

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征

张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铎, 侯思宇



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年7月

第43卷 第7期
Vol.43 No.7

目次

两种模式下中国未来发电行业发展情景及其环境效益分析	刘春景, 吕建毅, 赵汶畅, 徐卿, 金玉佳 (3375)
基于 LEAP 模型的兰州市道路交通温室气体与污染物协同减排情景模拟	庞可, 张芊, 马彩云, 祝禄祺, 陈恒葵, 孔祥如, 潘峰, 杨宏 (3386)
基于半级别的城市空气质量预报评估方法探讨	王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 高愈霄, 朱媛媛, 汪巍, 刘冰 (3396)
厦门港大气 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价	肖思晗, 蔡美君, 李香, 黄屋, 王坚, 朱清墩, 吴水平 (3404)
南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征	张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铖, 侯思宇 (3416)
晋中盆地主要城市冬季 PM _{2.5} 传输特征分析	王小兰, 王雁, 闫世明, 岳江, 郭伟, 郝振荣 (3423)
鄂尔多斯市夏秋季黑碳气溶胶时间演变特征及其来源解析	孔祥晨, 张连霞, 张彩云, 王红磊, 许晶, 郑佳峰 (3439)
济源冬季 VOCs 污染特征、来源和 SOAP	王芳, 李利霞, 王红果, 赵宗生, 张建平, 张栋 (3451)
长株潭城区 8 月 VOCs 污染特征及来源分析	罗达通, 张青梅, 刘湛, 尤翔宇, 黄杰, 宋云飞, 张敬巧 (3463)
2019 年 7 月石家庄市 O ₃ 生成敏感性控制策略解析	朱家贤, 王晓琦, 欧盛菊, 张新宇 (3473)
华北平原 AOD 时空演化与影响因素	郭霖, 孟飞, 马明亮 (3483)
基于地基太阳光度计观测的长安区气溶胶光学特性变化及其与颗粒物浓度的关系	郑玉蓉, 王旭红, 崔思颖, 冯子豪, 张秀, 刘康 (3494)
基于长时序“地-星”数据的京津冀大气污染时空分布及演变特征	王耀庭, 殷振平, 郑祚芳, 李炬, 李青春, 孟春雷, 李威 (3508)
近十年洪泽湖富营养化状态变化趋势及原因分析	陈天宇, 刘常清, 史小丽, 李云, 范子武, 贾本有, 廖轶鹏 (3523)
高原湖泊周边浅层地下水: 磷素时空分布及驱动因素	杨恒, 李桂芳, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 张丹, 陈安强 (3532)
三峡水库不同支流库湾蓄水期溶解氧分层特性及差异性	纪道斌, 方娇, 龙良红, 杨正健, 赵星星, 杨霞, 郭亚丽 (3543)
典型喀斯特城市湖泊溶解性有机质成分特征及来源解析	倪茂飞, 周慧, 马永梅, 苏印, 王晓丹, 王志康 (3552)
骆马湖表层水和沉积物中全氟化合物赋存特征、来源及健康风险评估	黄家浩, 吴玮, 黄天寅, 陈书琴, 项颂, 庞燕 (3562)
千岛湖浮游植物群落结构的垂向分布特征及其影响因素	王吉毅, 霍翟, 国超旋, 朱广伟, 龚志军, 范亚文, 王建军 (3575)
泗河水系沉积物磷的存在形态及其空间分布特征	张子涵, 张鑫茹, 贾传兴, 甘延东, 王世亮 (3587)
降雨径流过程中土地利用优化配置对磷流失的影响	周豪, 陈方鑫, 罗义峰, 龙翼, 周继, 王小燕, 李丹丹, 陈晓燕 (3597)
典型生物滞留设施重金属累积分布特征与风险评价	储杨阳, 杨龙, 周媛, 王喜龙, 王嗣禹, 张敏 (3608)
筑坝蓄水对不同水深浮游微生物群落结构和种间互作模式的影响	王洵, 张佳佳, 袁秋生, 胡斌, 刘胜 (3623)
天津独流减河流域不同等级河流沉积物细菌区系及功能辨识	刘嘉元, 丰玥, 杨雪纯, 张彦, 李德生, 刘福德 (3635)
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	彭珂醒, 李瑞飞, 周亦辰, 卓泽铭, 张晋, 李梅, 李雪 (3645)
北京市通州区河流中微塑料组成的空间分布及潜在来源解析	门聪, 李頔, 左剑恶, 邢薇, 刘梦瑶, 魏凡钦, 胡嘉敏, 谢珍雯, 邢鑫, 沈杨贵 (3656)
微塑料对鲫鱼生长、肝脏损伤和肠道微生物组成的影响	胡嘉敏, 左剑恶, 李金波, 张艳艳, 艾翔, 龚大惠, 张继文, 孙丁明 (3664)
不同类型脱水药剂对底泥固化效果和理化性质的影响	任俊, 殷鹏, 王威振, 唐婉莹, 尹洪斌, 朱丽娟 (3672)
微纳米粒径生物炭的结构特征及其对 Cd ²⁺ 吸附机制	马文艳, 裴鹏刚, 高歌, 孙约兵 (3682)
不同生物炭对磷的吸附特征及其影响因素	连宁海, 张树楠, 刘锋, 邢宏霖, 吴金水 (3692)
Mg-La-Fe/沸石复合材料的制备及其处理低浓度含磷废水的性能	印学杰, 宋小宝, 丁陈蔓, 冯彦房, 杨根, 何世颖, 薛利红 (3699)
一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺污泥膨胀发生和恢复过程中微生物群落演替及 PICRUS2 功能预测分析	李亚男, 闫冰, 郑蕊, 姚丽, 隋倩雯, 魏源送 (3708)
丝状菌膨胀污泥好氧颗粒化稳定性及微生物多样性	高春娣, 杨箫阳, 欧家丽, 韩颖璐, 程阳阳, 彭永臻 (3718)
2000~2020 年长江流域植被 NDVI 动态变化及影响因素探测	徐勇, 郑志威, 郭振东, 宴世卿, 黄雯婷 (3730)
近 40 年来福建省水稻土有效磷富集效应及潜在生态风险评估	陈中星, 邱龙霞, 陈瀚闾, 范协裕, 毋亭, 沈金泉, 邢世和, 张黎明 (3741)
土地利用变化对西南喀斯特土壤团聚体组成、稳定性以及 C、N、P 化学计量特征的影响	何宇, 盛茂根, 王轲, 王霖娇 (3752)
长江经济带矿山土壤重金属污染及健康风险评价	张浙, 卢然, 伍思扬, 贾智彬, 王宁 (3763)
煤矸石堆积区周边土壤重金属污染特征与植物毒性	尚誉, 桑楠 (3773)
燃煤工业区不同土地利用类型土壤汞含量污染评价	李强, 姚万程, 赵龙, 张朝, 张恩月, 苏迎庆, 刘庚 (3781)
广州市南沙区第四剖面镉富集特征及生物有效性	王芳婷, 包科, 黄长生, 赵信文, 顾涛, 曾敏 (3789)
黔西北山区耕地重金属健康风险评价及环境基准	徐梦琪, 杨文毅, 杨利玉, 陈勇林, 景灏楠, 吴攀 (3799)
土壤重金属生物可利用性影响因素及模型预测	张加文, 田彪, 罗晶晶, 吴凡, 张聪, 刘征涛, 王晓南 (3811)
添加有机物料对豫中烟田土壤呼吸的影响	鲁琪飞, 叶协锋, 韩金, 潘昊东, 张明杰, 王晶, 杨佳豪, 姚鹏伟, 李雪利 (3825)
不同稻作系统土壤的 CH ₄ 产生潜力与产生途径	沈皖豫, 黄琼, 马静, 张广斌, 徐华 (3835)
东部平原矿区复垦土壤微生物群落特征及其组装过程	马静, 董文雪, 朱燕峰, 肖栋, 陈浮 (3844)
同质环境下不同锦鸡儿属植物根际土壤细菌群落结构差异及其影响因素	李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐潞, 马飞 (3854)
岩溶与非岩溶区水稻土团聚体细菌群落结构和功能类群比较	肖筱怡, 靳振江, 冷蒙, 李雪松, 熊丽媛 (3865)
紫色土中微生物群落结构及功能特征对土壤 pH 的差异响应	王智慧, 蒋先军 (3876)
有机物料还田对稻田土壤 DOM 碳源代谢能力的影响	肖怡, 李峥, 黄容, 汤奥涵, 李冰, 王昌全 (3884)
《环境科学》征订启事 (3403) 《环境科学》征稿简则 (3462) 信息 (3493, 3655, 3834)	

晋中盆地主要城市冬季 $PM_{2.5}$ 传输特征分析

王小兰¹, 王雁^{1*}, 闫世明^{1*}, 岳江¹, 郭伟¹, 郝振荣²

(1. 山西省气象科学研究所, 太原 030002; 2. 山西省气象信息中心, 太原 030006)

摘要: 对 2017~2019 年晋中盆地主要城市 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 逐时浓度资料进行了分析, 给出了晋中市和太原市颗粒物浓度主要分布特征; 此外利用 $PM_{2.5}$ 逐时浓度资料, 结合 HYSPLIT 后向轨迹模型, 通过轨迹密度分析 (TDA)、轨迹停留时间分析 (RTA) 和潜在源贡献因子分析 (PSCF), 并对 $PM_{2.5}$ 逐时浓度资料 and 对应时刻风向数据进行分析, 探讨了晋中盆地主要城市冬季 $PM_{2.5}$ 传输特征。结果表明, 太原市颗粒物浓度整体水平高于晋中市, 月、季变化特征类似, 均呈现冬季高, 夏季低的特征, 最高值出现在 1 月。晋中市受静稳型天气形势引起的颗粒物污染较受沙尘型天气形势导致的颗粒物污染相较太原市更普遍一些; 颗粒物的分布呈现出晋中市中间值较多, 太原市高值偏多、低值偏少的特点, 冬季为晋中盆地 $PM_{2.5}$ 污染高发季节。晋中盆地主要城市冬季 $PM_{2.5}$ 传输通道均可分为 4 类: 第一类通道沿太行山横谷传输, 第二类通道为偏东南方向传输通道, 第一、二类均为近距离传输通道, 气团会携带较多水汽, $PM_{2.5}$ 沿此类通道传输时容易吸湿增长加重本地污染; 第三类传输通道为西北方向传输通道, 对应晋中盆地近地面 $PM_{2.5}$ 污染在冷空气到达前达到最严重时段的气流轨迹, 还对应沙尘传输通道; 第四类通道为汾渭平原传输通道, 对应高浓度的 $PM_{2.5}$ 污染。污染轨迹密集 (污染轨迹 100 条以上) 的区域, 以及气流移动缓慢 (RTA 污染轨迹端点数 > 50) 的区域易成为目标城市潜在源区 (PSCF 贡献 0.7 以上); 晋中市冬季 $PM_{2.5}$ 主要潜在源区 (PSCF 贡献 0.7 以上) 主要分布在山西省的临汾、晋城等地, 还包括河南省北部、河北省南部、陕西省中南部; 太原市冬季 $PM_{2.5}$ 主要潜在源区分布范围较晋中市广, 包括山西境内的吕梁市南部、阳泉市、临汾市、运城市 and 晋中市南部, 此外还包括陕西南部大部分地区以及河南省北部、河北省南部部分地区, 此外 PSCF 贡献 0.9 以上的高值中心分布亦较晋中市广; 当 PSCF 贡献 0.9 以上的高值城市出现污染时, 应特别注意其与晋中盆地城市之间的互相传输的影响。晋中市和太原市在轻度以上污染出现时, 对应地面风向呈现不同的分布特征, 晋中市近地面风向为 E 时, 出现轻度以上污染的频率为 8.1%, 在各个风向中最高; 太原市近地面风向为 SSW 时, 轻度污染以上污染天气出现频率在各个风向中最高, 为 5.1%; 出现静风时, 太原市出现轻度污染以上的频率 (3.4%) 高于晋中市 (0.5%)。

关键词: 晋中盆地; $PM_{2.5}$; 输送通道; 后向轨迹 (HYSPLIT); 轨迹密度; 停留时间; 潜在源区

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301 (2022) 07-3423-16 DOI: 10.13227/j.hjxx.202109056

Analysis of $PM_{2.5}$ Transmission Characteristics in Main Cities of Jinzhong Basin in Winter

WANG Xiao-lan¹, WANG Yan^{1*}, YAN Shi-ming^{1*}, YUE Jiang¹, GUO Wei¹, HAO Zhen-rong²

(1. Shanxi Province Institute of Meteorological Sciences, Taiyuan 030002, China; 2. Shanxi Province Meteorological Information Center, Taiyuan 030006, China)

