

基于分钟降水数据的贵阳机场中等强度及以上的降水统计特征

罗浩¹, 刘烈霜², 杨凤婷¹

¹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

²中国民用航空西南地区空中交通管理局, 四川 成都

收稿日期: 2026年2月26日; 录用日期: 2026年5月6日; 发布日期: 2026年5月14日

摘要

利用贵阳机场近十年分钟级降水观测资料和ERA5再分析等资料, 统计分析中等强度及以上降水事件的分布特征与影响系统, 结果表明: (1) 近十年贵阳机场中雨和大雨频次及持续时间呈下降趋势, 极端强降水无显著变化; (2) 降水夏季最多、春季次之, 6月为峰值; (3) 日峰值位于夜间至早晨, 冬春季夜雨明显; 降水持续时间短, 76%的事件在20 min内结束; (4) 降水共分为四类: 局地对流型(副高影响, 多发于夏季午后)、对流型(原因复杂, 多发生于春夏季夜间, 多雷暴)、混合型(低涡/切变线主导, 持续时间较短, 多数无雷暴)及热带低压外围型(出现次数最少, 多发于夏季傍晚)。研究揭示了贵阳机场中等强度及以上降水持续时间短、多夜雨及系统分类明显的鲜明特征, 成果可为西南复杂地形下强降水短临预警与航空气象保障提供科学依据, 对深化山地机场强降水机理认识具有参考价值。

关键词

分钟雨量, 中等强度及以上降水, 贵阳机场

Statistical Characteristics of Moderate to Heavy Precipitation at Guiyang Airport Based on Minute Precipitation Data

Hao Luo¹, Lieshuang Liu², Fengting Yang¹

¹Guizhou Sub-Bureau of Southwest Regional Air Traffic Administration of Civil Aviation of China, Guiyang Guizhou

²Southwest Regional Air Traffic Administration of Civil Aviation of China, Chengdu Sichuan

Received: February 26, 2026; accepted: May 6, 2026; published: May 14, 2026

Abstract

Using minute-level precipitation observation data from Guiyang Airport over the past decade and ERA5 reanalysis data, this study statistically analyzed the distribution characteristics and influencing systems of moderate-to-heavy precipitation events. Results indicate that: (1) The frequency and duration of moderate and heavy rainfall at Guiyang Airport have shown a declining trend over the past decade, while extreme heavy precipitation events remain stable; (2) Precipitation peaks in summer, followed by spring, with June being the peak month; (3) Daily precipitation peaks occur between night and morning, with significant nighttime rainfall in winter and spring; the precipitation duration was short, with 76% of events ending within 20 minutes; (4) Precipitation events are categorized into four types: local convective (affected by subtropical high, mostly occurring in summer afternoons), convective (complex causes, predominantly thunderstorms in spring/summer nights), mixed (dominated by low vortex/shelf line, short duration, mostly non-thunderstorm events), and tropical low-pressure peripheral (rarest occurrence, mostly in summer evenings). The research reveals distinct characteristics of Guiyang Airport's precipitation events, including short duration, frequent nighttime rainfall, and clear system classification. These findings provide scientific basis for short-term heavy precipitation warnings and aviation meteorological support in southwestern China's complex terrain, while offering valuable insights into understanding heavy precipitation mechanisms in mountainous airport environments.

Keywords

Minute Precipitation, Moderate to Heavy Precipitation, Guiyang Airport

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

降水,尤其是短时强降水与极端强降水天气,常引发洪涝、城市内涝、山洪及地质灾害,不仅造成重大经济损失,也严重威胁人民群众出行安全。在航空运营中,持续性的低强度降水即使累积雨量较大,对航班起降的影响往往有限;然而短小时内出现的中等强度及以上降水,极易导致能见度急剧下降、跑道积水和湿滑等现象,对飞机起降构成显著威胁。目前,针对机场区域内分钟尺度降水的强度特征及其对航空运行影响的研究仍较为缺乏,因此,深入分析短时强降水的精细化特征具有重要的现实意义。

近年来,围绕强降水尤其是极端降水事件,学界已开展了广泛研究。全国尺度上,杨金虎等[1]指出长江以南地区极端降水发生概率最高;陈炯等[2]揭示中国暖季短时强降水呈单峰型分布,与夏季风活动密切相关,并于4~7月达到峰值;钟军[3]的研究表明1961~2000年中国降水在时空分布上趋于极端化,其他一些学者也分别从不同角度对各区域短时强降水进行了研究分析[4]-[8]。在区域层面,针对地形复杂的贵州省,多位学者开展了深入分析:肖蕾等[9]指出省内短时强降水呈现南多北少的空间格局;吴兴洋等[10]发现贵州强降雨主要集中在5~8月,6月为峰值;周明飞等[11]验证了比湿与暴雨量级的一致性;王君军等[12]则强调低涡切变是贵阳地区短时强降水的主要天气系统,其他一些学者也对贵阳市短时强降水天气进行了多视角和不同尺度的详细分析[13]-[16]。

随着高密度自动气象站的部署和资料质控水平的提升,基于分钟降水数据的研究逐渐增多,为强降水过程的精细化分析提供了新途径。战云捷等[17]指出2005~2019年中国夏季分钟降水频率呈增加趋势;

段丽杰等[18]对长沙场次降水的分析表明主要降水过程持续时间多在 20 min 以内；林晓萌等[19]证实高分辨率大气可降水量资料有助于短临降水预报；冷亮等[20]则强调基于区域站分钟雨量进行滑动累计分析对识别短时强降水具有重要意义；其他一些学者对全国各地分钟降水数据的应用也做出了大量的研究[21]-[25]。然而，既有研究多集中于降水气候特征、机制诊断和预报技术，针对航空高影响天气——特别是机场区域内分钟级中等强度以上降水事件的统计分析仍显不足。

在此背景下，本文基于贵阳机场近 10 a 高分辨率分钟降雨观测数据，重点分析中等强度及以上降水事件的时空分布和变化特征，探究贵阳机场中等强度以上降水的发生频次、强度分布、持续时间和集中时段的统计规律，研究成果旨在为民航运行部门开展短时强降水高影响天气的精细化监测、预警和运行决策提供数据支撑与科学依据。本研究的创新点在于：首次利用分钟级降水数据揭示贵阳机场中等强度以上降水的精细统计特征，弥补了该区域航空针对性降水分析的研究空白，为机场强降水临近预报和运行响应提供了新的视角和参考。

2. 资料和方法

2.1. 资料

本文所选用的资料包括：(1) 贵阳机场 2014~2023 年自动观测系统(AWOS)逐分钟观测数据；(2) 贵阳机场 2014~2023 年地面观测簿每日纪要栏数据；(3) 贵阳国家基准站 08 时和 20 时探空资料(站号：57816，经纬度为 106.65°E、26.48°N，海拔高度 1222 m)；(4) ERA5 逐小时高空再分析数据(0.25° × 0.25°)；(5) ERA5 逐小时地面 Land 再分析数据(0.1° × 0.1°)；(6) 地面及高空常规观测数据；(7) 贵阳机场双偏振多普勒雷达数据，贵阳机场风廓线雷达数据，贵阳机场微波辐射计数据。本文所涉及的时间均采用北京时间。

2.2. 方法

在航空飞行中，飞机在起降过程中更关注瞬时降水量，民航气象中降水强度分为三级[26] (弱，中，强)，主要通过人工观测雨滴下降状态、雨声及地面水洼和水潭形成的快慢来判定，业内对通过自观判定中或大降水阈值已有相关研究[27]，结果表明可将 0.2 mm/min 作为客观判定小与中(或大)等强度降水的阈值，通过对比贵阳机场人工观测与 AWOS 分钟级雨量探测数据，本文采取同样阈值。

