

# 乌苏市冬季短时内两次强沙尘过程气象条件及来源对比分析

田书婷

新疆维吾尔自治区气候中心，新疆 乌苏

收稿日期：2025年12月11日；录用日期：2026年1月12日；发布日期：2026年1月20日

## 摘要

本研究针对2025年冬季新疆乌苏市相继发生的“1·23”与“2·25”两次强沙尘过程，综合运用地面气象观测、ERA5再分析资料、颗粒物浓度监测及后向轨迹模拟等方法，从天气系统、动力结构、前期地表条件与污染物来源等角度展开系统对比。结果表明：“1·23”过程受“北槽南涡”型高低压对峙系统控制，850 hPa层呈现强辐合(散度达 $-2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )与高螺旋度( $250 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ )，动力抬升显著，属于以中远距离输送为主的“多源复合型”沙尘；而“2·25”过程则为冷高压前缘锋面爆发型，动力结构较弱，沙尘起沙更依赖局地强风，属“局地主导型”。两次过程发生前均具备显著的“暖-干”型前期气候背景，地表气温偏高 $1.5^\circ\text{C} \sim 3^\circ\text{C}$ ，降水偏少 $1 \sim 5 \text{ mm}$ ，土壤湿度下降 $0.12 \sim 0.20 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ，共同导致地表可蚀性显著增强。轨迹聚类与浓度权重分析进一步表明，“1·23”过程沙尘来源于本地、哈萨克斯坦东南部和新疆西南部三类源区，外源输送占比较高；而“2·25”过程则以乌苏本地及西南近源区为核心(轨迹占比70.83%，WCWT值 $> 500 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )，外源影响微弱。研究阐明了两类沙尘过程在天气背景、动力机制与源区结构方面的本质差异，为北疆地区冬季沙尘天气预报及差异化防控策略的制定提供了科学依据。

## 关键词

冬季沙尘，气象条件，后向轨迹，浓度权重

# Comparative Analysis of Meteorological Conditions and Source Contributions of Two Strong Sand and Dust Events in Wusu City during Winter

Shuting Tian

Xinjiang Uygur Autonomous Region Climate Center, Wusu Xinjiang

Received: December 11, 2025; accepted: January 12, 2026; published: January 20, 2026

文章引用: 田书婷. 乌苏市冬季短时内两次强沙尘过程气象条件及来源对比分析[J]. 气候变化研究快报, 2026, 15(1): 155-166. DOI: 10.12677/ccrl.2026.151020

## Abstract

This study focuses on the two strong sand and dust events that occurred successively in Wusu City, Xinjiang in winter 2025, namely the “1·23” and “2·25” events. By integrating ground meteorological observations, ERA5 reanalysis data, particulate matter concentration monitoring, and backward trajectory simulations, a systematic comparison was conducted from the perspectives of weather systems, dynamic structures, pre-event surface conditions, and pollutant sources. The results show that the “1·23” event was controlled by a “north trough-south vortex” type of high-low pressure confrontation system, with strong convergence (divergence reaching  $-2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) and high vorticity ( $250 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ) at the 850 hPa layer, indicating significant dynamic uplift. It was a “multi-source composite type” sand and dust event mainly driven by long-distance transport. In contrast, the “2·25” event was a cold high-pressure front-type event with a weaker dynamic structure, where local strong winds played a more significant role in sand lifting, making it a “locally dominant type” event. Both events were preceded by a significant “warm-dry” type of pre-event climate background, with surface temperatures  $1.5^\circ\text{C} \sim 3^\circ\text{C}$  higher, precipitation 1~5 mm less, and soil moisture decreased by  $0.12 \sim 0.20 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , collectively leading to a significant increase in surface erodibility. Trajectory clustering and concentration-weighted trajectory (WCWT) analysis further indicated that the “1·23” event’s sand and dust originated from three source areas: local, southeastern Kazakhstan, and southwestern Xinjiang, with a relatively high proportion of external transport. In contrast, the “2·25” event was centered on Wusu and its southwestern near-source areas (trajectory proportion 70.83%, WCWT value  $> 500 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ), with minimal external influence. This study clarifies the essential differences between the two types of sand and dust events in terms of weather background, dynamic mechanisms, and source area structures, providing a scientific basis for winter sand and dust weather forecasting and the formulation of differentiated control strategies in the northern Xinjiang region.

## Keywords

**Winter Sand and Dust, Meteorological Conditions, Backward Trajectory, Concentration-Weighted Trajectory (WCWT)**

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

近年来，在全球气候变化持续深化的背景下，我国北疆地区作为典型的内陆干旱与半干旱区，其气候系统的敏感性和脆弱性日益凸显[1][2]。观测记录表明，该区域极端天气气候事件的发生频率、持续时间和强度均呈现出显著的增长趋势，具体表现为极端降雪、寒潮频发、持续大风等事件的增多[3]。在这一系列变化中，沙尘天气作为干旱区重要的环境过程，其时空分布规律和发展特征也正在经历深刻的重塑[4]。传统的沙尘气候学研究与业务预报经验普遍认为，春季(3月至5月)是北疆沙尘天气的绝对高发期，这主要源于春季地表积雪消融、土壤解冻后疏松裸露，加之冷暖空气交替频繁，容易产生强风天气，从而为沙尘的启动和输送提供了充分的条件[5]。因此，长期以来，绝大多数研究资源与关注点都集中于春季沙尘暴的成因、输送路径及环境影响上。然而，一个新的观测事实正逐渐引起科学家和决策者的警惕：冬季沙尘天气的发生频率与强度出现了不容忽视的增强信号[6]。这一现象打破了我们对该地区

沙尘活动季节规律的固有认知，暴露出对非传统沙尘季节，特别是冬季，天气过程的认识存在显著的盲区与不足。与备受关注的春季沙尘暴相比，冬季发生的沙尘过程虽然在整体数量上可能不占优势，但其往往与寒潮大风、极端低温等恶劣天气相伴生，形成的“大风、沙尘、低温”复合型灾害，对交通运输、公众健康、农业生产以及能源供应构成的威胁同样严峻[7]，甚至因其发生的“非常规性”而更具突发性和破坏性。例如，冬季沙尘叠加低温和冰雪路面，会极大增加高速公路交通事故风险；沙尘颗粒物在稳定的冬季边界层内不易扩散，导致空气质量持续恶化，加剧呼吸系统疾病负担；沙尘覆盖积雪表面，会改变地表反照率，加速局部冰雪消融，影响区域水循环[8]。

