
	ZX-4	11.07	鄂皖交界安徽南部	ZX-4	13.89	福建西南部	ZX-4	6.03	内蒙古西南部	ZX-4	15.57	南海海面
	ZX-5	17.21	黄海江苏南部	ZX-5	9.44	渤海	ZX-5	6.32	广东南部沿海	ZX-5	9.84	东海海面
浙南	ZN-1	25.00	东部沿海	ZN-1	29.17	东部沿海	ZN-1	21.26	河北中部	ZN-1	23.36	黄海海面
	ZN-2	29.10	渤海山东东部	ZN-2	34.44	安徽东北部	ZN-2	25.86	福建西南部	ZN-2	22.54	南海海面
	ZN-3	4.51	蒙古国和北方内陆	ZN-3	17.50	渤海	ZN-3	26.72	东部沿海	ZN-3	14.34	台湾北部沿海
	ZN-4	5.74	东海海面	ZN-4	13.89	山西中部	ZN-4	17.24	东海海面	ZN-4	14.75	东海海面
	ZN-5	35.66	黄海	ZN-5	5.00	福建西南部	ZN-5	8.91	豫皖交界安徽南部	ZN-5	25.00	福建南部沿海

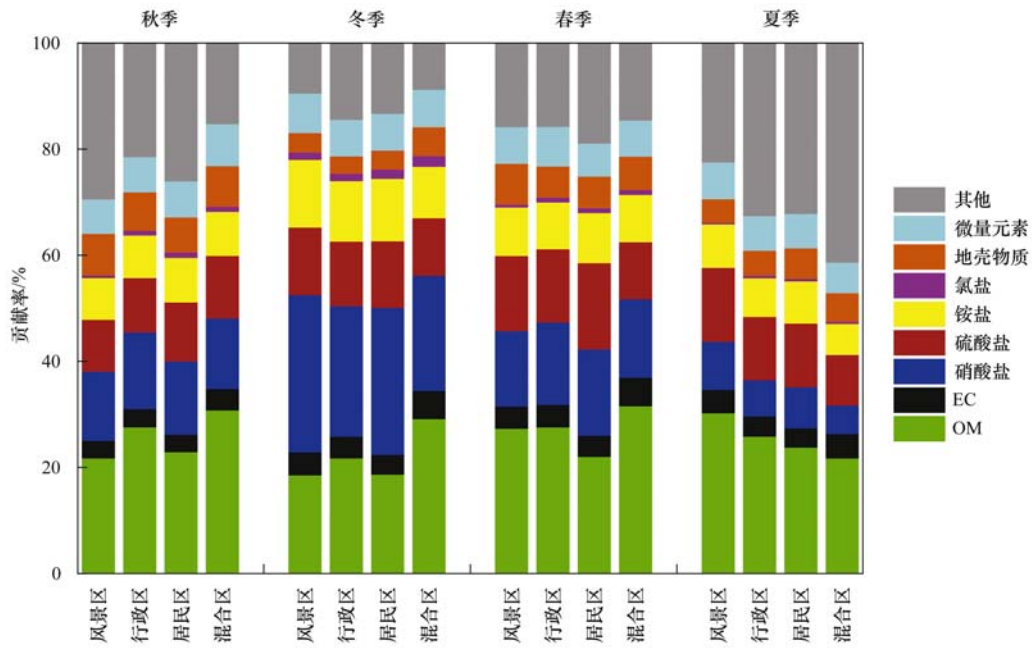


图 7 内陆地区 $\text{PM}_{2.5}$ 的组分特征的季节变化情况

Fig. 7 Seasonal pollution characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ chemical composition in hinterland of Zhejiang province

