王俊彬,李婷苑,龚 宇,等.2025 年 4 月广东省一次罕见浮尘天气过程的气象成因分析 [J]. 中国环境科学, 2026,46(1):41-52.
Wang J B, Li T Y, Gong Y, et al. Synoptic mechanisms underlying a rare floating dust weather processin Guangdong Provinceduring April 2025 [J]. China Environmental Science, 2026,46(1):41-52.

2025 年 4 月广东省一次罕见浮尘天气过程的气象成因分析

王俊彬[1,2],李婷苑[1,2*],龚 宇[1,2],陈靖扬[1,2],沈 劲[3] (1.广东省生态气象中心(珠三角环境气象预报预警中心),广东 广州 510640；2.广东省南岭森林大气环境与碳中和野外科学观测研究站,广东 广州 511443；3.广东省生态环境监测中心,生态环境部环境保护区域空气质量监测重点实验室,广东省环境保护大气二次污染研究重点实验室,广东 广州 510308)

摘要：2025 年 4 月 12~16 日广东省出现了一次大范围的罕见浮尘天气过程,为了解本次过程的气象成因,基于多源融合观测资料和再分析资料进行了分析.结果表明,东亚大槽引导的冷空气在蒙古国西南部形成沙尘区,并推动沙尘深度南下,输入广东省.受沙尘影响,广东省 21 个城市均出现 PM_{10} 浓度超标,共计出现 54 个污染城数,其中有 6 个重度污染.13 日广东全省平均 PM_{10} 浓度高达 305.2μg/m^3,是 2014 年以来第二高值的 2.4 倍,其中广州市 PM_{10} 日平均浓度最高(400μg/m^3),显著高于 2009 年沙尘入粤过程的浓度值.沙尘源地的气候分析发现,受脊前西北气流影响,蒙古国西部大部分地区 2~3 月累积降水量在 10mm 以下,较历史同期偏少,导致土壤湿度降至近 30 年第 4 低的水平,为沙尘的形成提供了有利的下垫面条件.沙尘传输过程的分析指出,本次冷空气过程在南岭山脉区域形成了近 30 年最强的偏北风,极端强风推动沙尘颗粒直接翻越南岭山脉南下,将大量沙尘颗粒带入广东省.后向轨迹分析表明,到达广东省四大区域的沙尘颗粒前期均由内蒙古向南输送至湖北省,后期则沿北路、东北路和西北路 3 种不同路径南下,翻越不同高度的山脉地形后入粤,使得广东省出现大范围浮尘天气.

关键词：广东省；浮尘天气；气象成因；冷空气；后向轨迹
中图分类号：X513 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2026)01-0041-12

Synoptic mechanisms underlying a rare floating dust weather processin Guangdong Province during April 2025. WANG Jun-bin[1,2], LI Ting-yuan[1,2*], GONG Yu[1,2], CHEN Jing-yang[1,2], SHEN Jin[3] (1.Guangdong Ecological Meteorological Center, Pearl River Delta Center for Environmental Meteorology Prediction and Warning, Guangzhou 510640, China；2.Guangdong Provincial Observation and Research Stationfor Atmospheric Environment and Carbon Neutrality in Nanling Forests, Guangzhou 511443, China；3.Key Laboratory of Regional Air Quality Monitoring of Ministry of Ecology and Environment,Guangdong Environmental Protection Key Laboratory of Secondary Air Pollution Research, Guangdong Ecological Environmental Monitoring Center, Guangzhou 510308, China). *China Environmental Science*, 2026,46(1)：41~52

Abstract：To investigate the synoptic mechanisms underlying a rare, widespread floating dust weather process in Guangdong Province during 12~16 April 2025, analyses were conducted using multi-source integrated observational data and reanalysis data. The results reveal:The cold front guided by the East Asian trough generated a dust area in southwestern Mongolia and drove it southward into Guangdong Province.Under the influence of dust, PM_{10} concentrations exceeded standards across all 21 cities in Guangdong, resulting in a total of 54 polluted cities (Including 6heavy pollution). On April 13, provincial average PM_{10} concentration reached 305.2μg/m^3, 2.4 times the magnitude of the second-highest concentration since 2014. Notably, Guangzhou registered the highest daily average PM_{10} concentration (400μg/m^3), significantly exceeding levels observed during the dust intrusion event affecting Guangdong in 2009. Climate analysis of the dust source region revealed that influenced by northwesterly flow ahead of a ridge, the cumulative precipitation in most parts of western Mongolia from February to March was below 10mm, significantly lower than the historical average for the same period. This resulted in soil moisture dropping to the fourth lowest level in the past 30 years, creating conducive underlying surface conditions for dust emission. Analysis of the dust transport process identified that the cold front generated the strongest northerly winds in the Nanling Mountains region in the past three decades. Driven by extreme winds, dust particles were carried directly across the Nanling Mountains andtransported southwards into Guangdong Province. Backward trajectory analysis indicated that dust particles reaching the four major regions of Guangdong were initially transported southward from Inner Mongolia to Hubei Province. Subsequently, they followed three distinct pathways (northern, northeastern, and

收稿日期：2025-06-23
基金项目：广东省基础与应用基础研究基金项目(2023A1515110536);广东省科技计划项目(2024B1212040006);中国气象局青年创新团队项目(CMA2023QN13);广东省重点研发计划项目(2020B1111360003);广东省气象局科学技术研究项目(GRMC2023Q37)
* 责任作者, 高级工程师, l-tiny@163.com

northwestern routes) southward, traversing mountainous terrain of varying elevations to enter Guangdong, ultimately causing the extensive floating dust event.

Key words：Guangdong Province；floating dustweather；synoptic mechanisms；cold front；backward trajectory

沙尘天气是大风把地表尘土或沙粒等吹起,使空气混浊、水平能见度降低的天气现象,多发于干旱、半干旱地区[1-3].根据其对能见度的影响程度,可以细分为浮尘、扬沙、沙尘暴、强沙尘暴和特强沙尘暴 5 个等级[4].研究发现,沙尘天气会带来大量可吸入颗粒物(PM_{10})和细颗粒物($PM_{2.5}$)[5-8],导致大气中的地壳金属元素浓度明显升高[9-12],并且通过二次反应生成硝酸根和硫酸根等气溶胶离子[13-14],对人体呼吸系统和心脑血管系统的健康造成严重危害[15-18].

基于实地监测和卫星遥感等手段发现,影响我国的沙尘主要源自蒙古国地区和我国西北部的新疆、内蒙古、甘肃和宁夏等地[19-21].在不同天气系统影响下,影响我国的沙尘有五种典型传输路径,其中最常发生的依次是西北路径型(自蒙古国西南部或我国内蒙古西部,向我国东部传输)、偏西路径型(自新疆南部向我国东北及华北方向传输)和偏北路径型(自蒙古国东部或我国东北地区,向华北方向传输)[22].Mao 等[23]的研究发现,沙尘在起源和传输过程中明显受下垫面植被状况的影响:在蒙古国东南部和我国中北部,归一化植被指数每增加 0.1,沙尘负荷会减少 2864μg/m^2,对应敏感区内春季沙尘暴、扬沙、浮尘将分别减少 4.0, 1.5 和 0.2d.而衣娜娜等人的研究则指出,若沙源地植被覆盖率增加 5%,起沙总量将削减 50%,下游地区地面沙尘的浓度将削减>80%,植树造林等生态治理工程对沙尘有很好的控制作用[24].为减少沙尘的发生,改善空气质量,我国自 1978 年开始推行三北防护林工程,在人为努力和有利气候条件的配合下,东亚地区沙尘发生的频次有了明显下降[25-26].但与此同时,自蒙古国地区向我国跨界传输的沙尘却有所增多[27-29],逐渐成为影响我国北方的重要沙尘源.Chen 等[30]最近的研究表明,2023 年 3~4 月蒙古国对我国北方沙尘浓度的贡献超过 42%,其中单次强沙尘暴的贡献度最高可达 63%,突出了跨界环境协同治理的重要性.

