

目次(卷终)

基于气象条件指数的我国重点区域 PM _{2.5} 和臭氧复合污染气象影响评估	杨欣, 杨元琴, 李红, 高健, 牛军捷, 储王辉, 刘世杰, 陈义珍, 何友江, 赵好希 (6433)
“2+26”城市 PM _{2.5} 与气象因子的尺度依存关系及影响因素分析	吴舒祺, 金团团, 郑冬阳, 顾杨吻, 赵文吉 (6441)
武汉军运会前后大气 PM _{2.5} 化学组分和来源	刘世豪, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 祁士华 (6452)
2016~2020 年邯郸市冬季 PM _{2.5} 污染特征与来源解析	牛红亚, 高娜娜, 鲍晓磊, 胡伟, 胡德豪, 吴春苗, 马心怡, 纪晓腾, 樊景森, 王金喜 (6463)
渭南市冬季 PM _{2.5} 化学组成及来源解析	郭景宁, 李小飞, 余锋, 张蕊, 高月, 杨雯 (6474)
长三角城郊冬季 PM _{2.5} 中铵盐的形成过程及来源解析	项妍琨, 曹芳, 张雯洪, 范美益, 章炎麟 (6486)
上海城区硝基芳香族化合物的化学组成及特征分析	杨露, 马英歌, 郁建珍, 吴宇航, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 黄成, 童张法 (6495)
吕梁市 PM _{2.5} 中多环芳烃的来源解析及健康风险评估	牟玲, 刘紫叶, 李杨勇, 李雪梅, 李晓帆, 刘添, 冯传阳, 姜辛 (6508)
广西背景大气中生物质燃烧对碳质气溶胶组成和吸光性的影响	吴星麒, 曹芳, 洪一航, 邢佳莉 (6518)
南京北郊大气棕碳吸光特性、来源及其季节变化特征	陈星州, 崔世杰, 张运江, 先久坤, 王镜雯, 汪俊峰, 盖鑫磊 (6529)
京津冀地区“煤改电”对 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	张茹婷, 陈传敏, 刘松涛, 吴华成, 周卫青, 李朋 (6541)
基于化学损耗修正的青岛胶州市环境 VOCs 来源解析	孔翠丽, 吴雨彤, 顾瑶, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 刘保双 (6551)
聊城市城区夏季 VOCs 污染特征及来源解析	李万勇, 黄浩瑜, 王艳振, 朱子博, 王一秋, 高艳珊, 彭娜娜, 伦小秀, 黄亮, 冯如帆, 菅月诚, 王强 (6564)
基于三维空气质量模型的淄博市臭氧及前体物来源解析	张馨心, 赵秀颖, 黄凌, 薛金, 卞锦婷, 王杨君, 李莉 (6576)
中国高温下臭氧抑制事件的时空特征及其影响因素	欧林冲, 陈伟华, 伍永康, 吴乐敏, 王雪梅 (6586)
基于无人机的大气细颗粒物与臭氧污染探测与溯源研究进展	曲雅微, 王体健, 袁成, 吴昊 (6598)
京津冀地区机动车细颗粒物污染的健康影响分析	郝永佩, 宋晓伟, 朱晓东, 王京伟, 程鹏 (6610)
中国水泥行业通过 CCUS 技术的减排潜力评估	魏宁, 刘胜男, 魏凤, 李小春 (6621)
钢铁行业生命周期碳排放核算及减排潜力评估	宋晓璐, 杜帅, 邓陈宁, 谢明辉, 沈鹏, 赵慈, 陈忱, 刘晓宇 (6630)
珠江三角洲二氧化碳源汇演变特征及驱动因素	胡景心, 沙青娥, 刘慧琳, 张雪驰, 郑君瑜 (6643)
东莞市低碳路径下加速电气化对 CO ₂ 和污染物协同减排影响	吴乐敏, 陈丙寅, 欧林冲, 白玉洁, 刘可旋, 王伟文, 彭勃, 王雪梅 (6653)
县域尺度下长株潭地区城市化与碳排放的关系	刘贤赵, 李阳 (6664)
城市草坪温室气体排放特征及影响因素	陈丽涵, 刘硕, 林溢, 郭娜, 臧昆鹏, 陈圆圆, 李嘉鑫, 邱珊珊, 卿雪梅, 洪海祥, 蒋凯, 熊浩宇, 方双喜 (6680)
双视角下中国畜牧业甲烷排放的温室效应	刘舒乐, 严薇, 高庆先, 马占云 (6692)
中国典型流域有机磷酸酯的污染特征与风险评估	赵江陆, 路海健, 吕佳佩, 杨江涛, 罗莹, 曹渺, 孙善伟, 郭昌胜, 徐建 (6700)
黄河下游悬河段饮用水源地土壤重金属污染、来源及健康风险	彭超月, 任翀, 申浩欣, 王艳锋, 段海静, 王玉龙, 李旭辉, 刘德新, 马建华 (6710)
黄河干流沉积物重金属的赋存形态特征及污染评价	王依滴, 欧阳威, 刘连华, 陆中桂 (6720)
土地利用结构与空间格局对鄱阳湖流域中小河流水质的影响	温嘉伟, 王鹏, 黄高翔, 张华, 聂明华, 丁明军, 折远洋 (6728)
内蒙古典型湖泊水环境特征及水质评价	王欣远, 潘保柱, 王立新, 刘铁军, 廖梓龙, 韩语, 杨子杰 (6744)
锡林河上游雨季降水、河水和地下水转化关系	孙金, 王怡璇, 杨璐, 段利民, 褚少杰, 张桂馨, 张波, 刘廷玺 (6754)
西北盐湖流域地下水水化学特征及控制因素	艳艳, 高瑞忠, 刘廷玺, 房丽晶, 王银龙 (6767)
巴里坤-伊吾盆地平原区地下水污染风险评价	刘钰, 曾妍妍, 周金龙, 闫志云, 白凡 (6778)
亚硫酸氢盐强化微量 Fe ²⁺ 活化过二硫酸盐降解扑热息痛	莫苗婷, 聂淑华, 晏彩霞, 丁明军, 陈诗瑶, 聂明华 (6790)
污泥生物炭活化过一硫酸盐降解环丙沙星	郑大洋, 邹佳丽, 徐皓, 王滕, 石宇翔, 陈永健, 李彬阳, 王亚宜, 冯沁, 吴敏 (6801)
NaHCO ₃ 活化荞麦皮生物炭对碘酸钾的吸附	魏红, 赵江娟, 景立明, 钮金芬, 付冉, 董莹 (6811)
竹基 N、P 共掺杂活性炭的制备及其铜离子吸附性能	王贵龙, 刘艳艳, 江荣源, 李思敏, 林冠峰, 卢贝丽, 黄彪, 陈燕丹 (6823)
西南高山峡谷区植被变化及影响因素分析	赖金林, 齐实, 崔冉冉, 廖瑞恩, 唐颖, 李鹏 (6833)
生物炭施用对农田土壤团聚体及有机碳影响的整合分析	孟艳, 沈亚文, 孟维伟, 王旭清, 李宗新, 刘开昌, 代红翠 (6847)
农田土壤碳循环过程及其量化方法	孙昭安, 朱彪 (6857)
生物炭施用 5 a 后对桂北桉树人工林土壤有机碳组分的影响	牟芝熠, 沈育伊, 曹杨, 王紫卉, 陈运霜, 滕秋梅, 黄科朝, 毛馨月, 徐广平 (6869)
喀斯特地区植被恢复下土壤活性有机碳与碳库管理指数的演变特征	蔡华, 舒英格, 王昌敏, 廖远行, 罗秀龙, 龙慧, 李雪梅 (6880)
中国典型抗生素在环境介质中的污染特征与生态风险评估	陈丽红, 曹莹, 李强, 孟甜, 张森 (6894)
基于 MGWR 的土壤 pH 值空间建模及其影响因素分析	赵明松, 陈宣强, 徐少杰, 邱士其, 王世航 (6909)
某燃煤电厂周边农田土壤重金属污染特征及源解析	张军, 李旭, 刘磊玉, 李雨茹 (6921)
重庆典型在产石化场地土壤污染特征及来源解析	张渝蓉, 罗帅, 陈媛, 曹军, 刘斌, 刘元元 (6933)
高垦殖丘陵区不同类型农用地土壤中抗生素抗性基因分布特征	陈瑞, 程建华, 唐翔宇 (6947)
有机肥配施生物炭对果园土壤反硝化微生物和酶活性的影响	邓正昕, 高明, 熊子怡, 王莹燕, 谢军, 王子芳 (6955)
有机肥处理对旱地红壤细菌群落及玉米生产力的影响	林婷婷, 郑洁, 朱国繁, 李璐, 杨叶钰萍, 刘佳, 徐勤松, 孙波, 蒋瑞琴 (6965)
微塑料和镉复合污染对狼尾草根际土壤微生物群落结构和功能的影响	段莉阳, 张玉, 任学敏, 李玉英, 张英君, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (6973)
设施番茄种植年限对土壤理化性质及微生物群落的影响	赵阳阳, 刘银双, 宋瑶, 张晓旭, 贾振华, 黄亚丽 (6982)
3 种氧化剂对焦化场地多环芳烃的修复效果与土著微生物的响应关系	李伟, 王伟伟, 孟祥宇, 孙英杰, 王亚楠, 李书鹏, 杨乐巍, 刘鹏, 刘渊文 (6992)
河北省不同盐渍化土壤类型的微生物多样性与种群结构	刘银双, 牛宏进, 赵阳阳, 孙宏勇, 陈晓波, 黄亚丽 (7004)
玉米根际微生物氮磷转化的功能基因组学分析	汪香君, 姜美彤, 李森, 倪浩为, 孙波, 梁玉婷 (7014)
外源菌剂联合柠檬酸强化龙葵修复土壤镉污染	王楷, 王丽, 王一钲, 游梦, 梁婷, 邹茸, 范洪黎 (7024)
1 株肠杆菌与硫酸联合施用对水稻积累镉的影响	张朴心, 姚俊帆, 刘玉玲, 张威宇, 尹雪斐, 铁柏清 (7036)
《环境科学》第 44 卷(2023 年)总目录	(7045)
《环境科学》征订启事(6507)	
《环境科学》征稿简则(6620)	
信息(6743, 6846, 6856)	

“2 + 26”城市 $PM_{2.5}$ 与气象因子的尺度依存关系及影响因素分析

吴舒祺, 金国囡, 郑冬阳, 顾杨旻, 赵文吉*

(首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048)

摘要: 基于“2 + 26”城市的 $PM_{2.5}$ 浓度和气象数据, 通过连续小波变换 (CWT) 和离散小波变换 (DWT) 分析 $PM_{2.5}$ 时间序列的变化, 利用小波相干 (WTC) 和多小波相干 (MWC) 量化 $PM_{2.5}$ 与单个、多个气象因子在时频域中的响应关系, 并结合偏小波相干 (PWC) 定量评估大气遥相关因子对响应关系的影响。结果表明: ①“2 + 26”城市的 $PM_{2.5}$ 浓度具有中间高、外围低的空间分布特征。 $PM_{2.5}$ 突变事件主要发生于气象条件稳定的冬季, 并且集中在 2018 年以前。256 ~ 512 d 的年尺度周期特征较稳定, 同时也是 $PM_{2.5}$ 时间序列的主导周期。② $PM_{2.5}$ 与气象因子的相干性取决于时频尺度和变量组合。在所有时频尺度上, $PM_{2.5}$ 与相对湿度、温度的相干性较强; 在小、中时频尺度上, $PM_{2.5}$ 与风速相干性较强; 在大时频尺度上, $PM_{2.5}$ 与温度的相干性较强。降水、温度和相对湿度的组合可作为解释 $PM_{2.5}$ 在所有时频尺度上变化的最佳变量组合。③ 时频尺度不同, 大气遥相关因子对响应关系的增强/削弱作用不尽相同。在所有时频尺度上, 厄尔尼诺-南方涛动 (ENSO) 对 $PM_{2.5}$ 与降水、温度之间响应关系的影响较大, 太平洋年代际涛动 (PDO) 对 $PM_{2.5}$ 与相对湿度、风速之间响应关系的影响较大。结果可为区域大气污染治理提供参考。

