

# 麦盖提县大气颗粒物污染特征及潜在源区分析

吾麦尔艾力·巴拉提, 热孜瓦古·孜比布拉\*, 何娟娟, 许妍

喀什地区气象局, 新疆 喀什

收稿日期: 2026年2月15日; 录用日期: 2026年3月13日; 发布日期: 2026年3月23日

## 摘要

基于全球同化系统(GDAS)数据及2018~2024年麦盖提县环境监测站逐小时颗粒物浓度数据等多源资料,运用大气团后轨迹聚类分析、潜在源贡献因子法(PSFC)和浓度权重轨迹法(CWT)等方法,分析麦盖提县颗粒物浓度的时空变化特征及不同季节外源污染物传输的路径及潜在源区。结果表明:(1)麦盖提县PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>污染天数分别为132 d和925 d,年均浓度依次为81.2  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和271.1  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,按季节变化来看,不同季节、不同输送路径对麦盖提县PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>污染物影响的差异显著,PM<sub>2.5</sub>浓度表现为春季 > 冬季 > 秋季 > 夏季,PM<sub>10</sub>浓度表现为春季 > 秋季 > 冬季 > 夏季。(2)麦盖提县全年,东北方向输送的气流对应的PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>浓度最大,轨迹占比为25.7%,轨迹途径区域分别为巴楚县和墨玉县等;其次是麦盖提本区域内气流对应的PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>浓度,轨迹占比为59.4%,移动速度较慢;西北方向输送气流对应的PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>浓度相对较低,轨迹占比为14.9%,且其输送距离最远,轨迹途径区域分别为乌恰县-疏附县-岳普湖县-麦盖提县。(3)麦盖提县颗粒物春季PSFC值和CWT值最大,夏季最小。PSFC和CWT值高值区分布在阿克苏-巴楚县-麦盖提县-墨玉县呈带状区域。(4)由随机森林模型结果表明,PM<sub>2.5</sub>受气温和湿度的影响比较大,PM<sub>10</sub>受到风速和温度的影响比较大。

## 关键词

颗粒物污染, 后向轨迹分析, 聚类分析, 潜在源区贡献, 浓度权重轨迹法

# Analysis of Atmospheric Particulate Matter Pollution Characteristics and Potential Source Regions in Magaiti County

Wumaieraili Balati, Reziwagu Zibibula\*, Juanjuan He, Yan Xu

Kashgar Meteorological Bureau, Kashgar Xinjiang

Received: February 15, 2026; accepted: March 13, 2026; published: March 23, 2026

\*通讯作者。

文章引用: 吾麦尔艾力·巴拉提, 热孜瓦古·孜比布拉, 何娟娟, 许妍. 麦盖提县大气颗粒物污染特征及潜在源区分析[J]. 气候变化研究快报, 2026, 15(2): 460-471. DOI: 10.12677/ccrl.2026.152051

## Abstract

Based on multi-source data such as Global Data Assimilation System (GDAS) data, ERA5 reanalysis data, and hourly particulate matter concentration data from the environmental monitoring station in Maigaiti County from 2018 to 2024, methods such as air mass back-trajectory cluster analysis, Potential Source Contribution Function (PSCF), and Concentration Weighted Trajectory (CWT) were used to analyze the temporal and spatial variation characteristics of particulate matter concentrations in Maigaiti County, as well as the transport paths and potential source areas of exogenous pollutants in different seasons. The results show that: (1) In Maigaiti County, the number of days with PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> pollution was 132 and 925, respectively, with corresponding average annual concentrations of 81.2  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  and 271.1  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . Seasonally, the influence of different seasons and transport pathways on these pollutants varied significantly. PM<sub>2.5</sub> concentrations followed the order of spring > winter > autumn > summer, while PM<sub>10</sub> concentrations followed spring > autumn > winter > summer. (2) Annually, the highest PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> concentrations in Maigaiti County were associated with airflows from the northeast, which accounted for 25.7% of the trajectories and passed through areas such as Bachu and Moyu counties. Local airflows within Maigaiti contributed the second-highest concentrations, characterized by slower movement and comprising the majority (59.4%) of trajectories. Notably, airflows from the northwest, despite having the longest transport distance and passing through Wuqia, Shufu, and Yuepuhu counties, corresponded to relatively lower PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> levels, representing only 14.9% of the total trajectories. (3) The PSCF and CWT values of particulate matter in Maigaiti County are the largest in winter and the smallest in summer. The high-value areas of PSCF and CWT values are distributed in a strip-shaped area from Aksu to Bachu County, Maigaiti County, and Moyu County. (4) The results of the random forest model show that PM<sub>2.5</sub> is more affected by air temperature and humidity, and PM<sub>10</sub> is more affected by wind speed and temperature.

## Keywords

Particulate Matter Pollution, Backward Trajectory Analysis, Cluster Analysis, Potential Source Area Contribution, Concentration Weighted Trajectory Method

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在全球城市化与工业化加速推进的背景下，大气污染物的跨境传输效应已成为环境科学领域的前沿议题。其中，PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>因其微米级粒径特征，能够通过大气环流实现跨区域迁移，形成“局地排放-区域传输-全域影响”的污染链，对生态系统和公共健康构成双重威胁[1][2]。近年来，不少科研工作者针对不同区域大气污染和雾霾做了大量研究，项佳娥等[3]研究发现PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>浓度变化不仅仅受一些气象因素的影响，还受人类城市建设、汽车排放和土地开发利用等人为活动影响。康盼茹等[4]-[10]的研究也指出，PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>的浓度变化主要受制于气象条件和人为活动的双重影响，呈现出显著的时空变异性。陆忠奇等[11][12]基于HYSPLIT模型，结合聚类分析、PSCF、CWT等方法对库尔勒市颗粒物研究，结果表明其气流输送路径以西风气流为主，吐鲁番盆地的东灌气流次之。塔里木盆地作为库尔勒市颗粒物的主要贡献源区，其贡献水平呈现显著的季节差异-春、冬季颗粒物浓度贡献较高，夏、秋季则

相对较低。然而，现有研究多局限于单一城市的短周期分析，对干旱区特殊生态区长时间序列的系统监测及连续数据积累较为匮乏。该研究短板不仅显著制约了跨境颗粒物污染联防联控策略的科学化、精准化制定，更难以支撑区域大气环境质量协同提升的实践诉求。