广东省位于我国大陆的最南端,远离沙尘源地,因此较少受到沙尘的侵扰.但在全球变暖背景下,北极放大效应导致中纬度西风急流的波动性增强,东亚和北美地区的极端强冷空气事件变得更加频发广发[31-33],我国出现了越来越多破纪录的冷空气过程[34-35].这也使得主要受冷空气驱动的沙尘过程变得更加复杂多变,原本一般只出现在我国中北部地区的沙尘在极端冷空气的带动下更易向南扩散,给广东省的环境空气质量带来新的挑战.已有的文献记录表明,2009 年 4 月[36]、2012 年 3 月[37]、2017 年 4 月[38]和 2021 年 3 月[39]均发生了沙尘输入广东省的情况.其中最严重的是 2009 年 4 月 27 日,一次沙尘过程使广州市日均 PM_{10} 浓度上涨至 284μg/m^3[40].而在 2025 年 4 月 12 日,又一次冷空气过程将沙尘吹进了广东省,使广东发生了强度超过上述几次过程的大范围罕见浮尘天气.为了探究广东省本次罕见浮尘天气的气象成因,本文借助多源融合观测资料和后向轨迹模型进行了具体分析.

1 数据与方法

1.1 数据来源

本研究采用的数据为气象站观测资料、再分析资料、卫星监测资料和 PM_{10} 浓度监测资料.其中,气象站观测资料采用广东省内有能见度观测仪器的 203 个国家气象站和区域气象站的能见度观测数据;再分析资料选用欧洲中期数值预报中心第五代大气再分析数据集 ECMWF Reanalysis v5,简称 ERA5(https://cds.climate.copernicus.eu/),水平网格分辨率为 0.25°×0.25°,垂直方向有 37 层(1000hPa 至 1hPa),采用资料包括高空要素(位势高度、U 风和 V 风)和地面要素(降水量、土壤湿度、10m U 风和 10m V 风);卫星监测资料采用我国新一代静止轨道气象卫星风云四号系列 B 星 L1 级 4 公里分辨率沙尘监测数据 (https://data.nsmc.org.cn/DataPortal/cn/data/structure.html);PM_{10} 浓度监测资料来源于中国环境监测总站(https://air.cnemc.cn:18007/).

1.2 研究方法

(1)采用混合单粒子拉格朗日积分轨道模型(HYSPLIT)追踪进入广东省的沙尘粒子传输轨迹.该模型是由美国国家海洋和大气管理局的空气资源实验室和澳大利亚气象局联合研发的用于计算

和分析大气污染物输送、扩散轨迹的专业模型(https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php), 能够用于计算气团的前向和后向轨迹,模拟沙尘、臭氧等固气粒子的扩散和沉降过程,被广泛应用于大气污染传输和扩散相关的科学研究[41-44].本文主要使用该模型的后向轨迹追踪功能,分析广东省不同地区沙尘粒子的来源轨迹,其中初始场气象资料为美国国家环境预报中心(NCEP)提供的全球资料同化系统(GDAS)数据,水平网格分辨率为 1°×1°,垂直方向有 23 层(1000hPa 至 20hPa),时间分辨率为 3h.

(2)定义一段时间内污染城市个数总和为污染城数.参照《环境空气质量指数(AQI)技术规定》[45], 污染城市表示 PM_{10}24h 平均浓度大于 150μg/m^3 的城市,其中浓度在 150~250μg/m^3 的为轻度污染;250~350μg/m^3 为中度污染;350~420μg/m^3 为重度污染;420μg/m^3 以上为严重污染.

2　结果与讨论

2.1　浮尘天气过程概况

基于风云 4B 卫星的沙尘监测图可以看到,4 月 11 日凌晨 5 点(图 1a),蒙古国西南部戈壁阿尔泰-巴彦洪戈尔-南戈壁一线的荒漠区形成了一大片沙尘区.随后,沙尘向南移动,于 42.5°N,100°E 附近进入我国内蒙古地区(图 1b),并于 11 日中午左右完全进入内蒙古西部(图 1c).11 日下午,沙尘进一步南下,但受云层的遮挡,气象卫星无法继续监测沙尘的动向(图 1d).

借助地面的空气质量监测站,可以看到沙尘后续南下的进程(图 2).4 月 11 日 12:00 时内蒙古中西部、甘肃北部、宁夏北部和陕西北部监测到 PM_{10} 小时浓度上升到中度至严重污染(图 2a),这与图 1c 的结果相一致.随后,沙尘于 12 日 14:00 时快速南压至广东省以北的湖南中部和江西北部一带,我国中部地区受沙尘影响出现了大范围的 PM_{10} 严重污染(图 2b).12 日下午起,沙尘开始翻越南岭山脉进入广东省,广东省北部的韶关市于 17:00 时开始出现 PM_{10} 中度污染(图 2c).到 12 日晚上,大量沙尘进入广东省,使得珠三角大部和粤东北部开始出现 PM_{10} 中度至严重污染(图 2d).13 日 01:00 时,沙尘影响到广东全省,21 个地市均出现了不同程度的 PM_{10} 污染.沙尘入粤前后,广东省平均粗细粒子浓度比($PM_{2.5}$/PM_{10})明显下降,从沙尘影响前的 59%(12 日 14:00 时)降低至 21%(13 日 04:00 时).这与广东地区的气溶胶污染以细粒子为主的特点不同[36],反映了大量外来粗粒子的输送影响.

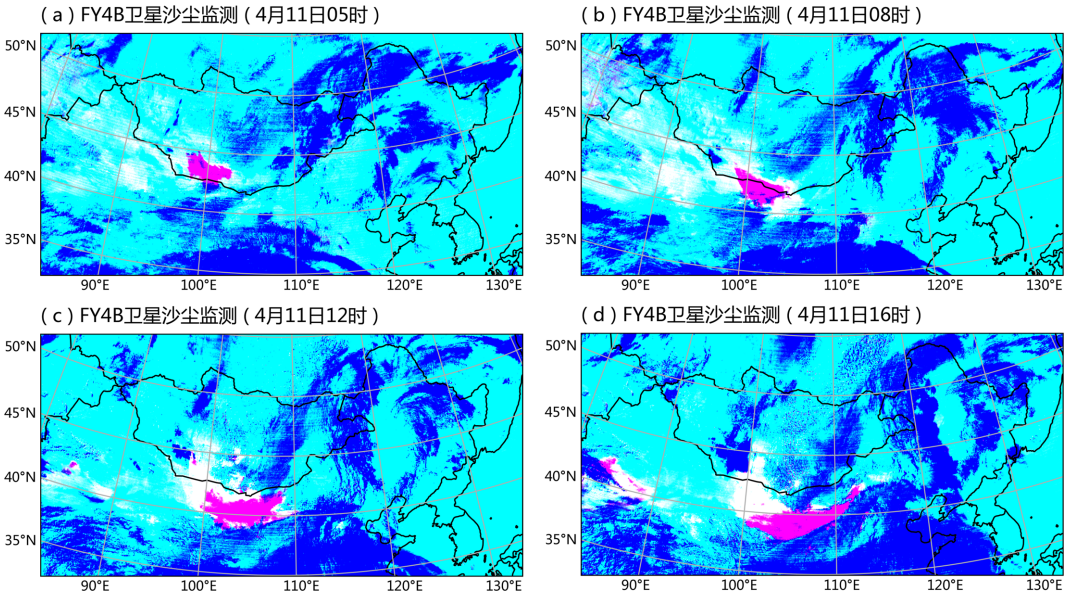


图 1　2025 年 4 月 11 日 05:00~16:00 时风云 4B 卫星沙尘监测图

Fig.1　FY-4B Satellite dust monitoring image from 05:00 to 16:00 on April 11, 2025

品红色区域表示沙尘

从广东省 21 地市的 PM_{10} 逐日平均浓度等级可以看到(表 1),受沙尘输入影响,广东省多个地市出现 PM_{10} 浓度超标,共造成 54 个污染城数,其中重度污染城数 6 个,中度污染城数 22 个,轻度污染城数 26

个.具体来看,由于 12 日沙尘进入广东省的时间较晚,因此各地市的 PM_{10} 日平均浓度等级都维持在优至良之间,其中最先受沙尘影响的韶关市日均浓度最高(148μg/m^3),接近轻度污染的阈值.到 13 日,受大量沙尘的影响,全省 PM_{10} 日平均浓度等级明显上涨,粤北(韶关、清远)和珠三角中部(广州、佛山、东莞和江门)共 6 个地市出现了重度污染.其中广州市 PM_{10} 日平均浓度最高,达到了历史罕见的 400μg/m^3,显著高于 16 年前沙尘入粤过程时的浓度(2009 年 4 月 27 日,284μg/m^3)[36].粤西和珠三角的其余地市则达到中度污染水平,而粤东的梅州、汕头、汕尾、揭阳和潮州的污染程度最轻,仅达到轻度污染水平.14 日沙尘的影响持续,但强度有所减弱,各地市的 PM_{10} 污染水平在轻度到中度污染之间.15 日起 PM_{10} 污染等级开始明显下降,到 17 日全省 PM_{10} 浓度等级降至良,沙尘的影响基本结束.