关键词: “2 + 26”城市; 气象因子; 多尺度相关; 大气遥相关因子; 小波分析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)12-6441-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202301031

Scale Dependence Between $PM_{2.5}$ and Meteorological Factors and Its Influencing Factors in “2 + 26” Cities

WU Shu-qi, JIN Jian-nan, ZHENG Dong-yang, GU Yang-yang, ZHAO Wen-ji*

(College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: Based on the $PM_{2.5}$ concentration and meteorological data of “2 + 26” cities, the variations in $PM_{2.5}$ time series were analyzed by the continuous wavelet transform (CWT) and discrete wavelet transform (DWT). Wavelet coherence (WTC) and multiple wavelet coherence (MWC) were used to quantify the response relationship between $PM_{2.5}$ and single/multiple meteorological factors in the time-frequency domain. Partial wavelet coherence (PWC) was used to quantitatively evaluate the influence of atmospheric teleconnection factors on the response relationship. The results showed that: ① the concentration of $PM_{2.5}$ in the “2 + 26” cities had the spatial distribution characteristics of high in the middle area and low in the peripheral area. The $PM_{2.5}$ mutation events were mainly concentrated before 2018 and mostly occurred in winter when the meteorological conditions were stable. The annual scale period of 256-512 d was relatively stable, and it was also the dominant period of the $PM_{2.5}$ time series. ② The coherences between $PM_{2.5}$ and meteorological factors depended on the time-frequency scale and variable combination. At all time-frequency scales, $PM_{2.5}$ had strong coherences with relative humidity and temperature. At small and medium time-frequency scales, $PM_{2.5}$ had strong coherences with wind speed. At large scales, $PM_{2.5}$ had strong coherences with temperature. The combination of precipitation, temperature, and relative humidity could explain the variation in $PM_{2.5}$ at all time-frequency scales. ③ At different time-frequency scales, the enhancement/weakening effects of atmospheric teleconnection factors on the response relationship were not the same. At all time-frequency scales, the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) had a greater impact on the response relationship between $PM_{2.5}$ and precipitation/temperature, and the Pacific decadal oscillation (PDO) had a greater impact on the response relationship between $PM_{2.5}$ and relative humidity/wind speed. These results provide reference for regional air pollution control.

Key words: “2 + 26” cities; meteorological factors; multi-scale correlation; atmospheric teleconnection factor; wavelet analysis

随着工业化和城市化的快速推进, $PM_{2.5}$ (空气动力学直径 $\leq 2.5 \mu m$) 成为中国主要空气污染物^[1]。 $PM_{2.5}$ 不仅显著降低大气能见度, 影响交通出行, 还会增加呼吸道和心血管疾病发病率^[2,3]。 快速的城市发展及污染排放, 使得京津冀大气污染传输通道城市 (“2 + 26” 城市) 成为 $PM_{2.5}$ 污染较为严重的区域^[4,5], $PM_{2.5}$ 污染已成为该地区面临的主要环境挑战之一, 严重影响经济社会的可持续发展。

识别 $PM_{2.5}$ 与影响因子的响应关系在提高模型预测准确性过程中至关重要^[6]。 除局部排放以及大气化学过程外, 气象因子在 $PM_{2.5}$ 的扩散、累积以及

转移过程中起着重要作用^[7~9]。 Chen 等^[10] 根据 2013 ~ 2017 年的相关数据对北京进行的研究结果表明, 气象因子对 $PM_{2.5}$ 浓度减小的相对贡献率为 20%。 Zhang 等^[11] 对同时期京津冀空气污染的研究表明, 气象因子对 $PM_{2.5}$ 污染事件的贡献率超过 50%。 邱雨露等^[12] 对 2020 年京津冀 $PM_{2.5}$ 物理和化学过程影响因素的研究表明, 中部地区气象场的变

收稿日期: 2023-01-05; 修订日期: 2023-02-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42071422)

作者简介: 吴舒祺 (1994 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为区域大气污染, E-mail: wushuqi5577@163.com

* 通信作者, E-mail: zhwenji1215@163.com

化导致 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 升高 $20 \sim 55 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 升高比例高达 $69\% \sim 170\%$. 大气遥相关因子对 $\text{PM}_{2.5}$ 也有着重要影响, 其主要通过改变海-陆热力差异来影响区域气象条件, 进而影响 $\text{PM}_{2.5}$ 的演变过程^[13]. 有研究发现, 太平洋年代际涛动 (Pacific decadal oscillation, PDO) 向负相位转变, 导致自 1980 年以来中国中东部冬季雾-霾天数的减少^[14]. 2015 年冬季中国东部 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度出现的跷跷板现象也与厄尔尼诺-南方涛动 (El Niño-southern oscillation, ENSO) 和北极涛动 (Arctic oscillation, AO) 有关^[15].

$\text{PM}_{2.5}$ 时间序列随着时间推移也表现出不均匀模式^[16], 小波变换可用于分析时频空间多尺度的非平稳过程^[17,18], 其主要分为连续小波变换 (continuous wavelet transform, CWT) 和离散小波变换 (discrete wavelet transform, DWT)^[19]. CWT 主要用于识别时间序列中的周期性特征^[20,21], DWT 主要用于时间序列的分解及重构^[22]. $\text{PM}_{2.5}$ 与气象因子的相互作用在不同时频尺度上发生变化, 远比线性关系复杂, 传统线性相关忽略了对全局线性关联的尺度效应的解释^[23,24]. 小波相干 (wavelet transform coherence, WTC) 可以捕捉两个非平稳时间序列的局部协同效应^[25]. MWC (multiple wavelet coherence, PWC) 和 PWC (partial wavelet coherence, PWC) 作为 WTC 的扩展, 已被证明是复相关、偏相关随时频尺度变化的有效方法, 因此被广泛应用于地球科学数据中的多时频尺度相关性分析^[26~30].

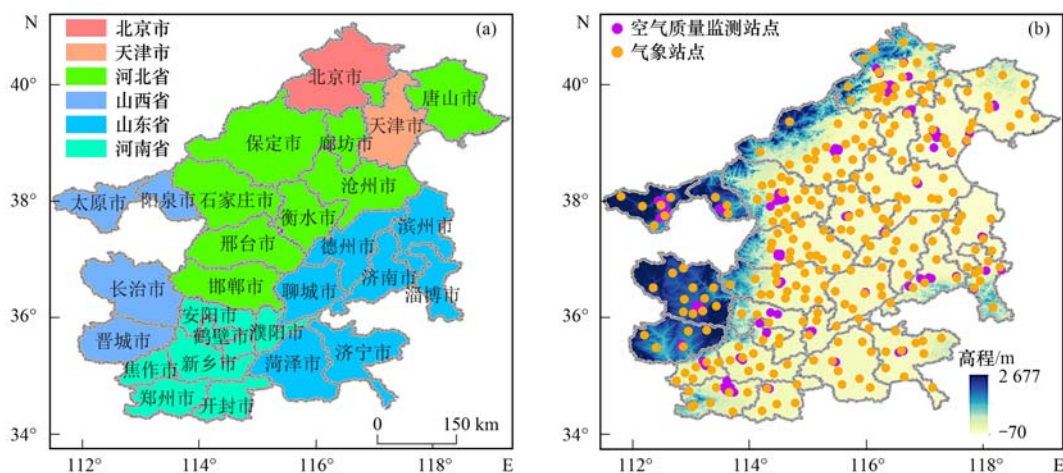
“2+26”城市是京津冀大气污染的重污染源排

放区, 也是中国大气污染防治的重点覆盖区域. 分析 $\text{PM}_{2.5}$ 与气象因子的响应关系和量化大气遥相关因子对响应关系的影响, 对于制定合理有效的区域空气质量管理、最大限度减少空气污染导致的不利影响具有重要意义. 以往研究主要基于双变量评估 $\text{PM}_{2.5}$ 与气象因子的响应关系^[31~33]. 在时频域中, $\text{PM}_{2.5}$ 与多个气象因子的尺度依存关系以及大气遥相关因子对响应关系的影响很少被揭示. 因此, 本文以“2+26”城市为研究区, 基于 CWT 和 DWT 分析 $\text{PM}_{2.5}$ 时间序列的多尺度变化, 利用 WTC 和 MWC 量化 $\text{PM}_{2.5}$ 与单个及多个气象因子在时频域中的响应关系, 并结合 PWC 定量评估大气遥相关因子对响应关系的影响, 以期对 $\text{PM}_{2.5}$ 与影响因子在时频域中的多尺度协同效应提供新的研究思路, 并为区域大气污染治理提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

“2+26”城市 ($34^{\circ}16' \sim 41^{\circ}36' \text{N}$, $111^{\circ}30' \sim 119^{\circ}50' \text{E}$) 包含北京市, 天津市, 河北省的 8 个城市, 山西省的 4 个城市, 山东省的 7 个城市和河南省的 7 个城市, 如图 1(a) 所示. 区域属于暖温带亚湿润季风气候, 大部分地区位于华北平原, 东临渤海、黄海, 西临太行山脉, 北临燕山山脉. 总面积约 27.18万 km^2 , 占全国总面积的 2.82% . 2020 年, 总人口为 1.96 亿, 约占全国总人口的 14.78% . 国内生产总值为 14.39 万亿元, 约占全国生产总值的 14.68% .



