

贵阳龙洞堡机场强对流天气潜势预报技术研究

陈义义, 罗 娅, 宋 媛

中国民用航空西南地区空中交通管理局贵州分局, 贵州 贵阳

收稿日期: 2023年9月11日; 录用日期: 2023年10月11日; 发布日期: 2023年10月20日

摘 要

本文利用常规观测资料、贵阳机场气候志资料、自动观测站及C波段多普勒双偏振雷达、微波辐射计等观测资料, 分析2008年~2021年贵阳机场强对流天气统计学特征, 表明贵阳机场强对流天气年、月、日变化特征显著。然后通过水汽、不稳定能量、垂直风切变及抬升条件4个方面对贵阳机场强对流发生的具体阈值进行统计总结。最后根据热力学、动力学结构特征, 将贵阳机场强对流天气的形势背景分成低层暖平流强迫型、高空冷平流强迫型、斜压锋生型、准正压型、高架雷暴类。

关键词

强对流, 潜势预报, 不稳定能量, 垂直风切变

Research on the Prediction Technology of Severe Convective Weather Potential at Guiyang Longdongbao Airport

Yiyi Chen, Ya Luo, Yuan Song

Guizhou Sub-Bureau of Southwest Air Traffic Management Bureau of CAAC, Guiyang Guizhou

Received: Sep. 11th, 2023; accepted: Oct. 11th, 2023; published: Oct. 20th, 2023

Abstract

This article analyzes the statistical characteristics of severe convective weather at Guiyang Airport from 2008 to 2021 using conventional observation data, climate records at Guiyang Airport, automatic observation stations, C-band Doppler dual polarization radar, wind profile radar, microwave radiometer, and other observation data. It shows that the annual, monthly, and daily variation characteristics of severe convective weather at Guiyang Airport are significant. Then, the specific thresholds for the occurrence of severe convection at Guiyang Airport are statistically sum-

marized through four aspects: water vapor, unstable energy, vertical wind shear, and uplift conditions. Finally, based on the thermodynamic and dynamic structural characteristics, the situation background of severe convective weather at Guiyang Airport is divided into low-level warm advection forcing type, high-altitude cold advection forcing type, baroclinic frontogenesis type, quasi barotropic type, and elevated thunderstorm type.

Keywords

Strong Convection, Potential Prediction, Unstable Energy, Vertical Wind Shear

Copyright © 2023 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

强对流天气通常指的是由深厚湿对流产生的包括短时强降水、雷暴大风、冰雹和龙卷等灾害性天气现象,具有突发性强、生命史短、局地性强、天气剧烈、破坏力大等特点[1]。贵州地处青藏高原东南侧、云贵高原东斜坡上,是我国强对流天气频发的主要地域之一。因贵阳龙洞堡机场位于贵州中部腹地,无论从新北路径还是西南路径过来的强对流天气均会受到影响,严重影响航空器的安全、正常、效率。

强对流天气一直是天气预报中的重点与难点,俞小鼎,郑永光等[2]通过对当代中国几十年来强对流天气研究和业务进展分析总结,阐述了强对流系统产生的环境背景和主要组织形态,以及具体强对流天气的有利环境条件、触发机制。王秀明等[3]讨论了中尺度不稳定与雷暴发生及天气系统与雷暴抬升机制之间的关系,并重点阐明了条件不稳定与位势不稳定的异同及具体判据;郑永光等[4]分析了对流有效位能和对流抑制能量与抬升气块温湿状态的关系、对流发展所需的水汽条件,给出了强对流天气时空分布的一些规律、极端强降水与地面露点的关系、雷暴大风产生机制;费海燕等[5]通过对中国强雷暴大风的气候特征和环境参数分析,表明团状云型强雷暴大风的CAPE值大,低层高湿,中层干且环境温度直减率大;线状云型其热力参数值均较团状云型小,但低层和深层垂直风切变大,整层均较干;不规则云型低层高温高湿,环境风垂直切变较小;如杨秀庄[6]对贵州中东部地2009-02-26夜间出现的锋后冰雹天气形成机制进行分析。结果表明,该次过程主要是由于冷空气势力加厚增强抬升中层相对较暖空气,造成中层出现对流不稳定,加上低空急流脉动效应与其最大风速中心前的辐合上升运动共同影响,引发对流的产生和发展;杨春艳等[7]通过对黔西南一次 β 尺度的强对流天气分析,认为0~6 km强垂直风切变、高干暖盖指数、对流层中层为明显干层、高层动量下传均利于雷暴大风的形成。周方媛[8]通过对上海地区1998年~2009年4月~9月各类强对流天气的统计分析,揭示了不同时间尺度各类强对流天气的时空分布特征,认为雷雨大风的预报采用SI分类方程效果最好。梁明珠等[9]利用数值预报产品提供的丰富预报场资料开发多种物理量场和对流指数场,并根据各种物理量和对流指数的物理意义对其进行“配料”和概率集成,从而确定强对流的发生概率和强度。

