

王义耕,麦博儒,和凌红,等. 2021年3月广西一次罕见浮尘天气成因分析[J]. 气象研究与应用,2023,44(4):96-101.

WANG Yigeng, MAI Boru, HE Linghong, et al. Analysis of the causes of a rare floating dust weather in Guangxi in March 2021 [J].

Journal of Meteorological Research and Application, 2023, 44(4): 96-101.

## 2021年3月广西一次罕见浮尘天气成因分析

王义耕<sup>1</sup>, 麦博儒<sup>2</sup>, 和凌红<sup>3</sup>, 陈丹<sup>4</sup>, 刘晓梅<sup>1</sup>, 姚胜芳<sup>1</sup>

(1. 广西壮族自治区气象台, 南宁 530022; 2. 中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州 510640;

3. 广西壮族自治区生态环境监测中心, 南宁 530028; 4. 广西壮族自治区气象科学研究所, 南宁 530022)

**摘要:** 利用气象探测资料、环境观测资料和高空地面天气图, 对2021年3月22—24日广西近30a最强的浮尘天气过程的气候背景、天气形势、形成原因进行分析, 并运用后向轨迹方法诊断其传输过程。结果表明, 此次沙尘(浮尘)天气源于内蒙古西部阿拉善高原和甘肃西北部河西走廊, 随着中路冷空气先自西向东、后自北向南传输, 沙尘在传输过程中逐渐减弱, 最后进入广西境内形成浮尘天气。由于广西处于弱气压场中, 整层大气稳定, 大气垂直湍流运动弱, 地面平均风速小于 $1.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 大气水平扩散条件差, 空气干燥、没有降水, 不利于沙尘粒子扩散、稀释、沉降和清除, 这是造成浮尘天气在广西境内长时间维持的主要原因。

**关键词:** 广西; 浮尘天气; 后向轨迹; 大气稳定

**中图分类号:** P445.4

**文献标识码:** A

**doi:** 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2023.4.15

沙尘暴是发生在干旱、半干旱、沙漠及其邻近地区强烈的沙尘天气, 主要分布在我国北方地区, 西北地区最为突出, 呈现出显著的区域性特征。春季是我国沙尘暴出现频率最高、范围最大的季节, 呈现出显著的季节性特征<sup>[1-3]</sup>。中国学者针对沙尘暴的研究已有很多, 也取得较大进展<sup>[4-7]</sup>, 但对浮尘的研究相对较少。孟露等<sup>[8]</sup>分析塔里木盆地近30a浮尘天气时间和空间变化特征、持续浮尘天气的频次分布, 以及塔里木盆地独特的持续浮尘滞空区域气候特征; 张迎新等<sup>[9]</sup>对2017年京津冀地区出现的一次持续较长时间的浮尘天气, 从气象条件方面分析其成因及维持机制; 褚金花等<sup>[10]</sup>分析兰州市春季一次连续浮尘天气过程的大气环流特征、发生机制及其造成的空气污染状况, 指出兰州地处黄河河谷盆地, 极易出现逆温和静风现象, 不利于大气污染物在垂直和水平方向上的扩散, 是造成浮尘天气长时间维持的主要原因; 马井会等<sup>[11]</sup>初步研究一次上海连续浮尘过程的传输特征和形成的主要原因。

目前, 浮尘天气的主要研究工作是针对其形成

原因及沙尘来源开展的, 研究个例多数发生在北方, 南方的研究个例相对较少。广西地处华南, 南临北部湾, 远离沙源地, 很少出现浮尘天气, 但2021年3月22—24日, 广西境内自北向南、从内陆到沿海出现近30a最强的浮尘天气过程, 其中原因值得深入探讨。中央气象台的沙尘暴数值预报模式(CUACE—Dust)预报此次浮尘南界仅仅到达湖南北部, 漏报湖南中南部、贵州南部和广西境内浮尘天气, 广西这次浮尘天气预报难度极大, 因此有必要分析其形成原因、传播过程及维持机制。本文从这次浮尘天气发生的前期气候背景和天气形势、中低层风场特征、浮尘区域输送、环境观测资料、气象探测资料等多个方面, 对此次过程进行系统全面分析, 以期得到本地浮尘天气发生规律、形成机理、预报思路和预报着眼点, 为广西浮尘天气的预报预警和防控减排提供参考。

### 1 资料与方法

PM<sub>10</sub> 质量浓度数据和空气质量指数(AQI)数据

收稿日期: 2023-11-20

基金项目: 广东省自然科学基金项目(2021A1515011494)

