贺威文,邹 滨,徐 勇,等.耦合光流矢量与移动距离约束的大气污染传输路径识别算法 [J]. 中国环境科学, 2025,45(9):4825-4836.
He W W, Zou B, Xu Y, et al. Atmospheric pollutant transport pathway identification algorithm coupling optical flow vectors with movement distance constraints [J]. China Environmental Science, 2025,45(9):4825-4836.

# 耦合光流矢量与移动距离约束的大气污染传输路径识别算法

贺威文[1],邹 滨[1*],徐 勇[1,2],张钦挺[1],许 杰[3],吴 坚[4](1.中南大学地球科学与信息物理学院,湖南 长沙 410083；2.桂林理工大学测绘地理信息学院,广西 桂林 541006；3.长沙市生态环境局大气处,湖南 长沙 410083；4.湖南省长沙生态环境监测中心,湖南 长沙 410083)

**摘要**：提出一种耦合光流矢量与移动距离约束的大气污染传输路径识别算法——Farneback-Distance Transmission Path Recognition Algorithm (FBD-TPRA).该算法基于一维深度卷积神经网络(1D-CNN)反演生成的高时空分辨率(空间分辨率为 2km,时间分辨率为 1h)$PM_{2.5}$浓度卫星遥感反演数据,通过光流法提取污染气团帧间运动特征,引入移动距离约束,实现污染气团传输路径的连续精细重构.湖南省长沙市三次典型大气污染事件(2024 年 1 月 14 日、10 月 12 日和 10 月 27 日)验证实验显示,FBD-TPRA 算法所识别的传输路径能够合理解释城市浓度变化的时序关系(仙桃-荆州-岳阳-长沙、岳阳-常德-益阳-长沙、岳阳-益阳-长沙);相比广泛应用的 HYSPLIT 模拟路径,FBD-TPRA 算法识别的传输路径与其在净位移方向上具有较高的一致性,余弦相似度最高达 0.99,但在路径形态上存在差异,动态时间规整(DTW 值)分别为 2.99°、9.58°和 3.69°.研究表明,FBD-TPRA 算法通过结合高时空分辨率污染物浓度数据和移动距离约束,增强了对污染物传输过程的刻画能力,为大气污染传输路径的识别提供了新的技术支持.

**关键词**：$PM_{2.5}$；大气污染；Farneback 光流法；FBD-TPRA 算法；HYSPLIT
**中图分类号**：X51 **文献标识码**： **文章编号**：1000-6923(2025)09-4825-12

**Atmospheric pollutant transport pathway identification algorithm coupling optical flow vectors with movement distance constraints.** HE Wei-wen[1], ZOU Bin[1*], XU Yong[1,2], ZHANG Qin-ting[1], XU Jie[3], WU Jian[4] (1.School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha 410083, China；2.School of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China；3.Changsha Municipal Ecological Environment Bureau Atmospheric Division, Changsha 410083, China；4.Changsha Environmental Monitoring Center of Hunan Province, Changsha 410083, China). *China Environmental Science*, 2025,45(9)：4825~4836

**Abstract**：Proposing a novel algorithm for identifying atmospheric pollutant transport pathways by coupling optical flow vectors with movement distance constraints—Farneback-Distance Transmission Path Recognition Algorithm (FBD-TPRA). Based on high spatiotemporal-resolution (2km spatial resolution, 1h temporal resolution) $PM_{2.5}$ concentration satellite remote sensing inversion data generated via a one-dimensional deep convolutional neural network (1D-CNN), this algorithm extracts inter-frame motion features of polluted air masses using optical flow and incorporates movement distance constraints to achieve continuous and refined reconstruction of pollutant transport pathways. Validation experiments conducted during three typical air pollution events in Changsha, Hunan Province (January 14, October 12, and October 27, 2024) demonstrate that the transport paths identified by the FBD-TPRA algorithm can reasonably explain the temporal relationships of urban concentration variations (Xiantao-Jingzhou-Yueyang-Changsha, Yueyang-Changde-Yiyang-Changsha, and Yueyang-Yiyang-Changsha). Compared with the widely used HYSPLIT model, the FBD-TPRA achieves strong consistency in net displacement direction(cosine similarity up to 0.99), but differ in path morphology, as reflected by dynamic time warping (DTW) values of 2.99°, 9.58°, and 3.69°, respectively. The study indicates that the FBD-TPRA algorithm enhances the characterization of pollutant transport processes by integrating high-resolution spatiotemporal pollutant concentration data and movement distance constraints, providing a new technical approach for identifying atmospheric pollution transport pathways.

**Key words**：$PM_{2.5}$；atmospheric pollution；farneback optical flow；FBD-TPRA algorithm；HYSPLIT

大气是一个动态变化且各区域彼此连接的复杂系统,其污染物不仅可在大气中稳定存在数天至数周时间[1],还可随气团的传输在城市区域间进行中、远距离扩散[2-3].因此,区域大气污染的成因复杂,不仅受到本地排放源的直接影响,还受到外部污染

**收稿日期**：2025-02-21
**基金项目**：国家自然科学基金资助项目(42271440)
* 责任作者, 教授, 210010@csu.edu.cn

物跨区域输送的间接影响[4-5],具有显著的区域性、复合型污染特征[6-8].近年来,随着区域联防联控理念的提出,污染治理模式正在向区域协作转型,强调多区域协同性和系统性的污染控制,对精细化识别大气污染传输路径提出了数据和方法方面的更高要求.

传统大气污染传输路径的识别多采用模式模拟和 HYSPLIT 模拟方法[9].模式模拟考虑气象条件和化学反应,解决了复杂环境下污染物传输的模拟需求[10-12],然而不同模式模拟结果之间存在较大差异,同时大气传输过程处于快速且动态变化中,限制了空气质量模式对重点城市大气污染联防联控政策规划的指导价值[13].HYSPLIT 模拟则通过后向轨迹分析有效识别了跨区域污染的来源,为污染治理提供了科学依据[14-17].但由于输入数据的粗分辨率和低更新频率,使其难以满足精细化的传输路径分析需求.

随着遥感技术的迅猛发展,逐小时、公里级高时空分辨率的遥感数据能够实时反演大气污染物浓度的空间分布,为跨区域大气污染传输路径的识别提供数据支持[18-19].同时,一种用于图像时空关联分析的光流方法被应用于计算多时序影像中像元运动[20-21].该方法基于光照守恒假设,认为在短时间间隔内同一物体的像素亮度保持不变,从而通过计算相邻帧间的像素位移来估计物体的运动方向和距离[22].在大气污染时空分布变化分析中,可将污染物浓度栅格数据视为一系列随时间变化的影像,将污染物在空间中的移动类比为图像中像素的运动.由此,光流法的引入使得污染物在相邻帧之间的运动趋势得以通过图像匹配技术进行估算,为追踪污染物传输扩散提供了新的思路和技术支持[13].然而,现有光流法主要用于估算污染物在帧间的运动趋势,对于在长时间尺度上的连续传输路径重构研究较少.

本文对此提出了 Farneback-Distance Transmission Path Recognition Algorithm(FBD-TPRA)大气污染传输路径识别算法.该算法基于高时空分辨率 $PM_{2.5}$ 浓度卫星遥感反演数据,结合光流法提取污染帧间传输特征,引入移动距离约束,重构连续的大气污染传输路径.为验证算法可靠性,本文拟结合国控站点逐小时 $PM_{2.5}$ 浓度监测数据,通过分析所识别传输路径途径城市 $PM_{2.5}$ 浓度时序变化分析的基础上,同时比较 FBD-TPRA 算法识别路径与 HYSPLIT 模拟路径结果,从净位移方向和形态差异两方面评估 FBD-TPRA 算法性能与优势.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验区与数据

1.1.1 实验区概况 本文以长沙市及其区域传输主要来源城市地区为研究区域(图 1),以伍家岭国控站(112.98°N,28.26°E)为污染传输分析站点开展研究.该研究区位于长江中下游城市群,北风盛行,是典型的亚热带季风气候带,表现为冬夏较长、春秋较短、空气湿润,且降雨与高温季节同步[23],这种气候特征为污染物的传输扩散提供了有利条件.此外,长沙市主城区特殊的马蹄形地形进一步限制了污染物的自然扩散,使污染物易在城区堆积[24].而地处长江中下游大气污染物通道之上,也使长沙易受周边城市污染物传输的叠加影响[23,25-27].

