

刘彬,邹灵宇,李晓鹏,等,2022. 云南雷暴大风天气的环境条件特征分析[J]. 气象,48(11):1402-1417. Liu B, Zou L Y, Li X P, et al, 2022. Analysis on environmental characteristics of thunderstorm gales in Yunnan[J]. Meteor Mon, 48(11):1402-1417 (in Chinese).

云南雷暴大风天气的环境条件特征分析^{*}

刘 彬^{1,2} 邹灵宇¹ 李晓鹏¹ 王 将¹ 杨芳园¹ 段燕楠¹

¹ 昆明市气象局,昆明 650501

² 中国气象局横断山区(低纬高原)灾害性天气研究中心,昆明 650034

提 要: 利用 2011—2020 年云南地面观测、闪电定位、重要天气报等资料,对云南雷暴大风时空分布特征进行统计分析,结果表明:雷暴大风主要集中在 2—8 月,呈现双峰型分布,4 月最多,春季多于夏季,日峰值出现在 16—17 时,多数雷暴大风持续时间为 1~4 h。高发区主要分布在玉龙雪山和苍山以东,以及哀牢山、无量山附近等区域。根据不同类型大尺度环流背景将区域性雷暴大风的天气型分为三种:南支槽型、低压槽型和准正压型,其中南支槽型雷暴大风最多。采用 NCEP 再分析资料计算表征大气热力、动力及水汽条件等特征的物理参数,分析了 3—8 月和各天气型背景下环境条件特征,并给出物理量参考阈值。结果表明:春季以动力作用为主,夏季以热力作用为主,南支槽型动力条件较好,准正压型水汽条件较好。雷暴大风发生前绝大多数物理量 6 h 变量均有不同程度的增大趋势,表明均向有利于雷暴大风发生的方向发展,这种演变趋势可为临近预报和预警提供有用信息。

关键词: 雷暴大风,时空分布,环境参数

中图分类号: P446, P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.071502

Analysis on Environmental Characteristics of Thunderstorm Gales in Yunnan

LIU Bin^{1,2} ZOU Lingyu¹ LI Xiaopeng¹ WANG Jiang¹ YANG Fangyuan¹ DUAN Yannan¹

¹ Kunming Meteorological Bureau, Kunming 650501

² Research Center for Disastrous Weather over Hengduan Mountains and Low-Latitude Plateau, CMA, Kunming 650034

Abstract: The temporal and spatial distributions of thunderstorm gales in Yunnan are analyzed based on conventional observation data, observed lightning data and significant weather reports from 2011 to 2020. The results are as follows. Thunderstorm gales tend to occur from February to August, characterized by a bimodal pattern, and seen mostly in April. It is easier to see thunderstorm gales in spring than in summer and the daily peaks often appear from 16:00 BT to 17:00 BT. The durations of most thunderstorm gales are 1—4 hours. The high frequency areas are mainly distributed near mountains, including the east of Jade Dragon Snow Mountain, the east of Cangshan Mountain, the Ailao Mountain and the Wuliang Mountain. According to different types of large scale circulation background, three basic synoptic situation configurations of regional thunderstorm gales in Yunnan are proposed, that is, the southern branch trough type, low pressure trough type and quasi-barotropic type. The thunderstorm gale of the southern branch trough type occurs most. The physical parameters are calculated based on NCEP reanalysis data, representing the environmental characteristics such as thermal, dynamical and water vapor conditions, and then the characteristics of physical parameters are analyzed, considering the influence of monthly variation and different

^{*} 云南省气象局 2022 年度城市气象预报预警服务专项(CS202209、CS202210)和云南省气象局科研项目(YZ202005、YZ201905)共同资助
2021 年 9 月 20 日收稿; 2022 年 7 月 15 日收修定稿

第一作者:刘彬,主要从事强对流天气预报研究. E-mail: fyleo_123@163.com

backgrounds of atmospheric circulation. The index thresholds of thunderstorm gales are worked out. The results show that the dynamic condition for thunderstorm gale in spring is much better than in summer, and the thermal condition is more significant in summer. The dynamic condition of southern branch trough type or vapor conditions of quasi-barotropic type is better than other weather types. Most meteorological physical parameters tend to increase 6 hours before most thunderstorm gales occur, which indicates that they develop to be more favorable for thunderstorm gale. This finding could provide useful information to the nowcasting and warning of thunderstorm gales.