Abstract: In this study, we analyzed the hourly concentration data of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in major cities in Jinzhong basin from 2017 to 2019. The main distribution characteristics of aerosols in Jinzhong and Taiyuan were determined, and $PM_{2.5}$ hourly concentration data and HYSPLIT in Jinzhong basin in winter were discussed. The results showed that the overall level of particulate matter concentration in Taiyuan was higher than that in Jinzhong, and the monthly and seasonal variation characteristics were similar. All showed high concentrations in winter and low concentrations in summer, and the highest concentration value appeared in January. The aerosol pollution caused by the static and stable weather in Jinzhong was more common than that caused by the sand and dust weather in Taiyuan. The distribution of particulate matter showed the characteristics of more intermediate values in Jinzhong and more high and fewer low values in Taiyuan, and winter was the highest incidence season of $PM_{2.5}$ pollution in Jinzhong basin. $PM_{2.5}$ transmission passageways in the main cities of Jinzhong basin in winter could be divided into four categories; class 1 was transmitted along the transverse valley of Taihang Mountain, and class 2 was the southeast transmission channel. Class 1 and class 2 were the short-range transmission passageways; air masses carried more moisture, and $PM_{2.5}$ transmitted along such passageways allowed moisture to be absorbed more easily, increasing levels and aggravating local pollution. Class 3 was the northwest passageway, corresponding to the most serious pollution period of $PM_{2.5}$ in Jinzhong basin before the arrival of cold air, which also corresponded to the dust transmission passageway. Class 4 was the Fenwei Plain passageway, corresponding to high-concentration $PM_{2.5}$ pollution. Areas with dense pollution tracks (more than 100 pollution tracks) and areas with slow air flow movement (RTA pollution track end points greater than 50) easily became potential source areas of target cities (PSCF contribution greater than 0.7). The main potential source areas of $PM_{2.5}$ in winter in Jinzhong (PSCF contributing more than 0.7) were mainly distributed in Linfen, Jincheng, and other places in Shanxi province, as well as in the north of Henan province, the south of Hebei province, and central and south Shaanxi province. The distribution range of main potential source areas of $PM_{2.5}$ in Taiyuan in winter was wider than that in Jinzhong, including the south of Lyliang, Yangquan, Linfen, and Yuncheng and the south of Jinzhong in Shanxi, as well as most areas in southern Shaanxi, northern Henan province, and southern Hebei province. In addition, the PSCF distribution of high-value centers above 0.9 was wider than that of Jinzhong. When pollution occurs in cities that PSCF contributed more than 0.9, special attention should be paid to the influence of mutual transmission

收稿日期: 2021-09-07; 修订日期: 2021-11-27

基金项目: 山西省自然科学基金项目 (201601D011084, 201901D111465); 山西省气象局重点项目 (SXKZDDQ20185105, SXKZDDW20205203); 山西省气象局项目 (SXKMSDQ20185122); 山西省气象局软科学项目 (202102)

作者简介: 王小兰 (1982~), 女, 高级工程师, 主要研究方向为大气环境, E-mail: 39123934@qq.com

* 通信作者, E-mail: qksy@126.com; qksysm@126.com

between them and cities in Jinzhong basin. Jinzhong and Taiyuan showed different distribution characteristics corresponding to the surface wind direction when light and higher pollution occur, when the wind direction near the ground in Jinzhong was E, the frequency of light and higher pollution was 8.1%; it was the highest in all wind directions. When the wind direction near the ground in Taiyuan was SSW, the frequency of light to higher polluted weather was the highest in all wind directions (5.1%). In the case of calm wind, the frequency of light to higher pollution in Taiyuan (3.4%) was higher than that in Jinzhong (0.5%).

Key words: Jinzhong Basin; $PM_{2.5}$; transmission; hybrid single-particle Lagrangian integrated trajectory (HYSPLIT); trajectory density; residence time; potential source areas

霾是大量粒径为几微米以下的大气气溶胶粒子使水平能见度小于 10 km、空气普遍浑浊的天气现象^[1],霾发生时,能见度低,空气湿度较大,并伴随高浓度 $PM_{2.5}$ ^[2,3],高浓度 $PM_{2.5}$ 对人体健康以及公众生活造成很大的影响^[4~6], $PM_{2.5}$ 浓度的增加,成因主要包括污染物的大量排放和不利的扩散条件^[7~9],与此同时,二次转化和区域传输的作用亦不可忽视,城市间存在着大气污染的相互影响和输送污染物的传输路径^[10,11],因此在大气污染治理中,联防联控尤为重要^[12].

京津冀及周边地区和汾渭平原仍是我国 $PM_{2.5}$ 污染最严重的区域^[13,14],两个地区相互接壤,大气污染物相互影响明显,大气污染物的跨区域输送是导致华北地区秋冬季霾污染天气频发的重要原因之一^[15~17]. 王晓琦等^[18]的研究定量估算了京津冀地区 $PM_{2.5}$ 的来源贡献,指出京津冀区域 $PM_{2.5}$ 外来源年均贡献为 23.4%;而在极端的污染天气过程中,大气污染输送对北京重污染天气的贡献比例可能超过 50%^[19~21],是最重要的污染源.

城市间可能存在着典型的大气污染输送路径,例如影响北京市空气质量的大气污染物传输路径为沿太行山东麓“邯郸-邢台-石家庄-保定-北京”的传输通道^[21];而影响太原市秋冬季大气污染特征和输送路径中沿汾河河谷的西南输送轨迹对太原重污染的影响概率超过 80%^[22];汾渭平原及其周边地区存在偏西和偏东北两条主要的传输路径,偏西路径是源自关中平原西部的粒子沿秦岭向东的传输,偏东北路径为来源于京津冀及其周边地区的粒子沿太行山向西南的传输^[10]. 可以看出,地形对污染物的分布以及区域传输都有显著影响,并且结合地形的大气污染研究正在受到重视^[23,24],例如在太行山的影响下,东侧平原和西侧汾河河谷之间污染物传输只能沿着太行山或通过太行山的峡谷传输^[25]. 不同特征的气团对污染天气的影响也不同,高晋徽等^[26]分析了南京地区长/近距离输送对本地气态污染物浓度变化的影响,近距离的西北气流使南京地区气态污染物浓度升高,而长距离输送的作用较弱;赵恒等^[27]研究了 TRACE-P 期间中国香港大气污染物的来源,结果表明抵达香港的气流轨迹结果表明来自大陆的气团占 47.5%,局地输送性气团占

34.6%,海洋性气团占 18.7%. 在各地市“科学治污,一市一策”政策指导下,对本地污染源的治理越来越重视^[11],而传输导致的 $PM_{2.5}$ 污染亦不容忽视,赵雪等^[28]的研究通过对 COVID-19 疫情期间京津冀大气污染物变化及影响因素进行分析,结果表明北京市的重污染天气是污染物本地积累、二次转化和区域传输共同作用的结果;陈颖元等^[29]的研究通过对京津冀和长三角地区一次重霾过程气象成因及传输特征进行分析,结果表明在重污染前期当中东部地区受南风控制时,京津冀地区受长三角地区传输影响较大. Ren 等^[30]的研究对 2019 年 COVID-19 疫情期间,中国在人为造成气溶胶排放大大减少的情况下,雾-霾事件仍然发生的原因进行分析,结果表明 1 月 30 日至 2 月 19 日,华北平原的 $PM_{2.5}$ 贡献由当地排放 (40%~66%) 造成,中国其他地区 $PM_{2.5}$ 的贡献主要来自非本地来源,来自南亚和东南亚的排放传输使中国西南部 $PM_{2.5}$ 浓度增加了 50% 以上.

晋中盆地是我国污染最为严重的区域之一,盆地内最大城市——太原市的 2020 年空气质量为“168 城市”倒数^[5,31],除盆地地形不利扩散外,区域传输对盆地污染物的影响也很显著^[32]. 针对山西省太原市已有一些相关研究,但针对晋中市和晋中盆地整体此类研究仍很少,本研究选取晋中盆地主要城市 (太原市和晋中市) 2017~2019 年污染较严重年份的冬季进行后向轨迹的聚类分析,并采用污染轨迹密度 (TDA)、停留时间 (RTA)^[33,34] 和潜在源区贡献因子 (PSCF)^[22] 进行综合分析,并对近地面风向进行分析,了解两个城市的异同,探讨晋中盆地主要城市秋冬季大气污染物的传输通道和潜在源区,助力工业企业的合理规划布局,控制入侵气团的污染浓度,减少外来污染物对晋中盆地主要城市空气质量的影响.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

晋中盆地,又称太原盆地,太原市与晋中市属于晋中盆地主要城市,位于晋中盆地北段,地理上毗邻,太原市位于晋中盆地的北端,西、北、东三面环山,中、南部为河谷平原,全市整体地形北高南低呈

簸箕形,晋中市位于太行山脉中段与晋中盆地之间[图 1(a)],东依太行山,西临汾河,北与省会太原市毗邻,南与长治市和临汾市相交,东北与阳泉市相连,西南与吕梁市接壤,山地、丘陵、平原兼备.地势东高西低,呈阶梯状分布.太原市和晋中市位于太行山井陘通道两侧,井陘通道是太行八陉的第五陉[图 1(b)],太原市区和晋中市同位于晋中盆地,市区接壤,随着城市的扩大发展,经济生活渐渐趋于

一体化,但其污染特征呈现出不同特征^[2,22],太原市属于京津冀大气污染传输通道“2+26”城市之一,晋中市作为汾渭平原重点城市之一,根据山西省气象信息中心观测资料统计结果,太原市和晋中市冬季霾频发,一方面由于本地大气污染物的排放量较大,但外部传输亦不容忽视^[22],研究 $\text{PM}_{2.5}$ 冬季传输特征,对城市通风廊道设置和未来城市规划建设有着重要的意义.

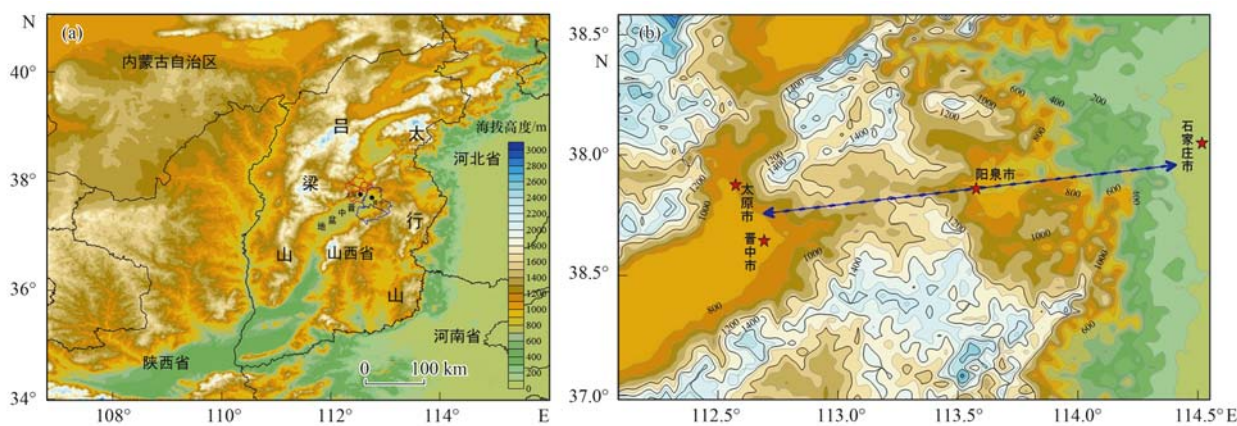


图 1 山西省地形图、晋中盆地主要城市地理位置和井陘通道

Fig. 1 Topographic map of Shanxi Province, geographical location of main cities in Jinzhong Basin, Jingxing passageway, and its surrounding area

1.2 相关分析方法

本研究采用美国国家海洋和大气管理局开发的 HYSPLIT (hybrid single-particle lagrangian integrated trajectory) 模式来分析晋中盆地主要城市大气污染物的来源以及移动轨迹,该模式被广泛应用于大气输送研究及污染过程分析中^[35,36],本研究后向轨迹计算起始高度选取为 300 m,轨迹运行时间选择为 72 h,时间间隔取为 1 h.

本研究所采用的潜在源贡献因子分析法 (potential source contribution function, PSCF) 常被用于定位潜在污染源位置并定量给出污染贡献大小. PSCF 是基于条件概率函数发展而来的一种方法,基于气流轨迹分析来识别可能源区,通过结合气团轨迹和某要素值 (如污染物浓度值等) 来给出可能的污染排放源方位; PSCF 的计算公式参见文献^[22,36].

本研究采用轨迹密度分析方法 (trajectory density analysis, TDA), 将分析区域划分为 $0.2^\circ \times 0.2^\circ$ 网格,对每个网格包含的轨迹条数进行统计,用颜色表示其数量的多寡,从而表征污染物的传输通道;此外还采用停留时间分析方法 (residence time analysis, RTA)^[33,34],同样将分析区域划分为 $0.2^\circ \times 0.2^\circ$ 网格,对每个网格内每条轨迹的停留时间进行统计 (用每条轨迹的计算端点代表),与在区域中停留时间较长的空气团相比,快速通过污染物源区域

的空气团积聚污染物的时间更少;以每条轨迹通过某个网格一次为基准,RTA 轨迹端点数与 TDA 轨迹数之差代表轨迹停留的时间超过基准数,可表征气团移动缓慢的区域.

1.3 数据来源

用于后向轨迹模式计算的气象场资料 (2017 ~ 2019 年) 为美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 提供的全球资料同化系统 (global data assimilation system, GDAS) 数据库 (<ftp://arlftp.arl.hq.noaa.gov/pub/archives/gdas1>),每日 4 个时次,即 00:00、06:00、12:00 和 18:00 UTC,水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$. 同时收集太原市和晋中市 2017 ~ 2019 年逐时颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10}) 浓度资料,数据采用山西省生态环境监测和应急保障中心 (山西省环境科学研究院) 提供的 2017 ~ 2019 年 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 小时浓度数据,采样方法、设备和数据质量控制按照文献^[37]进行,对应时刻的地面风向风速数据来源于山西省气象信息中心.

