

### 北京城区PM<sub>2.5</sub>各组分污染特征及来源分析

安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心  
■ 出版 科学出版社



2022年5月

第43卷 第5期  
Vol.43 No.5

目次

北京城区 PM<sub>2.5</sub> 各组分污染特征及来源分析 ..... 安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献 (2251)

基于时空混合效应模型的京津冀 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化模拟 ..... 范丽行, 杨晓辉, 宋春杰, 李梦诗, 段继福, 王卫, 李夫星, 李伟妙 (2262)

2000~2018年京津冀城市群 PM<sub>2.5</sub> 时空演变及其与城市扩张的关联 ..... 赵安周, 相恺政, 刘宪锋, 张向蕊 (2274)

海-陆大气交汇作用下青岛冬季天气 PM<sub>2.5</sub> 污染特征与来源解析 ..... 虞雄, 杨凌霄, 张婉, 齐安安, 王滢铭, 王鹏程, 黄琦, 赵彤, 张雄飞, 徐鹏, 张天琪, 王文兴 (2284)

硫酸盐非均相机制对颗粒物污染的影响: 上海典型污染事件的 WRF-Chem 模拟 ..... 张茹涵, 张皓然, 冯伟航, 汤克勤, 马亚平, 王红丽, 黄成, 胡建林, 张宏亮, 李楠 (2294)

省会城市不同功能区大气 PM<sub>2.5</sub> 化学组分季节变化及来源分析 ..... 孙友敏, 范晶, 徐标, 李彦, 韩红, 张桂芹 (2304)

太原市冬季不同污染程度下 PM<sub>2.5</sub> 的化学组成、消光特征及氧化潜势 ..... 任娇, 赵荣荣, 王铭, 张欢欢, 尹诗杰, 薛永刚 (2317)

郑州市冬季大气 PM<sub>2.5</sub> 金属元素来源及健康风险评估 ..... 姚森, 王乾恒, 薛妍, 史来文, 张俊美, 杨书申 (2329)

淄博市冬季 PM<sub>2.5</sub> 载体金属元素污染特征、生态风险评估及来源分析 ..... 白雯宇, 徐勃, 郭丽瑶, 殷宝辉, 马银红, 李丽明, 杨文, 赵雪艳 (2336)

承德市 PM<sub>2.5</sub> 中多环芳烃的季节分布特征、来源解析及健康风险评估 ..... 贺博文, 聂赛赛, 李仪琳, 郭睿瑶, 姚波, 崔建升, 冯亚平, 王帅, 侯晓松 (2343)

珠三角大气中二噁英污染水平与区域迁移 ..... 付建平, 谢丹平, 黄锦琼, 杨艳艳, 冯桂贤, 周长风, 廖海婷, 青亮, 张漫雯, 吴明亮, 张素坤 (2355)

华北平原南部农村地区黑碳气溶胶浓度及来源 ..... 张玲, 孔少飞, 郑煌, 胡亮, 曾昕, 程溢, 祁士华 (2363)

基于模式过程分析技术天津地区 PM<sub>2.5</sub> 污染气象成因分析 ..... 郝团, 蔡子颖, 韩素芹, 杨旭, 樊文雁, 姚青, 邱晓滨 (2373)

基于排放量和大气反应活性的 VOCs 污染源分级控制 ..... 陈鹏, 张月, 邢敏, 李珊珊 (2383)

基于复杂网络的中国臭氧拓扑特征 ..... 菅娜, 陈建华, 李冬, 王迪, 薛志钢 (2395)

基于前体物多情景排放的兰州市 2030 年夏季臭氧预测 ..... 陈天雷, 吴敏, 潘成珂, 常莉敏, 李洪, 刘鹏, 高宏, 黄韬, 马建民 (2403)

基于源反演和气溶胶同化方法天津空气质量模式预报能力改进 ..... 蔡子颖, 唐邈, 肖致美, 杨旭, 朱玉强, 韩素芹, 徐虹, 邱晓滨 (2415)

基于空气质量监测数据的钢铁行业污染源识别方法 ..... 石耀鹏, 胡京南, 褚晰晰, 段青春, 胡丙鑫, 殷丽娜, 吕玲玲 (2427)

重污染天气应对“绩效分级、差异化管控”措施首次实践效果后评估 ..... 曾景海, 王灿 (2436)

黄河流域水污染风险分区 ..... 周夏飞, 曹国志, 於方, 杨威杉, 徐泽升 (2448)

黄河流域甘肃段工业行业水污染物空间排放特征 ..... 李雪迎, 杨曦, 乔琦, 刘丹丹, 张玥, 赵若楠, 白璐 (2459)

黄河沉积物重金属时空分布与污染评价 ..... 王韬轶, 潘保柱, 韩语, 王雨竹, 李晨辉, 杜蕾 (2467)

APCS-MLR 结合 PMF 模型解析厦门杏林湾近郊流域沉积物金属来源 ..... 沈宸宇, 闫钰, 于瑞莲, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (2476)

河流底泥 DOM、营养盐与重金属空间分异特征及响应关系 ..... 肖艳春, 于会彬, 宋永会 (2489)

太原市汾河河岸带土壤重金属分布特征、评价与来源解析 ..... 胡杰, 赵心语, 王婷婷, 苟奎贤, 王春玲 (2500)

洪泽湖溶解态有机质与重金属汞的结合特性 ..... 胡斌, 王沛芳, 张楠楠, 包天力, 金秋彤 (2510)

富营养化驱动下西凉湖百年生态演化轨迹 ..... 郑佳楠, 徐敏, 郑文秀, 朱可欣, 王荣, 张恩楼 (2518)

基于 DGT 技术的黄河上游典型水库沉积物氮磷释放与污染源解析 ..... 马玉坤, 朱翔, 庞晴晴, 孔明, 韩天伦, 彭福全, 谢磊, 汪龙眠, 徐斌, 何斐 (2527)

暴雨前后河南北部河流水质分异特征及其污染源解析 ..... 张彦, 邹磊, 梁志杰, 姜明, 李平, 黄仲冬, 齐学斌 (2537)

鄱阳湖流域水葫芦 (*Eichhornia crassipes*) 对水体微塑料的吸附截留效应 ..... 李文刚, 吴希恩, 简敏菲, 刘淑丽, 刘海球, 丁惠君 (2548)

太湖塑料添加剂时空分布和生态风险评估 ..... 刘舒娇, 丁剑楠, 石浚哲, 张军毅, 庄严, 邹华 (2557)

骆马湖表层沉积物微塑料的分布、来源及储量 ..... 姚明轩, 白雪, 徐振佳, 李凤杰, 陆滢, 李畅, 华祖林 (2566)

太湖不同介质中磷的污染特征及其治理启示 ..... 蔡梅, 陆志华, 王元元, 钱旭 (2575)

辽河四平段流域河流沉积物微生物群落多样性和结构分析 ..... 李鹏洋, 安启睿, 王新皓, 孙思宇, 李元乾, 郑娜 (2586)

面源污染诱导嘉陵江沉积物中细菌群落结构与功能异变 ..... 薛玉琴, 徐飞, 刘坤和, 王佳颖, 竹兰萍, 朱志豪, 张拓 (2595)

微塑料对沉积物细菌群落组成和多样性的影响 ..... 李汶璐, 王志超, 杨文煊, 张博文, 李卫平 (2606)

白洋淀冬季沉积物好氧反硝化菌垂直分布特征及群落构建 ..... 张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 周石磊, 孟佳靖, 陈哲, 张一凡, 董宛佳, 崔建升 (2614)

人工诱导水库分层水体提前混合对细菌群落结构和代谢活性的影响 ..... 高悦, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 司凡, 杨斌 (2624)

鄱阳湖典型区铜锈环螺体内微塑料分布特征 ..... 江为群, 胡启武, 简敏菲, 邹龙, 刘淑丽 (2633)

负载多壁碳纳米管的多孔 Ti/SnO<sub>2</sub>-Sb-Ni 电极催化氧化双酚 A ..... 符远航, 刘安迪, 黄纬斌, 唐柏彬, 张进忠 (2640)

磁性 Mn<sub>0.6</sub>Zn<sub>0.4</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>@SiO<sub>2</sub> 催化 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 降解亚甲基蓝效能及机制 ..... 徐冬莹, 余静, 郝旗, 杨迎春, 方淑红 (2650)

两种纳米颗粒对沸石吸附环丙沙星的影响 ..... 蒋兰翠, 孟昭福, 刘贤, 刘欣, 王新欣, 曹雪雯 (2662)

AMD 污泥复合材料吸附 As(V) 的机制及其影响因素 ..... 张亚辉, 张瑞雪, 吴攀, 陈世万, 杨艳, 安丽, 傅渝然, 张子豪 (2673)

