

# 高原地区拉萨贡嘎机场短小时内两次强沙尘过程气象条件及来源对比分析

旦增卓嘎, 冉铁伟

民航西藏自治区空中交通管理中心, 西藏 拉萨

收稿日期: 2026年1月28日; 录用日期: 2026年2月27日; 发布日期: 2026年3月10日

## 摘要

本研究针对2023年冬末春初拉萨贡嘎机场两次强沙尘过程(2023年2月11日~12日、3月30日~31日)开展对比分析, 结合气象观测、环流背景分析、物理量场与HYSPLIT后向轨迹-浓度权重模拟, 揭示其成因与源区贡献差异。结果表明, 两次过程均发生在高原西风急流增强背景下,  $PM_{10}$ 峰值分别达 $960 \mu g \cdot m^{-2}$ 和 $810 \mu g \cdot m^{-2}$ , 能见度降至百米级。2023年2月11日~12日沙尘过程受高纬度冷涡东移主导, 急流更强, 动力抬升显著, 沙尘以跨境远距离传输为主, 境外源贡献突出; 2023年3月30日~31日沙尘过程则主要受西风槽和高压脊南压影响, 沙尘更多源于西藏中西部近源区, 垂直扩散弱导致污染物持续累积。垂直结构上, 两次过程中低层辐散-中层辐合的配置均有利于沙尘垂直混合。基于沙尘来源和传输机制差异, 建议强化跨境沙尘监测预警与区域联防联控, 提升机场应急响应能力, 以保障高原航空安全与空气质量。

## 关键词

环流背景, 物理量场, HYSPLIT, 浓度权重, 高原航空安全

# A Comparative Analysis of Meteorological Conditions and Sources of Two Strong Sand and Dust Processes within a Short Time at Lhasa Gonggar Airport in the Plateau Region

Zengzhuoga Dan, Tiewei Ran

Civil Aviation Tibet Autonomous Region Air Traffic Management Center, Lhasa Xizang

Received: January 28, 2026; accepted: February 27, 2026; published: March 10, 2026

文章引用: 旦增卓嘎, 冉铁伟. 高原地区拉萨贡嘎机场短小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(2): 285-295. DOI: 10.12677/ccrl.2026.152034

## Abstract

This study conducts a comparative analysis of two strong sand and dust events at Lhasa Gonggar Airport in late winter and early spring of 2023 (February 11~12 and March 30~31), combining meteorological observations, circulation background analysis, physical quantity fields, and HYSPLIT backward trajectory-concentration weight simulations to reveal their causes and differences in source contributions. The results show that both events occurred under the background of enhanced westerly jet stream over the plateau, with  $PM_{10}$  peaks reaching  $960 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$  and  $810 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$  respectively, and visibility dropping to the hundred-meter level. The sand and dust event from February 11~12, 2023, was dominated by the eastward movement of a high-latitude cold vortex, with a stronger jet stream and significant dynamic uplift, and the dust was mainly from long-distance cross-border transport, with significant contributions from foreign sources; the sand and dust event from March 30~31, 2023, was mainly influenced by the west wind trough and the southward pressure of the high-pressure ridge, with dust mainly originating from the near-source areas in the central and western parts of Xizang, and weak vertical diffusion leading to the continuous accumulation of pollutants. In terms of vertical structure, the configuration of low-level divergence and mid-level convergence in both events was conducive to the vertical mixing of sand and dust. Based on the differences in the sources and transport mechanisms of sand and dust, it is suggested to strengthen cross-border sand and dust monitoring and early warning, as well as regional joint prevention and control, and enhance the airport's emergency response capabilities to ensure aviation safety and air quality on the plateau.

## Keywords

Circulation Background, Physical Quantity Field, HYSPLIT, Concentration Weight, Plateau Aviation Safety

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

青藏高原作为“亚洲水塔”和全球气候敏感区,其独特的地理环境与大气环流系统塑造了复杂的气溶胶传输机制[1][2]。近年来,随着全球气候变暖与区域人类活动叠加影响,高原沙尘事件的频率与强度呈现显著差异性,对生态系统、航空运输及公共健康构成多维挑战。机场作为高原交通网络的核心节点,其运行安全高度依赖精准的气象与环境监测能力[3]。同时,西藏自治区是我国面临严峻土地沙化问题的区域之一,其沙化土地总面积高达2151万ha,占据了全区国土面积的18%,在全国排名中位列第三[4]。特别拉萨至贡嘎机场高速公路沿线的山体沙化区域,不仅位于拉萨河这“一江两河”区域的关键地段,还是拉萨市的形象窗口,居民生活与活动的核心区域[5]。土地沙化及其引发的沙尘天气,不仅损害了拉萨作为城市窗口的形象,还对当地少数民族农牧民的生活环境和生活质量造成了不良影响[6][7]。更为严重的是,这一现象还导致了耕地面积的减少、草地生态系统的退化和农作物产量的下滑,对畜牧业和种植业的生产带来了多方面的负面影响。这不仅降低了农牧民的经济收入,还严重制约了他们的生存和发展空间[8]。

贡嘎机场正面临着独特的自然环境挑战,尤其是沙尘天气的影响[9]。由于机场所处地区冬季枯水期

河床裸露, 加之大风天气的频繁出现, 导致扬沙、浮尘天气时有发生。沙尘天气不仅降低了机场的能见度, 对航班的起飞和降落造成了不利影响, 还可能对飞机的机体和设备造成损害[10]。在沙尘暴严重时, 大量沙尘被吸入发动机进气道, 可能影响发动机的正常运作, 造成安全隐患[11]。但是目前针对这一特定区域的沙尘研究较为稀缺, 本文选取两次影响贡嘎机场较为严重的沙尘过程从气象以及来源角度进行对比分析, 从而为高原机场生态环境治理提供一定参考。