2 结果与讨论

2.1 晋中盆地主要城市颗粒物污染特征分析

图 2 给出了晋中盆地主要城市颗粒物年际变化趋势,分析可知,太原市和晋中市虽然地理上毗邻,均位于晋中盆地北段,但其颗粒物污染呈现出不同特征,太原市和晋中市颗粒物 2017 ~ 2019 年基本呈

现下降趋势,这可能与山西省加大力度对大气环境进行治理,严格控制污染物排放有关^[38,39].通过对颗粒物的季节变化进行分析(图3),结果表明,太原市颗粒物浓度总体水平在各季节均要高于晋中市;各季节中,晋中盆地主要城市冬季颗粒物浓度最高,夏季浓度要低于其余季节,晋中市冬季小时 $\rho(\text{PM}_{10})$ 均值为 $137.29 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,太原市为 153.16

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,晋中市夏季小时 $\rho(\text{PM}_{10})$ 均值为 $72.33 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,太原为 $87.27 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,晋中市冬季小时 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均值为 $79.42 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,太原市为 $89.66 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,晋中市夏季小时 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均值为 $38.52 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,太原为 $41.47 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,这与太原盆地主要城市的天气气候特征及污染物排放特征有关,与颗粒物的传输亦有关^[2,22].

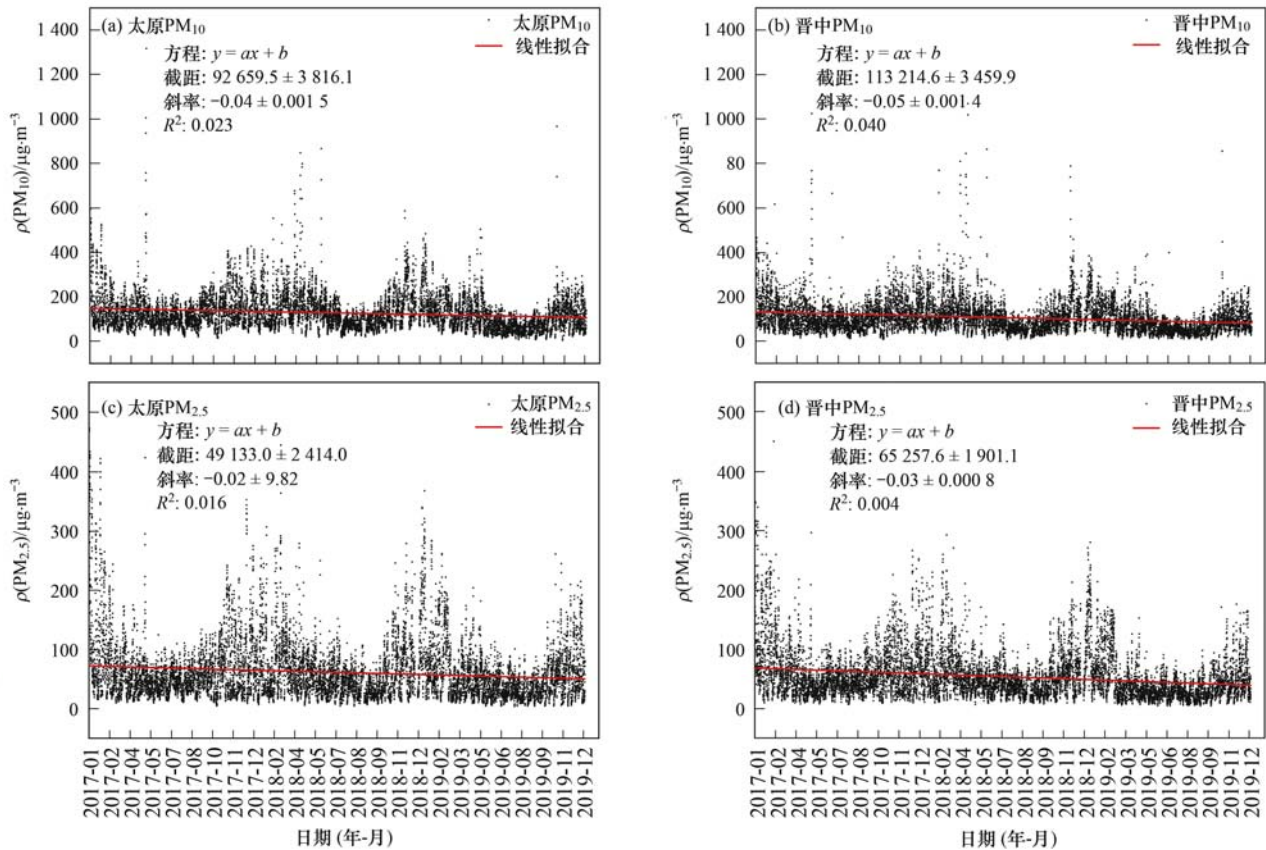


图2 2017~2019年晋中盆地主要城市颗粒物变化特征

Fig. 2 Variation characteristics of particulate matter in major cities in Jinzhong Basin from 2017 to 2019

图4给出了太原市和晋中市 PM_{10} 浓度变化情况,结果表明,太原市 PM_{10} 浓度[图4(b)]整体水平较晋中市 PM_{10} 浓度[图4(a)]高,太原市 PM_{10} 浓度高值出现在1、4、5和11月,晋中市 PM_{10} 浓度高值主要集中在1月,这种差异可能是由于两地污染来源的差异和扩散条件不同导致的^[19,23],此外,沙尘的影响亦能导致这种差异,根据山西省气象信息中心天气现象观测结果数据,通过对晋中市和太原市污染过程的统计结果分析表明,太原市受沙尘影响较晋中市多,2017~2019年期间,太原市,总污染过程为154次,沙尘型污染过程有10次,静稳型污染过程33次,其余(臭氧型或其他型)11次,沙尘型污染过程占比为18.5%,晋中市总污染过程为27次,其中沙尘型污染过程为3次,静稳型为16次,其余(臭氧型和其他型)8次,沙尘型污染过程占比为

11.1%.

图5给出了太原市和晋中市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化情况,结果表明,太原市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度[图5(b)]整体水平亦高于晋中市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度[图5(a)],太原市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高值主要集中在1月和2月、其次是11月和12月,晋中市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布特征类似,在浓度最高的1月,太原市小时 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均最高值出现在01:00~03:00($117.0 \sim 119.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),次高值出现在19:00~21:00($111.0 \sim 113.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),晋中市小时 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 最高值出现在21:00($111.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),究其原因,可能与两个城市工业企业生产布局的不同导致污染排放差异有关^[4],亦与混合层高度有关^[40],此外可能与污染物夜间的输送亦有关^[22,25,41].

$\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 在一定程度上可表征颗粒物污染类

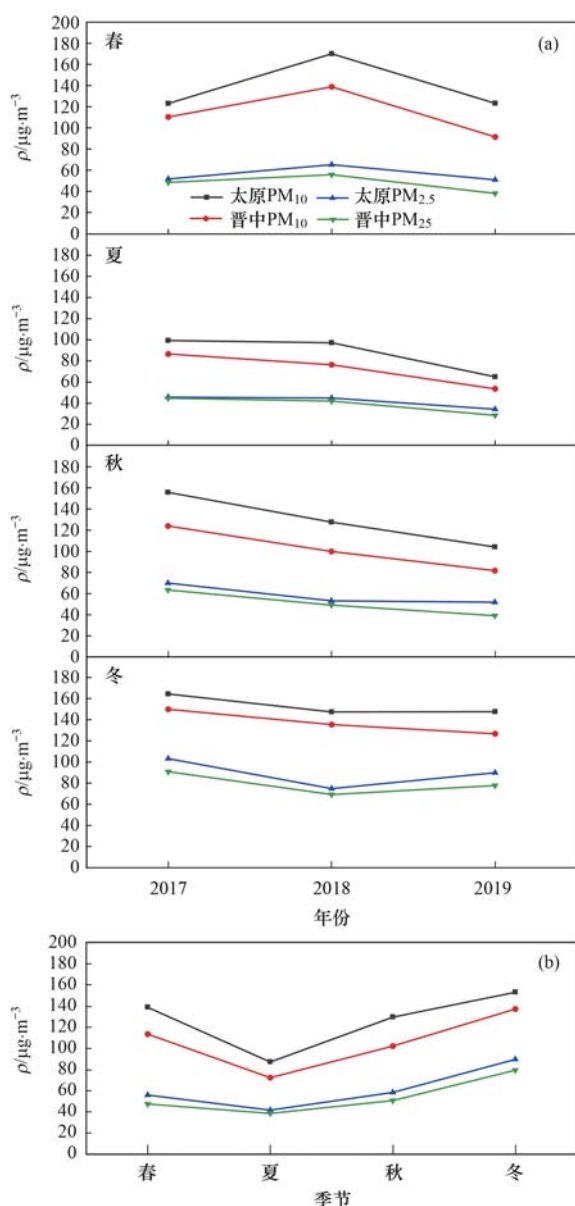


图3 晋中盆地主要城市颗粒物浓度季节变化特征

Fig. 3 Seasonal variation characteristics of particulate matter concentration in main cities in Jinzhong Basin

型和特征,当出现静稳型颗粒物污染时, $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值较高(通常 ≥ 0.35),当出现沙尘型颗粒物污染时, $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值较小(通常 < 0.35)^[42,43],图6给出了晋中市和太原市 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 分布情况,结果表明,太原市 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ [图6(b)]高值主要集中在1月和2月,其中1月高值基本出现在18:00~19:00($\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值均为0.63),2月高值出现在09:00~11:00($\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值均为0.63),次高值出现在7月,集中在11:00~13:00($\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值范围为0.56~0.57),晋中市 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ [图6(a)]较太原市整体水平较高,晋中市 $\text{PM}_{2.5}$ 所占比重较大,表明相较太原市,晋中市受静稳型天气形势引起的颗粒物污染较受沙尘型天气形势导致的颗粒物污染更普遍一些,晋中市 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 最高值出现

在2月,其次是1月,2月 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 高值出现在凌晨03:00~06:00($\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值范围为0.63~0.65),1月 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 高值出现在02:00(0.63),此外夏季7月和8月 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 亦出现较高值,7月 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 高值集中在午后14:00~15:00($\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值范围为0.60~0.61),8月 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 高值集中在15:00~16:00($\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值范围为0.59~0.61),此外7月和8月 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 在早间07:00~08:00亦较高($\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值范围为0.59~0.60),太原市 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 1月和2月均出现高值,其中1月 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 高值出现在18:00和19:00($\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值为0.63),2月 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 高值出现在10:00和11:00($\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值为0.63),7月 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 在11:00~13:00出现次高值($\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值范围为0.56~0.57),这些差异可能与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和近地面湿度有关,在湿度较大时段, $\text{PM}_{2.5}$ 会出现吸湿增长^[2,41],此外, $\text{PM}_{2.5}$ 占比与不同地区颗粒物排放特征、反应特征、累积特征和扩散气象条件亦有关^[2,38]。

通过对晋中市和太原市 PM_{10} [图7(a)]和 $\text{PM}_{2.5}$ [图7(b)]的分布特征进行分析,结果表明:在2017~2019年期间,太原市和晋中市小时 $\rho(\text{PM}_{10})$ 均最多分布在50~100 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 区间范围内,该区间范围内小时浓度数据值占总体小时浓度数据的比在晋中市为38.8%,太原市为33.3%,其次太原市和晋中市小时 $\rho(\text{PM}_{10})$ 较多分布在50~100 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 区间范围内,该区间范围内小时浓度数据值占总体小时浓度数据的比在晋中市为26.4%,太原市为24.5%,在>150 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的区间范围内时,小时浓度数据占总体小时浓度数据的比在太原市为30.2%,晋中市为19.5%,在<50 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的区间范围内时,小时浓度数据占总体小时浓度数据的比在太原市为10.1%,晋中市为17.2%。综上所述,小时 $\rho(\text{PM}_{10})$ 分布基本呈现出晋中市中间值较多(50~100 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 区间),相较晋中市,太原呈现高值(>150 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)偏多、低值(<50 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)偏少特点;在2017~2019年期间,太原市和晋中市小时 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均最多分布在25~50 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 区间范围内,该区间范围内小时浓度数据值占总体小时浓度数据比在晋中市为39.7%,太原市为32.7%,其次太原市和晋中市小时 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 较多分布在50~75 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 区间范围内,该区间范围内小时浓度数据值占总体小时浓度数据的比在晋中市为21.5%,太原市为22.3%,在>75 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的区间范围内时,小时浓度数据占总体小时浓度数据的比在太原市为26.3%,晋中市为19.7%,在<25 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的区间范围内时,小时浓度

