

拉格朗日后向轨迹模型(HYSPLIT)主要参数对模拟结果影响规律的研究

姚悦¹ 张成福^{1*} 王雨晴² 冯霜¹ 苗林¹

1 内蒙古农业大学 沙漠治理学院 2 赤峰学院 资源环境与建筑工程学院

DOI:10.12238/as.v8i11.3474

[摘要] 拉格朗日后向轨迹模型(HYSPLIT)在污染物传输与扩散模拟领域具有广泛的应用,但模型中参数的设定方法对轨迹有一定的影响。为找到模型参数影响轨迹的规律,本研究以模拟运算一场过境北京市的沙尘天气为对象,分析了模型参数对沙尘暴轨迹的影响。结果发现距地面高度参数大小取决于沙尘气溶胶颗粒的粒径差异分布特征;运行起始时刻参数取决于沙尘浓度峰值与能见度谷值的时空耦合节点,以及UTC与CST的时间换算;运行总时间取决于沙尘暴事件的周期长短。模型参数的准确设定能有效捕捉沙尘物质传输轨迹。

[关键词] HYSPLIT模型; 参数; 沙尘暴

中图分类号: O571.21+1 **文献标识码:** A

Research on the Influence Law of the main Parameters of the Lagrange Backward Trajectory Model (HYSPLIT) on the simulation results

Yue Yao¹ Chengfu Zhang^{1*} Yuqing Wang² Shuang Feng¹ Lin Miao¹

1 College of Desert Control, Inner Mongolia Agricultural University

2 School of Resources, Environment and Architectural Engineering, Chifeng University

[Abstract] The Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) model is widely used in the field of pollutant transport and diffusion simulation, but the setting method of parameters in the model has a certain impact on the trajectories. To identify the laws governing how model parameters influence trajectories, this study focused on simulating a dust storm event passing through Beijing, analyzing the effects of model parameters on dust storm trajectories. The results showed that the parameter of height above the ground depends on the size distribution characteristics of dust aerosol particles; the parameter of initial run time is determined by the spatiotemporal coupling node of the dust concentration peak and visibility valley, as well as the time conversion between UTC and CST; and the total run time is dependent on the duration of the dust storm event. Accurate setting of model parameters can effectively capture the transport trajectories of dust substances.

[Key words] HYSPLIT model; parameter; sand-dust storm

引言

混合单粒子拉格朗日积分轨迹模型(Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model, HYSPLIT)通过前向和后向的轨迹跟踪,模拟大气污染物的轨迹,扩散和沉积过程^[1]。

HYSPLIT模式广泛应用于沙尘暴传输路径、扩散范围及强度变化的模拟^[2]。马玉芬等人对2010年3月12日12时和田站距地面100m高度空气质点的3d前向轨迹进行了模拟,结果表明GDAS与GBL资料模拟的轨迹高度一致^[3]。借助HYSPLIT模型,Alzaid等人确定了伊拉克和叙利亚等北部地区是沙特阿拉伯东部受灾区

域严重沙尘暴的主要来源地,同时证实了模型的准确性极高(实测值与模拟值的 R^2 达到了0.9965)^[4]。陈俊言等人利用该模型准确反演了2020年4月戈壁沙漠沙尘向青藏高原的传输路径^[5]。

影响沙尘暴的路径有很多因素。获取特定沙尘暴的准确路径,需要调节许多参数,这是该模型使用的瓶颈^[6-9]。本研究目的是弄清影响沙尘暴路径最主要的参数,及各参数对沙尘路径影响的规律,以期方便、快速、准确获得沙尘传输路径。

1 研究方法

1.1 研究区概况。来自我国北方和蒙古国南部的沙尘暴影响

着京津冀和黄河中下游地区的大气环境。中国北方地区和蒙古国南部地区位于欧亚大陆内陆,受温带大陆性气候主导,年降水量低,属于干旱半干旱气候区。这些地区广泛分布着风沙土(如内蒙古浑善达克沙地、新疆塔克拉玛干沙漠边缘)和棕钙土、灰钙土,土壤颗粒粗、孔隙大,易受风力侵蚀^[10-12]。蒙古国南部戈壁地区土壤以砾质戈壁土和沙质荒漠土为主,地表多裸露砾石或沙丘^[13-14]。这些地区植被覆盖率较低,是重要的沙尘源区。本研究以2007年3月31日到达北京市的沙尘暴为对象,分析HYSPLIT模型中影响沙尘暴路径的参数。