麦盖提位于新疆地区西南部，毗邻塔里木盆地，坐落于塔克拉玛干沙漠边缘，地跨 77°28'E~79°05'E、38°25'N~39°22'N，面积约  $1 \times 10^5 \text{ m}^2$ ，平均海拔 1180 m 左右。该地植被覆盖率较低，生态环境极为脆弱。同时，作为“丝绸之路”刀郎文化的核心区域，麦盖提县的空气质量不仅直接关系到当地的交通安全、旅游业发展，更与社会公众的日常生活和身体健康紧密相连。目前，在南疆西部地区，针对  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  的相关研究相对较少。本文以新疆麦盖提县为研究对象，系统开展大气颗粒物污染特征解析与源区识别研究。基于 2018~2024 年逐小时大气细颗粒物监测数据，集成运用混合单粒子拉格朗日轨迹模型(Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory, HYSPLIT)的后向轨迹聚类分析、潜在源贡献因子法(Potential Source Contribution Function, PSCF)及浓度权重轨迹分析法(Concentration Weighted Trajectory, CWT)，重点解析  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  作为首要污染物的跨区域传输路径及其潜在贡献源区空间分布特征。通过这些方法，能够精准追溯污染物的传输轨迹，识别出污染物来源的关键区域，为后续治理工作提供清晰的方向指引。

## 2. 资料与方法

### 2.1. 数据资料

文中资料包括：2018 年 1 月~2024 年 12 月麦盖提县监测站逐小时  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  质量浓度资料、全球资料同化系统的水平分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$  逐 6 h 资料(GDAS, global data assimilation system)用于后向轨迹计算，由于本区域位于沙漠边缘沙尘天气频繁发生，后向时间尺度 72 h，以便于同时分析  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  质量浓度，且不考虑二次污染物的生命周期影响。文中时间统一采用北京时间(BT)。

### 2.2. 技术方法

$\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  源区研究主要基于潜在源贡献分析法(PSCF, Potential Source Contribution Function)和浓度权重轨迹分析法(CWT, Concentration weighted Trajectory Method) [13] [14]，其中 PSCF 值是利用后向气流轨迹来描述污染物可能源区地理位置空间分布的条件概率函数，研究区被分为  $i \times j$  个网格，研究时段内所有轨迹的总节点数为  $N_{ij}$ ，如果有  $n_{ij}$  个节点落在第  $(i, j)$  个网格中，PSCF 值表示为：

$$\text{PSCF}_{ij} = n_{ij}/N_{ij} \quad (1)$$

由于 PSCF 是一种条件概率，PSCF 高的网格被解释为潜在源区。当各网格内气流滞留时间较短时，加上瞬时风速的影响，使得 PSCF 的数值存在一定的误差。相关学者引入了权重函数  $W_{ij}$  来减小误差，使不确定性降到最低。当某一网格中的  $n_{ij}$  小于研究区内每个网格内平均轨迹端点数的 3 倍时，使用权重因子  $W_{ij}$  降低 PSCF 的误差，即

$$\text{WPSCF} = W_{ij} \times \text{PSCF}。 \quad (2)$$

CWT 分析通过气流轨迹与其对应的污染物浓度进行对比，以此确定对研究区污染物影响较大的源区。每个网格  $(i, j)$  的浓度平均值  $C_{ij}$  表示为：

$$C_{ij} = \frac{1}{\rho_{ij}T} \sum_{T=1}^N C_T \rho_{ij} \quad (3)$$

式中： $C_{ij}$  为网格  $i, j$  上的平均权重浓度，轨迹  $T$  在网格  $(i, j)$  停留的时间为  $\rho_{ij}T$ ，而轨迹  $T$  经过网格  $(i, j)$  时对应的研究区域污染物质量浓度则为  $C_T$ 。若某网格  $C_{ij}$  具有较高数值，表明平均后过该网格的气流会导

致接收站点的高浓度。

随机森林(Random Forests) [15]是包含多个决策树, 并对其训练达到某种预测结果为目的分类器的一种。基本流程: 首先利用自取重采样的方法进行采样且对全体训练样本( $M$ ), 并对其进行  $M$  次的随机放回抽样, 把以上的抽样过程进行  $N$  次重复, 从而能获取到的  $S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$  样本作为  $N$  颗决策树的训练样本。以  $N$  颗树对应的训练样本为依据, 进行采取各节点分裂技术从所有属性特征  $T$  当中随机地选择  $t$  个属性特征( $t \leq T$ ), 并把  $t$  个属性特征进行分裂作该颗树的属性特征集。以方差不纯度作指标对随机选择的  $t$  个属性特征进行建树。公式如下:

$$i(N) = \sum_{i \neq j} P(w_i)P(w_j) = 1 - \sum_j p^2(w_j) \quad (4)$$

$w_i$  为第  $i$  类的属性特征;  $w_i$  类样本在  $P(w_i)$  是在节点  $N$  处占总样本数的频数,  $i$  是方差不纯程度。

最终依据分支停止的准则提前设置方差不纯程度的下降差阈值。分支使节点的方差不纯程度的下降差值小于到提前设置好的阈值时, 停止该分支。实现对  $N$  颗树的构建, 最后这些  $N$  颗树构成随机森林算法。

### 3. 结果与讨论

#### 3.1. 麦盖提县大气污染特征

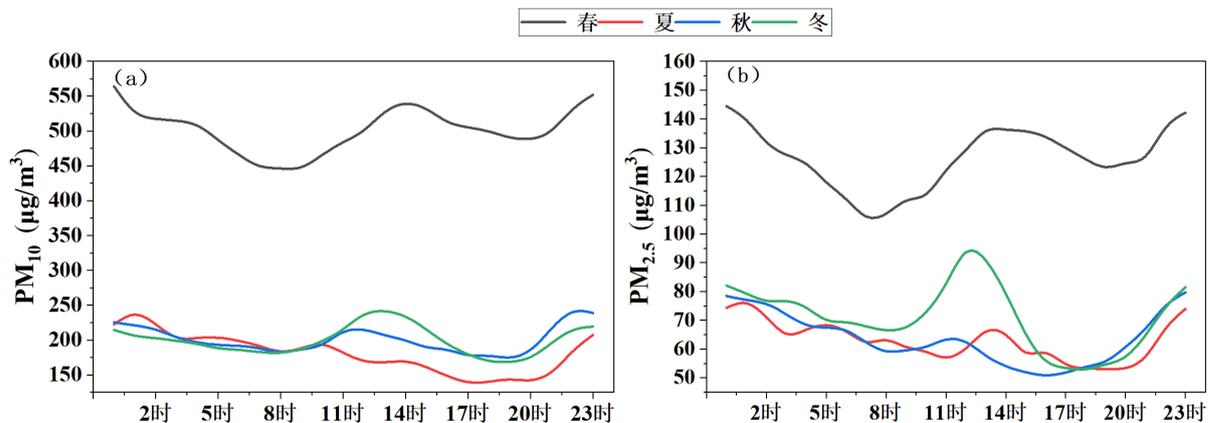


Figure 1. The diurnal variations of particulate matter concentrations in four seasons in Magaiti County from 2018 to 2024

