

贵州地区地面辐合线触发强对流天气机理研究初探

陈义义, 宋媛, 罗娅

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6日; 录用日期: 2023年10月9日; 发布日期: 2023年10月17日

摘要

利用贵州省常规观测和区域加密自动观测站资料、葵花8及天气雷达观测资料, 通过水汽、能量、抬升三个方面研究贵州区域地面辐合线对强对流天气的触发机制。首先对造成贵州区域强对流天气的地面辐合线进行分型: 按照动态分为移动型、静止型、碰撞型三种, 按照形态分为成东北-西南型、准横向型、西北-东南型、南北型, 其中东北-西南型和南北型多移动, 准横向型和西北-东南型多静止。然后通过分析地面辐合线与强对流天气落区的位置关系, 发现绝大多数强对流天气落区位于辐合线后部及上部, 且距离辐合线水平距离均在20 km以内。最后通过分析强对流天气发生前地面辐合线附近温、湿度情况, 发现三种地面辐合线两侧的温差大部分为2°C~4°C, 露点差为1.5°C~3.5°C, 并发现三种不同辐合线触发强对流天气时的对流有效位能(CAPE)均需达到1000 J/kg以上, 强天气威胁指数(SWEAT)需达到230以上, 且抬升凝结高度和自由对流高度均需低于700 hPa高度。

关键词

地面辐合线, 强对流, 对流初生, 对流有效位能

Preliminary Study on the Mechanism of Strong Convection Triggered by Surface Convergence Lines in Guizhou Region

Yiyi Chen, Yuan Song, Ya Luo

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

Received: Sep. 6th, 2023; accepted: Oct. 9th, 2023; published: Oct. 17th, 2023

Abstract

Using conventional observation data from Guizhou Province, regional encrypted automatic ob-

ervation stations, sunflower 8, and weather radar observation data, this study investigates the triggering mechanism of surface convergence lines on strong convective weather from three aspects: water vapor, energy, and uplift. Firstly, the surface convergence lines that cause severe convective weather in the Guizhou region are classified into three types: moving, stationary, and collision based on their dynamics. They are divided into northeast southwest type, quasi transverse type, northwest southeast type, and north-south type based on their morphology. Among them, the northeast southwest type and north-south type are mostly moving, while the quasi transverse type and northwest southeast type are mostly stationary. Then, by analyzing the positional relationship between the surface convergence line and the strong convective weather zone, it was found that the vast majority of the strong convective weather zone is located behind and above the convergence line, and the horizontal distance from the convergence line is within 20 kilometers. Finally, by analyzing the temperature and humidity conditions near the surface convergence line before the occurrence of strong convective weather, it was found that the temperature difference on both sides of the three types of surface convergence lines was mostly $2^{\circ}\text{C}\sim 4^{\circ}\text{C}$, and the dew point difference was $1.5^{\circ}\text{C}\sim 3.5^{\circ}\text{C}$. It was also found that the convective effective potential energy (CAPE) of the three different convergence lines needed to trigger strong convective weather needed to reach above 1000 J/kg , and the strong weather threat index (SWEAT) needed to reach above 230, and the elevation of condensation height and free convection height should be lower than the height of 700 hPa.

Keywords

Ground Convergence Line, Strong Convection, Convective Nascent, Convective Effective Potential Energy

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

贵州地处青藏高原东南侧、云贵高原东斜坡上，是高耸于四川盆地和广西丘陵之间的高原山区，山地和丘陵占全省总面积的 97%。境内地势西高东低，自中部向北、东、南三面倾斜，平均海拔 1100 m 左右。西部海拔在 2400~1200 m 之间，中部海拔在 1200~800 m 之间，东部海拔在 800 m 以下，构成三级小阶梯面，是我国地势第二级阶梯东部边缘的一部分。因其特殊的地理地形特征，贵州地区经常出现辐合、切变及地涡等中小尺度天气系统，是我国冰雹、短时强降水等强对流天气发生频率最高的地区之一。贵州地区独特高原特征的天气给预报带来很大的困难，高原天气系统分析，尤其是边界层天气系统的分型是个非常困难的且尚未真正解决的问题。