(a) “2+26”城市行政区划; (b) 气象站点、空气质量监测站点以及高程分布

图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

1.2 数据来源及处理

本研究以中国环境监测站 2015 ~ 2021 年“2+26”城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据为原始数据. 参考《环境空气质量标准》(GB 3095-2012), 对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据

进行预处理. 本研究使用的气象数据为降水 (PRE)、温度 (TEM)、相对湿度 (RHU) 和风速 (WS), 来源于国家气候中心发布的中国地面气候资料日值数据集 (V3.0), 数据集经过严格的质量控制, 实有率超

过 99%。本研究所使用的大气遥相关因子为北极涛动(AO, <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>), 定义为极地内位势与中纬度地区的位势差异; 厄尔尼诺-南方涛动(ENSO, <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/>) 定义为赤道太平洋中东部大气和海洋温度的波动; 太平洋年代际涛动(PDO, <https://psl.noaa.gov/data/correlation/pdo.data>) 定义为北太平洋的温差。

1.3 研究方法

小波分析将时间序列与满足某些条件的小波函数进行卷积, 将一维时间序列分解为频率和时间分量, 从而可视化时频空间中的功率分布, 适用于多时频尺度特征分析、突变检测等非平稳过程。CWT 可用于获取时间序列的周期性结构特征。DWT 将原始时间序列分解为低频和低频信号, 低频信号表征近似分量, 高频信号表征时间序列中的细节分量。第一层高频系数的重构可用于检测时间序列中的突变特征^[34]。小波函数的选择是小波分析的关键, 本研究选择 Morlet 小波用于连续小波变换, Daubechies 小波用于离散小波变换。

连续小波变换的定义为:

$$W_f(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

式中, $W_f(a, b)$ 为小波系数, $\bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 为母小波的复共轭, a 为伸缩尺度, b 为平移因子, t 为时间。在 b 域上对小波系数的平方进行积分得到小波方差:

$$\text{Var}(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_f(a, b)|^2 db \quad (2)$$

离散小波的定义为:

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-\frac{j}{2}} \psi(2^{-j}t - k) \quad (3)$$

式中, j 为分解层数, k 为平移因子

小波相干可用于量化两个时间序列的协方差强度, 其定义为:

$$R_n^2(s) = \frac{|S[s^{-1} W_n^{XY}(s)]|^2}{S[s^{-1} |W_n^X(s)|^2 \cdot s^{-1} |W_n^Y(s)|^2]} \quad (4)$$

式中, S 为时频空间中的平滑算子, $W_n^X(s)$ 和 $W_n^Y(s)$ 分别为时间序列 X 和 Y 的连续小波变换系数, $W_n^{XY}(s)$ 为交叉小波变换。

多小波相干基于自小波以及交叉小波功率谱计算得到, 可用于研究多个气象因子对 PM_{2.5} 的综合影响。其定义为:

$$\rho_m^2(s) = \frac{W^{XY}(s) \cdot W^{XY}(s)^*}{W^{XX}(s) \cdot W^{YY}(s)} \quad (5)$$

式中, $W^{XY}(s)$ 为响应变量 Y 与预测变量 X 之间的平

滑交叉小波功率谱; $W^{XX}(s)$ 为预测变量 X 之间的平滑自小波功率矩阵, $W^{YY}(s)$ 为响应变量 Y 的平滑自小波功率矩阵, $*$ 为复共轭。

偏小波相干通过排除其他变量的影响, 探究时频空间中的二元关系。当响应变量 y , 预测变量 x , 涉及一个控制变量 Z 时, 其定义为:

$$\rho_{y,x,z}^2(s) = \frac{|\gamma_{y,x}(s, \tau) - \gamma_{y,z}(s, \tau) \gamma_{y,z}(s, \tau)^*|^2}{[1 - R_{y,z}^2(s, \tau)] \cdot [1 - R_{x,z}^2(s, \tau)]} \quad (6)$$

式中, $R_{y,z}(s, \tau)$ 为响应变量 y 与控制变量 Z 之间的小波相干, $R_{x,z}(s, \tau)$ 为预测变量 x 与控制变量 Z 之间的小波相干, $R_{y,x}(s, \tau)$ 为 y 和 x 之间的复小波相干, $\gamma_{y,z}(s, \tau)$ 为 y 和 Z 之间的复小波相干, $*$ 为复共轭。

本研究所使用的 CWT、WTC、MWC 和 PWC 的显著性水平均采用基于一阶自相关系数的蒙特卡罗估计(1 000 次重复)^[35]。为定量评估预测变量、控制变量对响应变量的影响程度, 计算小波影响锥之外, WTC、MWC 和 PWC 的小波相干平均值(average wavelet coherence, AWC)和显著功率百分比(percentage of significant power, POSP)。对于预测变量组合, 只有当添加的预测变量使得 POSP 增加 > 5%, 才具有统计学意义^[36]。

2 结果与分析

2.1 时空变化特征分析

图 2 为 2015~2021 年“2+26”城市的 PM_{2.5} 浓度空间变化。从图 2 中可以看出, “2+26”城市的 PM_{2.5} 浓度具有中间高、外围低的空间分布格局; 整体形成了以河北省的保定市、邢台市、石家庄市、邯郸市和衡水市为中心的 PM_{2.5} 重污染区域, 高值区域呈片状分布于山东省和河南省的相关城市。浓度较低的区域主要集中在北部地区, 由于太行山脉对 PM_{2.5} 颗粒的扩散起到阻隔作用, 山西省的 4 个城市 PM_{2.5} 浓度也保持在较低水平。PM_{2.5} 浓度的高值区域空间范围逐年减小, 低值区域逐年由四周向中心扩散。2017~2018 年, 区域 PM_{2.5} 浓度下降明显, 其主要原因可能是 2017 年政府空气污染防治力度加大^[37,38]。

PM_{2.5} 突变事件指的是高浓度 PM_{2.5} 在短时间内引发的严重雾-霾污染, 对生态环境的危害较大。图 3(a) 为 PM_{2.5} 时间序列的离散小波变换。整个研究期间内, 总共发生 9 次突变事件, 并且集中在 2018 年以前。PM_{2.5} 突变事件主要发生在冬季, 冬季 PM_{2.5} 时间序列的频率高、振幅较强, 污染相对严重; 作为采暖季, 冬季的大气层结稳定, 易出现逆温以及边

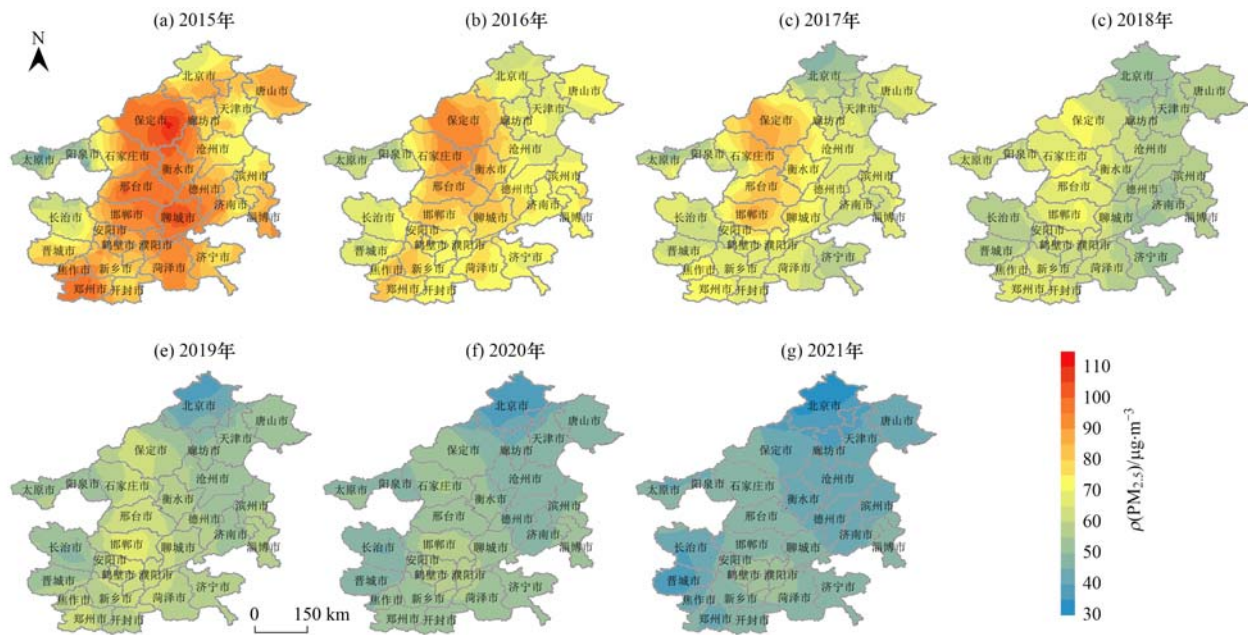


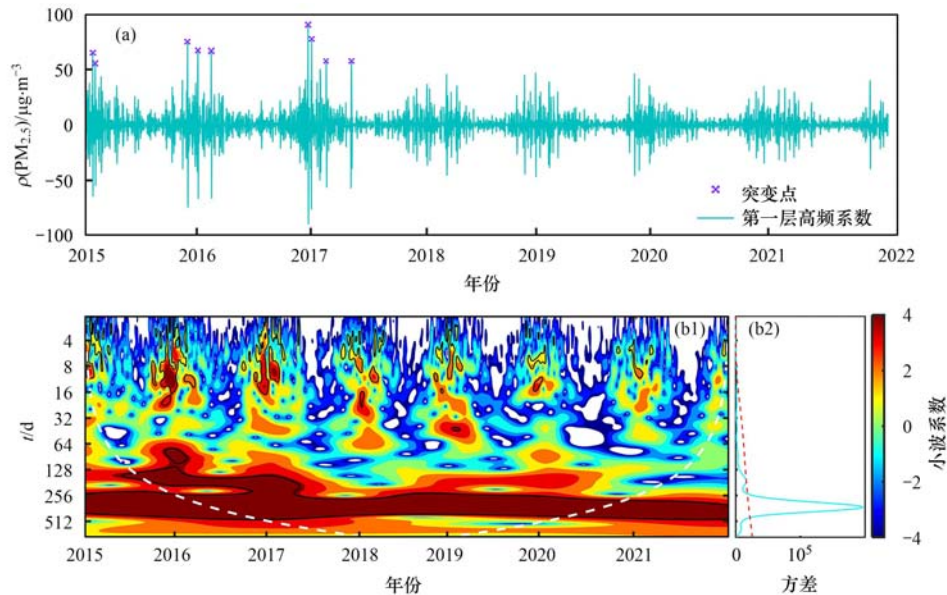
图2 2015~2021年PM_{2.5}浓度空间变化

Fig. 2 Spatial variations in PM_{2.5} concentration from 2015 to 2021

界层高度偏低,因此导致PM_{2.5}浓度的突然上升.夏季PM_{2.5}时间序列的频率低且振幅弱;在夏季,大气稳定性较弱,不利于污染物的形成,因此PM_{2.5}污染较轻或消失.从年际变化来看,“2+26”城市PM_{2.5}时间序列的频率和振幅呈下降趋势,并且趋于稳定.这表明空气质量逐年改善,政府监管和实施有效的空气污染防治措施是有效的.

图3(b)为PM_{2.5}时间序列的连续小波变换.PM_{2.5}时间序列具有多个尺度周期,分别为4~16、

16~32、64~115、128~256和256~512 d.作为多个小时频尺度周期的收敛,256~512 d尺度周期特征较稳定,覆盖了整个时域,同时也是PM_{2.5}浓度的主导周期.在小波方差中,有一个明显的峰值,对应年尺度,这意味着周期振荡在年尺度上是最强的,几乎控制了整个时频域中日均PM_{2.5}浓度的波动.在较短的时频尺度上,年份之间的差异很小.需要说明的是,2~8 d尺度周期不仅与大气条件变化有关,还与人类活动的周末效应有关^[39],PM_{2.5}的季节性周



(a) 离散小波变换; (b) 连续小波变换: 1 为小波功率谱, 封闭实线区域表示通过红噪声检测, 具有 5% 显著性水平, 锥型虚线为小波影响锥, 2 为小波方差, 虚线表示具有 5% 显著性水平的红噪声检测, 实线为小波方差

图3 2015~2021年PM_{2.5}浓度时间变化

Fig. 3 Temporal variations in PM_{2.5} concentration from 2015 to 2021

期是由大气变量的季节性变化引起的^[40].