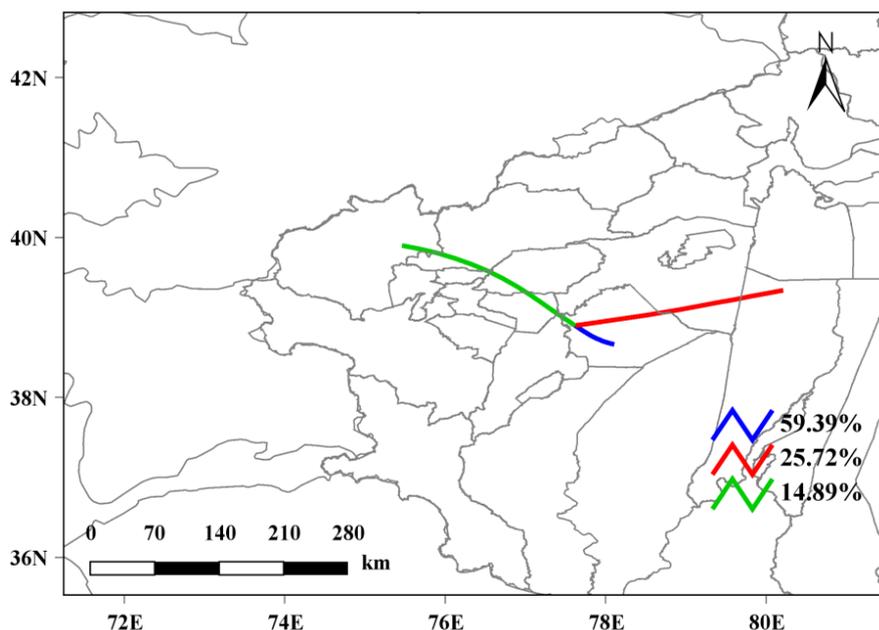
图 1. 2018~2024 年麦盖提县颗粒物浓度四季内日变化

研究区域 2018~2024 年空气质量优良率为 45.4%,  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  污染天数分别为 132 d 和 925 d, 年均浓度依次为  $81.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $271.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 均显著高于《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)二级标准限值( $PM_{2.5}$ :  $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $PM_{10}$ :  $70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 区域颗粒物污染形势严峻。近 30 a 沙尘观测资料可以看出, 麦盖提县年平均沙尘日数 107 d, 其中浮尘(90 d)占比 84.1%, 扬沙(13 d)占 12.1%, 沙尘暴(4 d)占 3.8%; 季节分布呈现春季(45 d) > 冬季(29 d) > 秋季(21 d) > 夏季(12 d), 春季占比达 42.2%, 与区域强风活动周期吻合。2018~2024 年麦盖提县颗粒物浓度季节变化如图 1 所示,  $PM_{2.5}$  浓度春季( $126.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) > 冬季( $71.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) > 秋季( $63.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) > 夏季( $63.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ),  $PM_{10}$  浓度春季( $502.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) > 秋季( $200.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) > 冬季( $199.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) > 夏季( $181.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 春季  $PM_{10}$  浓度为夏季 2.8 倍, 凸显沙尘输入的显著影响。塔里木盆地春季盛行 ENE—NE 风(频率 32.7%), 直接输送塔克拉玛干沙漠沙尘, 导致  $PM_{10}$  浓度骤升; 春季逆温层出现频率高于夏季, 大气层结稳定抑制污染物垂直扩散,  $PM_{2.5}$  近地面累积效应显著。夏季降水量占全年 42%, 雨滴对细颗粒物( $PM_{2.5}$ )清除效率达 35%~40%; 夏季平均风速较春季略低, 但边界层高度较春

季增加 50%，增强污染物水平扩散能力。

### 3.2. 麦盖提县大气团后向轨迹聚类分析

以麦盖提县环境监测(38°53'47"N, 77°36'55"E, 海拔高度 1178 m)为中心, 基于 2018~2024 年大气团后向轨迹数据(采用 HYSPLIT 模型, 轨迹时长 72 h, 起始高度 500 m), 运用聚类分析方法划分气流路径(图 2), 麦盖提县大气团轨迹可分为 3 类, 东南方向轨迹(蓝色, 占比 59.4%)PM<sub>2.5</sub>浓度为 78 μg·m<sup>-3</sup>(低于 GB 3095~2012 二级标准限值 75 μg·m<sup>-3</sup>, 超标率 1.3%), PM<sub>10</sub>为 286 μg·m<sup>-3</sup>(超二级标准限值 150 μg·m<sup>-3</sup>, 超标率 90.7%), 移动速度缓慢, 路径主要环绕麦盖提县, 途经区域以农田、荒漠交错带为主, 本地扬尘(农业耕作、地表裸露)是 PM<sub>10</sub>的主要贡献源。东北方向气流(红色, 占比 25.7%)PM<sub>2.5</sub>和 PM<sub>10</sub>浓度最大, 分别为 138 μg·m<sup>-3</sup>、480 μg·m<sup>-3</sup>, 均超过国家二级标准, 移动速度缓慢, 轨迹途径区域分别为阿克苏地区、墨玉、巴楚和麦盖提县, 形成 PM<sub>2.5</sub>和 PM<sub>10</sub>的复合污染; 西北方向(绿色, 占比 11.8%)气流对应的 PM<sub>2.5</sub>和 PM<sub>10</sub>浓度相对较低, 分别为 60 μg·m<sup>-3</sup>、184 μg·m<sup>-3</sup>, PM<sub>10</sub>超过国家二级标准, PM<sub>2.5</sub>浓度低于国家二级标准, 气流移动速度较快, 途径区域阿图什、伽师、岳普湖和麦盖提县。揭示了干旱区绿洲城市“本地扬尘 + 跨区域源输送”的污染模式, 建议针对东北向路径途经的工业 - 农业 - 沙尘过渡带加强扬尘管控与产业布局优化, 同时强化本地农田地表覆盖措施以降低 PM<sub>10</sub>污染。



**Figure 2.** Clustering analysis of backward trajectories of atmospheric air masses in Maigaiti County from 2018 to 2024  
**图 2.** 2018~2024 年麦盖提县大气团后向轨迹聚类分析

春季(3~5 月)影响麦盖提县的气流轨迹可归纳为 4 条主要路径, 具体分布及环境效应如下: 偏东方向有两条路径, 该方向轨迹对大气污染物浓度贡献显著, PM<sub>2.5</sub>和 PM<sub>10</sub>轨迹占比分别为 31%和 30.2%, 对应 PM<sub>2.5</sub>浓度为 190 μg·m<sup>-3</sup>, PM<sub>10</sub>浓度为 696 μg·m<sup>-3</sup>, 均远超《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)二级标准限值, 气流移动速度缓慢, 轨迹途径区域以墨玉县 - 巴楚县 - 麦盖提县监测站周边为核心, 呈现局地聚集与缓慢扩散的复合特征; 西北方向也有两条路径, 该方向轨迹具有“高占比、广覆盖、快移动”的特点, PM<sub>2.5</sub>和 PM<sub>10</sub>轨迹占比分别为 33.1%、5.7%, 对应浓度分别为 86 μg·m<sup>-3</sup>、426 μg·m<sup>-3</sup>, 仍高于国家二级标准限值, 气流移动速度较快, 影响范围显著扩大, 途径区域可延伸至哈萨克斯坦 -