1.2数据来源。沙尘暴的发生时间来源于《沙尘天气年鉴》;沙尘浓度数据来自国家气象信息中心-中国气象数据网(<https://data.cma.cn/site/index.html>)。再分析气象数据资料(National Center for Environmental Prediction, global final analysis)来源于NOAA官方网(<https://www.ready.noaa.gov/archives.php>),其垂直层数26层,水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,时间间隔为6h,满足中尺度气象模拟需求。

拉格朗日后向轨迹模型HYSPLIT模型是由Draxler等开发,用于PM10污染物(粒径小于 $10 \mu\text{m}$)扩散与传输的数值模拟。该模式凭借先进的算法与强大的数据处理能力,能够精准模拟PM10污染物在大气环境中的动态变化过程,细致刻画其扩散路径与传输轨迹^[16]。HYSPLIT模型来自NOAA官方网站^[15]。

1.3参数特性的分析。

1.3.1距地面高度(Above Ground Level)。在沙尘暴过程中,沙尘气溶胶颗粒粒径分布呈现显著的垂直分层分布特征。大颗粒沙尘受重力沉降作用影响显著,主要分布于近地面边界层内,其传输过程与地表粗糙度、近地层风速切变密切相关;而微小颗粒沙尘可随上升气流进入自由大气,其扩散范围受中高层大气环流调控更为显著。HYSPLIT模型可输出多层高度轨迹数据,通常是3层,而每层高度的设置需参考文献或根据当地地形确定。本研究设置三组不同高度,分别为a: 100m、300m、500m; b: 1000m、1500m、2000m; c: 2500m、3000m、3500m。依次进行后向轨迹运算,然后对得到的轨迹图像进行对比。

在HYSPLIT模拟框架下,轨迹线的空间形态特征可作为沙尘暴发生的间接判据。两点间轨迹线段长度与风速大小呈正相关关系,该特征在多组模拟结果的图像对比分析中,可作为评估不同时段风速变化的辅助判据。

1.3.2运行起始时刻(starting time)。模型输入时刻对应着特定区域气团运动能量峰值与边界层结构最不稳定状态,其动力学特征对后续颗粒物传输路径的模拟精度具有决定性影响。选择合适的时刻作为轨迹起点,可最大限度捕获沙尘气溶胶的初始扩散动力,为后续轨迹模拟提供更贴合真实动力过程的初始条件,进而提升源解析与扩散特征模拟的科学可靠性。

本研究对比三种运行起始时刻设定方法。第一种方法为随机设定运行起始时刻;第二种方法为依据沙尘浓度峰值与能见度谷值的时空耦合节点;第三种方法是在第二种方法基础上将当地时间换算为世界统一时间(Universal Time Coordinated, UTC)。第

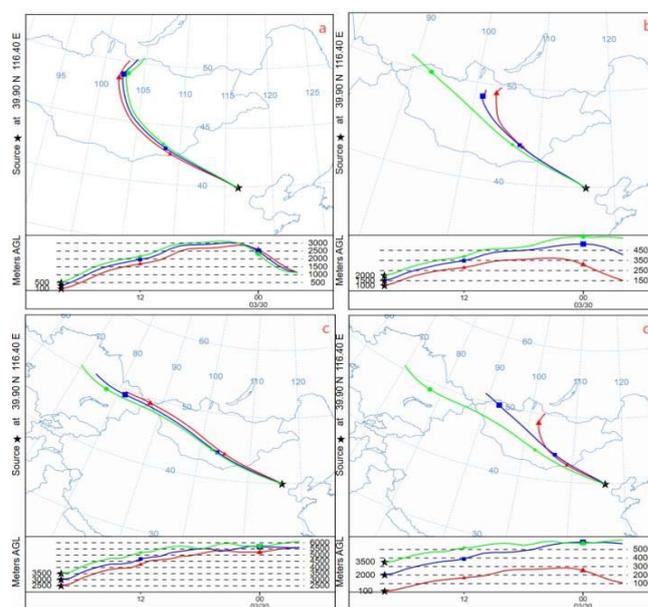
二种设定运行起始时刻方法需系统分析目标沙尘暴事件的时空演化特征,整合地面气象观测、遥感反演数据及中尺度模式预报产品,精准定位沙尘浓度峰值与能见度谷值的时空耦合节点,并以此作为轨迹模拟的起始基准。中国标准时间(China Standard Time, CST)换算成UTC的公式为“UTC=中国标准时间-8”。

