DOI:10.26974/j.cnki.XBGC.2026.02.005

基于WHCWT模型的宁夏地区季节性$PM_{2.5}$传输路径及来源分析

艾双双[1]， 杨文良[1*]， 刘晶敏[1]， 康宝荣[2]， 刘焕武[3]， 牟国桃[4]
(1.安徽安光环境科技有限公司,安徽 合肥 230088;2.安徽蓝科信息科技有限公司,安徽 铜陵 244000;
3.西安环境监测站,陕西 西安 710119;4.安徽皖仪科技股份有限公司,安徽 合肥 230061)

摘 要:为识别宁夏地区$PM_{2.5}$协同防控的关键区域及主要贡献源,基于2023年3月至2024年2月宁夏5市(银川市、石嘴山市、吴忠市、中卫市、固原市)$PM_{2.5}$小时质量浓度监测数据、全球资料同化系统(GDAS)气象数据及高分辨率土地覆盖数据,运用混合单粒子拉格朗日积分轨迹模型(HYSPLIT)、加权高度-加权质量浓度权重轨迹分析模型(weighted height-weighted concentration-weighted trajectory,WHCWT)系统解析了宁夏地区季节性$PM_{2.5}$传输路径及来源特征。结果表明,宁夏地区$PM_{2.5}$质量浓度呈现冬春居高、夏秋趋缓的季节性特征,春夏西高、秋冬北高的空间分布特征,以及整体双峰、峰值异质的日变化规律;四季均受4类气流传输路径影响,即西北方向长距离传输路径(新疆—内蒙古/甘肃—宁夏)、西北方向短距离传输路径(内蒙古/甘肃—宁夏)、西北方向绕偏东短距离传输路径(内蒙古/内蒙古与蒙古国边界—宁夏)和东南方向短距离传输路径(陕西—宁夏),其中,西北方向传输路径气流合计占总气流的比例在冬季达峰值(83.69%),在夏季落至低位(56.42%);潜在源贡献呈现季节性分异,春季西北区域贡献突出,冬季东南区域主导;污染源贡献亦具显著季节性分异,春、夏、秋三季内蒙古自治区贡献居首,风沙扬尘源、天然植被源及农业生产源贡献依次递减,冬季陕西省跃升为最大贡献源,天然植被源、农业生产源及城市工业源为主要贡献源。

关键词:$PM_{2.5}$来源;传输路径;WHCWT模型;聚类分析;宁夏地区
中图分类号:X51 **文献标志码:**A

$PM_{2.5}$,即环境空气中空气动力学当量直径≤2.5 μm的颗粒物,也称细颗粒物[1],自2012年被正式纳入国家环境监测项目以来,一直是大气污染防治的关键指标。宁夏地处中国西北部的黄河中上游,地形南北狭长,地势南高北低,西部高差较大,东部起伏较缓;气温的年较差、日较差大,干旱少雨。特殊的地形地势使宁夏除固原市外的其他城市易受$PM_{2.5}$传输影响。此外,宁夏北部和东部工业源分布密集,加之冬季取暖需求量大,导致以$PM_{2.5}$为首要污染物的环境问题尤为突出。

近年来,宁夏持续推进大气污染治理,实施燃煤综合治理、重点行业超低排放改造、老旧车辆淘汰及扬尘精细化管控等多项举措,成效斐然。2020年宁夏全区$PM_{2.5}$平均质量浓度为33 μg/m^3[2],较2015年下降29.8%[3]。如今,$PM_{2.5}$治理步入攻坚深水区,为达到2025年$PM_{2.5}$平均质量浓度比2020年下降10%的目标[4],开展区域协同治理,突出精准、科学治污迫在眉睫。本文基于宁夏地区2023年3月至2024年2月$PM_{2.5}$小时质量浓度资料,对不同季节$PM_{2.5}$的输入路径和来源进行详细分析,旨在明确需要协同的区域和关键贡献源,为$PM_{2.5}$污染防治攻坚提供科学依据。

1 数据来源及方法

1.1 数据来源

$PM_{2.5}$质量浓度数据为石嘴山市、银川市、吴忠

收稿日期:2025-09-15
基金项目:安徽省重点研究与开发计划基金项目(2023t07020009)
作者简介:艾双双(1993—),女,硕士,工程师,主要从事大气环境监测数据分析与研究(ass@ldchina.cn)。
* **通信作者:**杨文良(1992—),男,硕士,工程师,主要从事大气环境监测研究(yangwenliang@ldchina.cn)。
引用格式:艾双双,杨文良,刘晶敏,等.基于WHCWT模型的宁夏地区季节性$PM_{2.5}$传输路径及来源分析[J].西北工程技术学报(中英文),2026,25(2):137-144.