## 2. 资料与方法

### 2.1. 研究区域

拉萨贡嘎国际机场(29.2976°N, 90.9119°E), 位于中国西藏自治区山南市贡嘎县境内, 是西藏自治区第一大航空枢纽, 承担西藏 80%以上的航空运输任务, 是旅客进出西藏的核心通道[12]。距离拉萨市中心约 85 千米。机场地形分布如图 1, 海拔高达 3569.5 米, 是世界上海拔最高的机场之一, 其坐落在雅鲁藏布江南岸的河谷地带, 周围被高山环绕, 地势相对平坦[13]。气候属于高原温带半干旱气候[14], 昼夜温差大, 全年多风沙天气, 对航班起降影响十分严重。

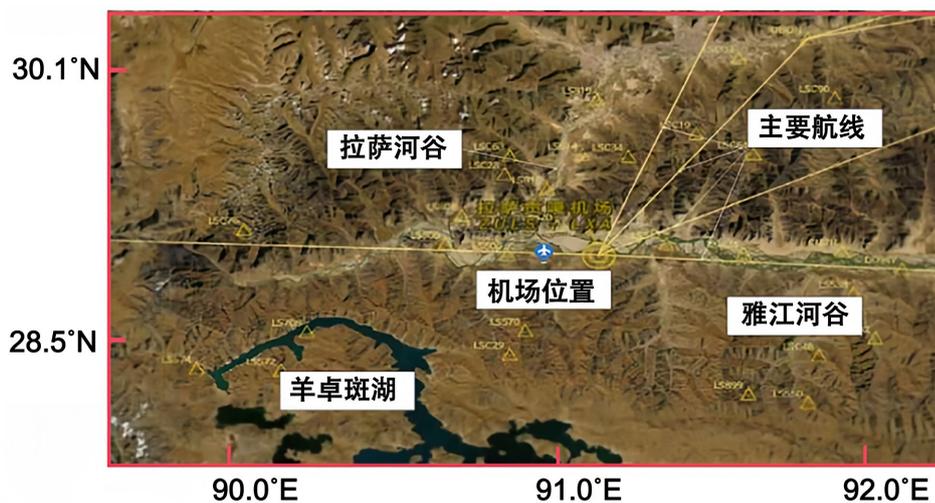


Figure 1. Terrain distribution and airport location (29.2976°N, 90.9119°E)  
图 1. 地形分布及机场位置(29.2976°N, 90.9119°E)

### 2.2. 数据来源及分析方法

本研究使用的数据主要来源于拉萨贡嘎国际机场地面气象观测站点数据以及 ERA5 再分析资料。沙尘时段选取北京时间 2023 年 2 月 11 日 08 时~12 日 08 时以及 3 月 30 日 08~31 日 08 时, 颗粒物污染数据来源真气网(<https://www.zq12369.com>)。后向轨迹以及 CWT 浓度权重分析所采用的气象数据来自美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)提供的全球同化系统(Global Data Assimilation System, GDAS)再分析数据(<https://ready.arl.noaa.gov/gdas1.php>)。

#### 2.2.1. 后向轨迹聚类

本研究借助 TrajStat 的后向轨迹模型, 深入分析两次贡嘎机场沙尘过程主要粗颗粒物的潜在来源[15]。该分析过程中, TrajStat 软件依托美国国家海洋大气管理局(NOAA)开发的 HYSPLIT (混合单粒子拉格朗日综合轨迹)模型模块来进行气团轨迹的计算[16] [17]。HYSPLIT 作为一个综合性的模式系统, 由 NOAA 等机构联合开发, 具备处理多样化气象输入场、涵盖广泛物理过程及适应多种排放源的特性。本文选取

模拟高度 500 米, 模拟时间 48 小时。

### 2.2.2. WCWT 分析法

CWT (浓度加权轨迹法)是一种量化外部污染物输运贡献水平的方法[18]。通过计算研究期间内单一网格内所有轨迹对应的样品浓度平均值, 来评估这些轨迹对目标区域污染水平的贡献。鉴于 PSCF(潜在源贡献因子)分析存在局限性, 即仅能反映污染轨迹在网格单元中的占比, 而无法在 PSCF 值相同的情况下区分不同来源对目标区域污染的具体影响。该法通过获取研究期间内单个网格内所有轨迹的样本浓度平均值, 实现了对外部迁移浓度贡献水平的量化。此外, 为了弥补 PSCF 方法的不足, CWT 还引入了数值校正机制, 即加权平均浓度值(WCWT 值), 这一指标能够更精确地反映潜在源的源强度[19]。计算公式(1)如下:

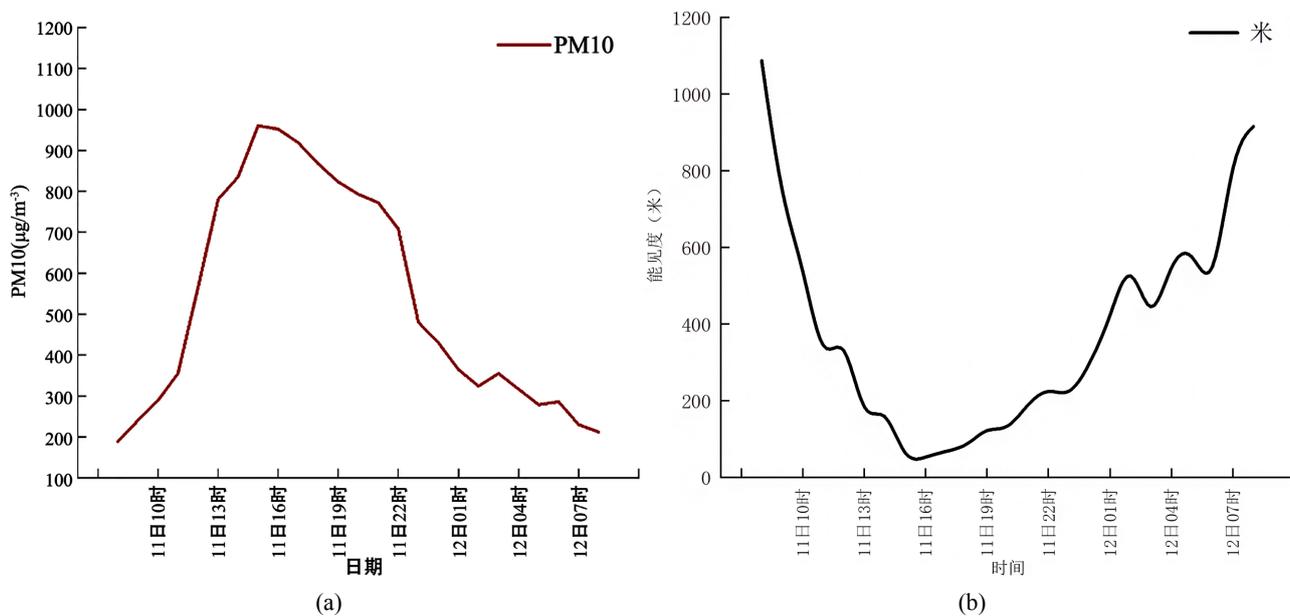
$$WCWT_{i,j} = \frac{m_{ij}}{n_{ij}} \times W_{i,j} \tag{1}$$

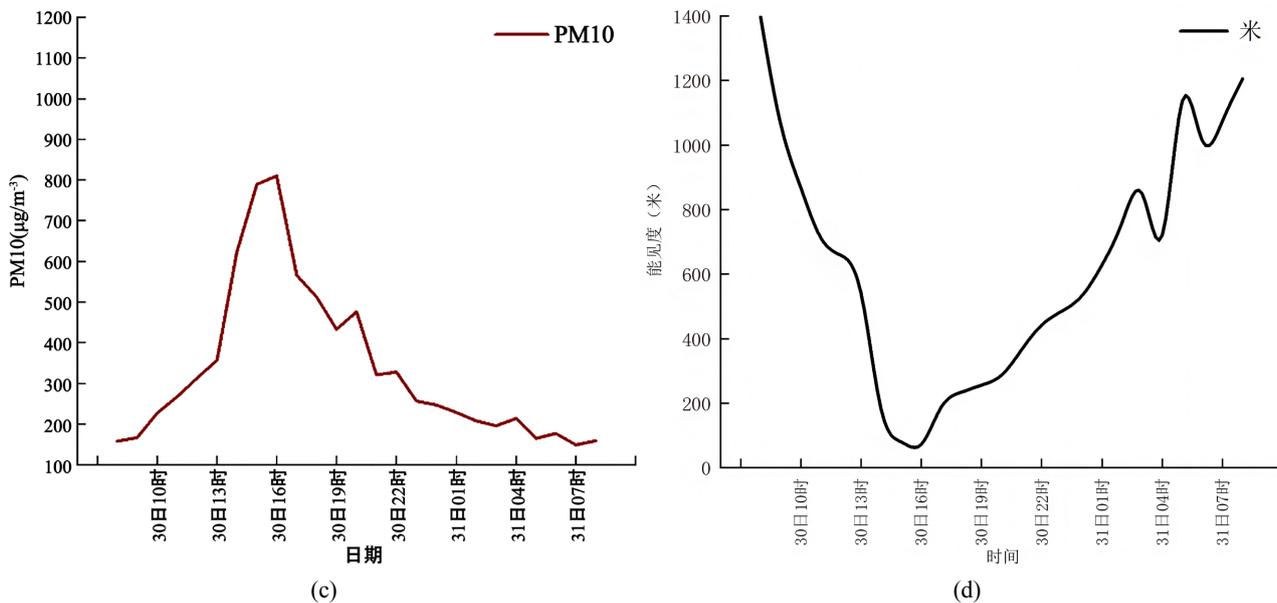
式中,  $WT_{ij}$ : 网格单元( $i,j$ )处的浓度权重值, 反映该区域对目标点污染的潜在贡献强度;  $M$  模拟的后向轨迹总数;  $n_{ij}$ : 第  $l$  条轨迹在网格单元( $i,j$ )内的停留时间;  $W_{i,j}$  表示第  $l$  条轨迹对应的污染物浓度观测值。

## 3. 结果与讨论

### 3.1. 两次沙尘污染天气实况

2 月 11 日 08 时~12 日 08 时, 贡嘎机场出现沙尘过程(简称“211”过程),  $PM_{10}$  峰值达  $960 \mu g \cdot m^{-3}$ , 平均粗颗粒物浓度  $533 \mu g \cdot m^{-3}$ , 强沙尘集中时段为 2 月 11 日 12~22 时, 过程平均能见度 385.7 米, 最低能见度仅为 53 米, 沙尘过程结束后能见度低于 2 千米的低能见度天气达 19 h(图 2(a)、图 2(b))。在“211”沙尘影响过程结束一个月左右, 3 月 30 日 08 时~31 日 08 时又一股沙尘暴天气来袭影响贡嘎机场(简称“330”过程), 该过程较“211”沙尘过程持续时间略短, 强沙尘集中时段为 3 月 30 日 14~16 时, 但强度依然较大,  $PM_{10}$  峰值达  $810 \mu g \cdot m^{-3}$ , 平均粗颗粒物浓度  $333.9 \mu g \cdot m^{-3}$ , 过程平均能见度 629.9 米, 最低能见度仅为 72 米, 沙尘过程结束后能见度低于 2 千米的低能见度天气达 11 h(图 2(c)、图 2(d))。两次过程影响时间相近, 强度大, 对贡嘎机场正常航线运行造成了严重的负面影响。