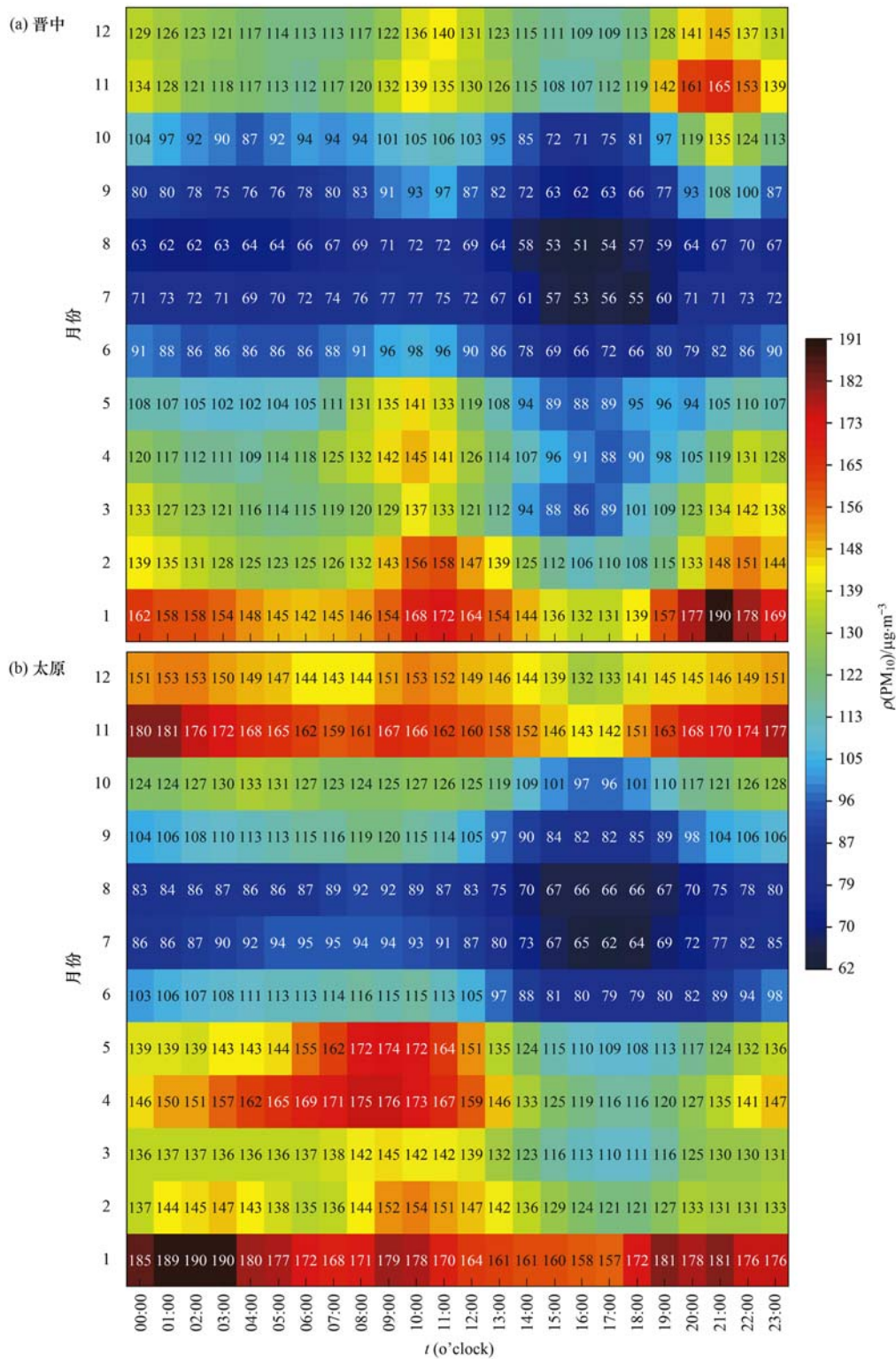


图4 2017~2019年晋中盆地主要城市PM₁₀浓度分布情况

Fig. 4 Diurnal and monthly variations of PM₁₀ in Jinzhong Basin from 2017 to 2019

数据占总体小时浓度数据的比在太原市为18.6%,晋中市为19.0%,综上所述,小时PM_{2.5}浓度分布基本特征与小时PM₁₀浓度分部特征类似,呈现出晋中市中间值较多(50~75 μg·m⁻³区间)的特点,相较晋中市,太原市呈现出高值(>75 μg·m⁻³)偏多、低值(<25 μg·m⁻³)偏少特点.这可能由于两个地

市两种污染物来源^[22,43,44]及累积特征不同^[2]和清除过程^[43]有所差异导致的.

分析可知,冬季为晋中盆地主要城市颗粒物污染高发季节.受冬季天气气候特征和冬季采暖等污染物排放等影响,晋中盆地冬季常出现以PM_{2.5}为首要污染物,对应天气形势为静稳型的污染^[21,43].

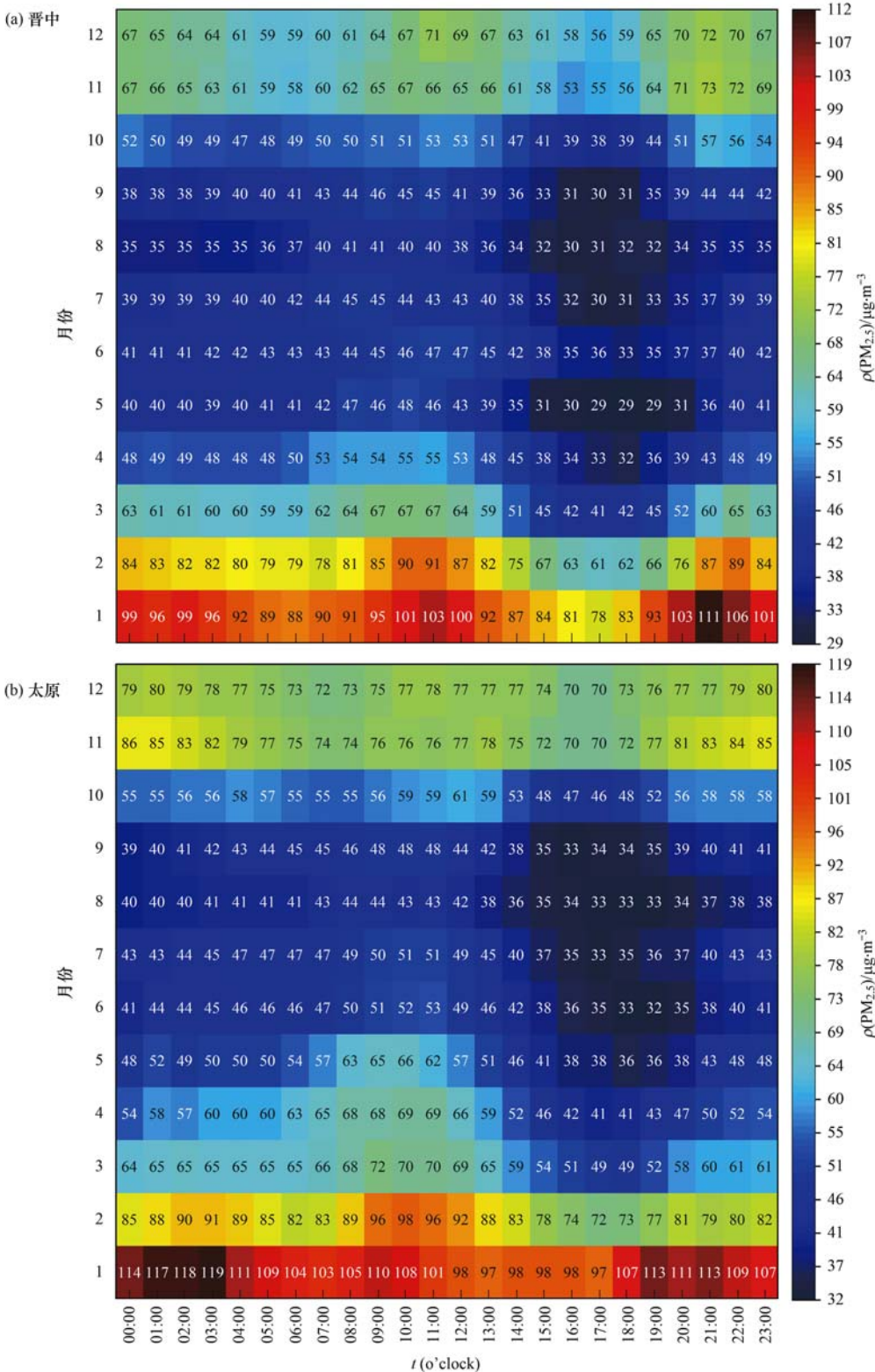


图5 2017~2019年晋中盆地主要城市 PM_{2.5} 浓度分布情况

Fig. 5 Diurnal and monthly variations in PM_{2.5} in Jinzhong Basin from 2017 to 2019

2.2 后向轨迹密度(TDA)分析

图8给出了晋中市和太原市2017~2019年各季后向轨迹密度(TDA),从中可知,晋中市后向轨迹密度分布情况和太原市后向轨迹密度情况类似,但后向轨迹密度分布有较为明显的季节差异,春季西北、东北、西南和东南方向气流轨迹密度较为均

衡,西北方向略多,夏季气流轨迹主要集中在东北、东南方向,秋季主要分布在西北、东北和东南这3个方向,冬季西北方向气流轨迹较多,轨迹密度的季节分布差异由于晋中盆地地处中纬度地带大陆内部,各季节盛行风向差异导致的,轨迹结果与晋中盆地所处的地理位置和季风气候是相适应的^[41,43].

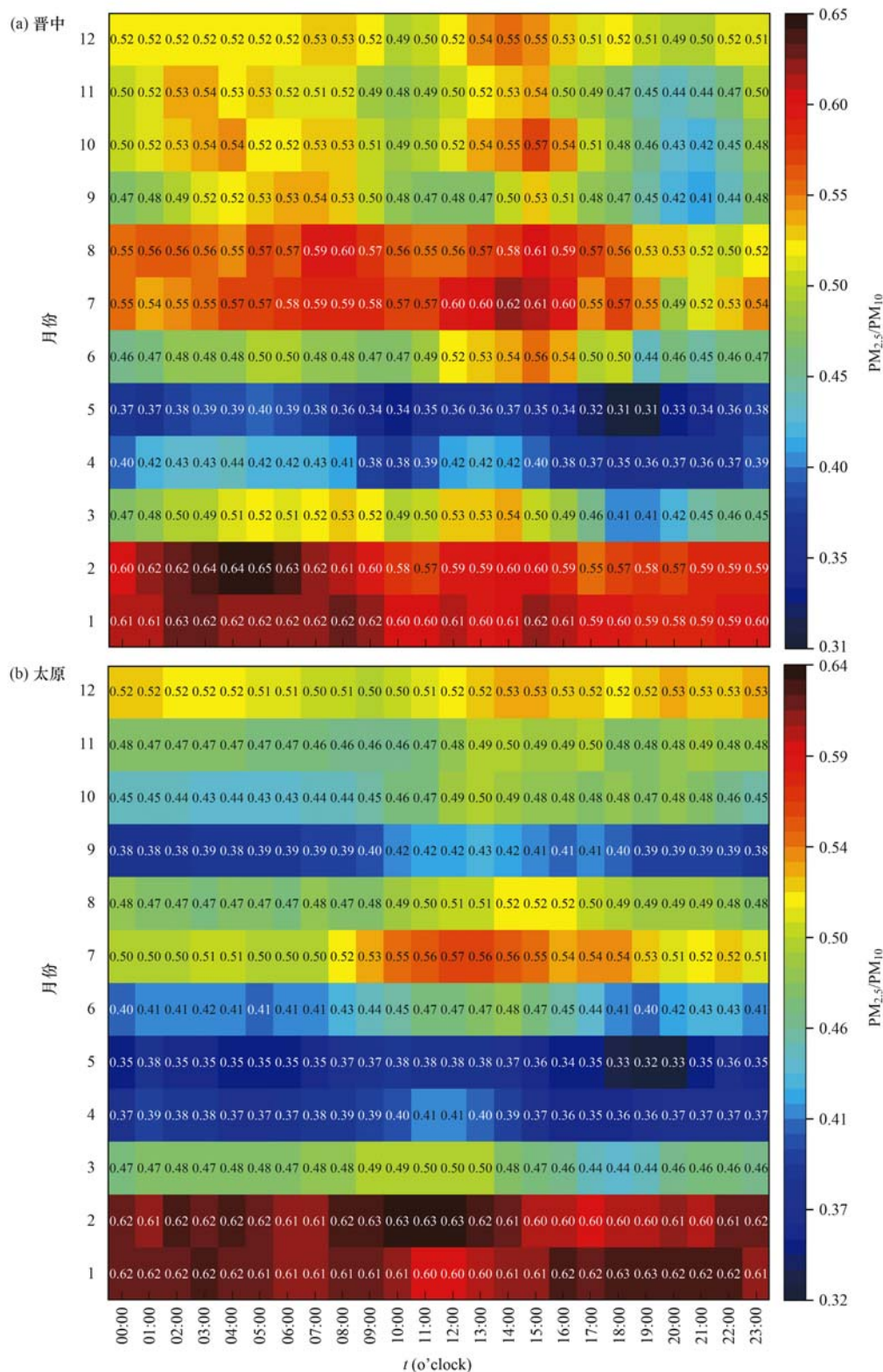


图6 2017~2019年晋中盆地主要城市 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 浓度分布情况

Fig. 6 Diurnal and monthly variations in $PM_{2.5}/PM_{10}$ in Jinzhong Basin from 2017 to 2019

高浓度 PM_{10} 污染多受沙尘传输影响^[43,44],而 $PM_{2.5}$ 污染受本地污染物排放及外来传输影响都不容忽视^[10,30],沙尘天气和静稳型天气导致的颗粒物污染,其首要污染物、污染成因和治理措施均有所不同,而晋中盆地冬季属于以 $PM_{2.5}$ 为首要污染物的静

稳型污染高发季节,本文将着重对晋中盆地冬季 $PM_{2.5}$ 传输特征进行分析。

图9给出了2017~2019年晋中盆地主要城市以 $PM_{2.5}$ 为首要污染物的静稳型污染和以 PM_{10} 为首要污染物的沙尘型污染发生时 TDA 分析结果,分析