新疆北部准噶尔盆地西南缘是我国沙尘天气的重要发生区之一，其沙尘活动不仅对当地气候环境与生态系统有重要影响，还可通过长距离输送影响下风方向区域[9]。乌苏市地处该区域关键地带( $44^{\circ}25'2.0''N, 84^{\circ}42'40.1''E$ )，属典型的温带大陆性气候，冬季受强盛西伯利亚高压控制，大风天气频繁。加之冬季地表植被覆盖度低，农田休闲、河床裸露，为沙尘天气提供了丰富的物源，使得该地区冬季沙尘过程具有独特的生消机制。本研究通过对比两次典型冬季沙尘过程，能够为地方政府实施精准的防风固沙工程、优化生态治理重点区域提供明确的科学依据，直接服务于区域的生态安全与可持续发展战略[10]。

## 2. 资料与方法

### 2.1. 数据来源

本研究综合利用乌苏地面气象观测站点数据、欧洲中期天气预报中心发布的 ERA5 再分析资料(空间分辨率  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ )以及中国环境监测总站/乌苏市生态环境局提供的逐小时 PM10 颗粒物浓度监测数据，对 2023 年 2 月 23 日 08 时至 24 日 20 时(过程一)和 2 月 25 日 08 时至 26 日 20 时(过程二)两次强沙尘过程进行对比分析，其中地面观测用于刻画近地层气象要素演变，再分析资料用于解析大尺度环流及边界层结构，颗粒物数据则用于客观量化沙尘污染的影响强度与时空特征。

### 2.2. 分析方法

#### 2.2.1. 后向轨迹聚类

为追溯两次沙尘过程中影响乌苏市的主要粗颗粒物潜在来源，本研究基于 TrajStat 平台(Li *et al.*, 2024)进行了后向轨迹分析。该分析利用美国国家海洋和大气管理局(NOAA)开发的 HYSPLIT(混合单粒子拉格朗日积分轨迹)模型(Draxler and Hess, 1998)作为核心计算模块[11]。HYSPLIT 模型能够兼容多种气象场输入，并综合考虑多种物理过程，适用于复杂排放源的模拟。研究将轨迹起始高度设定为距地 500 米，后向模拟时长为 48 小时，以此识别沙尘的可能输送路径与潜在源区[12]。

#### 2.2.2. WCWT 分析法

为识别和量化影响研究区的污染物外部输送贡献，本研究采用浓度加权轨迹法[13]。该方法通过计算每个网格单元内所有后向轨迹对应污染物浓度的平均值，从而将轨迹的空间分布与污染水平直接关联，能够有效评估不同输送路径对目标区域污染的相对贡献。相较于潜在源贡献因子分析仅能反映高污染轨迹出现频率的局限性，CWT 法的优势在于能够区分相同 PSCF 值下不同来源区的实际污染贡献强度[14]。为进一步提升识别精度，本研究对加权平均浓度值进行数值校正，以获得更能真实反映潜在源强度的 WCWT 值。具体计算公式(1)(2)如下：

$$CWT_{i,j} = \frac{1}{\sum_{l=1}^M \tau_{ijl}} \sum_{l=1}^M C_l \tau_{ijl} \quad (1)$$

$$WCWT_{I,J} = \frac{m_{i,j}}{n_{i,j}} \times W_{i,j} \quad (2)$$

式中,  $CWT_{ij}$ : 网格单元( $i,j$ )处的浓度权重值, 反映该区域对目标点污染的潜在贡献强度;  $M$  模拟的后向轨迹总数;  $t_{ijl}$ : 第1条轨迹在网格单元( $i,j$ )内的停留时间;  $C_l$  表示第1条轨迹对应的污染物浓度观测值。

### 2.2.3. 螺旋度计算

螺旋度在流体力学中描述了流体运动沿旋转方向的程度, 即速度矢量与涡度矢量的点积。气象学中, 它通常指相对螺旋度, 其物理意义是: 衡量环境风场对风暴发展的组织和支撑能力[15]。

尘粒子从地面扬起并维持长时间的空中悬浮提供了强大的动力抬升机制[16]。因此, 螺旋度在沙尘天气分析中有广泛的应用, 计算公式3如下:

$$SRH = \int_0^{3km} \left[ (\bar{V}_h - \bar{C}) \times \frac{\partial \bar{V}_h}{\partial z} \right] dz \quad (3)$$

## 3. 结果与讨论

### 3.1. 两次沙尘污染天气实况

2025年1月23日08时至24日20时, 新疆北部地区经历了一次显著的沙尘天气过程(以下简称“1·23”过程)。该过程中, 乌苏市能见度急剧下降, 最低值低于100米,  $PM_{10}$ 质量浓度峰值达到972.3  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 平均粗颗粒物浓度为491.6  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。强沙尘集中出现在1月23日12时至24日04时, 沙尘主体过境后, 能见度持续低于1000米的浮尘天气仍维持约20小时(图1)。约一个月后, 该地区于2月25日08时至26日20时再次受到沙尘暴影响(以下简称“2·25”过程)。此次过程持续时间相对较短, 强沙尘主要出现在2月25日14时至20时, 但影响强度依然显著, 期间最低能见度为130米,  $PM_{10}$ 峰值浓度为825.9  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 平均粗颗粒物浓度为344.7  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。过程结束后, 能见度低于1000米的浮尘天气持续约15小时(图2)。两次沙尘过程发生时间接近、强度大、影响重, 对乌苏地区的交通运输、生产活动和公众健康均造成了严重影响。