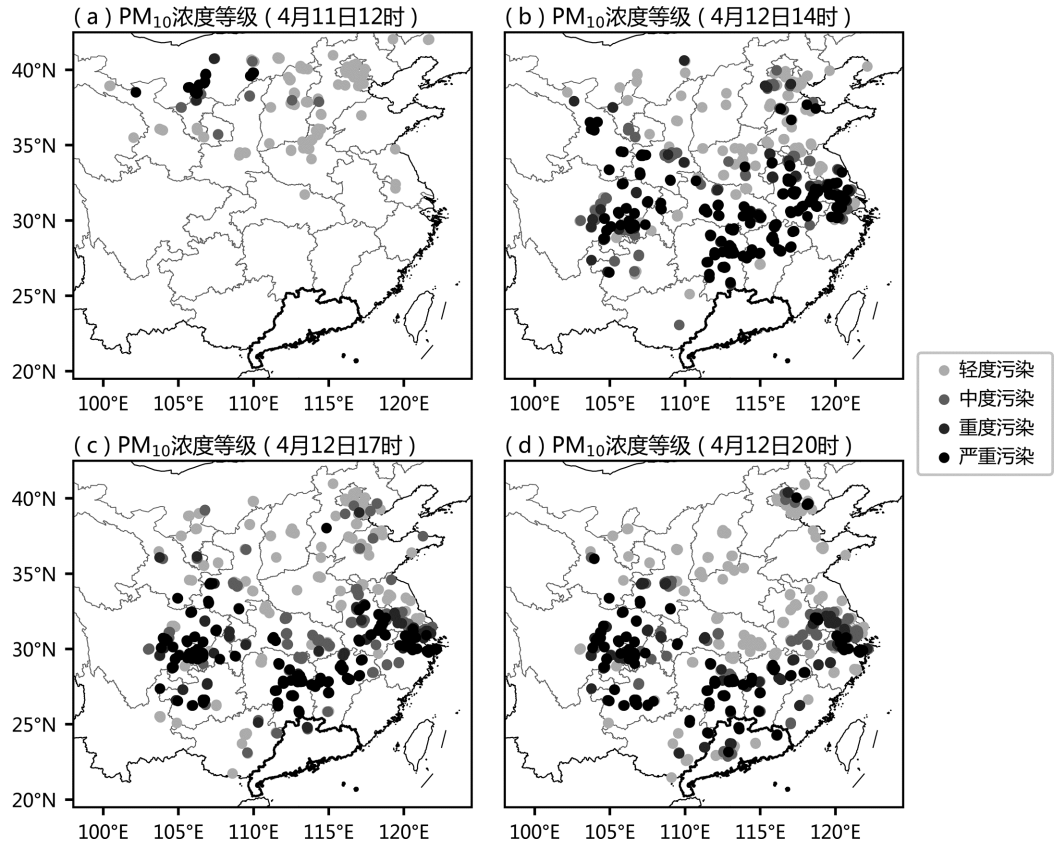


图 2 2025 年 4 月 11 日 12:00 时至 4 月 12 日 20:00 时空气质量监测站点 PM_{10} 小时平均浓度等级

Fig.2 PM_{10} hourly average concentration level at air quality monitoring stations from 12:00 on April 11 to 20:00 on April 12, 2025

填色圆点,仅绘制小时平均浓度达轻度污染及以上等级的站点

表 1 2025 年 4 月 12~17 日广东省 21 地市 PM_{10} 浓度(μg/m^3)和等级

Table 1 PM_{10} concentration and levels in 21 cities of Guangdong Province from April 12~17, 2025

	粤北		珠三角									粤西				粤东					
日期 (月-日)	韶关	清远	广州	佛山	东莞	江门	深圳	珠海	中山	惠州	肇庆	云浮	阳江	茂名	湛江	河源	梅州	汕头	汕尾	揭阳	潮州
04-12	148	125	59	78	48	54	41	34	36	59	94	94	58	56	58	84	111	55	48	80	74
04-13	357	354	400	372	369	364	295	324	348	315	318	314	348	309	302	308	166	200	181	173	174
04-14	213	251	276	270	310	264	282	284	256	255	247	241	242	291	266	176	136	163	199	154	138
04-15	115	134	150	165	167	167	178	186	150	173	138	140	199	270	220	122	104	164	160	149	138
04-16	114	140	144	147	136	140	115	127	122	120	136	127	160	183	184	126	102	116	104	116	107
04-17	116	106	88	86	80	82	73	80	72	74	95	105	108	129	116	83	68	79	64	84	76

轻度污染 中度污染 重度污染

表 2　2014~2025 年广东省平均 PM_{10} 浓度

Table 2　Average PM_{10} concentration in Guangdong Province (2014~2025)

项目	时间	PM_{10} 日均浓度(μg/m^3)
多年平均	2014~2025 年 4 月平均	47.6
第一高值	2025 年 4 月 13 日	305.2
第二高值	2021 年 1 月 16 日	127.2
第三高值	2014 年 12 月 15 日	126.2
第四高值	2017 年 12 月 10 日	121.1

从表 2 可以看到,此次沙尘过程使得广东省平均 PM_{10} 浓度明显偏高.2014~2025 年共 12 年间,广东省 4 月份 PM_{10} 浓度平均值为 47.6μg/m^3,而 2025 年 4 月 13 日全省平均 PM_{10} 浓度高达 305.2μg/m^3,远超历史同期水平.自 2014 年以来(剔除此次沙尘天气过程后),全省平均 PM_{10} 浓度的历史前三高值分别为 127.2, 126.2 和 121.1μg/m^3,均出现在冬季.而此次过程全省平均的 PM_{10} 浓度刷新了 2014 年以来浓度最高值的记录,并且达到了第二高值的 2.4 倍,可见本次过程对广东省而言是极为罕见的.

2.2　天气形势

为了探究本次罕见浮尘天气过程的气象成因,图 3 给出了此次过程的天气形势.从图 3a 可以看到,2025 年 4 月 11 日凌晨 05:00 时,受中高纬西风带波动影响,蒙古国地区 500hPa 高度场上形成一道明显的横槽,槽底位于蒙古国西部地区.850hPa 风场上可以看到,受低压槽引导的冷空气影响,蒙古国大部被较强的偏北风控制,最大风速达 22m/s 以上,冷气团和暖气团的对峙区在我国和蒙古国交界处.从相同时间的近地面 10m 风场(图 3c)可以看到,冷空气在蒙古国大部带来明显偏北风,平均风速总体在 6m/s 以上,西南部和中东部部分地区达 12m/s 以上,超过了起沙阈值风速[46],有利于扬起沙尘颗粒,形成沙尘暴.