贵阳机场基准点雨量计安装在 19R 跑道入口处，即跑道北头，相较于人工观测的降雨强度，分钟降雨量更能精确反映跑道端实时降水情况，本文在统计降水数据时通过 AWOS 分钟降雨数据将雨强大小细分为三个等级：中雨：分钟降雨量大于等于 0.2 mm；大雨：分钟降雨量大于等于 0.4 mm，极端强降雨：分钟降雨量大于等于 0.8 mm，另外为了获得连续性较好的有效样本，以上三个等级的降水数据，均必须满足持续时间大于等于 5 min 的设定，此即本文所定义的中等强度及以上的降水(后同)，另外，中雨样本包含了中雨、大雨及极端强降雨，大雨样本包含了极端强降雨。此设定的根据在于，贵阳机场全年日平均起降航班量 400 架次以上，起降时间通常为 07:00~次日 01:00 共 18 hr，平均每小时起降 22 架次，即平均 2~3 min 就要起降一架次航班，因此只要出现连续 5 min 及以上的中等强度及以上的降水，就可能会对航班的正常起降造成影响。

为了研究贵阳机场中等强度及以上降水出现的频次变化，将间隔时间小于 10 min 的降水事件进行合并，此设定的根据在于，民用航空气象地面观测规范指出，当中等强度及以上的降水现象结束时，观测员需要在接下来的 10 min 内不再观测到中等强度及以上的降水才能发布特殊观测报解除中等强度及以上的降水事件。

根据降水性质的不同，本文将中等强度及以上的降水事件分为局地对流型、对流型、混合型以及热

带低压外围型,分型将参照天气形势、对流指数、多普勒雷达等资料进行人工判定,具体判定方法如下:

对挑出的所有案例进行天气形势普查,对 500 hPa、700 hPa、850 hPa 及地面系统进行人工系统判定,判定系统包括热带低压系统、高空槽、切变线、低涡、急流、辐合线等,逐一对应到每个案例。

普查每一个案例发生当天的对流指数,包括沙氏指数、K 指数、CAPE 指数等。

普查每一个案例发生时的多普勒天气雷达图,根据雷达回波的形态进行初分,将对流性降水和非对流性降水进行划分,在对流降水中,根据回波分布的形态和天气形势的判定以及对流指数综合判定,挑选出局地对流型(回波呈多点散发,生消时间较短,无明显天气系统,对流指数显示不稳定能量较强等特点),并对其余对流型进行主导天气系统标识,在非对流降水中,根据雷达回波形态(回波范围、强度大小、零度层亮带等)划分出混合型降水和普通层状云降水,并对混合型降水进行主导天气系统标识。

3. 中等强度及以上的降水分布特征

3.1. 年变化

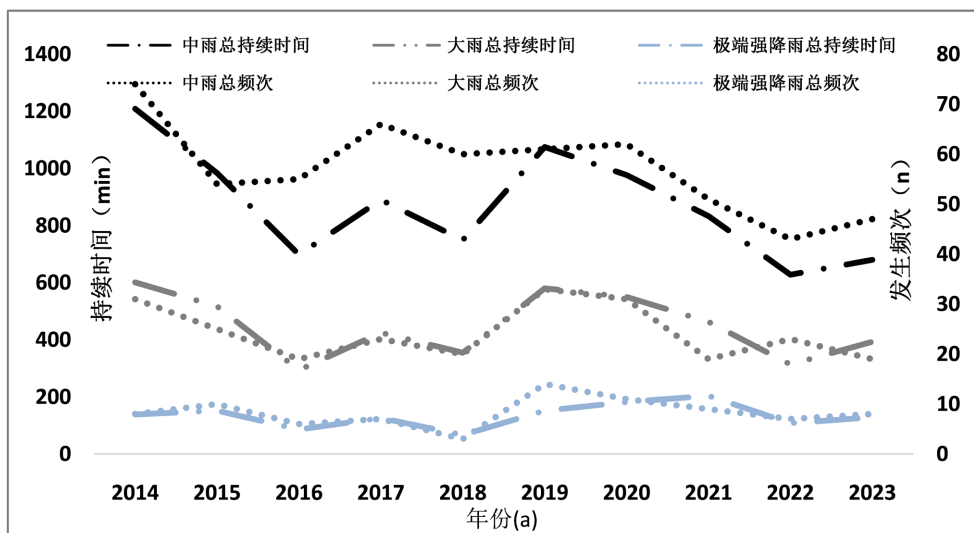


Figure 1. Annual variation of frequency and duration of moderate to heavy precipitation in Guiyang Airport from 2014 to 2023

图 1. 2014 年~2023 年贵阳机场中等强度及以上降水频次及持续时间年变化

如图 1 所示,2014 至 2023 年,贵阳机场中雨平均每年出现 872.3 min,中位数为 861.5 min,出现最多的年份为 2014 年,共计 1209 min,最少的年份为 2022 年,628 min;大雨平均每年出现 449.2 min,中位数 444 min,出现最多的年份为 2014 年,601 min,最少的年份为 2016 年,294 min;极端强降雨平均每年出现 134.5 min,中位数为 134 min,出现最多的年份为 2021 年,204 min,最少的年份为 2018 年,67 min。除了总持续时间以外,贵阳机场中雨频次从 2014 年至 2023 年,平均每年 57.3 次,中位数 57.5,大雨平均每年 24.3 次,中位数 23,极端强降雨平均每年 8.3 次,中位数为 8,在 2019 年出现了一次极值(14 次);从变化趋势来看,中雨及大雨在过去十年呈现出下降趋势,极端强降雨则变化不明显。整体来看,贵阳机场近 10 a 中雨和大雨的发生总频次和持续时间呈现出下降趋势,而极端强降雨则没有显著变化。

3.2. 月变化和日变化

图 2 显示了 2014~2023 年贵阳机场中等强度及以上降水出现频率的日变化和月变化以及日月变化二维图,由图可见,除了 12 月没有中等强度及以上降水外,11 月、1~5 月中等强度及以上降水事件集中在

20 时至 04 时的夜晨时段, 6 月存在两个主要时段, 17~22 夜间时段以及 00~06 凌晨时段, 夏季 7~8 月日变化并不十分显著, 有两个小峰值, 15~21 下午至夜间时段以及 01~05 时段, 9 月降水的日变化不显著, 10 月峰值主要集中在 04~11 时的早晨时段, 次峰值出现在 17~21 时的傍晚至夜间时段。可见对于贵阳机场而言, 冬春季中等强度及以上降水主要发生在夜间至早晨, 夜雨现象比较明显, 而夏秋季, 特别是 7~10 月这四个月, 降水的日变化并不十分显著。

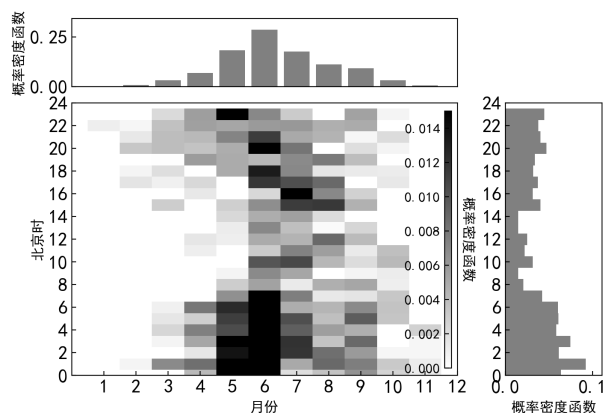


Figure 2. 2D probability distribution of daily/monthly variation of precipitation probability at Guiyang Airport with moderate to heavy precipitation from 2014 to 2023