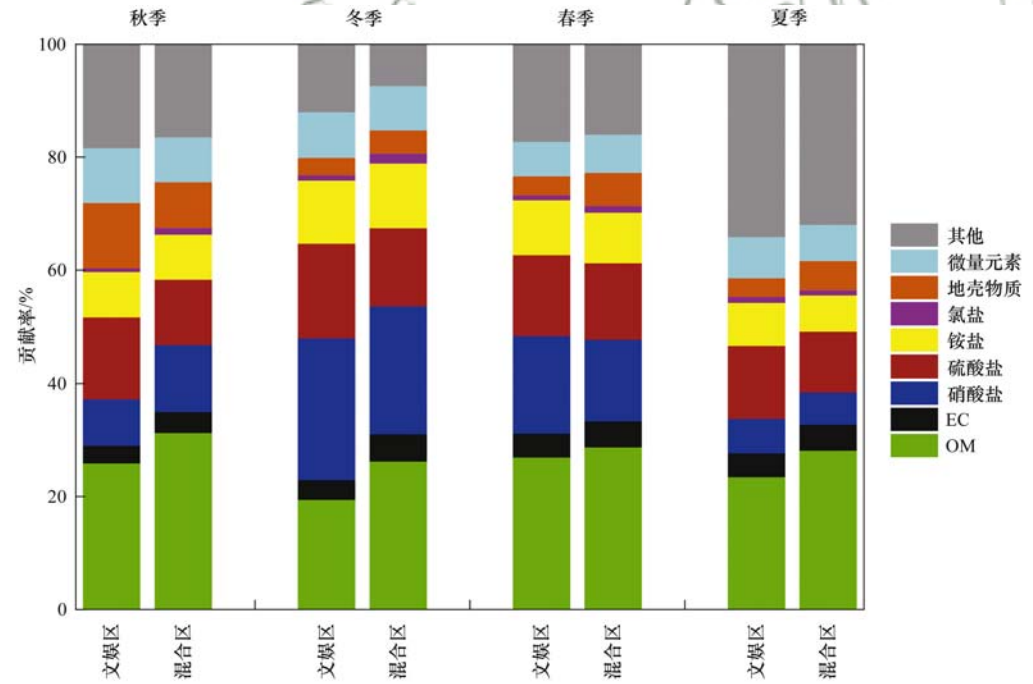
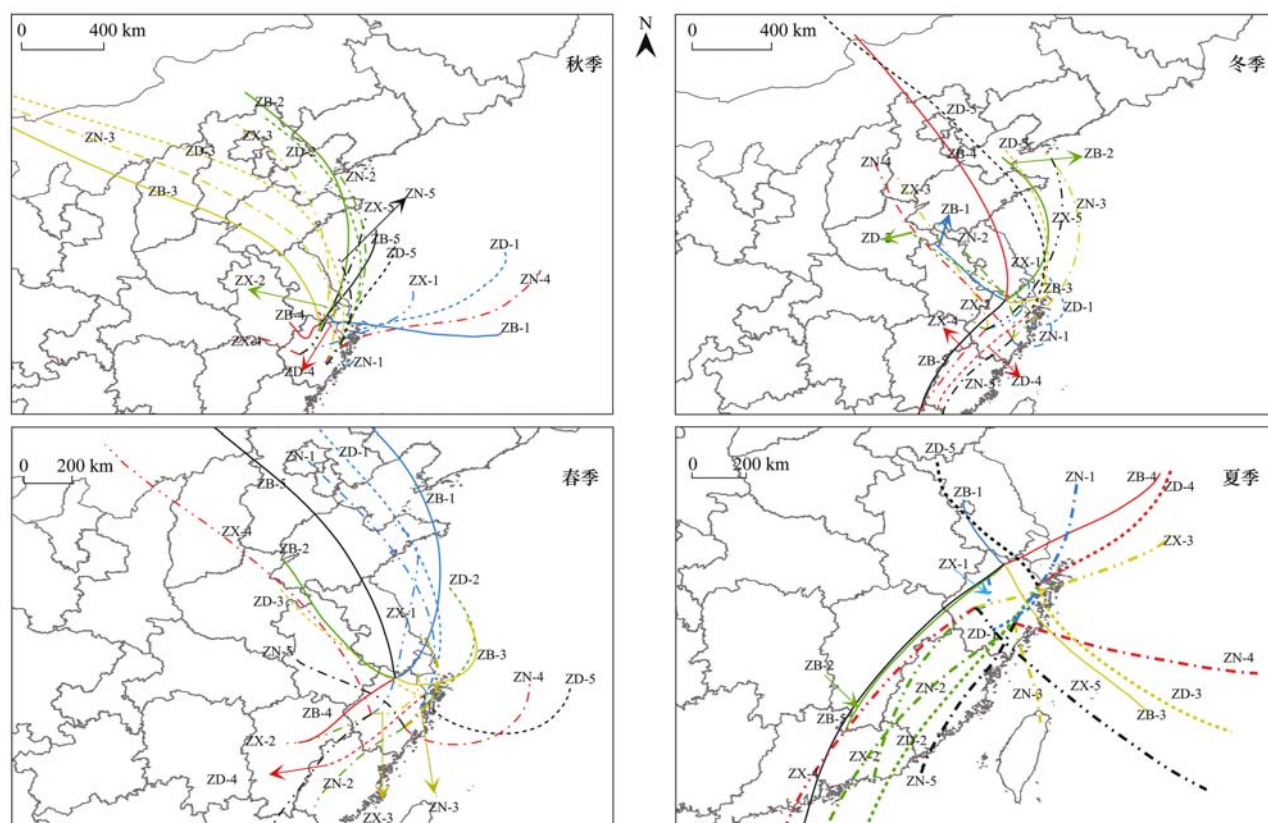


图 8 沿海地区 $\text{PM}_{2.5}$ 的组分特征的季节变化情况

Fig. 8 Seasonal pollution characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ chemical composition in coastal areas of Zhejiang province

的气流轨迹影响,其中浙北地区和浙西地区受黄海江苏南部方向的气流轨迹占其秋季气流轨迹的贡献率最大,均为 38.11%,浙北地区受来自内蒙古南部的远距离气团(28.69%)影响次之;浙西地区也同时受来自东部海面的气团(17.62%)影响;浙东地区则是以河北北部传来的气团(36.07%)为最大出现概率轨迹,其次为来自黄海的气团贡献;浙南地区主要受来自东海不同方位的气团轨迹影响.冬季浙江省各区域主要受来自北方气流轨迹影响的同时

也有来自中国南部地区的气团影响,其中浙北地区受来自豫皖交界安徽北部地区的气团贡献率最大,达 35.28%;浙东地区来自渤海山东东部地区等方向的气流轨迹占其气流轨迹的 38.06%,受东部沿海方向的气团占比次之;浙西主要受来自安徽南部的短距离气团贡献最大(37.50%);浙南受来自安徽东北部的气团(34.44%)贡献最高.同时秋冬季浙江省 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值远大于春夏季,并且在全省各区域间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度存在明显差异,浙西和浙北地区