1.3.3运行总时间(Total run time)。使用HYSPLIT模型模拟沙尘暴轨迹时,运行时长参数的优化配置是确保模拟结果可靠性的关键。时长过短会导致模拟的沙尘暴过程未能覆盖气团完整传输链条,遗漏关键源区信息进而导致源解析失效。通过设定不同时长的模拟试验,对比轨迹分布与沙尘天气遥感观测结果、地面观测站点数据的空间吻合度,并结合目标沙尘暴事件的天气系统生命周期(蒙古气旋东移引发的沙尘暴通常伴随24-48h的中尺度动力过程)确定既能完整捕捉气团迁移轨迹又避免无效外延的最优时长区间。

2 结果

反复对比模型的各项参数后发现,距地面高度、运行起始时刻和运行总时间是对沙尘暴轨迹影响最大的三个参数,其调整结果及相关分析如下。

2.1距地面高度参数对于路径影响的规律。图1为按照设置的距地面高度不同得出的结果。2007年3月31日到达北京市的沙尘气溶胶颗粒粒径较小,沙尘气溶胶很可能存在于100m低空到3500m高空。



注: a中红色、蓝色、绿色实线分别为距地面高度 100、300 及500m沙尘轨迹; b中红色、蓝色、绿色实线分别距地面高度 1000、1500及2000m沙尘轨迹; c中红色、蓝色、绿色实线分别为距地面高度2500、3000及3500m沙尘轨迹; d中红色、蓝色、绿色实线分别距地面高度100、2000及3500m沙尘轨迹。

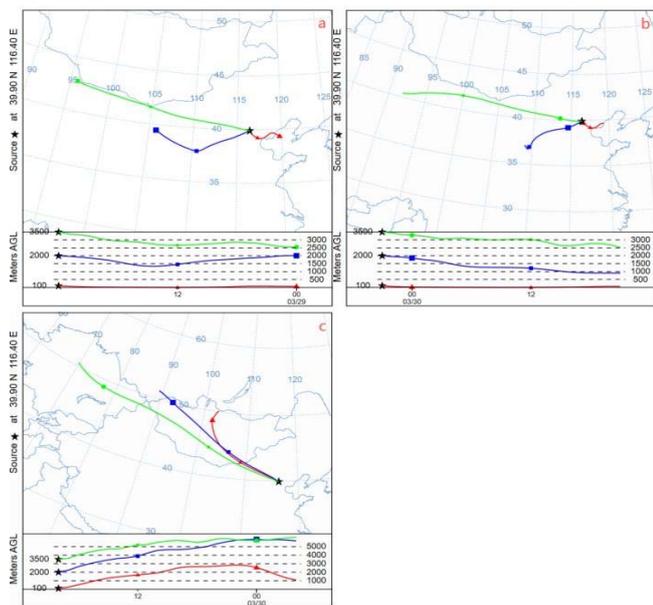
图1 2007年3月31日沙尘暴不同起始高度模拟图例

由图1a可见,本次沙尘暴距地面高度100m、300m、500m轨迹路线大致相同,说明当时风向一致。100m时的轨迹长度较长,表

明风速较高。由图1b可见,距地面高度1000m、1500m、2000m轨迹路线不同,说明当时风向不一致。2000m时轨迹长度较长,表明风速较高。由图1c可见,距地面高度2500m、3000m、3500m轨迹路线同样大致相同,说明当时风向一致。3500m时轨迹较长,表明风速较高。由图1d可见,设定的不同距地面高度的模拟路线方向均相似,都位于蒙古国南部地区。三组高度模拟的沙尘暴传输距离均较长,说明在垂直高度上风速都较高。基于以上研究结果以及沙尘暴经过区域的地貌综合考虑,100m、2000m和3500m是模拟本次沙尘暴的最佳距地面高度参数,结果见图1d。

