

兰州飞行管制区一次罕见强对流天气过程成因分析

伏龙延

中国民用航空西北地区空中交通管理局甘肃分局, 甘肃 兰州 730030

DOI:10.61369/EAE.2026020021

摘 要 : 兰州飞行管制区历史上曾出现一次罕见的强对流天气过程, 区域内多地出现暴雨, 其中兰州中川机场出现直径超过 10 毫米的冰雹, 同时还出现了自建成以来唯一的一次泥石流地质灾害。由于当时探测资料缺乏, 对于此次极端天气的发生机理尚不清楚, 本文利用 ERA5 再分析资料系统回顾了此次天气过程的大气环流, 发现中纬度地区高空锋区与低纬地区孟加拉湾热带风暴相互作用, 是大范围强对流天气活动的天气尺度背景, 环流形势较为罕见。天气尺度系统的稳定少动为中小尺度对流系统的新生、增长、传播以及长时间维持提供了充沛的动力、不稳定及水汽条件, 沿着高空槽前部不断生成并前向传播的对流云团所造成的列车效应是多地出现极端强降水的主要原因。机场所在的中尺度区域内, 低层风场强烈顺转、较大的不稳定能量以及 0℃ 与 -20℃ 层的适宜高度为冰雹的出现提供了有利的环境条件, 机场上游山区的强降水所形成的山洪是造成机场泥石流的直接原因。

关 键 词 : 极端天气; 强对流; 列车效应; 中川机场

Analysis of the Causes of a Rare Severe Convective Weather Event in the Lanzhou Flight Control Area

Fu Longyan

Gansu Branch of the Northwest Regional Air Traffic Management Bureau of the Civil Aviation Administration of China, Lanzhou, Gansu 730030

Abstract : A rare severe convective weather event occurred in the history of the Lanzhou Flight Control Area, with heavy rainfall observed in multiple locations within the region. Hailstones exceeding 10 millimeters in diameter were recorded at Lanzhou Zhongchuan International Airport, which also experienced its only mudslide geological disaster since its establishment. Due to a lack of observational data at the time, the mechanism behind this extreme weather event remained unclear. This paper systematically reviews the atmospheric circulation during this weather event using ERA5 reanalysis data. It reveals that the interaction between the upper-level frontal zone in mid-latitudes and the tropical storm from the Bay of Bengal in low latitudes created a rare synoptic-scale background for widespread severe convective weather activity. The relatively stable synoptic-scale system provided ample dynamic, instability, and moisture conditions for the initiation, growth, propagation, and long-term maintenance of mesoscale convective systems. The train effect caused by convective cloud clusters continuously forming and propagating forward along the front of the upper-level trough was the primary reason for the extreme precipitation observed in multiple locations. Within the mesoscale region where the airport is located, strong low-level wind rotation, significant instability energy, and suitable heights of the 0℃ and -20℃ layers provided favorable environmental conditions for hail formation. The flash floods generated by heavy rainfall in the upstream mountainous areas of the airport were the direct cause of the airport mudslide.

Keywords : extreme weather; severe convection; train effect; Zhongchuan Airport

引言

强对流天气是影响民航运行安全和效率的重要灾害性天气之一。雷暴大风、短时强降水、冰雹等天气现象具有突发性强、局地性强、演变迅速和致灾性高等特点, 不仅会对航空器起降、进离场排序和航路运行造成直接影响, 还可能诱发跑道积水、低能见度、地面设备受损以及次生灾害等问题, 从而对机场运行能力和航班正常性产生显著制约^[1]。

统计研究表明, 中国强对流天气具有显著的区域差异, 其发生频次和强度受到地理位置、季风活动和地形等条件共同影响^[2]。相较

于东部季风区,西北地区总体水汽条件较弱,但并不意味着强对流天气稀少,在特定季节和有利环流配置下,该地区仍可出现短时强降水、冰雹和雷暴大风过程^[3-5]。特别是在高原、山地和盆地交错分布的复杂下垫面背景下,局地动力抬升、热力差异和中尺度辐合线的形成,均可成为对流触发和维持的重要条件^[6]。