市、中卫市和固原市城市小时观测数据,来源于全国城市空气质量实时发布平台。气象数据来自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)数据集[5]。土地覆盖数据来源于 CLCD(China Land Cover Dataset),该数据集是基于 Landsat 等卫星遥感影像生产的土地覆盖分类产品。数据时间跨度为 2023 年 3 月至 2024 年 2 月,季节划分按气象学标准实施,具体为春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)、冬季(12 月至次年 2 月)。

1.2 分析方法

1.2.1 HYSPLIT 模型 HYSPLIT 模型(hybrid single particle lagrangian integrated trajectory model)由美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration,NOAA)空气资源实验室与澳大利亚气象局联合研发,是一款融合拉格朗日和欧拉方法的大气传输和扩散模型,可用于计算大气污染物的输送、扩散、化学转化和沉降过程,其核心在于计算空气中的粒子运动轨迹,具体原理详见文献[6]。在本研究中,以城市近地面 500 m 低空作为气流传输终点,基于 HYSPLIT 模型计算观测期间逐小时 48 h 后向轨迹,所得结果作为 WHCWT(weighted height-weighted concentration-weighted trajectory)模型的输入数据。

1.2.2 WHCWT 模型 质量浓度权重轨迹分析(concentration-weighted trajectory,CWT)是一种用于评估不同源区对受体点污染物质量浓度贡献的模型,该模型主要考量气团质点所在经纬度网格以及轨迹到达目标点时的污染程度。为了使分析结果更接近真实情况,基于 CWT 模型对 WHCWT 模型进行改进,其核心为耦合飞行高度参数,通过综合考虑垂直层的污染可信度,优化对目标区域的贡献评估。

依据公式(1)计算每个网格(i,j)的质量浓度平均值,即

$$\mathrm{CWT}_{ij}=\frac{1}{\sum_{l=1}^{M}\tau_{ijl}}\sum_{l}^{M}C_l\tau_{ijl}。\tag{1}$$

式中:CWT_{ij}为网格(i,j)的平均加权质量浓度,μg/m^3;l 为轨迹;M 为轨迹总数;C_l为轨迹 l 对应的质量浓度,μg/m^3;τ_{ijl}为轨迹 l 在网格(i,j)上经过的时间,h。

为降低条件概率分析和气团不同高度污染程度带来的误差,引入权重函数 W_{ij}和质点高度权重系数 H_{ij}计算加权质量浓度(WHCWT$_{ij}$)。即

$$\mathrm{WHCWT}_{ij}=W_{ij}\times H_{ij}\times\mathrm{CWT}_{ij}。\tag{2}$$

式中,W_{ij}参考相关研究中的定义[7-13],引入网格自适应调整功能,确定宁夏地区参数。则有

$$W_{ij}=\begin{cases}1.0, & n_{ij}\geqslant 3\times n_{\mathrm{avg}},\\ 0.75, & n_{ij}\geqslant 2\times n_{\mathrm{avg}},\\ 0.5, & n_{ij}\geqslant 1\times n_{\mathrm{avg}},\\ 0.25, & n_{ij}\geqslant 0.25\times n_{\mathrm{avg}},\\ 0.05, & n_{ij}\geqslant 0.05\times n_{\mathrm{avg}},\end{cases}\tag{3}$$

$$H_{ij}=1-\frac{h_{ij}-h_{\min}}{h_{\max}-h_{\min}}。\tag{4}$$

式中:h_{ij}为每个气团质点的高度,m;$h_{\min}$为所有质点的最小高度,m;$h_{\max}$为所有气团质点的最大高度,m。

1.2.3 源识别方法 识别网格区域中污染源贡献度,能够为大气污染防治工作提供更具针对性的指导。相关学者[14]曾采用植被影响系数、中国土地覆盖权重系数等方法识别污染来源。因土地覆盖数据能解析出更多的源类,故本研究选取中国土地覆盖权重系数,以确定污染源对目标区域的贡献。即有

$$\text{农业生产源}=\mathrm{agr}_{ij}\times\mathrm{WHCWT}_{ij},\tag{5}$$

$$\text{城市工业源}=\mathrm{city}_{ij}\times\mathrm{WHCWT}_{ij},\tag{6}$$

$$\text{天然植被源}=\mathrm{bio}_{ij}\times\mathrm{WHCWT}_{ij},\tag{7}$$

$$\text{风沙扬尘源}=\mathrm{dust}_{ij}\times\mathrm{WHCWT}_{ij}。\tag{8}$$

agr_{ij},city_{ij},bio_{ij},dust_{ij}计算公式分别为

$$\mathrm{agr}_{ij}=\frac{\mathrm{cropland}_{ij}}{S_{ij}},\tag{9}$$

$$\mathrm{city}_{ij}=\frac{\mathrm{impervious}_{ij}}{S_{ij}},\tag{10}$$

$$\mathrm{bio}_{ij}=\frac{\mathrm{foreset}_{ij}+\mathrm{shrub}_{ij}+\mathrm{grassland}_{ij}}{S_{ij}},\tag{11}$$

$$\mathrm{dust}_{ij}=\frac{\mathrm{barren}_{ij}}{S_{ij}}。\tag{12}$$

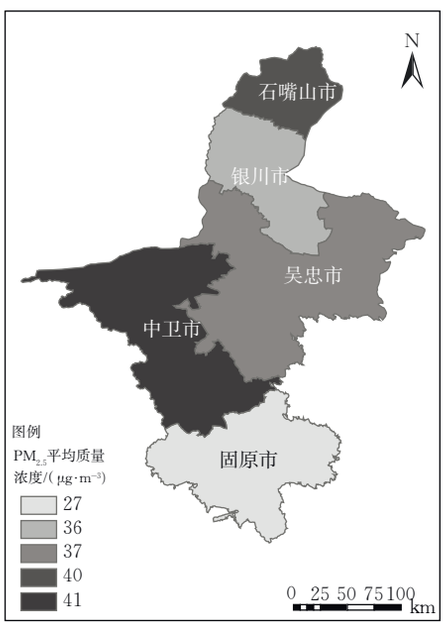
式中:agr_{ij}为网格农业生产源的权重系数;$\mathrm{cropland}_{ij}$为网格内农田面积;city_{ij}为网格城市工业源的权重系数;$\mathrm{impervious}_{ij}$为网格内不透水表面面积;bio_{ij}为网格天然植被源的权重系数;$\mathrm{foreset}_{ij}$,shrub_{ij},$\mathrm{grassland}_{ij}$分别为网格内森林、灌木、草地面积;barren_{ij}为网格风沙扬尘源的权重系数;barren_{ij}为网格内荒地面积;S_{ij}为网格总面积。