ZB 表示浙北, ZD 表示浙东, ZX 表示浙西, ZN 表示浙南

图 9 浙江省各区域不同季节后向轨迹聚类分析结果

Fig. 9 Back trajectory clusters in each region during different seasons

$PM_{2.5}$ 浓度均远大于浙东和浙南地区, 其中秋季均值浓度最高的浙西地区与最低浙南地区的 $\rho(PM_{2.5})$ 平均值的差值达 $21.0 \mu g \cdot m^{-3}$, 冬季最高的浙北地区与最低的浙南地区的 $\rho(PM_{2.5})$ 平均值的差值达 $20.5 \mu g \cdot m^{-3}$, 间接说明北方气团对浙江省秋冬季 $PM_{2.5}$ 存在较大的外源性贡献. 春季浙江省各区域主要受来自北方、西南方向和东部沿海地区气流轨迹影响, 其中浙北地区受东海方向的气团贡献 (37.46%) 最大, 其次为来自江西中部的气团; 同样的浙东地区也是受东海方向的气团贡献 (30.17%) 最大, 其次为福建北部方向的气团; 浙西则是以浙江东部方向的气流轨迹占其当季气流轨迹的 46.55%, 且气团轨迹长度最短, 大气扩散条件较差; 浙南地区春季受东海浙东方向和福建西南方向的气团贡献相当, 分别为 26.72% 和 25.86%. 夏季浙江省各区域基本上受来自南海和东海等海上远距离传输气团的影响, 其中浙北地区以江苏西部方向和黄海方向的气团贡献为主, 分别为 27.87% 和 22.54%; 浙东地区则是以来自南海和黄海等海上方向的气团贡献为主, 分别为 34.43% 和 25.50%; 浙西地区受来自浙北方向和广东南部沿海方向的气团贡献最高, 分别为 32.58% 和 30.74%; 浙南地区主要受来自南海方向 (轨迹 2 和轨迹 5) 贡献最高,

达 47.54%, 其次是受黄海方向的气团贡献. 另外春夏季全省各区域间 $PM_{2.5}$ 质量浓度差异较小, 春季均值浓度最高的浙北地区与最低的浙南地区的 $\rho(PM_{2.5})$ 平均值的差值为 $10.4 \mu g \cdot m^{-3}$, 夏季最高的浙北地区与最低的浙东地区的 $\rho(PM_{2.5})$ 平均值的差值仅为 $6.1 \mu g \cdot m^{-3}$, 进一步说明随着春夏季北方气团对浙江省气团轨迹的减弱, 以及南方和东海海上气团对浙江省气流贡献的增大, $PM_{2.5}$ 质量浓度也存在好转的趋势.

3 结论

(1) 采样期间, 浙江省各地区 $\rho(PM_{2.5})$ 平均值范围为 $34.3 \sim 46.4 \mu g \cdot m^{-3}$, 浙西最高, 浙南最低. 浙江省 OM、硝酸盐、硫酸盐、铵盐、微量元素和地壳物质在总浓度中的贡献率分别为 26.4%、15.4%、12.4%、9.0%、7.1% 和 5.7%. SNA 贡献率达到 36.8%, 因此浙江省 $PM_{2.5}$ 的二次转化反应较为活跃. 各区域 $PM_{2.5}$ 组分构成基本一致, 对 $PM_{2.5}$ 贡献比较大的物种主要是 SNA、OM、微量元素和地壳物质.

(2) 秋季和冬季 $PM_{2.5}$ 浓度较高, 超出均值 13.9%; 夏季 $PM_{2.5}$ 浓度最低, 低于均值 24.3%. 各

地区夏季 PM_{2.5} 浓度均小于秋季、冬季和春季。浙北地区秋季、春季和夏季 OM 对 PM_{2.5} 的贡献率均最高, 分别为 22.9%、24.6% 和 26.1%, 冬季则是硝酸盐贡献率最大(28.7%)。同样的浙东地区也是秋季、春季和夏季 OM 对 PM_{2.5} 的贡献率均最高, 分别为 29.2%、28.2% 和 27.4%, 冬季硝酸盐贡献率最大(24.5%)。浙西和浙南地区, 各季节 OM 在 PM_{2.5} 的贡献率均最高,

(3) 不同功能区点位来看, 采样期内居民区点位 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 最高, 达到 $(50.1 \pm 10.6) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 沿海地区文化娱乐区点位 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 最低, 仅有 $(37.2 \pm 5.6) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。风景名胜区的 OM 在 PM_{2.5} 中最高贡献率出现在夏季(达到 30.2%), 由于夏季为该风景名胜区的旅游旺季, 景区内机动车尾气排放来源的增加带动 OM 浓度的增长。另外由于商业交通居民混合区的机动车排放来源大, OM 在秋季、冬季、春季和夏季四季贡献率均为最高, 内陆地区达 21.7%~31.5%, 沿海地区达 26.2%~31.2%。

(4) 浙江省各区域秋季和冬季主要受北方及东部沿海地区输入的气流轨迹影响, 春季和夏季受来自南海、东海等海上远距离传输气团的影响。各区域间 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 差值在秋季和冬季分别为 $21.0 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $20.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 春季和夏季分别为 $10.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $6.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 说明北方气团对浙江省秋季和冬季 PM_{2.5} 存在一定的外源性贡献, 春季和夏季北方气团对浙江省气团轨迹的减弱, 以及南方和东海海上气团对浙江省气流贡献的增大, PM_{2.5} 质量浓度也存在好转的趋势。

参考文献:

- [1] Wang S X, Hao J M. Air quality management in China: issues, challenges, and options[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, **24**(1): 2-13.
- [2] 张殷俊, 陈曦, 谢高地, 等. 中国细颗粒物(PM_{2.5})污染状况和空间分布[J]. *资源科学*, 2015, **37**(7): 1339-1346.
Zhang Y J, Chen X, Xie G D, *et al.* Pollution status and spatial distribution of PM_{2.5} in China[J]. *Resources Science*, 2015, **37**(7): 1339-1346.
- [3] Huang X J, Tang G Q, Zhang J K, *et al.* Characteristics of PM_{2.5} pollution in Beijing after the improvement of air quality[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, **100**: 1-10.
- [4] 李沈鑫, 邹滨, 刘兴权, 等. 2013-2015 年中国 PM_{2.5} 污染状况时空变化[J]. *环境科学研究*, 2017, **30**(5): 678-687.
Li S X, Zou B, Liu X Q, *et al.* Pollution status and spatial-temporal variations of PM_{2.5} in China during 2013-2015[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, **30**(5): 678-687.
- [5] Pui D Y H, Chen S C, Zuo Z L. PM_{2.5} in China: measurements, sources, visibility and health effects, and mitigation[J]. *Particulology*, 2014, **13**: 1-26.
- [6] 芮巍, 谭明典, 张芳, 等. 大气颗粒物对健康的影响[J]. *中国科学: 生命科学*, 2014, **44**(6): 623-627.
Rui W, Tan M D, Zhang F, *et al.* Adverse health effects of particulate matter[J]. *Scientia Sinica (Vita)*, 2014, **44**(6): 623-627.
- [7] 胡彬, 陈瑞, 徐建勋, 等. 雾霾超细颗粒物的健康效应[J]. *科学通报*, 2015, **60**(30): 2808-2823.
Hu B, Chen R, Xu J X, *et al.* Health effects of ambient ultrafine (nano) particles in haze[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, **60**(30): 2808-2823.
- [8] Zhao H J, Che H Z, Zhang X Y, *et al.* Characteristics of visibility and particulate matter (PM) in an urban area of Northeast China[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2013, **4**(4): 427-434.
- [9] Gu J X, Bai Z P, Li W F, *et al.* Chemical composition of PM_{2.5} during winter in Tianjin, China[J]. *Particulology*, 2011, **9**(3): 215-221.
- [10] 赵辉, 郑有飞, 吴晓云, 等. 我国典型区域 PM_{2.5} 化学组分特征及来源解析[J]. *科学技术与工程*, 2014, **14**(31): 129-135, 154.
Zhao H, Zheng Y F, Wu X Y, *et al.* PM_{2.5} Chemical component characteristics and source apportionment in our domestic typical areas[J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, **14**(31): 129-135, 154.
- [11] 李伟芳, 白志鹏, 魏静东, 等. 天津冬季大气中 PM_{2.5} 及其主要组分的污染特征[J]. *中国环境科学*, 2008, **28**(6): 481-486.
Li W F, Bai Z P, Wei J D, *et al.* Pollution characteristics of PM_{2.5} and its main components in Tianjin winter atmosphere[J]. *China Environmental Science*, 2008, **28**(6): 481-486.
- [12] Huang W, Cao J J, Tao Y B, *et al.* Seasonal variation of chemical species associated with short-term mortality effects of PM_{2.5} in Xi'an, a central city in China[J]. *American Journal of Epidemiology*, 2012, **175**(6): 556-566.
- [13] 刀谱, 李健军, 唐桂刚, 等. 国家大气颗粒物组分监测网的设计发展展望[J]. *中国环境监测*, 2019, **35**(6): 16-27.
Dao X, Li J J, Tang G G, *et al.* Prospects and design of national atmospheric particulate chemical-speciation-network [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2019, **35**(6): 16-27.
- [14] 赵靛, 刘保献, 杨懂艳, 等. 大气细颗粒物组分分析及研究[J]. *现代科学仪器*, 2014, (3): 123-126.
Zhao L, Liu B X, Yang D Y, *et al.* Analysis and research on atmosphere fine particle main components[J]. *Modern Scientific Instruments*, 2014, (3): 123-126.
- [15] 张棕巍, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 厦门市大气 PM_{2.5} 中水溶性离子污染特征及来源解析[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(7): 1947-1954.
Zhang Z W, Hu G R, Yu R L, *et al.* Characteristics and sources apportionment of water-soluble ions in PM_{2.5} of Xiamen City, China[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(7): 1947-1954.
- [16] 孟琛琛, 王丽涛, 张芬芬, 等. 邯郸市 PM_{2.5} 中水溶性无机离子污染特征及来源解析[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(11): 3443-3451.
Meng C C, Wang L T, Zhang F F, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of water soluble inorganic ions in PM_{2.5} in Handan City [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(11): 3443-3451.
- [17] 乔宝文, 刘子锐, 胡波, 等. 北京冬季 PM_{2.5} 中金属元素浓度特征和来源分析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 876-883.
Qiao B W, Liu Z R, Hu B, *et al.* Concentration characteristics and sources of trace metals in PM_{2.5} during wintertime in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 876-883.
- [18] 田莎莎, 张显, 卞思思, 等. 沈阳市 PM_{2.5} 污染组分特征及其