第一作者简介: 王义耕(1978—), 男, 硕士, 主要研究环境气象预报、城市大气复合污染。E-mail: wyg780625@163.com

来自中国环境监测总站全国城市空气质量实时发布平台(<https://air.cnemc.cn:18007>);气象数据来自国家气象信息中心提供的地面台站常规气象观测资料(风速、相对湿度、气温、降水量),温度对数压力图来自中国气象局 CMA—Cast 信息系统下发的 MICAPS 资料;高空及地面天气图使用美国气象环境预报中心和美国国家大气研究中心(NCEP/NCAR)再分析资料(空间分辨率  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ,时间分辨率 6 h,垂直 17 层)。

HYSPLIT-4 模型是由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的空气资源实验室和澳大利亚气象局联合研发的一种用于计算和分析大气污染物输送、扩散轨迹的专业模型<sup>[12]</sup>。该模型具有处理多种气象要素输入场、多种物理过程和不同类型污染物排放源功能的较为完整的输送、扩散和沉降模式,已经被广泛应用于多种污染物在各个地区的传输和扩散的研究中。模型所用数据是 NCEP 的 GDAS 资料,空间分辨率为  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 浮尘天气过程实况

受较强冷空气影响,2021 年 3 月 22—24 日,广西出现一次罕见的大范围长时间浮尘天气过程,这次浮尘天气过程具有范围广、时间长、浓度高、影响大等特点。广西 14 个地级市中 10 个地级市出现了浮尘污染天气,以  $PM_{10}$  为首要污染物的区域大气污染过程明显,另外 4 个地级市  $PM_{10}$  浓度也较高。在广西境内,与 850 hPa、925 hPa 的风场风向(都吹东北风)一致,浮尘整体呈自东北向西南移动趋势,在浮尘传播主路径上的城市都出现了浮尘污染。此次过程从 3 月 22 日到 24 日,达 3 d 之久,其中柳州、河池、来宾和百色连续 3 d,南宁连续 2 d,桂林、贵港、崇左、防城港和钦州各 1 d,累计出现 19 城次的污染天。污染最重的河池 22 日 AQI 达 142,  $PM_{10}$  日平均浓度达  $233 \mu g \cdot m^{-3}$ ,  $PM_{10}$  小时浓度峰值出现在桂林 22 日中午 12 时达  $296 \mu g \cdot m^{-3}$ ,达到中度污染。广西境内出现近 30a 最强浮尘天气过程,造成空气质量恶化、能见度下降,对交通出行、农业生产和人体健康造成不利影响,引起社会各界广泛关注。在这次罕见的大范围长时间浮尘天气过程中,浮尘在广西境内整体呈自东北向西南、从内陆到沿海移动趋势,由于桂东地区不在浮尘传播主要路径上,贺州、梧州、玉林和北海 4 个城市浮尘影响稍小,没有

出现浮尘污染天气。

### 2.2 气候背景和天气形势

#### 2.2.1 前期气候背景分析

从 3 月前半月北方地区气温距平实况图和北方地区降水距平百分率图看,这次扬沙过程沙源地(见第 4 节传输过程的后向轨迹分析)内蒙古阿拉善高原和甘肃河西走廊等地与常年同期相比气温偏高  $4 \sim 6^{\circ}C$  以上,降水普遍偏少 80% 以上,大部分地区降水少于 10 mm,甚至无降水,地表基本无积雪覆盖。在阿拉善高原和河西走廊地区分布着大片的沙漠、荒漠、沙地和戈壁,沙源充足,加上前期干燥少雨,气温明显偏高,降水显著偏少,春季植被较少,地表逐渐解冻,干土层厚,土壤表层干燥疏松,沙粒裸露在地表,易于起沙。富含沙尘源的下垫面为沙尘天气的出现提供很好的物质条件。前期低层偏暖,不稳定的大气层结,为沙尘天气的出现提供良好的局地热力条件。3 月 19—20 日,受较强的蒙古冷高压东移南下的影响,我国西北大部地区出现 5~6 级持续大风,阵风达到 7~8 级,为这次沙尘天气的发生提供非常好的动力条件。