2 结果与分析

2.1 污染特征分析

2.1.1 年分布特征 宁夏五市 $PM_{2.5}$年平均质量浓

度空间分布如图 1 所示。五市按 $PM_{2.5}$ 平均质量浓度值递减排序,依次为中卫市(41 μg/m³)、石嘴山市(40 μg/m³)、吴忠市(37 μg/m³)、银川市(36 μg/m³)、固原市(27 μg/m³);$PM_{2.5}$ 平均质量浓度呈西北偏高,中部居次,南部偏低的地域特征。横向对比全国主要城市,宁夏五市整体 $PM_{2.5}$ 污染水平仍处于较高区间,其中,中卫市和石嘴山市尤为突出,$PM_{2.5}$ 质量浓度明显高于全国平均水平,凸显沿黄流域及工业集聚地带面临的环境治理挑战依然严峻。

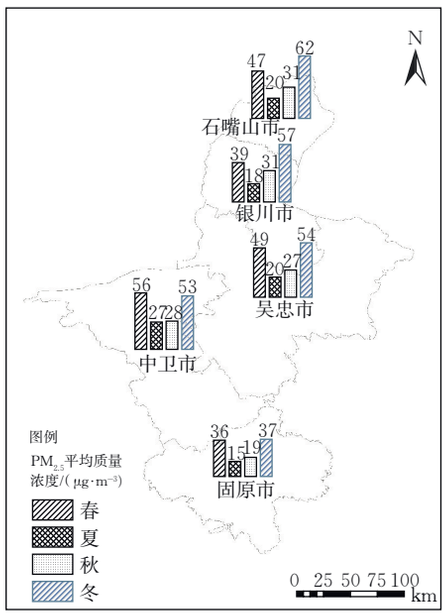


注:底图来源于国家地理信息公共服务平台与宁夏回族自治区自然资源厅,审图号为GS(2025)1508号。

图1　宁夏五市$PM_{2.5}$年平均质量浓度空间分布图

Fig. 1　Spatial pattern of annual average $PM_{2.5}$ concentrations in five cities of Ningxia

2.1.2　季分布特征　研究表明,宁夏五市 $PM_{2.5}$ 季平均质量浓度在时空维度上呈现显著分异规律(图 2)。时间维度上,五市 $PM_{2.5}$ 季平均质量浓度呈现鲜明的波动特征:冬季均值居于峰值,达 52.6 μg/m³;春季次之,为 45.4 μg/m³;夏秋两季则处于相对低位,分别为 20 μg/m³和 27.2 μg/m³。空间格局方面,春夏两季呈现西部 $PM_{2.5}$ 平均质量浓度偏高的态势。春季,中卫市 $PM_{2.5}$ 平均质量浓度达 56 μg/m³,位列五市之首,较吴忠市(49 μg/m³)、石嘴山市(47 μg/m³)、银川市(39 μg/m³)和固原市(36 μg/m³)高出 7~20 μg/m³;夏季,中卫市 $PM_{2.5}$ 平均质量浓度为 27 μg/m³,依旧高于吴忠市与石嘴山市(均为 20 μg/m³)、银川市(18 μg/m³)、固原市(15 μg/m³),差值为 7~12 μg/m³。秋冬季节,高值区发生转移,北部成为污染重心。秋季,石嘴山市与银川市 $PM_{2.5}$ 平均质量浓度均为 31 μg/m³,较中卫市(28 μg/m³)、吴忠市(27 μg/m³)和固原市(19 μg/m³)高出 3~12 μg/m³;冬季,石嘴山市 $PM_{2.5}$ 平均质量浓度峰值达到 62 μg/m³,显著高于银川市(57 μg/m³)、吴忠市(54 μg/m³)、中卫市(53 μg/m³)和固原市(37 μg/m³),落差介于 5~25 μg/m³。



注:底图来源于国家地理信息公共服务平台与宁夏回族自治区自然资源厅,审图号为GS(2025)1508号。

图2　宁夏五市$PM_{2.5}$季平均质量浓度空间分布图

Fig. 2　Spatial pattern of seasonal average $PM_{2.5}$ concentrations in five cities of Ningxia

综上所述,宁夏地区 $PM_{2.5}$ 质量浓度呈现冬春居高、夏秋趋缓的时序节律,以及春夏西高、秋冬北高的空间异质性特征。

2.1.3　月变化特征　宁夏五市 $PM_{2.5}$ 月平均质量浓度呈现典型的双峰型波动特征(图 3)。监测数据表明,冬、春两季为污染高值期。冬季高值集中于 12 月至翌年 2 月,2024 年 2 月除固原市外,其余四市 $PM_{2.5}$ 月平均质量浓度均超过 50 μg/m³,这一现象与北方采暖期能源消耗攀升、边界层降低所致大气扩散能力削弱密切相关。春季污染次高峰出现于 3—