乌恰县 - 阿图什市 - 伽师县 - 岳普湖县等跨境及区域内多节点, 体现出长距离传输与区域污染耦合的特征。

夏季(6~8月)影响麦盖提县的气流轨迹呈现“局地主导、外源为辅”的复杂格局, 共4条主要路径, 其时空分布与污染贡献差异显著, 局地主导路径(2条, 麦盖提县本区域)轨迹占比分别为58.3%和35.7%, 合计占比达94%, 凸显局地气流的主导地位, 对应 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 浓度分别为 $91 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $233 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 均超过国家二级标准, 气流移动速度缓慢, 污染物呈现显著的局地滞留与累积效应, 路径以麦盖提县内不同方向的气流循环为主, 未涉及大规模区域传输; 东北方向路径为夏季次要外源输入通道,  $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 轨迹占比4.2%, 占比较低但仍具环境意义。 $PM_{2.5}$ 浓度为 $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (低于国家标准26.7%),  $PM_{10}$ 浓度 $141 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (接近标准值, 超标6.0%), 呈现“单污染物超标”特征, 气流移动速度较快, 途径区域为麦盖提县 - 巴楚县 - 阿瓦提县, 表现为短距离区域传输, 污染物混合程度较低; 西北方向跨境路径体现夏季气流的长距离传输潜力,  $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 轨迹占比仅1.8%,  $PM_{2.5}$ 浓度为 $63 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 低于国家二级标准,  $PM_{10}$ 浓度为 $182 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 超过国家二级标准, 与东北路径一致呈现 $PM_{10}$ 单因子超标, 气流移动速度快, 影响范围跨越国界, 途径区域为境外 - 乌恰县 - 阿图什市 - 伽师县 - 岳普湖县, 显示出跨境大气污染物传输对麦盖提县的潜在影响, 尽管贡献度较低但需关注区域协同防控。

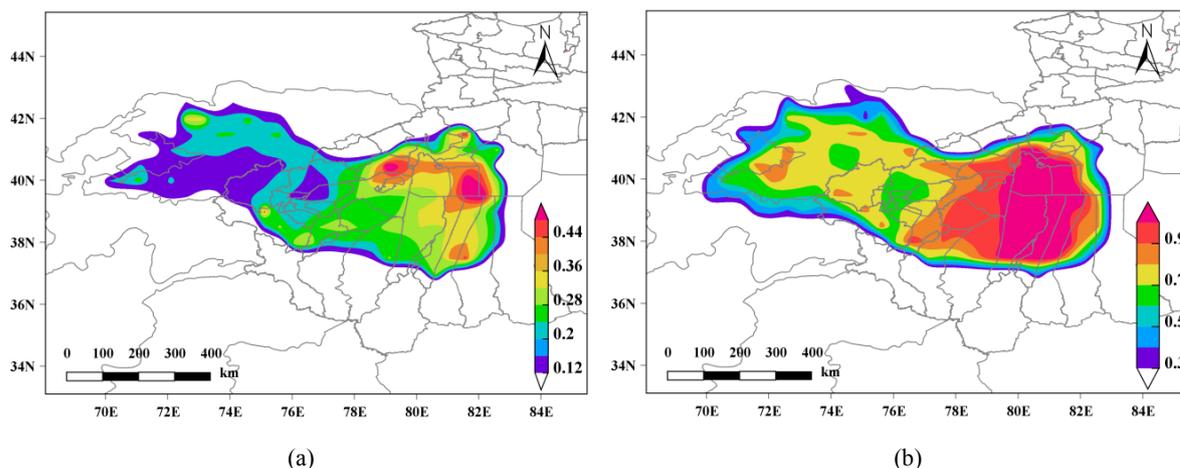
秋季(9~11月)影响麦盖提县气流轨迹主要分为4类, 其中偏东路径有两条, 一条跨区域偏东气流, 途径墨玉县、巴楚县,  $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 轨迹占比12.4%, 浓度分别为 $91 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $337 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 均超过国家二级标准, 污染物浓度最高, 可能携带区域传输的污染源; 另一条本地偏东气流, 轨迹占比为53.1%(占比最高), 对应的 $PM_{2.5}$ 浓度 $62 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 低于国家二级标准,  $PM_{10}$ 浓度 $194 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 超过国家二级标准, 气流移动速度较慢, 以本地污染源累积为主; 西北方向路径涉及范围广, 延伸至境外(乌恰县 - 阿图什市 - 伽师县 - 岳普湖等区域),  $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 轨迹占比4.9%,  $PM_{2.5}$ 浓度 $44 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 低于国家二级标准,  $PM_{10}$ 浓度 $192 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 超过国家二级标准, 气流移动速度较快, 可能受远距离传输及区域扩散影响; 西南方向主要途经麦盖提县西南方向莎车县偏北区域,  $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 轨迹占比30.3%,  $PM_{2.5}$ 浓度为 $58 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 低于国家二级标准,  $PM_{10}$ 浓度为 $158 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 超过国家二级标准, 气流移动速度极慢, 污染物易在本地及周边低扩散区域累积。

冬季影响麦盖提县的气流轨迹主要分为3类, 其中东北气流轨迹占比为24.7%, 污染物浓度最高,  $PM_{2.5}$ 浓度 $74 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 低于国家二级标准,  $PM_{10}$ 浓度 $388 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 超过国家二级标准, 移动速度缓慢, 轨迹途径墨玉县、巴楚县; 偏东气流为本地主导轨迹, 轨迹占比46.8%(占比最高),  $PM_{2.5}$ 浓度 $69 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 低于国家二级标准,  $PM_{10}$ 浓度 $210 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 超过国家二级标准, 移动速度较慢, 路径以麦盖提县本地为主; 西北气流轨迹占比28.5%,  $PM_{2.5}$ 浓度 $73 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 低于国家二级标准,  $PM_{10}$ 浓度 $236 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 超过国家二级标准, 速度较快, 途径阿图什市 - 伽师县 - 岳普湖等区域。