甘肃河西走廊呈西北—东南向,长度大约 1 100 km,当冷空气经过时,由于河西走廊地形的狭管效应,使风力明显加大。强风是沙尘发生的动力条件,也是沙尘能够长距离输送的动力保证。在河西走廊形成风沙,途经阿拉善高原的巴丹吉林和腾格里沙漠,卷起更多的沙尘,在东移南压过程中,在贺兰山北面山前受阻堆积,冷锋受山脉阻挡作用,坡度变陡,当冷空气堆积到一定厚度,一部分冷空气翻越贺兰山向银川盆地俯冲,由于冷空气迅速下沉,锋面坡度急剧减小,大量空气下滑势能转变为动能,地面风速增大。地形俯冲作用造成下滑效应,加之冷锋前高温,促使在银川盆地形成强烈辐合上升运动,气压和温度的梯度进一步加大,促使扬沙天气进一步加强。

#### 2.2.2 天气形势分析

从 3 月 18 日 20 时中国地区 500 hPa 环流形势(图 1a)来看,高空槽位于新疆东部,且温度槽稍落后于高度槽,该槽将东移发展,我国华北和东北地区为高压脊控制,高原南支槽多波动活动,西太平洋副热带高压主体位于南海上。从 3 月 18 日 20 时中国地区地面气压场(图 1b)来看,冷高压中心位于新疆北部,冷高压强度大(1 050 hPa),冷锋前低压中心位于青海北部,中心值为 1 000 hPa,高低中心气压差到达 50 hPa 以上,等压线密集,地面气压梯度大。高

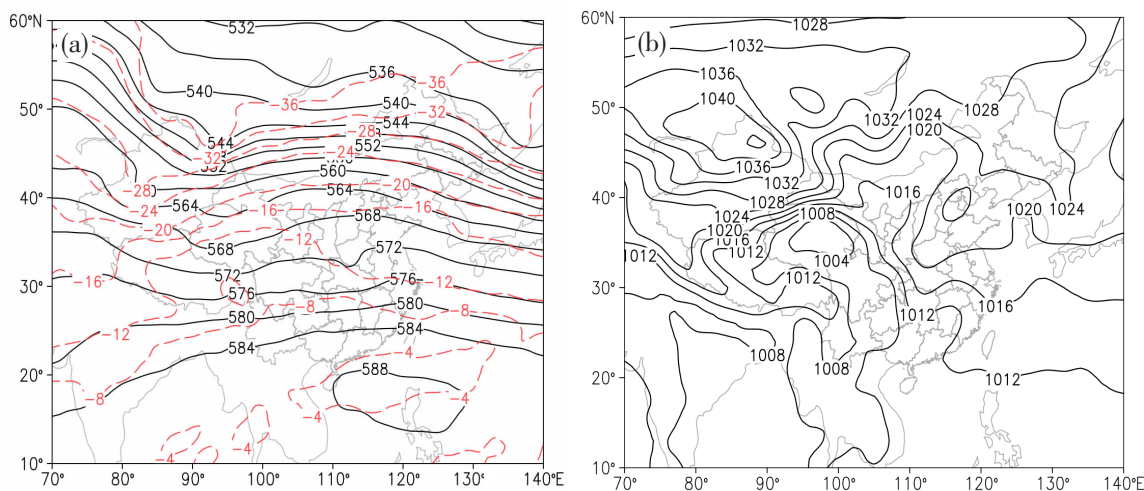


图1 500 hPa 高度场(黑实线)和温度场(红虚线)(a)、地面气压场(b)

低压中心之间等压线密集区正是位于高空槽前的沙源地阿拉善高原沙漠及河西走廊戈壁地区,强大的气压梯度导致沙源地产生强烈的上升运动,槽前上升气流将地面的沙尘卷至高空,并随高空风向下游传输,加大了沙尘的影响范围。

根据位势倾向方程<sup>[13]</sup>

$$\left( \nabla^2 + \frac{f^2}{\sigma} \frac{\partial^2}{\partial p^2} \right) \frac{\partial \Phi}{\partial t} = -fV_g \cdot \nabla(f + \zeta_g) + \frac{f^2}{\sigma} \frac{\partial}{\partial p} (-V_g \cdot \nabla \frac{\partial \Phi}{\partial p}) \quad (1)$$

(等式左边是位势倾向的三维拉普拉斯项,等式右边第一项是地转风的绝对涡度平流项,等式右边第二项是温度平流随高度的变化项)