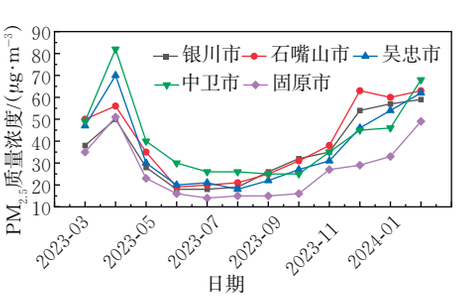


图3　宁夏五市$PM_{2.5}$月平均质量浓度变化图

Fig. 3　Monthly mean $PM_{2.5}$ concentration trends in five cities of Ningxia

4 月,2023 年 4 月中卫市 $PM_{2.5}$ 月平均质量浓度攀升至 82 μg/m³主要归因于沙尘天气频发与本地污染源叠加。相较之下,夏、秋季节(6—10 月)在大气扩散条件改善与降水湿清除效应的共同作用下,$PM_{2.5}$ 月平均质量浓度整体处于低位,形成显著的污染谷期。

五市 $PM_{2.5}$ 月平均质量浓度南北分异并非恒定,而是呈现显著的季节性动态。冬季差异趋于极化:不利气象条件下,北部城市因工业聚集与供暖排放双重驱动,污染累积效应凸显,南北 $PM_{2.5}$ 月平均质量浓度梯度由此达到峰值,2024 年 12 月石嘴山市与固原市 $PM_{2.5}$ 月平均质量浓度差值达 34 μg/m³。夏季差异显著收敛:大气扩散条件转优之际,区域背景质量浓度趋于一致,五市间 $PM_{2.5}$ 月平均质量浓度落差明显收窄。此外,五市 $PM_{2.5}$ 月平均质量浓度变化曲线表现出高度协同性,重污染月份尤为突出。这一趋势表明,除本地排放贡献外,区域性传输已成为影响宁夏空气质量变化的关键机制。

2.1.4 日变化特征 图 4 为宁夏五市 $PM_{2.5}$ 日小时平均质量浓度变化曲线,揭示了质量浓度日变化及空间特征,即整体呈现双峰结构、北高南低、峰值异质的复合特征。时间维度上,五市 $PM_{2.5}$ 日小时平均质量浓度普遍呈现夜间至清晨(20:00 至次日 8:00)和上午时段(9:00—12:00)的双峰格局,午后(15:00—18:00)落入谷值,这一“双峰一谷”形态与人类活动节奏及边界层昼夜演变高度耦合。空间维度上,各市呈现显著差异:中卫市日间 $PM_{2.5}$ 日小时平均质量浓度明显抬升,10:00 前后出现异常高值(49 μg/m³),结合月度数据研判,该现象与沙尘传输过程密切相关;石嘴山市 $PM_{2.5}$ 日小时平均质量浓度则全天维持高位基线,折射出其作为工业城市,连续性工业排放对空气质量的主导性影响;银川市与吴忠市 $PM_{2.5}$ 日小时质量浓度曲线形态趋同、数值接近,既体现了城市生活源与交通源的典型特征,也佐证了相邻城市间存在显著的区域传输效应;固原市全天 $PM_{2.5}$ 日小时平均质量浓度始终处于低位且波动平缓,进一步印证其优良的环境本底条件。

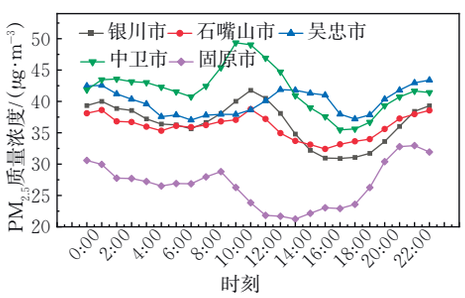


图 4 宁夏五市 $PM_{2.5}$ 日小时平均质量浓度变化图

Fig. 4 Temporal evolution of hourly $PM_{2.5}$ concentrations in five cities of Ningxia

上述日变化特征揭示了不同城市污染成因的异质性。中卫市、石嘴山市等西北部城市受沙尘过程与工业源驱动,表现为峰值突出或基线偏高;银川市、吴忠市等中部城市则更多呈现交通与生活排放的典型双峰特征;固原市人为源影响最弱。未来精细化管控应基于城市排放特征的日变化规律,推行因城因时施策的差异化调控策略,针对北部城市需重点强化上午及夜间等污染累积关键时段的干预力度,以提升减排措施的时效性与精准性。

2.2 污染传输路径分析

宁夏地区各季度 48 h 后向轨迹聚类结果见图 5,其中,上层展示轨迹传输的经纬度演变,下层呈现传输过程中的高度变化,0:00 为轨迹终点。分析表明,该区域存在 4 类典型气流传输路径。

(1)西北方向长距离传输路径(新疆—内蒙古/甘肃—宁夏)。该路径传输气流占总气流的比例呈逐季递增态势:春季为 23.20%,夏季为 24.75%,秋季为 41.40%,冬季为 58.06%。气流起始高度季节性分异显著:春季约为 3 100 m,夏季约为 2 400 m,秋冬季降至约 1 900 m,秋冬季气流起始高度明显低于春夏两季。