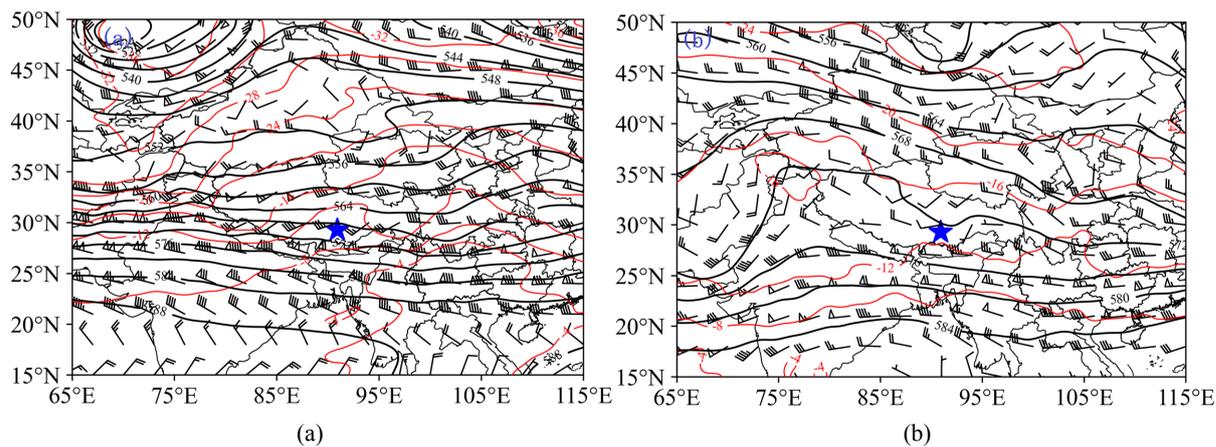


**Figure 2.** (a) PM10 concentration during the “211” dust event; (b) Visibility during the “211” dust event; (c) PM10 concentration during the “330” dust event; (d) Visibility during the “330” dust event

**图 2.** (a) “211” 沙尘过程 PM10 浓度; (b) “211” 沙尘过程能见度; (c) “330” 沙尘过程 PM10 浓度; (d) “330” 沙尘过程能见度

### 3.2. 天气形势

#### 3.2.1. 500 hPa 形势场



**Figure 3.** 500 hPa Geopotential Field ((a) “211” Process; (b) “330” Process)

**图 3.** 500 hPa 形势场((a) “211” 过程; (b) “330” 过程)

2023 年 2 月 11 日 08 时 500 hPa 形势场如图 3(a), “211” 沙尘过程中高纬呈两槽一脊的形势, 青藏高原西部上游北部冷涡发展东移南调, 冷涡后部强冷空气引导地面冷锋南下, 85°E~105°E 中低纬地区内存在西风槽东移, 槽前正涡度平流诱导地面低压发展, 加强气压梯度, 引发地面强风。青藏高原对西风带产生动力阻挡, 形成南北两支急流。北支急流沿高原北侧向东, 南支急流绕高原南缘, 导致高原北部 (20°N~30°N) 风速增强, 贡嘎机场处在平直西风带下, 西风急流风速超  $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , “211” 沙尘过程主要为冷涡引导地面强冷空气南下, 西风急流显著增强控制高原大部分地区, 为沙尘暴提供强有力的动力条件。

从图 3(b)为“330”沙尘过程 3 月 30 日 08 时 500 hPa 环流场, 西风槽主体位于 95°E~115°E, 槽线呈东北-西南走向, 槽后西北气流覆盖西藏东部及四川西部。高原西部(65°E~75°E)受高压脊控制, 脊线南压至 25°N, 下沉气流范围扩大, 高原南部更为干燥。南支急流绕高原南缘延伸至 30°N, 急流风速风速达 30 m·s<sup>-1</sup>。“330”过程是高空槽东移, 槽后西北气流引导冷空气南下, 中低纬西风急流增强带来的沙尘天气。

### 3.2.2. 水平螺旋度特征

水平螺旋度(Horizontal Helicity)表征气流水平运动中的旋转特性, 水平螺旋度场的强度与空间分布直接反映沙尘暴的动力抬升能力[20]。从图 4(a)、图 4(b)分析, “211”和“330”沙尘过程的水平螺旋度均处在正值与负值的过渡区域, “211”过程颗粒物污染最强时刻 11 日 16 时, 青藏高原东南部地区为水平螺旋度大面积的负值区域, 辐合上升明显, 西北部为大面积的正值, 辐散下沉, 机场位于南北水平螺旋度过渡区的梯度大值区, 为弱的上升运动, 中心值-100 m<sup>2</sup>·s<sup>-2</sup>。“330”沙尘过程颗粒物污染最强时刻 30 日 16 时青藏高原南部为正值, 北部为负值, 中部为弱的正值区, 拉萨东西两侧均为正值区, 该过程均处在南北以及东西两侧水平螺旋度的梯度大值区, 为弱的上升运动, 中心值-80 m<sup>2</sup>·s<sup>-2</sup>。两次过程都是在青藏高原西侧以及南侧强烈的辐合上升运动背景下以及西风气流增强, 沙尘向拉萨地区传输影响贡嘎机场, 此外, 均存在弱的上升运动, 拉萨本地的沙尘悬浮于空中, 与外来沙尘叠加加剧了沙尘影响程度。