2.2 PM_{2.5}对气象因子的响应分析

表 1 为 PM_{2.5}与气象因子之间小波相干和多小波相干的参数统计,图 4 为 PM_{2.5}与气象因子的小波相干,图 5 为 PM_{2.5}与气象因子的多小波相干. 本研究将时频尺度分为 3 个部分:小时频尺度: < 4 月, 中时频尺度: 4 ~ 8 月, 大时频尺度: > 8 月. PM_{2.5}与气象因子在多个时频尺度上具有显著的相干性. 在小时频尺度上: PM_{2.5}与降水的平均交叉位相角向下约 90°, PM_{2.5}提前于降水约 1/4 周期; PM_{2.5}与温度的平均交叉位相角同位相, 具有正相干; PM_{2.5}与相对湿度的平均交叉位相角向下约 45°, PM_{2.5}提前相对湿度约 1/8 周期; PM_{2.5}与风速的平均交叉位相角向下约 135°, PM_{2.5}提前风速约 3/8 周期. 在中时频尺度上: PM_{2.5}与降水的平均交叉位相角向下约 90°, PM_{2.5}提前降水约 1/4 周期; PM_{2.5}与温度具有负相干; PM_{2.5}与相对湿度的交叉位相角向下 45°, PM_{2.5}提前相对湿度约 1/8 周期; PM_{2.5}与风速的平均交叉位相角向上约 90°, PM_{2.5}延后风速约 1/4 周期. 在大时频尺度上: PM_{2.5}与降水、温度具有负相干; PM_{2.5}与相对湿度、风速的交叉位相角相反, PM_{2.5}延后相对湿度约 1/4 周期, 而提前风速约 1/4 周期. 在所有时频尺度上, PM_{2.5}与相对湿度、温度的相干性较强. 在小、中时频尺度上, PM_{2.5}与风速相干性较强,

而在大时频尺度上, PM_{2.5}与温度的相干性较强.

在所有时频尺度上, 解释 PM_{2.5}变化的最佳双变量组合是 TEM-RHU. 温度和相对湿度主导的尺度周期存在差异, 因此其组合可显著提高对 PM_{2.5}变化的解释能力. 解释 PM_{2.5}变化的最佳三变量组合是 PRE-TEM-RHU, 其 POSP 在所有组合中最高. 变量组合在不同时频尺度上对 PM_{2.5}变化的解释能力也不尽相同. 在小时频尺度上, 解释 PM_{2.5}变化的最佳双变量组合是 TEM-WS, 最佳三变量组合是 PRE-RHU-WS. 在中时频尺度上, 解释 PM_{2.5}变化的最佳双变量组合是 TEM-RHU, 最佳三变量组合是 TEM-RHU-WS. 在大时频尺度上, 解释 PM_{2.5}变化的最佳双变量组合是 TEM-RHU, 最佳三变量组合是 PRE-TEM-RHU. 相较于单个气象因子, 气象因子组合显著提高在小时频尺度上对 PM_{2.5}变化的解释能力. 此外, AWC 随着预测变量数量的增加而增加, POSP 却并不一定增加, 如三变量组合存在 POSP 小于双变量组合的情况. 这可能是由于: ① 添加了额外变量导致显著性阈值同时增加; ② 多个预测变量与响应变量的显著相干域重叠, 预测变量之间的共线性效应降低了预测变量的方差贡献率. 因此只有添加可以独立解释 PM_{2.5}在特定尺度上变化的预测变量, 才能显著提高变量组合对 PM_{2.5}变化的解释能力.

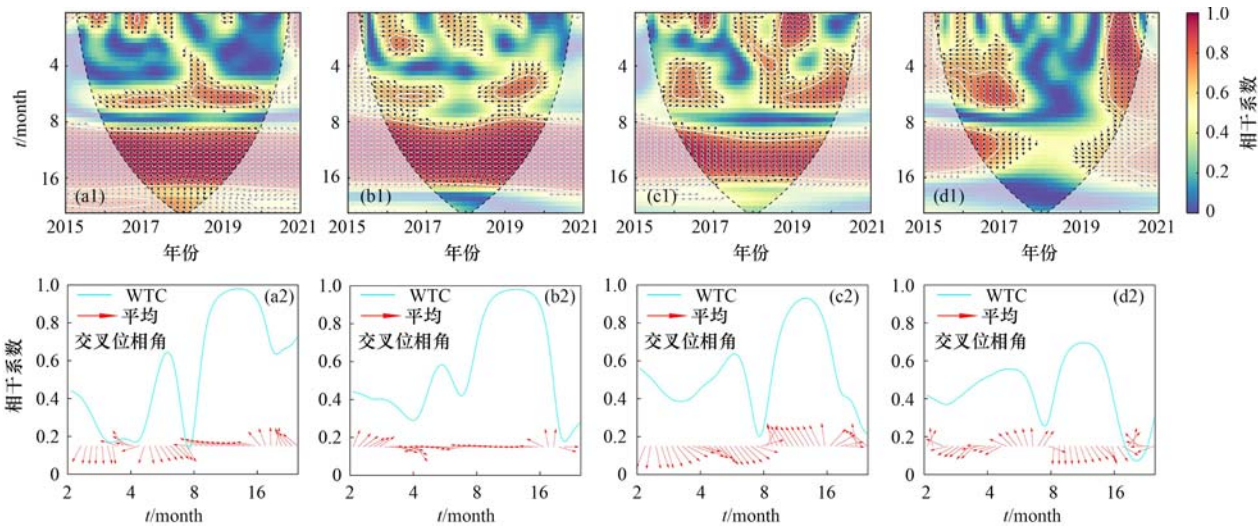
表 1 PM_{2.5}与气象因子的小波相干和多小波相干参数统计

组合		POSP/%				AWC			
		所有时频尺度	< 4 月	4 ~ 8 月	> 8 月	所有时频尺度	< 4 月	4 ~ 8 月	> 8 月
单变量	PM _{2.5} -PRE	26.37	0.79	15.11	71.62	0.46	0.52	0.53	0.55
	PM _{2.5} -TEM	28.16	2.65	9.82	81.25	0.54	0.62	0.61	0.60
	PM _{2.5} -RHU	28.26	13.46	21.75	54.39	0.53	0.55	0.55	0.59
	PM _{2.5} -WS	16.17	13.76	26.89	7.26	0.41	0.53	0.53	0.51
双变量	PM _{2.5} -PRE-TEM	30.05	0.15	21.90	77.53	0.71	0.82	0.81	0.80
	PM _{2.5} -PRE-RHU	31.59	13.76	14.05	73.99	0.74	0.77	0.76	0.78
	PM _{2.5} -PRE-WS	29.00	11.64	20.24	60.98	0.69	0.75	0.75	0.76
	PM _{2.5} -TEM-RHU	46.86	13.76	51.06	85.47	0.80	0.82	0.82	0.83
	PM _{2.5} -TEM-WS	38.66	21.69	29.91	70.10	0.75	0.79	0.79	0.81
	PM _{2.5} -RHU-WS	23.78	14.55	19.94	39.86	0.70	0.73	0.73	0.73
三变量	PM _{2.5} -PRE-TEM-RHU	49.50	16.40	42.15	99.01	0.88	0.91	0.91	0.91
	PM _{2.5} -PRE-TEM-WS	37.91	12.96	30.97	77.53	0.87	0.93	0.93	0.93
	PM _{2.5} -PRE-RHU-WS	33.53	17.33	16.01	73.82	0.85	0.90	0.90	0.88
	PM _{2.5} -TEM-RHU-WS	47.71	15.87	48.19	87.84	0.91	0.93	0.92	0.93
四变量	PM _{2.5} -PRE-TEM-RHU-WS	49.30	20.77	39.58	99.03	0.95	0.97	0.97	0.97

2.3 影响响应关系的大气遥相关因子分析

表 2 为 PM_{2.5}与气象因子的偏小波相干参数统计,图 6 ~ 8 为排除大气遥相关因子的影响后, PM_{2.5}与气象因子的偏小波相干. 在所有时频尺度上: ENSO 对 PM_{2.5}与降水之间的响应关系影响较大, 去除 ENSO 的影响后, POSP 减少 4.03%, 表明 ENSO

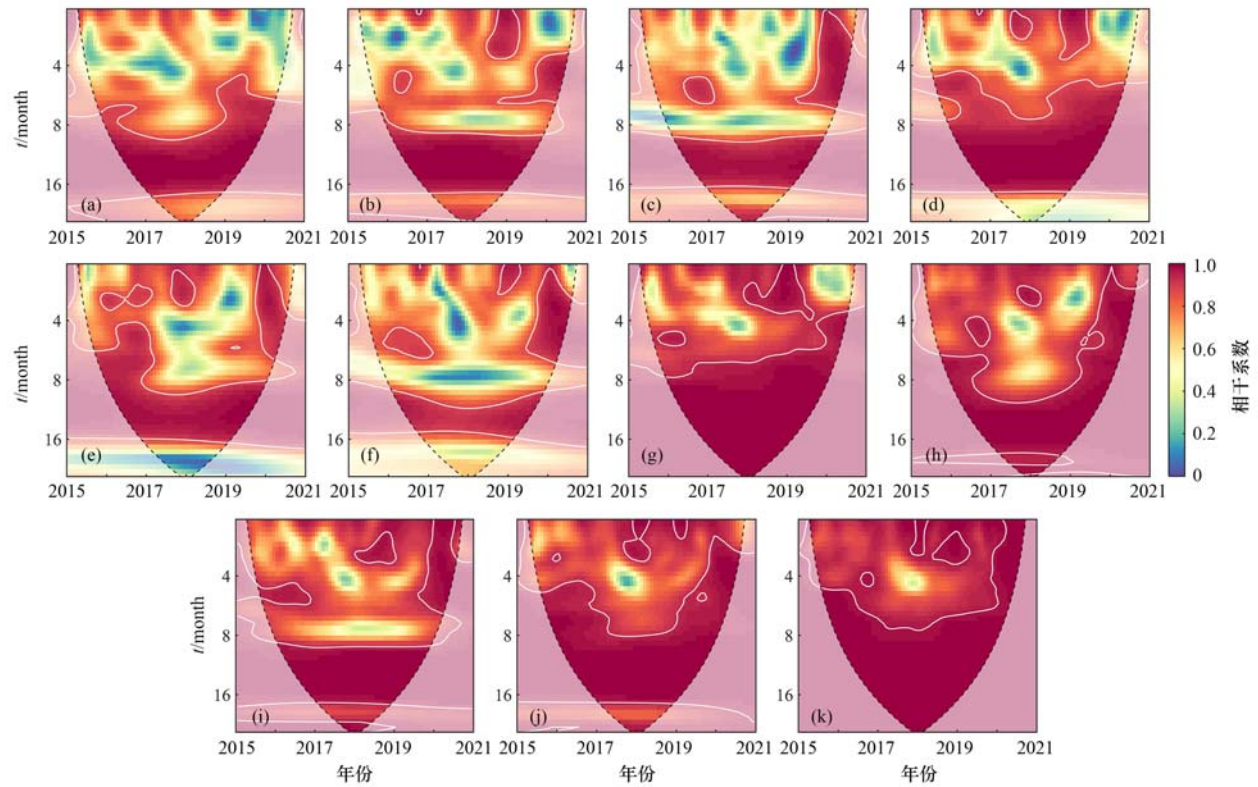
增强了 PM_{2.5}与降水之间的响应关系; 而 PDO 对 PM_{2.5}与降水之间的响应关系影响较小. ENSO 对 PM_{2.5}与温度之间响应关系的影响较大, 并且具有削弱作用(POSP 增加 4.38%), 而 PDO 对响应关系具有较小的影响. PDO 对 PM_{2.5}与相对湿度之间响应关系的影响较大, 并且具有增强作用(POSP 减少