目前对于贵阳机场的强对流天气的研究更多的是局限于个例分析,系统全面的研究偏少,而强对流天气作为航空业内最主要的高影响天气,严重威胁航空安全、正常与效率,因此本文主要从贵阳机场强对流天气的潜势预报技术方面开展系统深入分析研究。

2. 资料和研究方法

本文利用2008~2021年贵阳气候志资料分析贵阳机场强对流天气统计学特征,利用常规观测资料、

贵阳机场 C 波段多普勒双偏振雷达资料研究贵阳机场强对流天气发生所需水汽、不稳定能量、垂直风切变及抬升条件 4 个方面的具体阈值, 然后以此为基础, 通过分析贵阳机场强对流天气发生的环流背景, 对强对流天气进行分型, 并具体案例逐一展开分析。

3. 强对流天气的统计分析

3.1. 贵阳机场雷暴的统计学分析



Figure 1. Statistics on the interannual variation of thunderstorm days at Guiyang Airport from 2008 to 2021
图 1. 2008~2021 年贵阳机场雷暴日数年际变化统计

如图 1 所示, 2008~2021 年贵阳机场共出现 555 个雷暴日, 年平均雷暴日数 39 天, 且雷暴日数呈现逐年增多趋势, 其中 2014 年雷暴日数最多, 达到 61 天。

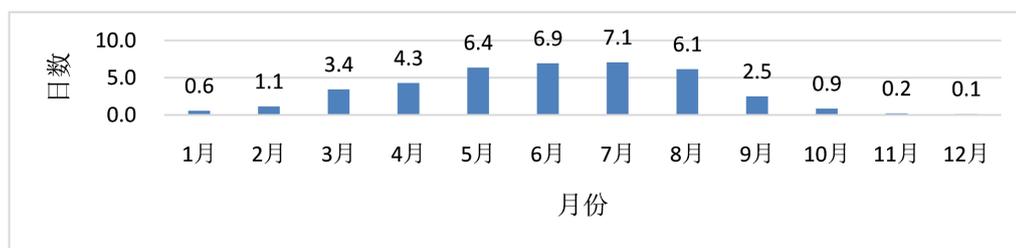


Figure 2. Monthly variation statistics of thunderstorms at Guiyang Airport from 2008 to 2021
图 2. 2008~2021 年贵阳机场雷暴的月变化统计

如图 2 所示, 从 2008~2021 年雷暴日数的月变化分布可知, 贵阳机场 1~3 月雷暴发生次数较少, 4 月至 9 月雷暴发生次数逐渐增多, 其中 5~8 月达到高峰, 10~12 月最少。

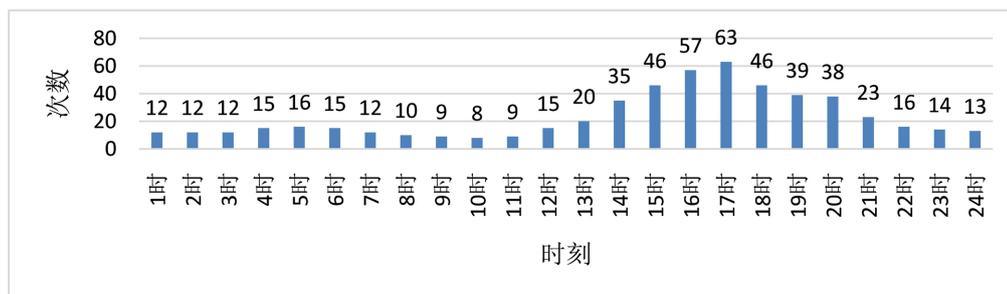


Figure 3. Daily variation statistics of thunderstorms at Guiyang Airport from 2008 to 2021
图 3. 2008~2021 年贵阳机场雷暴的日变化统计