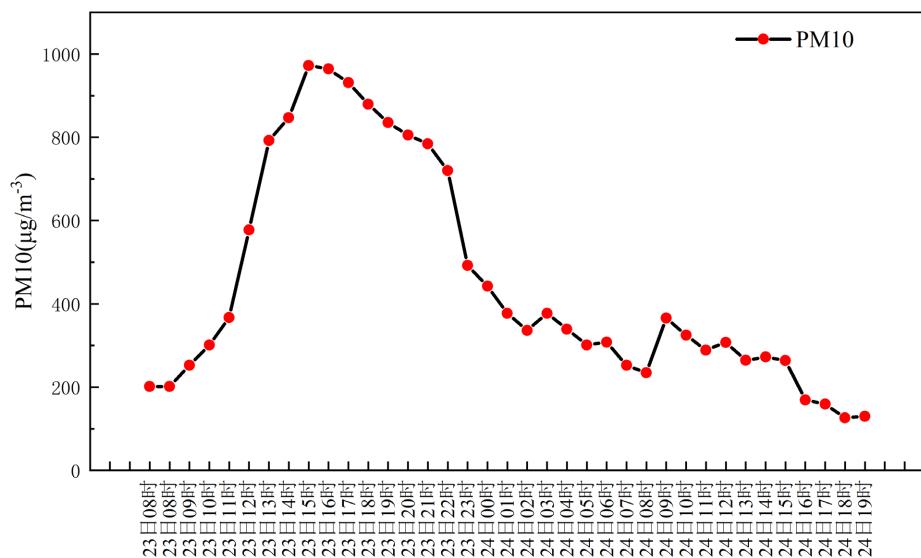
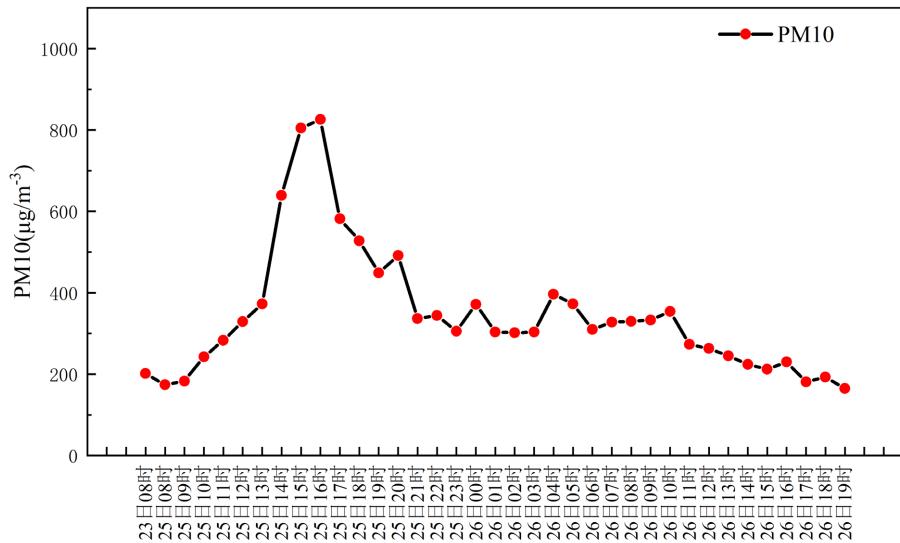


Figure 1.  $PM_{10}$  concentration during the “1·23” dust event

图1. “1·23” 沙尘过程  $PM_{10}$  浓度

**Figure 2.** PM<sub>10</sub> concentration during the “2.25” dust event图 2. “2·25” 沙尘过程 PM<sub>10</sub> 浓度

### 3.2. 海平面气压场和风场

从平均海平面气压场与地面风场的配置来看(图 3、图 4), “1·23”与“2·25”两次沙尘过程虽均源于强气压梯度驱动下的大风天气,但其主导天气系统与动力机制存在显著差异。“1·23”过程期间,乌苏市处于一个典型的高低压对峙的“北槽南涡”形势中。新疆北部地区有强盛的气旋性低压系统发展,其中心气压低至 988 hPa,而乌苏市以南则为冷高压脊所控制,当地海平面气压值约为 1024 hPa。这种南北向的强气压梯度,在乌苏地区形成了强大的气压梯度力,是导致地面风速急剧增强的直接动力来源。此时,乌苏市正位于此深厚气旋系统的前部,盛行强劲的偏南或偏东风。这股气流不仅提供了起沙所需的动力条件,更可能将塔城盆地、艾比湖流域等北部沙源区的沙尘粒子向乌苏方向输送。相比之下,“2·25”过程则主要表现为一次典型的冷高压前沿爆发型沙尘事件。此次过程由势力更为强大的冷高压主导,其

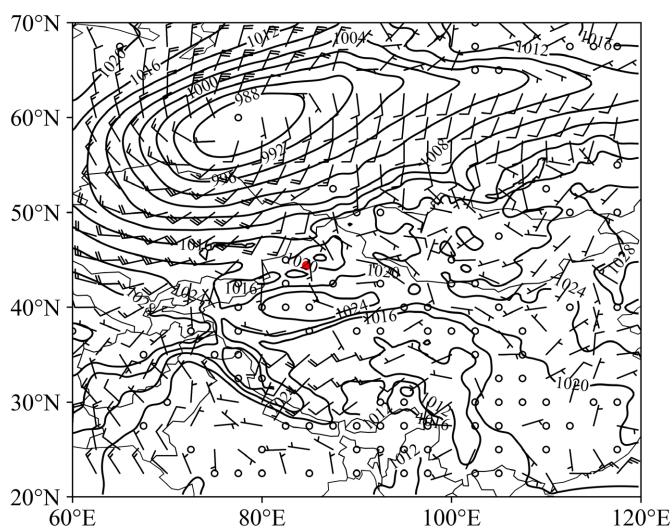
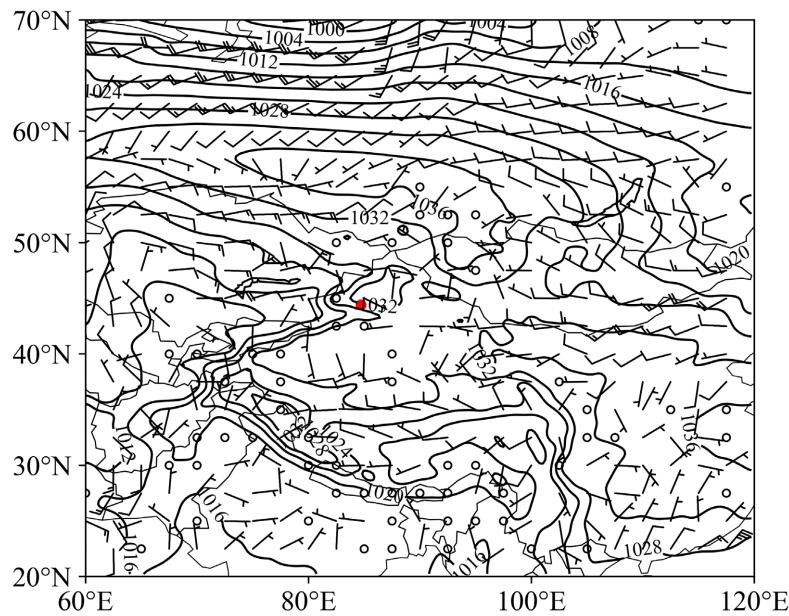
**Figure 3.** Mean sea level pressure and wind field from January 23 to 24