(a) WTC: $PM_{2.5}$ -PRE; (b) WTC: $PM_{2.5}$ -TEM; (c) WTC: $PM_{2.5}$ -RHU; (d) WTC: $PM_{2.5}$ -WS; 箭头水平向右表示同位相, 水平向左表示相反位相, 向上表示 $PM_{2.5}$ 延后于气象因子, 向下表示 $PM_{2.5}$ 提前于气象因子; 封闭实线区域表示通过红噪声检测, 具有 5% 显著性水平, 锥型虚线为小波影响锥, 受小波边缘效应的影响, 不考虑小波影响锥内区域(阴影部分)

图 4 $PM_{2.5}$ 与气象因子的小波相干

Fig. 4 Wavelet coherence between $PM_{2.5}$ and meteorological factors



(a) $PM_{2.5}$ -PRE-TEM, (b) $PM_{2.5}$ -PRE-RHU, (c) $PM_{2.5}$ -PRE-WS, (d) $PM_{2.5}$ -TEM-RHU, (e) $PM_{2.5}$ -TEM-WS, (f) $PM_{2.5}$ -RHU-WS, (g) $PM_{2.5}$ -PRE-TEM-RHU, (h) $PM_{2.5}$ -PRE-TEM-WS, (i) $PM_{2.5}$ -PRE-RHU-WS, (j) $PM_{2.5}$ -TEM-RHU-WS, (k) $PM_{2.5}$ -PRE-TEM-RHU-WS; 封闭实线区域表示通过红噪声检测, 具有 5% 显著性水平, 锥型虚线为小波影响锥, 受小波边缘效应的影响, 不考虑小波影响锥内区域(阴影部分)

图 5 $PM_{2.5}$ 与气象因子的多小波相干

Fig. 5 Multiple wavelet coherence between $PM_{2.5}$ and meteorological factors

5.42%), 而 AO 对响应关系具有较小的影响. PDO 对 $PM_{2.5}$ 与风速之间响应关系的影响较大, 并且具有增强作用(POSP 减少 10.30%), 而 ENSO 对响应关系影响较小.

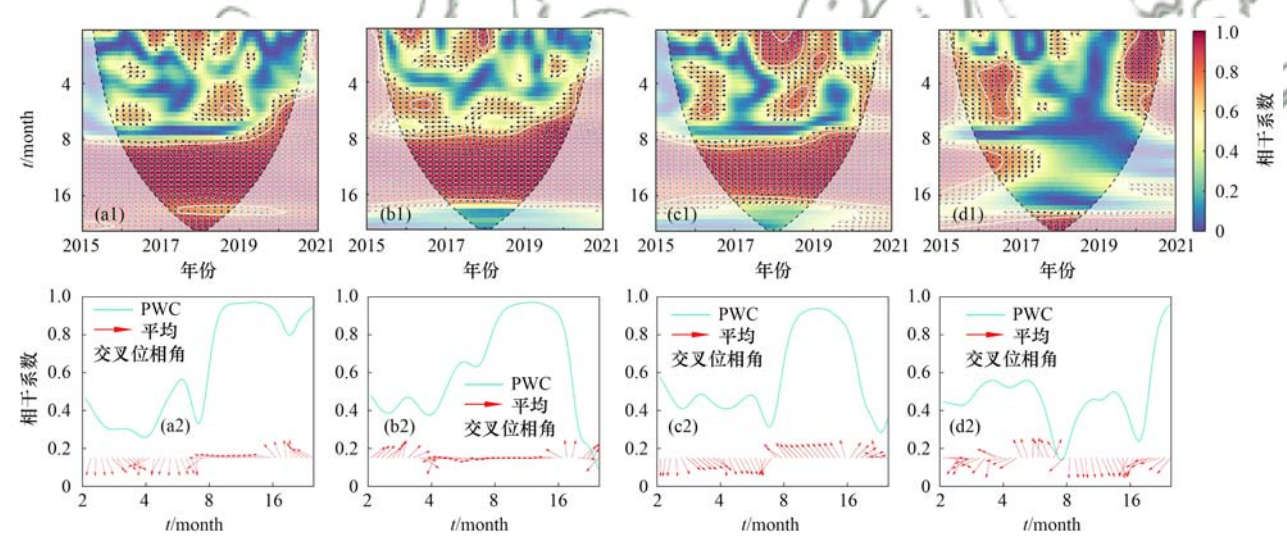
$PM_{2.5}$ 与降水的响应关系中: AO 对小时频尺度影响较大, 并且具有增强作用; ENSO 对中时频尺度影响较大, 并且具有增强作用; AO 对大时频尺度影响较大, 并且具有削弱作用. $PM_{2.5}$ 与

温度的响应关系中:PDO 对小时频尺度影响较大,并且具有削弱作用;AO 对中时频尺度影响较大,并且具有削弱作用;ENSO 对大时频尺度影响较大,并且具有削弱作用. PM_{2.5}与相对湿度的响应关系中:ENSO 对小、中时频尺度影响较大,并且具有增强作用;AO 对大时频尺度影响较大,并且具有削弱作用. PM_{2.5}与风速的响应关系中:ENSO 对小时频尺度影响较大,并且具有削弱作用;PDO 对中、大时频尺度影响较大,并且具有增强作用.

表 2 PM_{2.5}与气象因子的偏小波相干参数统计

组合	POSP/%				AWC			
	所有时频尺度	<4 月	4~8 月	>8 月	所有时频尺度	<4 月	4~8 月	>8 月
PM _{2.5} -PRE ~ AO	28.26(1.89)	0.17(-0.62)	6.34(-8.77)	88.85(17.23)	0.52(0.06)	0.56(0.04)	0.57(0.04)	0.60(0.05)
PM _{2.5} -PRE ~ ENSO	22.34(-4.03)	0.40(-0.39)	3.78(-11.33)	71.11(-0.51)	0.49(0.03)	0.58(0.06)	0.58(0.05)	0.56(0.01)
PM _{2.5} -PRE ~ PDO	26.12(-0.25)	0.19(-0.60)	12.69(-2.42)	74.49(2.87)	0.49(0.03)	0.54(0.02)	0.54(0.01)	0.51(-0.04)
PM _{2.5} -TEM ~ AO	30.70(2.54)	2.68(0.03)	15.26(5.44)	83.78(2.53)	0.57(0.03)	0.66(0.04)	0.64(0.03)	0.61(0.01)
PM _{2.5} -TEM ~ ENSO	32.54(4.38)	6.22(3.57)	9.21(-0.61)	92.23(10.98)	0.59(0.05)	0.70(0.08)	0.69(0.08)	0.69(0.09)
PM _{2.5} -TEM ~ PDO	29.15(0.99)	9.39(6.74)	8.16(-1.66)	77.87(-3.38)	0.57(0.03)	0.64(0.02)	0.62(0.01)	0.63(0.03)
PM _{2.5} -RHU ~ AO	29.05(0.79)	13.49(0.03)	9.06(-12.69)	71.28(16.89)	0.54(0.01)	0.50(-0.05)	0.50(-0.05)	0.53(-0.06)
PM _{2.5} -RHU ~ ENSO	23.73(-4.53)	11.11(-2.35)	8.76(-12.99)	56.59(2.20)	0.54(0.01)	0.61(0.06)	0.61(0.06)	0.60(0.01)
PM _{2.5} -RHU ~ PDO	22.84(-5.42)	15.34(1.88)	11.48(-10.27)	45.10(-9.29)	0.51(-0.02)	0.61(0.06)	0.61(0.06)	0.57(-0.02)
PM _{2.5} -WS ~ AO	12.94(-3.23)	20.24(6.48)	9.21(-17.68)	7.77(0.51)	0.39(-0.02)	0.63(0.10)	0.62(0.09)	0.58(0.07)
PM _{2.5} -WS ~ ENSO	14.38(-1.79)	21.83(8.07)	14.95(-11.94)	4.22(-3.04)	0.40(-0.01)	0.51(-0.02)	0.52(-0.01)	0.50(-0.01)
PM _{2.5} -WS ~ PDO	5.87(-10.30)	11.90(-1.86)	3.47(-23.42)	0.84(-6.42)	0.38(-0.03)	0.52(-0.01)	0.52(-0.01)	0.45(-0.06)

1) 括号中数值为 PWC 的 POSP 和 AWC 相较于 WTC 的差值,负值表示减少,正值表示增加



(a) PWC: PM_{2.5}-PRE ~ AO; (b) PWC: PM_{2.5}-TEM ~ AO; (c) PWC: PM_{2.5}-RHU ~ AO; (d) PWC: PM_{2.5}-WS ~ AO; 封闭实线区域表示通过红噪声检测,具有 5% 显著性水平,锥型虚线为小波影响锥,受小波边缘效应的影响,不考虑小波影响锥内区域(阴影部分)

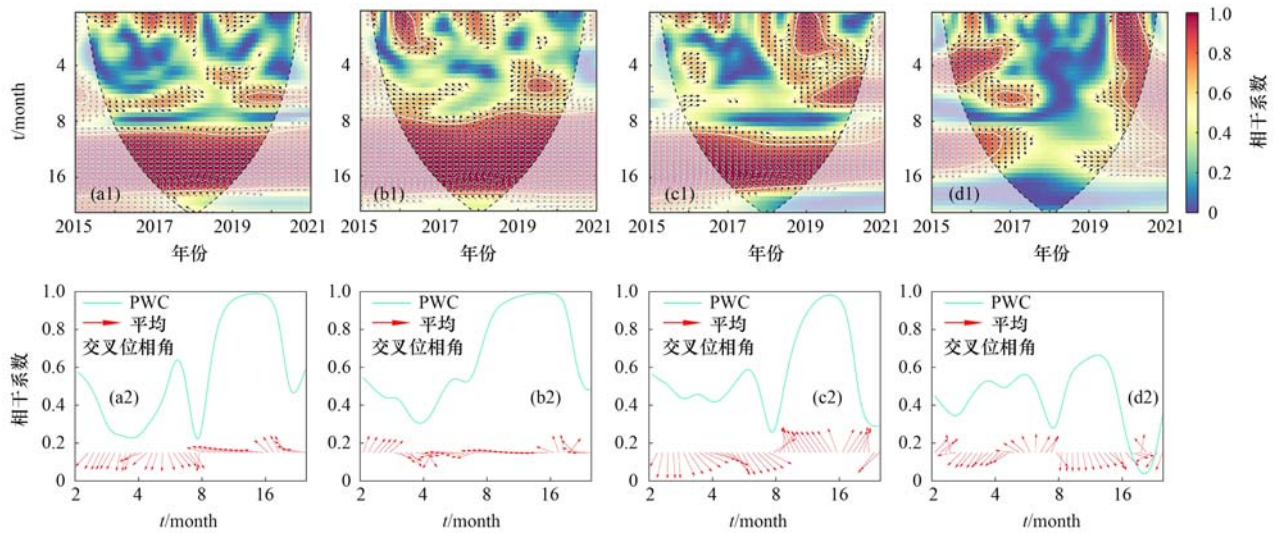
图 6 去除 AO 影响后,PM_{2.5}与气象因子的偏小波相干

Fig. 6 Partial wavelet coherence between PM_{2.5} and meteorological factors after excluding the effects of the AO

3 讨论

Deng 等^[41]揭示了风速是影响京津冀地区 PM_{2.5}变化最重要的气象因子. Jing 等^[42]为保持时间尺度的一致性,选择年尺度气象数据进行研究,结果表明温度是影响 PM_{2.5}变化的决定性因素. Gong 等^[43]研究结果表明相对湿度是最重要的正相关因素,温度是最重要的负相关因素. 研究数据和时间段的选择可能导致不同的研究结果. 本研究考虑 PM_{2.5}与气象因子在多时频尺度上的依存关系,从而揭示