Key words: thunderstorm gale, temporal and spatial distribution, environmental parameter

引 言

中国气象局将雷暴大风定义为伴随强对流且风速 $\geq 17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (8 级风) 的大风事件(郑永光等, 2015)。雷暴大风作为一种强对流天气, 是由强对流风暴中处于成熟阶段单体中的下沉气流, 在近地面处向水平方向扩散形成的辐散性阵风而产生(俞小鼎等, 2006), 常造成重大生命财产损失, 如 2015 年“6·1 东方之星”翻沉事件(郑永光等, 2016), 2018 年 3 月初在江西中北部发生的极端雷暴大风天气过程(盛杰等, 2019), 以及“2016·4·19”云南一次强致灾飑线雷暴大风天气过程(张腾飞等, 2018; 杨芳园等, 2018), 这些灾害性对流大风天气都引起了巨大社会反响。

雷暴大风具备强对流天气发生的三个基本条件包括中低层水汽、大气层结不稳定和抬升条件(Doswell III, 1987), 而大尺度环境为强对流天气发生提供热力、动力和水汽等条件(Doswell III, 1987; 孙继松和陶祖钰, 2012; 郑永光等, 2017), 因此研究大气环境条件有助于了解雷暴大风发生时的物理量分布特征, 提高潜势预报的准确率。

方翀等(2017)、许霖等(2017)、王冀等(2020)对我国一些省份或地区的雷暴大风进行了相关研究, 从空间分布情况上看, 由于各地天气气候以及地形地貌各有不同使得雷暴大风空间分布差异较大。而雷暴大风时间分布上有一定相似性, 如月变化方面, 华北地区、山东、京津冀地区、渤海西部、广西等主要出现在夏季 6—8 月(严仕尧等, 2013; 杨晓霞等, 2014; 柴东红等, 2017; 王亚男等, 2020; 钟利华等, 2011), 湖南、川藏地区等春、夏季 3—8 月皆可出现雷暴大风(许霖等, 2017; 王冀等, 2020)。日变化方面, 多数省份或地区雷暴大风主要集中出现在午后到傍晚, 即 14—20 时(北京时, 下同)(廖晓农, 2009; 钟利华等, 2011; 严仕尧等, 2013; 柴东红等, 2017; 许

霖等, 2017; 杨新林等, 2017; 樊李苗和俞小鼎, 2020)。

在大尺度环境物理量特征研究方面, 秦丽等(2006)指出利于北京地区雷暴大风产生的探空结构为低层暖湿, 中高层有干冷空气, 不稳定性较大, 风垂直切变较大。廖晓农(2009)指出, 北京地区绝大多数的雷暴大风具有下击暴流特征, 而且冰雹的落区附近也是大风的爆发区之一。严仕尧等(2013)、杨晓霞等(2014)、王亚男等(2020)分别对华北地区、山东、渤海西部按影响天气类型讨论了发生雷暴大风时的环境物理量指标阈值。方翀等(2017)研究指出华北地区多数常用的热力指标需考虑季节因素。杨新林等(2017)研究指出相比于普通雷暴, 华南雷暴大风天气发生的环境条件具有更强的条件性不稳定, 斜压性和动力强迫更强, 春季雷暴大风动力条件明显优于夏季, 而夏季热力强迫的作用大于春季。费海燕等(2016)、马淑萍等(2019)研究了中国风速 $\geq 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 强雷暴大风的环境参量特征, 为强雷暴大风的短时潜势预报和临近预警提供了参考。雷蕾等(2011)、高晓梅等(2019)、王迪等(2020)对比分析了雷暴大风与短时强降水、冰雹等其他强对流天气的物理量差异, 提炼分类强对流关键参数阈值, 以甄别各类强对流天气。

云南山谷纵横地形复杂, 3—5 月云贵高原为雷暴大风、冰雹等强对流天气多发区(孙继松等, 2014), 雷暴大风发生时环境条件特征又如何? 本文在分析云南雷暴大风时空分布特征和区域性雷暴大风发生时的环流背景基础上, 选取多个用于表征热力、动力和水汽条件的物理量参数, 尝试归纳对雷暴大风具有预报指示意义的物理量阈值及其分布特征, 以期开展此类天气潜势预报提供一定参考。