### 3.3. 麦盖提县 PSCF 潜在源分析

基于后向轨迹模型, 以麦盖提县环境监测站为起点, 设定12小时回溯时间、500m模拟高度, 对2018~2024年 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 开展PSCF(潜在源贡献函数)分析。其中,  $PM_{2.5}$ 阈值设定为 $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (对应《环境空气质量标准》GB 3095-2012二级标准年均值),  $PM_{10}$ 阈值设定为 $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (同上), 并将PSCF值 $> 0.7$ 的区域划定为核心潜在源区。麦盖提县 $PM_{2.5}$ 潜在源区主要分布于麦盖提县东北方位的柯坪县、阿瓦提县、阿拉尔市及和田地区北部(图3(a))。该区域PSCF值显著高于周边, 表明其对麦盖提县 $PM_{2.5}$ 的贡献具有强潜在关联性。 $PM_{10}$ 潜在源区集中于阿克苏地区南部及和田地区北部塔克拉玛干沙漠边缘地带(图3(b))。沙漠边缘的松散地表物质及区域传输过程, 成为 $PM_{10}$ 的主要潜在贡献源。两类污染物均呈现远距离输送特征,  $PM_{2.5}$ 潜在源区以人类活动相对密集的绿洲农业区(如柯坪、阿瓦提)及城镇区域(阿拉

尔)为主,可能与农业扬尘、工业排放及交通源相关;PM<sub>10</sub>潜在源区则直接关联塔克拉玛干沙漠边缘的自然起尘及区域风沙活动。研究结果为识别麦盖提县大气颗粒物外源输入路径、制定跨区域污染防治策略提供了科学依据。



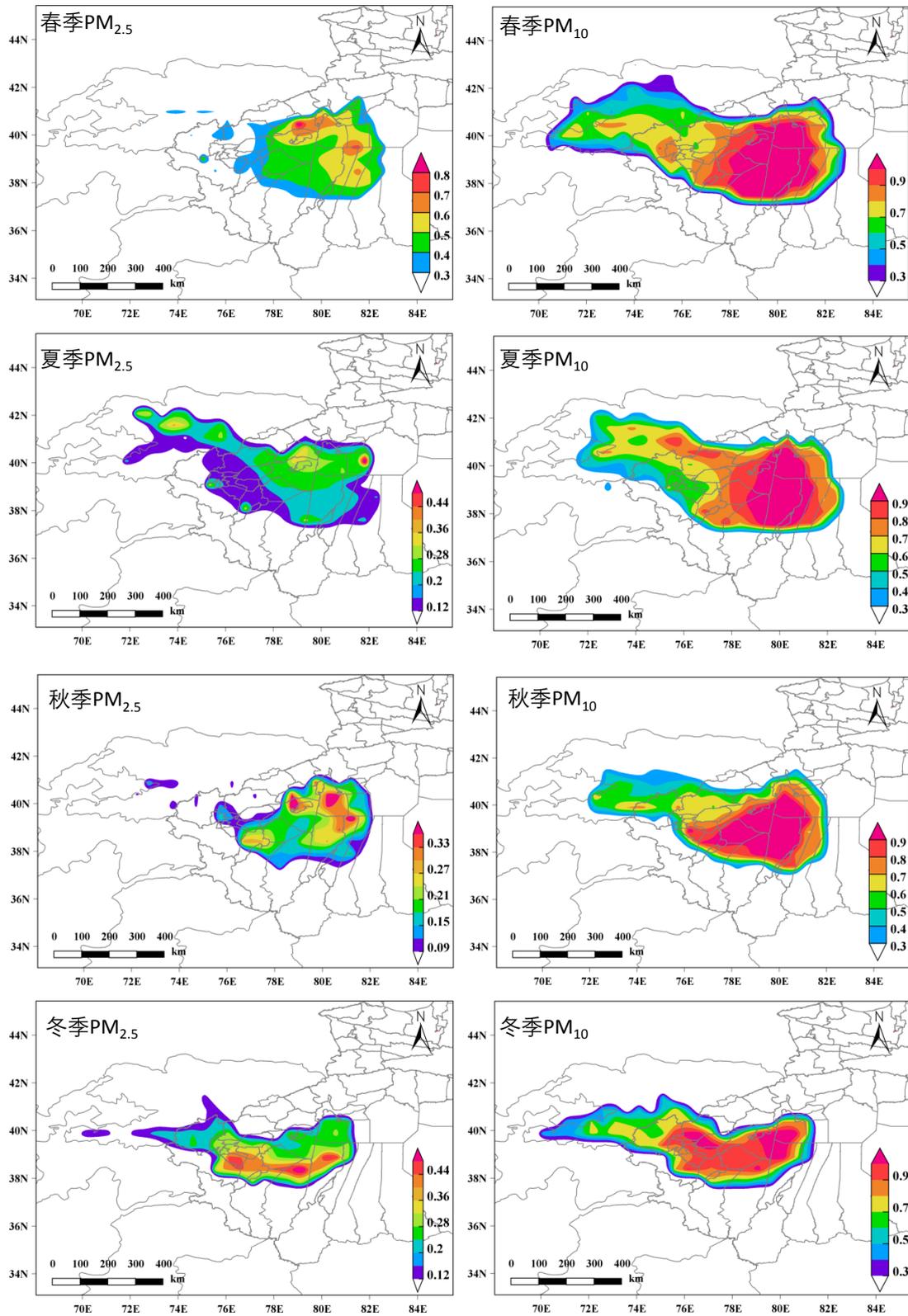
**Figure 3.** Analysis of potential source regions (PSCF) of PM<sub>2.5</sub> (a) and PM<sub>10</sub> (b) in Maigaiti County from 2018 to 2024  
**图 3.** 2018~2024 年麦盖提县 PM<sub>2.5</sub> (a)和 PM<sub>10</sub> (b)潜在源贡献函数(PSCF)分布

基于 PSCF(潜在源贡献函数)模型分析麦盖提县季节性 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 潜在源区差异(图 4),春季 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 潜在源区空间分布高度重合,主要集中于麦盖提县东北方位的巴楚县、墨玉县及阿克苏地区部分区域,该类区域 PSCF 值显著高于背景水平(PSCF > 0.7),表明污染物通过东北向气流远距离输送(如塔里木盆地东部路径)成为麦盖提县春季颗粒物的主要外源贡献,本地源贡献相对有限。

夏季 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 潜在源区呈现“相似为主、差异为辅”的格局,均受远距离区域传输主导,核心贡献区包括东北方位的巴楚县、墨玉县及阿克苏地区(与春季一致, PSCF > 0.7);以及西北方向的阿合奇县及跨境区域(如哈萨克斯坦东南部, PSCF > 0.65),与夏季西风带气流增强导致的跨境传输相关。PM<sub>2.5</sub> 本地生成贡献极低,几乎完全依赖周边区域及远距离输送,PM<sub>10</sub> 除区域传输外,本地地表松散物质起尘(如绿洲边缘戈壁、农田裸露地表)贡献显著,表现为监测站周边网格 PSCF 值(0.5~0.7)高于 PM<sub>2.5</sub>。PM<sub>10</sub> 在夏季的“本地-外源”双源性特征,提示需针对农田管理、戈壁地表固化等开展本地化防控,同时加强与东北、西北方向区域的污染协同治理。