槽后冷平流使槽加深发展、引导冷空气快速南下,槽前正涡度平流使锋前热低压发展。地面冷锋前后气压梯度、变压梯度和温度梯度都很大,日间地表升温快,造成中低空干绝热不稳定层结,强冷平流、强气压梯度以及高空急流造成的动量下传等共同作用,使得该地区出现西北大风,平均风力普遍达到5~6级,阵风7~8级,大风将地面沙尘吹起扬向空中,迅速加大空气中沙尘含量,由于大气的不稳定,沙尘快速卷至高空,并随着高低空上下一致的西北气流向东南南输送。而近地面层形成的局地干绝热不稳定,同时有利于造成强的湍流感热通量,这对沙漠地区局地性沙尘暴的产生和加强起着重要作用<sup>[14]</sup>。

### 2.3 浮尘传输过程分析

广西地处华南,远离沙源地,自然生态环境良好,境内植被茂盛、草原综合植被盖度为82.8%,森林茂密,森林覆盖率达62.5%,居全国第3位,因此,

极少由本地形成如此严重的大范围高浓度PM<sub>10</sub>空气污染。为了分析本次沙尘的来源,利用美国国家海洋及大气管理局(NOAA)的HYSPLIT模型做河池市观测点后向轨迹分析,沙尘气团的经纬度选定污染最重的河池观测点(108.28°E, 25.20°N),沙尘气团的时间选定广西境内浮尘浓度大幅上升的北京时间3月22日08时,沙尘气团后向轨迹的起始点分别设为海拔1500 m、1000 m和500 m,对应于采样点大气高层、中层和低层,分别从3个高度进行质点后向72 h轨迹追踪。到达河池72 h后向轨迹模型显示,距地面1500 m、1000 m和500 m的污染气团高起低落来自内蒙古西部的阿拉善高原和甘肃西北部的河西走廊。周自江等<sup>[15]</sup>利用1954—2000年中国大陆681个站的观测资料,分析近47 a我国沙尘暴的时空分布特征,发现塔里木盆地及其周围地区、阿拉善高原及相邻的河西走廊东北部是我国沙尘暴的两大高频中心。此次过程沙尘源地正是来自我国沙尘暴高发中心的阿拉善高原及相邻的河西走廊。

3月22日08时河池市的72 h后向轨迹中,前24 h,因高空风力大(风速达到30 m·s<sup>-1</sup>),裹着沙尘的空气沿途逗留时间短,传输快,向东南长驱直入,直扑陕甘宁地区、华北南部,造成甘肃、宁夏、陕西、山西、河北大部分地区出现扬沙天气;中间36 h,沙尘气团进一步向南传输,但速度逐渐减慢,影响华中地区,河南、湖北、湖南出现大面积的扬沙或浮尘天气;后12 h,随着中低层上下一致的挟卷沙尘的东北气流向西南地区南部和华南地区西部继续扩散,贵州南部和广西北部地区出现浮尘天气。浮尘随着强冷空气先自西向东、后自北向南先后影响到我国西



北地区、华北南部、华中地区和华南西部,导致广西出现近 30 a 最强的浮尘天气,浮尘天气在广西境内整体呈自北向南、从内陆到沿海移动趋势。在浮尘自北向南高空传输过程中,由于传输距离长,在重力沉降作用下,PM<sub>10</sub> 浓度逐渐下降,强度逐渐减弱。

#### 2.4 浮尘天气长时间维持原因

3 月 22—24 日,浮尘天气过程在广西境内滞留长达 3 d 之久,历史罕见。浮尘天气能够长时间的维持与本地的气象要素密切相关,以这次污染最重的河池市为代表站来分析。图 2 是 3 月 22 日 20 时河池站探空曲线图,图中状态曲线位于层结曲线左边,对流有效位能为负值,整层大气稳定,对湍流运动起抑制作用,减弱大气扩散稀释能力,有利于污染物累积,上游输送的沙尘一旦进入该区域,不易扩散出去。800 hPa 以下温度露点差较大,表明对流层的中下层空气干燥。统计地面气象观测站的数据,出现浮尘污染的城市地面日平均相对湿度在 45.8%~72.5% 之间,绝大多数在 70.0% 以下,相对湿度小不利于浮尘颗粒物重力沉降到地面,长时间滞留在空气中,形成浮尘污染天气。从图中可以看出 850 hPa 和 700 hPa 之间有深厚逆温层,当高空出现逆温层时,会阻碍空气对流活动,进而使逆温层像顶盖一样抑制污染物的湍流输送<sup>[16]</sup>。各地上空逆温层的高度在 850 hPa 附近,逆温层阻挡低层空气的上升运动,不利于上下层空气交换,抑制湍流混合,污染物垂直扩散能力降低,造成沙尘污染物聚集在 850 hPa 以下,从而使浮尘天气得以持续。