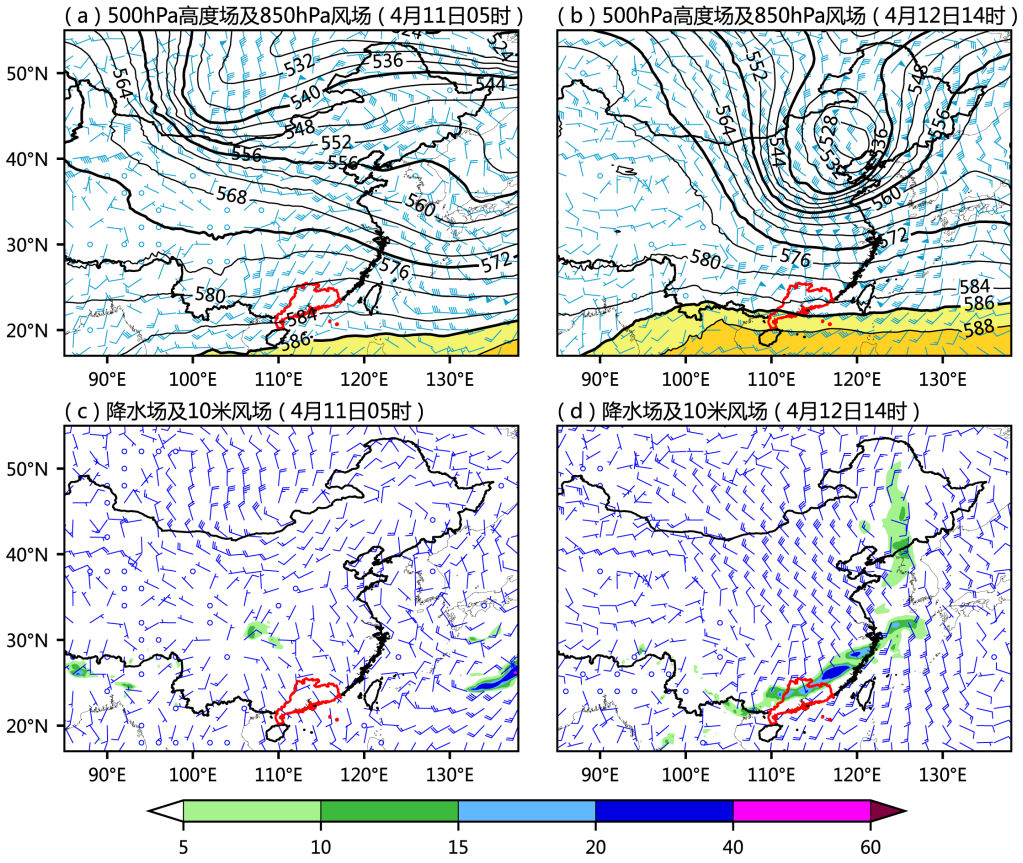


图 3　2025 年 4 月 11 日 05:00 时和 12 日 14:00 时天气形势

Fig.3　Synoptic circulation at 05:00 on April 11 and 14:00 on April 12, 2025

(a)和(b)2025 年 4 月 11 日 05:00 时和 12 日 14:00 时 500hPa 高度场和 850hPa 风场;(c)和(d)2025 年 4 月 11 日 05:00 时和 12 日 14:00 时 3h 累积降水场和近地面 10m 风场.图中红色轮廓表示广东省

12 日 500hPa 横槽逐渐转竖,形成一道深厚的东亚大槽(图 3b),槽线位置在 105°~110°E 之间,槽

底南压到 30°N 左右.受东亚大槽影响,槽后冷空气快速且深度南下,并且在广东省以北的南岭山脉地区附近维持较强的偏北风,850hPa 最大风速(22m/s)与沙尘源地处的最大风速相当.而从近地面风场来看(图 3d),低层风场与中层风场基本一致,冷空气快速南压至广东省,在广东省北部维持 6m/s 以上的平均风速.这种快速且深度南下的冷空气推动沙尘颗粒快速向南移动,不利于沙尘在传输路径上的干沉降.另一方面,结合图 2b 和图 3d 可见,本次冷空气南下过程中仅在冷锋的前沿区形成带状降水,而位于冷锋后部的沙尘颗粒全程几乎未受降水影响.在不利的干沉降和湿清除条件下,大量沙尘得以进入广东省.

从图 4a 可以看到,12 日 20:00 时沙尘进入广东后使得广东中北部地区能见度快速下降至 10km 以下,局地小于 5km,达到浮尘天气的标准[4].而南部大部分地区还未受到沙尘主体的影响,能见度维持在 10km 以上.由于冷空气强度减弱, 13 日 12:00 时(图 4b)广东省各地平均风速降至 2~4m/s 之间,沙尘颗粒在省内缓慢扩散.受偏东北风影响,粤北、珠三角中部和粤西南部等地区的能见度均在 10km 以下,出现了大范围的浮尘天气.14 日和 15 日(图 4c 和 d)地面风场由弱偏西北风转弱偏东风,风速在 2m/s 左右,扩散条件仍然不利,沙尘粒子的清除速率缓慢,因此珠三角和粤西部分地区的能见度依然较低,浮尘天气维持,而其余地区的浮尘天气则有所缓解.16 日起,受逐渐加强的偏南气流影响,广东省的浮尘天气过程逐渐趋于结束.

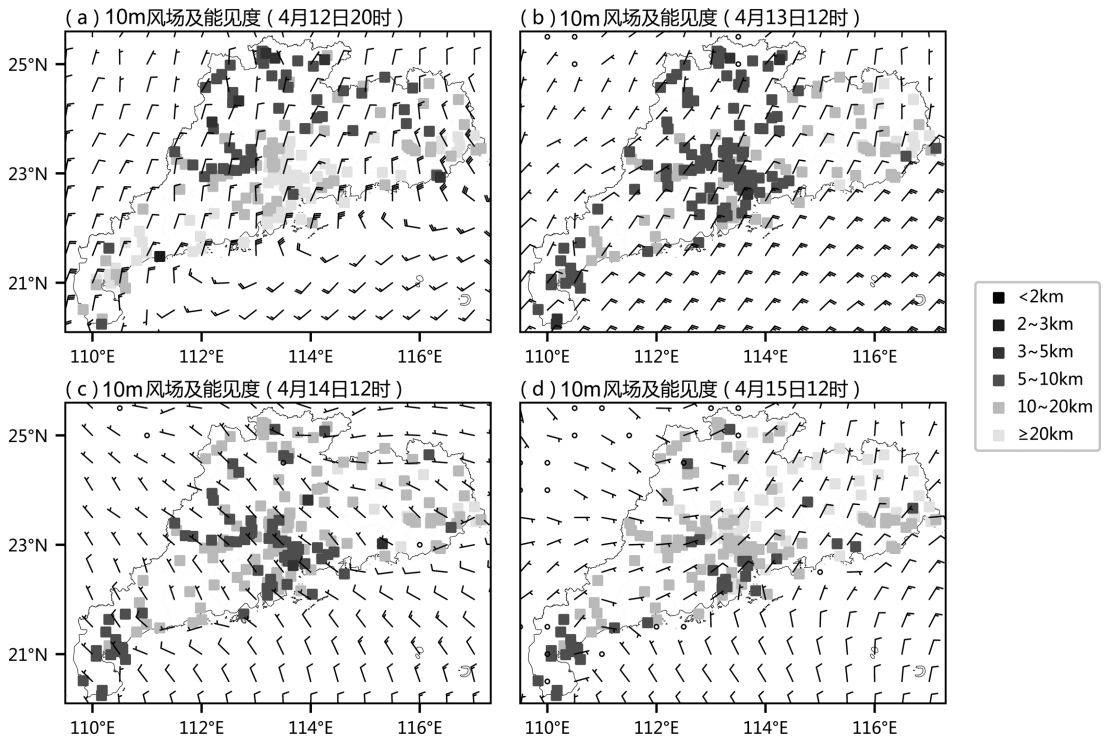


图 4 2025 年 4 月 12 日至 15 日地面 10m 风场(风羽)及能见度(填色方块)

Fig.4 Surface 10m wind field (barbs) and visibility (color-filled squares) from April 12 to 15, 2025

2.3 气候异常分析

为进一步探究大量沙尘罕见输送至广东省的气象成因,图 5 给出了沙尘源地的气象条件及气候距平.可以看到,2025 年 2~3 月份平均 500hPa 高度场呈现西高东低的形势,我国西北部和蒙古国中西部均受高压脊前的西北气流控制(图 5a).受脊前干燥的西北气流影响,蒙古国中西部 2~3 月累积降水量较少,两个月总的累积降水量少于 10mm(图 5c).从 2025 年 2~3 月 500hPa 高度场和风场的 30 年气候距平来看(图 5b),蒙古国中部以西地区 500hPa 高度场存在明显的反气旋环流异常,高度场为正异常区,而我国东北部则为气旋式环流异常.而从累积降水量距平来看(图 5d),受异常高压影响,蒙古国中部以西地区和我国内蒙古中西部地区的 2~3 月累积降水量

均比近 30 年平均偏少,其中沙尘源地的蒙古国西南部降水量偏少 4~8mm.降水的减少使得处于干旱区的蒙古国西部地区[47]2025 年 2~3 月平均表层土壤湿度降至近 30 年内的第 4 低的水平,并且与 2020 年第 3 低值接近.较低的土壤湿度使得土壤表层松散,更有利于大量沙尘颗粒的形成.