武文辉[1]通过对云贵高原东段初夏暴雨研究，认为当南亚低层盛行的西南气流绕过横断山脉进入贵州时，地形原因就会在背风坡形成气旋性环流，这种背风波的扰动有时与华南低空急流配合，在急流轴的左侧形成较强的气旋性风速切变，是造成贵州暴雨的有利的天气系统。刁秀广等[2]对近年发生在山东中部的典型局地强风暴的生成及对流参数进行了分析，认为单纯的近地层辐合线在有利的环境条件下可产生较为孤立的局地风暴，可作为强对流天气临近预警的关键参考依据。徐亚钦[3]通过对影响浙江地区的多个强对流个例进行分析，发现回波发展前沿存在着较为明显的辐合线区域，辐合的效果可以很大程度上反应出回波的发展趋势。翟国庆等[4]根据对华东地区 9 次强对流天气的地面风场分析发现，强对流的发生发展与锋前暖区的中尺度辐合线有密切关系，而辐合线的形成与大尺度背景和特定地形有关。王

彦[5]等应用天津 CINRAD/SA 雷达探测到的边界层辐合线信息,对 2008~2009 年 6~9 月发生在天津地区的边界层辐合线进行了统计分析,研究结果表明:在合适的层结状态和水汽条件下,这些边界层辐合线的演变和碰撞与强对流天气的发生、发展密切相关。崔庭等[6]对 2012 年 4 月 19 日傍晚发生在黔西南州的一次冰雹天气进行了诊断分析,分析表明:低层切变和地面辐合线是本次冰雹天气的主要影响系统。车军辉等[7]对 2012 年 7 月 4 日山东半岛地区一次复杂天气背景下的地面辐合线演变过程及其与不同尺度天气过程的相互作用进行分析。结果表明:3 次天气尺度过程同地面辐合线发展演变关系密切,辐合线深入内地成为鲁西北对流天气过程的触发系统,且风暴尺度对流过程与地面辐合线直接相关。王丽荣等[8]太行山东麓地面辐合线特征分析,由于太行山地形的影响,在河北中南部,地面存在着几乎定常的风向辐合,局地对流天气往往发生在地面辐合线附近。周治黔等[9]通过对贵州省 2006 年 4 月 4 日夜间冰雹天气过程分析,认为锋面与地面辐合线的相互作用引发了黔南和黔东南自治州发生的雷雨冰雹天气过程,为在弱水汽条件下辐合线附近发生对流天气的落区预报提供了分析依据和方法。杨秀庄等[10]通过对云贵高原东段初夏一次辐合线锋生型暴雨研究,发现地面中尺度辐合线和 850 hPa 切变线耦合是对流发展的主要原因,中尺度对流系统在云图上表现为一 MCS 对流云团自西向东移动。周明飞等[11]分析了 2021 年 5 月 15 日贵州东北部发生了一次极端风雹天气过程,发现冷锋前沿的地面辐合线抬升是本次强对流天气的触发机制,切变线南侧暖湿气流输送和较强的垂直风切变有利于对流风暴的维持和加强。周林等[12]对 2019 年 5 月 24 日夜间黔中地区暖区暴雨过程的中尺度对流系统特征及成因进行分析,认为地面辐合线为对流系统的发生发展提供了较好的动力条件,强降水落区的位置随着地面辐合线的移动而移动,同时强降水落区主要位于地面辐合线左侧的偏北气流内。吴古会等[13]对贵州西部极端对流性暴雨预报失败案例剖析,发现在弱天气尺度强迫背景下,高温高湿的环境中,未能准确判断对流的触发条件,未分析出露点锋、偏西风和偏南风的辐合、冷池和地面辐合线等的存在导致容易暴雨天气漏报。苏爱芳等[14]分析了国内外边界层辐合线触发深厚湿对流研究进展,回顾边界层辐合线对流触发作用的统计研究,认为边界层辐合线的对流触发作用不仅具有地域特征,而且还会因辐合线的形成原因、表现形式、相互作用方式等差异影响对流初生的时间、相对位置并导致对流或深对流初生概率不同。王子昕等[15]对多源数据融合在强对流天气中地面风场的识别应用进行分析,通过融合风场的识别发现:强对流天气系统发展阶段,地面有气旋性辐合流场,包含中 γ 尺度气旋和辐合线,与反气旋和辐散相伴。气旋性气流对应着雷达回波中的入流缺口,辐合线位于风暴前沿(移动方向)。强对流天气系统强盛阶段,地面流场转变为强辐合弱旋转,灾害性天气发生。

国内关于地面辐合线触发强对流天气机制的系统性研究较少,更多的是侧重于个例分析。因此,深入系统的研究贵州地区复杂地形下的边界层辐合线对强对流天气发生和发展的物理机制,对该地区强对流天气的预报思路的建立和提高强对流天气预报准确率具有重要的意义。本文通过对影响贵州地区的 160 个强对流个例进行统计,研究贵州地区地面辐合线具体形态、移动趋势及与强对流天气落区的位置关系,然后进一步分析触发强对流天气的地面辐合线附近水平方向上的温、湿度梯度及垂直方向上的大气层结情况,期望揭示出地面辐合线对贵州地区强对流天气的发生、发展的具体影响原因。