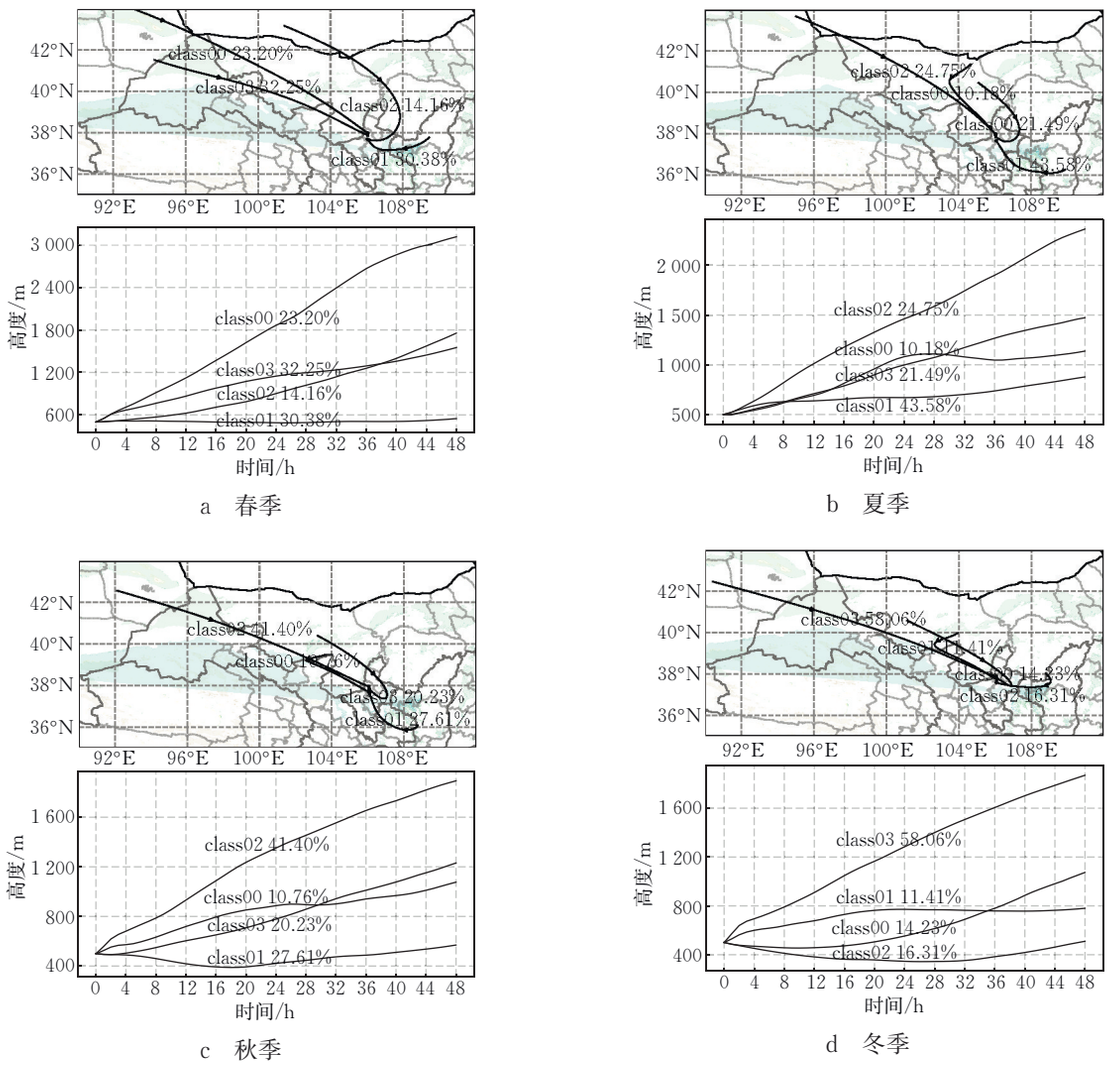
(2)西北方向短距离传输路径(内蒙古/甘肃—宁夏)。该路径传输气流占总气流的比例以春季居高,为 32.25%,夏、秋、冬季骤降至 10.18%、10.76%、11.41%;气流起始高度春季约为 1 550 m,夏季约为 1 100 m,秋冬季稳定在 800~1 100 m,冬季处于全年最低位。

(3)西北方向绕偏东短距离传输路径(内蒙古/内蒙古与蒙古国边界—宁夏)。该路径传输气流占总气流的比例以夏季最高,为 21.49%,春季为 14.16%,秋季为 20.23%,冬季为 14.23%;气流起始高度随着季节递减,春季约为 1 700 m,夏季约为 1 500 m,秋冬季降至 1 100~1 250 m。

(4)东南方向短距离传输路径(陕西—宁夏)。该路径传输气流占总气流的比例以夏季最高,为 43.58%,春、秋、冬三季分别为 30.38%、27.61%、16.31%;气流起始高度四季均处于低位,春季约为 550 m,夏季约为 900 m,秋冬季约为 500~600 m,冬季为全年最低。

综上,宁夏地区各季度主要受上述 4 类轨迹影

响,其中,西北方向传输路径(含长、短及绕偏东路径)气流合计占总气流的比例以夏季最低(56.42%),以冬季最高(83.69%),长路径气流独占58.06%;东南方向传输路径气流则以夏季占据主导(43.58%)。气流起始高度呈现显著季节异质性,冬季整体处于低位(普遍低于 1 000 m),春季或夏季达峰(长路径的气流起始高度最高至 3 100 m),与区域大气边界层高度的演变趋势吻合。



注:底图来源于国家地理信息公共服务平台与宁夏回族自治区自然资源厅,审图号为GS(2025)1508号。

图5　宁夏地区各季度48 h后向轨迹聚类图

Fig. 5　Clustered 48 h backward trajectories by seasonal in the Ningxia region

2.3　潜在来源分析

基于加权高度-加权质量浓度权重轨迹分析模型(WHCWT)的潜在源区识别结果(图 6),发现宁夏地区 $PM_{2.5}$ 质量浓度受区域传输影响的季节性分异显著,与 2.1 中污染特征分析结论相吻合。