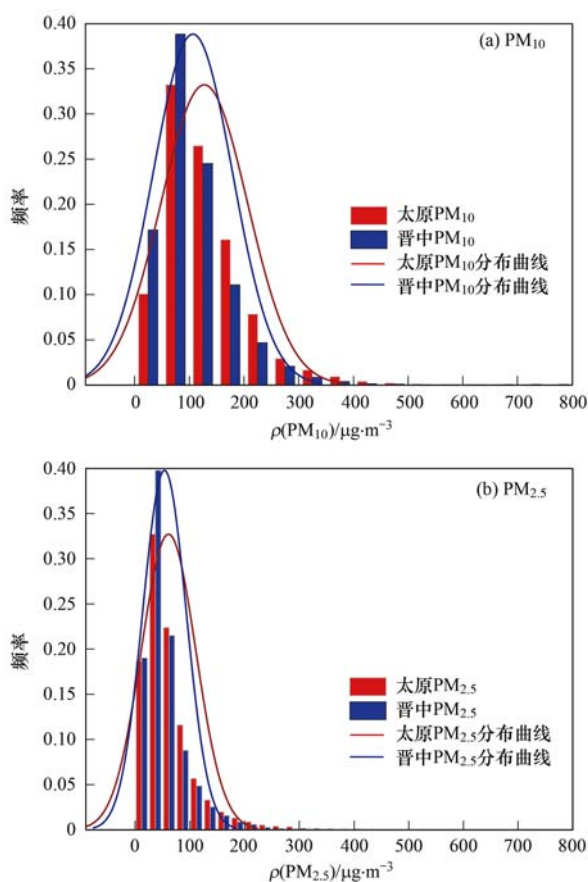


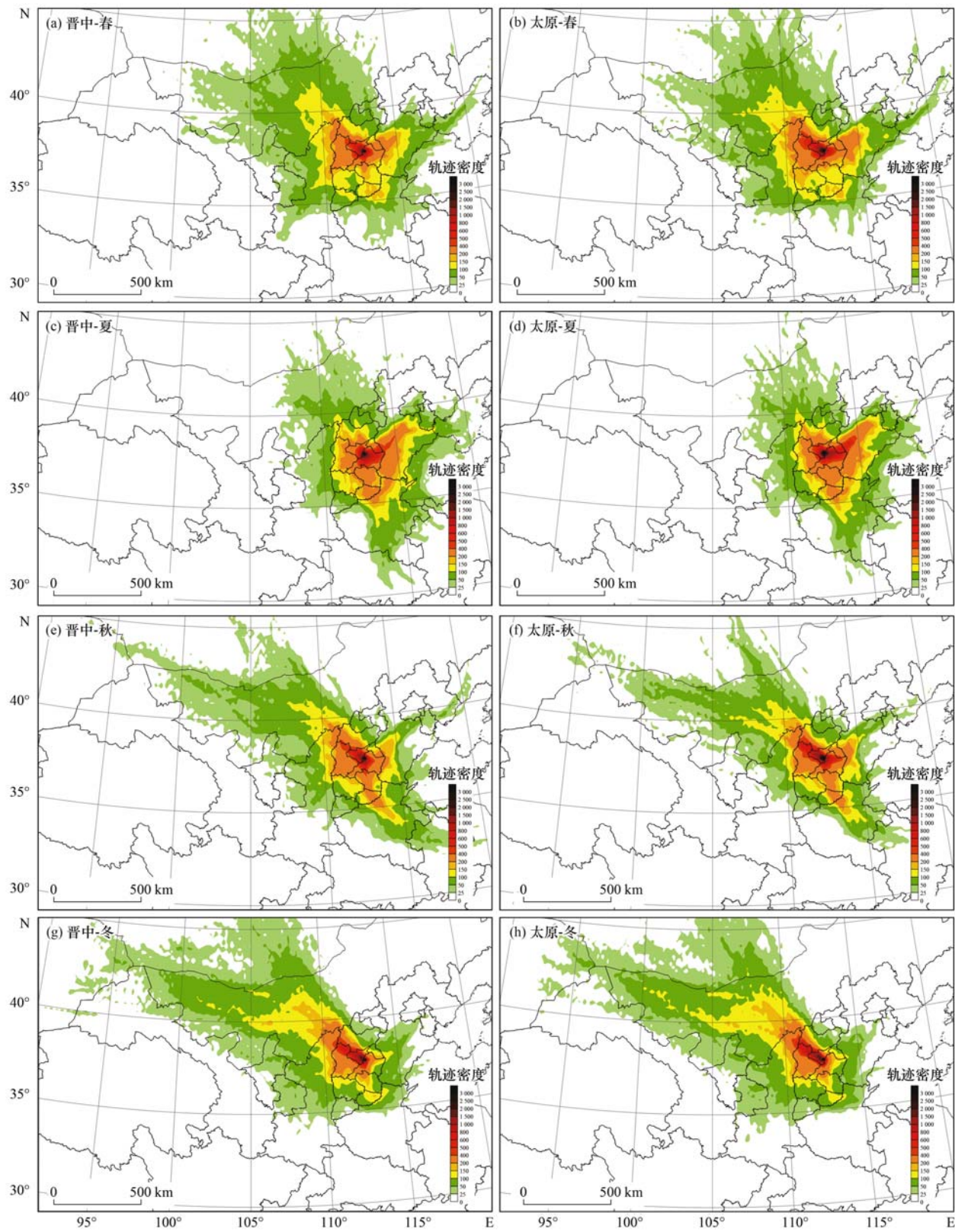
图7 2017~2019年晋中盆地主要城市颗粒物浓度分布特征

Fig. 7 Distribution characteristics of aerosol in Jinzhong Basin from 2017 to 2019

表明,静稳型和沙尘型气流轨迹分布有较为明显的差异,沙尘型污染气流轨迹主要集中在西北方向,和影响晋中盆地主要城市的沙尘路径基本一致^[41],且太原市沙尘型气流轨迹较晋中市密集,这和太原市受沙尘影响较晋中市多的结果是一致的;从静稳型污染气流轨迹分布来看,晋中市和太原市静稳型污染轨迹密集的区域主要分布在太原、晋中、吕梁、长治、临汾和晋城地区,此外还包括河北省的西南部,河南省西北部和陕西省东北部,表明晋中盆地静稳型污染发生时 $\text{PM}_{2.5}$ 传输通道涵盖了上述地区,而太原市静稳型污染气流轨迹密度较晋中市大,这与太原市 $\text{PM}_{2.5}$ 污染较晋中市严重的结果是一致的。

受冬季气象条件以及冬季采暖等因素的影响,晋中盆地静稳型污染多发生在冬季,图10给出了晋中市和太原市冬季2017~2019年 $\text{PM}_{2.5}$ 污染轨迹[轨迹对应 $\rho(\text{PM}_{2.5}) > 75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]分布情况,受冬季气象条件以及冬季采暖等因素的影响,晋中盆地静稳型污染多发生在冬季,污染轨迹密度分布可表征污染物传输通道,结合轨迹聚类分析结果可知,晋中市和太原市污染轨迹分布情况较为类似,晋中市及太原市冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 传输通道均可分为4类,通过对4类通道对比分析可知,第一类通道为近距离传输

通道,基本与太行八陬的井陘通道相重合,污染物沿太行山横谷传输^[25],晋中市第一类通道占比约为7.42%,对应小时 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均值约为 $121.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,此类通道污染气流移动平均速度约为 $2.12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,太原市第一类通道占比约为6.87%,对应小时 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均值约为 $119.82 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,污染气流移动平均速度约为 $1.79 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;第二类通道为偏东南方向传输通道,经过晋中、长治、晋城,河南省北部,河北省南部,第二类传输通道沿华北平原绕太行山传输,此类传输通道污染轨迹密度较第一类传输通道大,晋中市第二类通道占比为12.49%,对应小时 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均值约为 $132.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,此类通道污染气流移动平均速度约为 $2.12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,太原市第二类通道占比为13.07%,对应小时 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均值约为 $172.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,污染气流移动平均速度约为 $1.94 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,第一、二类气流传输受偏东南气流影响^[32],会携带较多水汽,且移动较为缓慢,属于近距离传输,当 $\text{PM}_{2.5}$ 沿此类通道传输时会容易吸湿增长,从而可能加重本地污染;第三类传输通道为西北方向传输通道,在各个方向气流轨迹中占比最多,晋中市第三类轨迹占比约为45.66%,对应小时 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均值约为 $125.99 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,此类通道污染气流移动平均速度约为 $6.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,太原市第三类轨迹占比约为47.19%,对应小时 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均值约为 $125.31 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,污染气流移动平均速度约为 $6.14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,此类传输通道气流轨迹较为密集,在各类轨迹中占比最多,气流移动速度在各类通道中移动速度最快,这是由于晋中盆地地处中纬度地带大陆内部,西北风盛行,与晋中盆地所处的地理位置和冬季季风气候特征相适应^[41],此外,通过研究近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 累积特征表明,冬季晋中盆地近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 污染往往在冷空气到达前达到最严重,此后随着近地面风向转为西北风向,扩散条件好转,污染过程结束^[2,43], $\text{PM}_{2.5}$ 此类积累特征表现在污染轨迹密度分布情况上看,即为西北方向第三类传输通道,此外,第三类传输通道,还对应为沙尘传输通道之一^[41,43,44],当沙尘经沙源地到达目标城市初期,近地面 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均会呈现增加,但同时 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 会下降^[43,44];第四类传输通道对应汾渭平原传输通道,晋中市第四类轨迹占比约为34.43%,对应小时 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均值约为 $140.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,此类通道污染气流移动平均速度约为 $4.68 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,太原市第四类轨迹占比约为32.86%,对应小时 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均值约为 $176.35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,污染气流移动平均速度约为 $4.45 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,此类通道污染轨迹占比亦较多,通道内气流轨迹对



黄色部分为100条以上轨迹集中区域

图 8 2017 ~ 2019 年晋中市和太原市各季向后轨迹密度 (TDA) 分析结果

Fig. 8 TDA results of Jinzhong and Taiyuan from 2017 to 2019

应 $PM_{2.5}$ 浓度在四类通道中最高, 这表明气团在通过第四类通道时, 携带更高浓度的污染物, 这可能是汾渭平原各城市受地形等因素影响, 随着气流方向的变化, 各城市之间 $PM_{2.5}$ 常互相传输, 从而裹挟更多

的污染物, 导致汾渭平原 $PM_{2.5}$ 浓度经常在时空分布特征上呈现出一定的关联性^[45].

图 11 给出了晋中市和太原市 2017 ~ 2019 年冬季 RTA 污染轨迹分析结果, 以及以 RTA 污染轨迹

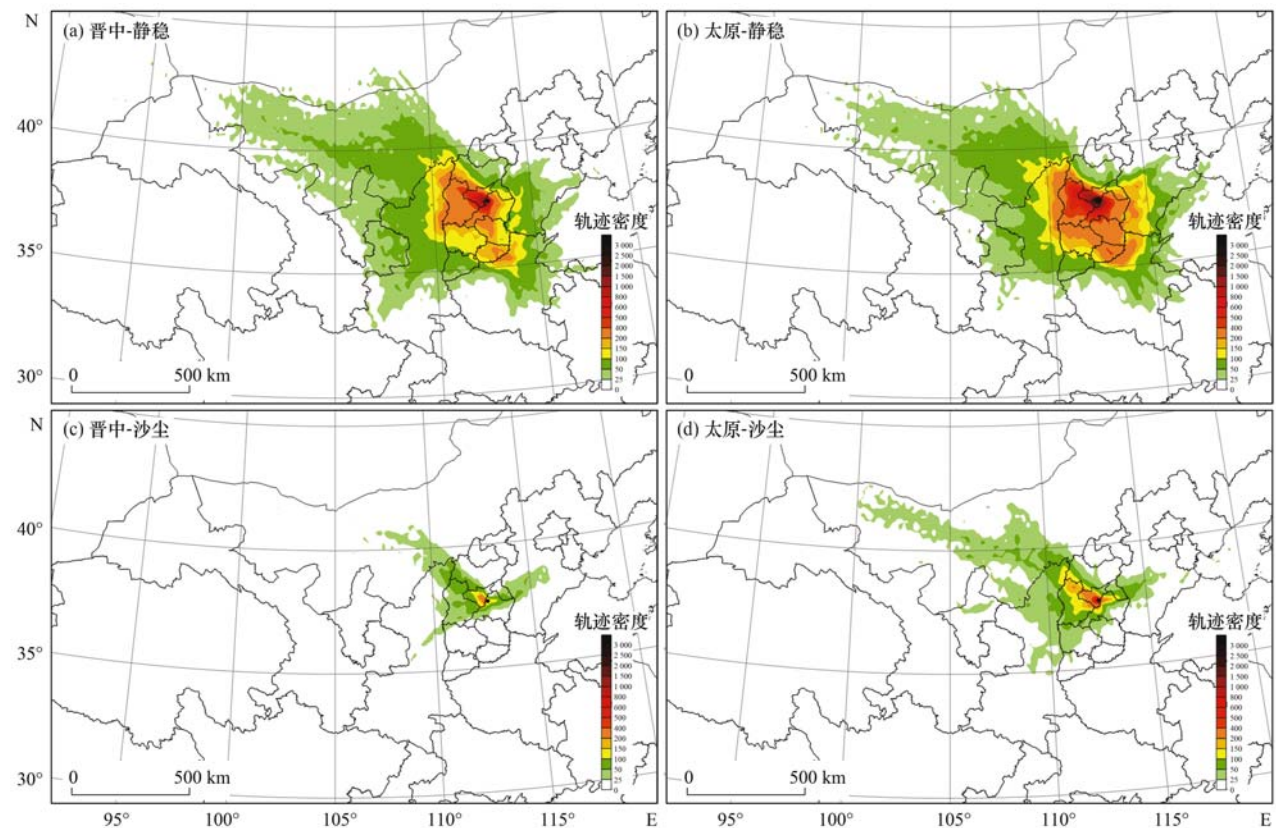


图 9 2017 ~ 2019 年晋中市和太原市沙尘型和静稳型污染轨迹密度分析结果图及污染传输通道
Fig. 9 TDA results of dust and stagnant air pollution in Jinzhong and Taiyuan from 2017 to 2019