图 2. 2014 年~2023 年贵阳机场中等强度及以上降水出现概率的日/月变化二维图

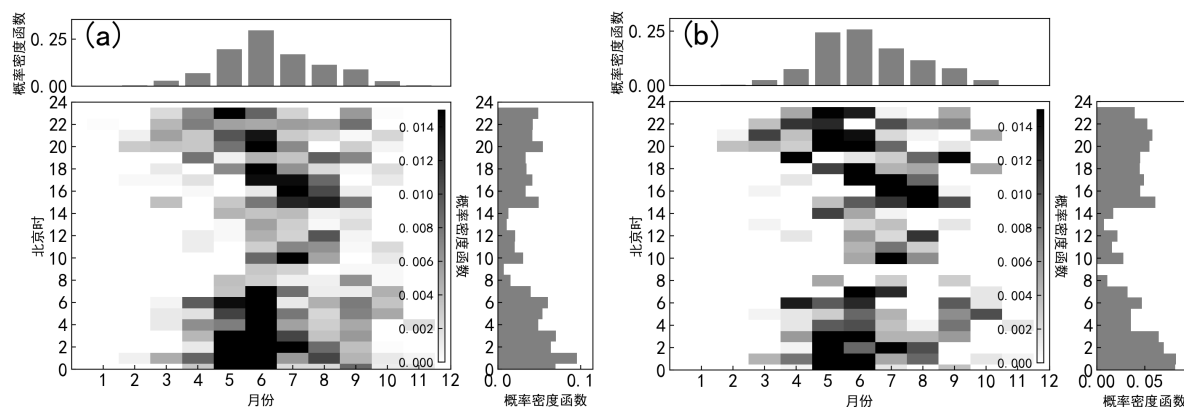


Figure 3. 2D probability distribution of daily/monthly variation of precipitation probability at Guiyang Airport with heavy rainfall and extreme heavy rainfall from 2014 to 2023: (a) Heavy rainfall; (b) Extreme heavy rainfall

图 3. 2014 年~2023 年贵阳机场大雨和极端强降雨出现概率的日/月变化二维图。(a) 大雨; (b) 极端强降雨

图 3 给出了大雨和极端强降雨出现频率的日变化和月变化以及日月变化二维图, 由图可见, 大雨的分布特征与中雨基本一致, 但 7~8 月在下午至傍晚时段(14~18 时)的降雨概率明显增大; 极端强降雨除了前文提到的 5 月与 6 月出现极端强降雨的概率基本相同以外, 在集中时段上体现出了日变化更明显的特征, 尤其是在 5~8 月傍晚至夜间时段的概率显著增大, 凌晨时段的峰值区间有所收窄, 主要集中在 00~03 时。

3.3. 分段统计

如前所述, 将间隔时间小于 10 分钟的降水事件进行合并后得到过去十年贵阳机场各类型降水分段持续时间和累计雨量, 表 1 给出了中等强度及以上降水在不同持续时间分段上的统计频次, 除了前文提到的超过一半的中等强度及以上降水均在 10 min 以内出现的情况, 如果将持续时间累加到 20 min, 其比率

为 76%，如果推延到 30 min，比率将上升到 95%，意味着 95%左右的中等强度及以上降水事件单次持续时间均不会超过 30 min，这样的客观指标对机场气象台发布天气预警可以提供重要参考意义。

Table 1. Duration of different intensity precipitation in Guiyang Airport from 2014 to 2023

表 1. 2014~2023 年贵阳机场不同强度降雨持续时间分段统计

持续时间(min)	中雨(频次)	大雨(频次)	极端强降雨(频次)
[5~10)	271	132	51
[10~20)	163	71	26
[20, 30)	76	20	5
[30, 60)	51	18	1
[60~)	12	2	0

4. 降水分型及特征

为了给机场气象台提供更为精细化的中等强度及以上降水的预警阈值，根据降水性质的不同，将贵阳机场近 10 a 共计 573 频次的中等强度及以上降水事件进行类型判别(大雨和极端强降雨的类型判别将包含在其中)如表 2 所示，共分为四类：局地对流型共计发生 68 次、对流型发生 396 次、混合型 84 次，热带低压外围型 25 次(由于热带低压外围气流既可导致较大范围的对流降水，也可导致局地性较强的对流降水，因此单独分类)。

Table 2. Duration of all types of moderate to heavy precipitation at Guiyang Airport from 2014 to 2023

表 2. 2014~2023 年贵阳机场各类型中等强度及以上降水持续时间分段统计

持续时间(min)	局地对流型(频次)	对流型(频次)	混合型(频次)	热带低压外围型(频次)
[5~10)	45	165	47	14
[10~20)	20	115	21	7
[20, 30)	3	62	9	2
[30, 60)	0	42	7	2
[60~)	0	12	0	0
累计频次	68	396	84	25

4.1. 局地对流型

贵阳机场局地对流型中等强度及以上降水共发生 68 次，有 23 次伴有雷暴，45 次不伴雷暴；有 43 次为副高背景下的局地对流事件，占比 63.2%，这是造成贵阳机场局地对流型中等强度及以上降水事件的主因，大部分局地对流型中等强度及以上降水事件没有明显中小尺度影响系统，中层 700 hPa 多为偏西南气流到急流(48 次)，占比 71%，仅有 11 次有边界层辐合线(本文所指边界层为 850 hPa 至地面，后同)存在，占比 16%。

如图 4(b)所示，贵阳机场局地对流型中等强度及以上降水事件在月分布上呈单峰型，主要集中在 6~8 月(即夏季)，7 月最多，在所有月份中出现概率达到了 29%，8 月次之，秋季多于春季，11 月至 2 月无局地对流型事件发生；另外，局地对流型事件日变化特征显著，降水事件主要集中在午后至傍晚时段(12~19 时)，累计概率为 69%，峰值为 17 时。

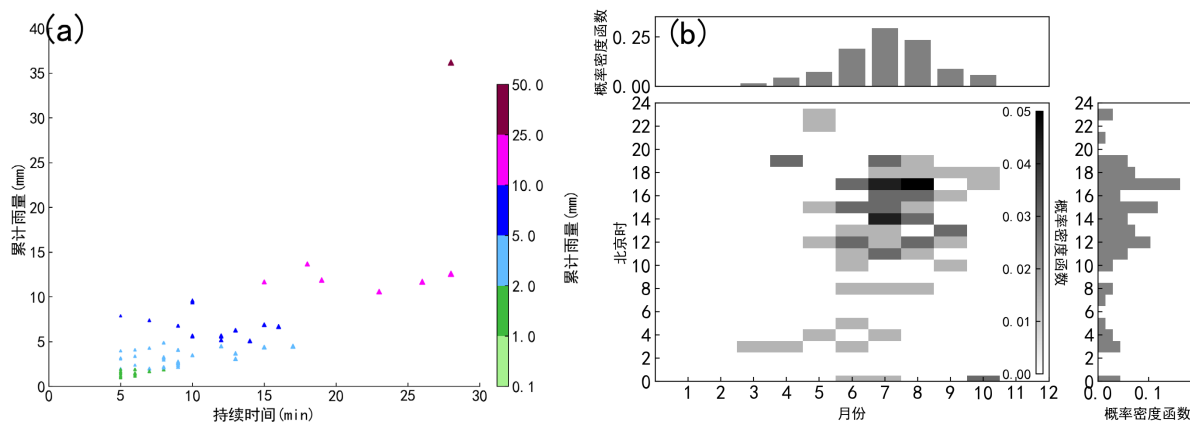


Figure 4. Local convective type of moderate to heavy precipitation at Guiyang Airport from 2014 to 2023. (a) Scatter plots of duration and cumulative rainfall; (b) 2D probability distribution of daily/monthly variations