2.2运行起始时刻参数对于路径影响的规律。研究以2007年3月31日到达北京市的沙尘暴,模型预先设定的运行总时间均为24h,距地面高度均为100m、2000m、3500m。运行起始时刻参数的研究是基于本次沙尘暴及模型预设距地面高度和运行总时间参数的基础上进行的。

图2a为随机设定的运行起始时刻为3月30日00:00(UTC)的沙尘路径模拟结果;图2b为运行起始时刻在沙尘浓度峰值为3月30日03:00(CST)的沙尘路径模拟结果;图2c为运行起始时刻设定为沙尘浓度峰值时刻3月30日03:00(CST),换算成UTC为3月29日20:00的沙尘路径。模拟结果的轨迹方向不同以及轨迹线段较短,表明风速较慢。由此可见,将沙尘浓度峰值时间换算为UTC作为运行起始时刻,模型模拟时间最佳。

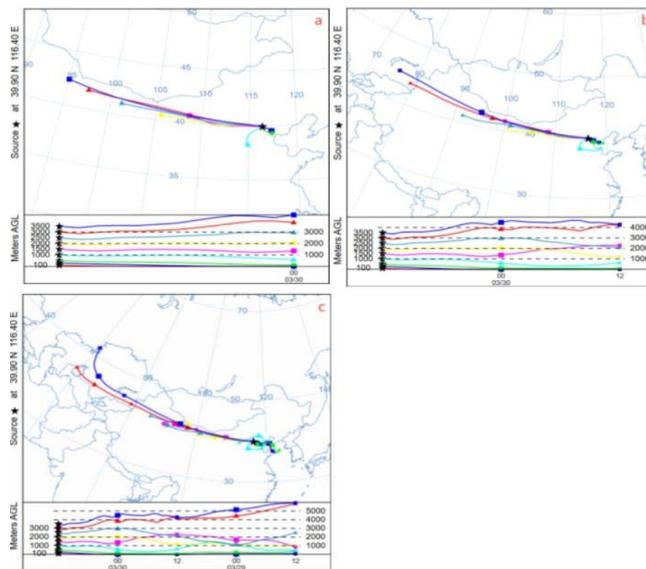


注:红色、蓝色、绿色实线分别为距地面高度100、2000及3500m沙尘轨迹。图a为随机选取的3月30日00:00运行轨迹例图;图b为沙尘浓度峰值在03:00运行轨迹例图;图c为沙尘浓度峰值时间-8换算运行轨迹例图。

图2 运行起始的时间不同导致运行轨迹不同的例图

2.3运行总时间参数对于路径影响的规律。经反复对比分析发现,将模拟时长设定在24-48h范围内,可有效平衡轨迹完整性与计算效率。该时间尺度能够充分覆盖潜在沙尘源地,这种持续时长与大气环流系统的演变规律相契合,在特定的天气形势下,

浮尘得以借助稳定的风场实现长距离传输,并在途经区域形成显著的空气质量下降现象。运行总时间短于实际气团有效活动周期,沙尘源可能会有遗漏(图3a);运行时间适当,会覆盖好可能的潜在沙尘源地(图3b);运行总时间大于实际气团有效活动周期,可能引入非相关路径的冗余轨迹,导致轨迹解析偏差并增加数据冗余(图3c)。



注:图中彩色实线分别为距地面高度100、300、500、1000、1500、2000、2500、3000及3500m沙尘轨迹。图a为运行12h运行轨迹例图;图b为运行24h运行轨迹例图;图c为运行48h运行轨迹例图。