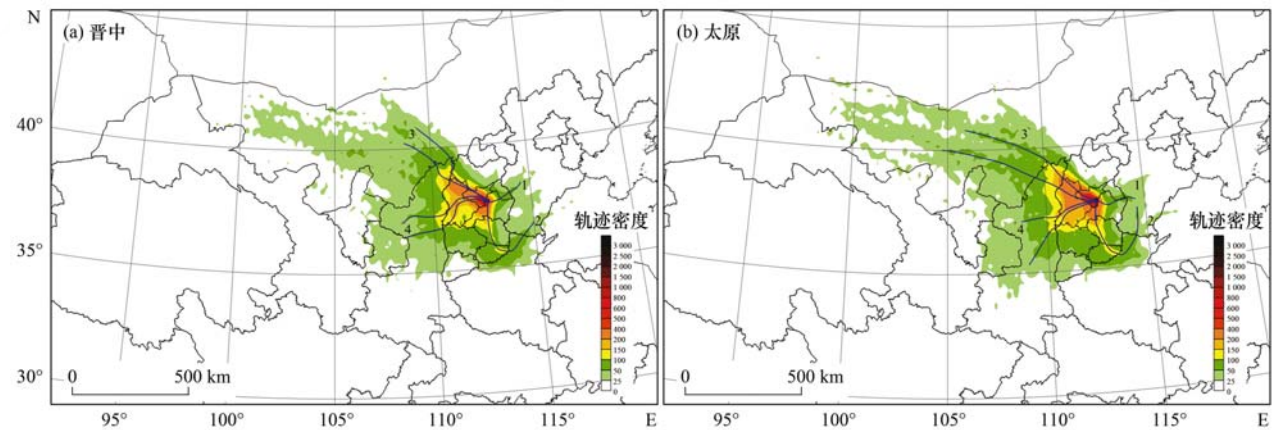
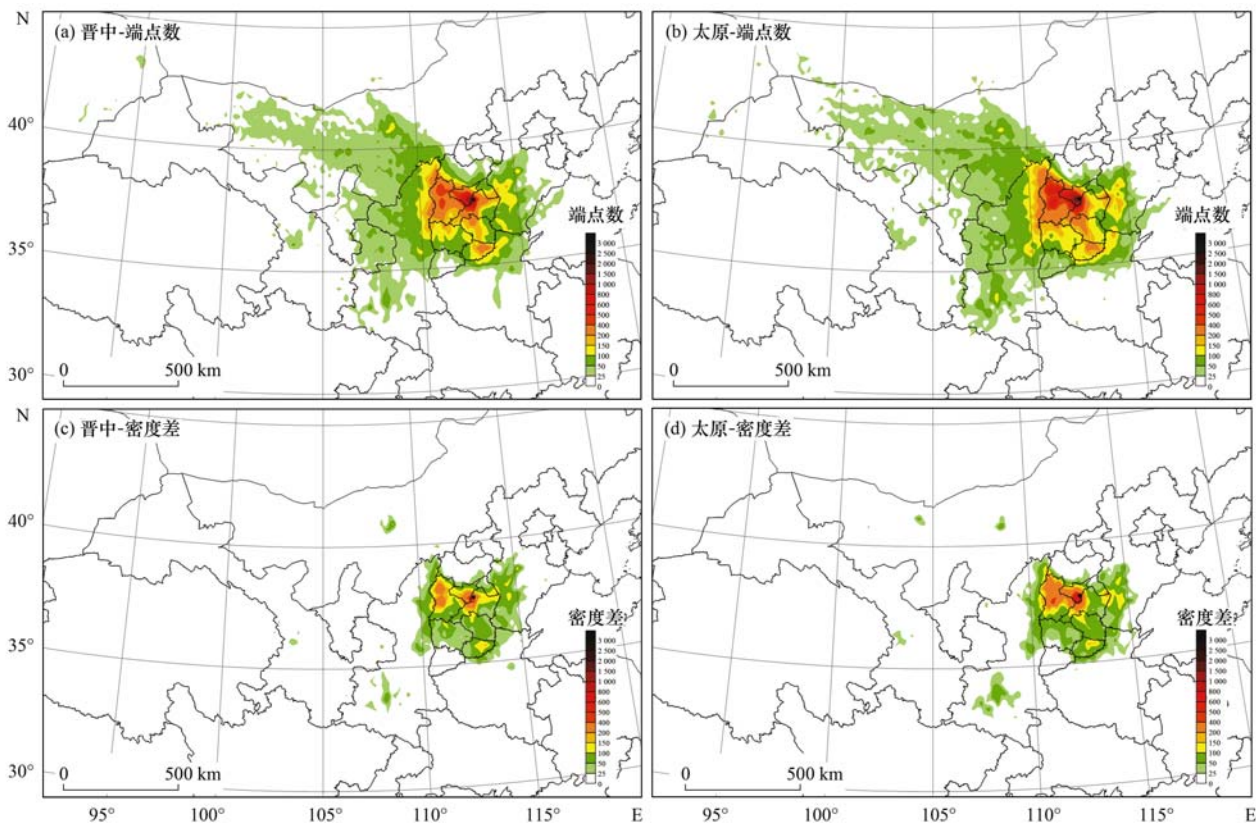


图 10 2017 ~ 2019 年晋中市和太原市冬季污染轨迹密度分析结果及 $PM_{2.5}$ 传输通道

Fig. 10 TDA results and pollution transmission passageway in winter of Jinzhong and Taiyuan from 2017 to 2019

端点数与 TDA 污染轨迹数之差,针对晋中市和太原市 RTA 污染轨迹端点数进行分析[图 11(a)和图 11(b)],不同颜色表示其数量的多寡,从而可表征污染物的传输通道.从中可知,分析结果与图 10 污染轨迹密度分析结果略有不同,这是由于 RTA 污染轨迹端点数考虑了网格内轨迹端点的停留,所以计算出的传输通道范围要大于轨迹密度分析法计算出的通道范围,通过计算 RTA 污染轨迹端点数与 TDA 污染轨迹数之差[图 11(c)和图 11(d)],分析污染

轨迹停留的时间超过基准数,从而表征污染轨迹移动缓慢的区域.结果表明,晋中盆地主要城市冬季污染轨迹停留时间较长的区域包括山西省的吕梁地区、阳泉市、长治市、晋城市和临汾市,陕西省东北部、河北省西南部、河南省北部,有研究表明,停留时间越长,气团包裹的污染物会更多^[33,34],在越接近受体点区域,气流轨迹移动越缓慢,表明晋中盆地主要城市冬季 $PM_{2.5}$ 污染在天气静稳,风速较小的时候更容易发生,这与 $PM_{2.5}$ 累积特征是一致的^[2].从



黄色部分为100条以上轨迹集中区域

图 11 2017 ~ 2019 年晋中市和太原市冬季污染轨迹轨迹停留时间 (RTA 轨迹数端点数) 及 RTA 污染轨迹数与 TDA 污染轨迹密度差

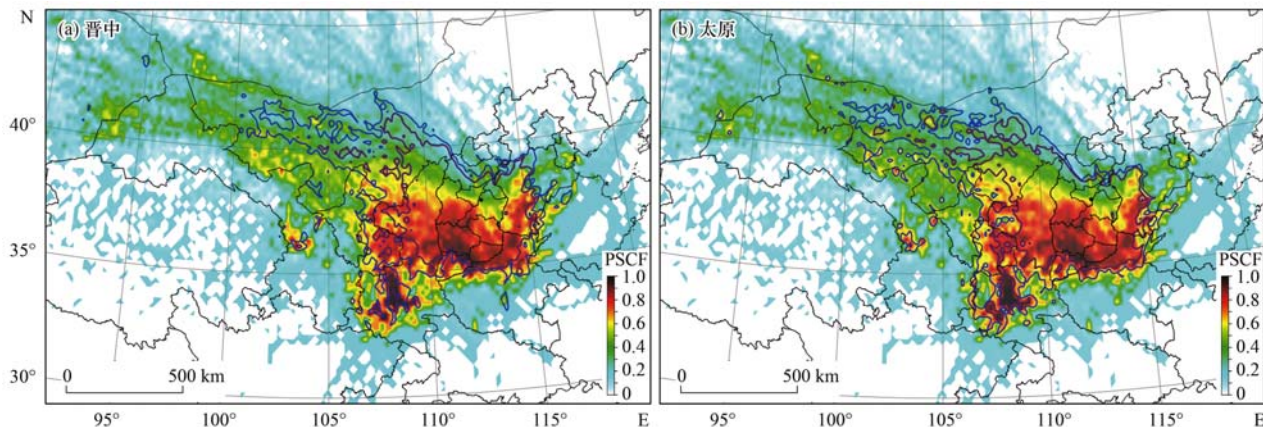
Fig. 11 RTA results and the difference in RTA results and TDA results in winter of Jinzhong and Taiyuan from 2017 to 2019

其分布特征来看,值得注意的是,陕西省西安市周边、汉中市附近等地亦出现高值区域,表明在时空分布特征上,汾渭平原 $PM_{2.5}$ 污染呈现出一定的关联性^[10,45],另一方面,汉中出现高值,可能由于汉中平原北依秦岭,南靠巴山,受地形的影响,汉中市 $PM_{2.5}$ 在静小风时,亦容易出现污染物的堆积,成为晋中盆地主要城市 $PM_{2.5}$ 潜在源区。

2.3 晋中盆地冬季 $PM_{2.5}$ 潜在源区 (PSCF) 分析

将后向轨迹结合 $PM_{2.5}$ 浓度采用潜在源贡献因

子分析法 (PSCF) 来定位潜在污染源区位置并定量给出污染贡献大小^[14],PSCF 的计算值越大,表明该网格对计算点 $PM_{2.5}$ 浓度的影响越大. 通过对后向轨迹聚类分析结果结合 $PM_{2.5}$ 浓度,采用潜在源贡献因子分析法 (PSCF) 给出太原市和晋中市冬季 $PM_{2.5}$ 污染潜在源区 (图 12), 将潜在源贡献因子分析法 (PSCF) 定位的潜在源区与 RTA 轨迹数端点数进行对比分析,由图 12 可知, 30 以上 RTA 轨迹数端点数分布范围包含了 PSCF 定位的贡献 0.7 以上的潜



蓝色线框内为停留端点数为 30 以上污染轨迹区域,粗紫色框线为停留端点数为 50 以上污染轨迹区域

图 12 晋中市和太原市 2017 ~ 2019 年冬季 $PM_{2.5}$ 潜在源区 (PSCF) 及污染轨迹停留时间 (TDA) 端点数

Fig. 12 PSCF and TDA results in winter of Jinzhong and Taiyuan from 2017 to 2019

在源区,但在西北方向,30 以上 RTA 轨迹数端点数分布范围要大于 PSCF 定位的贡献 0.7 以上的潜在源区范围,这是由于 PSCF 计算方法^[37]是基于条件的概率函数计算所得.晋中盆地冬季西北风盛行,西北方向气流虽轨迹较多,但其污染轨迹所占总轨迹的比例较其他方向占比少所致.

综合分析表明,污染轨迹密集(污染轨迹 100 条以上)的区域,以及气流移动缓慢(RTA 污染轨迹端点数 > 50)的区域易成为目标城市潜在源区(PSCF 贡献 0.7 以上),晋中市冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 主要潜在源区(PSCF 贡献 0.7 以上),主要分布在山西省的临汾、晋城等地.此外,还包括河南省北部,河北省南部,陕西省中南部,值得注意的是,在陕西省西安、铜川,汉中等地亦出现 0.9 以上的高值中心,表明当此类城市出现高浓度 $\text{PM}_{2.5}$ 污染时,尤其应注意其传输与晋中盆地之间互相影响.太原市冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 主要潜在源区(PSCF 贡献 0.7 以上)包括山西境内的吕梁市南部、阳泉市、临汾市、运城市及晋中市南部,此外还包括陕西中南部大部分地区、河南省北部和河北省南部部分地区.太原市 PSCF 的计算值 0.7 以上的高值分布范围较晋中市广,PSCF 的计算值 0.9 以上分布范围亦较晋中市广,表明太原市冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 潜在源区分布范围要大于晋中市.

2.4 近地面风对冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响

通过潜在源区(PSCF)分析、轨迹密度(TDA)

分析、停留时间(RTA)分析.结果表明,晋中盆地主要城市在冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 污染发生时,晋中市和太原市污染轨迹停留区域以及潜在源区基本呈现类似的分布特征,分布范围略有不同,太原市潜在源区较晋中市范围广,以上分析方法普遍针对高空气流(起始高度 300 m).图 13 给出的是太原市和晋中市冬季在不同近地面风向影响下 $\text{PM}_{2.5}$ 的污染呈现出的特征,给出了冬季晋中市及太原市风频与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度关系.分析表明,晋中市近地面全年主导风向以偏东风为主(NE、ENE 和 E 这 3 个风向频率之和为 40.4%),其中,当风向为 E 时,出现轻度以上污染的频率为 8.1%,在各个风向中最高.与晋中市不同,太原市近地面以偏北气流为主(NW、NNW 和 N 这 3 个风向频率之和为 29.9%),轻度以上污染多发生在近地面为偏南气流时,其中当地面风向为 SSW 时,轻度污染以上污染天气出现频率在各个风向中最高,为 5.1%.这些差异可能由于地形影响造成,太原市地形北高南低呈簸箕形,晋中市地势东高西低,呈阶梯状分布(图 1),地形差异导致近地面主导风向亦有所差异,并导致冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 近地面传输特征的差异^[22,25].此外,太原市出现静风的频率(4.9%)要高于晋中市(1.0%),且太原市出现静风时,出现轻度污染以上的频率(3.4%)亦高于晋中市(0.5%),亦表明两个城市 $\text{PM}_{2.5}$ 具有不同累积特征^[2].