图 4. 2014 年~2023 年贵阳机场局地对流型中等强度及以上降水事件。(a) 分段持续时间和累计雨量散点图; (b) 出现概率的日/月变化二维图

4.2. 对流型

贵阳机场对流型中等强度及以上降水事件共发生 396 次, 如图 5 所示, 对流型中等强度及以上降水事件的月分布同样呈单峰型, 主要集中在 5-7 月, 峰值为 6 月, 在所有月份中概率最大, 达到了 27.8%, 5 月同样有 20.7%, 7 月为 17.9%, 这三个月累计概率为 66.4%, 全年仅有 12 月没有出现过对流型中等强度及以上的降水事件; 日变化方面则呈现出了 17~23 时和 00~06 时的两个高峰区间, 00~06 时为最大降水时段, 累计概率为 48.2%, 17~23 时为 31.1%, 这两个区间实际上也可以看作连续的降水区间, 累计概率为 79.3%, 可见贵阳机场对流型中等强度及以上降水主要为夜雨, 在所有事件中, 共有 289 次伴有雷暴, 占比 73%, 107 次不伴有雷暴, 占比 27%。

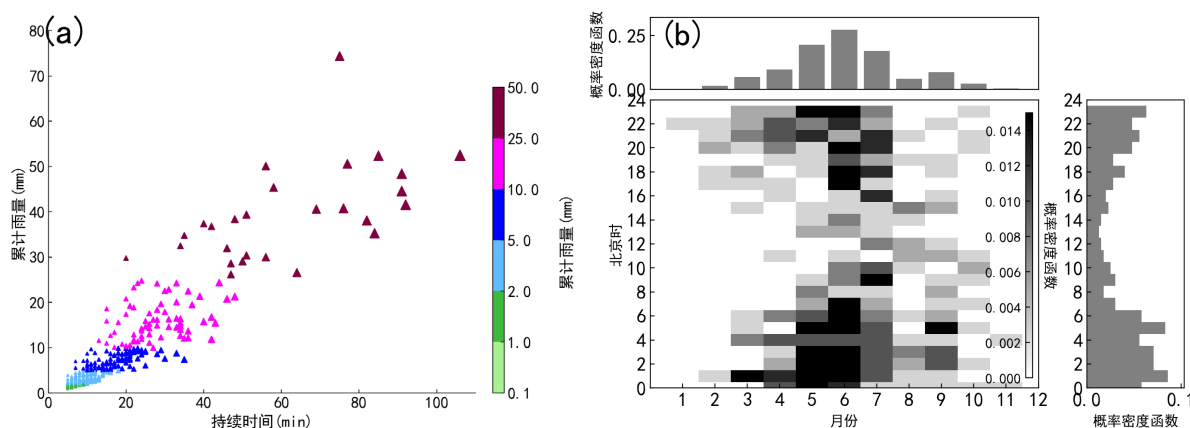


Figure 5. Convective type of moderate to heavy precipitation at Guiyang Airport from 2014 to 2023. (a) Scatter plots of duration and cumulative rainfall; (b) 2D probability distribution of daily/monthly variations

图 5. 2014 年~2023 年贵阳机场对流型中等强度及以上降水事件。(a) 分段持续时间和累计雨量散点图, (b) 出现概率的日/月变化二维图

将存在地面锋面系统的贵阳机场对流型中等强度及以上降水事件单独挑选出来, 共 52 次, 占比 13.1%; 当无锋面系统时, 存在 500 hPa 高空槽或高空低涡活动(与副高可同时出现)的共 200 次, 占比 50.5%, 无高空槽活动, 但有副高作为环流背景场的共 88 次, 占比 22.2%, 另有 56 次 500 hPa 无明显背

景系统,以纬向偏西环流为主,占比 14.1%;无锋面系统时的中小尺度影响系统方面,700 hPa 有切变线的共 119 次,占比 30.1%,700 hPa 有低涡的共 77 次,占比 19.4%,700 hPa 无明显影响系统,边界层存在辐合线的共 103 次,占比 26%,另有 45 次无明显中小尺度影响系统(其中 18 次 500 hPa 有高空槽活动,14 次有副高作为背景场),占比 11.4%;由此可见造成贵阳机场对流型中等强度及以上降水事件的原因多样,但主要以副高或高空槽背景下的切变低涡和锋面系统为主。

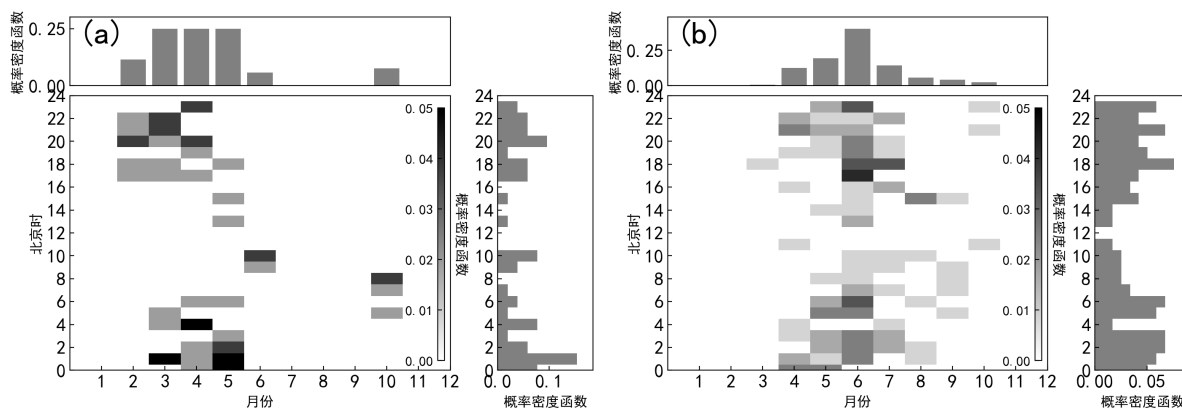
如表 3 所示,根据中小尺度影响系统的不同,将贵阳机场对流型中等强度及以上降水事件分为五类:锋面型共 52 次,切变型共 119 次,单次持续 10 min 以内的 36 次,10~20 分钟的 43 次,20~30 min 的 20 次,30~60 min 的 16 次,累计占比 96.6%;低涡型共 77 次,边界层辐合线型 45 次,弱形势场型 24 次。在排除极端案例的情况下,贵阳机场对流型中等强度及以上降水事件的锋面型和弱形势场型单次持续时间基本不会超过 30 min,切变型、低涡型以及边界层辐合线型则基本不超过 60 min,这意味着,当对流型中等强度以上降水持续时间达到了各分型阈值高值以后,就会有至少 10 min 的间歇时间;另外,锋面型降水有 40 次伴有雷暴,12 次不伴雷暴;切变型 95 次伴有雷暴,24 次不伴雷暴;低涡型 57 次伴有雷暴,20 次不伴雷暴;边界层辐合线型 73 次伴有雷暴,30 次不伴雷暴;弱形势场型 24 次伴有雷暴,21 次不伴雷暴,除了弱形势场型较低以外,其余几种类型同时伴有雷暴的概率均在 70%~80%。

Table 3. Duration of moderate to heavy precipitation at Guiyang Airport under different mesoscale and small-scale influencing systems from 2014 to 2023

表 3. 2014~2023 年贵阳机场不同中小尺度影响系统下对流型中等强度及以上降水持续时间分段统计

持续时间(min)	锋面型(频次)	切变型(频次)	低涡型(频次)	边界层辐合线型(频次)	弱形势场型(频次)
[5~10)	22	36	38	45	24
[10~20)	18	43	19	24	11
[20, 30)	8	20	12	16	6
[30, 60)	3	16	5	15	3
[60~)	1	4	3	3	1
累计频次	52	119	77	103	45