1 资料和方法

本文所用资料包括 2011—2020 年云南 125 个地面站逐小时观测资料、闪电定位系统监测的闪电

资料、重要天气报和 NCEP $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 逐 6 h 再分析资料,分析云南雷暴大风的时空分布、区域性雷暴大风的大尺度环流背景以及环境物理量条件特征。云南地面气象站点及地形分布如图 1 所示。

由于雷暴大风等强对流天气常伴随活跃的闪电活动(Feng et al,2007;Yang and Sun,2014),因此参考杨新林等(2017)、杨波等(2019)的研究方法对雷暴大风样本进行筛选,选取原则为:当某次地面站出现极大风速 $\geq 17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 大风事件,结合重要天气报,并考虑前后 1 h 内站点附近半径范围 30 km 内监测到非孤立闪电活动(2 次及以上),则判定为一次雷暴大风事件,共得到 2832 个样本。

物理量参数选取方面,根据对流参数的物理意义及本地预报员经验,从样本发生当日 14 时 NCEP 再分析资料计算挑选物理量参数,所选参数如表 1 所示,并插值到雷暴大风样本所在站点,将各对流参数样本按月和天气型统计绘制箱线图,分别显示最小值、第 25%分位值、中位值、第 75%分位值和最大值,得出雷暴大风发生前有指导意义的预报指标。

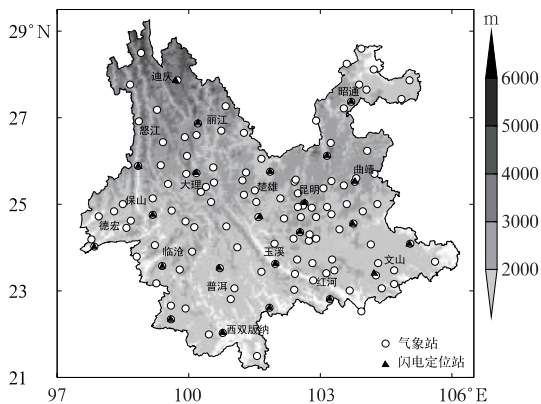


图 1 云南气象站点、闪电定位站及地形分布
Fig.1 Distribution of surface meteorological stations, lightning detection sensors and terrain elevation in Yunnan Province

表 1 物理量参数列表

Table 1 List of physical parameters

物理量	符号/单位
对流有效位能	CAPE/(J·kg ⁻¹)
抬升指数	LI/℃
700~500 hPa 温度差	$\Delta T_{700-500}/^{\circ}\text{C}$
700~500 hPa 垂直风切变	$SHRL_{500-700}/(10^{-3}\text{ s}^{-1})$
大气可降水量	PW/mm
700 hPa 比湿	$Q_{700}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$
700~500 hPa 相对湿度差	$\Delta RH_{700-500}/\%$

2 雷暴大风的时空分布特征

2.1 时间和强度分布特征

从雷暴大风出现频次月分布(图 2a)可见,雷暴大风主要集中出现在 2—8 月,呈现双峰型分布,其中春季(3—5 月)最为集中,主峰出现在 4 月,约有 100 次,占总数的 35.6%,结合胡娟等(2015)研究分析得知,气候态中云南易出现大风(含对流性大风)的 2—5 月也可能是雷暴大风较多出现的时间段。次峰出现在 8 月,仅占总数的 7.4%,频次较春季各月明显偏小,这与孙继松等(2014)研究指出西南地区 4—5 月单站平均雷暴大风日峰值高于 8 月的结论有相似之处。

云南雷暴大风月分布情况与大尺度环流背景和影响天气系统有关,冬、春季南支槽和昆明准静止锋均较为活跃(许美玲等,2011;段旭等,2017),由于南支槽系统易将孟加拉湾地区的水汽向大陆方向输送,因此对于冬、春季受西风带干燥气流控制的云南而言,南支槽是产生降水和大风冰雹的主要天气系统。如果此时存在昆明准静止锋,一方面南支槽将西南暖湿气流带到云南上空,大气层结更易处于不稳定状态;另一方面当冷空气加强,使得昆明准静止锋自东向西移时,暖湿气流就会被抬升产生雷暴大风、冰雹等强对流天气。夏季影响云南天气系统较为复杂,夏半年昆明准静止锋出现时,云南出现雷暴的比例很高,其中主汛期(6—8 月)10 个站以上雷暴发生概率可达 83.45%(段旭等,2017)。此时西太平洋副热带高压(以下简称副高)大幅北抬,8 月脊线多年平均可达 28°N 左右,包括云南在内的整个华南在副高南侧气流控制之下,如果南海有台风生成,其在副高外围偏东气流引导之下,在广东、广西登陆后继续西行,或穿过海南岛进入北部湾在越南北部登陆,均会对云南产生较大影响,可产生暴雨、强对流等天气。