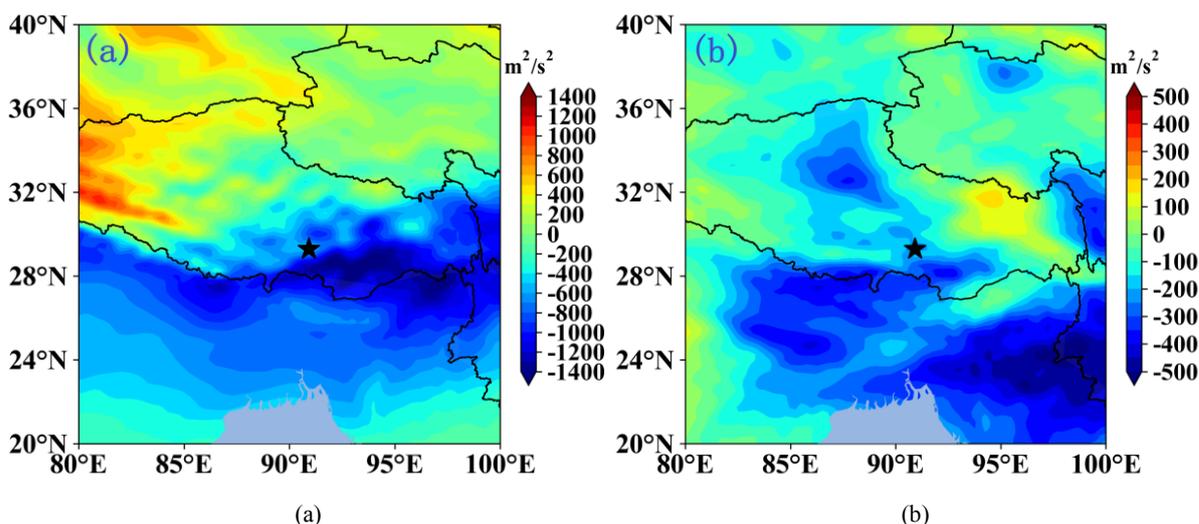
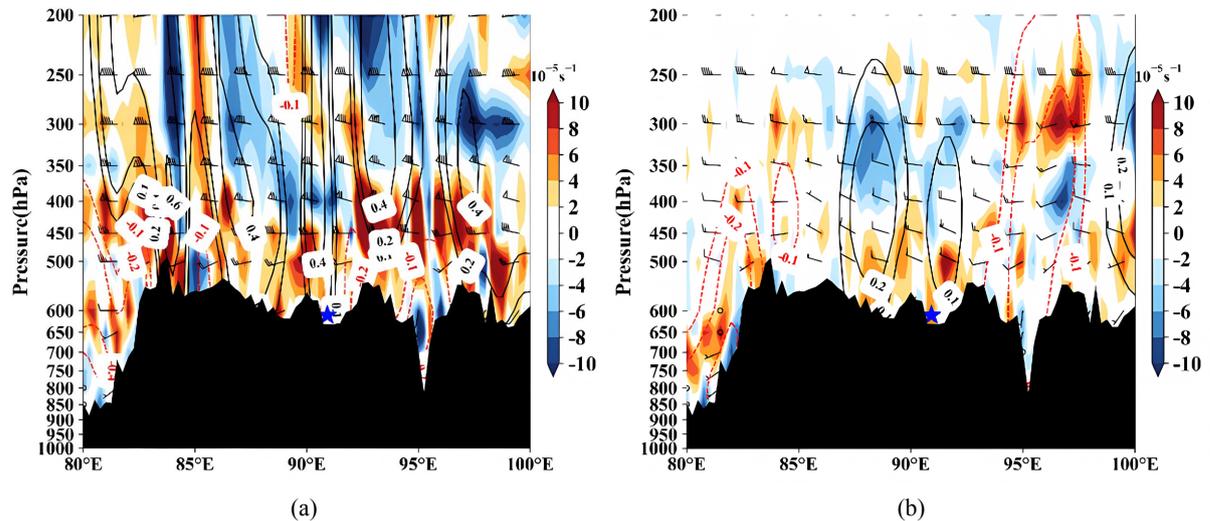


Figure 4. Horizontal Helicity Field ((a) “211” process on February 11 at 16:00; (b) “330” process on March 30 at 16:00)  
图 4. 水平螺旋度场((a) “211”过程 2 月 11 日 16 时; (b) “330”过程 3 月 30 日 16 时)

### 3.2.3. 垂直速度及散度场

沿贡嘎机场纬度位置做纬向剖面, 分析两次沙尘过程垂直方向上的运动特点, 图 5(a)为“211”沙尘过程 PM<sub>10</sub> 污染浓度最高时次 2 月 11 日 16 时垂直剖面图, 80°E~85°E 以上升运动为主, 中心最大强度达 0.4 m·s<sup>-1</sup>, 且贡嘎机场上游 82°E~88°E 以辐合上升运动为主, 450 hPa 以上西北风(风速 > 16 m·s<sup>-1</sup>)与上升气流耦合, 形成强斜压锋区从而增强动量下传, 加剧近地面起沙, 同时在西风急流作用向下游传输影响贡嘎机场附近, 且上游地区大气层结辐合上升辐散下沉交替存在, 沙尘途径地垂直混合作用更强。相比之下, “330”沙尘天气过程在 PM<sub>10</sub> 浓度峰值时次(3 月 30 日 16 时, 图 5(b))呈现出不同的动力结构。上升运动范围虽广, 但强度显著偏弱, 上游地区以上升运动为主, 中心强度仅为 0.2 m·s<sup>-1</sup>。动力场配置独特, 形成了“低层辐散、中层强辐合”的垂向结构。具体而言, 机场地区低空受微弱辐散控制(散度约 2 × 10<sup>-5</sup> s<sup>-1</sup>), 此结构有利于将上游输送来的沙尘向周边扩散; 而在中层则存在较强的辐合中心(散度约 -5 ×

$10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ), 这一明显的“抽吸”效应为沙尘向上输送提供了核心动力, 有效克服了低层辐散的不利条件。这种高低空动力场的配合, 构成一个有效的“底部吸入 - 中层抬升”泵送机制, 使得近地面的沙尘能被持续抽吸至空中, 并在中层辐合层内聚集与发展, 极大地促进了沙尘在垂直方向上的充分混合与长时间滞留, 从而解释了为何在上升运动较弱的情况下, 依然能形成浓度较高、垂直分布均匀的沙尘污染。