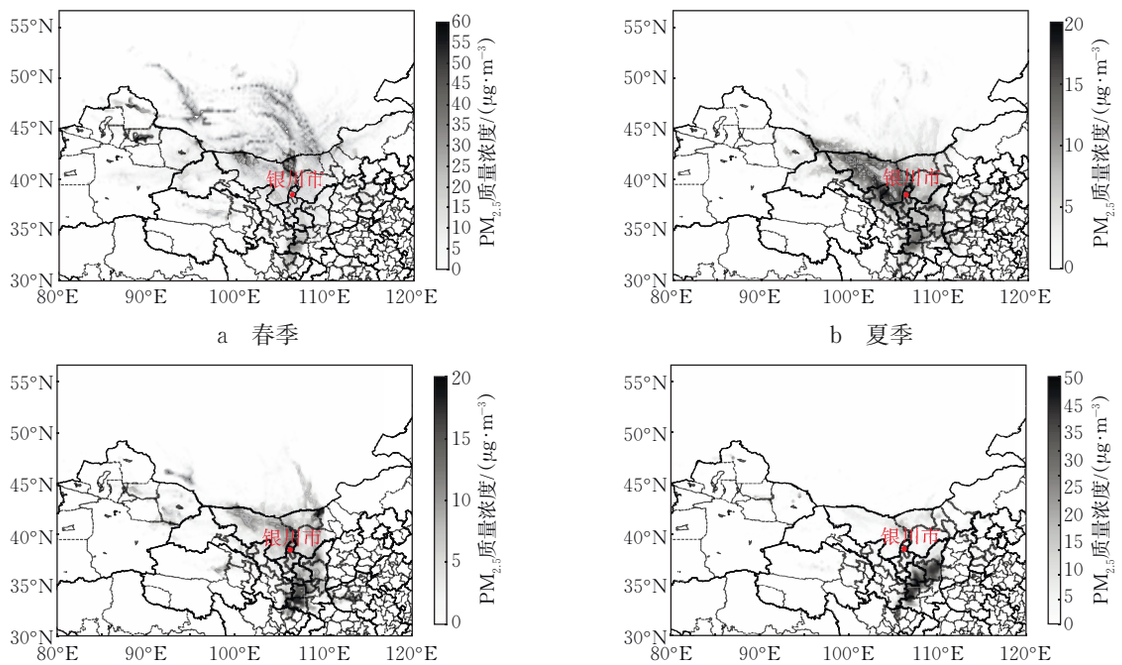
春季,西北方向潜在源的贡献尤为突出,结合48 h后向轨迹聚类分析结果(图 5a),发现该时段西北气团飞行高度居全年之首,移速较快,主要受西伯利亚高压影响[15],区域内盛行强风天气。此外,西北方向沙源地分布密集(宁夏地区自西侧、北侧至东侧被腾格里沙漠、乌兰布和沙漠及毛乌素沙地环绕,西北方向分布有巴丹吉林沙漠)[16],表明春季 $PM_{2.5}$ 质量浓度主要受西北路径沙尘传输主导[17-19]。

冬季,东南方向潜在源区的影响显著增强。由48 h后向轨迹聚类分析可知(图 5d),此时段东南方向气团飞行高度全年最低,契合污染气团水平传输特征,且传输距离短,扩散条件整体不利。陕西省隶属农业、工业大省,冬季环境空气质量差[20],在该气流条件下极易导致污染物向宁夏地区缓慢输送,从而推高宁夏地区 $PM_{2.5}$ 质量浓度水平。

2.4　污染源贡献分析

基于宁夏地区各季度区域及污染源贡献解析结

果(图 7),不同季节 $PM_{2.5}$ 质量浓度的主要贡献源呈现显著分异。春、夏、秋三季,内蒙古均为首要贡献区域,对宁夏地区贡献占周边省份总贡献的比例分别为 44.98%、49.46%、40.86%。其中,风沙扬尘居主导作用,贡献率波动于 26.41%~33.27%;天然植被源与农业生产源次之,贡献率分布于 8.97%~14.63% 和 2.62%~4.16%。冬季,陕西省跃升为最大贡献区域,对宁夏地区贡献占周边省份总贡献的比例达 38.97%。主要影响源涵盖天然植被源(21.23%)、农业生产源(12.07%)及城市工业源