三氯生及其降解中间产物对活性污泥中微生物群落变化和硝化反硝化功能基因的影响 ..... 卢英源, 董小琦, 彭星然, 贾晓珊 (2685)

污染场地风险管控可持续评价指标体系构建及关键影响因素分析 ..... 李笑诺, 易诗懿, 陈卫平 (2699)

基于生态功能的滨海湿地土壤质量综合评价方法构建及实证分析 ..... 张雪, 孔范龙, 姜志翔 (2709)

铜山矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价 ..... 陈航, 王颖, 王澍 (2719)

典型铁、锰矿物对稻田土壤砷形态与酶活性的影响 ..... 周一敏, 黄雅媛, 刘凯, 赵儒乐, 李冰玉, 雷鸣 (2732)

两种油菜施肥水溶性壳聚糖修复典型铅污染农田土壤 ..... 孟晓飞, 郑国砥, 陈同斌, 杨俊兴, 郭俊梅, 刘杰 (2741)

基于贝叶斯理论的小麦籽粒镉铅超标风险预测 ..... 王天齐, 李艳玲, 杨阳, 牛硕, 王美娥, 陈卫平 (2751)

紫色土旱坡地油菜/玉米轮作下氮流失的年度变化特征 ..... 徐曼, 高明, 余添, 朱浩宇, 邓华, 王子芳 (2758)

不同原料生物炭的理化特性及其作炭基肥缓释载体的潜力评价 ..... 邢莉彬, 成洁, 耿增超, 张宏伟, 梁宏旭, 王强, 孙倩倩, 李艳 (2770)

木醋液酸化生物炭与氮素配施对盐渍土壤活性氮及氨挥发的影响 ..... 申书伟, 张丹丹, 王敏鸽, 王旭东 (2779)

生物可降解地膜覆盖对关中地区小麦-玉米农田温室气体排放的影响 ..... 郭怡婷, 罗晓琦, 王锐, 陈海心, 冯浩 (2788)

戴云山南坡不同海拔森林土壤微生物群落结构特征和影响因素 ..... 何中声, 王紫薇, 朱静, 陈佳嘉, 谷新光, 江蓝, 陈博, 吴则焰, 刘金福, 陈文伟 (2802)

模拟增温和降雨增加对撂荒草地土壤胞外酶活性及计量特征的影响 ..... 王兴, 钟泽坤, 简俊楠, 张硕宏, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娇, 韩新辉 (2812)

中国主要城市的城市化对局地增温的贡献 ..... 李宇, 周德成, 闫章美, 张良侠 (2822)

《环境科学》征订启事(2293) 《环境科学》征稿简则(2426) 信息(2585, 2672, 2708)

# 基于复杂网络的中国臭氧拓扑特征

营娜, 陈建华, 李冬, 王迪, 薛志钢\*

(中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012)

**摘要:** 伴随着颗粒物浓度的快速下降, 大气臭氧( $O_3$ )污染呈快速上升和蔓延态势, 已成为制约我国空气质量持续改善的瓶颈问题之一. 因此, 理清  $O_3$  浓度变化特征对于改善空气质量有重要意义. 应用复杂网络方法, 基于城市间  $O_3$  浓度的相关关系和其时滞, 构建中国  $O_3$  浓度网络, 并分析  $O_3$  浓度的关联结果和传输特征. 结果表明, 统计指标度、加权度和连边长度的概率密度函数遵循幂律分布, 这说明  $O_3$  浓度的变化不是随机的, 存在一定的规律性. 加权度的空间分布分析表明, 加权度的高值集中在京津冀和周边地区, 与  $O_3$  浓度高值区分布一致. 其中, 北京、天津和河北东部(渤海湾沿线)城市向其他城市传输的能力较强. 并且, 冬季传输能力强于其它季节, 主要是受到冬季风的影响. 研究结果不仅有助于理解  $O_3$  浓度变化特征, 也是复杂网络方法应用到大气环境中的有益尝试.

**关键词:** 臭氧污染; 臭氧浓度; 复杂网络; 拓扑特征

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)05-2395-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202108172

## Complex Networks Reveal the Characteristics of Ozone in China

YING Na, CHEN Jian-hua, LI Dong, WANG Di, XUE Zhi-gang\*

(State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract:** Along with the rapid decline in fine particulate matter concentrations, ozone ( $O_3$ ) pollution is rapidly rising and spreading, which has become one of the critical issues that limit the improvement of air quality in China. It is important to understand the characteristics of  $O_3$  concentration changes to improve air quality. In this study, we applied the complex network method to construct an  $O_3$  concentration network in China and analyze the characteristics and transport of  $O_3$  concentrations. The study has shown that the probability density functions of weighted degree and edge length followed a power-law distribution, which indicated that the variation in  $O_3$  concentration was not random behavior. The analysis of the spatial distribution of the weighted degree showed that the higher weighted degrees were concentrated in the Jing-Jin-Ji-region and its surrounding areas, which was consistent with the distribution of the higher values of  $O_3$  concentrations. Cities in Beijing, Tianjin, and eastern Hebei (along the Bohai Bay) had a strong transmission ability to other cities. Thus, more control is needed in the Jing-Jin-Ji-region because this area can export  $O_3$  pollution to other cities. Moreover, the transmission capacity in winter was stronger than that in other seasons, which was mainly affected by the winter monsoon. The results of this study not only aid understanding of the characteristics of  $O_3$  concentration variabilities but are also a useful application of complex network methods to the atmospheric environment.

**Key words:** ozone pollution; ozone concentration; complex network; topological characteristics

自2013年国务院颁布《大气污染防治行动计划》以来,我国大气污染防治工作取得了巨大进展<sup>[1]</sup>.近年来,全国颗粒物浓度呈逐渐下降的趋势,优良天数和比例增加,重污染天数显著减少<sup>[2]</sup>.然而,我国臭氧( $O_3$ )浓度逐渐上升,长时间、大范围的 $O_3$ 污染事件屡屡发生,影响了数亿人口的生产和生活<sup>[3,4]</sup>.2019年,全国337个城市年 $\rho(O_3)$ 平均值为 $138 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ <sup>[5]</sup>,其中,超过一半的城市 $O_3$ 浓度低于国家二级标准限值. $O_3$ 已成为部分城市空气质量不达标的首要因素,是我国空气质量持续改善的重要问题<sup>[6-8]</sup>.

$O_3$ 是一种二次污染物,其化学形成过程具有很强的非线性<sup>[9,10]</sup>. $O_3$ 浓度的变化高度依赖于气象因素,具有局地、区域和季节尺度的特征.局地尺度看,短期 $O_3$ 浓度的变化和当地气象因素有关,晴空、高温和低湿条件下, $O_3$ 浓度较高<sup>[11-13]</sup>.全国大部分地区臭氧浓度与温度和边界层高度具有显著的正相关关系,与相对湿度和云量具有显著的负相关关系<sup>[14,15]</sup>.区域尺度, $O_3$ 浓度的形成受盛行风向、局

地环流和大气边界层结构的共同影响<sup>[16]</sup>.风向和风速的变化对臭氧的传输和消散也会产生影响<sup>[17,18]</sup>.季节上看,春季和秋季,温度是我国 $O_3$ 浓度变化的主导因子,相对湿度对南方城市的 $O_3$ 浓度有影响;夏季,部分区域 $O_3$ 浓度变化受温度影响,少部分区域受相对湿度影响;冬季,温度和湿度为主导的城市数量较少<sup>[19]</sup>.臭氧浓度还和前体物,即氮氧化物( $\text{NO}_x$ )和可挥发性有机化合物(VOCs)有很强关系<sup>[20-22]</sup>.臭氧与前体物敏感性研究已受到国内外学者的广泛关注.有研究发现,我国典型城市群区域VOCs控制区和 $\text{NO}_x$ 控制区分界线对应的VOCs反应活性与 $\text{NO}_x$ 反应活性的比值约为3:1~4:1<sup>[23]</sup>.不同时间段,臭氧对前体物的敏感性差异较大.在上午,京津冀、长三角和珠三角等地区臭氧生成的控制区为VOCs控制区,在下午,这些区域

收稿日期: 2021-08-16; 修订日期: 2021-10-17

基金项目: 中央财政科技计划结余经费项目(2021-JY-15); 国家重点研发计划项目(2020YFC1806303, 2019YFC0214201)

作者简介: 营娜(1988~),女,博士,助理研究员,主要研究方向为大气环境复杂性, E-mail: yingna@caes.org.cn

\* 通信作者, E-mail: xuezg@caes.org.cn

臭氧生成的控制区为  $\text{NO}_x$  控制区<sup>[24]</sup>. 不同区域臭氧对前体物的敏感性也不尽相同. 珠三角地区和台湾地区臭氧生成的控制区主要为 VOCs 控制区<sup>[25~27]</sup>. 一般而言, 城市属于 VOCs 控制区, 远郊区属于  $\text{NO}_x$  控制区, 郊区则处于二者的过渡区<sup>[28]</sup>. 此外, 天气系统和气候变化对臭氧浓度的变化也有一些影响. 全球气候变暖影响局地对流层臭氧浓度, 对流层臭氧污染也反作用于气候变化<sup>[29]</sup>. 热带气旋环流影响我国东南沿海臭氧浓度, 其外围大范围的下沉气流引起高浓度臭氧污染事件<sup>[30]</sup>; 东亚季风变化能够引起我国南部地区 10% 左右的臭氧年际差异<sup>[31]</sup>.