2. 资料和研究方法

本文利用 2018~2023 年近五年利用贵州省常规观测和区域加密自动观测站资料、葵花 8 及天气雷达观测资料,对影响贵州地区的 160 个强对流个例进行统计分析,将贵州地区触发强对流天气的地面辐合线按照移动趋势、形态进行分类,并统计不同形态、不同动态地面辐合线的发生频率,然后通过定义强对流天气的边界,即:葵花 8 卫星红外通道云顶亮温度 $TBB \leq 233 \text{ K}$ 且雷达回波反射率 $\geq 45 \text{ dbz}$, 统计分析地面辐合线与强对流天气落区的位置关系,最后通过贵州区域的贵阳及威宁两个探空站观测资料,

统计触发强对流天气的地面辐合线附近水平方向上的温、湿度梯度及垂直方向上的大气层结情况，分析地面辐合线主导的环境背景下形成强对流天气的大气层结阈值，并通过 2022 年 3 月 16 日傍晚至夜间贵州中西部的一次长历时强对流天气事件进行实例阐述。

3. 贵州区域触发强对流天气的地面辐合线分型

通过普查 2018~2023 年共计 160 个强对流个例资料，发现除高架雷暴外的其他强对流天气均伴随有地面辐合线的发生发展，根据地面辐合线的移动动态，将造成强对流的辐合线划分为移动型、静止型、碰撞型三种类型，分别发生 80、63、17 次，分别占比 50%、39% 和 11% (图 1)。其中移动型和碰撞型产生的强对流天气主要表现为雷暴大风、冰雹天气；静止型多产生短时强降水及暴雨天气。碰撞型多表现为“V”字或倒“V”字型碰撞。

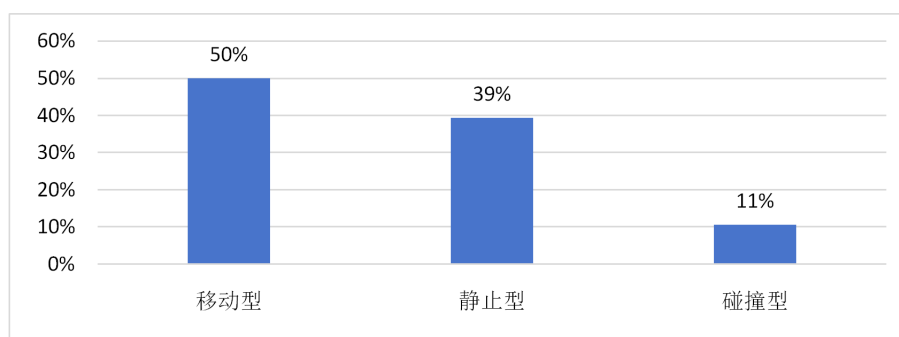


Figure 1. Frequency distribution of dynamic types of ground convergence lines in Guizhou region

图 1. 贵州区域地面辐合线的动态类型发生频率分布

根据地面辐合线的形态，划分成东北-西南型、准横向型、西北-东南型、南北型，分别发生 92、32、22、10 次，分别占比 64%、21%、15% 和 7% (图 2)。

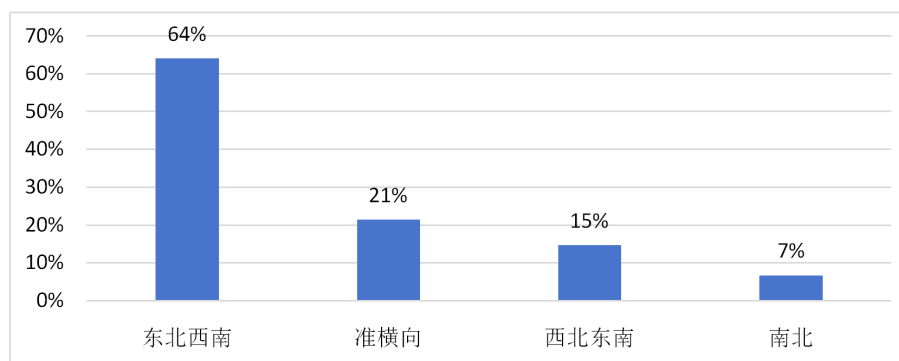


Figure 2. Frequency distribution of dynamic types of ground convergence lines in Guizhou region