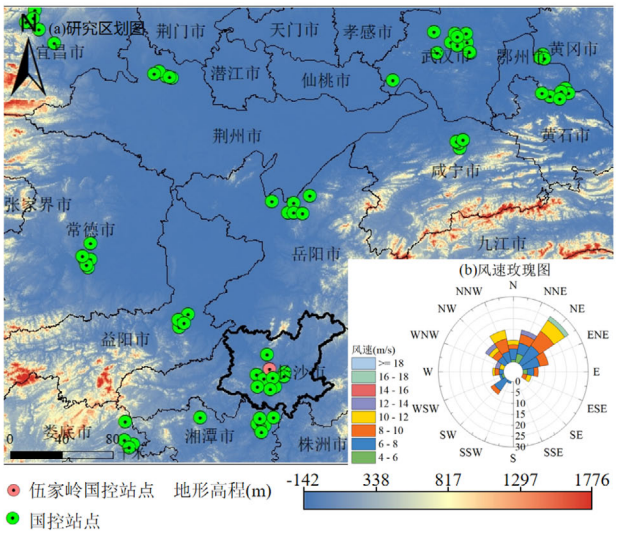



图 1 研究区示意

Fig.1 Location of study area

审图号:GS(2023)2767

1.1.1 实验时段选取与数据收集 本文选取了湖南生态环境部门报道的 2024 年 1 月 14 日、10 月 12 日和 10 月 27 日长沙发生的三次大气污染事件.这三次污染事件均发生在秋冬季节,属于污染传输频发时期[28-29],具有较强的代表性和复杂性,为验证算法的性能提供了理想的实验场景,其中研究所需的数据主要包括卫星遥感反演的近地面 $PM_{2.5}$ 浓度数据、国控站监测的 $PM_{2.5}$ 浓度数据以及气流轨迹数据.

$PM_{2.5}$ 浓度卫星遥感反演数据:本文使用的 $PM_{2.5}$ 浓度栅格数据,以 $PM_{2.5}$ 浓度国控站监测数据为真值,

结合葵花 8 号卫星遥感 AOD(气溶胶光学厚度)、ERA5-LAND 气象数据、中国土地覆盖数据集(CLCD)、SRTM 高程以及橡树岭国家实验室发布的人口数据,经过重采样和栅格化处理后,采用一维深度卷积神经网络(1D-CNN)进行浓度反演生成,具备较高的时空分辨率(空间分辨率为 2km,时间分辨率为 1h).模型基于样本、站点和时间 3 个维度的训练及验证结果如图 2 和图 3 所示.由于 AOD 数据受太阳光照限制,本文中卫星遥感反演的近地面 $PM_{2.5}$ 浓度栅格数据有效时段仅为每日 8:00 至 17:00.该高时空分辨率数据为光流法识别污染物在帧间的移动提供了数据基础.

$PM_{2.5}$ 浓度国控站监测数据:来源于中国环境监测总站提供的逐小时 $PM_{2.5}$ 质量浓度均值数据(https://air.cnemc.cn:18007/),为验证 FBD-TPRA 算法识别的传输路径是否符合城市间实际 $PM_{2.5}$ 浓度变化的时序特征提供了重要支撑.

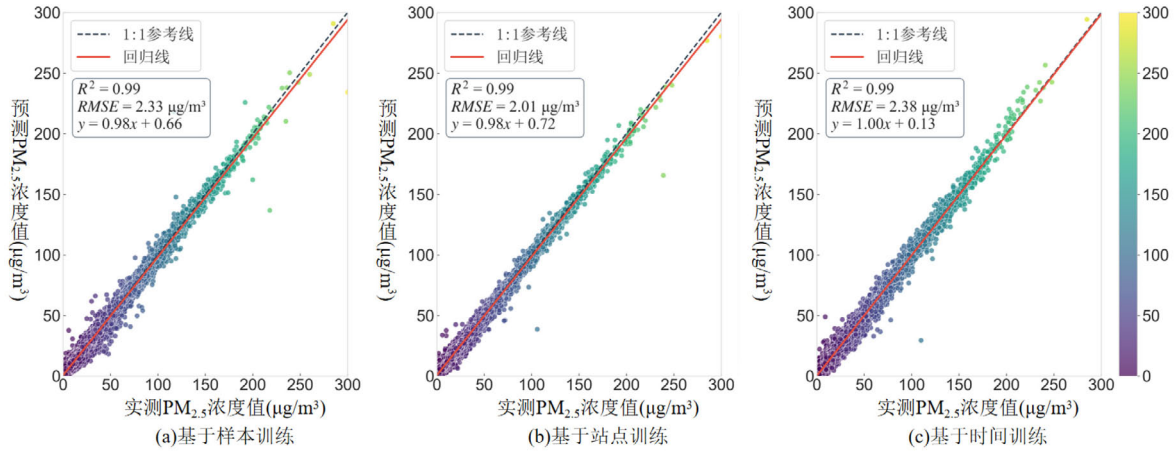



图 2　1D-CNN 模型训练密度散点图

Fig.2　Density scatter plot of 1D-CNN model training

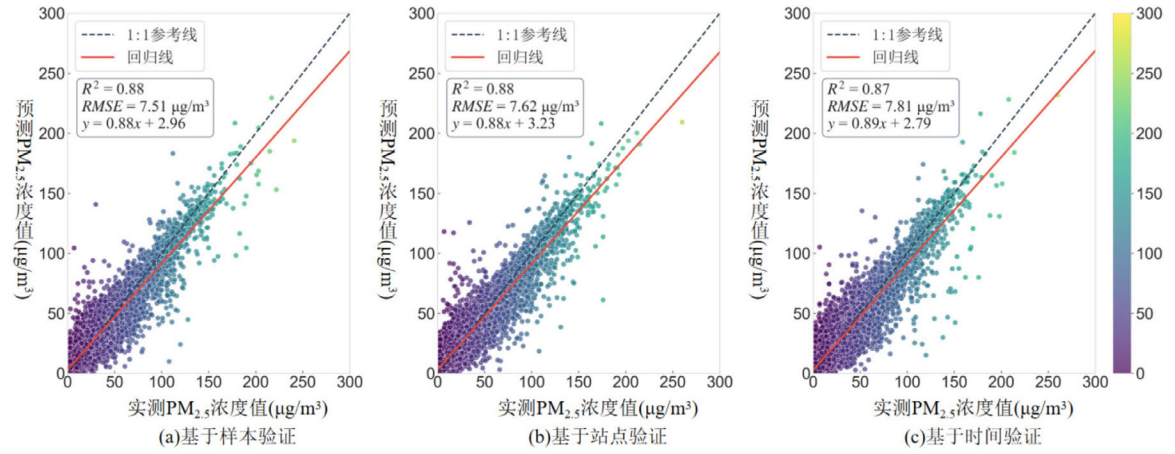



图 3　1D-CNN 模型验证密度散点图

Fig.3　Validation density scatter plot of the 1D-CNN model

气流轨迹数据:来源于美国国家环境预报中心(NCEP)的全球资料同化系统(GDAS)气象数据(ftp://arlftp.arlhq.noaa.gov/pub/archives/gdas1),空间分辨率为 1°×1°、时间分辨率为 6h,在大气污染传输路径研究中被广泛应用.为验证 FBD-TPRA 传输路径识别算法的有效性,本文利用 GDAS 数据通过 HYSPLIT 模拟污染物的传输路径,并将模拟结果与 FBD-TPRA 算法识别的路径进行对比分析.

## 1.2　FBD-TPRA 传输路径识别算法

FBD-TPRA 算法主要通过光流法计算高时空分辨率 $PM_{2.5}$ 浓度卫星遥感反演数据的逐帧网格矢量,结合移动距离阈值,重构连续的污染传输路径.本文对此设计了如图 4 所示的 3 个步骤的技术验证流程:①Farneback 光流计算:提取栅格数据帧间矢量;②移

动距离约束的传输路径识别:结合帧间矢量及移动距离约束,生成污染物的连续传输路径;③传输路径对比分析:通过与城市国控站点监测数据和 HYSPLIT 模拟路径对比,评估 FBD−TPRA 算法可靠性.