如图 3 所示,从 2008~2021 年雷暴的日变化分布可知,贵阳机场雷暴日变化高值区集中在每日 15~20 时(北京时,以下均为北京时),峰值出现在 17 时,表明雷电多发生在午后至傍晚,低值主要集中在每日 8~11 时。

3.2. 贵阳机场的冰雹的统计学分析

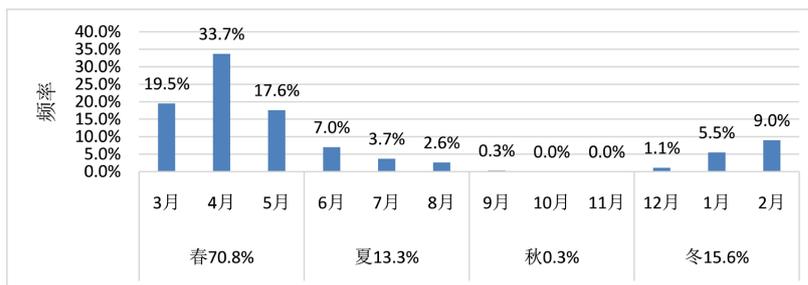


Figure 4. Monthly and seasonal frequency distribution of hail at Guiyang Airport
图 4. 贵阳机场冰雹月、季节发生频率分布

如图 4 所示,贵阳机场冰雹季节频率分布显示,春季冰雹最多,占全年总雹日的 70.8%,冬季次之达到 15.6%,而秋季冰雹发生最少,仅占 0.3%。冰雹月际频率分布显示,4 月冰雹发生频率最高,达到 33.7%,10 月至 11 月未发生冰雹天气。

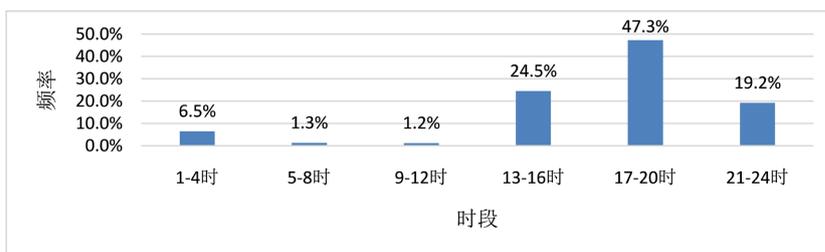


Figure 5. Frequency distribution of hail occurrence periods at Guiyang Airport
图 5. 贵阳机场冰雹发生时段频率分布

如图 5,从单日冰雹开始时刻频率分布可知,冰雹集中发生在一日的下午至前半夜,占 91%,其中 17~20 时冰雹发生频率最高,达到 47.3%,凌晨至上午发生频率最低尤其 5~8 时、9~12 时仅占 1%左右。

3.3. 贵阳机场雷暴大风的统计学分析



Figure 6. Statistics on interannual changes of thunderstorms and strong winds at Guiyang Airport from 2008 to 2021
图 6. 2008~2021 年贵阳机场雷暴大风年际变化统计

如图 6 所示, 2008~2021 年贵阳机场共统计出雷暴大风 25 天, 年平均接近 2 次, 且近几年雷暴大风发生的次数逐渐增加, 2016 年共计发生 5 次, 为 14 年中发生雷暴大风次数最多的年份。