图3 运行不同时间的例图

2.4案例分析。

2.4.1沙尘参数设置情况。本案例以2007年3月28-31日过境北京的沙尘暴天气为对象,模型参数分别设置为距地面高度500、1000、2000m、运行起始时刻为3月30日20:00、运行总时间为18h。

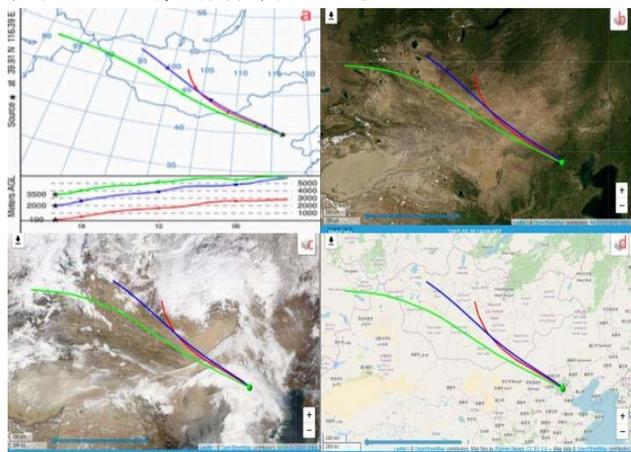
依据参数设置此次沙尘暴的模拟轨迹,得到如图4结果,后向轨迹路线图结合后可清楚直观的看到此次沙尘天气的潜在沙尘源地。

图4显示了2007年3月31日MODIS浮尘天气图和模拟的沙尘暴后向轨迹。由图可见,三个高度的轨迹方向不完全一致,表明在不同高度上,沙尘来自不同沙尘源地,且沙尘源主要来源于3500m高空。主要沙尘源地是蒙古国南部地区,沙尘暴路径是蒙古国南部-乌兰察布-张家口-北京市。由图4b可见,在沙尘运行期间,可能会有部分沙尘来自沙尘暴途经地区。

3 讨论

沙尘气溶胶的垂直分布与沙尘粒径、风速有关。从垂直分布上看,夏季、秋季和春季沙尘气溶胶最高可抬升到距地面3-4km(海拔4.4-5.4km),而冬季最高则只能抬升到距地面2-3km(海拔3.4-4.4km)^[17]。在北方,沙尘暴常发生在春季,所以主要以春季的沙尘气溶胶的垂直分布的分析为主。沙尘高度与风的等级具有一定的关系。沙尘气溶胶垂直分布也与沙尘粒径

有关: 沙尘粒径大于 $100\ \mu\text{m}$ 时, 一般分布在 $0\text{--}500\text{m}$ 左右; 沙尘粒径小于 $10\ \mu\text{m}$ 时, 一般分布在 3000m 以上^[18]。



注: 红色、蓝色、绿色实线分别为距地面高度 100、2000 及 3500m 沙尘轨迹。图a为HYSPLIT后向轨迹图; 图b为Blue Marble图; 图c为MODIS卫星云图; 图d为区域地理图。

图4 2007年3月31日浮尘天气后向轨迹图

奚立宗等人基于航空观测的2023年9月6日沙尘天气的数据, 分析了祁连山北坡沙尘气溶胶的垂直分布特征, 发现气溶胶垂直分布及谱分布存在差异。通过HYSPLIT模式模拟, 他们发现不同来源的气团是造成此次沙尘天气下气溶胶垂直分布及谱分布差异的可能原因^[19]。

马新成等人利用3次沙尘天气期间的气溶胶航空观测资料, 分析了北京市在3种沙尘天气下气溶胶垂直分布特征。结果显示浮尘个例编号为20070331的沙尘粗粒子浓度最小, 并且垂直扩散到 2200m 高度后浓度趋于0, 而这个高度也是边界层的高度并存在逆温层, 2200m 以下垂直均匀分布。

以上研究也说明了HYSPLIT后向轨迹模型中距地面高度的设定对模拟准确性有很大影响。 $24\text{--}48\text{h}$ 的运行总时间窗口亦与东亚地区沙尘天气系统的平均持续时间及边界层高度演变特征高度契合。