- 来源解析[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(2): 487-496.
- Tian S S, Zhang X, Bian S S, *et al.* Characteristics of PM_{2.5} pollution components and their sources in Shenyang[J]. China Environmental Science, 2019, **39**(2): 487-496.
- [19] 张承中, 马文静, 李勇, 等. 西安市夏末秋初 PM_{2.5} 中碳组分分析[J]. 环境工程, 2015, **33**(5): 95-99.
- Zhang C Z, Ma W J, Li Y, *et al.* Analysis of carbon components in PM_{2.5} during late summer and early autumn of Xi'an City[J]. Environmental Engineering, 2015, **33**(5): 95-99.
- [20] 崔倩, 张艳平, 莫杨, 等. 我国主要城市大气颗粒物及碳组分污染水平研究进展[J]. 环境卫生学杂志, 2021, **11**(3): 287-295.
- Cui Q, Zhang Y P, Mo Y, *et al.* Research advances in atmospheric particulate matter and carbon component pollution levels in major cities of China[J]. Journal of Environmental Hygiene, 2021, **11**(3): 287-295.
- [21] Liang Z B, Zhao X F, Chen J Y, *et al.* Seasonal characteristics of chemical compositions and sources identification of PM_{2.5} in Zhuhai, China[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2019, **41**(2): 715-728.
- [22] 陈文聪. 杭州地区大气颗粒物污染特征与来源解析[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [23] 张会涛, 田瑛泽, 刘保双, 等. 武汉市 PM_{2.5} 化学组分时空分布及聚类分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(11): 4764-4773.
- Zhang H T, Tian Y Z, Liu B S, *et al.* Spatial temporal characteristics and cluster analysis of chemical components for ambient PM_{2.5} in Wuhan[J]. Environmental Science, 2019, **40**(11): 4764-4773.
- [24] 刘保献, 张大伟, 陈添, 等. 北京市 PM_{2.5} 主要化学组分浓度水平研究与特征分析[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(12): 4053-4060.
- Liu B X, Zhang D W, Chen T, *et al.* Characteristics and major chemical compositions of PM_{2.5} in Beijing[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(12): 4053-4060.
- [25] 杨复沫, 贺克斌, 马永亮, 等. 北京 PM_{2.5} 化学物种的质量平衡特征[J]. 环境化学, 2004, **23**(3): 326-333.
- Yang F M, He K B, Ma Y L, *et al.* Characterization of mass balance of PM_{2.5} chemical speciation in Beijing[J]. Environmental Chemistry, 2004, **23**(3): 326-333.
- [26] 王琴, 张大伟, 刘保献, 等. 基于 PMF 模型的北京市 PM_{2.5} 来源的时空分布特征[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(10): 2917-2924.
- Wang Q, Zhang D W, Liu B X, *et al.* Spatial and temporal variations of ambient PM_{2.5} source contributions using positive matrix factorization[J]. China Environmental Science, 2015, **35**(10): 2917-2924.
- [27] 丁萌萌, 周健楠, 刘保献, 等. 2015 年北京城区大气 PM_{2.5} 中 NH₄⁺、NO₃⁻、SO₄²⁻ 及前体气体的污染特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(4): 1307-1316.
- Ding M M, Zhou J N, Liu B X, *et al.* Pollution characteristics of NH₄⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻ in PM_{2.5} and their precursor gases during 2015 in an urban area of Beijing[J]. Environmental Science, 2017, **38**(4): 1307-1316.
- [28] 曹阳, 安欣欣, 刘保献, 等. 北京市黑碳气溶胶浓度特征及其主要影响因素[J]. 环境科学, 2021, **42**(12): 5633-5643.
- Cao Y, An X X, Liu B X, *et al.* Characteristics and main influencing factors of black carbon aerosol in Beijing[J]. Environmental Science, 2021, **42**(12): 5633-5643.
- [29] 安欣欣, 曹阳, 王琴, 等. 北京城区 PM_{2.5} 各组分污染特征及来源分析[J]. 环境科学, 2022, **43**(5): 2251-2261.
- An X X, Cao Y, Wang Q, *et al.* Chemical characteristics and source apportionment of PM_{2.5} in urban area of Beijing[J]. Environmental Science, 2022, **43**(5): 2251-2261.
- [30] 任娇, 赵荣荣, 王铭, 等. 太原市冬季不同污染程度下 PM_{2.5} 的化学组成、消光特征及氧化潜势[J]. 环境科学, 2022, **43**(5): 2317-2328.
- Ren J, Zhao R R, Wang M, *et al.* Chemical compositions, light extinction effect, and oxidative potential of PM_{2.5} under different pollution levels during winter in Taiyuan[J]. Environmental Science, 2022, **43**(5): 2317-2328.
- [31] 孙友敏, 范晶, 徐标, 等. 省会城市不同功能区大气 PM_{2.5} 化学组分季节变化及来源分析[J]. 环境科学, 2022, **43**(5): 2304-2316.
- Sun Y M, Fan J, Xu B, *et al.* Source apportionment and seasonal changes in PM_{2.5} chemical components from different functional areas of a provincial capital city[J]. Environmental Science, 2022, **43**(5): 2304-2316.
- [32] 杨梦蓉, 潘勇, 黄仲文, 等. 宁波市春节期间水溶性离子污染来源和特征分析[J]. 环境科学, 2022, **43**(4): 1716-1724.
- Yang M R, Pan Y, Huang Z W, *et al.* Source analysis and composition characteristics of water-soluble ions during Spring Festival in Ningbo[J]. Environmental Science, 2022, **43**(4): 1716-1724.
- [33] 蒋琦清, 陈文聪, 徐冰焱, 等. 杭州城区大气颗粒物污染特征及 PM_{2.5} 潜在源区研究[J]. 中国环境监测, 2020, **36**(5): 88-95.
- Jiang Q Q, Chen W C, Xu B Y, *et al.* The characteristics of atmospheric particles and potential sources of PM_{2.5} in urban Hangzhou[J]. Environmental Monitoring in China, 2020, **36**(5): 88-95.
- [34] Liu G, Li J H, Wu D, *et al.* Chemical composition and source apportionment of the ambient PM_{2.5} in Hangzhou, China[J]. Particulology, 2015, **18**: 135-143.
- [35] Xu J S, Xu M X, Snape C, *et al.* Temporal and spatial variation in major ion chemistry and source identification of secondary inorganic aerosols in Northern Zhejiang Province, China[J]. Chemosphere, 2017, **179**: 316-330.
- [36] 罗干, 王体健, 赵明, 等. 基于在线监测的南京仙林 PM_{2.5} 组分特征与来源解析[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(5): 1857-1868.
- Luo G, Wang T J, Zhao M, *et al.* Chemical composition and source apportionment of fine particulate matter in Xianlin area of Nanjing basing on-line measurement[J]. China Environmental Science, 2020, **40**(5): 1857-1868.
- [37] 王曼婷, 朱彬, 王红磊, 等. 长三角冬季一次霾过程气溶胶及其水溶性离子的区域分布特征[J]. 环境科学, 2015, **36**(7): 2337-2345.
- Wang M T, Zhu B, Wang H L, *et al.* Composition and regional characteristics of atmosphere aerosol and its water soluble ions over the Yangtze River Delta Region in a winter haze period[J]. Environmental Science, 2015, **36**(7): 2337-2345.
- [38] 王红磊, 朱彬, 沈利娟, 等. 春节期间南京市大气气溶胶粒径分布特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 442-450.
- Wang H L, Zhu B, Shen L J, *et al.* Size distributions of aerosol during the Spring Festival in Nanjing[J]. Environmental Science, 2014, **35**(2): 442-450.
- [39] Wang N, Xu J W, Pei C L, *et al.* Air quality during COVID-19 lockdown in the Yangtze River Delta and the Pearl River Delta: two different responsive mechanisms to emission reductions in China[J]. Environmental Science & Technology, 2021, **55**(9): 5721-5730.