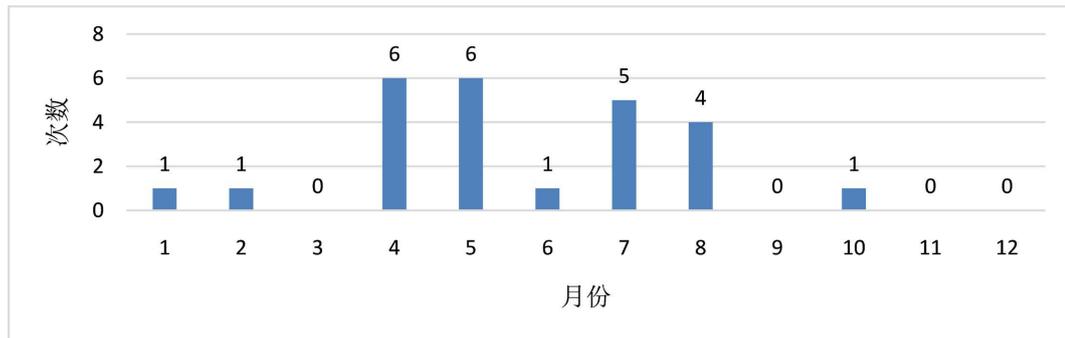


Figure 7. Statistics on monthly changes of thunderstorms and strong winds at Guiyang Airport from 2008 to 2021
图 7. 2008~2021 年贵阳机场雷暴大风月变化统计

如图 7 所示, 从 2008~2021 年贵阳机场雷暴大风月变化统计可知, 一年中的 4~5 月雷暴大风日数最多, 期间累计出现日数均为 6 天, 7~8 月次之, 3 月、9 月、11 月、12 月未出现雷暴大风。

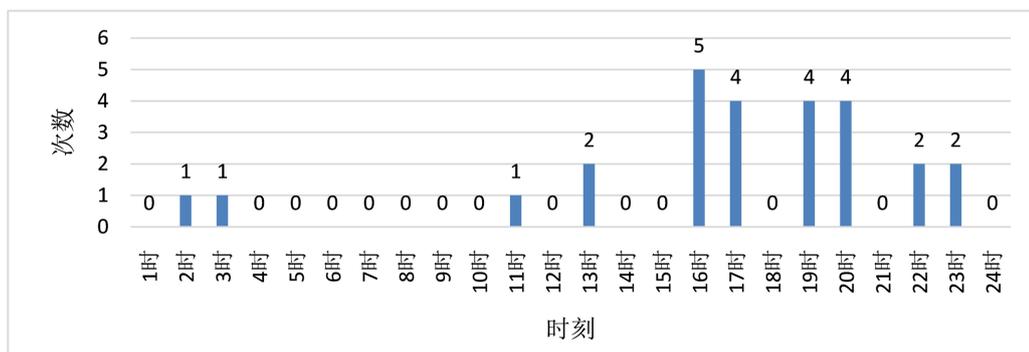


Figure 8. Statistics on daily changes of thunderstorms and strong winds at Guiyang Airport from 2008 to 2021
图 8. 2008~2021 年贵阳机场雷暴大风日变化统计

如图 8 所示, 从 2008~2021 年贵阳机场雷暴大风日变化统计可知, 雷暴大风出现时间有明显的日变化规律, 雷暴大风出现的最多时段是一日中的 16~20 时, 22~23 时次之, 4~10 时未出现雷暴大风。雷暴大风的极值发生在 2020 年 05 月 19 日与 2022 年 4 月 24 日, 最大瞬时风速均超过 32 米/秒。

4. 贵阳机场强对流天气的潜势预报统计分析

经对 2008~2021 年贵阳机场强对流天气分析个例统计分析, 统计了贵阳机场发生强对流天气的水汽、不稳定能量、风垂直切变及抬升条件的阈值, 具体如下。

4.1. 强对流天气的潜势预报——水汽阈值分析

4.1.1. 地面湿度方面(使用比湿 q), 以贵阳机场自动观测站数据, 统计结果如下:

当 $q < 8 \text{ g/kg}$ 时, 除非高架雷暴外, 一般不会出现雷暴及强对流天气, 可用于强对流天气预报消空;

当 $9 \leq q \leq 12 \text{ g/kg}$ 时, 除非高架雷暴外, 有可能出现普通对流, 如雷暴, 出现强对流天气概率较小;