图 3. 1月 23 日~24 日平均海平面气压场和风场

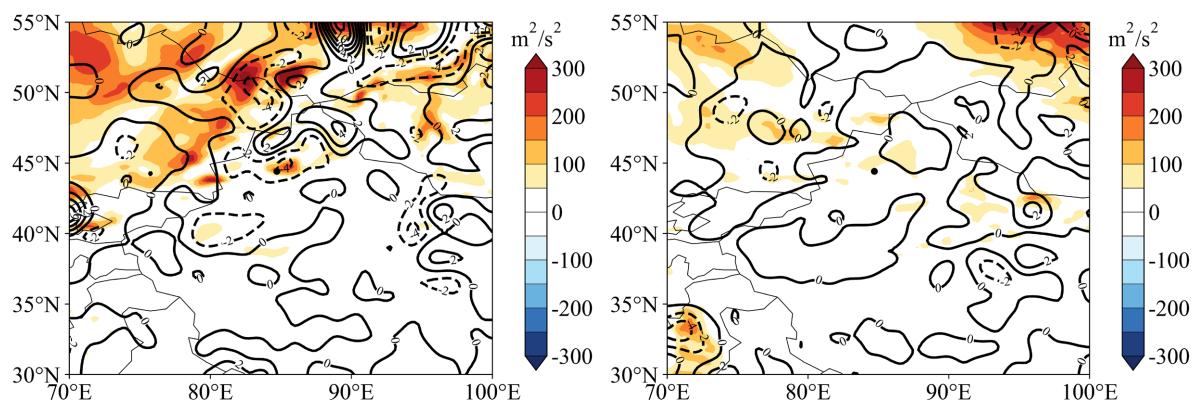


**Figure 4.** Mean sea level pressure and wind field from February 25 to 26  
**图 4.** 2月 25 日~26 日平均海平面气压场和风场

中心强度高达 1036 hPa。乌苏市清晰地处在该冷高压前缘的地面冷锋后方，预示着一次强冷空气的南侵过程。强大的冷空气作为驱动力，推动冷锋过境，锋前强烈的气压梯度和温度梯度共同作用，引发瞬间风力猛增。这种锋面大风的突发性和强度极大，能够迅速卷起地表松散沙尘。与“1·23”过程气旋前部的流场不同，此次过程的风场以一致的偏北风或西北风为主，表明沙尘的输送路径更可能源于乌苏市北部或西北部的局地沙源，是一次以近源就地起沙为主要特征的沙尘过程。两次过程的关键区别在于：“1·23”过程的核心驱动力是气旋与高压之间的强梯度风，流场配置利于沙尘的区域性汇聚与中距离输送；而“2·25”过程则是由强冷高压前沿的锋面大风主导，动力抬升和起沙作用更为剧烈和集中。这种天气系统本质上的不同，直接决定了两者在沙尘来源、起沙机制以及影响方式上的差异性，为理解两次沙尘污染特征与演变规律提供重要基础。

### 3.3. 动力条件

基于螺旋度公式对两次沙尘天气过程低层 850 hPa 动力结构的分析表明(图 5)，“1·23”与“2·25”过程在水平螺旋度与散度场上表现出显著差异，反映出两者在动力抬升机制与沙尘垂直输送能力方面的不同。“1·23”过程期间，乌苏地区处于强烈的上升运动区，850 hPa 散度值达 $-2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ，表明该层存在明显的气流辐合，为沙尘的垂直输送提供了有利的动力条件。同时，水平螺旋度值高达 $250 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ，进一步说明该区域不仅具备强烈的旋转特征，还伴有较强的气流伸展，这种配置极有利于沙尘粒子从近地面向空中扬起并维持较长时间的悬浮，从而形成强度大、影响范围广的沙尘天气。相比之下，“2·25”过程的动力结构相对较弱。其 850 hPa 散度值在零值附近波动，反映该过程中气流辐合较弱，系统性上升运动不显著。相应地，水平螺旋度也处于 $50 \sim 100 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 的较低区间，说明大气的旋转与伸展作用均较有限，沙尘的垂直抬升能力因此受到制约。这一动力特征与“2·25”过程沙尘强度相对较弱、影响时间较短的表现相一致。水平螺旋度与散度的配置从动力角度揭示了两类沙尘过程的本质差异：“1·23”过程以强辐合与高螺旋度为特征，属于典型的动力强输送型；而“2·25”过程则动力结构偏弱，沙尘发展更多依赖局地起沙与近地面扩散，两者在动力机制上具有明显区分。



**Figure 5.** 850 hPa divergence (contours) and horizontal helicity (shading) at 08:00 on January 23 (left) and February 25 (right)

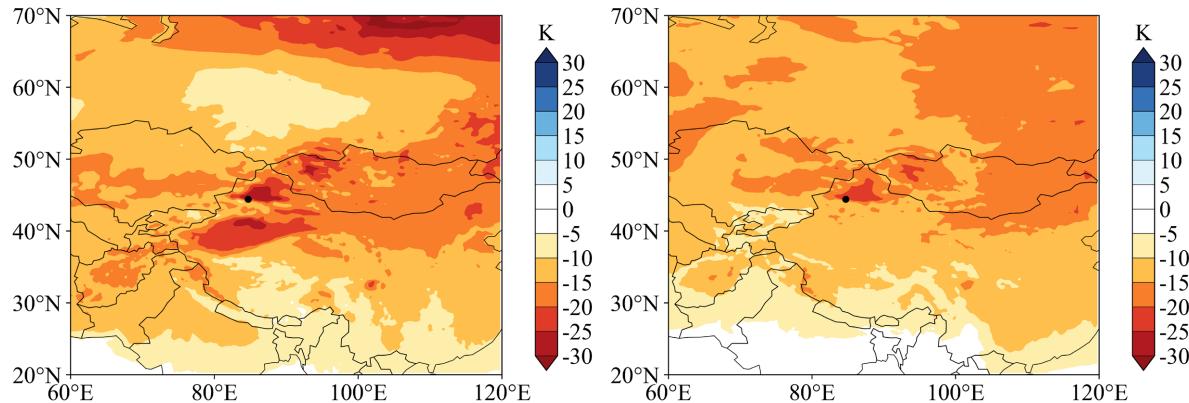
图 5. 1月 23 日 08 时(图左)、2 月 25 日 08 时(图右)850 hPa 散度(等值线)和水平螺旋度(阴影)