- [40] Sun P, Nie W, Wang T Y, *et al.* Impact of air transport and secondary formation on haze pollution in the Yangtze River Delta: in situ online observations in Shanghai and Nanjing [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **225** (6), doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117350.
- [41] 夏丽, 朱彬, 王红磊, 等. 长三角地区一次区域污染过程中细颗粒物的来源解析及其光学特性[J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 556-563.
Xia L, Zhu B, Wang H L, *et al.* Source apportionment and optical properties of fine particles associated with regional pollution in the Yangtze River Delta[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 556-563.
- [42] 杨毅红, 瞿群, 刘随心, 等. 夏季珠江三角洲地区 PM_{2.5} 化学组分特征及其对大气能见度的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(8): 2758-2767.
Yang Y H, Qu Q, Liu S X, *et al.* Chemical compositions in PM_{2.5} and its impact on visibility in summer in Pearl River Delta, China [J]. *Environmental Science*, 2015, **36** (8): 2758-2767.
- [43] Li J W, Zhang Z S, Wu Y F, *et al.* Effects of chemical compositions in fine particles and their identified sources on hygroscopic growth factor during dry season in urban Guangzhou of South China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **801**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149749.
- [44] 钱骏, 冯小琼, 陈军辉, 等. 四川盆地典型城市 PM_{2.5} 污染过程组分特征和来源解析[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(11): 4366-4376.
Qian J, Feng X Q, Chen J H, *et al.* Composition characteristics and source apportionment of PM_{2.5} pollution process in typical cities in the Sichuan Basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(11): 4366-4376.
- [45] 李瑞, 李清, 徐健, 等. 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[J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1520-1534.
Li R, Li Q, Xu J, *et al.* Regional air pollution process in winter over the Yangtze River Delta and its influence on typical northern cities [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1520-1534.
- [46] 中国环境监测总站. 环境空气颗粒物来源解析监测方法指南(试行)(第二版) [EB/OL]. <https://img1.17img.cn/17img/old/NewsImags/files/201431118462.pdf>, 2014-02-28.
- [47] 郁珍艳, 吴利红, 高大伟, 等. 浙江省四季划分方法探讨[J]. *气象科技*, 2014, **42**(3): 474-481.
Yu Z Y, Wu L H, Gao D W, *et al.* Investigation of methods for season division in Zhejiang province [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2014, **42**(3): 474-481.
- [48] 郝伟华. 成都市 PM_{2.5} 化学质量重构研究及组分变化特征分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- [49] Turpin B J, Lim H J. Species contributions to PM_{2.5} mass concentrations: revisiting common assumptions for estimating organic mass [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2001, **35** (1): 602-610.
- [50] 王申博, 范相阁, 和兵, 等. 河南省春节和疫情影响情景下 PM_{2.5} 组分特征[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(12): 5115-5123.
Wang S B, Fan X G, He B, *et al.* Chemical composition characteristics of PM_{2.5} in Henan Province during the Spring Festival and COVID-19 outbreak [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(12): 5115-5123.
- [51] 朱书慧, 周敏, 乔利平, 等. 2015 年 12 月气流轨迹对长三角区域细颗粒物浓度和分布的影响[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(12): 4285-4294.
Zhu S H, Zhou M, Qiao L P, *et al.* Impact of the air mass trajectories on PM_{2.5} concentrations and distribution in the Yangtze River Delta in December 2015 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(12): 4285-4294.
- [52] Yu S C, Zhang Q Y, Yan R C, *et al.* Origin of air pollution during a weekly heavy haze episode in Hangzhou, China [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2014, **12**(4): 543-550.
- [53] Ye B M, Ji X L, Yang H Z, *et al.* Concentration and chemical composition of PM_{2.5} in Shanghai for a 1-year period [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(4): 499-510.
- [54] Mkoma S L, Chi X G, Maenhaut W. Characterization of carbonaceous materials in PM_{2.5} and PM₁₀ size fractions in Morogoro, Tanzania, during 2006 wet season campaign [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2010, **268** (10): 1665-1670.
- [55] Cao J J, Wu F, Chow J C, *et al.* Characterization and source apportionment of atmospheric organic and elemental carbon during fall and winter of 2003 in Xi'an, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, **5**(11): 3127-3137.
- [56] 张毓秀, 任万辉, 王嘉禾, 等. 沈阳市冬季不同污染程度 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 污染特征[J]. *中国环境科学*, 2021, **41** (7): 3066-3075.
Zhang Y X, Ren W H, Wang J H, *et al.* Characteristics of organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) under different pollution levels of PM_{2.5} during winter in Shenyang [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(7): 3066-3075.