3 月 22 日,上游地区浮尘向广西境内输送时

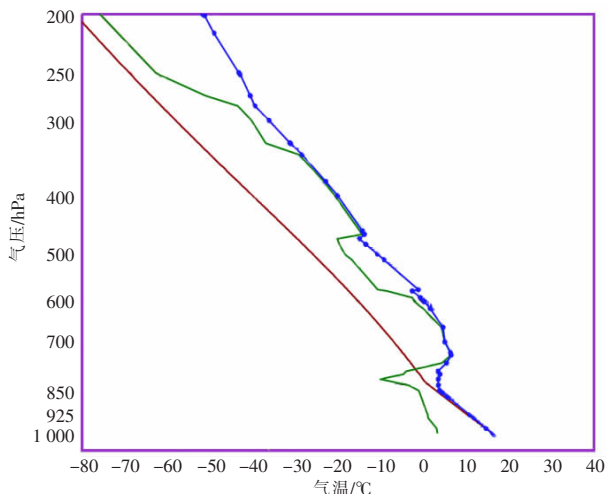


图 2 3 月 22 日 20 时河池站探空曲线  
(蓝线为温度层结曲线,绿线为露点层结曲线,  
红线为状态曲线)

段,广西境内大部有 3~4 级东北风,阵风可达 5~6 级,地面风速较大,较大的风速有利于上游地区沙尘源源不断地向广西境内输送,形成浮尘天气。23 日,冷空气主体出海,进入北部湾,陆地上地面风速变小,经统计,23—24 日出现浮尘污染天气的城市地面日平均风速大小在 1.0~2.5 m·s<sup>-1</sup> 之间,绝大多数在 1.4 m·s<sup>-1</sup> 以下,处于微风状态。地面风速大小决定大气扩散能力,地面风速越小,大气水平扩散能力越弱,较小的风速,不利于沙尘颗粒物扩散,长时间滞留在原地,形成浮尘污染天气。被降水湿去除或湿沉降对气体和颗粒物都是最有效的大气净化机制<sup>[17]</sup>。降水有利于沙尘颗粒物的洗刷和湿清除,但这三天,出现浮尘污染天气的城市降水量都是 0 mm,无降水不利于浮尘稀释、沉降和清除。

这次由西北地区高空输送来的沙尘,在广西境内形成大范围长时间的浮尘污染天气与由广西本地污染源排在气象条件很差的情况下形成的污染天气最大的不同,就是本地污染源排放产生的污染天气,污染物主要集中在 925 hPa 高度(大气边界层)以下,而这次高空输送来的沙尘,到达 850 hPa 高度,伸展高度高,近地面空气中沙尘重力沉降到地面后,高层空气中的沙尘又源源不断地沉降补充到近地面空气中,也是这次浮尘污染天气长时间维持的重要原因。

### 3 结论

利用气象探测资料、环境观测资料和高空地面天气图,分析 2021 年 3 月 22—24 日广西境内近 30 a 来强度最强、范围最广的一次浮尘天气过程的气候背景、天气形势、传输过程和形成原因,得到以下几点结论:

(1)受蒙古高压、地面冷锋和冷空气大风的影响,此次浮尘天气在广西境内整体呈自北向南、从内陆到沿海移动趋势,对广西东部地区影响相对较小。

(2)HYSPLIT-4 后向轨迹模拟结果表明,此次浮尘天气源于内蒙古西部阿拉善高原和甘肃北部河西走廊的沙尘远距离输送,沙尘粒子东移南压,途经陕甘宁地区、华北南部、华中地区,向华南西部输送,造成广西境内大范围长时间一次浮尘天气过程。

(3)阿拉善高原和河西走廊地区富含沙尘源的下垫面为浮尘天气的出现提供很好的物质条件;前期低层偏暖,不稳定的大气层结,为浮尘天气的出现提供良好的局地热力条件;受较强的蒙古冷高压东

移南下影响,我国西北大部地区出现较强大风,为这次浮尘天气的发生提供较好的动力条件。

(4)在连续浮尘天气期间,广西各地边界层整层大气稳定、大气垂直湍流运动弱、温度露点差较大、空气干燥、地面风速较小、没有降水,不利于沙尘粒子扩散、稀释、沉降和清除,是浮尘天气长时间维持的主要原因。