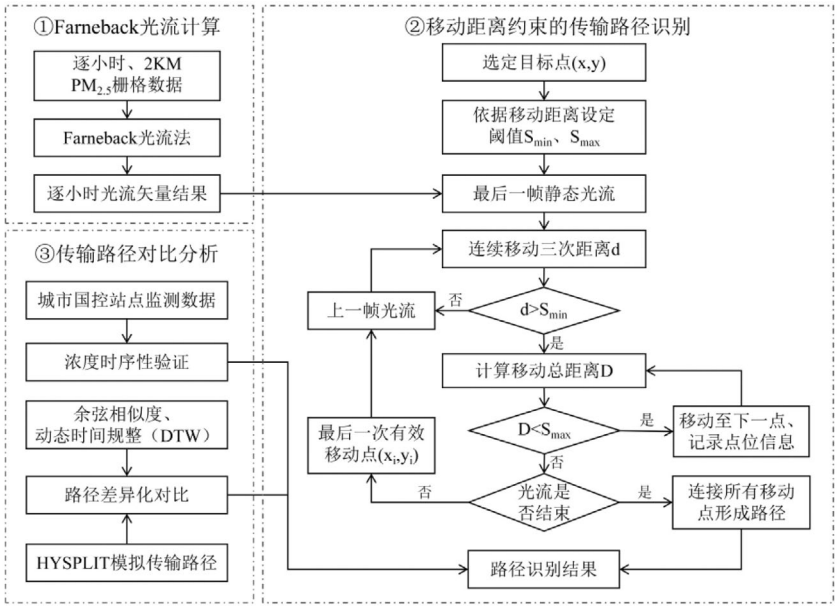



图 4 FBD−TPRA 传输路径识别技术路线

Fig.4 Technical workflow for transport pathway identification using FBD−TPRA

1.2.1 Farneback 光流计算 Farneback 光流法(Farneback Optical Flow)是一种经典的稠密光流计算方法,适用于图像序列中像素间位移的精确估算.该方法基于光照守恒假设,认为在短时间内像素点运动的过程中亮度不变[30],同时通过局部二次多项式展开模型对图像灰度进行近似,从而确定每个像素点的运动方向和距离[31].基本公式如下:

$$I(x,y,t)=I(x+\Delta x,y+\Delta y,t+\Delta t) \quad (1)$$

式中: $I(x,y,t)$ 表示时间 $t$ 时刻像素点 $(x,y)$ 的灰度值; $(\Delta x,\Delta y)$ 是运动矢量; $\Delta t$ 是时间间隔.

在大气污染传输研究中,污染物通过大气运动呈现出动态变化特性,光流法能够利用逐小时的高时空分辨率污染物栅格数据,捕捉污染物的运动变化情况.Farneback 光流法关注高污染浓度区域的运动特性,对变化较小的低污染浓度区域响应较弱,这一特点恰好符合大气污染传输研究的需求.

1.2.2 移动距离约束的传输路径识别 本文在光流法提取帧间矢量基础上,结合风速计算的移动距离约束,实现对污染物传输路径的连续识别.风速对污染物跨区域传输起着重要作用,特别是当风速达到或超过 3.0m/s 时,污染物的传输扩散能力显著增强,大气污染传输效率也随之提升[32-33].基于此,研究中选取 3.0m/s 作为速度阈值,并据此推算污染物的移动距离:在 $PM_{2.5}$ 浓度栅格数据的 2km 逐小时分辨率条件下,3.0m/s 的风速对应每小时移动距离至少为 10.8km,即超过 5.4 个栅格单元的空间范围.由于光流法的精细识别特性可能导致单次网格点的移动不足以达到上述阈值,从而遗漏部分污染传输路径.为弥补这一问题,避免路径无限制延伸导致的识别偏差,本文通过反复实验设计了以下约束条件:①最小移动距离:目标网格需在连续 3 次移动内达到 5.4 个栅格单元的总距离,以满足污染传输条件.②路径总长度限制:为防止路径过长导致误差,路径总长度被限制为不超过 60 个栅格单元.具体实现过程如下:

选取污染到达目标点$(x,y)$;在一帧光流之间计算目标点连续移动 3 次的距离 $d$;判断移动距离 $d$ 是否大于 5.4 个网格,如果不是则目标点不改变,进入上一帧,重新上一步骤;如果是,则继续移动并存储经过的所有点位置,计算目标点移动总距离 $D$;判断移动总距离 $D$ 是否小于 60 个网格,如果是则继续移动;如果不是,则获取最后一次有效移动点$(x_i,y_i)$,并判断整体光流是否结束;整体光流未结束,最后一次有效移动点$(x_i,y_i)$作为下一次光流计算的目标点,进入上一帧,重新计算距离 $d$;如果结束,完成传输路径的识别.

$$d=\sum_{i=1}^{3}\sqrt{(\text{flow}_x_{(i,j)}^{t})^2+(\text{flow}_y_{(i,j)}^{t})^2} \tag{2}$$

$$D=\sum_{i=1}^{n}\sqrt{(\text{flow}_x_{(i,j)}^{t})^2+(\text{flow}_y_{(i,j)}^{t})^2} \tag{3}$$

式中:$d$ 表示在 $t$ 时刻计算的光流矢量结果中,目标点连续移动三次的距离;$D$ 表示在 $t$ 时刻计算的光流矢量结果中,目标点总移动距离;$\text{flow}_x_{(i,j)}^{t}$ 和 $\text{flow}_y_{(i,j)}^{t}$ 分别表示在 $t$ 时刻网格位置($i$,$j$)处,$x$ 和 $y$ 方向上的移动情况.

1.2.3　传输路径对比分析　本文通过两种方法评估 FBD-TPRA 传输路径识别结果的可靠性:①对比国控站点城市 $PM_{2.5}$ 浓度监测数据开展时序变化一致性分析.基于国控站点逐小时 $PM_{2.5}$ 浓度监测数据,分析 FBD-TPRA 传输路径识别结果与途经城市 $PM_{2.5}$ 浓度变化的时空匹配性.根据污染物传输过程中各城市 $PM_{2.5}$ 浓度变化出现的时序先后关系验证 FBD-TPRA 算法识别的传输路径准确性.②与 HYSPLIT 模拟路径的对比分析.使用基于 HYSPLIT 模型开发的 Meteoinfo 软件[34]中的 TrajStat 工具模拟外来污染传输路径.以长沙市伍家岭站点为轨迹起始点,模拟时长 9h 的污染物传输路径,计算高度设定为 100m[23,27].本文分别采用余弦相似度(Cosine Similarity)和动态时间规整(Dynamic Time Warping,DTW)分析传输路径在净位移方向以及形态上的差异性.

余弦相似度是衡量两个向量方向相似性的一种方法,其值介于-1 到 1 之间.值越接近 1,表示两个两条路径的净位移方向越一致.计算公式如下:

$$\cos(\Delta\theta)=\frac{\vec{A}\cdot\vec{B}}{\left\|\vec{A}\right\|\left\|\vec{B}\right\|} \tag{4}$$

式中:$\vec{A}$、$\vec{B}$ 分别代表两条路径的方向矢量,$\left\|\vec{A}\right\|$、$\left\|\vec{B}\right\|$ 代表矢量模长,$\cos(\Delta\theta)$ 代表两路径首尾方向的余弦相似度.