图 2. 贵州区域地面辐合线的形态类型发生频率分布

根据图 3 可知，移动型、静止型、碰撞型三种地面辐合线类型中，东北-西南型占据绝对大比重，南北型占据比重均最小，在静止型辐合线中准横向型与东北-西南型旗鼓相当。

其中东北-西南型一般由北向南快速移动，发生于贵州各个地区；准横向型一般呈准静止状态，多发生在黔西北和黔中一线；西北-东南型多发生于黔西南部，一般呈准静止状态或缓慢向东北方向移动；南北型多发于贵州西部，呈“弓”型缓慢向东移动，发然发生较少，但容易产生雷暴大风、冰雹等剧烈天气。

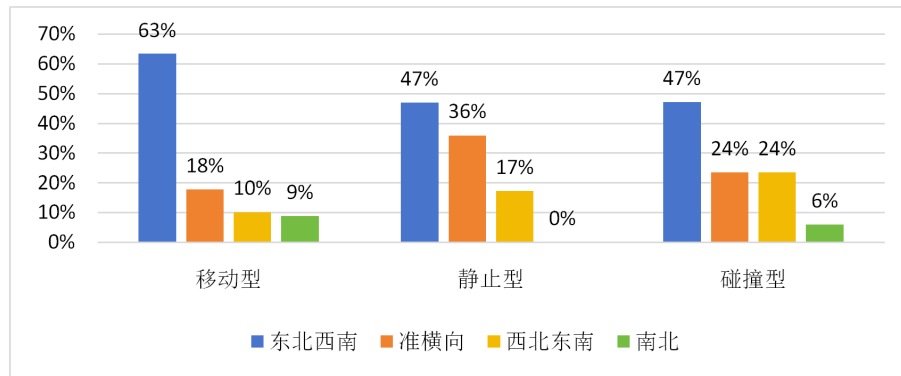


Figure 3. Frequency distribution of ground convergence lines under different dynamic types and morphological types in Guizhou region

图 3. 贵州区域不同动态类型下不同形态类型的地面辐合线发生频率分布

4. 地面辐合线与强对流天气落区的位置关系

本文将葵花 8 卫星红外通道云顶亮温度 $TBB \leq 233 \text{ K}$ 且雷达回波反射率 $\geq 45 \text{ dbz}$ 定义强对流天气的边界，根据贵州区域加密地面观测站资料识别地面辐合线，识别强对流天气落区与地面辐合线的位置关系。如图 4 所示，90% 以上的强对流天气位于地面辐合线类型的上部和后部，极少数位于辐合线前部。另外，如图 5 所示，移动型辐合线，强对流落区多位于辐合线后部与上部；静止型辐合线，强对流落区

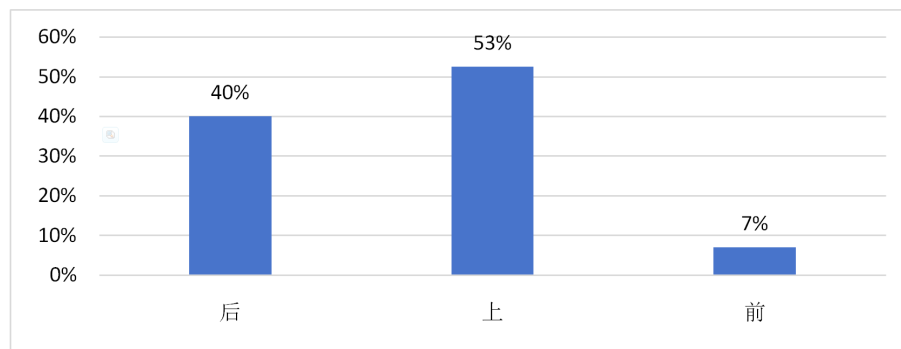


Figure 4. Frequency distribution of the position relationship between surface convergence lines and strong convective weather zones

图 4. 地面辐合线与强对流天气落区的位置关系频率分布

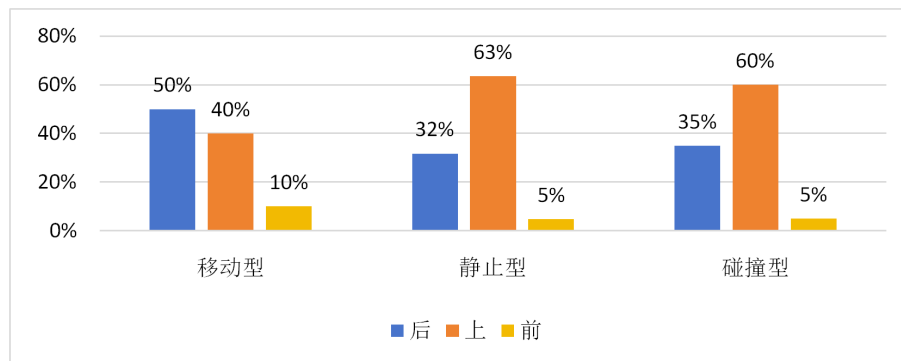


Figure 5. Frequency distribution of the positional relationship between different types of surface convergence lines and strong convective weather zones