4 结论

本项研究表明, 距地面高度、运行起始时刻、运行总时间是HYSPLIT模型的关键参数。运行模型时, 首先设置这三个参数, 可以提高模拟效率, 方便追踪沙尘暴路径并发现沙源。

[基金项目]

京津风沙源工程区植被的水资源承载力估算(RZ240000602); 内蒙古自治区高等学校科学技术研究项目(NJZZ23101)。

[参考文献]

[1]周绍尧, 朱家正, 张宇, 等. 基于HYSPLIT模型的海南岛橡胶树白粉菌孢子气流传播路径与时空动态[J]. 热带作物学报, 2025, 46(07): 1724–1732.

[2]高晶, 陈金琪, 石茹琳, 等. 近23a中国北方强沙尘暴时空分布特征及环流分析[J]. 山地气象学报, 2025, 49(03): 93–98.

[3]马玉芬, 陆辉, 刘海涛. HYSPLIT模式轨迹计算误差分析[J].

南京信息工程大学学报(自然科学版), 2015, 7(01): 86–91.

[4]Alzaid S A, Ani I, Aga O. Simulation and Assessment of Episodic Dust Storms in Eastern Saudi Arabia Using HYSPLIT Trajectory Model and Satellite Observations[J]. Atmosphere, 2024, 15(12): 1515.

[5]陈俊言, 贾雅雯, 张越, 等. 戈壁沙漠沙尘向青藏高原传输路径和传输机制: 以2020年4月一次沙尘事件为例[J]. 中国沙漠, 2024, 44(03): 158–171.

[6]Sokolik I N, Toon O B. Direct radiative forcing by anthropogenic airborne mineral aerosols[J]. Nature, 1996, 381(6584): 681–683.

[7]Tegen I, Lacis A A. Modeling of particle size distribution and its influence on the radiative properties of mineral dust aerosol[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1996, 101(D14): 19237–19244.

[8]Zhang X Y, Arimoto R, An Z S. Dust emission from Chinese desert sources linked to variations in atmospheric circulation[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1997, 102(D23): 28041–28047.

[9]Creamean J M, Suski K J, Rosenfeld D, et al. Dust and biological aerosols from the Sahara and Asia influence precipitation in the western US[J]. Science, 2013, 339(6127): 1572–1578.

[10]李晶晶, 何清, 张海亮, 等. 塔克拉玛干沙漠南缘沙尘气溶胶的垂直分布及其传输特征研究——以民丰为例[J]. 中国环境科学, 2025, 1–16.

[11]南戈壁省. 东北亚地区地方政府联合会[引用日期2020-05-03].

[12]DUNDGOBI AIMAG, DUNDGOBI PROVINCE[引用日期2023-9-30].

[13]区域地理. 中华人民共和国政府官网. 2005-07-27[引用日期2021-09-26].

[14]夏德强. 生态环境保护概论[M]. 化学工业出版社, 2024. 09. 258.

[15]Draxler, R. R., 1999, HYSPLIT_4 User's Guide, NOAA Technical Memorandum ERL ARL-230, June, 35pp.

[16]李洪升. 基于多元数据的内蒙古沙尘暴时空特征及土壤风蚀敏感性研究[D]. 内蒙古财经大学, 2024, (04): 61.

[17]ROLAND R. Draxler, forecasting dust storms using Hysplit[C]//Sino-US Workshop on Dust storms and their effects on Human Health. North Carolina: Raleigh, 2002: 25–26.

[18]段昊书. 揭秘: 全球仅有的两个沙尘暴预报区域中心为何设在北京和巴塞罗那[J]. 生命与灾害, 2019, (02): 22–25.

[19]奚立宗, 把黎, 庞朝云, 等. 祁连山北坡沙尘天气气溶胶特征的飞机观测[J]. 应用气象学报, 2024, 35(03): 311–322.

作者简介:

姚悦(1998—), 女, 汉族, 内蒙古自治区兴安盟人, 内蒙古农业大学24级林业硕士研究生, 研究方向是基于模型的沙尘暴轨迹模拟与分析。