西北地区强对流过程具有鲜明的区域特征。关于西北暴雨的综述研究指出,该区域暴雨过程往往与高、中、低纬系统的相互作用、水汽远距离输送、低空急流演变以及复杂地形作用密切相关,而短时强降水的发生发展又与中尺度对流系统的生消演变紧密耦合^[3]。与此同时,冰雹也是西北地区重要的灾害性天气之一。相关研究表明,西北地区冰雹活动在空间分布上与山地、高原地形关系密切,祁连山、天山等区域均属于相对高发区域^[4];全国冰雹灾害事件统计也显示,西北地区仍是我国冰雹较为活跃的区域之一^[5]。上述事实说明,尽管西北地区整体气候偏干,但在复杂地形和特殊环流背景下,局地仍具备形成强对流灾害天气的环境基础。本文以兰州飞行管制区发生的一次罕见强对流天气过程为例,分析其生成的环流背景和中小尺度特征,为西北地区类似极端天气过程的预报预警和航空气象保障提供参考。

一、资料来源及实况

本文使用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的ERA5再分析资料和机场人工观测记录开展讨论。其中ERA5再分析资料时段为1997年7月29日08时至30日08时,时间分辨率1小时,空间分辨率0.25°。高空数据包含了自800百帕至250百帕共计7个高度层,物理量有纬向风 u ,经向风 v ,温度 t 和比湿 q 等。对于单层数据,使用了总降水量 tp 。人工观测记录包括了机场雷暴、降水的开始、结束时间以及机场的总降水量。

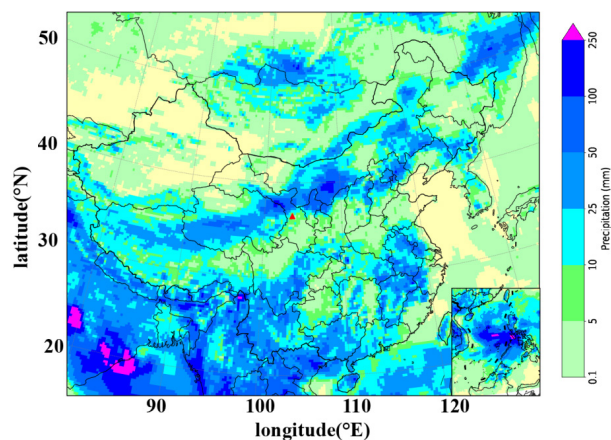


图1 1997年7月29日08时至30日08时东亚地区降水分布(红色三角为机场位置)

兰州飞行管制区(后文简称管制区)位于我国西北地区,总面积约150万平方公里。再分析资料显示,1997年7月29日08时至7月30日08时(后文略去年份信息),管制区内出现一次强对流天气过程,多地出现暴雨天气,强降水主要出现在青藏高原中部,祁连山区及内蒙古中西部地区,部分地区过程降水量达到250毫米(图1)。人工观测记录表明兰州中川机场自7月29日20时至30日08时出现强对流天气,雷暴持续时长达5小时20分,短时出现直径超过10毫米的冰雹,夜间出现泥石流覆盖跑道,这也是中川机场自建成以来仅有的一次地质灾害。

二、环流背景及演变

图2展示了7月29日14时-20时东亚地区250百帕、500百帕和700百帕的天气系统动态变化过程。29日14时,250百帕高

度上副热带锋区与西风急流位于37°N-45°N之间,沿着急流区域有高空浅槽配合急流核东移,急流中心位于新疆至河西地区,中心最大风速为50 m/s(图2a)。急流北侧为中纬地区切断低压并伴有冷中心,急流以南为南亚高压且势力较弱,退居中南半岛北部地区,同时注意到在孟加拉湾地区有热带风暴活动。管制区大部位于急流核区,中川机场位于急流右侧,高空气流辐散。在中层500百帕(图2b),中高纬地区呈纬向环流,在250百帕高空急流的下方区域,锋区结构明显,其北部的切断低涡范围较高层更大且在低涡后有横槽向西伸展,由高度场与冷中心的位置可见,低涡及锋区的位置和强度呈现为较为稳定的状态,仅在锋区底部存在冷平流输送。低纬地区,副高主体退居海上,其外围的暖湿气流影响长江以南地区。值得注意的是孟加拉湾热带风暴的环流结构在500百帕更为清晰,中心趋于登陆,风暴外围的偏东暖湿气流在喜马拉雅山北麓逐渐转为偏南气流进入高原地区。此时,中纬度高空锋区底部的冷空气与来自低纬地区北上的暖湿空气在高原地区交汇并形成东西走向的辐合线,有利于中层锋生。700百帕,孟加拉湾热带风暴配合南支槽及副高外围的偏南气流,在高原以东地区建立了天气尺度的水汽通道,比湿最大值超过12g/kg。水汽通道的出口位于内蒙古中西部地区,在该区域随着冷暖气流的交汇,有黄河气旋生成,并且气旋前有暖式切变线建立(图2c)。在上述天气尺度系统的相互配合下,西北地区的降水云系位于500百帕辐合线附近以及700百帕黄河气旋的前部。