图 6 为贵阳机场不同中小尺度影响系统下对流型中等强度及以上降水事件的日月变化二维图,由图可见,锋面型主要发生春季 3~5 月的夜晨时段(20 时~02 时);切变型主要发生在 4~7 月,峰值 6 月,时段同样在夜晨,不过跨度更大,从 18 时至 06 时;低涡型主要发生在 6~7 月,时段集中在 22 时至 05 时;边界层辐合线型主要发生在 5~6 月,时段集中在 23 时~06 时;弱形势场型主要发生在 5~8 月,时段集中在 22~02 时。



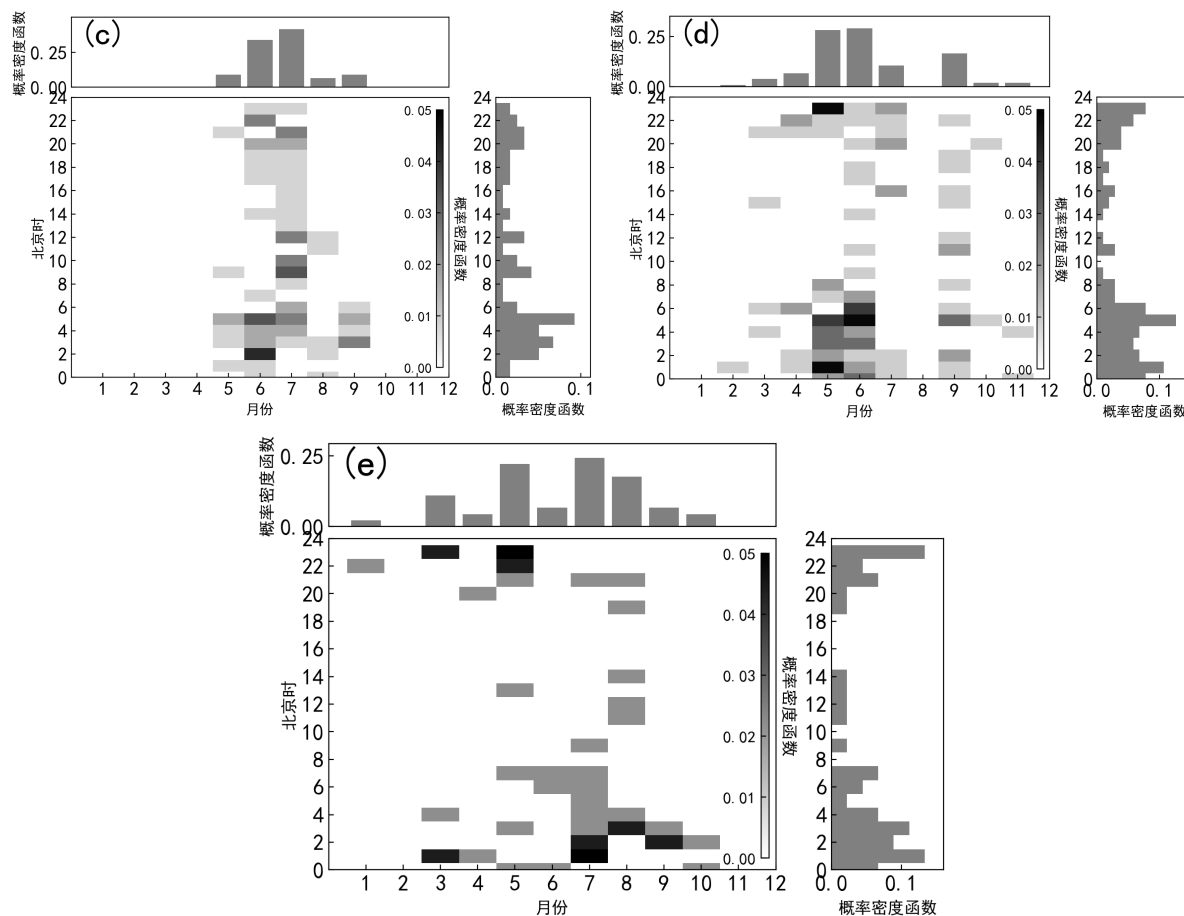


Figure 6. 2D probability distribution of daily/monthly variations of convective type days/months of moderate to heavy precipitation at Guiyang Airport under different mesoscale and small-scale influence systems from 2014 to 2023. (a) Frontal type; (b) Shear type; (c) Low vortex type; (d) Boundary layer convergence line type; (e) Weak baroclinic field type

图 6. 2014 年~2023 年贵阳机场不同中小尺度影响系统下对流型中等强度及以上降水日/月变化二维图。(a) 锋面型; (b) 切变型; (c) 低涡型; (d) 边界层辐合线型 (e): 弱形势场型

4.3. 混合型

本文定义混合型降水, 主要参考多普勒雷达反射率因子图, 其表现特征多为大范围长时间降水, 除局部对流降水以外, 整体反射率因子在 35 dBz 以下, 部分事件可探测到零度层亮带, 贵阳机场混合型中等强度及以上降水事件过去十年共发生 84 次, 其中有 47 次单次持续时间在 10 min 以内, 占比 56%, 10~20 分钟的 21 次, 占比 25%, 20~30 min 的 9 次, 30 min 以内共计 77 次, 累计占比 91.7%; 84 次混合型降水事件中, 仅有 8 次伴有雷暴, 另有 76 次不伴雷暴, 占比 90.5%; 如图 7 所示, 混合型降水事件在月分布上除 6 月峰值特别明显以外(6 月出现概率为 27%), 4~5 月, 7~11 月差别不大, 日变化方面则主要集中在凌晨 2 点至早上 8 点期间出现, 下午至前半夜出现次数较少。

环流背景方面, 84 次混合型降水事件中, 有锋面过境的共计 8 次, 有副高作为背景场的有 23 次, 占比 27.4%, 有高空槽或高空低涡存在的有 51 次, 占比 60.7%; 中小尺度影响系统方面, 有 700 hPa 低涡影响的共计 28 次, 占比 33.3%, 有 700 hPa 切变线存在的共计 28 次, 占比 33.3%, 另外 28 次中有 15 次存在边界层辐合线, 有 13 次无明显中小尺度系统影响(其中 9 次存在高空槽活动或以副高作为背景场); 可见对于贵阳机场而言, 混合型降水事件的成因虽然多样, 但仍然以切变和低涡为主要原因。

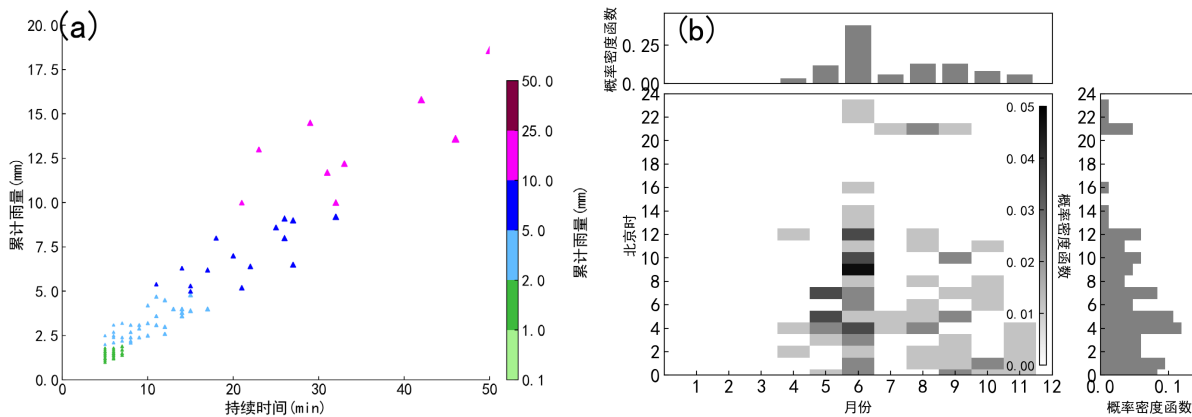


Figure 7. Mixed type of moderate to heavy precipitation at Guiyang Airport from 2014 to 2023. (a) Scatter plots of duration and cumulative rainfall; (b) 2D probability distribution of daily/monthly variations
图 7. 2014 年~2023 年贵阳机场混合型中等强度及以上降水事件。(a) 分段持续时间和累计雨量散点图; (b) 出现概率的日/月变化二维图