从雷暴大风出现频次日分布(图 2b)可见,午后到傍晚(即 12—22 时)是雷暴大风出现较集中的时段共发生约 253 次,占总数的 89.4%,其中 14—20 时为高峰期,极值出现在 16—17 时,占总数的 28.8%,07—10 时是一天中出现最少的时段。可见云南雷暴大风日变化与我国其他一些地区有相似分布特征(方翀等,2017;费海燕等,2016;许霖等,

2017),这可能由于午后到傍晚是一天中热力条件和
不稳定条件最佳的时段,最有利于风暴的形成和发
展(柴东红等,2017),加之不同海拔高度梯度变化更
容易在午后到傍晚造成局地环流触发对流发展
(Yang et al,2015)。

为了进一步了解发生雷暴天气时,雷暴和雷暴
大风过程持续时间的情况,参考上节内容,定义某小
时内某个站点附近半径范围 30 km 内监测到非孤
立闪电活动(2 次及以上)为一次雷暴事件,得到
153 249 次雷暴样本(含雷暴大风),结合上一节结
论,可知雷暴大风样本仅占全部雷暴样本的 1.85%,
雷暴大风出现次数远小于雷暴出现次数,表明大多
数雷暴活动并不伴有雷暴大风天气的出现。另外计
算雷暴过程开始时间和结束时间的差值作为雷暴过
程持续时间,同理得到雷暴大风过程持续时间并进
行比较(图 2c),可知绝大多数雷暴大风、雷暴的过
程持续时间均在 1~4 h,占各自总数的比例分别为
88.6%、69.6%;雷暴大风最长持续时间为 17 h,而
雷暴可达 21 h。这种雷暴大风持续时间分布情况

与贵州类似(李力等,2020),而与华北地区不同,华
北地区多数雷暴大风过程持续时间为 4~8 h(方翀
等,2017)。

对雷暴大风风速大小进行统计(图 2d),超过
50% 风速值集中在 $17.0 \sim 18.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
以上的强雷暴大风只占 4.8%;另外按风力等级来
看,8 级风($17.2 \sim 20.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)最多,占总数的
69.1%。极端强雷暴大风出现在 2016 年 4 月 19 日
红河建水,风速达 $39.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (12 级以上)。对比
中国其他省份或地区雷暴大风风速分布情况,北京
地区 $17 \sim 19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风速占个例总数的 34%(秦丽
等,2006);山东在 8~9 级($17.2 \sim 24.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)的风
力占比为 80.8%(杨晓霞等,2014);华北地区雷暴大
风以 8 级风为主,占比超过 80%(方翀等,2017);中国
 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的极端雷暴大风占比为 4.5%(马淑萍
等,2019)。可知云南 $19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下雷暴大风的比
较北京地区大;雷暴大风风力以 8~9 级风为主,与山
东、华北地区的情况类似; $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的极端雷暴
大风占比与我国平均情况基本一致。