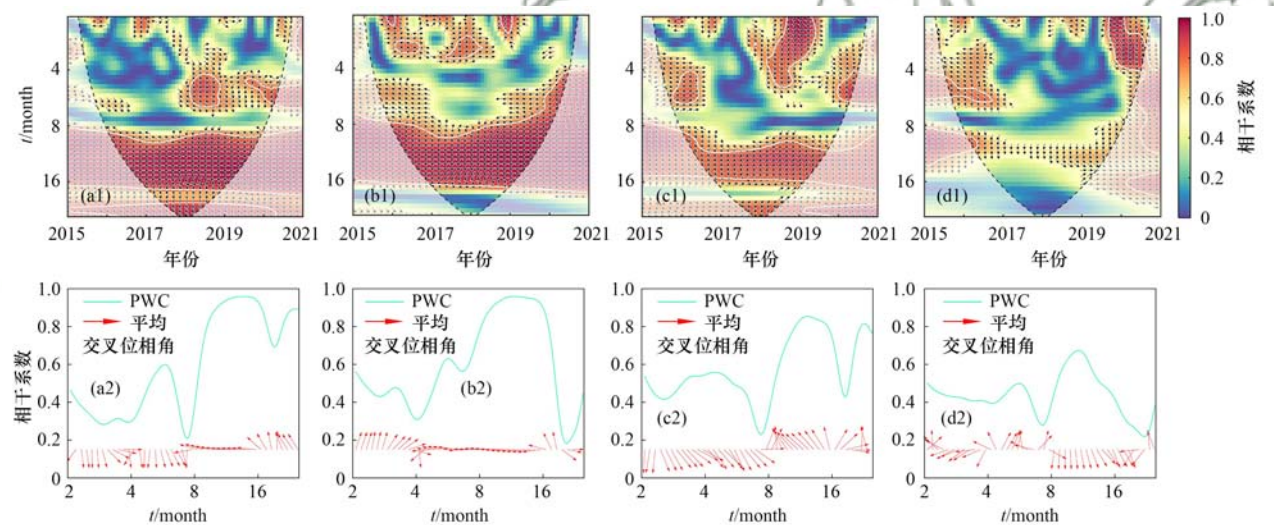
变量之间的局部响应程度. 考虑多个时频尺度上的特征可以有效预测 PM_{2.5}变化,从而制定有针对性的大气污染防治措施^[44,45]. 例如,短期预测模型应优先考虑较短时频尺度上与 PM_{2.5}相关的因素,而长期预测模型应考虑不同时频尺度上变量间的耦合程度^[6]. 本研究发现,PM_{2.5}时间序列具有显著的年尺度周期,这与大多数气象因子的主周期相似^[46]. 这表明,气象因子是引起 PM_{2.5}变化的潜在驱动因素^[47],而气象因子与大气遥相关因子密切相关. 当 AO 指



(a) PWC: $PM_{2.5}$ -PRE ~ ENSO; (b) PWC: $PM_{2.5}$ -TEM ~ ENSO; (c) PWC: $PM_{2.5}$ -RHU ~ ENSO; (d) PWC: $PM_{2.5}$ -WS ~ ENSO; 封闭实线区域表示通过红噪声检测,具有 5% 显著性水平,锥型虚线为小波影响锥,受小波边缘效应的影响,不考虑小波影响锥内区域(阴影部分)

图 7 去除 ENSO 影响后, $PM_{2.5}$ 与气象因子的偏小波相干

Fig. 7 Partial wavelet coherence between $PM_{2.5}$ and meteorological factors after excluding the effects of the ENSO



(a) PWC: $PM_{2.5}$ -PRE ~ PDO; (b) PWC: $PM_{2.5}$ -TEM ~ PDO; (c) PWC: $PM_{2.5}$ -RHU ~ PDO; (d) PWC: $PM_{2.5}$ -WS ~ PDO; 封闭实线区域表示通过红噪声检测,具有 5% 显著性水平,锥型虚线为小波影响锥,受小波边缘效应的影响,不考虑小波影响锥内区域(阴影部分)

图 8 去除 PDO 影响后, $PM_{2.5}$ 与气象因子的偏小波相干

Fig. 8 Partial wavelet coherence between $PM_{2.5}$ and meteorological factors after excluding the effects of the PDO

数强时,中国大部分地区冬季温度明显升高并伴随降水量的增加^[48]. AO 异常对华北和华中地区的空气污染的影响更为显著,影响通常是由温度和风速等因素变化引起的^[15]. 在外部强迫因子中,ENSO 是调节赤道附近海-气耦合系统年际变化的最强信号^[49,50]. ENSO 在暖事件(厄尔尼诺)和冷事件(拉尼娜)之间不规则振荡,在北方冬季到达顶峰,并在 2~7 年内重复出现^[14]. 其能够引起大气环流异常,进而影响区域气象条件^[51]. PDO 在中国气候模式中起着主导作用,是调节 ENSO 与东亚气候最重要的遥相关因子^[52,53],特别是在 21 世纪, PDO 暖相位与温度、降水等区域气象因子密切相关. AO、ENSO

和 PDO 通过大气环流以遥相关形式影响区域气候^[54],间接对 $PM_{2.5}$ 的形成、转移以及消散产生重要影响.

在 MWC 中,相干性随气象因子数量的增加而增强,表明 $PM_{2.5}$ 变化是由多个气象因子决定的. 这也与 Zhang 等^[55] 研究结果一致,即 $PM_{2.5}$ 变化过程受多个气象因子的协同作用,并且多变量组合对 $PM_{2.5}$ 变化的解释能力强于单变量. 但本研究所使用的 $PM_{2.5}$ 站点数据时间序列较短,可能会遗漏一些典型或极端事件,较长时间的记录则可以更好反映 $PM_{2.5}$ 与气象因子的关系,大气遥相关因子对 $PM_{2.5}$ 变化的影响也主要体现在年际尺度上^[48]. 此外,小

波分析域的选择非常关键,在进行时域扩展时,噪声误差可能会被放大^[56].小波分析是一种简单而有效的统计分析方法,可作为 PM_{2.5}影响因子分析方法的补充.但统计分析缺乏对 PM_{2.5}变化的物理机制研究,未来可结合海-气耦合模型进一步研究分析 PM_{2.5}、气象因子和大气遥相关因子之间的潜在物理机制.

4 结论

(1)“2+26”城市的 PM_{2.5}浓度具有中间高、外围低的空间分布格局. PM_{2.5}突变事件主要发生于气象条件稳定的冬季,并且集中在 2018 年以前. 256 ~ 512 d 的年尺度周期特征较稳定,同时也是 PM_{2.5}时间序列的主导周期.

(2)在所有时频尺度上,PM_{2.5}与相对湿度、温度的相干性较强.在小、中时频尺度上,PM_{2.5}与风速相干性较强,而在大时频尺度上,PM_{2.5}与温度的相干性较强.气象因子组合显著提高在小时频尺度上对 PM_{2.5}变化的解释能力.降水、温度和相对湿度的组合可作为解释 PM_{2.5}在所有时频尺度上变化的最佳变量组合.

(3)不同时频尺度上,大气遥相关因子对响应关系的增强/削弱作用不尽相同.在所有时频尺度上,ENSO 对 PM_{2.5}与降水、温度之间的响应关系的影响较大,PDO 对 PM_{2.5}与相对湿度、风速之间响应关系的影响较大.

参考文献:

- [1] 王丽丽,刘笑杰,李丁,等.长江经济带 PM_{2.5}空间异质性和驱动因素的地理探测[J].环境科学,2022,43(3):1190-1200.
Wang L L, Liu X J, Li D, et al. Geographical detection of spatial heterogeneity and drivers of PM_{2.5} in the Yangtze River Economic Belt [J]. Environmental Science, 2022, 43(3): 1190-1200.
- [2] 潘晨,康志明.2001~2019年气象条件对江苏省 PM_{2.5}分布的影响[J].环境科学,2022,43(2):649-662.
Pan C, Kang Z M. Impact of meteorological conditions on PM_{2.5} in Jiangsu province from 2001 to 2019 [J]. Environmental Science, 2022, 43(2): 649-662.
- [3] 葛岂序,刘岩,杨洪,等.2015~2019年河南省 PM_{2.5}时空特征与驱动因素分析[J].环境科学,2022,43(4):1697-1705.
Ge Q X, Liu Y, Yang H, et al. Analysis on spatial temporal characteristics and driving factors of PM_{2.5} in Henan province from 2015 to 2019 [J]. Environmental Science, 2022, 43(4): 1697-1705.
- [4] 朱媛媛,高愈霄,汪巍,等.2019年10~12月京津冀及周边“2+26”城市重污染减排效果评估[J].环境科学,2020,41(10):4402-4412.
Zhu Y Y, Gao Y X, Wang W, et al. Assessment of emergency emission reduction effect during the heavy air pollution episodes in Beijing, Tianjin, Hebei, and its surrounding area(‘2+26’ cities) from October to December 2019 [J]. Environmental Science, 2020, 41(10): 4402-4412.
- [5] 李慧,王淑兰,张文杰,等.京津冀及周边地区“2+26”城市空气质量特征及其影响因素[J].环境科学研究,2021,34(1):172-184.
Li H, Wang S L, Zhang W J, et al. Characteristics and influencing factors of urban air quality in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding areas(‘2+26’ cities) [J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(1): 172-184.
- [6] Wang J J, Lu X M, Yan Y T, et al. Spatiotemporal characteristics of PM_{2.5} concentration in the Yangtze River Delta urban agglomeration, China on the application of big data and wavelet analysis [J]. Science of the Total Environment, 2020, 724, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138134.
- [7] 蔡子颖,郝团,韩素芹,等.2000~2020年天津 PM_{2.5}质量浓度演变及驱动因子分析[J].环境科学,2022,43(3):1129-1139.
Cai Z Y, Hao J, Han S Q, et al. Analysis of change and driving factors of PM_{2.5} mass concentration in Tianjin from 2000 to 2020 [J]. Environmental Science, 2022, 43(3): 1129-1139.
- [8] 郝团,蔡子颖,韩素芹,等.基于模式过程分析技术天津地区 PM_{2.5}污染气象成因分析[J].环境科学,2022,43(5):2373-2382.
Hao J, Cai Z Y, Han S Q, et al. Research on causes of severely polluted weather in Tianjin based on process analytical technology [J]. Environmental Science, 2022, 43(5): 2373-2382.
- [9] 齐鹏,周颖,程水源,等.城区与郊区 PM_{2.5}污染及传输特征差异性[J].环境科学,2022,43(11):5018-5029.
Qi P, Zhou Y, Cheng S Y, et al. Difference in PM_{2.5} pollution and transport characteristics between urban and suburban areas [J]. Environmental Science, 2022, 43(11): 5018-5029.
- [10] Chen Z Y, Chen D L, Kwan M P, et al. The control of anthropogenic emissions contributed to 80% of the decrease in PM_{2.5} concentrations in Beijing from 2013 to 2017 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19(21): 13519-13533.
- [11] Zhang H, Yuan H O, Liu X H, et al. Impact of synoptic weather patterns on 24 h-average PM_{2.5} concentrations in the North China Plain during 2013-2017 [J]. Science of the Total Environment, 2018, 627: 200-210.
- [12] 邱雨露,陈磊,朱佳,等.COVID-19管控期间气象条件变化对京津冀 PM_{2.5}浓度影响[J].环境科学,2022,43(6):2831-2839.
Qiu Y L, Chen L, Zhu J, et al. Impacts of changes in meteorological conditions during COVID-19 lockdown on PM_{2.5} concentrations over the Jing-Jin-Ji region [J]. Environmental Science, 2022, 43(6): 2831-2839.
- [13] Liu Y L, Shi G M, Zhan Y, et al. Characteristics of PM_{2.5} spatial distribution and influencing meteorological conditions in Sichuan Basin, southwestern China [J]. Atmospheric Environment, 2021, 253, doi: 10.1016/j.atmosenv.2021.118364.
- [14] Xie B Y, Yang Y, Wang P Y, et al. Impacts of ENSO on wintertime PM_{2.5} pollution over China during 2014-2021 [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2022, 15(4), doi: 10.1016/j.aosl.2022.100189.
- [15] Lu S H, He J J, Gong S L, et al. Influence of Arctic Oscillation abnormalities on spatio-temporal haze distributions in China [J]. Atmospheric Environment, 2020, 223, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117282.
- [16] Yuan W Y, Wang K Q, Bo X, et al. A novel multi-factor &