**Figure 5.** Vertical velocity (contours in  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), divergence (shaded in  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ), and wind field for the “211” process and “330” process ((a) 16:00 on February 11; (b) 16:00 on March 30)

**图 5.** “211”过程、“330”过程垂直速度(等值线  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )、散度(填色  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )及风场((a) 2月11日 16时; (b) 3月30日 16时)

### 3.3. 沙尘来源分析

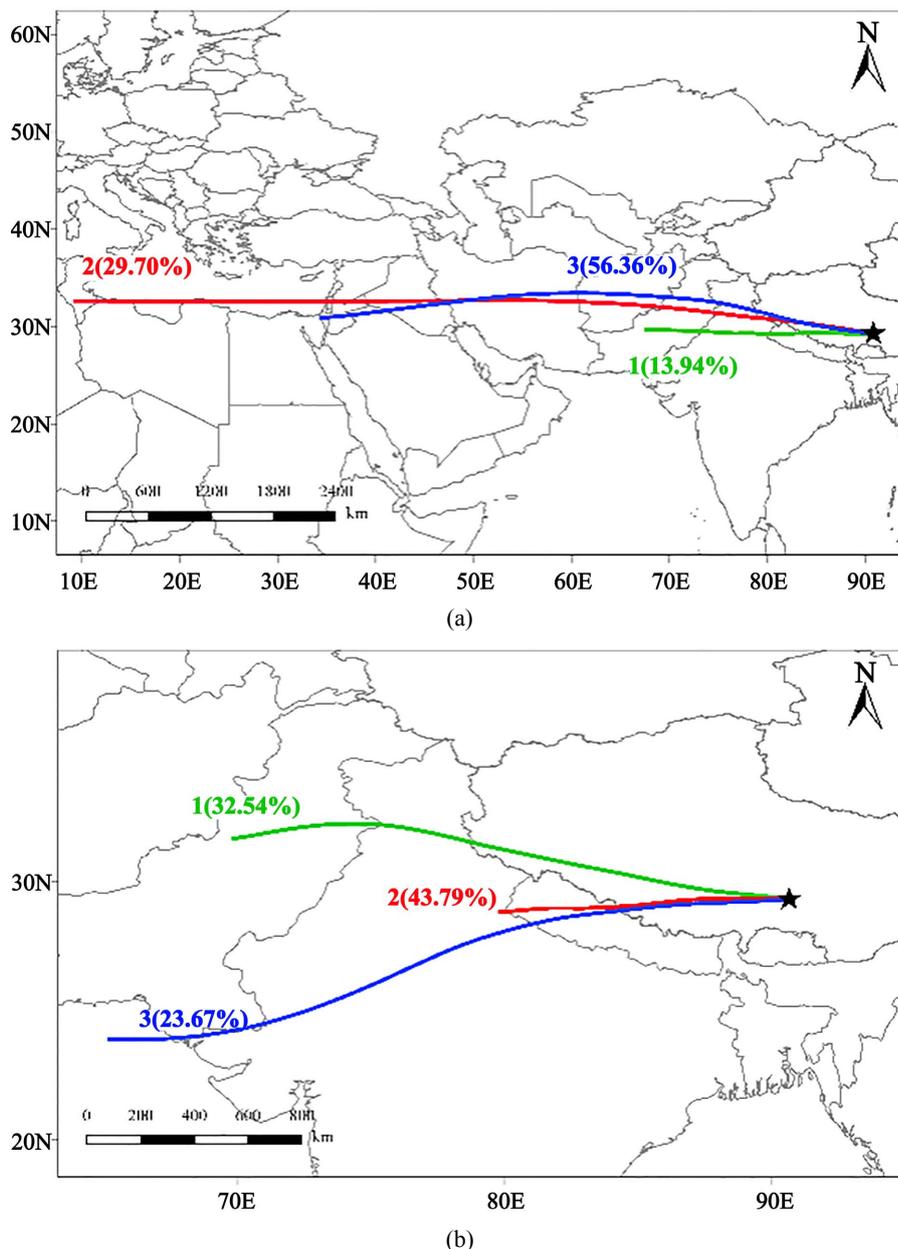
#### 3.3.1. 输送路径

选择贡嘎机场位置作为两次沙尘过程后向轨迹模拟的研究受点, 设定初始高度为 500 m。从“211”沙尘过程共得到 190 条轨迹(图 6(a)), 后向聚类结果经过空间方差增长率确定为 3 条路径, 占比最大的第一条路径(轨迹 3)为青藏高原西部 - 巴基斯坦 - 阿拉伯半岛北部, 占比 56.36%。其次为巴基斯坦 - 伊朗 - 北非大陆西北部(轨迹 2), 占比 29.7%, 占比最少的青藏高原西南部 - 印度北部 - 巴基斯坦一带(轨迹 1), 该路径传输距离相对较近, 占比确仅为 13.94%, 表明“211”沙尘过程受远距离沙漠以及季节性裸露沙地传输影响。“330”沙尘过程共得到 165 条轨迹(图 6(b)), 后向聚类结果经过空间方差增长率同样确定为 3 条路径, 其中占比 43.79%的轨迹 2 (青藏高原西南部 - 尼泊尔地区)凸显了喜马拉雅南麓的本地沙源贡献, 其传输路径受地形约束显著, 呈现近距离扩散模式。占比 32.54%的轨迹 1 (青藏高原 - 印度北部 - 巴基斯坦中部)则表现出跨喜马拉雅山脉的长距离传输特征, 反映出印度季风对沙尘路径的引导作用。占比 23.67%的轨迹 3 (青藏高原西南部 - 巴基斯坦南部)虽传输距离最短, 但揭示了喀喇昆仑走廊的局地环流对沙尘扩散的复杂影响。“330”过程相较于“211”沙尘过程传输距离更近, 以近距离传输为主。