秋季 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 潜在源区空间分布基本一致,核心潜在源区均集中于麦盖提县东北方位的巴楚县、墨玉县及阿克苏地区部分区域,污染物通过东北向远距离气流输送;PM<sub>2.5</sub> 本地生成贡献极低,几乎完全依赖区域传输,PM<sub>10</sub> 除区域传输外,本地绿洲边缘农田收割后裸露地表起尘形成次要贡献,呈现“外源主导、本地辅助”特征。

冬季 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 潜在源区空间分异显著,贡献机制呈“逆向互补”格局,PM<sub>2.5</sub> 潜在源区呈现“本地-外源双源驱动”,且外源贡献以多方向远距离传输为主。近距离本地源与冬季居民燃煤取暖、低空逆温导致的污染物累积相关,远距离西北方位的岳普湖县、阿图什市、乌恰县及东北方位的巴楚县、墨玉县、阿克苏地区部分区域,通过西北-东北向气流跨区域输送。PM<sub>10</sub> 本地起尘贡献极小,完全依赖东北向远距离传输,东北方位的巴楚县、墨玉县及阿克苏地区部分区域,与冬季东北气流携带的沙漠边缘扬尘(如塔克拉玛干沙漠北缘松散沉积物)及工业粉尘远距离输送相关,针对 PM<sub>10</sub> 需强化东北路径上游沙漠边缘防风固沙及工业粉尘治理。

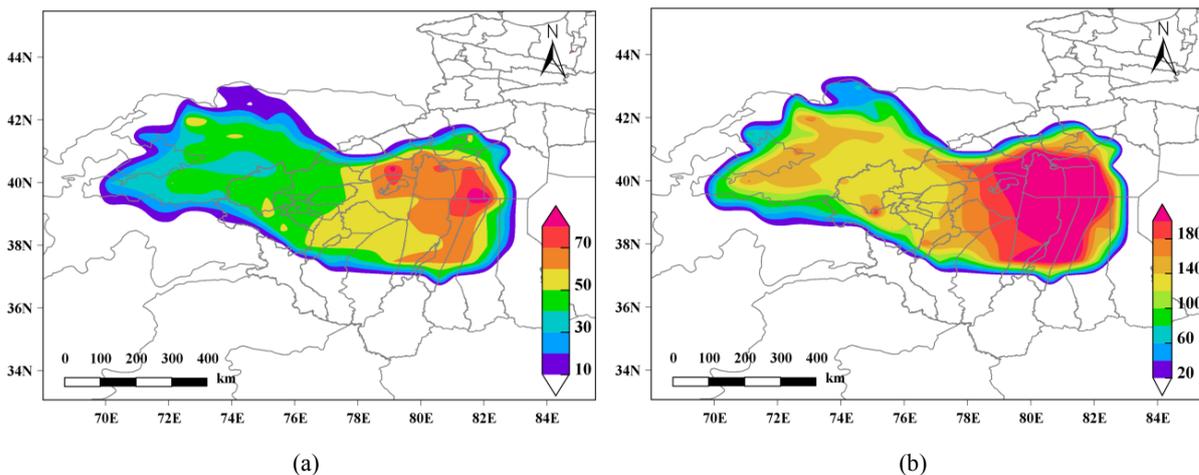


**Figure 4.** Analysis of potential source regions (PSCF) of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in Spring, Summer, Autumn and Winter Seasons in Maigaiti County from 2018 to 2024

**图 4.** 2018~2024 年麦盖提县春、夏、秋、冬季节 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 潜在源区(PSCF)分布

### 3.4. 麦盖提县 CWT 结果分析

为量化潜在源区对麦盖提县  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  的浓度贡献权重, 采用 CWT (浓度权重轨迹)模型开展分析。CWT 值表征轨迹途经网格单元时携带的污染物对目标区域的平均浓度贡献, 数值越大表明该区域的影响权重越高。2018~2024 年  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  的 CWT 高值区( $\text{CWT} > 30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )空间分布高度重合, 均集中于阿克苏地区南部及和田地区北部塔克拉玛干沙漠边缘区域(图 5)。该区域作为塔里木盆地主要的松散沉积物分布区, 其地表沙尘起尘及区域气流输送过程, 对麦盖提县两类颗粒物的浓度抬升起主导作用。 $\text{PM}_{2.5}$  CWT 高值区覆盖阿克苏南部农田 - 沙漠过渡带, 表明农业活动与自然起尘的协同贡献;  $\text{PM}_{10}$  CWT 高值区集中于塔克拉玛干沙漠边缘裸露沙丘区, 直接关联沙尘活动的粗颗粒物输送。尽管 PSCF 分析显示  $\text{PM}_{2.5}$  存在一定本地源贡献(如冬季燃煤), 但 CWT 高值区的一致性表明, 塔克拉玛干沙漠边缘的远距离沙尘输送是长期主导因素。分析结果为跨区域划定“沙漠 - 绿洲过渡带生态防护重点区”“农业扬尘管控协同区”提供了浓度权重层面的科学依据。



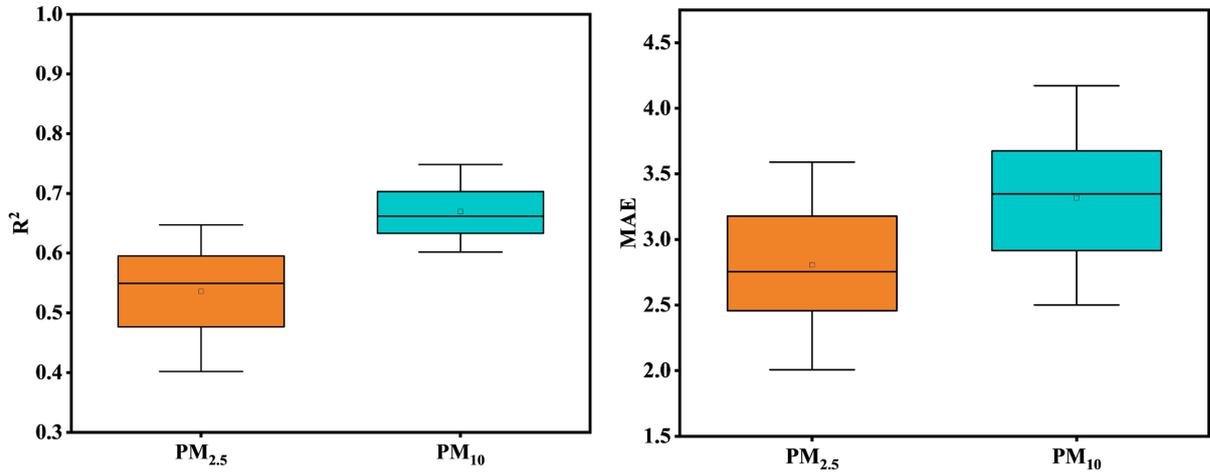
**Figure 5.** Analysis of potential source regions (CWT) of  $\text{PM}_{2.5}$  (a) and  $\text{PM}_{10}$  (b) in Maigaiti County from 2018 to 2024  
**图 5.** 2018~2024 年麦盖提县  $\text{PM}_{2.5}$  (a)和  $\text{PM}_{10}$  (b)潜在源区分析(CWT)