### 3.4. 沙尘气象驱动因子

研究表明,中国北方沙尘源区的沙尘活动强度与近地表气象要素(如温度、降水和土壤湿度)的异常波动密切相关。特别是地表气温的显著偏高,可通过改变地表覆被状态和土壤物理性质,成为诱发极端沙尘事件的关键前期信号。为深入分析这一机制,图 6 展示了乌苏市“1·23”与“2·25”两次沙尘过程发生前两周的近地面气象要素异常场,其基准气候态为 2015~2024 年共 10 年的同期平均值。从温度异常特征来看,两次沙尘过程发生前均出现了极为显著的地表增温。“1·23”过程发生前两周,乌苏地区近地表平均气温较十年气候态偏高幅度高达 3℃ 左右,如此强烈的正异常表明该时段经历了罕见的极端暖事件。相比之下,“2·25”过程前期虽增温幅度略低,但仍较气候态持续偏高 1.5℃~3℃,属于明显的暖异常状态。这种大幅度的温度正异常具有重要的环境指示意义。持续异常偏高的地表温度对当地下垫面状况产生了根本性影响。首先,高温直接加速了冬季积雪的消融进程,并促使浅层冻土提前解冻。积雪覆盖的消失使地表直接暴露于大气之下,而冻土解冻则导致表层土壤结构变得松散、可蚀性增强,从而为沙尘启动提供了丰富的物质基础。其次,强烈的温度正异常也意味着地表蒸发加剧,土壤水分流失迅速。在缺乏有效降水补充的情况下,土壤湿度显著下降,表层土质趋于干燥化,进一步降低了起沙的临界风速阈值。在两次沙尘过程发生前,异常高温作为重要的前置信号,通过“加速积雪冻土消融-增加沙源可及性”与“增强土壤蒸发-降低土壤粘结力”两条关键途径,共同塑造了极有利于沙尘释放的地表条件。这一分析从热力条件角度揭示了前期特殊气候背景对沙尘过程的潜在贡献,深化了对极端沙尘事件触发机制的理解。

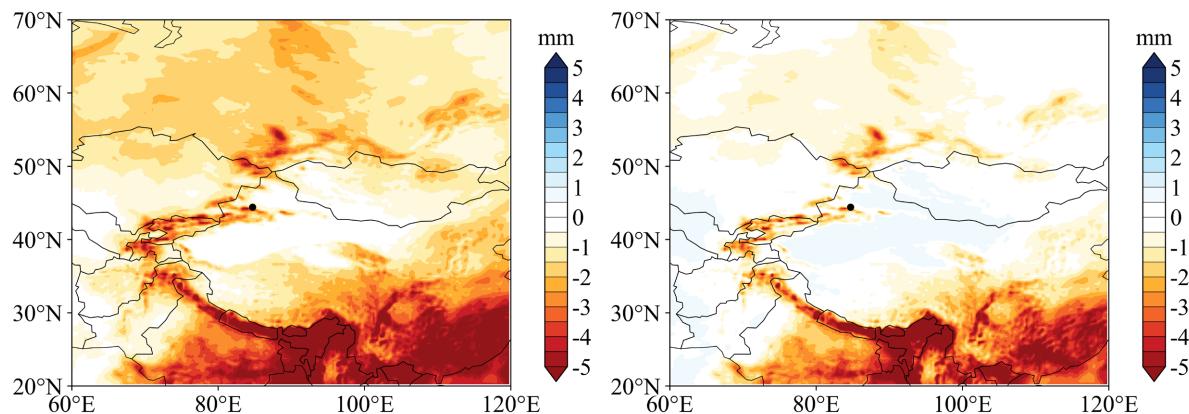
为深入解析沙尘发生前的地表水分条件,图 7(左、右)分别展示了“1·23”与“2·25”两次沙尘过程发生前两周的区域总降雨量,与 2015~2024 年同期十年气候平均态之间的差值空间分布。从图中可以看出,在“1·23”过程发生前两周,乌苏地区西部及北部大部分区域降水较历史同期明显偏少,普遍偏低 2~5 毫米,呈现出一定的干旱化倾向。对于“2·25”过程,其前期降水空间格局与“1·23”过程具有一定相似性,西部及北部地区同样表现为偏少特征,但偏少幅度略小,普遍为 1~3 毫米;东部及南部地区降水仍接近常年水平。这种前期降水的区域性减少,对沙尘过程的发生具有重要的环境预调节作用。一方面,持续偏少的降水导致表层土壤湿度下降,土壤颗粒间的粘结力减弱,更易在风力作用下脱离地表;另一方面,水分亏缺抑制了早期植被的萌发与生长,使地表覆盖度降低,进一步增加了可蚀性沙源的范围。尤其是在乌苏西部和北部这类对水分变化敏感的区域,即便仅为数毫米的降水负异常,也足以显著改变地表抗风蚀能力,从而为后续沙尘天气的爆发提供关键的物质与地表条件。两次沙尘过程发生前,

乌苏地区均表现出一定程度的前期降水亏缺，空间上集中于西部与北部，这一特征与同期异常高温共同构成了“干-暖”型前期气候背景，为沙尘天气的最终发生提供了重要的降雨清除效果的前置信号。



**Figure 6.** The difference between the ten-year climatic state of ground temperature from 2015 to 2024 and the ground temperature two weeks before the occurrence of the “1·23” and “2·25” sand and dust events (left: “1·23”; right: “2·25”)