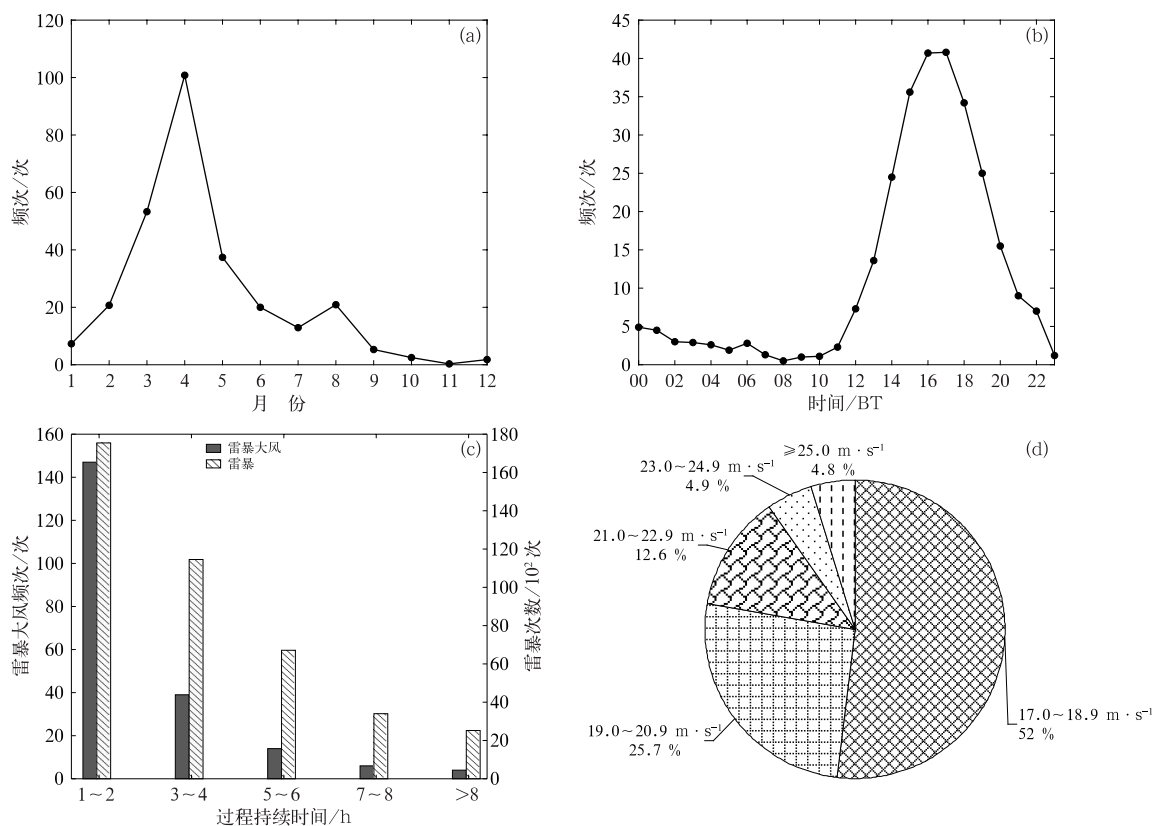


图 2 2011—2020 年云南雷暴大风频次时间和风速分布

(a)月分布,(b)日分布,(c)过程持续时间,(d)风速

Fig. 2 The time and speed distribution of thunderstorm gale frequency in Yunnan during 2011–2020

(a) monthly, (b) daily, (c) duration, (d) speed

2.2 空间分布特征

从雷暴大风全年频次空间分布(图 3a)来看, 53.6%的站点频次为 2 次以上, 4 次以上站点主要集中在玉龙雪山和苍山以东, 以及哀牢山、无量山附近区域, 其中大理、玉溪华宁的频次高达 7 次以上。由于春季(图 3b)雷暴大风发生频次占比为 67.6%, 因此其空间分布形态与年平均大体相同。夏季(图 3c)雷暴大风发生频次占比为 19%, 大值区主要分布在丽江东部的金沙江河谷、昆明东北部小江河谷以及普洱中东部。

这种雷暴大风的分布可能与影响云南天气系统和地形有密切的关系, 由于云南春、夏季南支槽、昆明准静止锋、孟加拉湾风暴以及低涡切变系统等影响频繁(许美玲等, 2011; 段旭等, 2017), 使得冷暖空气在山脉附近交汇, 加之地形抬升作用使得雷暴大风出现概率加大。另外云南山脉、河谷、湖泊众多, 如大理受苍山和洱海的影响(徐安伦等, 2010; 许

鲁君等, 2014), 可能存在着山谷风和湖陆风两者叠加效应引起的局地环流; 丽江东部和四川攀枝花交界区域, 受金沙江干热河谷地形坡度影响闪电活动较多(Xie et al, 2013; 刘雪涛等, 2019), 也为雷暴大风天气发生提供了较为有利的条件。

3 区域性雷暴大风环流形势合成分析

雷暴大风天气的范围越大, 出现站次越多, 造成灾害也越严重, 因此定义当某日云南四分之一以上州(市)有站点出现雷暴大风则记为一个区域性雷暴大风过程, 统计得到 77 个天气个例过程(表 2)。并参考孙继松等(2014)和许美玲等(2011)研究方法将区域性雷暴大风进行分类, 分为南支槽型、低压槽型和准正压型。