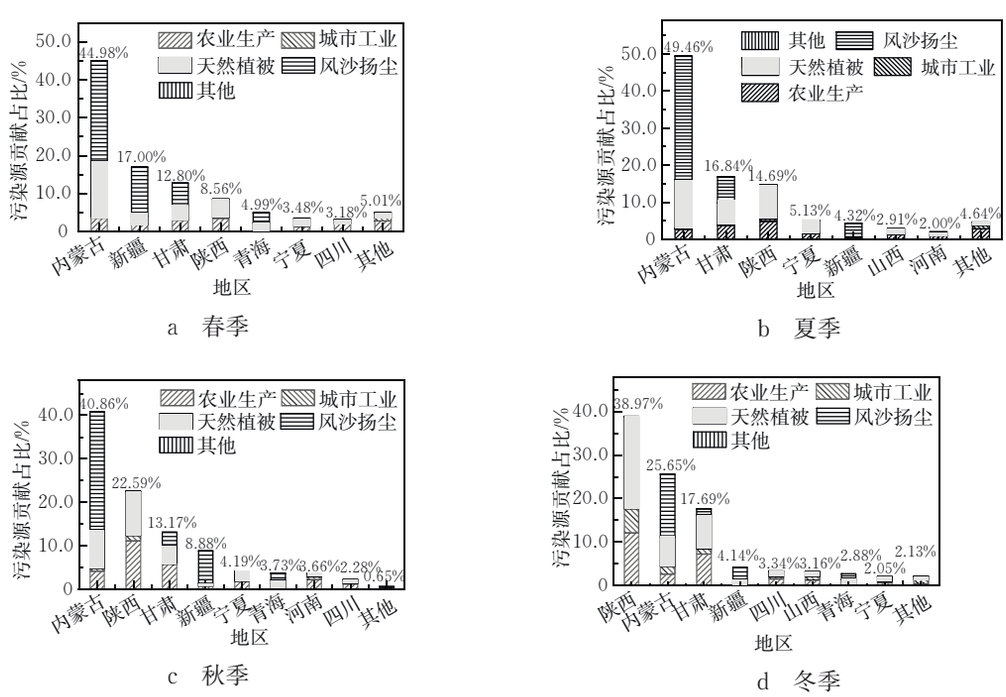
a 春季 b 夏季

c 秋季 d 冬季

注:底图来源于国家地理信息公开服务平台与宁夏回族自治区自然资源厅,审图号为GS(2025)1508号。

图6 宁夏地区各季度 $PM_{2.5}$ 潜在源分布图

Fig. 6 Spatial distribution of seasonal $PM2_{.5}$ potential sources in the Ningxia region



a 春季 b 夏季

c 秋季 d 冬季

图7 周边省份不同污染源对宁夏地区各季度 $PM_{2.5}$ 的贡献

Fig. 7 Contributions of provincial pollution sources to seasonal $PM_{2.5}$ concentrations in Ningxia region

(5.58%),其中,城市工业源排放因冬季取暖需求激增而凸显。

3　结论

通过对宁夏地区季节性 $PM_{2.5}$ 传输路径及来源的研究,得到如下 4 点主要结论。

(1)时空分异特征显著。时间维度上,五市 $PM_{2.5}$ 年均质量浓度均高于全国多数城市,中卫市与石嘴山市尤为突出;$PM_{2.5}$ 质量浓度演变呈现冬春居高、夏秋趋缓的季节节律,以及整体双峰、峰值异质的日变化特征。空间维度上,$PM_{2.5}$ 质量浓度总体呈西北偏高,中部次高,南部偏低态势;春夏季西部 $PM_{2.5}$ 质量浓度抬升,秋冬季北部污染凸显。

(2)气流传输路径季节性更替。宁夏地区四季主要受 4 类轨迹影响:西北方向长距离传输路径(新疆—内蒙古/甘肃—宁夏)、西北方向短距离传输路径(内蒙古/甘肃—宁夏)、西北方向绕偏东短距离传输路径(内蒙古/内蒙古与蒙古国边界—宁夏)和东南方向短距离传输路径(陕西—宁夏),其中,西北方向传输路径气流合计占总气流的比例在冬季达到峰值(83.69%),夏季则落至低位(56.42%)。气流起始高度呈冬低夏高的特征,冬季普遍低于 1 000 m,春夏季可达 3 000 m 左右。

(3)潜在源区贡献季节性分异。宁夏地区 $PM_{2.5}$ 潜在源区存在显著季节性分异,春季和冬季平均加权质量浓度分布较高,但主导方向截然相反——春季西北方向区域潜在源贡献突出,冬季则转为东南方向区域主导。

(4)污染源贡献季节性分异。春、夏、秋三季,内蒙古为主要污染贡献区域,对宁夏地区贡献占周边省总贡献的比例大于 40%,风沙扬尘源、天然植被源及农业生产源影响依次递减,扬尘源影响居首;冬季,陕西省跃升为最大贡献区域,对宁夏地区贡献占周边省份总贡献的比例达 38.97%,天然植被源、农业生产源及城市工业源为主要贡献源。

参考文献:

[1] GB 3095—2012 环境空气质量标准[S].

[2] 宁夏回族自治区生态环境厅. 2020年宁夏回族自治区环境状况公报[R/OL]. 2021-05-31. https://sthjt.nx.gov.cn/hjzl/hjzkgb/202105/t20210531_3633768.html.

[3] 宁夏回族自治区生态环境厅. 2015年宁夏回族自治区环境状况公报[R/OL]. 2016-05-05. https://sthjt.nx.gov.cn/hjzl/hjzkgb/201605/t20160505_3633777.html.

[4] 国务院. 国务院关于印发《空气质量持续改善行动计划》的通知[EB/OL]. (2023-12-07)[2025-06-10]. https://www.gov.cn/zhengce/content/202312/content_6919000.htm.

[5] NCEP. Global Data Assimilation System [DS/OL]. National Centers for Environmental Prediction (2017)[2017-11-20]. ftp://arlftp.arlbq.noaa.gov/pub/archives/gdasl.

[6] Draxler R R, Hess G D. An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories, dispersion and deposition [J]. Australian Meteorological Magazine, 1998, 47(4): 295-308.

[7] Polissar A V, Hopke P K, Paatero P, et al. The aerosol at Barrow, Alaska: Long-term trends and source locations[J]. Atmospheric Environment, 1999, 33(16): 2441-2458.