- multi-scale method for $PM_{2.5}$ concentration forecasting [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **255**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113187.
- [17] 张可可, 胡冬梅, 闫雨龙, 等. 基于小波变换的山西省 $PM_{2.5}$ 污染特征及影响因素[J]. *环境科学*, 2022, **43**(3): 1226-1234.
- Zhang K K, Hu D M, Yan Y L, *et al.* Pollution characteristics and influencing factors of $PM_{2.5}$ in Shanxi province based on wavelet transform[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(3): 1226-1234.
- [18] 彭珂醒, 李瑞飞, 周亦辰, 等. 地表水悬浮态多环芳烃时空变化特征及主要输入源响应机制[J]. *环境科学*, 2022, **43**(7): 3645-3655.
- Peng K X, Li R F, Zhou Y C, *et al.* Spatiotemporal distribution and source apportionment of suspended polycyclic aromatic hydrocarbons in surface water [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(7): 3645-3655.
- [19] Abebe S A, Qin T L, Zhang X, *et al.* Wavelet transform-based trend analysis of streamflow and precipitation in Upper Blue Nile River basin[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2022, **44**, doi: 10.1016/j.ejrh.2022.101251.
- [20] Dong Y P, Zhou H, Fu Y L, *et al.* Wavelet periodic and compositional characteristics of atmospheric $PM_{2.5}$ in a typical air pollution event at Jinzhong city, China [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2021, **12**(1): 245-254.
- [21] Ciria T P, Labat D, Chiogna G. Detection and interpretation of recent and historical streamflow alterations caused by river damming and hydropower production in the Adige and Inn River basins using continuous, discrete and multiresolution wavelet analysis[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, **578**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.124021.
- [22] Wei Y, Ding J L, Yang S T, *et al.* Soil salinity prediction based on scale-dependent relationships with environmental variables by discrete wavelet transform in the Tarim Basin [J]. *CATENA*, 2021, **196**, doi: 10.1016/j.catena.2020.104939.
- [23] Nalley D, Adamowski J, Biswas A, *et al.* A multiscale and multivariate analysis of precipitation and streamflow variability in relation to ENSO, NAO and PDO [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, **574**: 288-307.
- [24] 吴舒祺, 赵文吉, 杨阳, 等. 基于小波变换的长江中下游地区极端降水与大气环流响应关系研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2021, **32**(4): 67-76.
- Wu S Q, Zhao W J, Yang Y, *et al.* Response of extreme precipitation events in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin to the atmospheric circulation based on continuous wavelet transform[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2021, **32**(4): 67-76.
- [25] 周梦鸽, 杨依, 孙媛, 等. 2016~2020年山东省空气质量时空分布特征及影响因素分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(6): 2937-2946.
- Zhou M G, Yang Y, Sun Y, *et al.* Spatio-temporal characteristics of air quality and influencing factors in Shandong province from 2016 to 2020[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(6): 2937-2946.
- [26] Zhang J, Ren Y, Jiao P, *et al.* Changes in rainfall erosivity from combined effects of multiple factors in China's Loess Plateau[J]. *CATENA*, 2022, **216**, doi: 10.1016/j.catena.2022.106373.
- [27] Tian H W, Zhang J H, Zhu L Q, *et al.* Revealing the scale-and location-specific relationship between soil organic carbon and environmental factors in China's north-south transition zone[J]. *Geoderma*, 2022, **409**, doi: 10.1016/j.geoderma.2021.115600.
- [28] Zhou Z Q, Liu S N, Ding Y B, *et al.* Assessing the responses of vegetation to meteorological drought and its influencing factors with partial wavelet coherence analysis [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, **311**, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.114879.
- [29] Rahman S, Azad A K, Hasanuzzaman, *et al.* How air quality and COVID-19 transmission change under different lockdown scenarios? A case from Dhaka city, Bangladesh [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **762**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143161.
- [30] Li S, Liu N J, Tang L F, *et al.* Mutation test and multiple-wavelet coherence of $PM_{2.5}$ concentration in Guiyang, China [J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2021, **14**(7): 955-966.
- [31] Luo Y, Liu S, Che L N, *et al.* Analysis of temporal spatial distribution characteristics of $PM_{2.5}$ pollution and the influential meteorological factors using Big Data in Harbin, China [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2021, **71**(8): 964-973.
- [32] Wei P Z, Xie S F, Huang L K, *et al.* Spatial interpolation of $PM_{2.5}$ concentrations during holidays in south-central China considering multiple factors [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2022, **13**(7), doi: 10.1016/j.apr.2022.101480.
- [33] Sharma G K, Tewari A, Gargava P. Comprehensive analysis of ambient air quality during second lockdown in national capital territory of Delhi [J]. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 2022, **6**, doi: 10.1016/j.hazadv.2022.100078.
- [34] Ma W, Ding J L, Wang R, *et al.* Drivers of $PM_{2.5}$ in the urban agglomeration on the northern slope of the Tianshan mountains, China [J]. *Environmental Pollution*, 2022, **309**, doi: 10.1016/j.envpol.2022.119777.
- [35] Das J, Jha S, Goyal M K. On the relationship of climatic and monsoon teleconnections with monthly precipitation over meteorologically homogenous regions in India: Wavelet & global coherence approaches [J]. *Atmospheric Research*, 2020, **238**, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.104889.
- [36] Cheng Q P, Zhong F L, Wang P. Baseflow dynamics and multivariate analysis using bivariate and multiple wavelet coherence in an alpine endorheic river basin (Northwest China) [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **772**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145013.
- [37] 宋小涵, 燕丽, 刘伟, 等. 2015~2021年京津冀及周边地区 $PM_{2.5}$ 和臭氧复合污染时空特征分析[J]. *环境科学*, 2023, **44**(4): 1841-1851.
- Song X H, Yan L, Liu W, *et al.* Spatiotemporal distribution characteristics of co-pollution of $PM_{2.5}$ and ozone over BTH with surrounding area for years of 2015-2021 [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(4): 1841-1851.
- [38] 王恰, 郑世林. “2+26”城市联合防治行动对京津冀地区大气污染物浓度的影响[J]. *中国人口·资源与环境*, 2019, **29**(9): 51-62.
- Wang Q, Zheng S L. Impact of joint prevention and control action on atmospheric pollutant concentration in ‘2+26’ cities [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2019, **29**(9): 51-62.
- [39] Zhang Q, Quan J N, Tie X X, *et al.* Effects of meteorology and secondary particle formation on visibility during heavy haze events in Beijing, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **502**: 578-584.
- [40] Wang X H, Zhong S Y, Bian X D, *et al.* Impact of 2015-2016

- El Niño and 2017-2018 La Niña on PM_{2.5} concentrations across China[J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **208**: 61-73.
- [41] Deng C X, Qin C Y, Li Z W, *et al.* Spatiotemporal variations of PM_{2.5} pollution and its dynamic relationships with meteorological conditions in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Chemosphere*, 2022, **301**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.134640.
- [42] Jing Z Y, Liu P F, Wang T H, *et al.* Effects of meteorological factors and anthropogenic precursors on PM_{2.5} concentrations in cities in China [J]. *Sustainability*, 2020, **12**(9), doi: 10.3390/su12093550.
- [43] Gong S L, Zhang L, Liu C, *et al.* Multi-scale analysis of the impacts of meteorology and emissions on PM_{2.5} and O₃ trends at various regions in China from 2013 to 2020 2. Key weather elements and emissions[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **824**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153847.
- [44] Chen X B, Yin L R, Fan Y L, *et al.* Temporal evolution characteristics of PM_{2.5} concentration based on continuous wavelet transform[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **699**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134244.
- [45] 符海月, 张伟婷. 时间尺度重构 EEMD-GRNN 改进模型预测 PM_{2.5} 的研究[J]. *地球信息科学学报*, 2019, **21**(7): 1132-1142.
- Fu H Y, Zhang Y T. Improving the EEMD-GRNN model for PM_{2.5} prediction based on time scale reconstruction[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2019, **21**(7): 1132-1142.
- [46] Wu S Q, Zhao W J, Yao J Q, *et al.* Precipitation variations in the Tai Lake Basin from 1971 to 2018 based on innovative trend analysis[J]. *Ecological Indicators*, 2022, **139**, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.108868.
- [47] Yan D, Lei Y L, Shi Y K, *et al.* Evolution of the spatiotemporal pattern of PM_{2.5} concentrations in China-A case study from the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **183**: 225-233.
- [48] Lu S H, Gong S L, Chen J M, *et al.* Impact of Arctic Oscillation anomalies on winter PM_{2.5} in China via a numerical simulation [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **779**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146390.
- [49] 苏越, 路春燕, 黄雨菲, 等. 1950~2019 年中国季节平均最高气温时空演变特征及其大气环流影响定量化分析[J]. *环境科学*, 2023, **44**(5): 3003-3016.
- Su Y, Lu C Y, Huang Y F, *et al.* Quantitative analysis of spatio-temporal evolution characteristics of seasonal average maximum temperature and its influence by atmospheric circulation in China from 1950 to 2019[J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(5): 3003-3016.
- [50] Yu H Y, Li T, Liu P. Influence of ENSO on frequency of wintertime fog days in Eastern China[J]. *Climate Dynamics*, 2019, **52**(9): 5099-5113.
- [51] Hu S Q, Zhang W J, Turner A G, *et al.* How does El Niño-Southern Oscillation affect winter fog frequency over eastern China? [J]. *Climate Dynamics*, 2020, **54**(1): 1043-1056.
- [52] 杜佳玉, 陶丽, 许承宇. 中国降水的年代际变化及全球变暖、太平洋年代际振荡、大西洋年代际振荡对其的相对贡献[J]. *气象学报*, 2022, **80**(5): 685-700.
- Du J Y, Tao L, Xu C Y. Interdecadal variation of land precipitation in China and relative contributions of global warming, IPO and AMO[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2022, **80**(5): 685-700.
- [53] 吴浩, 颜鹏程, 侯威, 等. 近百年及未来百年 PDO 位相年代际转变检测及其早期预警信号研究[J]. *大气科学*, 2022, **46**(2): 225-236.
- Wu H, Yan P C, Hou W, *et al.* Detection of decadal phase transition and early warning signals of PDO in recent and next 100 years[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2022, **46**(2): 225-236.
- [54] 刘永婷, 徐光来, 杨钊, 等. 近 56 年安徽省极端气温变化及其与气候指数的关系[J]. *水土保持研究*, 2021, **28**(2): 248-255.
- Liu Y T, Xu G L, Yang Z, *et al.* Variation of extreme temperature and its association with climate indices in Anhui province during the past 56 years[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, **28**(2): 248-255.
- [55] Zhang X X, Xu H D, Liang D. Spatiotemporal variations and connections of single and multiple meteorological factors on PM_{2.5} concentrations in Xi'an, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2022, **275**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2022.119015.
- [56] Ng E K W, Chan J C L. Geophysical applications of partial wavelet coherence and multiple wavelet coherence[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2012, **29**(12): 1845-1853.