4.4. 热带低压外围型

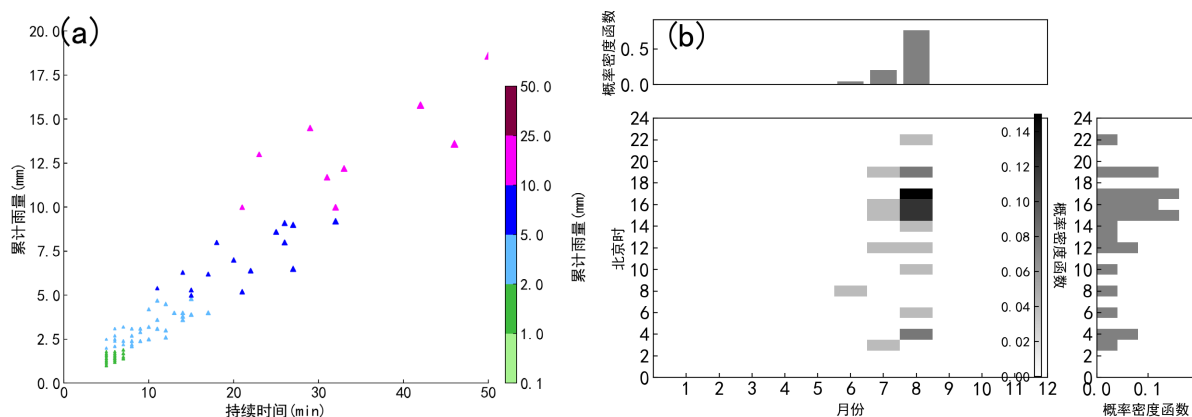


Figure 8. Peripheral tropical depression type of moderate to heavy precipitation at Guiyang Airport from 2014 to 2023. (a) Scatter plots of duration and cumulative rainfall, (b) 2D probability distribution of daily/monthly variations
图 8. 2014 年~2023 年贵阳机场热带低压外围型中等强度及以上降水事件。(a) 分段持续时间和累计雨量散点图, (b) 出现概率的日/月变化二维图

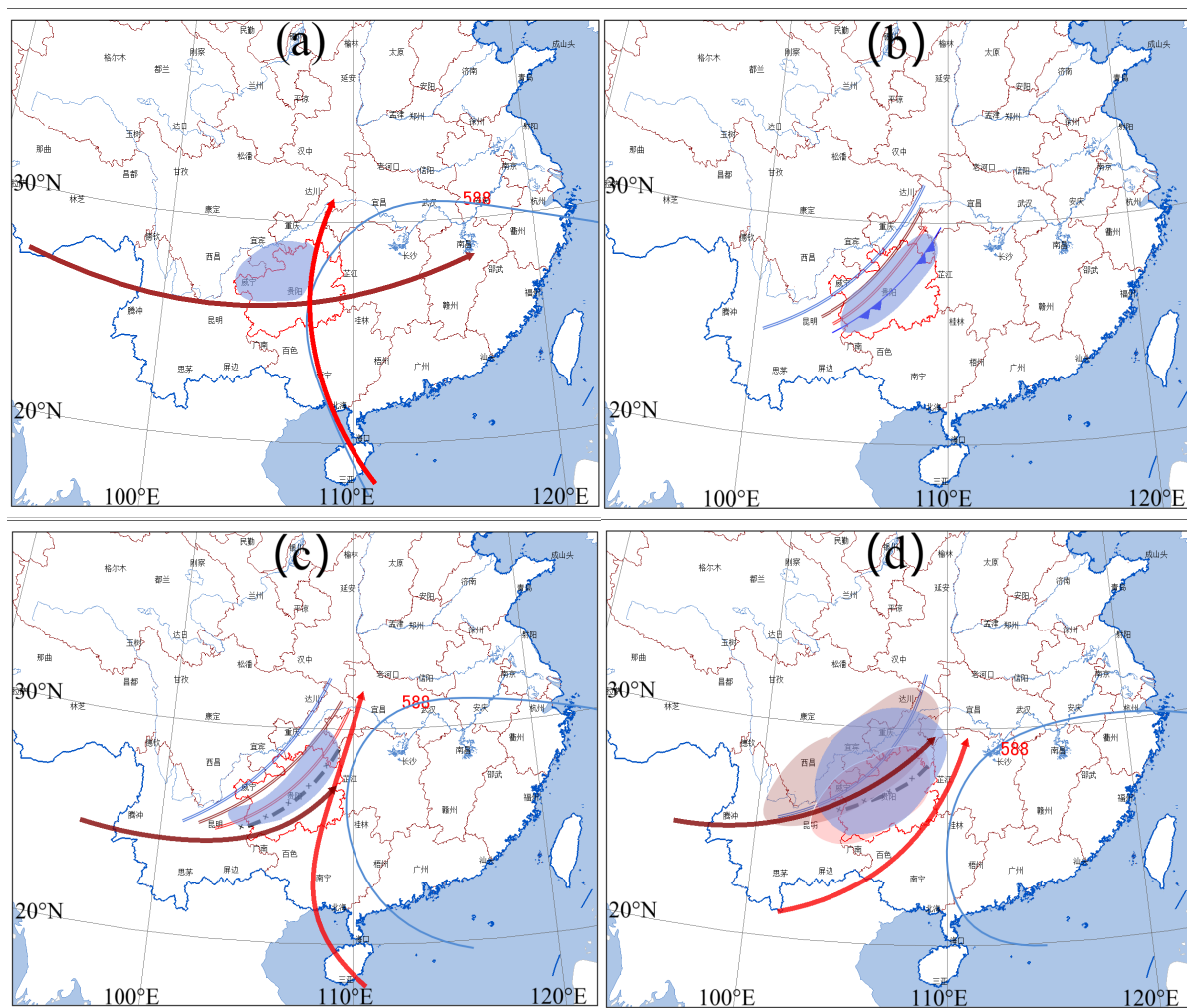
热带低压外围型包含了登陆台风减弱型和热带低压型，这两种系统虽然不会直接影响贵阳机场，但其外围气流仍会导致贵阳机场出现中等强度及以上降水事件，过去十年共有 25 次热带低压外围型降水事件发生，有 16 次伴有雷暴，9 次不伴雷暴，单次持续 10 min 以内的共 14 次，10~20 min 的有 7 次，20~30 min 的 2 次，30~60 min 的有 2 次；如图 8 所示，热带低压外围型主要发生在 7~8 月，8 月最多，概率达到了 76%，与局地对流型一样，其主要发生时段集中在 12~19 时，累计概率达到了 68%；由此可见贵阳机场热带低压外围型中等强度及以上降水事件的特征与局地对流型一致，可采取同样的短临预警措施。