[8] Hsu Y K, Holsen T M, Hopke P K. Comparison of hybrid receptor models to locate PCB sources in Chicago [J]. Atmospheric Environment, 2003, 37(4): 545-562.

[9] Zhang F, Zhou L X, Novelli P C, et al. Evaluation of *in situ* measurements of atmospheric carbon monoxide at Mount Waliguan, China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, 11(11): 5195-5206.

[10] 王帅, 冯亚平, 崔建升, 等. 石家庄市臭氧污染的时空演变格局和潜在源区[J]. 环境科学学报, 2020, 40(9): 3081-3092.

[11] 雷雨, 张小玲, 康平, 等. 川南自贡市大气颗粒物污染特征及传输路径与潜在源分析[J]. 环境科学, 2020, 41(7): 3021-3030.

[12] 翁佳烽, 梁晓媛, 邓开强, 等. 不同季节肇庆市$PM_{2.5}$和O_3污染特征及潜在源区分析[J]. 环境科学研究, 2021, 34(6): 1306-1317.

[13] 段时光, 姜楠, 杨留明, 等. 郑州市冬季大气$PM_{2.5}$传输路径和潜在源分析[J]. 环境科学, 2019, 40(1): 86-93.

[14] 曹宁, 刘诗云, 刘文雯, 等. 识别人为源与天然源贡献浓度的方法与装置: CN118115179B[P]. 2024-05-14.

[15] 孙莹, 单璐璐, 徐金秀. 沙尘暴天气下大气颗粒物污染特征及传输路径研究[J]. 环境科学与管理, 2022, 47(6): 50-55.

[16] 袁瑞瑞, 王建英, 张卫红, 等. 不同路径冷空气导致的宁夏沙尘重污染天气特征及传输规律[J]. 中国沙漠, 2024, 44(1): 209-217.

[17] 罗达通. 典型沙尘多发地银川市$PM_{2.5}$污染特征及来源分析[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2015: 47-50.

[18] 王伟, 白娟. 基于银川市大气颗粒物组分网观测的夏

季沙尘污染过程分析[J]. 宁夏工程技术, 2020, 19(2): 97-102.
[19] 朱媛媛, 高愈霄, 柴文轩, 等. 京津冀及周边区域$PM_{2.5}$叠加沙尘重污染过程特征及预报效果分析[J]. 环境科学, 2020, 41(2): 574-586.
[20] 张丽萍, 王旭峰, 何映月, 等. 基于多源数据的陕西省$PM_{2.5}$时空分布特征及成因分析[J]. 环境科学学报, 2023, 43(6): 94-109.

Analysis of Seasonal $PM_{2.5}$ Transport Pathways and Sources in the Ningxia Region Based on the WHCWT Model

AI Shuangshuang[1], *YANG Wenliang*[1*], *LIU Jingmin*[1], *KANG Baorong*[2], *LIU Huanwu*[3], *MOU Goutao*[4]

(1. Anhui Anguang Environmental Technology Co., Ltd., Hefei 230088, China;
2. Anhui Lanke Information Technology Co., Ltd., Tongling 244000, China;
3. Xi'an Environmental Monitoring Station, Xi'an 710119, China;
4. Anhui Wanyi Technology Co., Ltd., Hefei 230061, China)

Abstract: To identify the key areas and primary contributing sources for the collaborative control of $PM_{2.5}$ in Ningxia, based on hourly $PM_{2.5}$ mass concentration monitoring data from five cities in Ningxia (Yinchuan City, Shizuishan City, Wuzhong City, Zhongwei City, and Guyuan City) from March 2023 to February 2024, Global Data Assimilation System (GDAS) meteorological data, and high-resolution land cover data, the Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) model and the Weighted Height-Weighted Concentration-Weighted Trajectory (WHCWT) model were used to systematically analyze the seasonal transport pathways and source characteristics of $PM_{2.5}$ in Ningxia. The results indicate that $PM_{2.5}$ mass concentration in Ningxia exhibits distinct seasonal patterns, with higher levels in winter and spring, and lower levels in summer and autumn. Spatially, concentrations were higher in the west during spring and summer and in the north during autumn and winter. Temporally, an overall bimodal and heterogeneous daily variation pattern was observed. The seasonal transport pathways are influenced by four types of airflow patterns, namely long-distance transport from the northwest (Xinjiang-Inner Mongolia/Gansu-Ningxia), short-distance transport from the northwest (Inner Mongolia/Gansu-Ningxia), short-distance transport from the northwest with an eastern detour (Inner Mongolia/Inner Mongolia-Mongolia border-Ningxia), and short-distance transport from the southeast (Shaanxi-Ningxia). Among these, the proportion of airflow from the northwest transport pathway peaked in winter (83.69%) and fell to a low in summer (56.42%). The potential source contributions showed seasonal differentiation, with significant contributions from the northwest in spring and dominance of the southeast in winter. The pollution source contributions also exhibited notable seasonal differentiation, with Inner Mongolia being the largest contributor in spring, summer, and autumn, while wind-blown dust sources, natural vegetation sources, and agricultural production sources contributed in decreasing order. In winter, Shaanxi Province became the largest contributor, with natural vegetation sources, agricultural production sources, and urban industrial sources as the main contributors.

Keywords: $PM_{2.5}$ sources; transport pathways; WHCWT model; cluster analysis; Ningxia region

(责任编辑 李 琼)