由各类型雷暴大风的统计结果可知(表 2), 各类型雷暴大风样本数合计为 1440 个, 约占全部雷暴大风样本数的 50.9%。无论是天气个例数, 还是

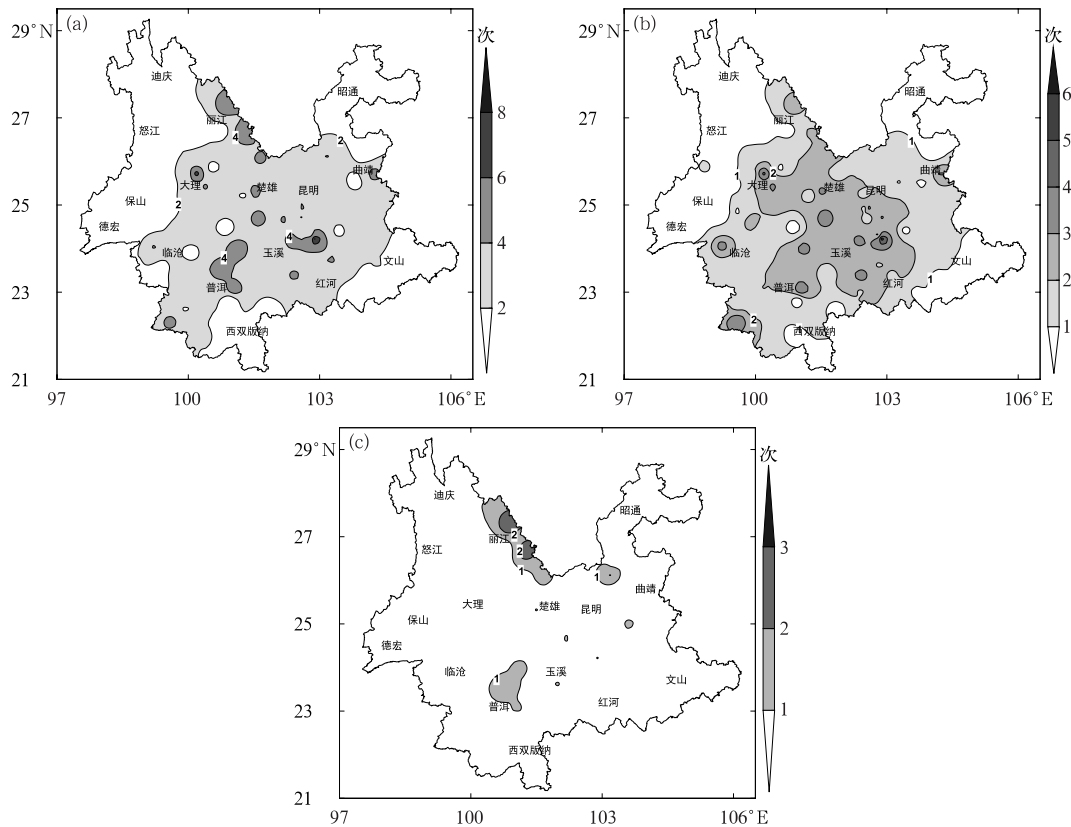


图 3 2011—2020 年云南雷暴大风发生频次空间分布

(a) 全年, (b) 春季, (c) 夏季

Fig. 3 Spatial distribution of thunderstorm gale frequency in Yunnan during 2011–2020

(a) annual, (b) spring, (c) summer

表 2 2011—2020 年云南各类型区域性雷暴大风的统计结果

Table 2 Statistics of regional thunderstorm gales of various types Yunnan during 2011—2020				
	南支槽型	低压槽型	准正压型	合计
W_n /个	65	9	3	77
S_n /个	1308	99	33	1440
P_R /%	46.2	3.5	1.2	50.9

注： W_n 、 S_n 、 P_R 分别为各类型雷暴大风的天气个例数、样本数和雷暴大风样本数占全部雷暴大风样本数的比率。

Note: W_n , S_n , P_R indicate number of weather cases, number of sample for regional thunderstorm gales of various types, proportion of S_n in total thunderstorm gales, respectively.