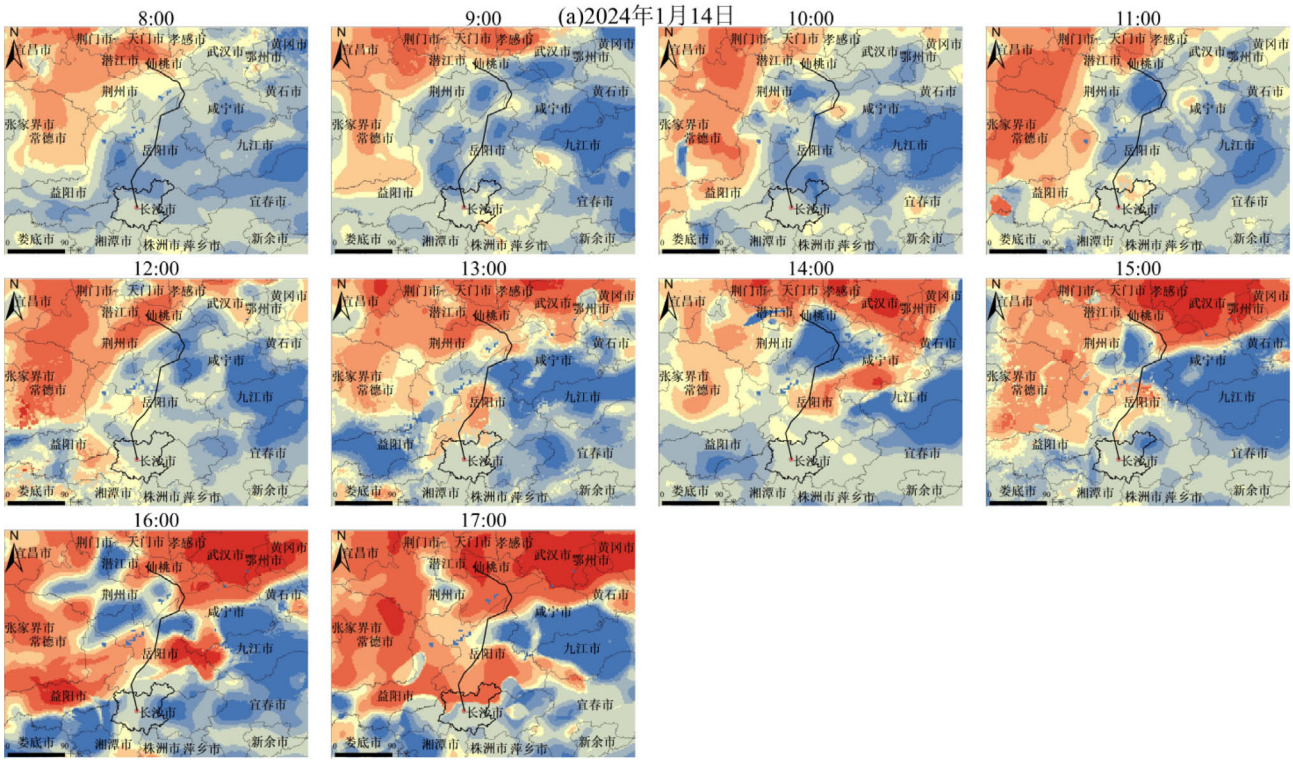
动态时间规整(DTW)是一种用于时间序列数据比较的经典方法,通过对比两条路径的坐标序列,衡量它们在传输过程中形态上的差异.DTW 允许路径在时序上存在非线性匹配,通过计算两条路径点之间的对齐距离,衡量路径形态的差异性,其值越大,代表路径形态差异越明显.公式如下:

$$DTW(p_1,p_2)=\min(\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(p_{1i}-p_{2j})^2}) \tag{5}$$

式中:$p_1$ 和 $p_2$ 分别为两条路径的坐标序列,$i$ 和 $j$ 表示路径上对应点的索引.

## 2　结果与分析

### 2.1　FBD-TPRA 传输路径识别



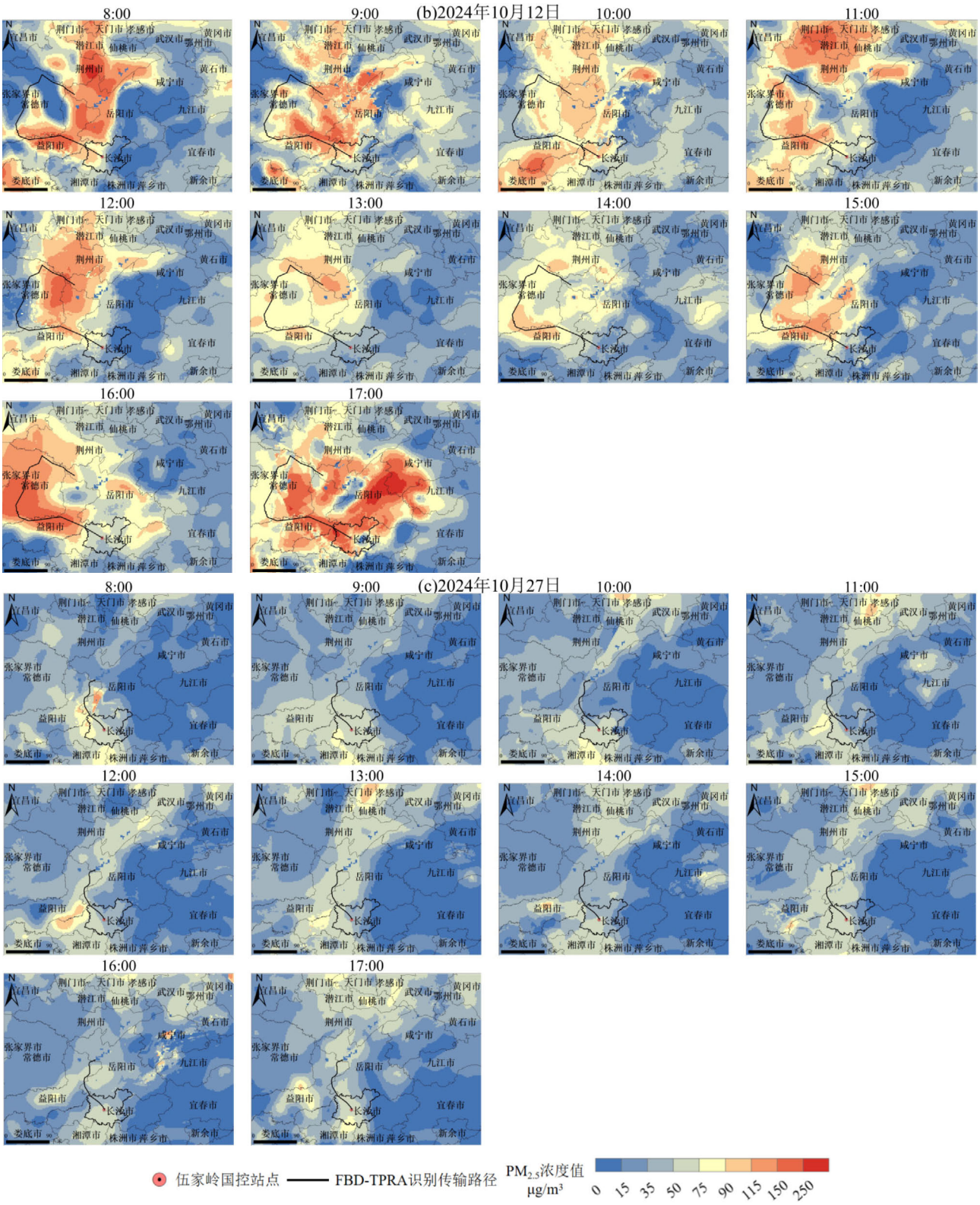



图 5 三次 $PM_{2.5}$ 污染事件 FBD−TPRA 传输路径识别结果

Fig.5 FBD−TPRA transport pathway identification results for three $PM_{2.5}$ pollution episodes

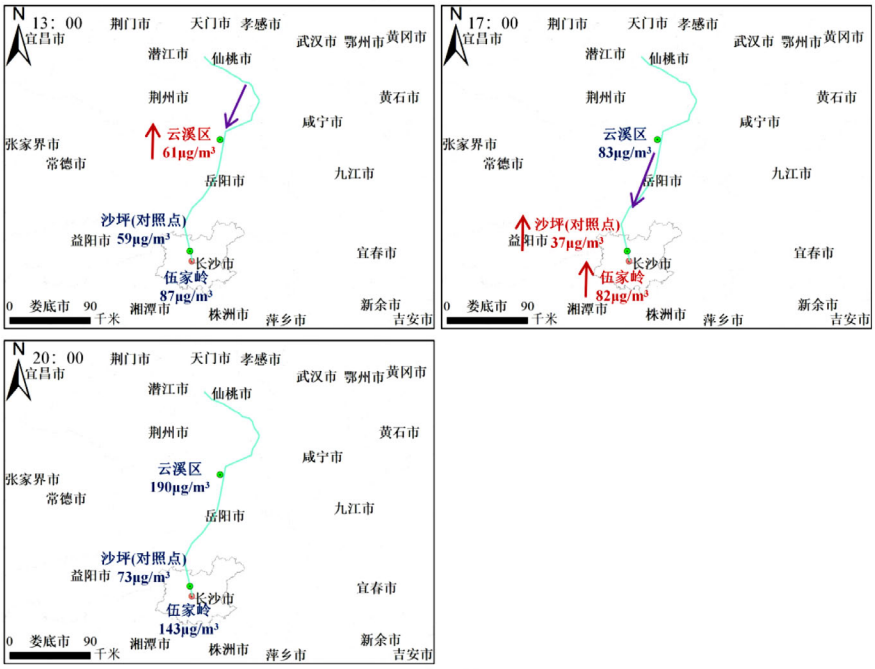
利用光流法提取的污染帧间运动矢量,结合移动距离约束,本文生成了图 3 所示的 FBD−TPRA 传输路径.实验结果表明,1 月 14 日的 $PM_{2.5}$ 污染事件中(图 5(a)),污染初期主要集中于荆门、天门、宜昌和常德等西北方向区域,区域内污染浓度较高且呈现明显累积;随后,污染物逐步向西南扩散至益阳,并在仙桃、武汉