CONTENTS

Research Progress of SOA Formation from Anthropogenic VOCs Under Complex Pollution Condition	CHEN Tian-zeng, LIU Jun, MA Qing-xin, <i>et al.</i>	(1201)
Advances in Microbial Degradation and Transformation of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs)	SUN Hong-wen, FANG Bo, CHEN Hao, <i>et al.</i>	(1214)
Research Progress on Remote Sensing Monitoring of Lake Water Quality Parameters	WANG Si-meng, QIN Bo-qiang	(1228)
Research Progress on Trojan-horse Effect of Microplastics and Heavy Metals in Freshwater Environment	ZHAO Wei-gao, TIAN Yi-mei, ZHAO Peng, <i>et al.</i>	(1244)
Temporal and Spatial Characteristics of Net CO ₂ Emissions and Decoupling Analysis in Yangtze River Economic Belt	WU Yi-fan, XU Yang, TANG Yang-bo, <i>et al.</i>	(1258)
Changes in Land Use Carbon Emissions and Coordinated Zoning in China	LI Yuan-yuan, WEI Wei, ZHOU Jun-ju, <i>et al.</i>	(1267)
Multi-dimensional Analysis of the Synergistic Effect of Pollution Reduction and Carbon Reduction in Tianjin Based on the STIRPAT Model	LIU Mao-hui, YUE Ya-yun, LIU Sheng-nan, <i>et al.</i>	(1277)
Railway Emission Trends in China Based on Fuel Life Cycle Analysis	TONG Hui, FAN Zhao-yang, LIANG Xiao-yu, <i>et al.</i>	(1287)
Pollution Characteristics of PM _{2.5} Chemical Composition in Zhejiang Province	ZHOU Jing-qing, YU Lei, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i>	(1297)
Seasonal Variations, Size Distributions, and Sources of Chemical Components of Submicron Particulate Matter in Nanjing	XU Zhen-qi, SHANG Yue, DING Feng, <i>et al.</i>	(1310)
Seasonal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Components in Luoyang: Implication for Brown Carbon Contribution	YAN Guang-xuan, HOU Ming-yang, ZHANG Pu-zhen, <i>et al.</i>	(1319)
Establishment and Spatial Distribution of S/IVOCs Emission Inventory in Jiangsu Province in 2019	SONG Tong-ai, ZHANG Jia-ying, GUAN Lu, <i>et al.</i>	(1328)
Compositional Characteristics of Volatile Organic Compounds in Typical Industrial Areas of the Pearl River Delta: Importance of Oxygenated Volatile Organic Compounds	SONG Xin, YUAN Bin, WANG Si-hang, <i>et al.</i>	(1336)
Evolution and Characteristics of Full-process Vehicular VOCs Emissions in Tianjin from 2000 to 2020	SUN Lu-na, ZHONG Chong-zhi, SUN Shi-da, <i>et al.</i>	(1346)
Port-owned Mobile Source Air Pollutant Emission Inventory	XU Xiao-fan, WANG Bao-qing, WU Jun-cheng, <i>et al.</i>	(1357)
Simulation and Regulation of Sustainable Utilization of Water Resources in China Based on Improved Water Resources Ecological Footprint Model	OUYANG Xing-tao, LIAO Hao-yu, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i>	(1368)
Occurrence Distribution and Risk Assessment of Organophosphate Esters in A Typical Area of the Estuary in the Yellow River Basin	CAO Miao, GUO Chang-sheng, ZHANG Heng, <i>et al.</i>	(1378)
Pollution Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Sediments of Huixian Karst Wetland in Guilin	YU Yue, XING Xin-li, CHENG Cheng, <i>et al.</i>	(1387)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments from Major River Systems in Maoming City, Guangdong Province	CHEN Xiao-xia, ZHANG Min, LI Bei, <i>et al.</i>	(1397)
Temporal-spatial Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Water of Ningbo	XU Mei-juan, YANG Jia, REN Xiao-jing, <i>et al.</i>	(1407)
Analysis of Water Chemistry Characteristics and Hydraulic Relationships of Different Water Bodies in Typical Mountain-oasis Systems in the Northwest Inland Area	WANG Shi-yu, SUN Cong-jian, CHEN Wei, <i>et al.</i>	(1416)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Pore-water in the Middle and Upper Reaches of Muwen River	LIU Yuan-qing, ZHOU Le, LÜ Lin, <i>et al.</i>	(1429)
Spatial-temporal Variation in Groundwater Quality and the Contamination Source Analysis in Shihezi-Changji Area	DING Qi-zhen, ZHOU Jin-long, JI Yan-zhen, <i>et al.</i>	(1440)
Analysis of Mechanism and Start-up Thresholds of Seasonal Algal Blooms in a Northern Eutrophic Stratified Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, KONG Chang-hao, <i>et al.</i>	(1452)
Characteristics of Benthic Diatom Community Structure and Water Ecological Health Evaluation in the Lalin River Basin	SHAN Tao, YUAN An-long, HUANG Zi-rui, <i>et al.</i>	(1465)
Bacterioplankton Communities and Assembly Mechanisms in Wet Season of Lakes, Nanchang	GAO Peng-fei, WANG Peng, HUANG Yi, <i>et al.</i>	(1475)
Seasonal Variation and Influencing Factors of Bacterial Communities in Storage Reservoirs	DING Ning, YANG Ying-ying, WAN Nian-xin, <i>et al.</i>	(1484)
Vertical Distribution and Source Tracking Analysis of Bacteria Composition and Nitrogen Metabolism Function of a Typical Urban Inland River	TAN Qiu-yang, LÜ Jin-yan, BAI Xian-yu, <i>et al.</i>	(1497)
Contribution Analysis of External Source Pollution Load and Environmental Capacity Estimation of Reservoirs in Central Yunnan Plateau	GUO Yu-jing, LI Hong-bing, WANG Shu-ming, <i>et al.</i>	(1508)