当 $q \geq 13 \text{ g/kg}$, 较易强对流天气。

4.1.2. 湿层厚度方面(使用比湿厚度 H), 以 8 g/kg 作为干层与湿层分界线, 采用贵阳站探空及贵阳机场微波辐射计数据, 统计结果如下:

当 $H < 500$ 米时, 基本不能形成对流, 可用于对流天气消空;

当 $50 \text{ 米} \leq H \leq 2000$ 米时, 有利于形成强对流天气;

当 $H > 2000$ 米时, 不仅利于发生强对流天气, 亦有利于发生短时强降水或暴雨等灾害性天气。

4.2. 强对流天气的潜势预报——不稳定能量阈值分析

采用贵阳站探空及贵阳机场微波辐射计数据统计分析, 贵阳机场发生强对流天气时对流有效位能(CAPE)一般大于 1000 J/kg , 且对流抑制有效位能(CIN)一般小于 100 J/kg , 强天气威胁指数(SWEAT)大于 250, 抬升指数(LI)小于 -4, 特别是对于雷暴大风天气, 一般风暴强度指数(SS1)需要大于 120。另外, 考虑到不同能量指数均有其使用的局限性, 不能依赖其中一个指数应用, 需要结合实际情况综合应用才能更符合客观实际。

4.3. 强对流天气的潜势预报——垂直风切变阈值分析

采用贵阳站探空及贵阳机风廓线雷达数据统计分析, 贵阳机场发生强对流天气时需要风垂直切变(ΔV)达到以下阈值:

当 $\Delta V < 2 \text{ m/s/km}$ 时, 可发生强对流天气概率小;

当 $2 \text{ m/s/km} < \Delta V < 3 \text{ m/s/km}$ 时, 可发生强对流天气, 但概率较小概率小;

当 $\Delta V > 3 \text{ m/s/km}$ 时, 发生强对流天气概率大, 尤其是雷暴大风天气。

4.4. 强对流天气的潜势预报——抬升条件分析

对流天气一般由低层中尺度系统触发, 如锋面、干线、边界层辐合线、重力波、地形抬升以及中尺度对流系统产生的阵风锋等[3]。因贵阳机场上游的中西部地区海拔高度多在 1000 米以上, 对于贵州地区来说, 边界层抬升触发条件主要关注地面辐合线、露点锋及 850 hPa 切变线的位置及走向, 大致绝对强对流出生的落区, 而 500 hPa 和 700 hPa 高空槽更多的是引导对流云团移动, 除高架雷暴以外, 即可认为地面辐合线和 850 hPa 切变线过境后, 强对流天气大致也就基本过境了。

5. 贵阳机场强对流天气分类

根据热力学、动力学结构特征, 将贵阳机场强对流天气的形势背景分成低层暖平流强迫型、高空冷平流强迫型、斜压锋生型和高架雷暴型等 4 大类型。

5.1. 低层暖平流强迫型

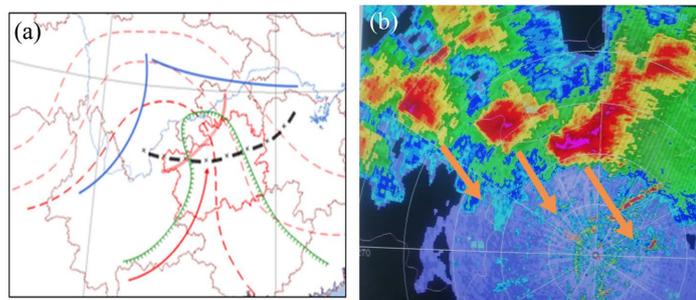


Figure 9. On April 24, 2022, at 20:00, the comprehensive map (a) and the radar combination reflectivity (b) of Guiyang Airport at 18:00

图 9. 2022 年 4 月 24 日 20 时综合图(a)与 18 时贵阳机场雷达组合反射率(b)

低层暖平流强迫型强对流天气一般发生在对流层中低层强烈发展的暖平流中，叠加边界层辐合线抬升触发，中低层强烈发展的暖平流对建立在位势不稳定起主导作用。如 2022 年 4 月 24 日贵阳机场夜间发生了一次强飊线过境天气过程，贵阳机场最大瞬时风达到 32.4 米/秒(图 9)。