麦盖提县春季  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  潜在源差异较大, 影响  $\text{PM}_{2.5}$  平均浓度的 CWT 高值区分布在阿克苏东部区域, 影响  $\text{PM}_{10}$  平均浓度的 CWT 高值区范围广, 分布在岳普湖、伽师、阿图什、乌恰以及巴楚县、墨玉县和阿克苏地区西部。夏季  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  潜在源基本一致,  $\text{PM}_{2.5}$  贡献较大的潜在源区明显增多, CWT 高值区分布在塔克拉玛干沙漠和田北部和阿克苏南部区域, 影响  $\text{PM}_{10}$  平均浓度的 CWT 高值区主要分布在和田地区中部和北部区域。秋季影响  $\text{PM}_{10}$  平均浓度贡献较大的潜在源区跟春季有些相似, 影响  $\text{PM}_{2.5}$  平均浓度的 CWT 高值区分布在巴楚县、和田北部和阿克苏南部区域。冬季  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  潜在源有些差异, 影响  $\text{PM}_{2.5}$  平均浓度贡献最大的( $\text{CWT} > 80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )主要分布在阿克苏西部及巴楚县东部区域, 其次( $\text{CWT} > 60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )主要分布在麦盖提县城区及喀什北部区域, 影响  $\text{PM}_{10}$  平均浓度的 CWT 高值区主要分布在阿克苏西部区域。

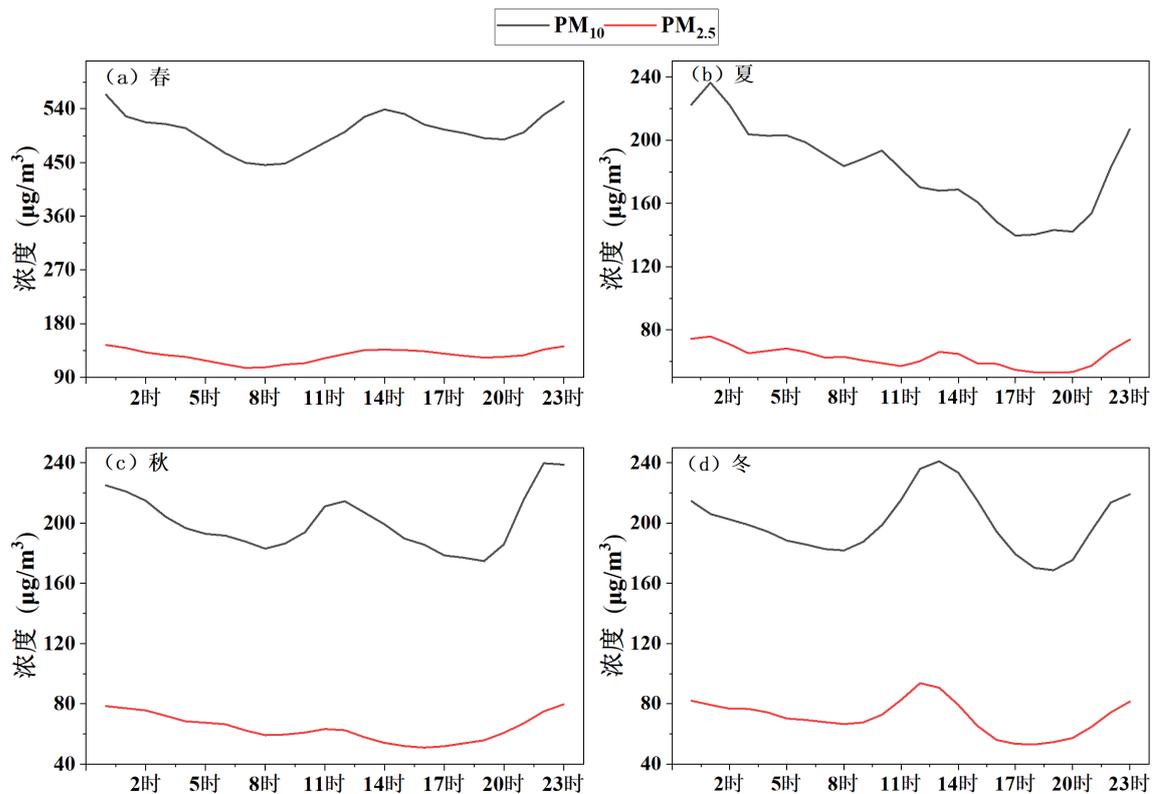
### 3.5. 随机森林预测变化趋势

利用随机森林机器学习算法, 针对麦盖提县  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$  浓度数据及气象因子开展建模分析, 通过构建决策树并进行 500 次迭代训练, 量化评估评估气温、湿度、风速等气象因子对  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$  浓度的非线性影响机制。计算模型的精度和效率, 如图 6 所示,  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  随机森林模型的确定系数  $R^2$  分别是 0.53

和 0.70, 表明模型对观测数据的解释力较强, 具备可靠的学习能力与泛化潜力;  $\text{PM}_{2.5}$  平均绝对误差 MAE 为  $2.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $\text{PM}_{10}$  模型 MAE 为  $3.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 均低于同类研究中环境浓度预测的行业可接受误差阈值 ( $\pm 10\%$ ), 验证了模型预测结果的稳定性与有效性。基于随机森林模型的变量重要性得分,  $\text{PM}_{2.5}$  浓度受气温和相对湿度的驱动作用显著, 反映出热力条件与吸湿增长过程的关键影响;  $\text{PM}_{10}$  浓度则主要受制于风速和温度, 体现了动力传输与扬尘释放过程的主导机制。



**Figure 6.** The precision ( $R^2$ ) and mean absolute error (MAE) of the random forest model  
**图 6.** 随机森林模型精度  $R^2$  和平均绝对误差 MAE



**Figure 7.** The seasonal and diurnal variations of particulate matter concentrations in Magaiti County from 2018 to 2024  
**图 7.** 2018~2024 年麦盖提县颗粒物浓度季节一日内变化