上述因素使得  $\text{O}_3$  的时间动态分析成为一项非常复杂的任务, 也导致了在研究复杂的和高度变化的时间序列时, 基于传统的统计分析方法描述  $\text{O}_3$  变化存在局限性. 原因是这些方法通过拟合函数来获得近似和平滑的信号, 拟合过程中存在信息损失<sup>[28]</sup>. 而复杂网络方法可以避免这一缺陷, 因为它们直接处理原始数据, 能够测度多元数据集内相互依赖结构的全部复杂性.

近 20 年来, 复杂系统科学研究领域最重要的发展就是在数学图论的基础上逐步完善了复杂网络的思想和方法. 在复杂网络中, 网络节点是空间某一位置的时间序列, 连边是任意两个空间位置上时间序列的统计关联, 边的强度由节点之间关联性的强度量化<sup>[32~35]</sup>. 复杂网络方法已经被国内外大气环境相关领域专家和学者所关注, 并在大气环境研究中得到良好应用. Zhang 等<sup>[36]</sup>的研究通过复杂网络方法建立了  $\text{PM}_{2.5}$  浓度和位势高度耦合网络, 揭示 Rossby 波对  $\text{PM}_{2.5}$  浓度变化的影响. Li 等<sup>[37]</sup>的研究构建京津冀地区  $\text{PM}_{2.5}$  浓度网络, 分析了京津冀地区  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的空间的传输特征. 肖琴

等<sup>[38]</sup>的研究应用复杂网络方法对中国城市  $\text{PM}_{2.5}$  浓度网络进行划分. Carmona-Cabezas 等<sup>[39]</sup>的研究应用复杂网络方法, 对安达卢西亚城市和农村  $\text{O}_3$  浓度进行区分.

复杂网络可以看作是研究大气环境相互关系的一种补充方法, 它继承了时间序列的特征, 最终通过度/加权重指标提供有用的信息. 本研究将采用复杂网络的方法, 以城市为节点, 构建了包含全国 335 个城市的  $\text{O}_3$  浓度加权网络, 并分析近地面  $\text{O}_3$  浓度拓扑特征, 来深化对  $\text{O}_3$  浓度变化的认识.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究数据

本研究使用的数据为 2015 年 1 月 1 日至 2019 年 12 月 31 日中国  $\text{O}_3$  的日最大 8 h 滑动平均浓度 ( $\text{O}_3$ -8h, 下文  $\text{O}_3$  浓度均指  $\text{O}_3$ -8h 浓度), 数据来源于中国环境监测总站全国城市空气质量实时发布平台(中国香港、澳门和台湾数据暂缺), 经过对数据的处理, 共获得 335 个城市, 1 800 d 时间序列.

### 1.2 研究方法

本文中, 以各个城市为节点, 城市间  $\text{O}_3$  浓度关系为连边. 通过设置合适的阈值, 构建中国  $\text{O}_3$  浓度网络模型.

#### 1.2.1 数据预处理

首先去除  $\text{O}_3$  浓度数据中包含的季节性变化, 处理后的数据记为  $T_i(l)$ , 其中,  $i$  代表节点,  $i = 1, 2, 3, \dots, 335$ ,  $l$  代表总天数 ( $d$ ),  $l = 1, 2, 3, \dots, 1 800$ .

#### 1.2.2 计算节点间关联

网络上每对节点  $i$  和  $j$  之间的相关性连接可通过计算相关系数  $X_{i,j}(\tau)$  来得到. 计算方法参考已有研究<sup>[40,41]</sup>, 具体公式见式(1)和式(2).

$$X_{i,j}(\tau) = \frac{\sum_{t=1}^{l-\tau} [T_i(t+\tau) - \bar{T}_i][T_j(t) - \bar{T}_j]}{\sqrt{\sum_{t=1}^{l-\tau} [T_i(t+\tau) - \bar{T}_i]^2} \cdot \sqrt{\sum_{t=1}^{l-\tau} [T_j(t) - \bar{T}_j]^2}} \quad (1)$$

$$X_{i,j}(-\tau) = \frac{\sum_{t=1}^{l-\tau} [T_i(t) - \bar{T}_i][T_j(t-\tau) - \bar{T}_j]}{\sqrt{\sum_{t=1}^{l-\tau} [T_i(t) - \bar{T}_i]^2} \cdot \sqrt{\sum_{t=1}^{l-\tau} [T_j(t-\tau) - \bar{T}_j]^2}} \quad (2)$$

式中,  $\tau$  为时滞(以天数计).  $\tau = -\tau_{\max}; -\tau_{\max} + 1, \dots, \tau_{\max} - 1; \tau_{\max} \times \tau_{\max} = 30 \text{ d}$ . 为了避免边缘效应, 此处  $t$  的范围是  $1 \sim l - \tau_{\max}$ .

计算正连接权重和负连接权重, 公式定义如式(3)和式(4):

$$W_{i,j}^+ = \frac{\max(X_{i,j}) - (\bar{X}_{i,j})}{\sigma(X_{i,j})} \quad (3)$$

$$W_{i,j}^- = \frac{\min(X_{i,j}) - (\bar{X}_{i,j})}{\sigma(X_{i,j})} \quad (4)$$

式中,  $\max(X_{i,j})$ 、 $\min(X_{i,j})$ 、 $(\bar{X}_{i,j})$  和  $\sigma(X_{i,j})$  分别

为  $\tau$  范围内相关系数的最大值、最小值、平均值和标准差. 除以  $\sigma(X_{i,j})$  是为了去除时间序列中由于自相关效应而导致的偏差.  $X_{i,j}(\tau)$  的最大值定义为:  $P_{i,j}^+[P_{i,j}^+ = \max(X_{i,j})]$ .  $X_{i,j}(\tau)$  的最小值定义为:  $P_{i,j}^-[P_{i,j}^- = \min(X_{i,j})]$ .  $\tau_{i,j}^+$  和  $\tau_{i,j}^-$  分别为  $X_{i,j}$  取得最大值和最小值所对应的时滞, 它们代表了正向连接或负向连接的方向.

1.2.3 显著性连边识别

为了识别显著性连边, 本文将原始数据进行随机重排 (shuffling), 构建方法参考以往研究<sup>[41,42]</sup>. 为了便于区分, 将基于原始数据构建的网络称为原始网络, 后者称为随机网络.

通过分析原始网络和随机网络的性质, 设置合适的阈值  $Q$  来分析原始网络中具有统计意义的连边. 具体计算根据式(5)和式(6):

$$A_{i,j}^+ = \begin{cases} W_{i,j}^+ & \text{if } W_{i,j}^+ \geq Q \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

$$A_{i,j}^- = \begin{cases} W_{i,j}^- & \text{if } W_{i,j}^- \geq Q \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

当两个节点连接权重大于  $Q$  时, 将两个节点进行连接, 否则, 不建立连接. 根据网络统计指标, 分析中国  $O_3$  浓度网络的拓扑特征.

1.2.4 加权度

度是复杂网络中最常见的统计指标. 入度是指

向节点的连接, 出度是指向远离节点的连接. 节点  $i$  的加权入(或出)度被视为其传入(或传出)连接权重的数目. 基于正向连接权重得到的加权入度表示为  $In^+(w)_i$ , 加权出度表示为  $Out^+(w)_i$ , 具体计算根据式(7)和式(8):

$$In^+(w)_i = \sum_j A_{j,i}^+ W_{j,i}^+ \quad (7)$$

$$Out^+(w)_i = \sum_j A_{i,j}^+ W_{i,j}^+ \quad (8)$$

式中,  $In$  和  $Out$  分别描述节点对其周围环境的依赖程度和其对周围环境的影响程度. 基于负向连接权重得到的加权出入度类似于正向连接权重.