CONTENTS

Meteorological Impact Assessment of PM _{2.5} and O ₃ Complex Pollution in Key Regions of China Based on Meteorological Conditions Index	YANG Xin, YANG Yuan-qin, LI Hong, <i>et al.</i>	(6433)
Scale Dependence Between PM _{2.5} and Meteorological Factors and Its Influencing Factors in “2+26” Cities	WU Shu-qi, JIN Jian-nan, ZHENG Dong-yang, <i>et al.</i>	(6441)
Chemical Constituents and Sources of PM _{2.5} Around the Wuhan Military Games Period	LIU Shi-hao, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i>	(6452)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} Pollution During Winter in Handan City from 2016 to 2020	NIU Hong-ya, GAO Na-na, BAO Xiao-lei, <i>et al.</i>	(6463)
Chemical Compositions and Sources of PM _{2.5} in Weinan City	GUO Jing-ning, LI Xiao-fei, YU Feng, <i>et al.</i>	(6474)
Analysis of Formation Processes and Sources of PM _{2.5} Ammonium During Winter and Summer in Suburban Area of the Yangtze River Delta	XIANG Yan-kun, CAO Fang, ZHANG Wen-qi, <i>et al.</i>	(6486)
Chemical Composition and Characterization of Nitroaromatic Compounds in Urban Areas of Shanghai	YANG Lu, MA Ying-ge, YU Jian-zhen, <i>et al.</i>	(6495)
Source Analysis and Health Risk Assessment of PAHs in PM _{2.5} , Liliang City	MU Ling, LIU Zi-ye, LI Yang-yong, <i>et al.</i>	(6508)
Effect of Biomass Burning on Carbonaceous Aerosol Composition and Light Absorption in Guangxi Regional Background Site	WU Xing-qi, CAO Fang, HONG Yi-hang, <i>et al.</i>	(6518)
Characteristics of Light Absorption, Sources, and Seasonal Variation of Atmospheric Brown Carbon in Northern Nanjing	CHEN Xing-zhou, CUI Shi-jie, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i>	(6529)
Health Benefit Assessment of Coal-to-electricity Policy on PM _{2.5} Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHANG Ru-ting, CHEN Chuan-min, LIU Song-tao, <i>et al.</i>	(6541)
Source Apportionment of Ambient VOCs in Qingdao Based on Photochemical Loss Correction	KONG Cui-li, WU Yu-tong, GU Yao, <i>et al.</i>	(6551)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Liaocheng in Summer	LI Wan-yong, HUANG Hao-yu, WANG Yan-zhen, <i>et al.</i>	(6564)
Source Analysis of Ozone and Its Precursors in Zibo Based on 3-D Air Quality Model	ZHANG Xin-xin, ZHAO Xiu-ying, HUANG Ling, <i>et al.</i>	(6576)
Spatio-temporal Characteristics and Influencing Factors of Ozone Suppression Events Under High Temperature in China	OU Lin-chong, CHEN Wei-hua, WU Yong-kang, <i>et al.</i>	(6586)
Review of UAV-based Atmospheric Fine Particulate Matter and Ozone Pollution Detection and Source Localization	QU Ya-wei, WANG Ti-jian, YUAN Cheng, <i>et al.</i>	(6598)
Health Impact Analysis of Fine Particulate Pollution from Vehicles in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	HAO Yong-pei, SONG Xiao-wei, ZHU Xiao-dong, <i>et al.</i>	(6610)
Assessment of Emission Reduction Potential of CO ₂ Capture, Geological Utilization, and Storage in Cement Industry of China	WEI Ning, LIU Sheng-nan, WEI Feng, <i>et al.</i>	(6621)
Life Cycle Carbon Emission Accounting and Emission Reduction Potential Assessment of Steel Industry	SONG Xiao-cong, DU Shuai, DENG Chen-ning, <i>et al.</i>	(6630)
Evolution Characteristics and Driving Forces of Carbon Dioxide Emissions and Sinks in the Pearl River Delta Region, China	HU Jing-xin, SHA Qing-e, LIU Hui-lin, <i>et al.</i>	(6643)
Impact of Accelerated Electrification Under the Low Carbon Path in Dongguan City on the Coordinated Emission Reduction of CO ₂ and Pollutants	WU Le-min, CHEN Bing-yin, OU Lin-chong, <i>et al.</i>	(6653)
Relationship Between Urbanization and Carbon Emissions in the Chang-Zhu-Tan Region at the County Level	LIU Xian-zhao, LI Yang, <i>et al.</i>	(6664)
Characteristics and Influencing Factors of Greenhouse Fluxes from Urban Lawn	CHEN Li-han, LIU Shuo, LIN Yi, <i>et al.</i>	(6680)
Dual-Perspective Analysis of the Warming Effect of the Methane Emissions from Animal Husbandry in China	LIU Shu-le, YAN Wei, CAO Qing-xian, <i>et al.</i>	(6692)
Pollution Level and Risk Assessment of OPEs in Typical River Basins of China	ZHAO Jiang-lu, LU Hai-jian, LÜ Jia-pei, <i>et al.</i>	(6700)
Soil Heavy Metal Contamination, Sources, and Health Risk of Typical Drinking Water Sources in the Suspended Reach of the Lower Yellow River	PENG Chao-yue, REN Chong, SHEN Hao-xin, <i>et al.</i>	(6710)
Fraction Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of the Yellow River Mainstream	WANG Yi-di, OUYANG Wei, LIU Lian-hua, <i>et al.</i>	(6720)
Influence of Land Use Structure and Spatial Pattern on Water Quality of Small and Medium-sized Rivers in Poyang Lake Basin	WEN Jia-wei, WANG Peng, HUANG Gao-xiang, <i>et al.</i>	(6728)
Water Environment Characteristics and Water Quality Assessment of Typical Lakes in Inner Mongolia	WANG Xin-yuan, PAN Bao-zhu, WANG Li-xin, <i>et al.</i>	(6744)
Relationship Between Precipitation, River Water, and Groundwater Conversion in the Upper Reaches of Xilin River During the Rainy Season	SUN Jin, WANG Yi-xuan, YANG Lu, <i>et al.</i>	(6754)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in the Northwest Salt Lake Basin	YAN Yan, GAO Rui-zhong, LIU Ting-xi, <i>et al.</i>	(6767)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of Barkol-Yiwu Basin	LIU Yu, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i>	(6778)
Bisulfite Promoted Minute Fe ²⁺ -Activated Peroxydisulfate for Paracetamol Degradation	MO Xi-ting, NIE Shu-hua, YAN Cai-xia, <i>et al.</i>	(6790)
Degradation of Ciprofloxacin by Activating Peroxymonosulfate with Sludge Biochar	ZHENG Da-yang, ZOU Jia-li, XU Hao, <i>et al.</i>	(6801)
Adsorption of Iopamidol by NaHCO ₃ -activated Buckwheat Biochar	WEI Hong, ZHAO Jiang-juan, JING Li-ming, <i>et al.</i>	(6811)
Preparation of Bamboo-based N, P Co-doped Activated Carbon and Its Lanthanum Ion Adsorption Performance	WANG Gui-long, LIU Yan-yan, JIANG Rong-yuan, <i>et al.</i>	(6823)
Analysis of Vegetation Change and Influencing Factors in Southwest Alpine Canyon Area	LAI Jin-lin, QI Shi, CUI Ran-ran, <i>et al.</i>	(6833)
Effect of Biochar on Agricultural Soil Aggregates and Organic Carbon: A Meta-analysis	MENG Yan, SHEN Ya-wen, MENG Wei-wei, <i>et al.</i>	(6847)
Carbon Cycling Processes in Croplands and Their Quantification Methods	SUN Zhao-an, ZHU Biao, <i>et al.</i>	(6857)
Effects of Biochar Application on Soil Organic Carbon Component in <i>Eucalyptus</i> Plantations After Five Years in Northern Guangxi	MOU Zhi-yi, SHEN Yu-yi, CAO Yang, <i>et al.</i>	(6869)
Evolution Characteristics of Soil Active Organic Carbon and Carbon Pool Management Index Under Vegetation Restoration in Karst Area	CAI Hua, SHU Ying-ge, WANG Chang-min, <i>et al.</i>	(6880)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Environmental Media in China	CHEN Li-hong, CAO Ying, LI Qiang, <i>et al.</i>	(6894)
Spatial Prediction Modeling for Soil pH Based on Multiscale Geographical Weighted Regression (MGWR) and Its Influencing Factors	ZHAO Ming-song, CHEN Xuan-qiang, XU Shao-jie, <i>et al.</i>	(6909)
Characteristics and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Around a Coal-fired Power Plant	ZHANG Jun, LI Xu, LIU Lei-yu, <i>et al.</i>	(6921)
Characteristics of Soil Pollution and Source Analysis of Typical Pollutants in the Petrochemical Site	ZHANG Yu-rong, LUO Shuai, CHEN Yuan, <i>et al.</i>	(6933)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes Distribution in Different Types of Agricultural Land Soils in Highly Cultivated Hilly Areas	CHEN Rui, CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, <i>et al.</i>	(6947)
Effects of Organic Fertilizer Combined with Biochar on Denitrifying Microorganisms and Enzyme Activities in Orchard Soil	DENG Zheng-xin, GAO Ming, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i>	(6955)
Effects of Organic Fertilization on Bacterial Community and Maize Productivity in Dryland Red Soil	LIN Ting-ting, ZHENG Jie, ZHU Guo-fan, <i>et al.</i>	(6965)
Effects of Combined Pollution of Microplastics and Cadmium on Microbial Community Structure and Function of <i>Pennisetum hybridum</i> Rhizosphere Soil	DUAN Li-yang, ZHANG Yu, REN Xue-min, <i>et al.</i>	(6973)
Effects of Tomato Planting Years on Soil Physical and Chemical Properties and Microbial Communities	ZHAO Yang-yang, LIU Yin-shuang, SONG Yao, <i>et al.</i>	(6982)
Remediation of Three Oxidants on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Coking Contaminated Soil and Its Response to Indigenous Microorganisms	LI Wei, WANG Hua-wei, MENG Xiang-yu, <i>et al.</i>	(6992)
Microbial Diversity and Population Structure of Different Salinized Soil Types in Hebei Province	LIU Yin-shuang, NIU Hong-jin, ZHAO Yang-yang, <i>et al.</i>	(7004)
Functional Genomics Analysis of Nitrogen and Phosphorus Transformation in Maize Rhizosphere Microorganisms	WANG Xiang-jun, JIANG Mei-tong, LI Sen, <i>et al.</i>	(7014)
Remediation of Soil Cadmium Contamination by <i>Solanum nigrum</i> L. Enhanced by the Combination of Exogenous Bacteria and Citric Acid	WANG Kai, WANG Li, WANG Yi-kun, <i>et al.</i>	(7024)
Effect of Combined Application of an <i>Enterobacter</i> and Sulfur Fertilizer on Cadmium and Arsenic Accumulation in Rice	ZHANG Pu-xin, YAO Jun-fan, LIU Yu-ling, <i>et al.</i>	(7036)