**图 6. 2015~2024 地面气温十年气候态与“1·23”和“2·25”沙尘过程发生前两周地表温度差值(图左：“1·23”；图右：“2·25”)**

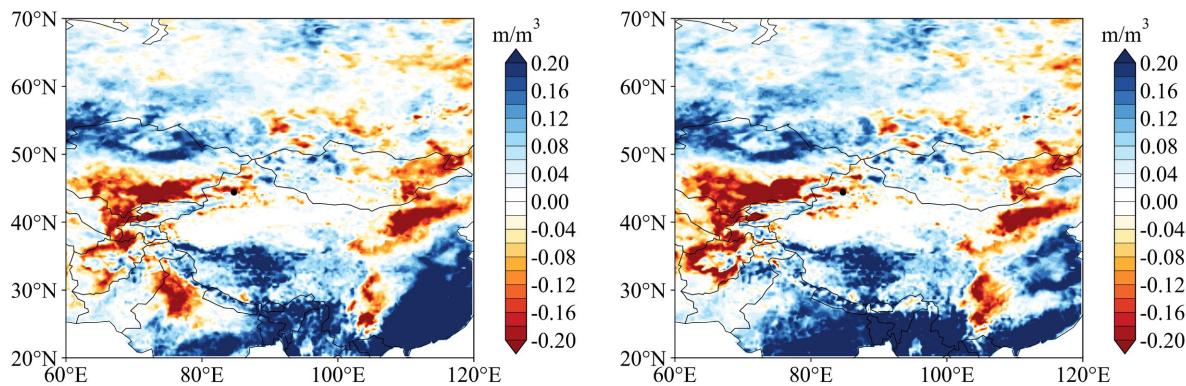


**Figure 7.** The difference between the ten-year climatological total rainfall from 2015 to 2024 and the surface rainfall two weeks before the occurrence of the “1·23” and “2·25” sand and dust events (left: “1·23”; right: “2·25”)

**图 7. 2015~2024 总降雨量十年气候态与“1·23”和“2·25”沙尘过程发生前两周地表降雨量差值(图左：“1·23”；图右：“2·25”)**

土壤含水量是衡量地表抗风蚀能力的关键指标，其异常偏低往往直接预示沙尘活动风险的增加。**图 8**展示了 2015~2024 年土壤含水量十年气候态与“1·23”(左)及“2·25”(右)两次沙尘过程发生前两周实际土壤含水量的空间差异。分析表明，“1·23”过程发生前两周，乌苏地区西部及南部已出现明显土壤湿度亏缺，较同期气候态偏低约  $0.12\sim0.2 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ，反映出这些区域表层土壤趋于干燥；而新疆本省及其以东区域的土壤含水量则与历史水平基本一致，未表现出显著异常。至“2·25”沙尘过程发生前，西部地区土壤干旱化态势进一步加剧，其湿度负异常范围更广、强度更大，大部分地区土壤含水量下降幅度达到  $0.2 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ，显示出比“1·23”过程前更为严峻的干土条件；其余地区土壤湿度仍接近常年水平，未出现系统性偏离。土壤含水量的显著下降，直接削弱了土壤颗粒间的内聚力和地表结构稳定性，显著降低了起沙的临界风速，从而为沙尘释放创造了有利条件。尤其是“2·25”过程前西部更为极端的土壤湿度负异常，可能在一定程度上解释了该过程中尽管系统影响时间较短，但沙尘强度依然显著的特征。综合来看，两

次沙尘过程发生前，乌苏关键区域均出现了与高温、少雨相匹配的土壤干化信号，共同构成了沙尘爆发的前期环境背景，进一步从土壤物理角度揭示了极端沙尘事件发生的潜在下垫面条件。



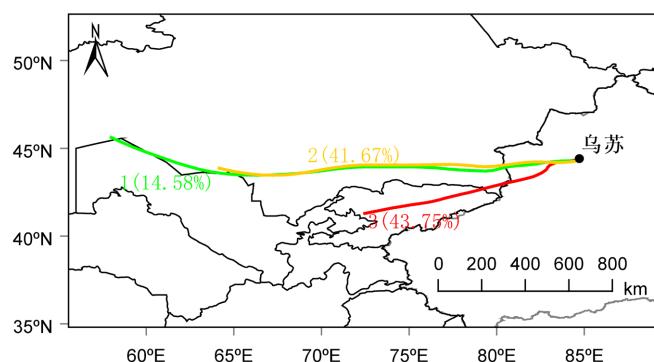
**Figure 8.** Total rainfall from 2015 to 2024, ten-year climate state and the surface rainfall difference two weeks before the “1·23” and “2·25” dust events (left: “1·23”; right: “2·25”)