和孝感等地出现浓度迅速增长,最终沿由仙桃经荆州、岳阳传输至长沙的路径输送.10 月 12 日的污染事件(图 5(b))则展现出“先分散后积聚”的传输态势,$PM_{2.5}$ 初期主要分布于益阳、常德和岳阳,随后向北扩散至荆州,同时向西南传输至娄底,最终沿半圆弧形路径汇聚于长沙.10 月 27 日事件中, $PM_{2.5}$ 污染呈现出南北贯通的特征,如图 5(c)所示.FBD−TPRA 算法通过帧间运动矢量与移动距离约束的耦合,追踪了外来 $PM_{2.5}$ 传输至伍家岭的完整路径.具体而言,1 月 14 日、10 月 12 日和 10 月 27 日三次以 $PM_{2.5}$ 为主的大气污染事件分别沿仙桃−荆州−岳阳−长沙、岳阳−常德−益阳−长沙以及岳阳−益阳−长沙的路径传输,且所识别的路径结果与湖南省各级生态环境部门发布的污染过程解析结果具有较好的一致性[35-38].

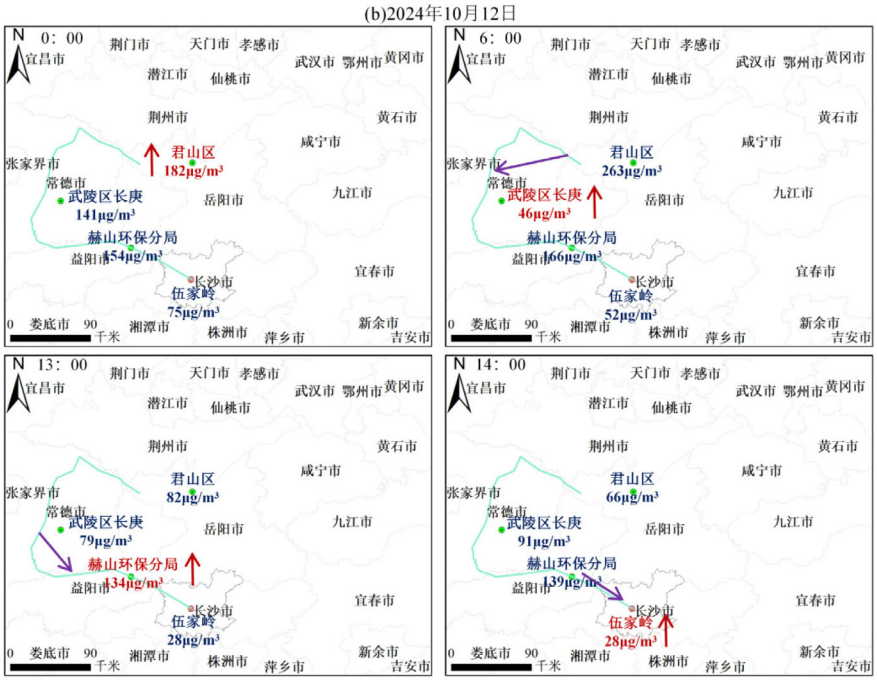
## 2.2　基于国控站点监测数据对比验证

国控站点监测浓度的先后变化情况可直观体现污染物的传输过程.本文通过对比所识别路径途经站点 $PM_{2.5}$ 浓度的变化趋势,判断 FBD−TPRA 算法是否准确刻画了污染物从源区向下风向区域的传输过程,从而验证其识别结果的可靠性.

(a)2024年1月14日




(b)2024年10月12日



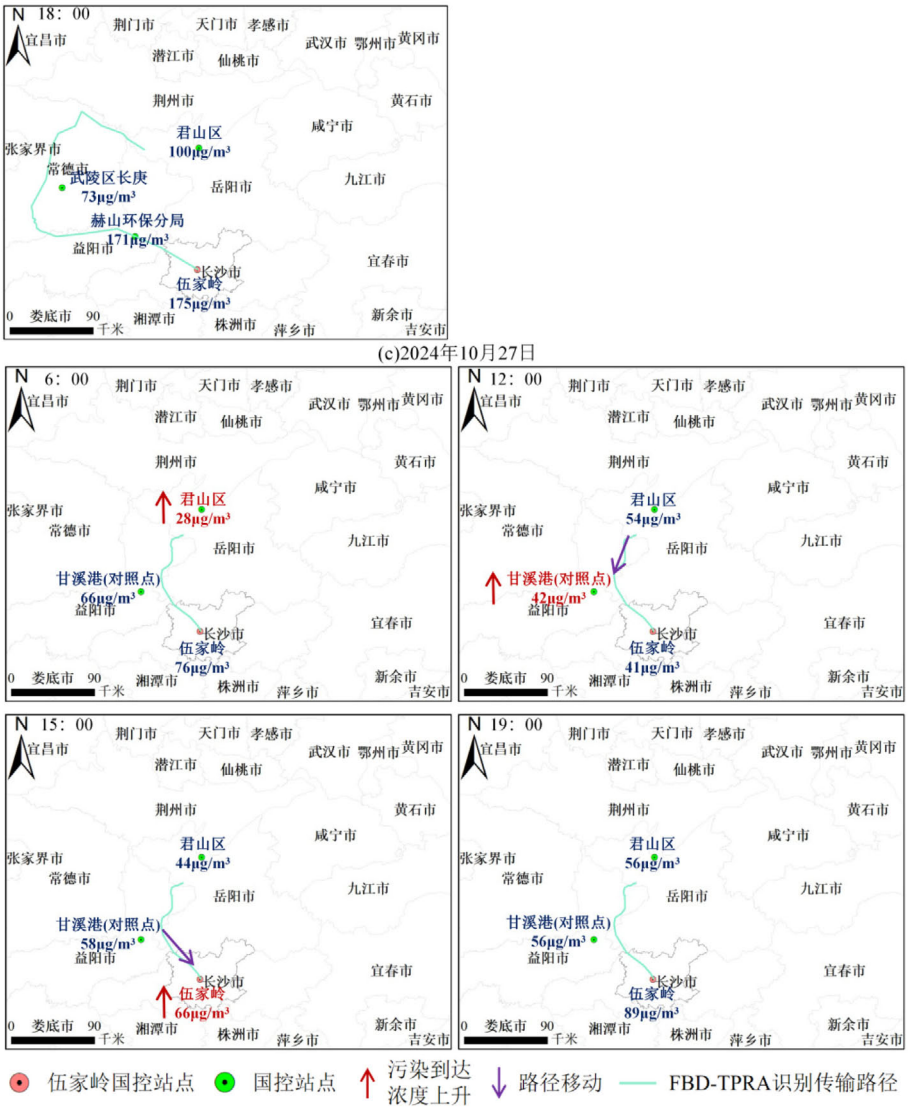



图 6 三次污染事件途经城市国控站点 $PM_{2.5}$ 浓度时序变化

Fig.6 Temporal variations of $PM_{2.5}$ concentrations at state-controlled monitoring sites in cities along transport pathways during three pollution episodes