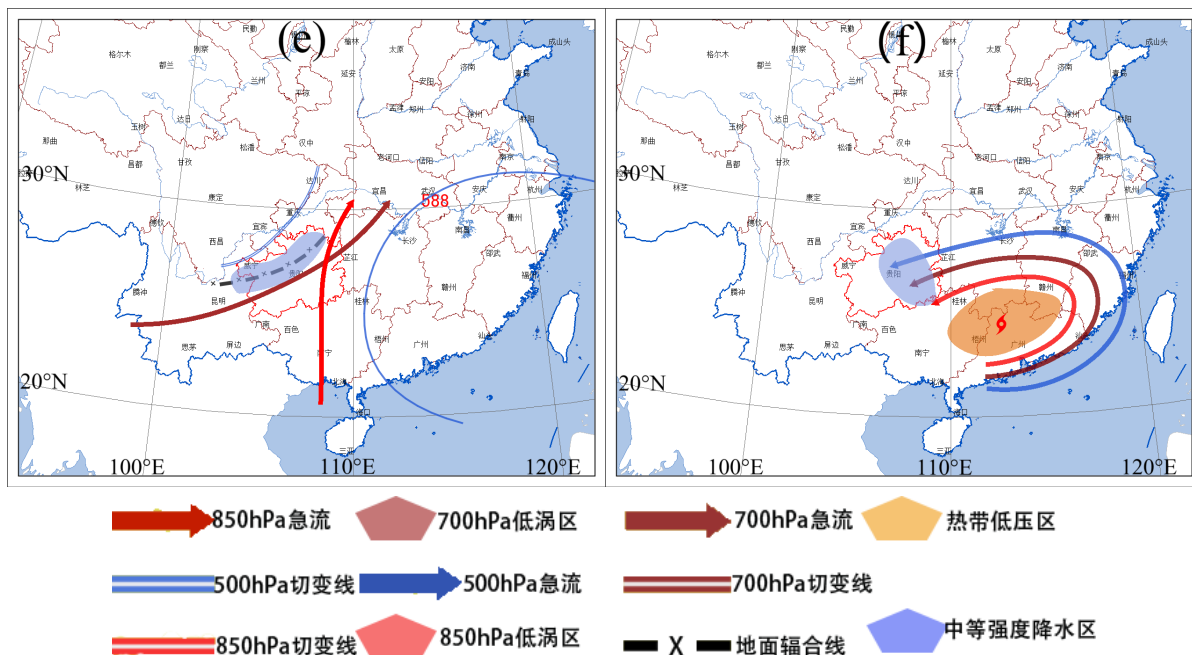
4.5. 天气学概念模型

如前所述，本文将贵阳机场中等强度及以上的降水类型共分为四类：局地对流型、对流型、混合型及热带低压外围型，在建构天气学模型时，局地对流型和热带低压外围型由于主导天气系统较为单一，因此单独分类，而对流型和混合型降水的成因复杂，根据其主导天气系统细分为锋面型、切变型、低涡

型和边界层辐合线型四类，因此本文所构贵阳机场中等强度及以上降水天气学模型共分为六类(图 9)。

根据统计，贵阳机场局地对流型中等强度及以上降水共发生 68 次，其中有 43 次为副高背景下的局地对流事件，占比为 63.2%，因此可判定副高环流背景下的热力性对流天气为贵阳机场局地对流型的主导天气，其天气概念模型如图 9(a)所示，副高 588 西脊线通常达到 110°E 以西，700 hPa 为偏西南气流或急流，850 hPa 为偏南气流或急流，在贵阳市中北部地区偶有地面辐合线存在(非必要条件)，在此种形势下，贵阳机场处于高温高湿的环境气流下，不稳定能量很强，极易在午后至傍晚出现热力性对流天气；根据前文统计(表 3)，造成贵阳机场对流性中等强度及以上降水天气的主因主要为锋面型、副高或高空槽背景下的低涡型或切变型(图 9(b)、图 9(c)、图 9(d))，这三种形势下的降水事件累计概率达到了 62.6%，其中锋面型主要发生在春季，其移动速度由于没有副高或台风系统的阻挡，通常移动速度较快，而切变型和低涡型多发生在 6~7 月，常常会受到副高或者台风的阻挡，导致移动缓慢，形成长时间的降水天气，甚至引发列车效应，需要格外关注；对于混合型降水，其主因同样为切变型和低涡型(图 9(c)、图 9(d))，两者累计概率达到了 66.7%；边界层辐合线型(图 9(e))在对流型中出现了 103 次，占比 26%，在混合型中出现了 15 次，占比 17.9%，同样需要引起重视；热带低压外围型的天气概念模型如图 9(f)所示，登陆减弱台风或热带低压的位置通常在贵州省的东部、东南部或南部，其外围气流延伸至贵州省境内，表现为整层一致的气流方向。





图片来源：本研究所使用的中国县级行政界线数据，源于全国 1:100 万地形数据(2015 版)，原始数据下载自全国地理信息资源目录服务系统(<http://www.webmap.cn>)。数据采用 CGCS_2000 国家大地坐标系，经过边界提取与拓扑处理，形成县级行政界线图层。

Figure 9. Meteorological conceptual model of moderate to heavy precipitation at Guiyang Airport. (a) Local convection type; (b) Frontal type; (c) Shear type; (d) Low vortex type; (e) Boundary layer convergence line type; (f) Peripheral tropical depression type

图 9. 贵阳机场中等强度及以上降水天气学概念模型。(a) 局地对流型；(b) 锋面型；(c) 切变型；(d) 低涡型；(e) 边界层辐合线型；(f) 热带低压外围型

5. 结论

本文利用贵阳机场分钟级自动观测数据及多源化观测数据、地面高空常规观测数据、era5 再分析数据等，对贵阳机场近 10 a 发生的中等强度及以上的降水事件进行统计分析，主要得出以下结论：

(1) 贵阳机场中等强度及以上降水事件频发，近 10 a 中雨和大雨的发生总频次和持续时间呈现出下降趋势，而极端强降雨则没有显著变化。

(2) 贵阳机场中等强度及以上的降水在月分布上呈单峰型，全年仅有 12 月份没有出现中等强度及以上的降水事件，集中出现在 5~7 月，峰值出现在 6 月，夏季发生频率最高，春季发生频率高于秋季。

(3) 贵阳机场近 10 a 中等强度及以上降水日变化呈单峰型特点，主要集中在夜间至早晨时段。冬春季降水的夜雨现象比较明显，而夏秋季降水的日变化则并不十分显著。

(4) 贵阳机场中等强度及以上降水持续时间的中位数集中在 8~10 min，超过半数的降水事件在 10 min 以内结束，20 min 以内的降水事件占比 76%，30 min 以内占比 95%。

(5) 根据降水性质的不同，贵阳机场中等强度及以上降水事件共分为四类：局地对流型、对流型、混合型和热带低压外围型。其中局地对流型主要影响系统为副高，集中出现在夏季午后至傍晚，少数伴有雷暴；对流型又分为锋面型、切变型、低涡型、边界层辐合线型和弱形势型，对流型降水主要发生在春夏季夜间至早晨，多数伴有雷暴；混合型降水主要影响系统为低涡或切变线，多数不伴雷暴，持续时间较短，主要出现在春夏季，峰值为 6 月；热带低压外围型整体出现频率较低，主要出现在夏季，尤其是 8 月午后至傍晚，其特点与局地对流型相似。

6. 讨论

贵阳机场中等强度及以上降水呈现的夜雨特征、短历时特性和夏季单峰型分布，与国内其他高海拔或山地机场的降水规律既有共性，也存在差异，反映出复杂地形下降水形成机制的多样性。

在降水日变化方面，贵阳机场冬春季降水集中发生在夜间至早晨，与云贵高原地区普遍存在的“夜雨”现象吻合。这种夜雨的成因通常与高原低涡东移、西南低空急流夜间增强以及山谷风环流转换有关。与同处高原山地的昆明、九寨黄龙等机场相比，夜雨的形成机制可能各有侧重：部分机场受系统性天气系统(如锋面、切变线)夜间过境影响更显著，而另一些机场则可能以局地山谷风驱动的热力对流为主。贵阳机场的对流型降水多伴有雷暴且集中在夜间，表明系统性强迫与不稳定层结的夜间释放共同作用；而局地对流型降水则集中在午后至傍晚，体现了纯粹热力作用的日变化特征。