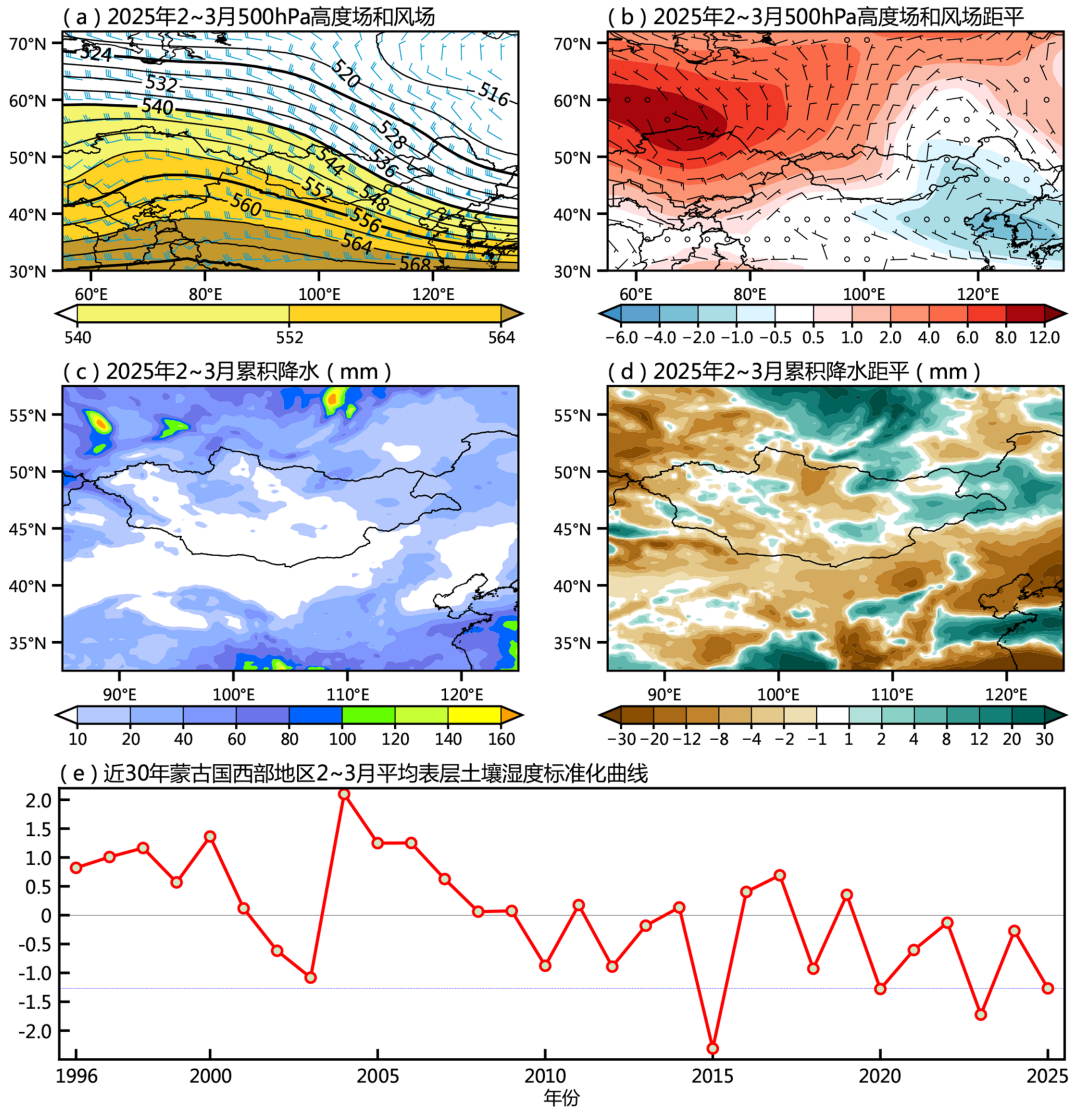


图 5　2025 年 2~3 月蒙古国地区气候特征

Fig.5　Climatic characteristics of the Mongolia area in February~March 2025

(a)2025 年 2~3 月平均 500hPa 高度场和风场;(b)是(a)与 1996 至 2025 年 30 年平均值的差;(c)和(d)同(a)和(b),不过为 2~3 月的累积降水量(mm);(e)是近 30 年蒙古国西部地区 2~3 月平均表层土壤(0~28cm)湿度的标准化曲线(虚线是本次过程对应的数值)

从传输过程来看,冷空气所带来的强劲偏北风是将沙尘吹进广东的关键,特别是南岭山脉地区附近的强偏北风,直接推动沙尘颗粒翻越较高的山地地形入粤.为了进一步分析此次冷空气南下过程中各个阶段的风力特征,本文分别选取了沙尘源地的蒙古国西南部、沙尘传输路径上的我国中部以及进入广东省前的南岭山脉地区三个关键区(分别对应为图 6a 中的蓝色、绿色和红色矩形框),研究这三个区域近 30 年春季逐日北风平均风速的时间序列.为了关注能够进入广东省的较强冷空气过程,本文基于南岭山脉区域平均经向风为北风且风速大于 4m/s 的标准进行筛选,绘制出南岭地区平均北风风速变化曲线如图 6d 所示.另外考虑到冷空气南下的时间差异,蒙古国地区和我国中部地区在图 6d 每个日期样本的当天及前两天内选取北风风速最大的一天作为对应区域的样本,绘制风速变化曲线如图 6b 和 c 所示.

可以看到,本次冷空气过程蒙古国西南部地区和南岭山脉地区平均北风风速高达 8.15 和 12.63m/s (图 6b 和 d),均达到了近 30 年的历史最大值.在我国中部地区形成的北风也处于较强水平,风速达 8.78m/s(图 6c).沙尘源地区域的历史极端强风更有利于将地表沙尘颗粒裹挟至空中并带动南下,促进了更强沙尘暴的形成.而我国中部的较强偏北风则支撑沙尘颗粒在我国中部的传输,促进了沙尘的进一步南下.最后,南岭地区的历史最强北风直接推动沙尘颗粒翻越南岭山脉,使得原本能够被山地地形阻挡而沉积的沙尘颗粒在强风带动下大量输入广东省,给广东带来罕见的浮尘天气.

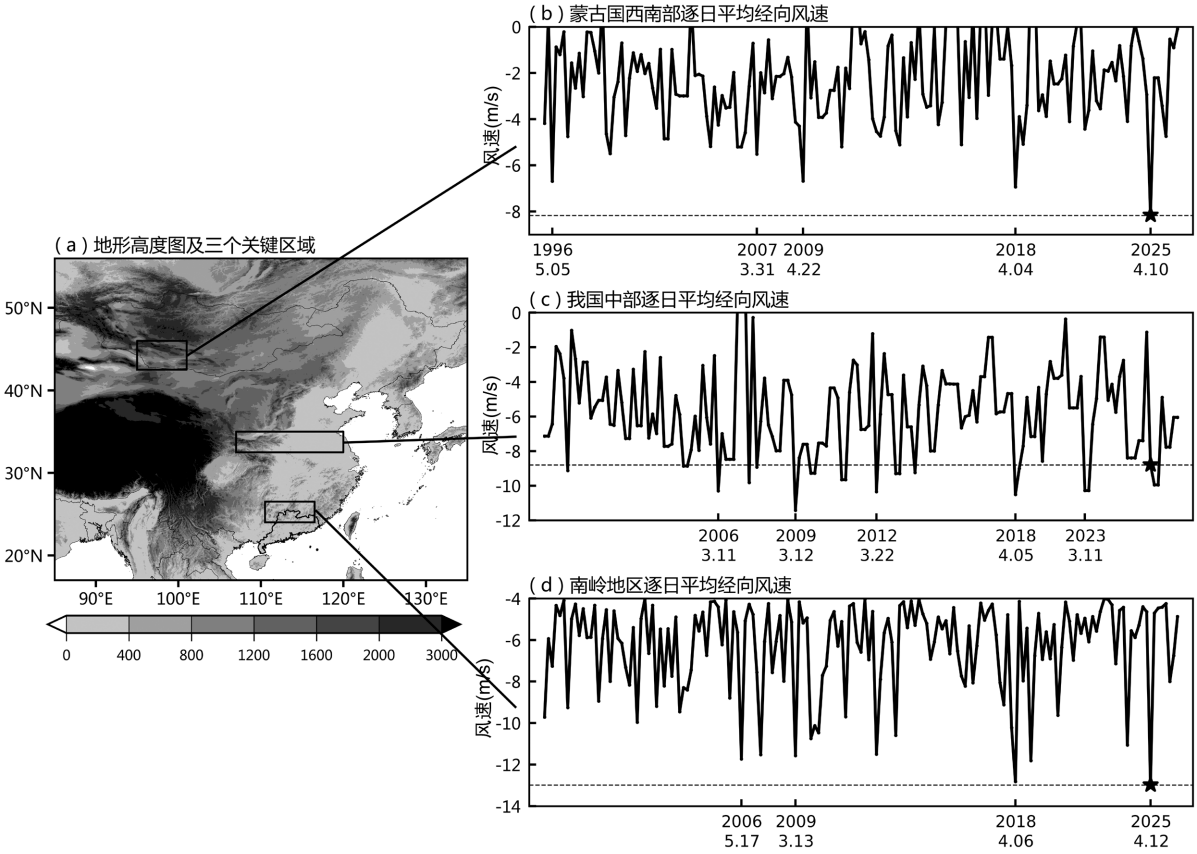


图 6 沙尘源地及传输路径上多年春季逐日北风的变化曲线

Fig.6 Daily variation curves of northerly winds in dust source regions and along transport pathways during spring over multiple years