图 5. 不同类型地面辐合线与强对流天气落区的位置关系频率分布

多位于辐合线上部与后部；碰撞型辐合线，强对流落区多位于辐合线上部。

如图 6 所示，针对强对流落区位于辐合线后部 64 次、前部 12 次，平均距离分别为 10.9 km、8 km。其中，强对流落区位于移动型辐合线后部平均距离 10.7 km、前部 4.5 km；位于静止型辐合线后部平均距离 9.8 km、前部 13 km；位于辐合线后部平均距离 4.5 km，前部因发生次数极少，不具备统计意义。

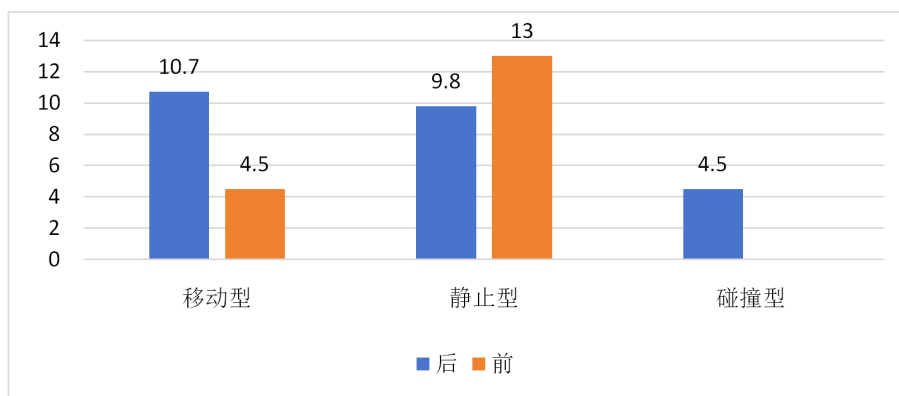


Figure 6. The distance between different types of surface convergence lines and strong convective weather zones

图 6. 不同类型地面辐合线与强对流天气落区的距离

5. 强对流天气发生前地面辐合线附近气层结情况

5.1. 强对流天气发生前地面辐合线两侧温湿度情况

强对流初生定义：本文将葵花 8 卫星长波红外通道 $240\text{ K} \leq \text{TBB} \leq 250\text{ K}$ 且对应的雷达回波反射率 $35\text{ dbz} \leq Z \leq 40\text{ dbz}$ 定义强对流天气初生。

通过遍历 160 个强对流天气个例，分析强对流初生时地面辐合线两侧的温、湿度情况发现，三种地面辐合线两侧的温差大部分为 $2^\circ\text{C} \sim 4^\circ\text{C}$ ，露点差为 $1.5^\circ\text{C} \sim 3.5^\circ\text{C}$ (见表 1)。其中，移动型辐合线两侧温差和露点差均最大，表现的强对流天气程度更剧烈。

Table 1. Temperature and humidity conditions near the surface convergence line before the occurrence of severe convective weather

表 1. 强对流天气发生前地面辐合线附近温湿度情况

	最小温差 平均($^\circ\text{C}$)	最大温差 平均($^\circ\text{C}$)	最小露点差 平均($^\circ\text{C}$)	最大露点差 平均($^\circ\text{C}$)
移动型	2.6	4.6	2.0	3.5
静止型	2.3	4.0	1.5	3.0
碰撞性	1.9	4.2	1.7	2.7

5.2. 强对流天气发生前地面辐合线附近大气层结情况

利用贵州省常规探空资料和贵阳机场微波辐射计和风廓线资料，分析强对流天气发生前地面辐合线附近大气层结情况。分析原则为：空间上要求对流发展位置距离探空站点 50 公里以内，时间上要求对流发展时间在探空时间(08 时，20 时)前 2 小时以内，受资料所限，经挑选，符合要求的个例 60 个。

通过分析强对流初生时地面辐合线附近的能量情况发现，如表 2 所示，移动型、静止型、碰撞性地面辐合线触发强对流的平均对流有效位能(CAPE)差别不大，分别为 1237.7 J/kg 、 1251.4 J/kg 、 1181.0 J/kg ，