2 结果与讨论

2.1 中国  $O_3$  浓度网络性质分析

图 1 描述了正/负向连接权重和最大/小相关系数和距离  $D_{i,j}$  的关系. 从  $W_{i,j}^+$  和  $D_{i,j}$  的关系可以看出, 原始网络的  $W_{i,j}^+$  在近距离 ( $< 2000$  km) 较强.  $W_{i,j}^+$  在随机网络中显著地小于其在原始网络, 且不随距离的改变而发生变化, 且 99% 的数据点主要分布在绝对值 4 以下.  $P_{i,j}^+$  和  $D_{i,j}$  的分布图展示了随着  $D_{i,j}$  增加,  $P_{i,j}^+$  呈现逐渐减少的模式; 并且在近距离内, 原始网络的  $P_{i,j}^+$  显著高于随机网络. 从  $W_{i,j}^-$ 、 $P_{i,j}^-$  和  $D_{i,j}$  的分布可以看出, 原始网络和随机网络没有什么差别, 且不随距离的改变而发生变化, 这说明  $O_3$  浓度存在随机行为.

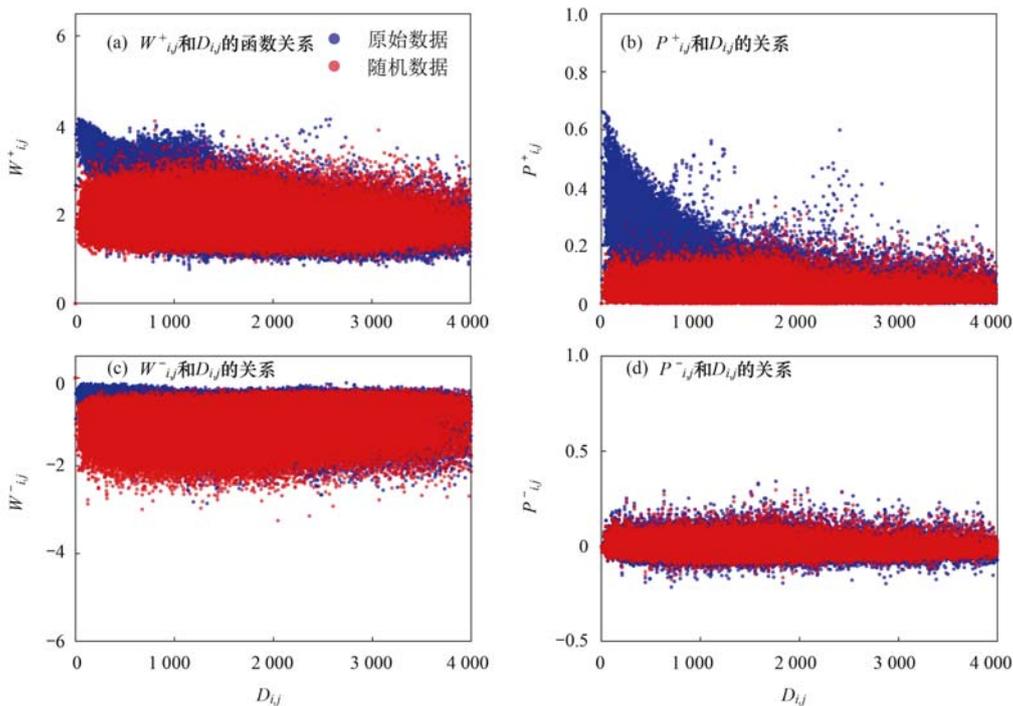


图 1 连边和距离的函数关系

Fig. 1 Links as a function of geographical distance

图 2(a) 是  $W_{i,j}^+$  的概率密度函数分布, 可以看出, 在  $[0, 4]$  范围内, 原始数据和打散重排数据都有一

个峰值, 两者差别很小. 这说明原始网络中的确存在一些随机连接. 但在较高的值  $[4, 6]$  范围内, 原始网

络的  $W_{i,j}^+$  存在一个长的拖尾, 随机网络中不存在这种情况. 说明这些较强的联系是由于某些确定物理相互作用而产生的, 而不是由于随机的因素导致的. 真实网络和随机网络分布的差异性表明, 原始网络中存在许多显著的正相关关系, 在分析网络特征时,

需要去除随机连接, 以识别有重要意义的连接. 从  $W_{i,j}^-$  的概率分布函数分布来看[图 2(b)], 原始网络和随机网络类似,  $W_{i,j}^-$  是一个随机行为. 进一步分析  $\tau_{i,j}^+$  和  $\tau_{i,j}^-$  的概率密度函数的关系可知[图 2(c) 和 2(d)],  $O_3$  浓度传播天数为 3~4 d.

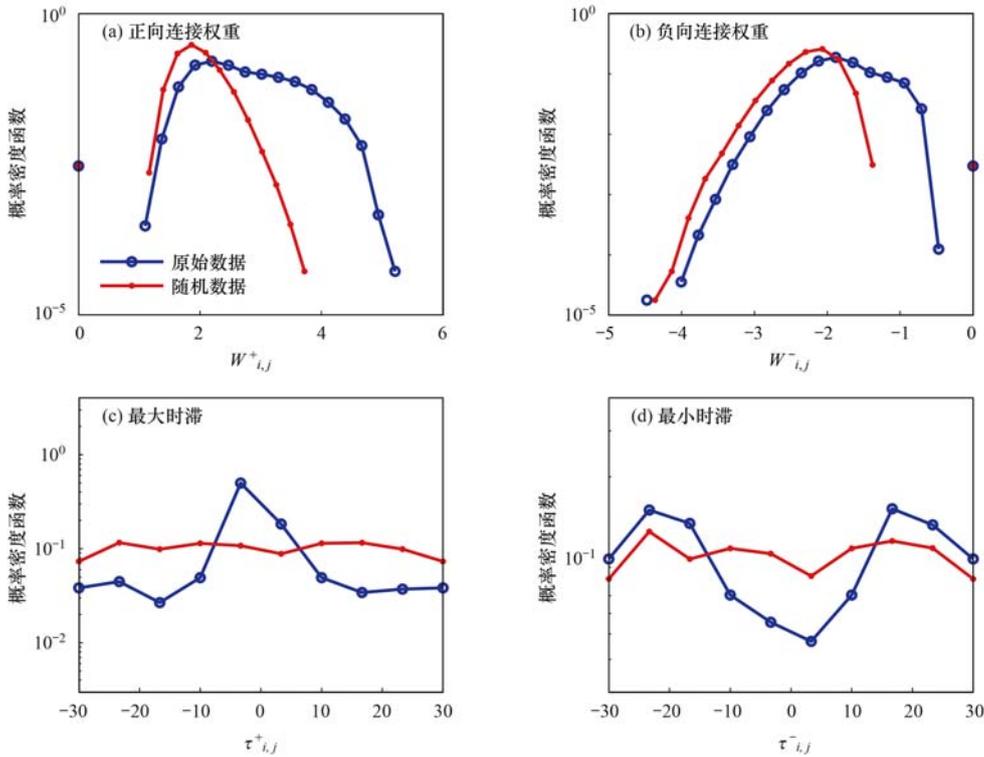


图 2 连边的概率密度函数

Fig. 2 Probability density function of links

### 2.2 中国 $O_3$ 浓度网络结构分析

通过上节分析, 随机网络中 99% 的  $W_{i,j}^+$  主要分布在绝对值 4 以下, 因此本研究将 4 设为阈值. 接下来, 主要考虑  $W_{i,j}^+ \geq 4$  的连边. 图 3 描述了加权度和连边长度的概率分布函数. 可以看出, 加权度和连边长度的概率分布函数符合幂律分布, 拟合函数的相关性  $R > 0.5$ .