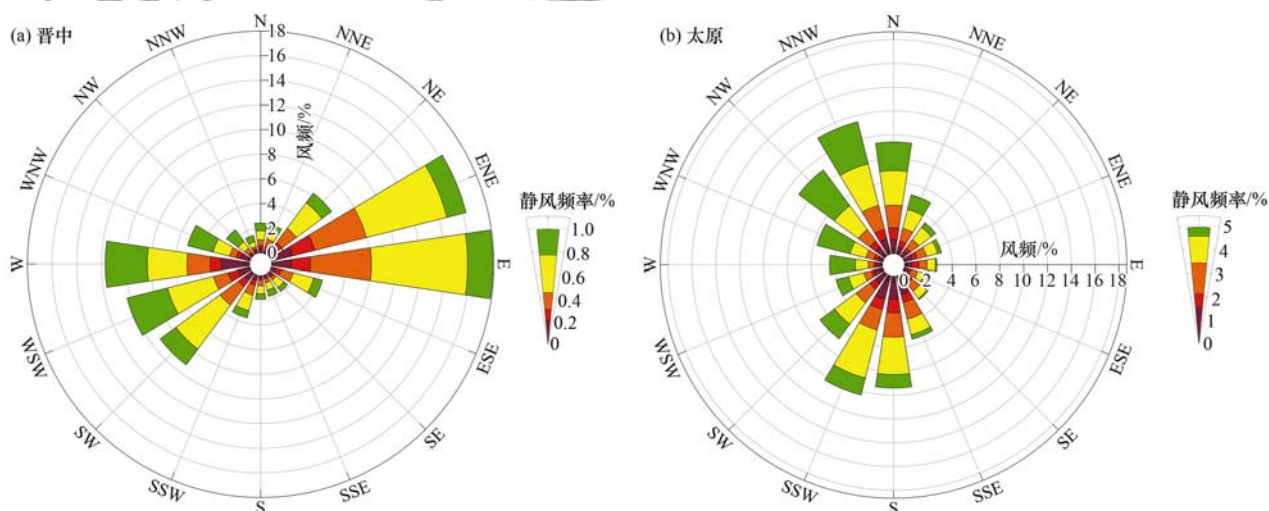


图 13 2017~2019 年晋中市和太原市风频与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度关系

Fig. 13 Relationship between wind direction frequency and $\text{PM}_{2.5}$ concentration in Jinzhong and Taiyuan from 2017 to 2019

3 结论

(1)位于晋中盆地北段的晋中市和太原市大气颗粒物污染呈现出不同特征,太原市颗粒物浓度整体水平高于晋中市,月、季变化特征类似,均呈现冬季高,夏季低的特征,最高值出现在 1 月份;晋中市

受静稳型天气形势引起的颗粒物污染较受沙尘型天气形势导致的颗粒物污染相较太原市更普遍一些.颗粒物的分布呈现出晋中市中间值较多,太原市高值偏多、低值偏少的特点,冬季为晋中盆地 $\text{PM}_{2.5}$ 污染高发季节.

(2)晋中市及太原市冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 传输通道均可

分为4类:第一类通道基本与太行八陉的井陉通道相重合,污染物沿太行山横谷传输.第二类通道为偏东南方向传输通道,经过晋中、长治、晋城、河南省北部和河北省南部,第一、二类均为近距离传输通道,且携带较多水汽,PM_{2.5}沿此类通道传输时容易吸湿增长加重本地污染.第三类传输通道为西北方向传输通道,对应冬季晋中盆地近地面PM_{2.5}污染在冷空气到达前达到最严重时段的气流轨迹,此外,还对应为沙尘传输通道之一.第四类通道为汾渭平原传输通道,对应汾渭平原各城市之间PM_{2.5}的传输,对应高浓度的PM_{2.5}污染.

(3)污染轨迹密集(污染轨迹100条以上)的区域,以及气流移动缓慢(RTA污染轨迹端点数>50)的区域易成为目标城市潜在源区(PSCF贡献0.7以上),晋中市冬季PM_{2.5}潜在源区(PSCF贡献0.7以上),主要分布在山西省的临汾、晋城等地,此外,还包括河南省北部,河北省南部,陕西省中南部.在PSCF贡献0.9以上的高值区域出现污染时,应注意其与晋中盆地城市之间的互相传输的影响.太原市冬季PM_{2.5}主要潜在源区(PSCF贡献0.7以上)分布范围较晋中市广,包括山西境内的吕梁市南部、阳泉市、临汾市、运城市及晋中市南部,此外还包括陕西南部大部分地区、河南省北部和河北省南部部分地区,PSCF贡献0.9以上的高值中心分布较晋中市广.

(4)晋中市和太原市在轻度以上污染出现时,对应地面风向有差异,晋中市近地面风向为E时,出现轻度以上污染的频率为8.1%,在各个风向中最高.与晋中市不同,太原市近地面风向为SSW时,轻度污染以上污染天气出现频率在各个风向中最高,为5.1%,且太原市出现静风时,出现轻度污染以上的频率(3.4%)亦高于晋中市(0.5%).

参考文献:

- [1] GB/T 36542-2018, 霾的观测识别[S].
- [2] 姬艺珍,郭伟,胡正华,等.太原市PM_{2.5}积累特征及重污染天气成因分析[J].环境科学学报,2021,41(3):853-862.
Ji Y Z, Guo W, Hu Z H, et al. Accumulation characteristics of PM_{2.5} and the causes of serious pollution weather in Taiyuan City, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(3): 853-862.
- [3] Song C B, He J J, Wu L, et al. Health burden attributable to ambient PM_{2.5} in China[J]. Environmental Pollution, 2017, 223: 575-586.
- [4] 张小曳,孙俊英,王亚强,等.我国雾-霾成因及其治理的思考[J].科学通报,2013,58(13):1178-1187.
Zhang X Y, Sun J Y, Wang Y Q, et al. Factors contributing to haze and fog in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(13): 1178-1187.
- [5] 郑治斌,崔新强,廖移山.我国霾研究进展及公共安全影响应对[J].沙漠与绿洲气象,2019,13(4):135-143.
- Zheng Z B, Cui X Q, Liao Y S. The Progress of haze research in china and the response to public security[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2019, 13(4): 135-143.
- [6] 张梦娇,苏方成,徐起翔,等.2013~2017年中国PM_{2.5}污染防治的健康效益评估[J].环境科学,2021,42(2):513-522.
Zhang M J, Su F C, Xu Q X, et al. Health impact attributable to the control of PM_{2.5} pollution in China during 2013-2017[J]. Environmental Science, 2021, 42(2): 513-522.
- [7] 姚青,蔡子颖,刘敬乐,等.气象条件对2009—2018年天津地区PM_{2.5}质量浓度的影响[J].环境科学学报,2020,40(1):65-75.
Yao Q, Cai Z Y, Liu J L, et al. Effects of meteorological conditions on PM_{2.5} concentration in Tianjin from 2009 to 2018[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(1): 65-75.
- [8] 刘引鸽,周欢欢,赵阿玲,等.河谷型城市一次大气持续重污染特征及其原因分析——以宝鸡市为例[J].环境污染与防治,2019,41(11):1286-1290.
Liu Y G, Zhou H H, Zhao A L, et al. Characteristics of continuous heavy pollution in a valley city and its causes: a case study of Baoji City[J]. Environmental Pollution & Control, 2019, 41(11): 1286-1290.
- [9] 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.
- [10] 李雁宇,李杰,杨文夷,等.2018年汾渭平原及其周边地区大气颗粒物的传输特征[J].环境科学学报,2020,40(3):779-791.
Li Y Y, Li J, Yang W Y, et al. Transport characteristics of atmospheric particulates in Fenwei Plain and its surrounding regions in 2018[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(3): 779-791.
- [11] 何伟,张文杰,王淑兰,等.京津冀地区大气污染联防联控机制实施效果及完善建议[J].环境科学研究,2019,32(10):1696-1703.
He W, Zhang W J, Wang S L, et al. Effects and improvement suggestions on air pollution joint prevention and control mechanism in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(10): 1696-1703.
- [12] 刘建国,谢品华,王跃思,等.APEC前后京津冀区域灰霾观测及控制措施评估[J].中国科学院院刊,2015,30(3):368-377.
Liu J G, Xie P H, Wang Y S, et al. Haze observation and control measure evaluation in Jing-Jin-Ji (Beijing, Tianjin, Hebei) area during the period of the Asia-Pacific Economic Cooperation (APEC) Meeting[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2015, 30(3): 368-377.
- [13] Wang A N, Jing J L, Luo F L, et al. Analysis of AQI change characteristics and correlation with PM_{2.5} and PM₁₀ in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2020, XLII-3/W10: 1041-1048.
- [14] 姬艺珍,郭伟,胡正华,等.基于积累速率的汾渭平原秋冬季PM_{2.5}污染特征及影响因素分析[J].环境科学学报,2021,41(9):3673-3682.
Ji Y Z, Guo W, Hu Z H, et al. The pollution characteristics and influencing factors of PM_{2.5} in autumn and winter seasons in Fenwei Plain based on accumulation rate[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(9): 3673-3682.
- [15] 王自发,李杰,王哲,等.2013年1月我国中东部强霾污染

- 的数值模拟和防控对策[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, **44**(1): 3-14.
- Wang Z F, Li J, Wang Z, *et al.* Modeling study of regional severe hazes over mid-eastern China in January 2013 and its implications on pollution prevention and control [J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, **57**(1): 3-13.
- [16] Sun J J, Huang L, Liao H, *et al.* Impacts of regional transport on particulate matter pollution in China: a review of methods and results[J]. *Current Pollution Reports*, 2017, **3**(3): 182-191.
- [17] Gu Y X, Yan F X, Xu J M, *et al.* Mitigated PM_{2.5} changes by the regional transport during the COVID-19 lockdown in Shanghai, China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(8), doi: 10.1029/2021GL092395.
- [18] 王晓琦, 郎建垒, 程水源, 等. 京津冀及周边地区 PM_{2.5} 传输规律研究[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(11): 3211-3217.
- Wang X Q, Lang J L, Cheng S Y, *et al.* Study on transportation of PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) and its surrounding area[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(11): 3211-3217.
- [19] 李璇, 聂滕, 齐珺, 等. 2013 年 1 月北京市 PM_{2.5} 区域来源解析[J]. 环境科学, 2015, **36**(4): 1148-1153.
- Li X, Nie T, Qi J, *et al.* Regional source apportionment of PM_{2.5} in Beijing in January 2013 [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(4): 1148-1153.
- [20] 薛文博, 付飞, 王金南, 等. 中国 PM_{2.5} 跨区域传输特征数值模拟研究[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(6): 1361-1368.
- Xue W B, Fu F, Wang J N, *et al.* Numerical study on the characteristics of regional transport of PM_{2.5} in China[J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(6): 1361-1368.
- [21] 胡京南, 柴发合, 段菁春, 等. 京津冀及周边地区秋冬季 PM_{2.5} 爆发式增长成因与应急管控对策[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(10): 1704-1712.
- Hu J N, Chai F H, Duan J C, *et al.* Explosive growth of PM_{2.5} during the autumn and winter seasons in the Jing-Jin-Ji and surrounding area and its control measures with emergency response[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(10): 1704-1712.
- [22] 闫世明, 王雁, 郭伟, 等. 太原市秋冬季大气污染特征和输送路径及潜在源区分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(11): 4801-4809.
- Yan S M, Wang Y, Guo W, *et al.* Characteristics, transportation, pathways, and potential sources of air pollution during autumn and winter in Taiyuan [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(11): 4801-4809.
- [23] 黄小刚, 赵景波, 孙从建, 等. 汾渭平原 PM_{2.5} 空间分布的地形效应[J]. 环境科学, 2021, **42**(10): 4582-4592.
- Huang X G, Zhao J B, Sun C J, *et al.* Orographic influences on the spatial distribution of PM_{2.5} on the Fen-Wei Plain [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(10): 4582-4592.
- [24] 朱燕, 赵天良, 白永清, 等. 两湖盆地冬季区域大气颗粒物污染特征及独特的风场和下垫面影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(10): 4669-4677.
- Zhu Y, Zhao T L, Bai Y Q, *et al.* Characteristics of atmospheric particulate matter pollution and the unique wind and underlying surface impact in the Twain-Hu Basin in winter [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(10): 4669-4677.
- [25] 王雁, 郭伟, 闫世明, 等. 太行山两侧污染物传输对横谷城市气溶胶的影响分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(9): 4104-4115.
- Wang Y, Guo W, Yan S M, *et al.* Influence of pollutant transport from both sides of the Taihang Mountains on cross-valley urban aerosols [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4104-4115.
- [26] 高晋徽, 朱彬, 王东东, 等. 南京北郊 O₃、NO₂ 和 SO₂ 浓度变化及长/近距离输送的影响[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(5): 1149-1159.
- Gao J H, Zhu B, Wang D D, *et al.* The variation of air pollutants and the impact of long-range transport in the northern suburb of Nanjing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(5): 1149-1159.
- [27] 赵恒, 王体健, 江飞, 等. 利用后向轨迹模式研究 TRACE-P 期间香港大气污染物的来源[J]. 热带气象学报, 2009, **25**(2): 181-186.
- Zhao H, Wang T J, Jiang F, *et al.* Investigation into the source of air pollutants to Hong Kong by using backward trajectory method during the Trace-P campaign [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2009, **25**(2): 181-186.
- [28] 赵雪, 沈楠驰, 李令军, 等. COVID-19 疫情期间京津冀大气污染物变化及影响因素分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(3): 1205-1214.
- Zhao X, Shen N C, Li L J, *et al.* Analysis of changes and factors influencing air pollutants in the Beijing-Tianjin-Hebei region during the COVID-19 pandemic [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1205-1214.
- [29] 陈颖元, 王晓琦, 程水源, 等. 京津冀和长三角地区一次重霾过程气象成因及传输特征[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(6): 2481-2492.
- Chen H Y, Wang X Q, Cheng S Y, *et al.* Analysis of meteorological causes and transmission characteristics of a heavy haze process in Beijing Tianjin Hebei and Yangtze River delta [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(6): 2481-2492.
- [30] Ren L L, Yang Y, Wang H L, *et al.* Aerosol transport pathways and source attribution in China during the COVID-19 outbreak [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, **21**(20): 15431-15445.
- [31] 中华人民共和国生态环境部. 2020 中国生态环境状况公报 [EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/>, 2021-01-01.
- [32] 裴坤宁, 高兴艾, 王淑敏等. 晋东南地区冬季 PM_{2.5} 污染输送路径分析[J]. 中国环境科学, 2022, **42**(2): 557-567.
- Pei K N, Gao X A, Wang S M, *et al.* Analysis of PM_{2.5} pollution transportation path in winter in southeast Shanxi province[J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(2): 557-567.
- [33] Ashbaugh L L. A statistical trajectory technique for determining air pollution source regions [J]. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 1983, **33**(11): 1096-1098.
- [34] Ashbaugh L L, Malm W C, Sadeh W Z. A residence time probability analysis of sulfur concentrations at grand canyon national park[J]. *Atmospheric Environment* (1967), 1985, **19**(8): 1263-1270.
- [35] Draxler R R, Hess G D. Description of the HYSPLIT_4 modelling system [R]. NOAA Technical Memorandum ERL ARL-224, Silver Spring; NOAA Air Resources Laboratory, 1997.
- [36] Zeng Y, Hopke P K. A study of the sources of acid precipitation in Ontario, Canada [J]. *Atmospheric Environment* (1967), 1989, **23**(7): 1499-1509.
- [37] HJ 817-2018, 环境空气颗粒物 (PM₁₀ 和 PM_{2.5}) 连续自动监测系统运行和质控技术规范[S].
- [38] 张小曳, 徐祥德, 丁一汇, 等. 2013~2017 年气象条件变化对中国重点地区 PM_{2.5} 质量浓度下降的影响[J]. 中国科学: 地球科学, 2020, **50**(4): 483-500.