29日20时,250百帕的环流形势整体较为稳定,仅表现为沿着急流区域有急流核向东传播,兰州中川机场始终位于急流右侧的气流辐散区,有利于整层垂直运动的发展(图2d)。29日20时,在500百帕高原地区的锋生作用下,有低涡系统生成,其前部的横向切变线进一步向东扩展(图2e),此时,降水云系呈西南东北走向持续发展,降水逐渐增强。在中纬度锋区整体稳定的背景下,低涡前部的横向切变线不断向东发展的过程中逐渐转变为西北气流与西南气流的辐合线,低纬地区输送水汽的西南气流不断向北发展,配合700百帕低空暖湿气流的加速(图2f),至30日02时,已建立起西起昆仑山脉,东至阴山山脉的天气尺度带状对流云系。随着对流系统不断在槽前生成并沿着西南气流向东北方向传播,多地出现列车效应,并且在祁连山地区,随着地形的强迫抬升作用,水汽辐合进一步增强,这也是祁连山区出现降水大值中心的重要原因。

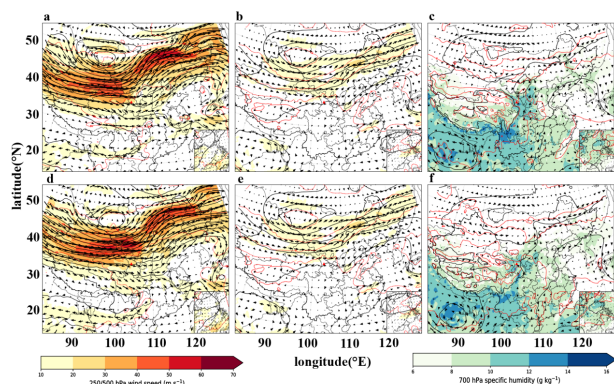


图2东亚地区1997年7月29日不同时刻各层环流形势。其中a-c代表29日14时250百帕、500百帕和700百帕环流形势，d-f则代表对应气压高度层在29日20时的环流形势。

由天气尺度的形势分析可见，此次大范围、长时间的强对流天气出现的关键因素来自于以下几方面。首先是天气尺度系统的相互作用及稳定维持。中层在高原地区锋生所形成的高原低涡、横向切变线、辐合线以及低层的暖湿气流是此次天气过程得以出现的关键系统，追踪其成因，在中纬度地区锋区稳定的背景下，孟加拉湾热带风暴是发动此次天气过程的核心因子，对于我国北方地区，中高层的锋区和动力抬升系统是常见的，但是天气尺度的水汽通道建立，需要依赖于天气尺度的热带系统。

第二点原因是天气尺度水汽通道的建立与维持。此次天气过程中，对于兰州飞行管制区，水汽通道在大气中层和低层分别建立，其中中层的水汽来自于翻越高原的西南暖湿气流，这在长期的天气预报实践过程中是较为罕见的。低层的水汽通道主要来自于沿青藏高原东部向北伸展的偏南气流，同时低层700百帕副高的形态对于水汽通道方向的调整也起到了重要作用，7月正值华北东北雨季，副高的经向度较大，其迫使偏南暖湿气流向我国西北地区输送水汽。

第三点是列车效应的形成与长时间维持。相关研究表明，列车效应的建立常见于我国东部地区，原因是其形成机理中，核心要素是暖湿强迫的建立以及对流系统沿着暖区切变线的生成与传播，这与低层持续的水汽输送存在密不可分的关系。然而在西北地区，高原地区复杂的下垫面环境配合远离热带洋面水汽条件，多数情况下很难有列车效应出现，即使在特定的形势下，槽线由西南指向东北，出现的列车效应也较弱。而此次天气过程中，随着热带系统翻越高原进入西北地区，在构建有利于列车效应建立的动力场结构的同时，高温高湿的环境条件配合复杂的下垫面更容易激发对流天气，从而使得列车效应长时间维持。