(a)地形高度图及沙尘源地和传输路径上的三个关键区;(b)~(d)为三个关键区 1996 年至 2025 年春季平均 850hPa 北风风速的逐日变化曲线(纵坐标为经向风速(m/s),虚线为本次冷空气过程的北风强度,横坐标标出了北风风速较强的几个日期)

2.4 后向轨迹分析

图 7 给出 2025 年 4 月 13 日到达粤北韶关市、珠三角广州市、粤东汕头市和粤西湛江市不同高度的后向轨迹,以分析广东省不同区域沙尘的来源.根据前人的研究结果,后向轨迹起点选用 1000m 高度能减少边界层内扩散与混合的影响[48],而选取 500m 高度能更准确反映边界层的平均流场特征[49-50].从 1000m 高度的轨迹来看(图 7a),广东省不同区域的沙尘最初均由蒙古国中部边境附近向南输送,与图 1b 中卫星监测到的沙尘位置一致.在冷空气带动下,最开始的后向轨迹较为集中,沙尘均经内蒙古、陕西、山西和河南省,抵达我国中部的湖北省.而在到达湖北省以后,沙尘南下的路径开始变得发散,呈扇形沿西北、偏北和东北三个不同方向进入广东省的不同区域.其中去往韶关和广州市的沙尘是由湖北省向南,经湖南省和江西省交界后直接翻越南岭山脉,进入珠三角平原;去往汕头市的沙尘颗粒直接向东南方向,通过江西省和福建省西部后,翻越南岭山脉东部,进入潮汕平原;而前往湛江市的沙尘则向西拐,穿越湖南省后翻越南岭山脉西部,沿粤桂交界进入雷州半岛.对比图 7a 和 b,韶关市、广州市和汕头市的 500m 高度后向轨迹与

1000m 高度的轨迹基本一致.而湛江市 500m 高度的后向轨迹在湖北省附近出现向南的弯折,但气流南下的路径也与 1000m 高度的路径相一致.从后向轨迹的各个时间点的位置来看,500m 高度轨迹点的位置比 1000m 高度略偏南,说明 1000m 高度气流南下速度较 500m 高度更快一些.

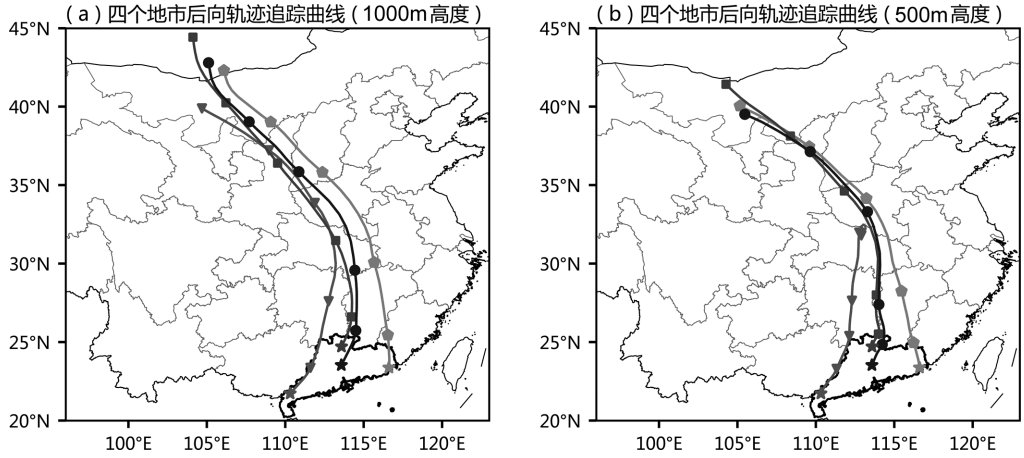


图 7　2025 年 4 月 13 日 00:00 时韶关市、广州市、汕头市和湛江市 1000m 高度(a)和 500m 高度(b)气流 38h 后向轨迹

Fig.7　Backward trajectories (38h) of airflows at 1000m (a) and 500m (b) heights over Shaoguan, Guangzhou, Shantou, and Zhanjiang cities at 00:00 on April 13, 2025

从追溯的终点开始每隔 8h 标记一次,最近一个点与追溯起点相距 6h

从四个城市 500m 后向轨迹高度图来看(图 8),轨迹基本都来自中蒙边境附近 1250m 以上的阿拉善高原(后向 38h 至 30h),随后经过黄土高原(后向 30h 至 22h),下降到华北平原(后向 22h 至 14h),最后经由不同方向翻越南岭山脉(后向 14h 至 6h)进入广东省.从 14h 到 6h 的时间区间内来看,进入韶关市的沙尘需翻越南岭山脉中部地形较高的区域,最高点的海拔高度可达 1000m(图 8a);进入广州市和湛江市的沙尘分别由南岭山脉东侧和西侧南下,只需翻越最高 750m 左右的地形高度(图 8b 和 d);而进入汕头市的沙尘沿最东边的路径南下,路径上的地形高度总体都较低,需要翻越的最高高度仅为 500m(图 8c).

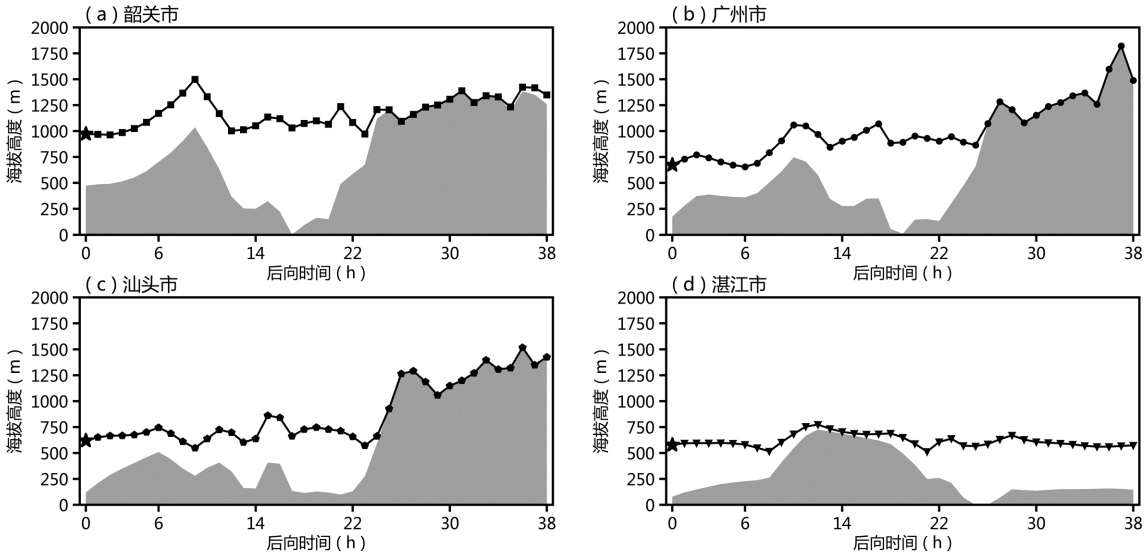


图 8　2025 年 4 月 13 日 00:00 时韶关市(a)、广州市(b)、汕头市(c)和湛江市(d)500m 高度气块后向 38 小时轨迹追踪曲线的垂直剖面图

Fig.8　The vertical cross-sections of backward 38-hour trajectory curves of air parcels at 500m altitudes for Shaoguan(a), Guangzhou(b), Shantou(c), and Zhanjiang(d) cities at 00:00 on April 13, 2025

3 结论

3.1 2025 年 4 月 11 日,东亚中纬度横槽引导冷空气影响蒙古国中西部地区.受冷空气大风影响,蒙古国西南部地区出现大量沙尘,并在偏北风作用下逐渐向南移入我国.12 日横槽转竖并东移南压,槽后冷空气快速南下,推动沙尘向南传输.12 日傍晚沙尘输入广东省,广东北部和中部地区 PM_{10} 浓度大幅上涨,能见度下降至 10km 以下,开始出现大范围浮尘天气.受沙尘影响,广东省 21 个城市均出现 PM_{10} 浓度超标,共计出现 54 个污染城数,其中有 6 个重度污染.13 日广东全省平均 PM_{10} 浓度高达 305.2μg/m^3,是 2014 年以来第二高值的 2.4 倍.其中广州市 PM_{10} 日平均浓度最高(400μg/m^3),显著高于 2009 年沙尘入粤过程的浓度值.