5.2. 高空冷平流平流强迫型

高空冷平流平流强迫型强对流天气多发生在对流层中高层西北气流控制下，垂直方向的温度差动平流形成热力不稳定的位势层结，叠加边界层辐合线抬升触发，中高层的强烈发展的冷平流对建立在位势不稳定起主导作用。如 2020 年 5 月 19 日夜间贵阳机场发生了一次超单风暴过境过程，贵阳机场最大瞬时风达到 32 米/秒(图 10)。

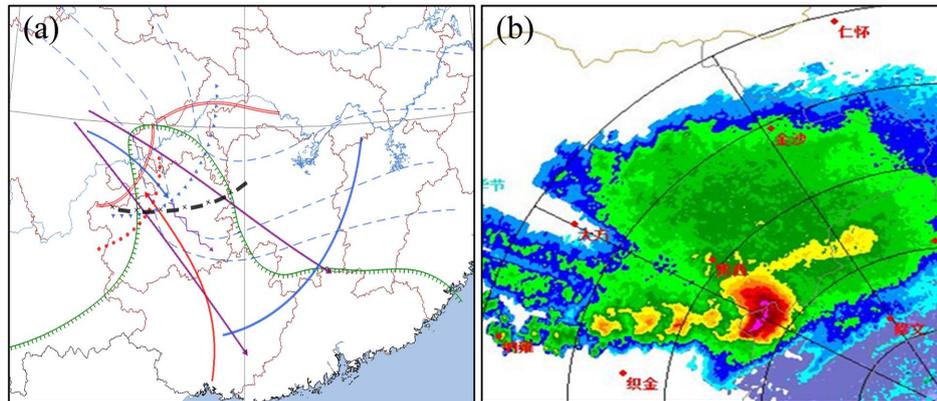


Figure 10. On May 19, 2019, at 20:00, the comprehensive map (a) and the combined radar reflectivity of Guiyang Airport at 20:00 (b)

图 10. 2020 年 5 月 19 日 20 时综合图(a)与 20 时贵阳机场雷达组合反射率(b)

5.3. 斜压锋生型

斜压锋生型强对流天气一般发生在对流层中低层冷暖空水平方向上强烈交汇区域，伴有明显的温度梯度，中低层配合有锋面抬升。如 2019 年 1 月 6 日下午贵阳机场发生了一次锋前飊线过境天气，贵阳机场最大瞬时风达到 32 米/秒(图 11)。

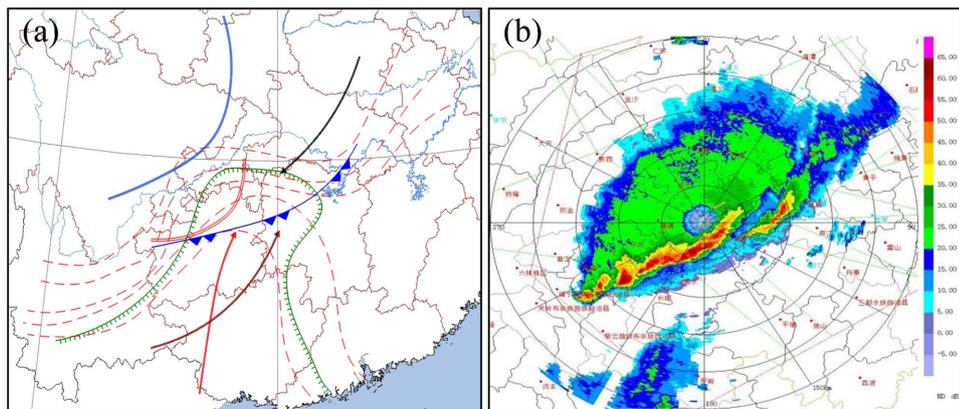


Figure 11. On January 6, 2019, at 08:00, the comprehensive map (a) and the radar combination reflectivity (b) of Guiyang Airport at 17:00

图 11. 2019 年 1 月 6 日 08 时综合图(a)与 17 时贵阳机场雷达组合反射率(b)