**图 8.** 2015~2024 总降雨量十年气候态与“1·23”和“2·25”沙尘过程发生前两周地表降雨量差值(图左：“1·23”；图右：“2·25”)

### 3.5. 沙尘来源分析

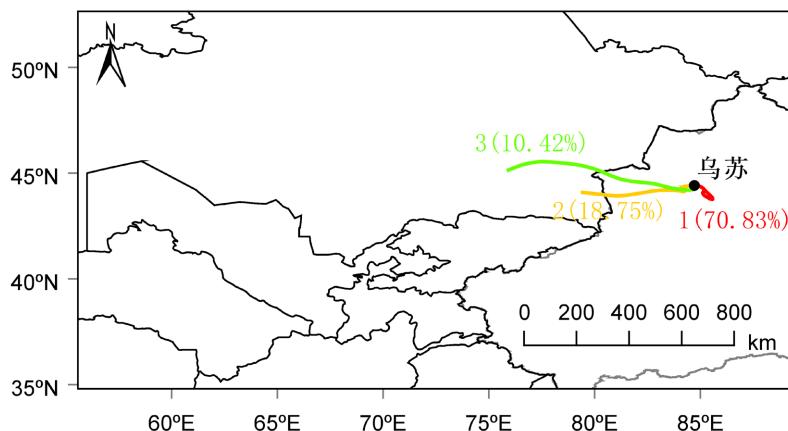
#### 3.5.1. 输送路径

基于后向轨迹聚类分析方法，对新疆乌苏市“1·23”沙尘过程期间的气团来源进行识别，结果可划分为三类主要输送路径(图 9)，其在总轨迹中占比分别为 14.85%、41.75% 及 43.75%，反映出沙尘输送的多源性及主导路径的集中特征。第一类路径(占比 14.85%)源自偏西方向，为最远的输送路径，自哈萨克斯坦南部向西北延伸，最远抵达与乌兹别克斯坦交界的西部地区。该路径反映出在一定环流配置下，西部更远源区的沙尘亦可能参与影响乌苏，尽管贡献比例较低，但体现出沙尘来源的复杂性。第二类路径(占比 41.75%)轨迹偏西，主要源自哈萨克斯坦南部，路径略长于轨迹一，但仍属中程输送。该气团所经区域地表覆盖以干旱荒漠为主，在强西北气流推动下，将中亚中部沙尘向下游输送，构成另一重要沙源。轨迹 3 占比 43.75%，轨迹占比最大、距离最短，起源于新疆西南部地区，延伸至塔吉克斯坦与乌兹别克斯坦交界带。该路径距离短、移动快，反映出来自中亚东部近源区域的沙尘可在较短时间内影响乌苏，是本次过程中最主要的沙尘输送通道。“1·23”沙尘过程主要受来自哈萨克斯坦南部至中亚交界区域的中短程输送路径主导，其中近源路径贡献最为显著。



**Figure 9.** Application of backward trajectory cluster analysis in the “1·23” dust event  
**图 9.** “1·23”沙尘过程后向轨迹聚类

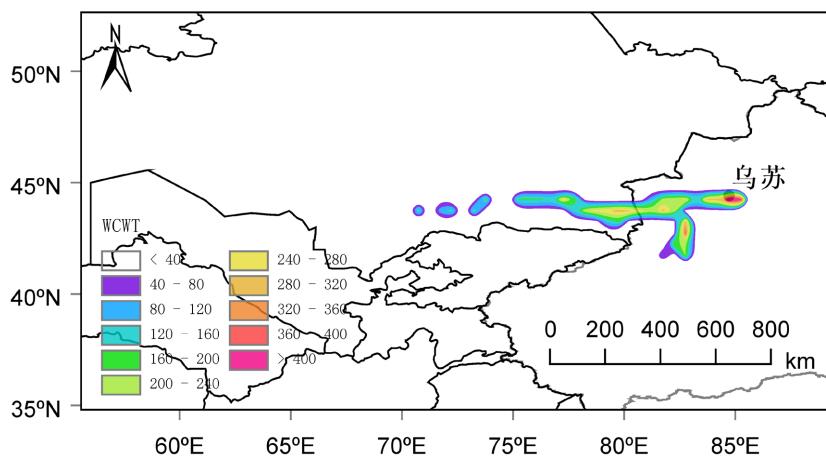
新疆乌苏市“2·25”沙尘过程期间的气团来源路径如图 10，结果显示三条轨迹的贡献比例分别为 70.83%、18.75% 和 10.42%（图 1）。此次过程中，局地及周边区域起沙成为主导沙尘来源，路径集中性较“1·23”过程更为显著。轨迹一（占比 70.83%）主要表现为乌苏本地及周边地区的局地输送路径。其轨迹空间跨度小、停留时间短，反映出此次沙尘过程受近地面局地环流影响显著，沙尘主要来源于乌苏周边裸露地表、干旱农田及河谷区域，说明本地沙源在本次过程中发挥了关键作用。轨迹二（占比 18.75%）路径延伸至乌苏市西部，终点位于哈萨克斯坦东南部与新疆交界地带。该路径为中短程输送，表明在特定风场配置下，境外临近沙源仍对乌苏地区具有一定贡献，但强度与频率均低于本地路径。轨迹三（占比 10.42%）为三条路径中占比最低者，其空间范围沿乌苏西部延伸至哈萨克斯坦东部，路径长度相对较长，反映出除主要沙源外，仍有少量跨境沙尘自西部境外输入，但影响程度有限。“2·25”沙尘过程以局地起沙为主导，路径一贡献超过七成，说明该过程更多受到乌苏及周边下垫面条件和局地气象条件的控制。与“1·23”过程相比，“2·25”过程的外源输送作用显著减弱，进一步揭示出不同天气背景下沙尘来源结构的显著差异，也为理解乌苏地区沙尘来源的季节变化与天气分型提供了轨迹学依据。



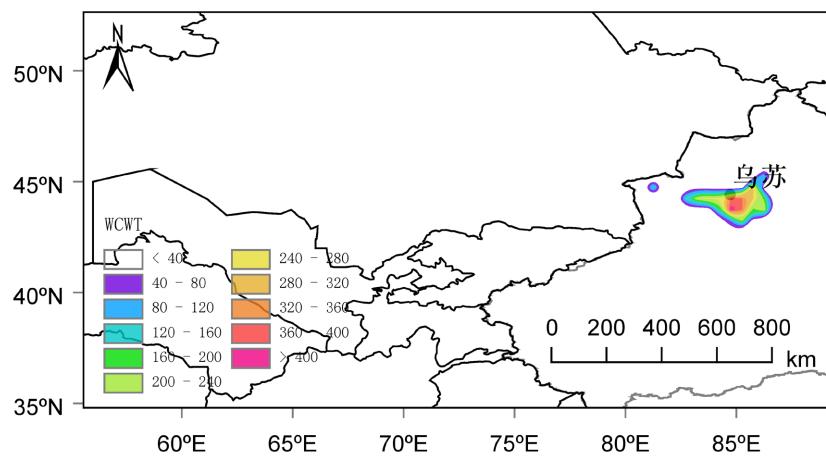
**Figure 10.** Backward trajectory clustering of the “2·25” dust event  
**图 10.** “2·25” 沙尘过程后向轨迹聚类