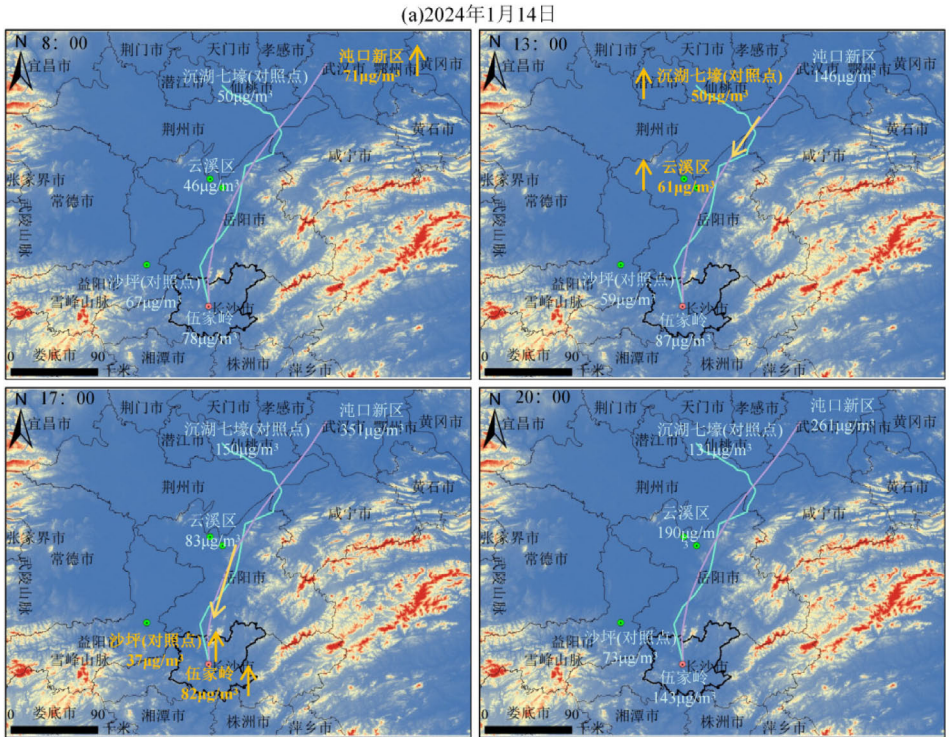
如图 6(a)显示,1 月 14 日,位于上风向的岳阳市云溪区站点 $PM_{2.5}$ 浓度 13 时率先开始上升;随后伴随着污染的传输扩散,下风向长沙市沙坪站点(作为对照点)和伍家岭站点的 $PM_{2.5}$ 浓度 17 时实现显著攀升,分别由 17 时的 37μg/m$^3$ 和 82μg/m$^3$ 增加至 20 时的 73μg/m$^3$ 和 143μg/m$^3$.10 月 12 日(图 6(b)),国控站点数据呈现出明显的时序变化,岳阳、常德、益阳及长沙的 $PM_{2.5}$ 浓度分别在当天 0 时、6 时、13 时和 14 时出现波动并依次上升,其中长沙市伍家岭站点在 14 时至 18 时期间的浓度由 28μg/m$^3$ 迅速攀升至 175μg/m$^3$.图 6(c)中,10 月 27 日的传输路径经过岳阳、益阳和长沙 3 个区域,岳阳市君山区站点的 $PM_{2.5}$ 浓度于 6 时开始上升,随后下风向的常德市武陵区长庚站点 $PM_{2.5}$ 浓度在 12 时出现上升,最终长沙市伍家岭站点在 15 时受到外来污染传输影响,$PM_{2.5}$ 浓度由 66μg/m$^3$ 上升至 19 时的 89μg/m$^3$.

结果表明,FBD-TPRA 算法识别出的传输路径(仙桃-荆州-岳阳-长沙、岳阳-常德-益阳-长沙、岳阳-益阳-长沙)与各城市污染物浓度上升的先后顺序相吻合.这种一致性不仅验证了 FBD-TPRA 算法所识别的传输路径的可靠性,同时还展现了该算法在解析大气污染局地传输细节方面具有一定的精准性.

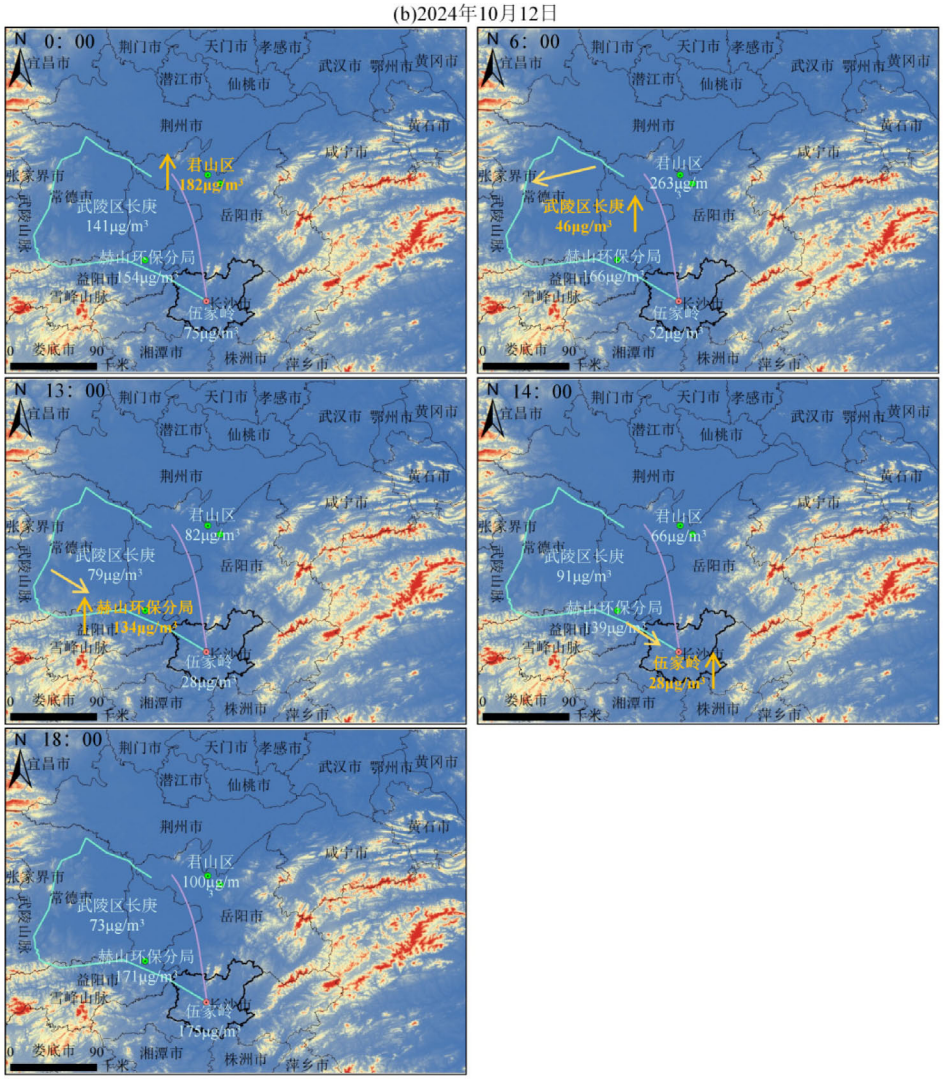
## 2.3 污染传输路径对比分析

HYSPLIT 模型是一种混合单粒子拉格朗日综合轨迹模型,通过计算后向轨迹模拟污染物的传输路径,在大气污染传输研究中得到广泛应用.