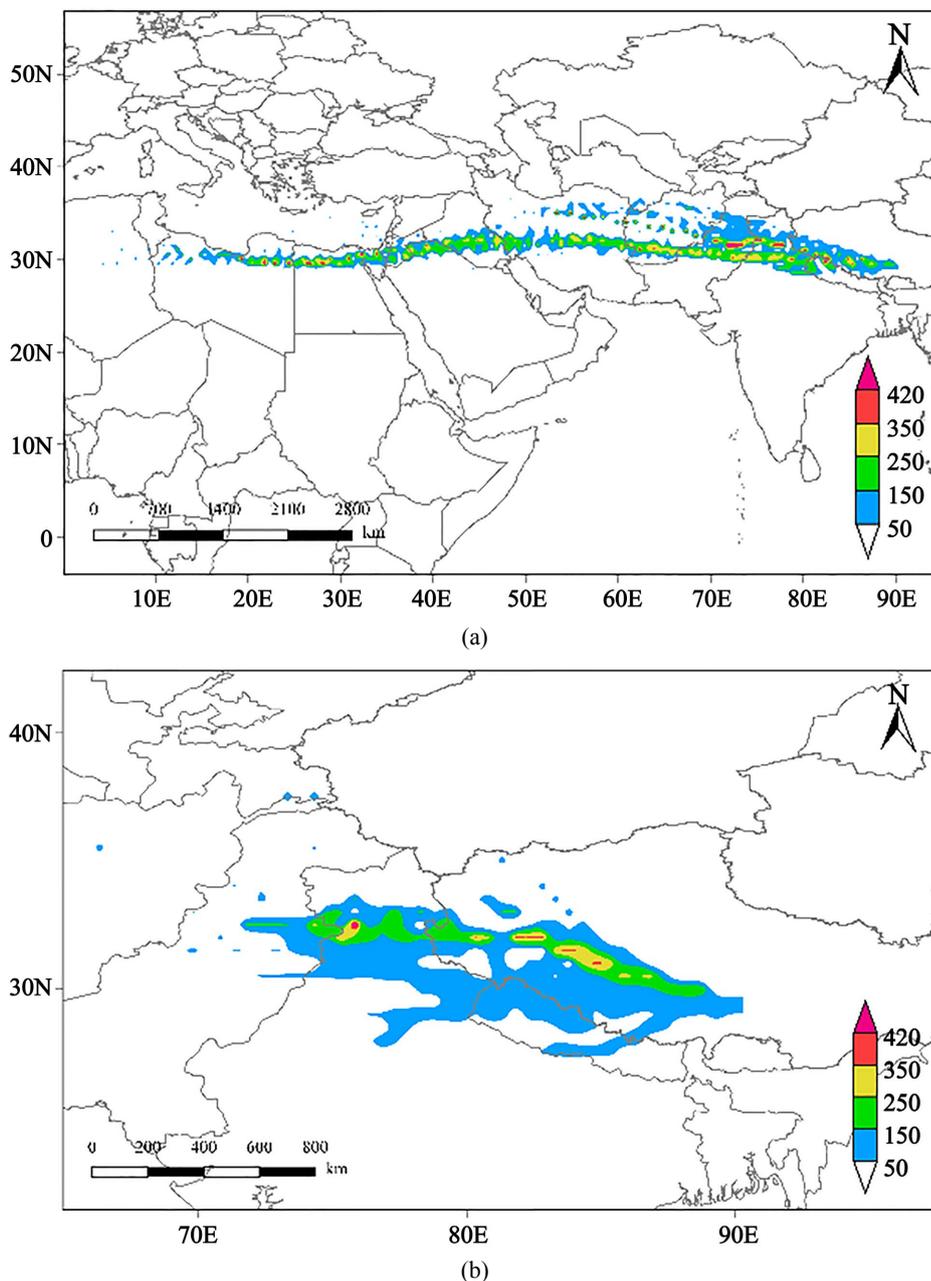
#### 3.3.2. 区域贡献

为进一步研究不同区域对于贡嘎机场这两次沙尘天气形成的贡献情况, 利用浓度权重轨迹分析对潜在源网格采用平均加权计算, 模拟贡嘎机场区域附近  $\text{PM}_{10}$  浓度权重轨迹[21], 结果见图 7(a)、图 7(b), WCWT 值越大, 表示该地区目标网格对机场附近的粗颗粒污染物贡献程度越高。“211”与“330”沙尘过程的空间贡献特征对比分析显示, 两者在沙尘源区分布、传输路径及环境效应上存在显著差异。具体

而言, “211”过程呈现多源远距离输送特征, 其潜在贡献源区覆盖西南亚至北非广阔区域: 西南南部与尼泊尔交界 - 巴基斯坦中部区域贡献值高达  $420 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$  以上, 印度北部 - 巴基斯坦中偏南部贡献值在  $150\sim 350 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$  之间, 北非大陆埃及 - 利比亚地区贡献值超过  $350 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。该过程源区以境外为主, 远距离输送特征显著, 反映了西风急流天气系统对中亚 - 西亚沙漠带沙尘的长距离搬运作用。相比之下, “330”过程则表现为局地贡献主导模式, 其沙尘源区集中于青藏高原中西部及境外邻近区域。西藏中西部日喀则 - 噶尔一带贡献值达  $250\sim 420 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ , 境外印度北部与克什米尔交界地区贡献值超过  $350 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ , 但影响范围较小。该过程源区以境内为主, 沙尘传输距离较短, 主要受制于春季青藏高原局地热力环流及山谷风效应, 反映了区域性地表解冻与西藏西侧附近沙源近距离传输影响。



**Figure 6.** Backward trajectory clustering of dust events ((a) “211” event; (b) “330” event)  
**图 6.** 沙尘过程后向轨迹聚类((a) “211”过程; (b) “330”过程)