Preparation of Narrow Pore Diameter Phosphorus Containing Cotton Stalk Carbon and Its Adsorption Mechanism for Tetracycline	ZENG Shao-yi, LI Kun-quan	(1519)
Preparation of High Specific Surface Thiourea Modified Peanut Shell Carbon and Adsorption of Tetracycline and Copper	MIN Bing-kun, LI Kun-quan	(1528)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes on Different Water Supply Pipes	LIU Chen-xu, BAI Xiao-hui	(1537)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Sequestration and Aggregate Stability in Water-Eroded Environment: A Meta-analysis	YANG Rui-zhe, YANG Shi-long, WENG Xi-zhe, <i>et al.</i>	(1542)
Effects of Warming and Fertilization on Soil Organic Carbon and Its Labile Components in Rice-wheat Rotation	DENG Xu-zhe, HAN Chen, XUE Li-xiang, <i>et al.</i>	(1553)
Horizontal Variation Characteristics of Alpine Grassland Soil Function and Vertical Changes Along Soil Genetic Horizons in the Three-River Headwaters Region	LI Bo-jian, SHEN Cong-cong, LIU Si-yi, <i>et al.</i>	(1562)
CH ₄ Fluxes and Their Comprehensive Greenhouse Effects with CO ₂ Fluxes in Direct-seeded Rice in Poyang Lake Plain	SHI Yuan-zhi, CUI Yuan-lai, CAI Shuo, <i>et al.</i>	(1572)
Vertical Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil PAHs in Different Land Use Types	ZHOU Zhi-yan, ZHANG Xiu-xiu, WANG Fei, <i>et al.</i>	(1583)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Per- and Polyfluoroalkyl Substances and Emerging Alternatives in Road Dust, Shijiazhuang	LI Peng-fei, WANG Yuan, YANG Chen, <i>et al.</i>	(1593)
Spatial Distribution Characteristics and Assessment of Heavy Metal Pollution in Cultivated Soil of Agricultural Small Watershed in Typical Mining Area in South China	YANG Yu, GUO Ting-ting, LIU Xiao-li, <i>et al.</i>	(1602)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Vegetable Field in the Three Gorges Reservoir Area (Chongqing Section)	SHI Yu-jia, FANG Lin-fa, FANG Biao, <i>et al.</i>	(1611)
Accumulation Characteristics and Influencing Factors of Heavy Metals in Cultivated Land Surface Soil in Lanzhou	KANG Le, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i>	(1620)
Enrichment Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Industrial and Mining Area of Northern Guangdong Province	WANG Yue, MO Li, YU Xin-xiao, <i>et al.</i>	(1636)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soil of a Lead Plant in Sanmenxia	LU Xiao-hui, YU Fang-zhong, FAN Yi-ming, <i>et al.</i>	(1646)
Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soils of a Testing Range	WANG Shi-yu, LI Chun, ZHAO Hong-wei, <i>et al.</i>	(1657)
Effectiveness and Mechanisms of Chemical Leaching Combined with Electrokinetic Technology on the Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil	MA Qiang, WEI Ze-bin, WU Qi-tang	(1668)
Emission Characteristics and Control of Heavy Metals in Secondary Copper Smelting Process	LIN Bing-cheng, WU Guang-long, ZHENG Ming-hui, <i>et al.</i>	(1678)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Soil-crops System in Anhui Section of the Yangtze River Basin	LIU Hai, WEI Wei, HUANG Jian-min, <i>et al.</i>	(1686)
In-situ Remediation Effect of Cadmium-polluted Agriculture Land Using Different Amendments Under Rice-wheat Rotation	ZHANG Lu, TANG Chan, YU Hai-ying, <i>et al.</i>	(1698)
Effect and Persistent Effect of Thiolated Montmorillonite on Safe Production in Cadmium-contaminated Cropland	FENG Xian-cui, CHEN Ya-gang, JIAO Hong-peng, <i>et al.</i>	(1706)
Effects of Earthworm, Straw, and Citric Acid on the Remediation of Zn, Pb, and Cd Contaminated Soil by <i>Solanum photeinocarpum</i> and <i>Pterocypselia indica</i>	CHEN Min-ni, NIE Xiao-qi, ZHANG Xing-feng, <i>et al.</i>	(1714)
Availability of Se-rich Arable Land in High Geological Background Area and Suggestions for Zoning	WANG Rui, LI Yu, YU Jing, <i>et al.</i>	(1727)
Characteristics and Causes of Ge Enrichment in Vegetable Growing Areas of Beixintun Town, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, JIN Ai-fang, <i>et al.</i>	(1735)
Structural Diversity and Its Temporal Variation in the Soil Bacterial Community Under Plantations of <i>Taxodium distichum</i> in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir Area	TAN Xue, DONG Zhi, ZHANG Li-miao, <i>et al.</i>	(1748)
Effect of the Process of Returning Farmland to Forest in the Loess Hilly Area on Soil Fungal Communities	ZHANG Lei, WANG Qiang, YANG Xin-yue, <i>et al.</i>	(1758)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Substitute with Organic Fertilizer on Soil Functional Microbes and Lemon Yield and Quality	WANG Ying-yan, XIONG Zi-yi, LUO Dong-hai, <i>et al.</i>	(1768)
Dynamic Changes in Antibiotic Resistance Genes During Biological Fermentation of Chicken Manure and Pig Manure	ZHANG Dan, PENG Shuang, WANG Dan-qing, <i>et al.</i>	(1780)
Effects of Cow Manure Application on Soil Microbial Community in Farmland	ZHANG Ya-li, GUO Xiao-ming, HU Hui, <i>et al.</i>	(1792)