#### 参考文献:

- [1] 钱正安,宋敏红,李万元.近 50 年来中国北方沙尘暴的分布及变化趋势分析[J].中国沙漠,2002,22(2):106-111.
- [2] QIAN W H, TANG X, QUAN L S. Regional characteristics of dust storms in China[J]. Atmospheric Environment, 2004,38(29):4 895-4 907.
- [3] 刘艳菊,韩同林,刘清琚,等.北京尘暴与环境[M].北京:科学出版社,2017:16-19.
- [4] 王式功,董光荣,陈惠忠,等.沙尘暴研究的进展[J].中国沙漠,2000,20(4):349-350.
- [5] 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):3 511-3 522.
- [6] 安月改,刘学锋,张梅.京津冀区域沙尘暴气候变化特征分析[J].环境科学研究,2004,17(3):21-24.
- [7] 王伏村,许东蓓,王宝鉴,等.河西走廊一次特强沙尘暴的热力动力特征分析[J].气象,2012,38(8):950-959.
- [8] 孟露,赵天良,何清,等.近 30 年塔里木盆地浮尘天气及持续浮尘滞空的气候特征[J].气象学报,2022,80(2):322-333.
- [9] 张迎新,李林,曹晓冲,等.京津冀地区一次持续时间较长的浮尘天气的观测分析[J].沙漠与绿洲气象,2021,15(4):123-129.
- [10] 褚金花,陈斌,王式功,等.2013 年春季兰州一次罕见持续浮尘天气过程分析[J].干旱区资源与环境,2014,28(12):58-63.
- [11] 马井会,张国琰,耿福海,等.上海地区一次典型连续浮尘天气过程分析[J].中国环境科学,2013,33(4):584-593.
- [12] DRAXLER R R, HESS G D. An overview of HYSPLIT4 modeling system for trajectories, dispersion and deposition [J].Australian Meteorological Magazine,1998,47(2):295-308.
- [13] 寿绍文等编著.天气学基本原理[M].北京:气象出版社,2016:158-161.
- [14] 孙继明,肖稳安,牛生杰,等.沙漠地区沙尘天气近地层湍流输送特征分析[J].南京气象学院学报,2002,25(4):489-495.
- [15] 周自江,王锡稳,牛若芸.近 47 年中国沙尘暴气候特征研究[J].应用气象学报,2002,13(2):193-200.
- [16] 胡隐樵,张强.兰州山谷大气污染的物理机制与防治对策[J].中国环境科学,1999,19(2):119-122.
- [17] 唐孝炎,张远航,邵敏.大气环境化学[M].北京:高等教育出版社,2006:102-106.

## Analysis of the causes of a rare floating dust weather in Guangxi in March 2021

WANG Yigeng<sup>1</sup>, MAI Boru<sup>2</sup>, HE Linghong<sup>3</sup>, CHEN Dan<sup>4</sup>, LIU Xiaomei<sup>1</sup>, YAO Shengfang<sup>1</sup>

(1.Guangxi Meteorological Observatory, Nanning 530022, China;

2.Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, China Meteorological Administration, Guangzhou 510640, China; 3.Guangxi Center of Ecological Environment Monitoring, Nanning 530028, China;

4.Guangxi Institute of Meteorological Sciences, Nanning 530022, China)

**Abstract:** The climatic background, weather situation and formation reasons of the strongest floating dust weather process in Guangxi in the past 30 years during March 22—24, 2021 were analyzed by using meteorological detection data, environmental observation data, high-altitude and ground weather maps, and the backward trajectory method was used to diagnose its transmission process. The results showed that the floating dust originated from the Alashan Plateau in the west of Inner Mongolia and the Hexi Corridor in the northwest of Gansu. Along with the cold air blowing, first from west to east and then from north to south, the sand and dust gradually weakened during the transmission process, and finally entered Guangxi to form a floating dust weather. Since Guangxi is in a weak air pressure field, the whole atmosphere is stable, the vertical turbulent movement of the atmosphere is weak, the average ground wind speed is less than  $1.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , the atmospheric horizontal diffusion conditions are poor, the air is dry, and there is no precipitation, which is not conducive to the diffusion, dilution, sedimentation and removal of dust particles, an main reason for the long-term maintenance of the floating dust weather in Guangxi.

**Key words:** Guangxi; dust weather; backward trajectory; atmospheric stability