**Figure 7.** Weighted trajectories of PM<sub>10</sub> concentrations during dust events ((a) “211” event; (b) “330” event)  
**图 7.** 沙尘过程 PM<sub>10</sub> 浓度权重轨迹((a) “211” 过程; (b) “330” 过程)

#### 4. 结果与讨论

(1) 贡嘎机场在 2023 年 2 月 11 日(“211”过程)和 3 月 30 日(“330”过程)短时内接连遭遇沙尘暴侵袭, 两次过程均导致能见度骤降至百米级, PM<sub>10</sub> 峰值分别达 960  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和 810  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 其中“211”过程强度更大、2 km 以下低能见度天气持续时间更长(19 h), 而“330”过程浮沉虽持续时间略短(11 h), 但仍对机场航线运行造成严重干扰。两次事件凸显高原春季沙尘强度较高, 需强化沙尘天气预警与应急响应以保障航空安全。

(2) “211”过程由高纬度冷涡东移主导, 青藏高原西部的强西风急流( $>40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )与西风短波槽前正涡

度平流叠加, 引导地面冷锋东移南下, 动力抬升更为剧烈, 沙尘强度大、范围广; “330”过程则受东移西风槽(95°E~115°E)及高压脊南压(25°N)影响, 南支急流增强(30 m·s<sup>-1</sup>), 西北冷空气与下沉干燥气流结合, 沙尘局地性强但动力条件次之。

(3) 两次沙尘过程的水平螺旋度场均表现为正负过渡区下存在弱上升运动, 青藏高原西侧以及南侧强烈的辐合上升运动背景下以及西风气流增强, 沙尘向拉萨地区传输影响贡嘎机场, 此外, 弱的上升运动使得拉萨本地的沙尘悬浮于空中, 与外来沙尘叠加加剧了沙尘影响程度。“211”沙尘过程上游地区大气层结辐合上升辐散下沉交替存在, 沙尘途径地垂直混合作用更强, “330”沙尘天气过程发生前, 上游以相对较弱上升运动为主。

(4) 两次沙尘过程对贡嘎机场 PM<sub>10</sub> 的贡献源区及强度存在显著差异, “211”过程以远距离跨境传输为主, 主路径受高空西风急流驱动, 沙尘源自阿拉伯半岛沙漠、北非大陆沙漠, 凸显强西风对跨境沙尘的强输送能力; “330”过程则以近距离跨境传输为主, 主路径源于高原西南部及尼泊尔沙源。“211”过程境外源区广布且强度高, 反映高空西风急流主导的强跨境沙尘输送能力; “330”过程则以境内近源为核心, 最大贡献值为境内西藏中西部日喀则-噶尔一带(250~420 μg·m<sup>-2</sup>), 沿地形通道近距离聚集。

## 参考文献

- [1] 陈学龙, 马耀明. 独特的青藏高原大气边界层[J]. 科学通报, 2025, 70(24): 4180-4187.
- [2] 季鸿语. 沙尘气溶胶对青藏高原降水的影响[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2024.
- [3] 吴昊, 徐琪, 曹阳, 等. 通用航空气象灾害监测与预警预报技术新进展[J/OL]. 大气科学学报, 2025, 48(2): 340-351. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1803.P.20250307.1051.002.html>, 2025-03-18.
- [4] 史伟, 吴协保, 刘庭威, 等. 西藏自治区2014-2019年沙化土地动态变化及演变特征[J]. 中南林业调查规划, 2023, 42(1): 1-4+10.
- [5] 罗铮蒸. 基于多源大数据的拉萨市主城区街区空间形态与人群时空行为关系研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- [6] 李灿然. 青藏高原城市地区 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 时空变化特征及其影响机制[D]: [硕士学位论文]. 拉萨: 西藏大学, 2023.
- [7] 张丹, 楚宝临, 赵丽, 等. 拉萨市大气颗粒物碳组分污染特征及来源分析[J]. 环境影响评价, 2018, 40(3): 65-70.
- [8] 李本涛, 张镭, 张云舒, 等. 青藏高原沙尘气溶胶时空变化及其来源地分析[J]. 高原气象, 2023, 42(3): 564-574.
- [9] 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.
- [10] 袁远, 吴琳, 邹超, 等. 天津机场飞机污染排放及其特征研究[J]. 环境工程, 2018, 36(9): 81-86+58.
- [11] 昆仑, 沈海滨. 沙尘暴灾害与沙尘天气的防护[J]. 世界环境, 2011(4): 82-83.
- [12] 黄婷婷. 中国建筑承建的拉萨贡嘎机场国际航站楼正式投运[J]. 施工企业管理, 2024(2): 118.
- [13] 嘉益. 封面照片说明: 拉萨河中游河谷地貌及植被景观[J]. 山地学报, 2012, 30(5): 554.
- [14] 周秉荣, 袁佳双, 乔斌, 等. 青藏高原气候与冰冻圈变化研究进展[J]. 环境科学研究, 2024, 37(9): 1885-1896.
- [15] 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[J]. 中国环境科学, 2025, 45(4): 1844-1857.
- [16] 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.
- [17] Draxler, R.R. and Hess, G.D. (1997) Description of the HYSPLIT\_4 Modeling System. NOAA Technical Memorandum ERL ARL-224.
- [18] 刘强. 拉格朗日输送扩散模式在大气环境中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京大学, 2016.
- [19] 高木木, 侯乐, 王佳音, 等. 沈阳地区一次重污染沙尘天气过程成因分析[J]. 绿色科技, 2023, 25(12): 129-

134+168.

- [20] 姚星灿. 南京地区冬季不同污染类型下二次无机气溶胶的形成研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2023.
- [21] 耿柠波. 郑州市高新区大气颗粒物  $PM_{2.5}$  中金属元素分析及污染源解析[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2012.