3.2 沙尘源地的气候分析发现,蒙古国中西部地区 2~3 月受脊前干燥的西北气流影响,500hPa 高度场与气候平均态相比呈现明显的反气旋环流异常.受此影响,蒙古国西部大部分地区累积降水量在 10mm 以下,较历史同期偏少,使得平均土壤湿度降至近 30 年第 4 低的水平.低湿度导致土壤表层松散,为大量沙尘的形成提供了有利的下垫面条件.

3.3 本次冷空气过程在沙尘源地和南岭山脉地区平均北风风速均达到了近 30 年的历史最强水平.沙尘源地区域的极端强风有利于将地表沙尘颗粒裹挟至空中并带动南下,促进了沙尘暴的形成.而南岭地区的历史最强北风则直接推动沙尘颗粒翻越南岭山脉,使得沙尘颗粒大量输入广东省,给广东带来罕见的浮尘天气.

3.4 后向轨迹分析的结果表明,输入广东省四大区域的沙尘颗粒源于中蒙边境附近,前期均经由内蒙古、陕西、山西和河南省,抵达我国中部的湖北省.而经过湖北省以后,沙尘颗粒分别沿北路、东北路和西北路三种不同路径南下,翻越不同高度的山脉地形后进入广东省的各个区域,引发大范围的浮尘天气.

参考文献:

[1] 叶笃正,丑纪范,刘纪远,等.关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策 [J]. 地理学报, 2000,15(4):513-521.
Ye D Z, Chou J F, Liu J Y, et al. Causes of sand-stormy weather in Northern China and contral measures [J]. Acta Geographica Sinica, 2000,15(4):513-521.

[2] 贺沅平,张云伟,顾兆林.特强沙尘暴灾害性天气的研究及展望 [J]. 中国环境科学, 2021,41(8):3511-3522.
He Y P, Zhang Y W, Gu Z L. Research progress of very strong sandstorm and its future research prospects [J]. China Environmental Science, 2021,41(8):3511-3522.

[3] Ginoux P, Prospero J M, Gill T E, et al. Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products [J]. Reviews of Geophysics, 2021,50(3):RG3005.

[4] GB/T 20480-2017 沙尘天气等级 [S].
GB/T 20480-2017 Classification of sand and dust weather [S].

[5] 董晓波,麦 榕,王红磊,等.石家庄一次沙尘大气污染物与边界层相互作用 [J]. 中国环境科学, 2021,41(3):1024-1033.
Dong X B, Mai R, Wang H L, et al. An interaction study between atmospheric pollutants and boundary layer during a dust storm weather in Shijiazhuang [J]. China Environmental Science, 2021,41(3):1024-1033.

[6] 马雁军,刘宁微,洪 也,等.2011 年春季辽宁一次沙尘天气过程及其对不同粒径颗粒物和空气质量的影响 [J]. 环境科学学报, 2012, 32(5):1160-1167.
Ma Y J, Liu N W, Hong Y, et al. The impacts on various particle sizes and the air quality caused by a dust weather process in Spring 2011 in Liaoning [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012,32(5):1160-1167.

[7] 刘新春,钟玉婷,何 清,等.塔克拉玛干沙漠腹地沙尘暴过程大气颗粒物浓度及影响因素分析 [J]. 中国沙漠, 2011,31(6):1548-1553.
Liu X C, Zhong Y T, He Q, et al. Analysis on mass concentration of atmospheric particulate matter and its influencing factors in sandstorm process in the Taklimakan Desert Hinterland [J]. Journal of Desert Research, 2011,31(6):1548-1553.

[8] 冯鑫媛,王式功,杨德保,等.近几年沙尘天气对中国北方环保重点城市可吸入颗粒物污染的影响 [J]. 中国沙漠, 2011,31(3):735-740.
Feng X Y, Wang S G, Yang D B, et al. Influence of dust events on PM_{10}pollution in key environmental protection cities of Northern China during recent years [J]. Journal of Desert Research, 2011,31(3): 735-740.

[9] 杜金花,陶文鑫,张宜升,等.秋冬季不同天气类型 PM1 中金属元素污染来源及健康风险评估——以青岛市为例 [J]. 中国环境科学, 2024,44(8):4179-4192.
Du J H, Tao W X, Zhang Y S, et al. Source apportionment and health risk assessment of metal elements in PM_1 on different weather types during autumn and winter-A case study of Qingdao [J]. China Environmental Science, 2024,44(8):4179-4192.

[10] 李贵玲,周 敏,陈长虹,等.2011 年春季沙尘天气影响下上海大气颗粒物及其化学组分的变化特征 [J]. 环境科学, 2014,35(5):1644-1653.
Li G L, Zhou M, Chen C H, et al. Characteristics of particulate matters and its chemical compositions during the dust episodes in Shanghai in Spring, 2011 [J]. Environmental Science, 2014,35(5):1644-1653.

[11] 杨 阳,李杏茹,陈 曦,等.春季沙尘过程北京市不同粒径大气气溶胶污染特征及来源分析 [J]. 环境科学, 2018,39(12):5315-5322.
Yang Y, Li X R, Chen X, et al. Analysis of different particle sizes, pollution characteristics, and sources of atmospheric aerosols during

the spring dust period in Beijing [J]. Environmental Science, 2018,39(12):5315−5322.

[12] 金同俊,祁建华,郗梓延,等.一次沙尘事件对沿海及海洋大气气溶胶中金属粒径分布的影响 [J]. 环境科学, 2019,40(4):1562−1574.
Jin T J, Qi J H, Xi Z Y, et al.Impact of a dust event on the size distribution of metal elements in atmospheric aerosols at a coastal region and over the ocean [J]. Environmental Science, 2019,40(4): 1562−1574.

[13] 刘庆阳,刘艳菊,赵强,等.2012 年春季京津冀地区一次沙尘暴天气过程中颗粒物的污染特征分析 [J]. 环境科学, 2014,35(8):2843−2850.
Liu Q Y, Liu Y J, Zhao Q, et al. Chemical characteristics in airborne particulate matter (PM_{10}) during a high pollution spring dust storm episode in Beijing, Tianjin and Zhangjiakou, China [J]. Environmental Science, 2014,35(8):2843−2850.

[14] 张秋晨,朱　彬,苏继峰,等.南京 3 类不同大气污染过程下气溶胶水溶性无机离子的特征研究 [J]. 环境科学, 2012,33(6):1944−1951.
Zhang Q C, Zhu B, Su J F, et al. Characteristics of aerosol water−soluble inorganic lons in three types air−pollution incidents of Nanjing City [J]. Environmental Science, 2012,33(6):1944−1951.

[15] Stefania P, Souzana A. Epidemiological insights into the health impacts of dust storms [J]. Current Opinion in Environmental Science & Health, 2025,46:100626.

[16] Hashizume M, Yoonhee K, Chris F S N, et al. Health effects of asian dust: a systematicreview and meta−analysis [J]. Environmental Health Perspectives, 2020,128(6):66001.

[17] Dominguez−Rodriguez A, Baez−Ferrer N, Abreu−Gonzalez P, et al. Impact of Desert Dust eventson the cardiovascular disease: A systematic review and metaanalysis [J]. Journal of Clinical Medicine, 2021,10(4):727.

[18] 王金玉,李　盛,王式功,等.沙尘污染对暴露人群呼吸系统健康的影响 [J]. 中国沙漠, 2013,33(3):826−831.
Wang J Y, Li S, Wang S G, et al. Effects of dust pollution on respiratory system of long−term exposed population [J]. Journal of Desert Research, 2013,33(3):826−831.

[19] 张小曳.亚洲粉尘的源区分布、释放、输送、沉降与黄土堆积 [J]. 第四纪研究, 2001,21(1):29−40.
Zhang X Y. Source distrubutions, emission, transport, deposition of Asian dust and loss accumulation [J]. Quaternary Sciences, 2001,21(1): 29−40.