### 3.5.2. 区域贡献

以上基于浓度权重轨迹分析方法，我们对影响乌苏地区的“1·23”与“2·25”两次沙尘过程潜在源区贡献进行了系统评估（图 11、图 12）。WCWT 分析结果清晰揭示出两类沙尘过程在主导源区结构与贡献强度方面的显著差异。“1·23”沙尘过程呈现出典型的多源复合贡献特征。其中，乌苏本地及周边区域为最主要贡献源，WCWT 值普遍超过  $500 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，反映出本地起沙在本次过程中起到核心作用。此外，偏西路径所经的哈萨克斯坦东南部地区亦为重要外源区，贡献值达  $240 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  以上；新疆西南部至塔吉克斯坦交界一带也有显著贡献，数值约为  $280 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。三类源区共同构成此次沙尘的复杂来源体系，说明该过程受本地排放与中远程跨境输送的共同影响。相比之下，“2·25”过程则表现出高度集中的源区结构，主导贡献区位于乌苏市西南方向约 100 公里范围内的短距离区域，其 WCWT 值同样超过  $500 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，显示出极强的局地污染贡献。其他外源路径贡献微弱，进一步表明该过程以本地起沙为主导，沙尘输送范围有限，源区集中性明显高于“1·23”过程。WCWT 分析从污染物输送潜能角度揭示出两类沙尘过程的本质区别：“1·23”过程为“多源复合型”，而“2·25”过程为“局地主导型”。这一差异与前期分析中两类过程在环流背景、轨迹特征等方面的区别高度一致，进一步深化了对乌苏地区沙尘来源系统的认识，也为区域差异化防控策略的制定提供了科学依据。



**Figure 11.** Weighted trajectory of  $\text{PM}_{10}$  concentration during the “1·23” dust event  
**图 11.** “1·23” 沙尘过程  $\text{PM}_{10}$  浓度权重轨迹



**Figure 12.** Weighted trajectory of  $\text{PM}_{10}$  concentration during the “2·25” sandstorm event  
**图 12.** “2·25” 沙尘过程  $\text{PM}_{10}$  浓度权重轨迹

#### 4. 结果与讨论

(1) 两类沙尘过程受不同天气系统驱动，动力结构与起沙机制存在本质差异。“1·23”过程由“北槽南涡”型高低压对峙系统控制，强气压梯度配合850 hPa高层辐合与高螺旋度，形成动力强输送型沙尘；而“2·25”过程则为冷高压前缘锋面爆发型，系统动力结构偏弱，以局地强风起沙为主，垂直输送能力有限。

(2) 沙尘来源结构具有明显分型特征，分别为“多源复合型”与“局地主导型”后向轨迹与浓度权重分析表明，“1·23”过程受本地、哈萨克斯坦东南部和新疆西南部三类源区共同影响，跨境输送贡献显著；而“2·25”过程则以乌苏本地及西南方向100公里范围内为主要源区，局地起沙占比超过70%，外源作用较弱。

(3) 前期“暖-干”气候背景为沙尘爆发提供了重要的下垫面预调节作用。两次过程发生前两周均出现显著地表增温(偏高1.5°C~3°C)与区域性降水偏少，导致土壤湿度下降、积雪消融和冻土解冻，共同构成沙尘易发的热力与水分条件，显著提升了地表可蚀性。

(4) 沙尘过程的形成是天气动力、热力背景与局地下垫面条件共同作用的结果。“1·23”过程强调统

尺度动力输送与多源复合贡献，“2·25”过程则凸显局地环流与近源起沙的主导作用。研究结果可为乌苏及类似区域沙尘天气的预报预警及差异化防控策略制定提供科学依据。

## 参考文献

- [1] 方祥聪, 马威. 拉萨贡嘎机场一次风切变过程特征变化及气象服务保障分析[J]. 西藏科技, 2015(7): 55-57.
- [2] 王式功, 刘明哲, 邵爱梅, 等. 中国北方沙尘暴研究的进展与展望[J]. 干旱气象, 2020, 38(4): 525-538.
- [3] 赵勇, 黄安宁, 李震坤. 北疆地区极端天气气候事件变化特征及其影响[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(1): 15-26.
- [4] 张莉, 徐祥德, 王宏, 等. 准噶尔盆地南缘沙尘天气时空分布及输送路径分析[J]. 中国环境科学, 2019, 39(6): 2314-2323.
- [5] 李霞, 买买提艾力·买买提依明, 何清. 新疆乌苏市气候特征及其对沙尘天气的影响分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2021, 15(2): 58-65.
- [6] 周雅清, 王劲松, 冯建英, 等. 中国北方冬季沙尘暴变化特征及其与大气环流的关系[J]. 高原气象, 2023, 42(3): 1-14.
- [7] Draxler, R.R. and Hess, G.D. (1998) An Overview of HYSPLIT\_4 Modeling System for Trajectories, Dispersion and Deposition. *Australian Meteorological Magazine*, **47**, 295-308.
- [8] Draxler, R.R. and Hess, G.D. (1997) Description of the HYSPLIT\_4 Modeling System. NOAA Technical Memorandum ERL ARL-224.
- [9] 魏林波, 郝璐, 王建勋. 新疆典型区域土地利用/覆盖变化对沙尘源地的响应研究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(3): 1-12.
- [10] 胡塔勃, 李彰俊, 姜学恭, 等. 蒙古气旋背景下一次强沙尘暴过程的数值模拟与诊断分析[J]. 气象学报, 2019, 77(5): 779-792.
- [11] Li, J., Wang, Y., Zhang, X., et al. (2024) TrajStat: A Software for Trajectory Analysis and Visualization. *Environmental Modelling & Software*, **171**, Article 105888.
- [12] 李正涛. 京津冀地区沙尘活动及其对城市大气环境的影响[D]: [博士学位论文]. 石家庄: 河北师范大学, 2013.
- [13] Seibert, P., Kromp-Kolb, H., Baltensperger, U., et al. (1994) Trajectory Analysis of Aerosol Measurements at High Alpine Sites. *Transport and Transformation of Pollutants in the Troposphere*, **15**, 689-693.
- [14] Hsu, Y., Holsen, T.M. and Hopke, P.K. (2003) Comparison of Hybrid Receptor Models to Locate PCB Sources in Chicago. *Atmospheric Environment*, **37**, 545-562. [https://doi.org/10.1016/s1352-2310\(02\)00886-5](https://doi.org/10.1016/s1352-2310(02)00886-5)
- [15] Lilly, D.K. (1986) The Structure, Energetics and Propagation of Rotating Convective Storms. Part II: Helicity and Storm Stabilization. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **43**, 126-140.  
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1986\)043<0126:tseapo>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1986)043<0126:tseapo>2.0.co;2)
- [16] 刘还珠, 赵琳娜, 王淑静. 沙尘天气动力、热力结构特征及爆发机制研究[J]. 气象学报, 2004, 62(4): 433-442.