(a)2024年1月14日




(b)2024年10月12日



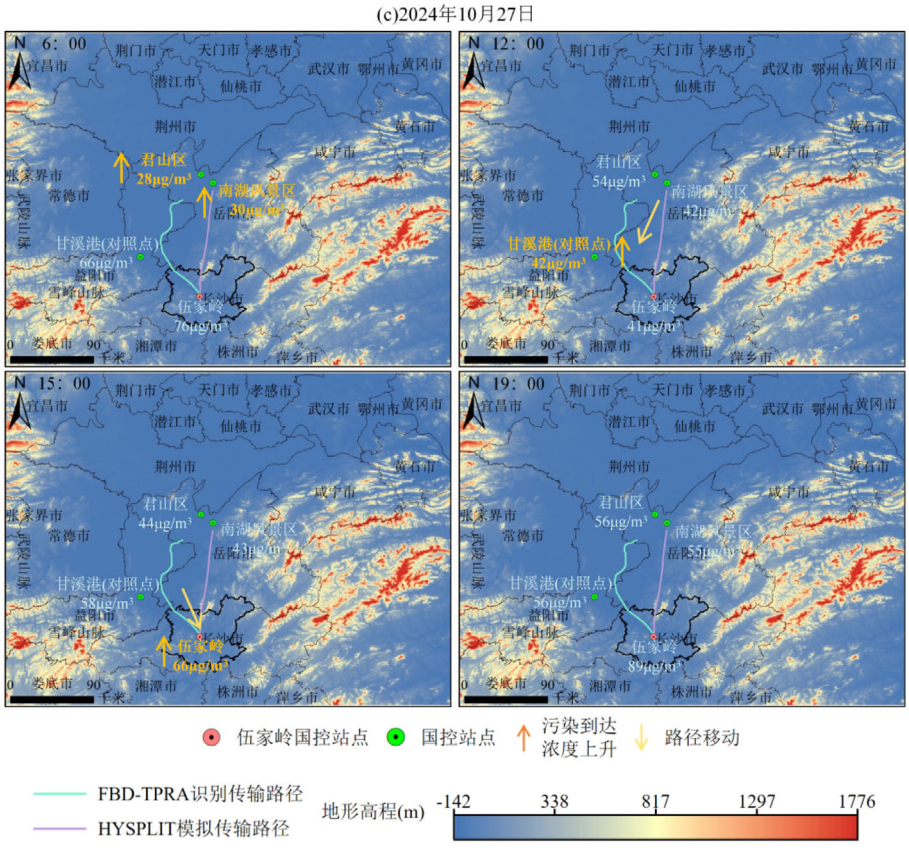



图 7 三次污染事件 FBD-TPRA 与 HYSPLIT 传输路径识别结果对比

Fig.7 Comparison of transport pathway identification results between FBD-TPRA and HYSPLIT during three pollution episodes

因此,本文通过与 HYSPLIT 模拟路径的对比分析,进一步解析 FBD-TPRA 算法在污染物传输路径识别中的优越性.图 7 显示,两种算法识别的传输路径在整体传输方向上均呈现由北向南的趋势,具有较好的一致性,净位移方向余弦相似度达 0.93、0.99 和 0.95,但在局部路径在形态上存在差异.如图 7(a),受咸宁市区域内地势起伏影响,1 月 14 日 FBD-TPRA 算法识别的传输路径在由仙桃向东南方向传输过程中发生偏转.相较于 HYSPLIT 模拟路径显示出的岳阳至长沙的“直线式”传输态势,图 7(b)10 月 12 日 FBD-TPRA 识别的传输路径能够响应常德与益阳之间武陵山脉(最高峰约 2572m)与雪峰山脉(最高峰约 1934m)的阻碍作用影响,大气污染呈现出沿山脉边缘向东南偏转后最终汇聚于长沙的现象.同时 DTW 计算结果 2.99°、9.58°和 3.69°,进一步印证了两者在路径细节上的差异.

## 3 结论

### 3.1 逐小时公里级高分辨率卫星遥感反演污染浓度数据,可为基于光流法的污染帧间运动特征提取和引入移动距离约束实现大气污染传输路径重构提供关键的数据基础.

### 3.2 FBD-TPRA 算法识别的湖南省长沙市三次典型大气污染传输路径(仙桃-荆州-岳阳-长沙、岳阳-常德-益阳-长沙、岳阳-益阳-长沙),能准确反映污染物从源区向下风方向传输的扩散过程,合理解释途径各城市污染物浓度的先后变化.

### 3.3 相比传统 HYSPLIT 模拟,FBD-TPRA 算法识别路径与其在净位移方向上具有较高的一致性,余弦相似度最高达 0.99.同时可响应地形等因素带来的影响,局地路径形态刻画更加精准,DTW 分别为 2.99°、9.58°和 3.69°.

**参考文献:**

[1] 姚 森,张晗宇,王晓琦,等.2016 年 1 月京津冀地区大气污染特征与多尺度传输量化评估 [J]. 环境科学, 2021,42(2):534-545.
Yao S, Zhang H Y, Wang X Q, et al. Air pollution characteristics and quantitative evaluation of multi-scale transport in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in January, 2016 [J]. Environmental Sciences,

2021,42(2):534−545.

[2] Ramanathan V, Feng Y. Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives [J]. Atmospheric Environment, 2009,43(1):37−50.

[3] 饶晓琴,张碧辉,江　琪,等.东南亚生物质燃烧对云南边境污染传输影响 [J]. 中国环境科学, 2023,43(9):4459−4468.
Rao X Q, Zhang B H, Jiang Q, et al. Effects of biomass burning in Southeast Asia on pollution transport in Yunnan border area [J]. China Environmental Science, 2023,43(9):4459−4468.

[4] 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.

[5] 王　芳,陈东升,程水源,等.基于气流轨迹聚类的大气污染输送影响 [J]. 环境科学研究, 2009,22(6):637−642.
Wang F, Chen D S, Cheng S Y, et al. Impacts of air pollutant transport based on air trajectory clustering [J]. Environmental Science Research, 2009,22(6):637−642.

[6] 康宝荣,刘立忠,刘焕武,等.关中地区秋冬季颗粒物二次有机碳的估算 [J]. 中国环境科学, 2019,39(9):3663−3670.
Tang B R, Liu L Z, Liu H W, et al. Estimation of secondary organic carbon in $PM_{2.5}$ and $PM_{10}$ in Guanzhong area in autumn and winter [J]. China Environmental Science, 2019,39(9):3663−3670.

[7] Chang X, Wang S X, Zhao B, et al. Contributions of inter−city and regional transport to $PM_{2.5}$ concentrations in the BeijingTianjin−Hebei region and its implications on regional joint air pollution control [J]. Science of the Total Environment, 2019, 660:1191−1200.

[8] 彭　玏,赵媛媛,赵吉麟,等.京津冀大气污染传输通道区大气污染时空格局研究 [J]. 中国环境科学, 2019,39(2):449−458.
Peng G, Zhao Y Y, Zhao J L, et al. Spatiotemporal patterns of air pollution in air pollution transmission channel of Beijing−Tianjin−Hebei from 2000 to 2015 [J]. China Environmental Science, 2019, 39(2):449−458.

[9] 罗　彪,刘　暄.基于后向轨迹模式下的合肥市大气污染来源研究 [J]. 中国科学技术大学学报, 2019,49(4):321−328.
Luo B, Liu X. Investigation on the source of air pollutants in Hefei city based on backward trajectory model [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2019,49(4):321−328.

[10] 陈佳欣.典型情景下武汉市 $PM_{2.5}$ 和 $O_3$ 污染形成机制和控制策略模拟研究 [D]. 武汉:武汉华中科技大学, 2023.
Chen J X. Simulation study of $PM_{2.5}$ and $O_3$ pollution formation mechanisms and control strategies in Wuhan under typical scenarios [D]. Wuhan: Wuhan Huazhong University of Science and Technology, 2023.

[11] 潘　勇,郑　捷,肖　航.长三角地区典型 $PM_{2.5}$ 污染过程和跨区域传输对宁波污染贡献评估模拟 [J]. 环境科学, 2023,44(2):634−645.
Pan Y, Zheng J, Xiao H. Simulation evaluation of the contribution of typical $PM_{2.5}$ pollution and trans−regional transport to Ningbo pollution in the Yangtze River Delta [J]. Environmental Science, 2023, 44(2): 634−645.

[12] 王继康,花　丛,桂海林,等.2016 年 1 月我国中东部一次大气污染物传输过程分析 [J]. 气象, 2017,43(7):804−812.
Wang J K, Hua C, Gui H L, et al. Transport of $PM_{2.5}$ of the haze pollution episode over Mid−Eastern China in January 2016 [J]. Meteorology, 2017,43(7): 804−812.

[13] 张天浩.高时空分辨气溶胶遥感反演及其在大气污染排放和传输中的应用研究 [D]. 武汉:武汉大学, 2020.
Zhang T H. High spatial and temporal resolution remote sensing based aerosol optical depth retrieval and its application in atmospheric environment [D]. Wuhan: Wuhan University, 2020.

[14] 王郭臣,王　珏,信玉洁,等.天津 $PM_{10}$ 和 $NO_2$ 输送路径及潜在源区研究 [J]. 中国环境科学, 2014,34(12):3009−3016.
Wang G C, Wang J, Xin Y J, et al. Transportation pathways and potential source areas of $PM_{10}$ and $NO_2$ in Tianjin [J]. China Environmental Science, 2014,34(12):3009−3016.

[15] 任浦慧,解静芳,姜洪进,等.太原市大气 $PM_{2.5}$ 季节传输路径和潜在源分析 [J]. 中国环境科学, 2019,39(8):3144−3151.
Ren P H, Jie J F, Jiang H J, et al. Transport pathways and potential sources of $PM_{2.5}$ in different seasons in Taiyuan city [J]. China Environmental Science, 2019,39(8):3144−3151.