在降水持续时间方面，贵阳机场超过七成的中等强度及以上降水事件在 20 min 内结束，显示出降水过程以短时、对流性为主的特点。这与山地机场普遍存在的对流单体生消迅速、生命史短的特征一致。相比之下，一些位于盆地或河谷地带的机场，由于地形对气流的辐合抬升作用更为持续，混合性降水过程可能维持更长时间。这种差异提示，机场周边的微地形(如山谷走向、相对高差)对降水的持续时间具有重要调制作用。

此外，本研究基于贵阳机场 AWOS 分钟级降水观测数据，虽具有高时间分辨率优势，但不可避免地存在测量误差和数据处理的局限性。

(1) 雨量计测量误差：AWOS 普遍使用翻斗式雨量计，在强降水时翻斗翻转可能存在滞后，或在大风条件下雨滴偏移导致捕获量减少，从而造成分钟雨量系统性低估。尤其当雨强超过仪器最大测量能力时，低估更为明显。尽管贵阳机场雨量计安装在开阔地带，但伴随强对流的瞬时大风仍可能影响测量精度。

(2) 分钟雨量阈值的设定：本文以 $\geq 0.2 \text{ mm/min}$ 作为中等强度降水的客观阈值，参考了人工观测与自观对比研究的结果，但该阈值对雨滴谱差异敏感。不同降水类型(对流性与层状云)的雨滴谱特征不同，相同雨强对应的实际能见度和对飞行的影响可能存在差异。未来若能结合雨滴谱仪数据，可进一步验证阈值的合理性。

(3) 降水事件合并的影响：依据民航特殊观测报文的发布规范，将间隔小于 10 min 的降水事件合并为一次过程，有利于获取连续样本，但可能平滑掉短暂间歇期内的降水波动，影响对降水精细结构的认识。例如，间歇期可能伴随雷暴、风切变等危险天气，仅从降水角度合并可能掩盖其对运行的影响。

(4) 再分析资料的适用性：ERA5 再分析资料虽分辨率较高，但在贵州复杂地形区， $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的网格仍难以完全解析局地环流和边界层精细结构，可能导致对局地对流型降水(如副高背景下的热力对流)的环流背景刻画存在偏差。未来结合风廓线雷达、微波辐射计等本地探测资料，有助于提升中小尺度系统的识别能力。

限于研究篇幅所限，本文主要从气象角度对各类型降水进行了统计分析，在未来的展望中，可以将管制流量协同，航班动态调整等数据进行融合分析，从而更大程度上发挥出气象预报信息在航空运行决策中的作用。

基金项目

中国民用航空西南地区空中交通管理局科技项目《西南地区多跑道运行气象预报预警技术研究》，民航西南空发[2024]57号。

参考文献

- [1] 杨金虎, 江志红, 王鹏祥, 等. 中国年极端降水事件的时空分布特征[J]. 气候与环境研究, 2008(1): 75-83.

- [2] 陈炯, 郑永光, 张小玲, 等. 中国暖季短时强降水分布和日变化特征及其与中尺度对流系统日变化关系分析[J]. 气象学报, 2012, 71(3): 367-382.
- [3] 钟军. 中国降水的时空和概率分布特征[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
- [4] 徐瑗, 喻琴昆, 刘成刚, 等. 川西高原甘孜州汛期短时强降水的时空分布特征[J]. 高原山地气象研究, 2024, 44(2): 50-57.
- [5] 刘晶, 刘兆旭, 张晋茹, 等. 东天山哈密地区典型暴雨事件对流触发机制对比分析[J]. 大气科学, 2022, 46(4): 965-988.
- [6] 乔春贵, 高牧原, 梁钰, 等. 河南省近 30 年分级短时强降水时空分布特征分析[J]. 气象与环境科学, 2024, 47(3): 72-81.
- [7] 胡燕, 陈鹤, 刘红武, 等. 湖南雨季小时极端降水的特征及其对暴雨贡献分析[J]. 大气科学学报, 2024, 47(6): 892-903.
- [8] 陆杰英, 余锐, 孙丽颖, 等. 近 10 年广州增城各历时强降水的特征分析[J]. 广东气象, 2024, 46(2): 11-15.
- [9] 肖蕾, 杜小玲, 武正敏, 等. 贵州省短时强降水时空分布特征分析[J]. 暴雨灾害, 2021, 40(4): 383-392.
- [10] 吴兴洋, 兰方信, 李从英, 等. 贵州年最大小时雨强时空分布变化特征[J]. 气象科技, 2020, 48(5): 723-730.
- [11] 周明飞, 熊伟, 杜小玲. 贵州近 10 年短时强降水统计分析[J]. 成都信息工程大学学报, 2016, 31(4): 425-432.
- [12] 王君军, 周林, 王彪. 贵阳市汛期短时强降水时空分布特征[J]. 中低纬山地气象, 2022, 46(2): 39-45.
- [13] 罗阳欢, 白慧, 陈早阳, 等. 贵州省汛期降水特征及强降水过程分型研究[J]. 山地气象学报, 2024, 48(1): 46-53.
- [14] 严小冬, 夏阳, 任曼琳, 等. 贵州暖季降水时空分布及其与大气环流异常的关系[J]. 山地气象学报, 2024, 48(6): 1-8.
- [15] 吴兴洋, 杜小玲, 陈怡璇, 等. 贵阳近百年雨日及降水量统计分析[J]. 山地气象学报, 2025, 49(1): 1-8.
- [16] 杜小玲, 蓝伟, 陈波. 2000 年以来贵州最强梅汛期降水异常成因分析[J]. 山地气象学报, 2024, 48(3): 1-11.
- [17] 战云捷, 鞠晓慧, 范邵华, 等. 1965-2019 年中国夏季分钟降水空间分布与长期趋势分析[J]. 气象学报, 2021, 79(4): 598-611.
- [18] 段丽杰, 曾向红, 蒋元华, 等. 基于分钟降水数据的长沙市场次降水事件特征分析[J]. 暴雨灾害, 2021, 40(04): 437-443.
- [19] 林晓萌, 刘一玮, 陈宏, 等. 基于分钟级大气可降水量的降水可预报性探究[J]. 气象科学, 2024, 44(4): 684-690.
- [20] 冷亮, 周伶俐, 肖艳姣, 等. 基于地面分钟雨量数据的湖北省短时强降水时空分布特征分析[J]. 暴雨灾害, 2021, 40(1): 61-68.
- [21] 张亚妮, 刘鑫华, 蓝渝, 等. 河南“21·7”极端降水分钟及小时雨量特征分析[J]. 热带气象学报, 2025, 41(3): 359-372.
- [22] 刘樱, 马浩, 杨明, 等. 浙江省分钟降水自记纸信息化数据与人工读取数据的对比及适用性分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(4): 128-134.
- [23] 王宇浩, 王晓慧, 顾小丽, 等. 基于分钟雨量的浙江省汛期短时强降水特征研究[J]. 暴雨灾害, 2025, 44(1): 60-70.
- [24] 王冷力, 任国玉, 战云健. 北京地区夏季分钟强降水气候学特征[J]. 气候与环境研究, 2025, 30(3): 260-274.
- [25] 郭冰芳, 朱业玉, 郭佳文, 等. 基于分钟数据的郑州市场次降水事件特征分析[J]. 气象与环境科学, 2025, 48(3): 1-10.
- [26] 中国民用航空局. 民用航空气象地面观测规范[EB/OL]. <https://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/GFXWJ/202112/P020220209588831109510.pdf>, 2026-05-12.
- [27] 张全, 吴妍, 关毅, 等. 自观系统判定中或大降水阈值生成方法探索[J]. 空中交通管理, 2025(3): 16-18.