### 3.6. 颗粒物浓度季节一日内变化特征

基于 2018~2024 年麦盖提县  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  质量浓度逐时观测数据,系统解析四季浓度变化规律(图 7)。春季  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  浓度峰值均出现在 14~16 时,夜间再次抬升,午后峰值与沙尘天气频发导致的粗颗粒物输入直接相关,夜间二次抬升与居民供暖活动增强、边界层高度降低引发的污染物累积耦合作用有关。进入夏季, $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  浓度高值区集中在夜间,最低值则出现在 19 时,但整体浓度较春季有所下降,夜间高值与温度逆温层形成、静风抑制污染物扩散,叠加人类晚间活动排放增加等因素有关,午后低值是因为 19 时前后温度较高、风速上升,促进大气湍流混合与污染物稀释。秋、冬季  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  浓度呈现显著“W”型双峰值特征,早晚高峰交通排放激增,冬季供暖期(11 月~次年 3 月)燃煤或燃气使用量增加,形成典型“生活-交通源”叠加排放;同时夜间至早晨强逆温层持续存在,垂直扩散系数较午后降低,导致污染物在近地面累积;午间太阳辐射增强使逆温层破裂,湍流强度上升,促进污染物扩散。

## 4. 结论与讨论

1) 2018~2024 年监测数据表明,麦盖提县大气首要污染物以细颗粒物( $PM_{2.5}$ )和可吸入颗粒物( $PM_{10}$ )为首要污染物。研究期间, $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  污染天数分别为 132 d、925 d,二者年均浓度分别为  $81.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $271.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,均显著高于国家二级标准限值,区域颗粒物污染形势严峻。颗粒物浓度呈现显著的季节性分异规律,具体表现为: $PM_{2.5}$  浓度春季( $126.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) > 冬季( $71.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) > 秋季( $63.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) > 夏季( $63 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ );  $PM_{10}$  浓度表现为春季( $502.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) > 秋季( $200.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) > 冬季( $199.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) > 夏季( $181.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )。春季主导因素为干旱区典型的沙尘天气,导致地壳源粗颗粒集中输入;夏季受东南季风带来的湿润气流影响,地表扬尘强度减弱,浓度降至全年最低。

2) 通过对 2018~2024 年逐日 500 m 高度气团 12 小时后向轨迹的聚类分析,发现麦盖提县气流轨迹具有明显的季节性变化。夏季空气质量较好,而冬、春、秋季常受沙漠和大陆性气团的共同影响。具体表现为:东北方向气流对应的  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  浓度最大,其轨迹占比为 25.7%,轨迹途径区域分别为阿克苏地区、墨玉、巴楚和麦盖提县;麦盖提本区域内气流对应的  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  浓度分别为  $78 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $286 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,轨迹占比为 59.4%;西北方向气流,受乌拉尔山南端低槽影响,南疆及麦盖提县大风和沙尘暴天气频繁,轨迹占比为 14.9%,该路径对应的  $PM_{10}$  浓度超过国家二级标准,而  $PM_{2.5}$  浓度低于国家二级标准。

3) 基于潜在源贡献因子法(PSCF)和浓度权重轨迹法(CWT)分析,麦盖提县  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  的 PSCF 和 CWT 分布及变化类似,春季 PSCF 值和 CWT 值最大,夏季最小。高值区主要分布在麦盖提县东北方向的巴楚县及部分阿克苏地区,表明这些区域对麦盖提县颗粒物污染有显著贡献。

4) 通过随机森林机器学习模型,揭示了  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  浓度与各气象因子之间的非线性关系,结果表明, $PM_{2.5}$  浓度主要受气温和湿度的影响,而  $PM_{10}$  浓度则主要受风速和温度的影响。这一发现为理解气象条件对颗粒物污染的调控作用提供了重要依据。

麦盖提县大气污染以  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  为主,污染程度呈现显著的季节性差异,春季最为严重。不同季节的气流输送路径对颗粒物浓度有显著影响,西北、偏东和东南方向的气流是主要的外源污染物输送路径。潜在源区分析表明,巴楚县及部分阿克苏地区是麦盖提县颗粒物污染的重要贡献区域。此外,气象条件(如温度、湿度和风速)对颗粒物浓度的影响显著,为未来空气质量管理 and 污染防控提供了科学依据。

## 基金项目

新疆维吾尔自治区气象局引导性项目(YD2024026),新疆维吾尔自治区气象局青年基金(QN202407),喀什地区气象局自立课题(KS202307)。

## 参考文献

- [1] 蒋镇, 赵美艳. 重庆城区大气细颗粒物浓度特征及其与气象因子的关系[J]. 气象研究与应用, 2020, 41(3): 38-42.
- [2] 李颜君, 安兴琴, 范广洲. 北京地区大气颗粒物输送路径及潜在源分析[J]. 中国环境科学, 2019, 39(3): 915-927.
- [3] 项佳娥, 徐丽华, 张方方, 等. 杭州城区 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 污染特征及其影响因子分析[J]. 中国环境监测, 2016, 32(6): 36-42.
- [4] 康盼茹, 陶园园, 童艳君, 等. 2020-2021 年冬季长三角北部典型农业城市大气 PM<sub>2.5</sub> 及其组分特征和来源解析[J]. 环境科学研究, 2023, 36(12): 2269-2281.
- [5] 程进. 长三角区域大气污染协同治理网络结构及影响因素研究[J]. 长江流域资源与环境, 2024, 33(7): 1529-1539.
- [6] 李淑婷, 李霞, 毛列尼·阿依提看, 等. 2017-2019 年中天山北坡城市群大气污染及污染天气类型特征[J]. 干旱区地理, 2022, 45(4): 1082-1092.
- [7] 文雯, 刘自牧. 成都市一次重雾霾过程成因及污染源的 HYSPLIT 模式分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2023, 17(3): 87-92.
- [8] 黄秋霞, 赵克明, 艾克代·沙拉木, 等. 乌鲁木齐一次重污染过程及其边界层特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2023, 17(3): 93-98.
- [9] 刘超, 周雅蔓, 魏娟娟, 等. 乌鲁木齐重污染日 PM<sub>2.5</sub> 不同增长型的污染特征及气象条件分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2022, 16(5): 127-134.
- [10] 刘婉莉, 闫世明, 王雁, 等. 运城盆地秋冬季 PM<sub>2.5</sub> 传输特征和源区分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2022, 16(3): 119-126.
- [11] 陆忠奇, 赵竹君, 何清. 库尔勒市大气颗粒物浓度特征及来源[J]. 中国沙漠, 2022, 42(6): 74-84.
- [12] 薛一波, 张小嘯, 雷加强, 等. 新疆大气颗粒物污染时空演变及沙尘组分研究[J]. 中国环境科学, 2024, 44(6): 3012-3020.
- [13] 郝永佩, 宋晓伟, 朱晓东, 等. 关中盆地咸阳市 PM<sub>2.5</sub> 污染时空分布特征和潜在源区分析[J]. 环境科学, 2025, 46(1): 579-590.
- [14] 周沙, 刘宁, 刘朝顺. 2013-2015 年上海市霾污染事件潜在源区贡献分析[J]. 环境科学学报, 2017, 37(5): 1835-1842.
- [15] 张志豪, 陈楠, 祝波, 等. 基于随机森林模型的武汉市城区大气 PM<sub>2.5</sub> 来源解析[J]. 环境科学, 2022, 43(3): 1151-1158.