[16] 孙　雪,刘子贺,李　轲,等.基于后向轨迹模式的区域大气污染及传输特征分析 [J]. 环境监测管理与技术, 2022,34(3):25−29.
Sun X, Liu Z H, Li K, et al. Analysis of regional air pollution and transmission characteristics based on backward trajectory model [J]. Environmental Monitoring Management and Technology, 2022,34(3): 25−29.

[17] 崔　宏,刘　肖,秦巧燕.汾渭平原典型污染城市 $PM_{2.5}$ 来源分布及传输分析 [J]. 环境工程技术学报, 2022,12(5):1593−1600.
Cui H, Liu X, Qin Q Y. $PM_{2.5}$ source distribution and transmission analysis in typical polluted cities of Fenwei Plain [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022,12(5):1593−1600.

[18] Chen J P, Yin J H, Zang L, et al. Stacking machine learning model for estimating hourly $PM_{2.5}$ in China based on Himawari 8 aerosol optical depth data [J]. Science of the Total Environment, 2019, 697.

[19] 吴　迪,杜　宁,王　莉,等.基于 GTWR−XGBoost 模型的四川省 $PM_{2.5}$ 小时浓度估算 [J]. 环境科学, 2023,44(7):3738−3748.
Wu D, Du Y, Wang L, et al. Estimation of $PM_{2.5}$ hourly concentration in Sichuan Province based on GTWR−XGBoost model [J]. Environmental Sciences, 2023,44(7):3738−3748.

[20] 杨　欢.基于光流的微小型飞行器目标检测和姿态估计方法研究 [D]. 北京:北京理工大学, 2016.
Yang H. Optical flow method based moving objects detection and attitude information estimation of UAVs [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.

[21] 武龙冬.基于光流的机器人视觉避障技术研究 [D]. 沈阳:辽宁大学, 2017.
Wu L D. Research on obstacle avoidance technology of robot vision based on optical flow [D]. Shenyang: Liaoning University, 2017.

[22] 赵　悦,储开斌,张　继,等.面向复杂环境的特征匹配算法 [J]. 计算机应用与软件, 2025,42(1):264−270,293.
Zhao Y, Chu K B, Zhang J, et al. Feature point matching algorithms for complex environments [J]. Computer Applications and Software, 2025,42(01):264−270,293.

[23] 熊　健,冯徽徽,丁　莹,等.长沙地区 $PM_{2.5}$ 传输路径和潜在源区时空分析 [J]. 环境科学学报, 2021,41(9):3663−3672.

Xiong J, Feng H H, Ding Y, et al. Spatial and temporal analysis of $PM_{2.5}$ transmission paths and potential sources regions in Changsha Region [J]. Journal of Environmental Science, 2021,41(9):3663-3672.

[24] 胡晨霞,邹 滨,李沈鑫,等.城市微环境 $PM_{2.5}$ 浓度空间分异特征分析 [J]. 中国环境科学, 2018,38(3):910-916.
Hu C X, Zou B, Li S X, et al. Spatial heterogeneity analysis of $PM_{2.5}$ concentrations in intra-urban microenvironments [J]. China Environmental Science, 2018,38(3):910-916.

[25] 曾 欣,舒 磊,张 靖,等.长株潭区域一次重度污染过程气象成因 [J]. 中国环境监测, 2023,39(5):183-192.
Zeng X, Shu L, Zhang J, et al. Meteorological cause of a heavy pollution process in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan region [J]. Environmental monitoring in China, 2023,39(5):183-192.

[26] 李细生,陈 媛,张克非,等.长株潭大气重污染的成因分型和冷空气侵入型路径 [J]. 四川环境, 2023,42(6):37-44.
Li X S, Chen Y, Zhang K F, et al. Causes classification and cold air intrusion path of heavy air pollution in Chang Zhu Tan [J]. Sichuan Environment, 2023,42(6):37-44.

[27] 丁 莹,冯徽徽,邹 滨,等.长株潭城市群气溶胶时空分布与传输规律 [J]. 中国环境科学, 2020,40(5):1906-1914.
Ding Y, Feng H H, Zou B, et al. Spatial-temporal distribution and transport characteristic of aerosol in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration [J]. China Environmental Science, 2020,40(5): 1906-1914.

[28] 周 莉,兰明才,张舰齐,等.2017 年冬季长沙一次重度霾污染天气过程气象成因分析 [J]. 气象与环境学报, 2019,35(3):45-51.
Zhou, L, Lan M C, Zhang J Q, et al. Characteristics and causes of a heavy haze event in Changsha during winter of 2017 [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2019,35(3):45-51.

[29] 朱家亮,贺 科,张 敏,等.长沙市大气污染特征的气象条件分析 [J]. 环保科技, 2022,28(6):54-61.
Zhu J L, He K, Zhang M, et al. Analysis of meteorological conditions of air pollution characteristics in Changsha City [J]. Environmental Technology, 2022,28(6):54-61.

[30] Horn B, Schunck B. Determiningopticalflow [J]. ArtificialIntelligence, 1981,17(13):185-203.

[31] Farnebäck G. Two-frame motion estimation based on polynomial expansion [C]//Image Analysis: 13th Scandinavian Conference, SCIA 2003 Halmstad, Sweden, June 29–July 2, 2003 Proceedings 13. Springer Berlin Heidelberg, 2003:363-370.

[32] 蒋维楣,刘红年,张 宁,等.空气污染气象学 [M]. 南京:南京大学出版社, 2021:120-125.
Jiang W M, Liu H N, Zhang N, et al. Air pollution meteorology [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2021:120-125.

[33] 赵旭辉,童欢欢,王含月,等.合肥市冬季颗粒物污染传输通道分析及通量研究 [J]. 中国环境监测, 2022,38(3):43-52.
Zhao X H, Tong H H, Wang H Y, et al. Study on the transmission channels and fluxes of particulate pollution in Hefei in winter [J]. Environmental monitoring in China, 2022,38(3):43-52.

[34] Wang Y Q, Zhang X Y, Draxler R R. TrajStat:GIS-based software that uses various trajectory statistical analysis methods to identify potential sources from long-term air pollution measurement data [J]. Environmental Modelling&Software, 24(8): 938-939.

[35] 湖南生态环境.刚刚,长沙启动重污染天气黄色预警 [EB/OL]. https://mp.weixin.qq.com/s/i1d1EkHJeY6hj0xKejr_uQ,2024-1-14.
Hunan ecological environment. Just now, Changsha started the yellow warning of heavy pollution weather [EB/OL]. https://mp.weixin.qq.com/s/i1d1EkHJeY6hj0xKejr_uQ,2024-1-14.

[36] 湖北生态环境.污染气团过境 雾霾来势汹汹 预计湖北省空气质量 16 日整体转好 [EB/OL]. https://mp.weixin.qq.com/s/h2lrczo-7E-X9BbCRMFlGg,2024-1-15.
Hubei ecological environment. It is estimated that the air quality in Hubei Province will be improved on the 16th day [EB/OL]. https://mp.weixin.qq.com/s/h2lrczo-7E-X9BbCRMFlGg,2024-1-15.

[37] 湖南生态环境.长沙启动重污染天气黄色预警!请市民注意防范 [EB/OL].https://mp.weixin.qq.com/s/ScCUu2xHVSPJuXCBB_nqTA, 2024-10-13.
Hunan ecological environment. Changsha start heavy pollution weather yellow warning! Please pay attention to prevent [EB/OL]. https://mp.weixin.qq.com/s/ScCUu2xHVSPJuXCBB_nqTA,2024-10-13.

[38] 湖南生态环境.刚刚!我省 2 市启动重污染天气黄色预警 [EB/OL]. https://mp.weixin.qq.com/s/T_DFLiYUPveOAuMPtXLkUw,2024-10-28.
Hunan ecological environment. Just! Yellow warning of heavy pollution weather launched in two cities of our province [EB/OL]. https://mp.weixin.qq.com/s/T_DFLiYUPveOAuMPtXLkUw,2024-10-28.

**作者简介:** 贺威文(2000-),男,重庆人,中南大学硕士研究生,主要研究方向为城市大气污染跨区域传输的遥感定性定量解析.发表论文 1 篇. 956811749@qq.com.