- Zhang X Y, Xu X D, Ding Y H, *et al.* The impact of meteorological changes from 2013 to 2017 on $PM_{2.5}$ mass reduction in key regions in China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, **62**(12): 1885-1902.
- [39] Vu T V, Shi Z B, Cheng J, *et al.* Assessing the impact of clean air action on air quality trends in Beijing using a machine learning technique[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(17): 11303-11314.
- [40] 汪文雅. 太原市大气混合层厚度变化特征分析[A]. 见: 第33届中国气象学会年会 S12 大气物理学与大气环境[C]. 西安: 中国气象学会, 2016.
- [41] 郝寿昌, 秦爱民, 李旭峰. 山西省天气预报技术手册[M]. 北京: 气象出版社, 2016.
- [42] Tong D Q, Dan M, Wang T, *et al.* Long-term dust climatology in the western United States reconstructed from routine aerosol ground monitoring [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12**: 5189-5205.
- [43] 王小兰, 闫世明, 王雁, 等. 太原市冬季一次霾和沙尘“混合型污染”过程天气成因分析[J]. *气象与环境科学*, 2021, **44**(4): 43-52.
- Wang X L, Yan S M, Wang Y, *et al.* Analysis of the synoptic causes for a haze and dust “Mixed Pollution” process in Taiyuan City in winter[J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2021, **44**(4): 43-52.
- [44] 闫世明, 王雁, 张岳军, 等. 五台山春季气溶胶传输特征[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(2): 497-505.
- Yan S M, Wang Y, Zhang Y J, *et al.* Aerosol transmission characteristics of spring in Wutai mountain [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(2): 497-505.
- [45] 贺冉冉, 朱兰保, 周开胜. 基于时间序列模型残差的中国东部地区空气质量指数(AQI)空间自相关特征分析[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(7): 2459-2467.
- He R R, Zhu L B, Zhou K S. Spatial autocorrelation analysis of air quality index (AQI) in eastern China based on residuals of time series models[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(7): 2459-2467.



CONTENTS

Development Scenarios and Environmental Benefits Analysis of Future Power Generation Industry Under Two Modes in China	LIU Chun-jing, LÜ Jian-yi, ZHAO Wen-chang, <i>et al.</i>	(3375)
Forecasting of Emission Co-reduction of Greenhouse Gases and Pollutants for the Road Transport Sector in Lanzhou Based on the LEAP Model	PANG Ke, ZHANG Qian, MA Cai-yun, <i>et al.</i>	(3386)
Discussion of Air Quality Forecasting Evaluation for Cities Based on Half-level Method	WANG Xiao-yan, ZHU Li-li, XU Rong, <i>et al.</i>	(3396)
Characterization and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} in Xiamen Port	XIAO Si-han, CAI Mei-jun, LI Xiang, <i>et al.</i>	(3404)
Deposition Characteristics of Water-soluble Inorganic Nitrogen and Organic Nitrogen in Atmospheric Precipitation in the Northern Suburbs of Nanjing	ZHANG Jia-ying, YU Xing-na, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i>	(3416)
Analysis of PM _{2.5} Transmission Characteristics in Main Cities of Jinzhong Basin in Winter	WANG Xiao-lan, WANG Yan, YAN Shi-ming, <i>et al.</i>	(3423)
Temporal Evolution and Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in Ordos During Summer and Autumn 2019	KONG Xiang-chen, ZHANG Lian-xia, ZHANG Cai-yun, <i>et al.</i>	(3439)
Characteristics, Sources, and SOAP of VOCs During Winter in Jiyuan	WANG Fang, LI Li-xia, WANG Hong-guo, <i>et al.</i>	(3451)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in August in the Chang-Zhu-Tan Urban Area	LUO Da-tong, ZHANG Qing-mei, LIU Zhan, <i>et al.</i>	(3463)
Ozone Sensitivity Analysis and Control Strategy in Shijiazhuang City in July 2019	ZHU Jia-xian, WANG Xiao-qi, OU Sheng-ju, <i>et al.</i>	(3473)
Spatiotemporal Variation and Influencing Factors of AOD in the North China Plain	GUO Lin, MENG Fei, MA Ming-liang	(3483)
Aerosol Optical Characteristics with Ground-based Measurements via Sun Photometer and Its Relationship with PM Particle Concentration in Chang'an	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, CUI Si-ying, <i>et al.</i>	(3494)
Spatial-temporal Distribution and Evolution Characteristics of Air Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Long-term "Ground-Satellite" Data	WANG Yao-ting, YIN Zhen-ping, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i>	(3508)
Ten-year Trend Analysis of Eutrophication Status and the Related Causes in Lake Hongze	CHEN Tian-yu, LIU Chang-qing, SHI Xiao-li, <i>et al.</i>	(3523)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Phosphorus and Its Driving Factors	YANG Heng, LI Gui-fang, YE Yuan-hang, <i>et al.</i>	(3532)
Characteristics and Differences of Dissolved Oxygen Stratification in Different Tributaries of Three Gorges Reservoir During Impoundment Period	Ji Dao-bin, FANG Jiao, LONG Liang-hong, <i>et al.</i>	(3543)
Dissolved Organic Matter Component and Source Characteristics of the Metropolitan Lakes and Reservoirs in a Typical Karst Region	NI Mao-fei, ZHOU Hui, MA Yong-mei, <i>et al.</i>	(3552)
Characteristics, Sources, and Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Water and Sediment of Luoma Lake	HUANG Jia-hao, WU Wei, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i>	(3562)
Vertical Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community Structure in Qiandao Lake	WANG Ji-yi, HUO Di, GUO Chao-xuan, <i>et al.</i>	(3575)
Chemical Forms and Spatial Distribution of Phosphorus in the Sediment of Sihe River	ZHANG Zi-han, ZHANG Xin-ru, JIA Chuan-xing, <i>et al.</i>	(3587)
Influence of Optimal Land Use Allocation on Phosphorus Loss in the Process of Rainfall and Runoff	ZHOU Hao, CHEN Fang-xin, LUO Yi-feng, <i>et al.</i>	(3597)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Accumulated Heavy Metals in Bioretention Systems	CHU Yang-yang, YANG Long, ZHOU Yuan, <i>et al.</i>	(3608)
Effects of Damming and Impoundment on Planktonic Microbial Community Structure and Interspecific Interaction Patterns in Different Water Depths	WANG Xun, ZHANG Jia-jia, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i>	(3623)
Identification of Bacterial Flora and Metabolic Function of Sediments in Different Channels of Duliujian River Basin, Tianjin	LIU Jia-yuan, FENG Yue, YANG Xue-chun, <i>et al.</i>	(3635)
Spatiotemporal Distribution and Source Apportionment of Suspended Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water	PENG Ke-xing, LI Rui-fei, ZHOU Yi-chen, <i>et al.</i>	(3645)
Spatial Variation and Potential Sources of Microplastics in Rivers in Tongzhou District, Beijing	MEN Cong, LI Di, ZUO Jian-e, <i>et al.</i>	(3656)
Effects of Microplastic Exposure on Crucian Growth, Liver Damage, and Gut Microbiome Composition	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Jin-bo, <i>et al.</i>	(3664)
Influence of Different Types of Dewatering Agents on the Solidification Effect and Physical and Chemical Properties of Sediment	REN Jun, YIN Peng, WANG Wei-zhen, <i>et al.</i>	(3672)
Structural Characteristics of Micro-nano Particle Size Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd ²⁺	MA Wen-yan, PEI Peng-gang, GAO Ge, <i>et al.</i>	(3682)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Different Biochar Types and Its Influencing Factors	LIAN Shen-hai, ZHANG Shu-nan, LIU Feng, <i>et al.</i>	(3692)
Development of Zeolite Loaded Mg-La-Fe Ternary (hydr)oxides for Treatment of Low Concentration Phosphate Wastewater	YIN Xue-jie, SONG Xiao-bao, DING Chen-man, <i>et al.</i>	(3699)
Succession and PICRUSt2-based Predicted Functional Analysis of Microbial Communities During the Sludge Bulking Occurrence and Restoration in One-stage Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	LI Ya-nan, YAN Bing, ZHENG Rui, <i>et al.</i>	(3708)
Aerobic Granulation Stability and Microbial Diversity of Filamentous Bulking Sludge	GAO Chun-di, YANG Xiao-yang, OU Jia-li, <i>et al.</i>	(3718)
Dynamic Variation in Vegetation Cover and Its Influencing Factor Detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, GUO Zhen-dong, <i>et al.</i>	(3730)
Enrichment and Ecological Risk Assessment of Available Phosphorus in Paddy Soil of Fujian Province Over Past 40 years	CHEN Zhong-xing, QIU Long-xia, CHEN Han-yue, <i>et al.</i>	(3741)
Effects of Land Use Change on Constitution, Stability, and C, N, P Stoichiometric Characteristics of Soil Aggregates in Southwest China Karst	HE Yu, SHENG Mao-yin, WANG Ke, <i>et al.</i>	(3752)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment of Mine Soil in Yangtze River Economic Belt	ZHANG Zhe, LU Ran, WU Si-yang, <i>et al.</i>	(3763)
Pollution Characteristics and Phytotoxicity of Heavy Metals in the Soil Around Coal Gangue Accumulation Area	SHANG Yu, SANG Nan	(3773)
Evaluation of Mercury Pollution in Soil of Different Land Use Types in Coal-fired Industrial Area	LI Qiang, YAO Wan-cheng, ZHAO Long, <i>et al.</i>	(3781)
Cadmium Enrichment and Bioavailability of Quaternary Profiles in Nansha District, Guangzhou, China	WANG Fang-ting, BAO Ke, HUANG Chang-sheng, <i>et al.</i>	(3789)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Mountainous Area of Northwest Guizhou Province	XU Meng-qi, YANG Wen-tao, YANG Li-yu, <i>et al.</i>	(3799)
Effect Factors and Model Prediction of Soil Heavy Metal Bioaccessibility	ZHANG Jia-wen, TIAN Biao, LUO Jing-jing, <i>et al.</i>	(3811)
Effect of Organic Material Amendments on Soil Respiration in Tobacco Fields of Central Henan	LU Qi-fei, YE Xie-feng, HAN Jin, <i>et al.</i>	(3825)
Methane Production Potential and Methanogenic Pathways in Paddy Soils Under Different Rice-based Cropping Systems	SHEN Wan-yu, HUANG Qiong, MA Jing, <i>et al.</i>	(3835)
Characteristics and Assembly Process of Reclaimed Soil Microbial Communities in Eastern Plain Mining Areas	MA Jing, DONG Wen-xue, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i>	(3844)
Differences in Bacterial Community Structure in Rhizosphere Soil of Three <i>Caragana</i> Species and Its Driving Factors in a Common Garden Experiment	LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i>	(3854)
Comparison of Bacterial Community Structure and Functional Groups of Paddy Soil Aggregates Between Karst and Non-karst Areas	XIAO Xiao-yi, JIN Zhen-jiang, LENG Meng, <i>et al.</i>	(3865)
Contrasting Responses of the Microbial Community Structure and Functional Traits to Soil pH in Purple Soils	WANG Zhi-hui, JIANG Xian-jun	(3876)
Effects of Agricultural Organic Waste Incorporation on the Metabolic Capacity of Microbial Carbon Sources of Dissolved Organic Matter in Paddy Soil	XIAO Yi, LI Zheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(3884)