5.4. 准正压雷暴型

贵阳机场准正压类雷暴一般发生在 6~9 月的副高边缘, 大气层结冷暖平流均较弱, 局地受热不均匀起主导作用。如 2022 年 7 月 17 日下午至傍晚贵阳机场出现了弱至强雷雨天气过程(图 12)。

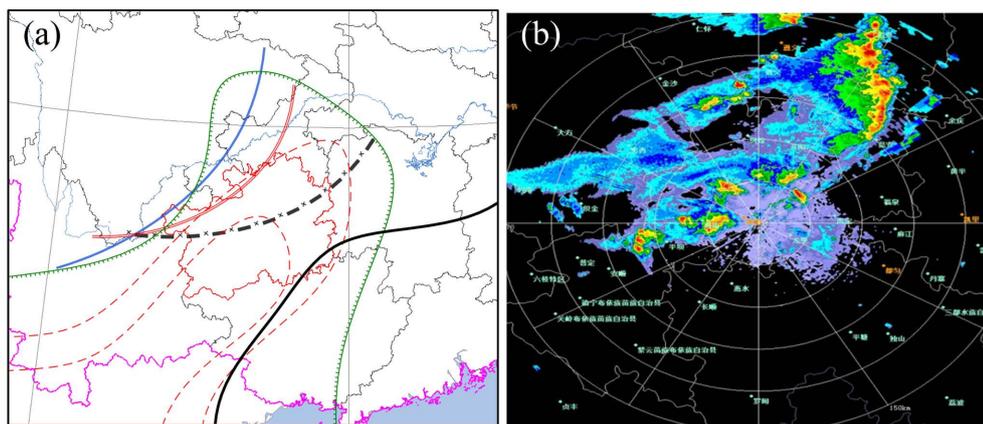


Figure 12. On January 4, 2022, at 20:00, the comprehensive map (a) and the combined radar reflectivity of Guiyang Airport at 20:00 (b)

图 12. 2022 年 1 月 4 日 08 时综合图(a)与 18 时贵阳机场雷达组合反射率(b)

5.5. 高架雷暴型

高架雷暴型强对流天气指发生在大气边界层之上的对流性天气, 多出现在夜间。高架对流一般从地面冷锋后冷空气垫之上触发, 700 hPa 与 850 hPa 有明显的逆温逆湿度且强烈的风垂直切变, 一般要达到 26 米/秒以上。如 2022 年 1 月 4 日傍晚至夜间贵阳机场发生了一次冰雹天气过程(图 13)。

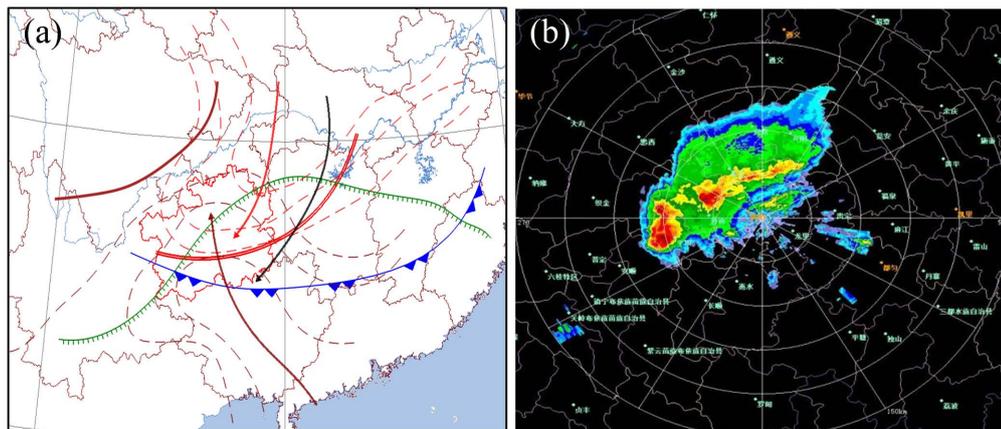


Figure 13. On January 24, 2020, at 20:00, the comprehensive map (a) and the combined radar reflectivity of Guiyang Airport at 20:00 (b)