为了研究每个节点对其他节点的依赖和影响关系, 本文分析了中国  $O_3$  浓度网络的加权入度、

出度和其差异的空间分布. 可以看出, 加权入度和加权出度的高值区均位于中国京津冀和周边区域, 和  $O_3$  浓度高值区分布类似. 这说明浓度高的区域和周边城市关系紧密, 具有很强的传输能力. 图 4(c) 给出了加权入度和加权出度差异的空间分布, 可以看出, 内蒙古自治区和甘肃省  $O_3$  浓度受到周边区域的影响较大, 而北京、天津和河北东部(渤海湾沿线)城市可以将其  $O_3$  浓度传输到其他城市. 具体地, 加权出度排名前 10 的城市为: 天津

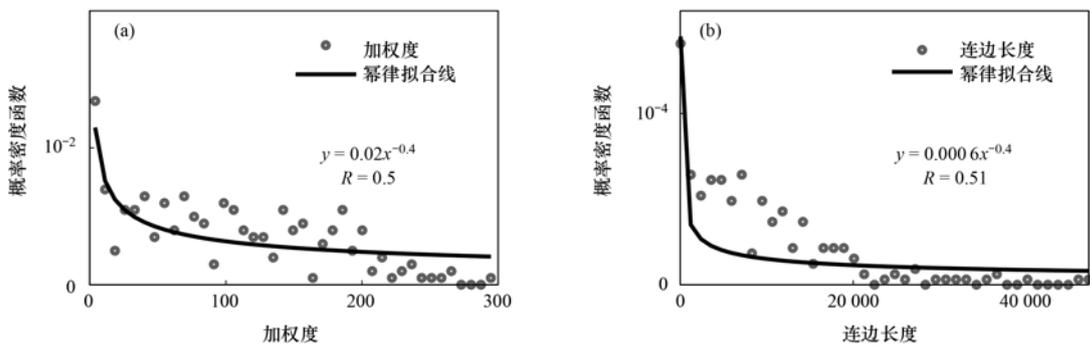


图 3 显著性连边的概率密度函数

Fig. 3 Probability density function of significant links

市、北京市、唐山市、沧州市、廊坊市、秦皇岛市、承德市、湖州市、常州市和南通市,其中 7 个城市位于京津冀地区, 3 个城市位于长三角区域. 加权入度排名前 10 的城市为天津市、北京市、唐山市、湖州市、沧州市、常州市、南通市、廊坊市、无锡市、秦皇岛市和苏州市,这些城市的出度值显著高于入度值. 说明这些城市的  $O_3$  污染会影响到其他城市的  $O_3$  浓度. 亟需在这些城市采取措施控制  $NO_x$  和 VOCs 的排放.

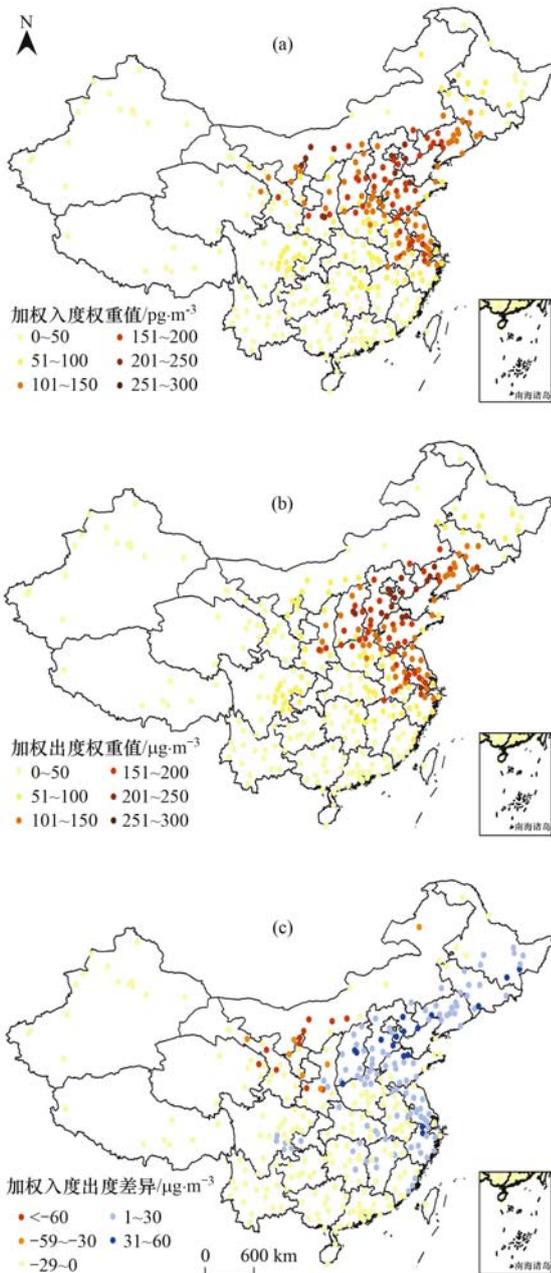


图 4 加权度的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of weighted degree

为了理解不同季节城市间  $O_3$  浓度传输和影响,分析了不同季节下  $O_3$  浓度的加权出度,具体如图 5 所示. 冬季,加权出度值最高,传输最强的

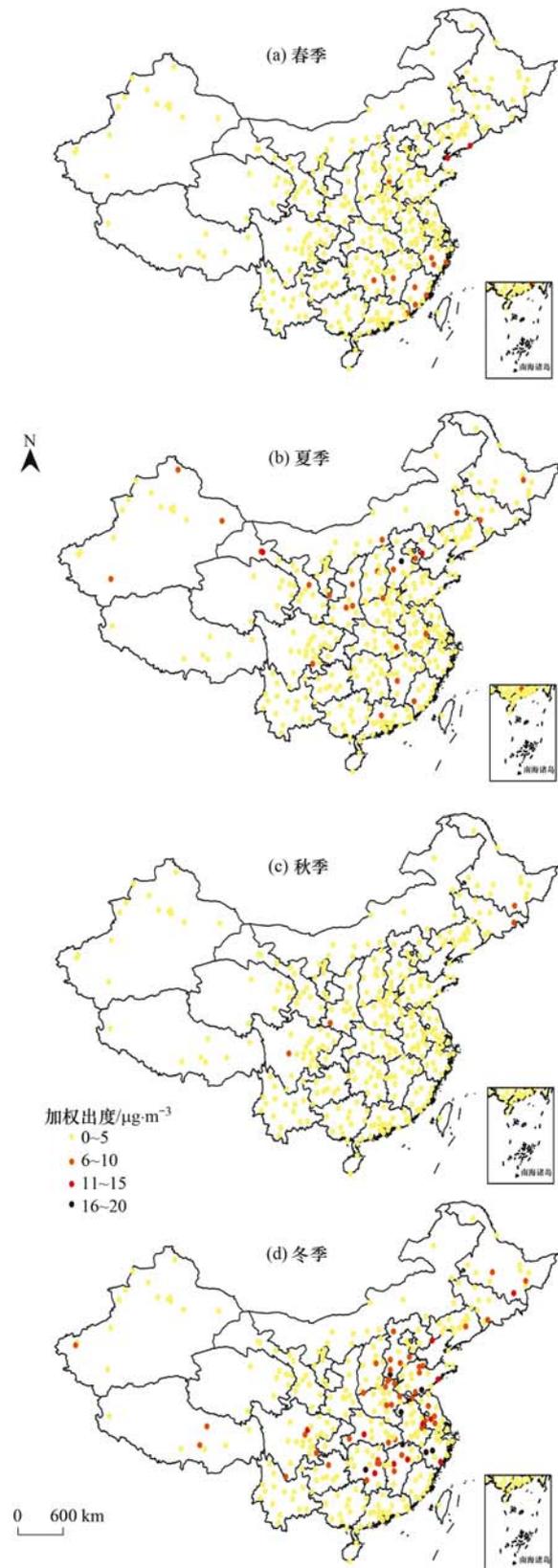


图 5 不同季节加权出度的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of out-weighted degree during different season

城市主要集中在东部城市区域. 尽管夏季  $O_3$  浓度值较高,夏季城市间  $O_3$  浓度传输作用小于冬季,春季和秋季加权度的强度较小. 冬季传输能力强

可能和较强的冬季风有关. 当冬季风速偏大时, 有利于  $O_3$  污染严重地区污染物向周围城市扩散, 这加强了城市间  $O_3$  浓度的相关性, 进而增加了  $O_3$  浓度加权出度值.

全年来看,  $O_3$  浓度传输路径主要为西北-东南向传输[图 6(a)], 这反映了  $O_3$  浓度变化受到冬季风的影响. 冬季,  $O_3$  浓度传输有两条典型的传输路径[图 6(b)]: ①从内蒙古自治区向西南传输到京

津冀地区; ②从京津冀地区向南传输到长三角区域. 其中, 北京和天津  $O_3$  污染和河北省  $O_3$  传输有关系, 这和以往北京地区  $O_3$  重污染时段研究结果类似<sup>[43,44]</sup>. 安徽省、山东省、河南省和河北省对长三角区域  $O_3$  污染有一定影响, 这和以往  $O_3$  污染过程中区域传输分析结果一致<sup>[45,46]</sup>. 总体上, 全年和冬季传输路径和冬季风有关, 反映了风向对  $O_3$  浓度传输的影响.