三、中小尺度特征

在分析环流背景及演变的基础上，进一步围绕中川机场的大

气环境条件开展分析。值得关注的问题有两点，首先是中雨天气的出现和结束与哪些因素关系较大，另一点是为何出现了冰雹。

针对第一点，观测记录显示机场在29日20时至30日08时出现多个阶段的中雨天气，通过建立风场的时序图可以发现，上述时段恰好是低层偏东气流发展维持并且配合500百帕高空槽东移的时段，中低层大气伴有明显的增湿过程，700百帕比湿最大值超过12g/kg，同时水汽辐合以及垂直速度也处于高位。因此，对于机场而言，显著降水的发生或许和低层偏东气流的发展与加强关系密切，当然500百帕高空槽的抬升作用也是其有利条件。此外，通过对地面形势场的分析可以发现，在20时前后，机场北侧在近地面有弱的冷空气入侵，由于其较为浅薄且势力较弱，并不会改变不稳定的大气状态以及整层的动力和湿度条件，但是较弱的降温会导致降水效率的再次增强。

冰雹天气的出现（29日21:35-29日22:01）是此次天气过程的另一个特点。除满足对流的基本要素外，冰雹天气还需要强烈的垂直风切变和适宜的温度层结，其中前者有助于维持对流单体的旋转和持续发展，风切变能够延长对流的寿命期，并促进冰雹的形成。通过分析冰雹发生时段机场周围各层大气的风场结构，发现确实存在水平风随着高度强烈顺转的现象。温度方面，降雹时段0℃的高度在600百帕附近而-20℃高度层在400百帕附近，这是典型的出现冰雹的温度层结结构。总之，机场降雹是发生在湿层深厚且强烈不稳定的背景下，较强的上升运动伴随水平风场随高度强烈顺转而形成。

四、总结与讨论

利用ERA5再分析资料对兰州管制区一次罕见强对流天气过程进行分析，发现此次过程发生在中纬地区高空锋区与孟加拉湾热带风暴相互作用的背景下，环流形势较为罕见。天气尺度系统的稳定维持为对流系统的新生与长时间维持提供了充沛的动力、不稳定及水汽条件；沿着高空槽前部不断生成并向前传播的对流云团所造成的列车效应是多地出现极端强降水的主要原因；机场区域的显著降水或许和低层偏东气流的显著加强关系更为密切，近地面弱冷空气入侵也是降水增强的有利条件；机场降雹是发生在湿层深厚且强烈不稳定的背景下，较强的上升运动伴随大气强烈顺转而形成。

受到篇幅所限，本文仅利用天气学方法对此次天气过程的大尺度环境和中小尺度特征进行了定性的讨论，对于高时空分辨率的环境场特征的模拟与分析将是后续需要持续开展的重点工作。

参考文献

- [1] Schultz M, Lorenz S, Schmitz R, Delgado L. Weather Impact on Airport Performance[J]. Aerospace, 2018, 5(4): 109. DOI: 10.3390/aerospace5040109.
- [2] 薛晓颖, 任国王, 孙秀宝, 任玉玉, 余予. 中国中小尺度强对流天气气候学特征[J]. 气候与环境研究, 2019, 24(2): 199-213. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17148.
- [3] 黄玉霞, 王宝鉴, 黄武斌, 段伯隆, 杨秀梅. 我国西北暴雨的研究进展[J]. 暴雨灾害, 2019, 38(5): 515-525. DOI: 10.3969/j.issn.1004-9045.2019.05.013.
- [4] 赵红岩, 宁惠芳, 徐金芳, 董安祥, 李青燕. 西北地区冰雹时空分布特征[J]. 干旱气象, 2005, 23(4): 37-40.
- [5] 汤兴芝, 黄治勇, 张荣, 王文玉, 姚瑶. 2010—2020年全国冰雹灾害事件时空分布特征[J]. 暴雨灾害, 2023, 42(2): 223-231. DOI: 10.12406/byzh.2022-089.
- [6] 俞小鼎, 郑永光. 中国当代强对流天气研究与业务进展[J]. 气象学报, 2020, 78(3): 391-418. DOI: 10.11676/qxxb2020.035.