下限分别为 426.3 J/kg、690.9 J/kg、656 J/kg; 平均对流抑制有效位能(CIN)方面, 分别为 17.7 J/kg、15.3 J/kg、2.4 J/kg, 上限分别为 108.9 J/kg、63.8 J/kg、25.3 J/kg; 平均强天气威胁指数(SWEAT)方面, 分别为 273.5、271.9、246.2, 下限分别为 249.6、245.0、233.3。由此可见三种地面辐合线对大气能量情况要求基本相当。

Table 2. Statistics of convective effective potential energy (CAPE), convective inhibitory effective potential energy (CIN), and severe weather threat index (SWEAT) near the surface convergence line before the occurrence of severe convective weather

表 2. 强对流天气发生前地面辐合线附近对流有效位能(CAPE)、对流抑制有效位能(CIN)及强天气威胁指数(SWEAT)统计

	平均 CAPE (J/kg)	最小 CAPE (J/kg)	平均 CIN (J/kg)	最大 CIN (J/kg)	平均 SWEAT 指数	最小 SWEAT 指数
移动型	1237.7	426.3	17.7	108.9	273.5	249.6
静止型	1251.4	690.9	15.3	63.8	271.9	245.0
碰撞性	1181.0	656	2.4	25.3	246.2	233.3

通过分析强对流初生时地面辐合线附近的抬升情况发现, 如表 3 所示, 移动型、静止型、碰撞性地面辐合线触发强对流的平均抬升凝结高度(LCL)分别为 808.4 hPa、823.7 hPa、789.8 hPa, 上限分别为 728.7 hPa、791.7 hPa、716.3 hPa; 平均自由对流高度(LFC)为 794.2 hPa、799.5 hPa、756.6 hPa, 上限为 694.2 hPa、745.4 hPa、703.6 hPa。由此可见静止型辐合线因自身抬升运动相对不足, 触发对流需要更低的抬升凝结高度和自由对流高度。

Table 3. Statistics of uplift condensation height (LCL) and free convection height (LFC) near the surface convergence line before the occurrence of severe convective weather

表 3. 强对流天气发生前地面辐合线附近抬升凝结高度(LCL)、自由对流高度(LFC)统计

	平均 LCL (hPa)	上限 LCL (hPa)	平均 LFC (hPa)	上限 LFC (hPa)
移动型	808.4	728.7	794.2	694.2
静止型	823.7	791.7	799.5	745.4
碰撞性	789.8	716.3	756.6	703.6

6. 地面辐合线移动原因分析

如图 1 所示, 一半以上的地面辐合线生成后均会移动, 强对流天气预报除关心对流初生落区和对流类型外, 更关心生成后的对强流天气如何发展移动, 具体影响下游地区的时间。如图 7 所示, 东北-西

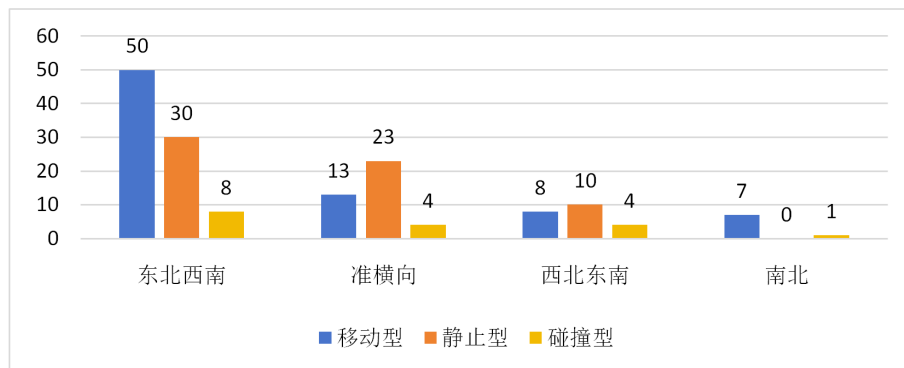


Figure 7. Distribution of ground convergence linear movement in different forms

图 7. 不同形态地面辐合线型移动情况分布

南向、准横向、西南 - 东北向地面辐合线中，移动型趋势所占比重均较大，尤其是东北 - 西南向辐合线有一半以上都会移动。因此本文对 80 条移动性地面辐合线进行深入分析发现，几乎每一条辐合线上空均会伴随有深浅不同的高空槽引导地面辐合线移动。