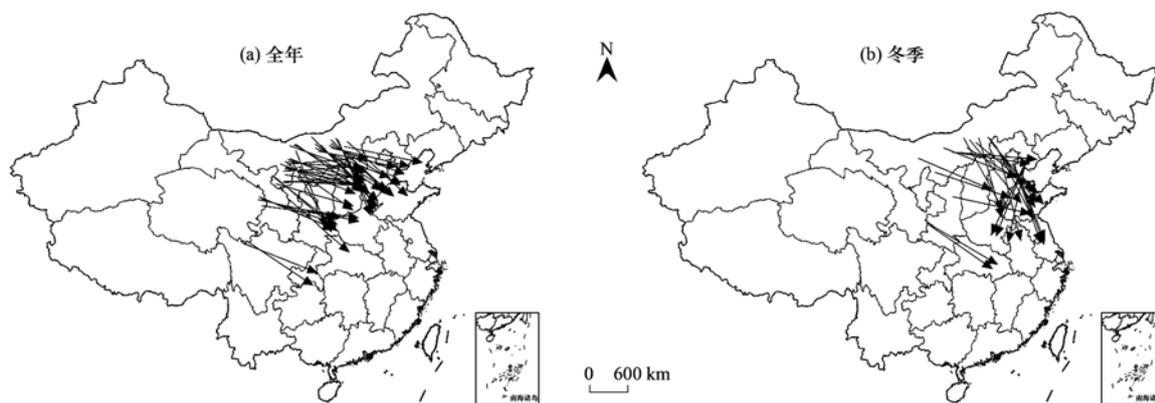


图 6 城市间传输路径分布

Fig. 6 Spatial distribution of transport routes between cities

### 3 结论

(1) 基于 2015~2019 年中国  $O_3$  浓度构建的原始网络中正向连接权重、最大相关系数在近距离显著高于随机网络中的正向连接权重. 而原始网络中负向连接权重、最小相关系数和随机网络的差别不大. 这说明  $O_3$  浓度网络既包含真实情况, 也包含随机的特征.

(2) 显著统计意义的连边的分析发现, 加权度和边长的概率分布函数符合幂律分布, 说明  $O_3$  浓度变化有一定规律性. 应用加权度指标分析了  $O_3$  浓度的加权出度和加权入度的空间分布, 结果表明, 加权度的高值分布和  $O_3$  浓度高值区分布一致, 这说明浓度高的区域和周边城市关系紧密, 具有很强的传输能力.

(3) 北京、天津和河北东部(渤海湾沿线)城市向其他城市的传输能力较强, 并且包含很强的季节特征. 冬季城市间  $O_3$  传输能力最强, 夏季次之, 春季和秋季传输较小.

(4) 全年和冬季传输路径分析发现,  $O_3$  浓度变化和冬季风有很强的关系.

#### 参考文献:

[1] 国务院. 国务院关于印发大气污染防治行动计划的通知: 国发[2013]37号[EB/OL]. [https://www.mee.gov.cn/zcwj/gwywj/201811/t20181129\\_676555.shtml](https://www.mee.gov.cn/zcwj/gwywj/201811/t20181129_676555.shtml), 2020-05-10.

[2] 郑保利, 梁流涛, 李明明. 1998~2016年中国地级以上城市  $PM_{2.5}$  污染时空格局[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(5): 1909-1919.  
Zheng B L, Liang L T, Li M M. Analysis of temporal and spatial patterns of  $PM_{2.5}$  in prefecture-level cities of China from 1998 to 2016[J]. China Environmental Science, 2019, **39**(5): 1909-1919.

[3] Wang T, Xue L K, Brimblecombe P, et al. Ozone pollution in China: a review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects[J]. Science of the Total Environment, 2017, **575**: 1582-1596.

[4] 班婕, 李滔滔. 北京市不同度量方式下臭氧短期暴露人群急性健康效应研究[J]. 环境与健康杂志, 2016, **33**(4): 287-291.  
Ban J, Li T T. Short-term effects of different ozone metrics on daily mortality in Beijing[J]. Journal of Environment and Health, 2016, **33**(4): 287-291.

[5] 国家环境保护局. 历年中国环境状况公报[EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/searchnew/?channelid=241628&searchword=%E5%8E%86%E5%B9%B4%E4%B8%AD%E5%9B%BD%E7%8E%AF%E5%A2%83%E7%8A%B6%E5%86%B5%E5%85%AC%E6%8A%A5&orderby=relevance&timestart=&timeend=&period=&chnls=&andsen=&total=&orsen=&exclude=&searchscope=&page=1,2021-05-26>.

[6] 杜娟, 宋鹏程, 彭同江. 2016-2018年绵阳市臭氧与颗粒物变化特征及相关性分析[J]. 西南科技大学学报, 2020, **35**(1): 31-38.  
Du J, Song P C, Peng T J, et al. Variation characteristics and correlation analysis of ozone and particulate matter in Mianyang from 2016 to 2018[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2020, **35**(1): 31-38.

[7] Ma Z Q, Xu J, Quan W J, et al. Significant increase of surface

- ozone at a rural site, north of eastern China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(6): 3969-3977.
- [8] 程麟钧, 王帅, 宫正宇, 等. 中国臭氧浓度的时空变化特征及分区[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(11): 4003-4012.  
Cheng L J, Wang S, Gong Z Y, *et al.* Spatial and seasonal variation and regionalization of ozone concentrations in China [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(11): 4003-4012.
- [9] Su R, Lu K D, Yu J Y, *et al.* Exploration of the formation mechanism and source attribution of ambient ozone in Chongqing with an observation-based model [J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, **61**(1): 23-32.
- [10] 黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 等. 中国城市 O<sub>3</sub> 浓度时空变化特征及驱动因素[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1120-1131.  
Huang X G, Zhao J B, Cao J J, *et al.* Spatial-temporal variation of ozone concentration and its driving factors in China [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1120-1131.
- [11] 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.
- [12] Zhao W, Fan S J, Guo H, *et al.* Assessing the impact of local meteorological variables on surface ozone in Hong Kong during 2000-2015 using quantile and multiple line regression models [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **144**: 182-193.
- [13] 何超, 慕航, 杨璐, 等. 中国暖季近地面臭氧浓度空间格局演变及主要气象驱动因素[J]. *环境科学*, 2021, **42**(9): 4168-4179.  
He C, Mu H, Yang L, *et al.* Spatial variation of surface ozone concentration during the warm season and its meteorological driving factors in China [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4168-4179.
- [14] 符传博, 徐文帅, 丹利, 等. 2015~2020年海南省臭氧时空变化及其成因分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(2): 675-685.  
Fu C B, Xu W S, Dan L, *et al.* Temporal and spatial variations in ozone and its causes over Hainan province from 2015 to 2020 [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(2): 675-685.
- [15] 齐艳杰, 于世杰, 杨健, 等. 河南省臭氧污染特征与气象因子影响分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 587-599.  
Qi Y J, Yu S J, Yang J, *et al.* Analysis of characteristics and meteorological influence factors of ozone pollution in Henan province [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 587-599.
- [16] Moghani M, Archer C L, Mirzakhali A. The importance of transport to ozone pollution in the U. S. Mid-Atlantic [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **191**: 420-431.
- [17] 符传博, 周航. 中国城市臭氧的形成机理及污染影响因素研究进展[J]. *中国环境监测*, 2021, **37**(2): 33-43.  
Fu C B, Zhou H. Research progress on the formation mechanism and impact factors of urban ozone pollution in China [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2021, **37**(2): 33-43.
- [18] 孙晓艳, 赵敏, 申恒青, 等. 济南市城区夏季臭氧污染过程及来源分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(2): 686-695.  
Sun X Y, Zhao M, Shen H Q, *et al.* Ozone formation and key VOCs of a continuous summertime O<sub>3</sub> pollution event in Jinan [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(2): 686-695.
- [19] Chen Z Y, Li R Y, Chen D L, *et al.* Understanding the causal influence of major meteorological factors on ground ozone concentrations across China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **242**, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118498.
- [20] 伍永康, 陈伟华, 颜丰华, 等. 不同传输通道下珠江三角洲臭氧与前体物非线性响应关系[J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 160-169.  
Wu Y K, Chen W H, Yan F H, *et al.* Nonlinear response relationship between ozone and precursor emissions in the Pearl River Delta region under different transmission channels [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 160-169.
- [21] 刘建, 吴兑, 范绍佳, 等. 前体物与气象因子对珠江三角洲臭氧污染的影响[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(3): 813-820.  
Liu J, Wu D, Fan S J, *et al.* Impacts of precursors and meteorological factors on ozone pollution in Pearl River Delta [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(3): 813-820.
- [22] 杨笑笑, 汤莉莉, 张运江, 等. 南京夏季市区 VOCs 特征及 O<sub>3</sub> 生成潜势的相关性分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(2): 443-451.  
Yang X X, Tang L L, Zhang Y J, *et al.* Correlation analysis between characteristics of VOCs and ozone formation potential in summer in Nanjing urban district [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(2): 443-451.
- [23] 蒋美青, 陆克定, 苏榕, 等. 我国典型城市群臭氧形成机制和关键 VOCs 的反应活性分析[J]. *科学通报*, 2018, **63**(12): 1130-1141.  
Jiang M Q, Lu K D, Su R, *et al.* Ozone formation and key VOCs in typical Chinese city clusters [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, **63**(12): 1130-1141.
- [24] Lu K D, Zhang Y H, Su H, *et al.* Oxidant (O<sub>3</sub> + NO<sub>2</sub>) production processes and formation regimes in Beijing [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, **115**(D7), doi: 10.1029/2009JD012714.
- [25] Li J F, Lu K D, Lv W, *et al.* Fast increasing of surface ozone concentrations in Pearl River Delta characterized by a regional air quality monitoring network during 2006-2011 [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26**(1): 23-36.
- [26] Peng Y P, Chen K S, Wang H K, *et al.* In situ measurements of hydrogen peroxide, nitric acid and reactive nitrogen to assess the ozone sensitivity in Pingtung County, Taiwan [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2011, **11**(1): 59-69.
- [27] 刘营营, 王丽涛, 齐孟姚, 等. 邯郸大气 VOCs 污染特征及其在 O<sub>3</sub> 生成中的作用[J]. *环境化学*, 2020, **39**(11): 3101-3110.  
Liu Y Y, Wang L T, Qi M Y, *et al.* Characteristics of atmospheric VOCs and their role in O<sub>3</sub> generation in Handan [J]. *Environmental Chemistry*, 2020, **39**(11): 3101-3110.
- [28] 刘楚薇, 连鑫博, 黄建平. 我国臭氧污染时空分布及其成因研究进展[J]. *干旱气象*, 2020, **38**(3): 355-361.  
Liu C W, Lian X B, Huang J P. Research review on the spatio-temporal distribution of ozone pollution and its causes in China [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2020, **38**(3): 355-361.
- [29] 耿福海, 刘琼, 陈勇航. 近地面臭氧研究进展[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2012, **6**(6): 8-14.  
Geng F H, Liu Q, Chen Y H. Discussion on the research of surface ozone [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2012, **6**(6): 8-14.
- [30] Shu L, Xie M, Wang T J, *et al.* Integrated studies of a regional ozone pollution synthetically affected by subtropical high and typhoon system in the Yangtze River Delta region, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(24): 15801-15819.
- [31] Yang Y, Liao H, Li J. Impacts of the east Asian summer monsoon on interannual variations of summertime surface-layer ozone concentrations over China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(13): 6867-6879.