[20] Ginoux P, Prospero J M, Gill T E, et al. Global−scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products [J]. Reviews of Geophysics, 2012,50(3):000388.

[21] Zhang X, Gong S, Zhao T, et al. Sources of Asian dust and role of climate change versus desertification in Asian dust emission [J]. Geophysical Research Letters, 2003,30(24):ASC1−ASC8.

[22] 徐　冉,张碧辉,安林昌,等.2000~2021 年中国沙尘传输路径特征及气象成因分析 [J]. 中国环境科学, 2023,43(9):4450−4458.
Xu R, Zhang B H, An L C, et al. Analysis of sand and dust storm transport paths characteristics and meteorological causes in China from 2000 to 2021 [J]. China Environmental Science, 2023,43(9): 4450−4458.

[23] Mao R, Ho C H, Feng S, et al. The influence of vegetation variation on Northeast Asian dust activity [J]. Asia−Pacific Journal of Atmospheric Sciences. 2013,49:87–94.

[24] 衣娜娜,姜学恭,董祝雷,等.植被覆盖率对内蒙古沙尘天气影响的模拟研究 [J]. 大气科学, 2024,48(2):521−538.
Yi N N, Jiang X G, Dong Z L, et al. Effect of vegetation coverage on the dust weather in Inner Mongolia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2024,48(2):521−538.

[25] Wu C, Lin Z, Shao Y, et al. Drivers of recent decline in dust activity over East Asia [J]. Nature Communications, 2022,13(1):7105.

[26] Wang S, Yu Y, Zhang X, et al. Weakened dust activity over China and Mongolia from 2001 to 2020 associated with climate change and land−use management [J]. Environmental Research Letters, 2021, 16(12):124056.

[27] Ma Y, Mao R, Shi C, et al. Increasing cross−border dust storm from Mongolia to China during 1987~2022 [J]. Global and Planetary Change, 2024,242:104578.

[28] Bao T, Gao T, Nandintsetseg B, et al. Variations in frequency and intensity of dust events crossing the Mongolia−China Border [J]. Sola, 2021,71:145−150.

[29] Zong Q, Mao R, Gong D, et al. Changes in dust activity in spring over East Asia under a global warming scenario [J]. Asia−Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 2021,57:839−850.

[30] Chen S, Zhao D, Huang J, et al. Mongolia contributed more than 42% of the dust concentrations in Northern China in March and April 2023 [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2023,40(9):1549−1557.

[31] Capua G D, Rahmstorf S. Extreme weather in a changing climate [J]. Environmental Research Letters, 2023,18:102001.

[32] Francis J A, Vavrus S J. Evidence for a wavier jet stream in response to rapid Arctic warming [J]. Environmental Research Letters, 2015, 10:014005.

[33] Kug J S, Jeong J H, Jang Y S, et al. Two distinct influences of Arctic warming on cold winters over North America and East Asia [J]. Nature Geoscience, 2015,8:759–762.

[34] Gong H, Ma K, Wang L, et al. Attribution of the record−breaking extreme cold event over Northern East Asia in December 2023 [J]. Geophysical Research Letters, 2024,51:e2024GL112568.

[35] Qian C, Wang J, Dong S, et al. Human influence on the record−breaking cold event in January of 2016 in Eastern China [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2018,99(1):S118−S122.

[36] 吴　兑,吴　晟,李　菲,等.粗粒子气溶胶远距离输送造成华南严重空气污染的分析 [J]. 中国环境科学, 2011,31(4):540−545.
Wu D, Wu S, Li F, et al. Air pollution episode in southern China due to the long range transport of coarse particle aerosol [J]. China Environmental Science, 2011,31(4):540−545.

[37] 刘文彬,刘　涛,黄祖照,等.利用偏振−米散射激光雷达研究广州一次浮尘天气过程 [J]. 中国环境科学, 2013,33(10):1751−1757.
Liu W B, Liu T, Huang Z Z, et al. Study of a dust case in Guangzhou using polarization mie−scattering lidar [J]. China Environmental Science, 2013,33(10):1751−1757.

[38] 刘文彬,黄祖照,陈彦宁,等.广州市春季一次沙尘天气过程综合观测 [J]. 中国环境监测, 2017,33(5):42−48.
Liu W B, Huang Z Z, Chen Y N, et al. Observation studies on a dust case in the Spring of Guangzhou [J]. Environmental Monitoring in

China, 2017,33(5):42−48.

[39] 雷 蕾,张金谱,裴成磊,等.2021 年一次春季北方沙尘过程对广州空气质量的影响 [J]. 环境科学学报, 2023,43(1):247−254.
Lei L, Zhang J P, Pei C L, et al. Influence of a northern dust weather process on air quality of Guangzhou inspring 2021 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023,43(1):247−254.

[40] 申 冲,李 园,王雪梅,等.北方强沙尘暴天气过程对广州空气质量影响的个例分析 [J]. 环境科学学报, 2012,32(7):1725−1735.
Shen C, Li Y, Wang X M, et al. Impact of a strong northern dust storm on the air quality in Guangzhou: A case study [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012,32(7):1725−1735.

[41] Li T Y, Deng X J, Li Y, et al. Transport paths and vertical exchange characteristics of haze pollution inSouthern China [J]. Science of the Total Environment, 2018,625(8):1074−1087.

[42] Li T Y, Wu N G, Chen J Y, et al. Vertical exchange and cross−regional transport of lower−tropospheric ozoneover Hong Kong [J]. Atmospheric Research, 2023,292(3):106877.

[43] 李婷苑,陈靖扬,翁佳烽,等.广东省臭氧污染天气型及其变化特征 [J]. 中国环境科学, 2022,42(5):2015−2024.
Li T Y, Chen J Y, Weng J F, et al. Ozone pollution synoptic patterns and their variation characteristics in Guangdong Province [J]. China Environmental Science, 2022,42(5):2015−24.

[44] 李婷苑,陈靖扬,龚 宇,等.2022 年广东省冬季一次臭氧污染过程的气象成因及潜在源区分析 [J]. 环境科学, 2023,44(7):3695−3704.
Li T Y, Chen J Y, Gong Y, et al. Meteorological formation mechanisms and potential sources of an ozone pollution process in winter of 2022 in Guangdong Province [J]. Environmental Science, 2023,44(7):3695−3704.

[45] HJ 663−2012 环境空气质量指数(AQI)技术规定 [S].
HJ 663−2012 Technical regulation on ambient air quality index [S].

[46] Laurent B, Marticorena B, Bergametti G, et al. Simulation of the mineral dust emission frequencies from desertareas of China and Mongolia using an aerodynamic roughnesslength map derived from the POLDER//ADEOS 1surfaceproducts [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2005,110:D18S04.

[47] 闫昕旸,张 强,闫晓敏,等.全球干旱区分布特征及成因机制研究进展 [J]. 地球科学进展, 2019,34(8):826−841.
Yan X Y, Zhang Q, Yan X M, et al.An overview of distribution characteristics and formation mechanisms in global arid areas [J]. Advances in Earth Science, 2019,34(8):826−841.

[48] 石春娥,姚叶青,张 平,等.合肥市 PM_{10} 输送轨迹分类研究 [J]. 高原气象, 2008,27(6):1383−1391.
Shi C E, Yao Y Q, Zhang P, et al.Transport trajectory classifying of PM_{10} in Hefei [J]. Plateau Meteorology, 2008,27(6):1383−1391.

[49] 蒲 茜,李振亮,曹云擎,等.重庆市 2015~2020 年秋冬季 $PM_{2.5}$ 污染传输路径与潜在源贡献分析 [J]. 环境科学学报, 2022,42(5):49−59.
Pu X, Li Z L, Cao Y Q, et al.Transport pathways and potential source contribution of $PM_{2.5}$ pollution in Chongqing from 2015 to 2020 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022,42(5):49−59.

[50] 王 艳,柴发合,刘厚凤,等.长江三角洲地区大气污染物水平输送场特征分析 [J]. 环境科学研究, 2008,21(1):22−29.
Wang Y, Chai F H, Liu H F, et al. Analysis on the characteristics of horizontal transport of the atmospheric pollutant over the Yangtze Delta [J]. Research of Environmental Sciences, 2008,21(1):22−29.

作者简介：王俊彬(1996−),男,广东揭阳人,工程师,博士,主要研究方向为污染气象学、气候学.发表论文 10 篇.wang_junbin@foxmail.com.