如图 8 所示，2022 年 3 月 16 日傍晚至夜间，贵州区域中西部发生了一次长历时强对流天气过程。16 日 14:00 辐合线 A 呈东北 - 西南向位于黔西北毕节 - 赫章一带、辐合线 B 呈西南 - 东北向位于黔西南普安 - 贞丰一带，两条辐合线均激发出强对流云团，后续辐合线 A 在高空槽后西北气流引导下携强对流云团向东南方向快速移动，辐合线 B 在空槽前西南气流的引导下携强对流云团向东北方向快速移动，呈犄角之势，两条辐合线于 17:00 在贵州中部纳雍 - 织金一带交汇碰撞，激发出更强烈对流云团，后续辐合线 A 继续缓慢南压，于 20 时呈准横向维持在贵州中部一带，稳定少动，强对流云团不断在辐合线上生成、发展，形成列车效应，给贵州中部一线带来短时大风、冰雹、短时强降水等强对流天气，局地过程降水量达到 100 毫米以上，其中贵阳机场雷雨天气历时 13 个小时，创下机场建站以来的雷雨持续时间之最。

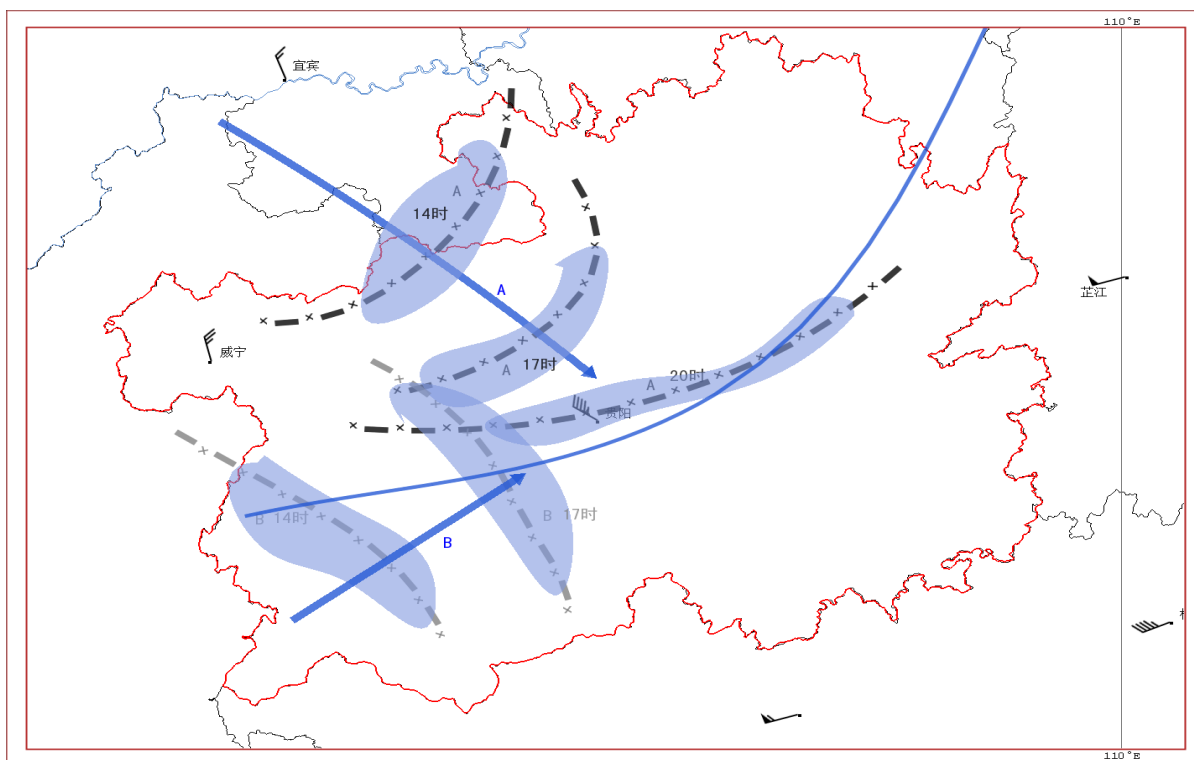


Figure 8. Comprehensive map analysis of severe convective weather occurred in Guizhou region from the afternoon to night of March 16, 2022

图 8. 2022 年 3 月 16 日下午至夜间贵州区域强对流天气发生综合图分析

7. 总结与讨论

1) 国内外关于不同形态和移动趋势的地面辐合线所造成的强对流天气特点研究较少，更多的是侧重于地面辐合线触发强对流天气的个例分析，系统研究较少，本文通过分析贵州区域近五年 160 个强对流天气个例，对造成强对流天气的地面辐合线按照动态分为移动型、静止型、碰撞型三种，其中移动型发生频率最高、静止型次之，碰撞型最少。按照形态可分为东北 - 西南型、准横向型、西北 - 东南型、南北型，其中东北 - 西南型发生频率最高、准横向型次之，西北 - 东南型、南北型发生较少。另外东北 -