- [32] Pavón-domínguez P, Jiménez-hornero F J, Gutiérrez de Ravé E. Joint multifractal analysis of the influence of temperature and nitrogen dioxide on tropospheric ozone [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2015, **29**(7): 1881-1889.
- [33] Tsonis A A, Swanson K L, Roebber P J. What do networks have to do with climate? [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2006, **87**(5): 585-596.
- [34] Ying N, Zhou D, Chen Q H, *et al.* Long-term link detection in the CO<sub>2</sub> concentration climate network [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **208**: 1403-1408.
- [35] Ying N, Zhou D, Han Z G, *et al.* Rossby waves detection in the CO<sub>2</sub> and temperature multilayer climate network [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, **47** ( 2 ), doi: 10. 1029/2019GL086507.
- [36] Zhang Y W, Fan J F, Chen X S, *et al.* Significant impact of Rossby waves on air pollution detected by network analysis [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(21): 12476-12485.
- [37] Li H J, Qi Y J, Li C, *et al.* Routes and clustering features of PM<sub>2.5</sub> spillover within the Jing-Jin-Ji region at multiple timescales identified using complex network-based methods [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **209**: 1195-1205.
- [38] 肖琴, 陆钰婷. 基于复杂网络的区域空气污染 PM<sub>2.5</sub> 分析 [J]. *应用技术学报*, 2019, **19**(1): 77-83.  
Xiao Q, Lu Y T. Application of the complex network in the PM<sub>2.5</sub> analysis of air pollution in regions [J]. *Journal of Technology*, 2019, **19**(1): 77-83.
- [39] Carmona-Cabezas R, Gómez-Gómez J, Ariza-Villaverde A B, *et al.* Can complex networks describe the urban and rural tropospheric O<sub>3</sub> dynamics? [J]. *Chemosphere*, 2019, **230**: 59-66.
- [40] 营娜, 叶谦, 韩战钢, 等. 全球地表温度大气遥相关路径研究 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2021, **57**(3): 314-319.
- Ying N, Ye Q, Han Z G, *et al.* Atmospheric teleconnections path of global surface temperature [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2021, **57**(3): 314-319.
- [41] Zhao Z D, Zhao N, Ying N. Association, Correlation, and causation among transport variables of PM<sub>2.5</sub> [J]. *Frontiers in Physics*, 2021, **9**, doi: 10. 3389/fphy. 2021. 684104.
- [42] 李超. 基于多层网络的京津冀区域大气污染时空关联效应研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- [43] Han L, Zhu L Y, Wang S L, *et al.* Modeling study of impacts on surface ozone of regional transport and emissions reductions over North China Plain in summer 2015 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(16): 12207-12221.
- [44] 贾海鹰, 尹婷, 瞿霞, 等. 2015年北京及周边地区臭氧浓度特征及来源模拟 [J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(4): 1231-1238.
- Jia H Y, Yin T, Qu X, *et al.* Characteristics and source simulation of ozone in Beijing and its surrounding areas in 2015 [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(4): 1231-1238.
- [45] 李浩, 李莉, 黄成, 等. 2013年夏季典型光化学污染过程中长三角典型城市 O<sub>3</sub> 来源识别 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 1-10.
- Li H, Li L, Huang C, *et al.* Ozone source apportionment at urban area during a typical photochemical pollution episode in the summer of 2013 in the Yangtze River Delta [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 1-10.
- [46] Gao J H, Zhu B, Xiao H, *et al.* A case study of surface ozone source apportionment during a high concentration episode, under frequent shifting wind conditions over the Yangtze River Delta, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **544**: 853-863.

## CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Urban Area of Beijing .....	AN Xin-xin, CAO Yang, WANG Qin, <i>et al.</i> (2251)
Modeling of PM <sub>2.5</sub> Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Using a Space-time Linear Mixed Effects Model .....	FAN Li-hang, YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, <i>et al.</i> (2262)
Spatio-temporal Evolution Patterns of PM <sub>2.5</sub> and Relationship with Urban Expansion in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 2000 to 2018 .....	ZHAO An-zhou, XIANG Kai-zheng, LIU Xian-feng, <i>et al.</i> (2274)
Characteristics and Source Analysis of PM <sub>2.5</sub> in Qingdao in Winter Under the Action of Sea-Land-Atmosphere Convergence .....	TUO Xiong, YANG Ling-xiao, ZHANG Wan, <i>et al.</i> (2284)
Impacts of Heterogeneous Uptake Pathway on Sulfate Formation: A Case Study in Shanghai Based on WRF-Chem .....	ZHANG Ru-han, ZHANG Hao-ran, FENG Wei-hang, <i>et al.</i> (2294)
Source Apportionment and Seasonal Changes in PM <sub>2.5</sub> Chemical Components from Different Functional Areas of a Provincial Capital City .....	SUN You-min, FAN Jing, XU Biao, <i>et al.</i> (2304)
Chemical Compositions, Light Extinction Effect, and Oxidative Potential of PM <sub>2.5</sub> Under Different Pollution Levels During Winter in Taiyuan .....	REN Jiao, ZHAO Rong-rong, WANG Ming, <i>et al.</i> (2317)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Metal Elements in Ambient PM <sub>2.5</sub> in the Winter of Zhengzhou .....	YAO Sen, WANG Qian-heng, XUE Yan, <i>et al.</i> (2329)
Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM <sub>2.5</sub> During Winter in Zibo City .....	BAI Wen-yu, XU Bo, GUO Li-yao, <i>et al.</i> (2336)
Seasonal Distribution Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Evaluation of PAHs in PM <sub>2.5</sub> in Chengde .....	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, LI Yi-lin, <i>et al.</i> (2343)
Pollution Level and Regional Migration of PCDD/Fs in Ambient Air from Pearl River Delta, China .....	FU Jian-ping, XIE Dan-ping, HUANG Jin-qiong, <i>et al.</i> (2355)
Concentrations and Sources of Black Carbon Aerosols in Rural Areas of Southern North China Plain .....	ZHANG Ling, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2363)
Research on Causes of Severely Polluted Weather in Tianjin Based on Process Analytical Technology .....	HAO Jian, CAI Zi-ying, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (2373)
Classification Control of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Pollution Sources Based on Emission Amounts and Atmospheric Reactivity .....	CHEN Peng, ZHANG Yue, XING Min, <i>et al.</i> (2383)
Complex Networks Reveal the Characteristics of Ozone in China .....	YING Na, CHEN Jian-hua, LI Dong, <i>et al.</i> (2395)
Ozone Simulation of Lanzhou City Based on Multi-scenario Emission Forecast of Ozone Precursors in the Summer of 2030 .....	CHEN Tian-lei, WU Min, PAN Cheng-ke, <i>et al.</i> (2403)
Improvement of Environmental Model Prediction Based on Inversion and Aerosol Assimilation .....	CAI Zi-ying, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (2415)
Method of Identifying Air Pollution from Iron and Steel Industry Based on Ambient Air Quality Monitoring Data Analysis .....	SHI Yao-peng, HU Jing-nan, CHU Yang-xi, <i>et al.</i> (2427)
Assessment of "Differentiated Response Requirement Based on Performance Grading" Policy During Heavy Air Pollution Alert .....	ZENG Jing-hai, WANG Can (2436)
Risk Zoning of Water Pollution in the Yellow River Basin .....	ZHOU Xia-fei, CAO Guo-zhi, YU Fang, <i>et al.</i> (2448)
Emission Characteristics of Industrial Water Pollutants in Gansu Section of the Yellow River Basin .....	LI Xue-ying, YANG Xi, QIAO Qi, <i>et al.</i> (2459)
Spatial-temporal Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Yellow River .....	WANG Tao-yi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (2467)
APCS-MLR Combined with PMF Model to Analyze the Source of Metals in Sediment of Xinglin Bay Suburban Watershed, Xiamen .....	SHEN Chen-yu, YAN Yu, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2476)
Spatial Differentiation Characteristics and Response Relationship of DOM, Nutrients, and Heavy Metals in River Sediments .....	XIAO Yan-chun, YU Hui-bin, SONG Yong-hui (2489)
Distribution Characteristics, Evaluation, and Source Analysis of Heavy Metals in Soils of Fenhe Riparian Zone in Taiyuan City .....	HU Jie, ZHAO Xin-yu, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (2500)
Binding Affinity Between Heavy Metal Hg and Dissolved Organic Matter in Hongze Lake .....	HU Bin, WANG Pei-fang, ZHANG Nan-nan, <i>et al.</i> (2510)
Ecosystem Evolutionary Trajectory of Lake Xiliang over the Past Century Driven by Eutrophication .....	ZHENG Jia-nan, XU Min, ZHENG Wen-xiu, <i>et al.</i> (2518)
Sediment Release and Pollution Source Analysis of Typical Reservoirs in the Upper Reaches of the Yellow River Based on DGT Technology .....	MA Yu-shen, ZHU Xiang, PANG Qing-qing, <i>et al.</i> (2527)
Differential Characteristics and Source Identification of Water Quality of the Rivers in Northern Henan Before and After Rainstorm .....	ZHANG Yan, ZOU Lei, LIANG Zhi-jie, <i>et al.</i> (2537)
Adsorption and Interception Effects of <i>Eichhornia crassipes</i> on Microplastics in Water of the Poyang Lake Basin .....	LI Wen-gang, WU Xi-en, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2548)
Spatiotemporal Distribution and Ecological Risk Assessment of Plastic Additives in Taihu Lake .....	LIU Shu-jiao, DING Jian-nan, SHI Jun-zhe, <i>et al.</i> (2557)
Distribution Characteristics, Sources, and Storage of Microplastics in Surface Sediments of Luoma Lake .....	YAO Ming-xuan, BAI Xue, XU Zhen-jia, <i>et al.</i> (2566)
Pollution Characteristics of Phosphorus in Different Media in Taihu Lake and Its Treatment Enlightenment .....	CAI Mei, LU Zhi-hua, WANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (2575)
Analysis on Diversity and Structure of Microbial Community in River Sediment of Siping Section of Liaohe River .....	LI Peng-yang, AN Qi-rui, WANG Xin-hao, <i>et al.</i> (2586)
Non-point Source Pollution (NPS) Induces Structural and Functional Variation in Bacterial Communities in Sediments of Jialing River .....	XUE Yu-qin, XU Fei, LIU Kun-he, <i>et al.</i> (2595)
Effects of Microplastics on Bacterial Community Composition and Diversity in Sediments .....	LI Wen-lu, WANG Zhi-chao, YANG Wen-huan, <i>et al.</i> (2606)
Vertical Distribution Characteristics and Community Construction of Aerobic Denitrification Bacteria from the Sediments of Baiyangdian Lake During the Winter Freezing Period .....	ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, <i>et al.</i> (2614)
Effect of Induced Mixing on Bacterial Community Structure and Metabolic Activity in Reservoir .....	GAO Yue, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in <i>Bellamyia aeruginosa</i> in Typical Area of Poyang Lake .....	JIANG Wei-qun, HU Qi-wu, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2633)
Electrocatalytic Oxidation of Bisphenol A by Porous Ti/SnO <sub>2</sub> -Sb-Ni Electrode Loaded with Multi-wall Carbon Nanotubes .....	FU Yuan-hang, LIU An-di, HUANG Wei-bin, <i>et al.</i> (2640)
Efficiency and Mechanism of Degradation of Methylene Blue with H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Catalyzed by Magnetic Mn <sub>0.6</sub> Zn <sub>0.4</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> @SiO <sub>2</sub> .....	XU Dong-ying, YU Jing, HAO Qi, <i>et al.</i> (2650)
Effect of Two Types of Nanoparticles on the Adsorption of Ciprofloxacin on Zeolite .....	JIANG Lan-cui, MENG Zhao-fu, LIU Xian, <i>et al.</i> (2662)
Adsorption Mechanisms and Effect Factors of As(V) by AMD Sludge Composite Material .....	ZHANG Ya-hui, ZHANG Rui-xue, WU Pan, <i>et al.</i> (2673)
Shifts in Microbial Community and Variation in Functional Genes for Nitrification and Denitrification in Activated Sludge Affected by Triclosan and Its Transformed Intermediates .....	LU Ying-yuan, DONG Xiao-qi, PENG Xing-xing, <i>et al.</i> (2685)
Construction of Sustainability Evaluation Index System for Contaminated Site Risk Management and Analysis on Key Influential Factors .....	LI Xiao-nuo, YI Shi-yi, CHEN Wei-ping (2699)
Construction and Empirical Analysis of a Comprehensive Evaluation Method of Coastal Wetland Soil Quality Based on Ecological Functions .....	ZHANG Xue, KONG Fan-long, JIANG Zhi-xiang (2709)
Source Analysis and Pollution Assessment of Heavy Metals in Farmland Soil Around Tongshan Mining Area .....	CHEN Hang, WANG Ying, WANG Shu (2719)
Effects of Typical Iron and Manganese Minerals on Arsenic Speciation and Enzyme Activities in Paddy Soil .....	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Kai, <i>et al.</i> (2732)
Phytoremediation Efficiency of Two Cultivars of <i>Brassica napus</i> L. Under Water-soluble Chitosan Treatment in Typical Pb-contaminated Farmland Soils .....	MENG Xiao-fei, ZHENG Guo-di, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2741)
Risk Prediction of Cadmium and Lead in Wheat Grains Based on Bayes Theorem .....	WANG Tian-qi, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (2751)
Interannual Variation Characteristics of Nitrogen Loss Under Rapeseed/Maize Rotation in Purple Soil Sloping Field .....	XU Man, GAO Ming, YU Luo, <i>et al.</i> (2758)
Physicochemical Properties of Biochars Prepared from Different Feedstocks and Evaluation of Its Potential as A Slow-release Carriers for Biochar-based Fertilizers .....	XING Li-bin, CHENG Jie, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (2770)
Effects of Combined Application of Wood Vinegar-Acidified Biochar and Nitrogen on Active Nitrogen and Ammonia Volatilization in Saline Soil .....	SHEN Shu-wei, ZHANG Dan-dan, WANG Min-ge, <i>et al.</i> (2779)
Effects of Biodegradable Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions Under Wheat-Maize Rotation System in the Guanzhong Plain .....	GUO Yi-ting, LUO Xiao-qi, WANG Rui, <i>et al.</i> (2788)
Forest Soil Microbial Community Structure Characteristics and Its Influencing Factors at Different Elevations on the Southern Slope of Daiyun Mountain .....	HE Zhong-sheng, WANG Zi-wei, ZHU Jing, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Simulated Warming and Increased Precipitation on Soil Extracellular Enzyme Activity and Enzymatic Stoichiometry of Abandoned Grassland .....	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, JIAN Jun-nan, <i>et al.</i> (2812)
Contribution of Urbanization to Local Warming in Major Cities of China .....	LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei, <i>et al.</i> (2822)