图 13. 2020 年 1 月 24 日 20 时综合图(a)与 20 时贵阳机场雷达组合反射率(b)

6. 总结

(1) 分析 2008 年~2021 年共计 14 年贵阳机场气候志资料, 发现贵阳机场雷暴日数呈逐年增加趋势, 一年中的 5 月~8 月雷暴平均发生次数达到高峰, 而雷暴日变化高值区集中在的一的日 15~20 时。冰雹方面,

贵阳机场春季冰雹最多, 占全年总雹日的 70.8%, 其中 4 月冰雹发生频率最高, 达到 33.7%, 一日中冰雹集中发生在下午至前半夜, 占 91%, 其中 17~20 时冰雹发生频率最高, 达到 47.3%。雷暴大风也呈逐年增加趋势, 一年中主要集中在 4~5 月份, 一日中出现最多的时段为 16~20 时。

(2) 分析 2008 年~2021 年共计 14 年常规观测资料和贵阳机场天气雷达、风廓线雷达、微波辐射计等观测资料, 发现贵阳机场形成强对流天气的要素阈值为: 比湿 $> 12 \text{ g/kg}$ 且水汽厚度 > 500 米; 不稳定能量方面: 对流有效位能一般大于 1000 J/kg , 强天气威胁指数大于 250, 特别是对于雷暴大风天气, 一般风暴强度指数需要大于 120; 垂直风切变需要大于 2 m/s/km 。满足以上大气层结的基础上还需要边界层辐合线、干线等抬升触发才可能形成强对流天气。

(3) 根据热力学、动力学结构特征, 将贵阳机场强对流天气的形势背景分成低层暖平流强迫型、高空冷平流强迫型、斜压锋生型、高架雷暴型、准正压型等五大类型。这五种类型并非完全孤立, 有时候一次强对流天气过程可能出现几种雷暴类型同时出现情况, 甚至在形势发展过程中出现不同类型间雷暴演变情况, 但无论那种类型强对流天气总归均满足强对流天气发生所需的四个要素。

7. 展望

(1) 本文将贵阳机场强对流天气按照形势背景划分的五种, 虽然可已概括绝大多数强对流天气过程, 但仍存在无法解释一部分过程, 尤其是弱强迫抬升方面的对流天气这一方面还需要进一步深入研究。

(2) 本文主要从贵阳机场强对流天气的潜势预报方面做了相关研究工作, 但航空气象预报工作属于精细化领域, 后续还需将进一步在强对流天气的短时预报和临近预报方面开展深入研究。

参考文献

- [1] 葛玲玲, 师春香, 谷军霞, 等. 强对流实况分析关键技术与产品研制进展和展望[J]. 气象科技进展, 2023, 13(3): 14-21, 28. <https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-1973.2023.03.003>
- [2] 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.
- [3] 王秀明, 俞小鼎, 周小刚. 雷暴潜势预报中几个基本问题的讨论[J]. 气象, 2014(4): 389-399.
- [4] 郑永光, 陶祖钰, 俞小鼎. 强对流天气预报的一些基本问题[J]. 气象, 2017, 43(6): 641-652.
- [5] 费海燕, 王秀明, 周小刚, 等. 中国强雷暴大风的气候特征和环境参数分析[J]. 气象, 2016, 42(12): 1513-1521.
- [6] 杨秀庄, 彭芳, 汪超. 贵州中东部地区一次锋后强对流天气成因分析[J]. 贵州气象, 2010, 34(1): 8-12.
- [7] 杨春艳, 陈杨, 孟庆怡, 等. 黔西南一次中 β 尺度强对流天气分析[J]. 中低纬山地气象, 2021, 45(6): 1-8.
- [8] 周方媛. 分类强对流天气潜势预报技术研究[D]: [硕士学位论文]. 江苏: 南京信息工程大学, 2010.
- [9] 梁明珠, 向华, 盛琼. 强对流天气潜势预报研究[C]//中国气象学会天气学委员会, 中国气象学会水文气象学委员会, 国家气象中心, 水利部水文局. 第 26 届中国气象学会年会灾害天气事件的预警、预报及防灾减灾分会场论文集. 2009: 2357-2364.