西南型和南北型多移动, 准横向型和西北 - 东南型多静止。

2) 对于地面辐合线与强对流天气落区的位置关系, 国内的研究也较少, 本文通过大量案例分析统计, 发现绝大多数强对流天气落区位于辐合线后部及上部, 且强对流天气落区的前沿距离地面辐合线水平距离均在 20 公里以内。

3) 通过分析强对流天气发生前地面辐合线两侧温、湿度情况, 发现移动型、静止型、碰撞型地面辐合线两侧的温差大部分为 $2^{\circ}\text{C}\sim 4^{\circ}\text{C}$, 露点差为 $1.5^{\circ}\text{C}\sim 3.5^{\circ}\text{C}$, 其中, 移动型辐合线两侧平均温差和露点差均最大。

4) 通过分析强对流天气发生前地面辐合线附近的大气层结情况, 发现移动型、静止型、碰撞型三种不同辐合线需要触发强对流天气时的对流有效位能(CAPE)需达到 1000 J/kg 以上, 强天气威胁指数(SWEAT)需达到 230 以上, 且抬升凝结高度和自由对流高度均需低于 700 hPa 高度。

5) 通过分析“3.16”强对流天气过程发现, 不同形态的地面辐合线移动的趋势不同, 形成的强对流天气特点也不同, 但在两条辐合线交汇碰撞处会激发更加强烈的对流性天气, 碰撞后的辐合线的形态和移动趋势也会发生变化, 因此不同形态、动态的地面辐合线在发生发展中也出现会相互转换的情况。

6) 本文对贵州地区地面辐合线的动态和形态进行了分析, 但地面辐合线具体形成原因还需要进一步分析研究。另外在地面辐合线背景下, 高的对流有效位能和低的对流抑制能量有利于形成强对流性天气, 但在同一环境条件下形成的强对流天气类型不尽相同, 还需要进一步分析研究。

参考文献

- [1] 武文辉. 云贵高原东段初夏暴雨的观测、诊断与模拟[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2007.
- [2] 刁秀广, 车军辉, 李静, 朱君鉴. 边界层辐合线在局地强风暴临近预警中的应用[J]. 气象杂志, 2009, 35(2): 29-33.
- [3] 徐亚钦. 中尺度辐合线对强天气影响分析与模拟试验[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [4] 翟国庆, 俞樟孝. 强对流天气发生前期地面风场特征[J]. 大气科学, 1992, 16(5): 522-529.
- [5] 王彦, 于莉莉, 李艳伟, 等. 边界层辐合线对强对流系统形成和发展的作用[J]. 应用气象学报, 2011, 22(6): 724-731.
- [6] 崔庭, 杜晓玲, 孙旭东. 地面辐合线锋生激发黔西南州冰雹天气的个例分析[J]. 云南地理环境研究, 2013, 25(2): 101-105. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-7852.2013.02.018>
- [7] 车军辉, 郭红艳, 史茜, 马丽. 地面辐合线演变与多尺度天气过程的相互作用分析[J]. 干旱气象, 2017, 35(1): 91-99.
- [8] 王丽荣, 刘黎平, 王立荣, 王宗敏. 太行山东麓地面辐合线特征分析[J]. 气象, 2013, 39(11): 1445-1451.
- [9] 周治黔, 罗文芳. 一次锋面与地面辐合线相互作用的对流天气落区预报及分析[J]. 贵州气象, 2006, 30(3): 6-9.
- [10] 杨秀庄, 杜小玲, 吴古会, 汪超. 云贵高原东段初夏辐合线锋生型暴雨研究[J]. 高原气象, 2016, 35(4): 920-933.
- [11] 周明飞, 杜小玲, 罗敬, 齐大鹏, 周文钰. 贵州“5. 15”极端风雹天气过程的环境场和雷达回波特征[J]. 暴雨灾害, 2022, 41(2): 158-166.
- [12] 周林, 王君军, 罗乃兴, 等. 黔中地区一次暖区暴雨的中尺度特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2023, 17(2): 146-153.
- [13] 吴古会, 彭芳, 张艳梅. 贵州西部极端对流性暴雨预报失败案例剖析[J]. 中低纬山地气象, 2022, 46(4): 17-24.
- [14] 苏爱芳, 郑永光, 张宁, 等. 边界层辐合线触发深厚湿对流研究进展[J]. 气象学报, 2022, 80(2): 177-189.
- [15] 王子昕, 王咏青, 张静, 王易. 多源数据融合在强对流天气中地面风场的识别应用[J]. 高原气象, 2022, 41(3): 798-802.