样本数,均表现为南支槽型最多、准正压型最少;其中南支槽型、低压槽型、准正压型天气个例数分别为 65、9、3 个。从各天气型月分布情况来看(图 4a),南支槽型主要出现在冬、春季(12 月至次年 5 月),低压槽型主要出现在 4—6 月,这两个类型均在 4 月出现最多;准正压型仅在 8 月出现。从各天气型日分布情况来看(图 4b),各类型与全部雷暴大风样本分布趋势基本一致(图 2b),集中出现在 12—20 时,而低压槽型在 00—02 时还出现了一个次高峰。另外从月分布和日分布出现频次数值上看,南支槽型比其他类型均大一个量级。

使用 NCEP 再分析资料对表 2 中各类型区域性雷暴大风天气个例 08 时高空环流形势和沿 21°~29°N 纬向平均的水平风和相对湿度垂直剖面进行合成分析如图 5。

3.1 南支槽型

该型雷暴大风发生时 700 hPa 上(图 5a)南支槽

位于 90°~95°E 附近,槽前风速超过 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,偏西急流主要在云南中南部地区,500 hPa 上南支槽位于 95°E 附近,其超前或者同位相于 700 hPa 南支槽,槽前偏西急流几乎控制整个云南,大部地区风速超过 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,形成高低层间强的垂直风切变。从沿 21°~29°N 纬向平均的水平风和相对湿度垂直剖面合成分析图(图 5b)看,200~300 hPa 云南上空水平风速超过 $30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,高空为偏西风急流带控制,高低空偏西急流的耦合为强对流天气发生提供较好动力条件,张腾飞等(2018)指出这种高空深厚强急流带和强垂直风切变导致中高层强斜压性加大而加强上升运动促使强对流天气发展。而在 100°~107°E 500 hPa 以上相对湿度小于 50%,相对湿度超过 70%的区域均在 650 hPa 以下,可见上干下湿层结结构明显,且低层为偏南风,随高度顺转为偏西风,整层大气以暖平流为主,为强对流天气的发生提供不稳定条件。14 时地面图(图略),近地面空气增温迅速,滇中及以东区域地面热低压发展,在干燥西风带上强而宽广的急流带上动量下传和气压梯度增大共同作用下,引起地面风速增大,山区地形以及近地面层辐合线附近的辐合上升运动,触发对流不稳定能量释放,产生强对流,造成雷暴大风。在此种类型环流影响下,由于 600 hPa 以上以偏西急流为主,不利于孟加拉湾水汽大量地向云南上空输送,大气湿层较浅薄,大范围强降水天气难以产生,而以雷暴活动和大风天气为主,有时局部地区也伴有冰雹产生。

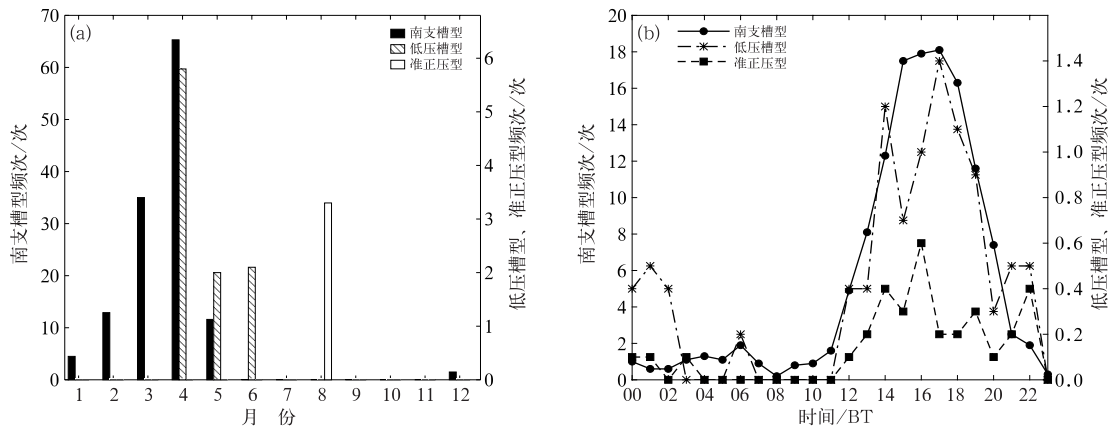


图 4 2011—2020 年云南各类型区域性雷暴大风出现频次
(a)月分布,(b)日分布

Fig. 4 Regional thunderstorm gale frequency of various types in Yunnan during 2011—2020
(a) monthly, (b) daily

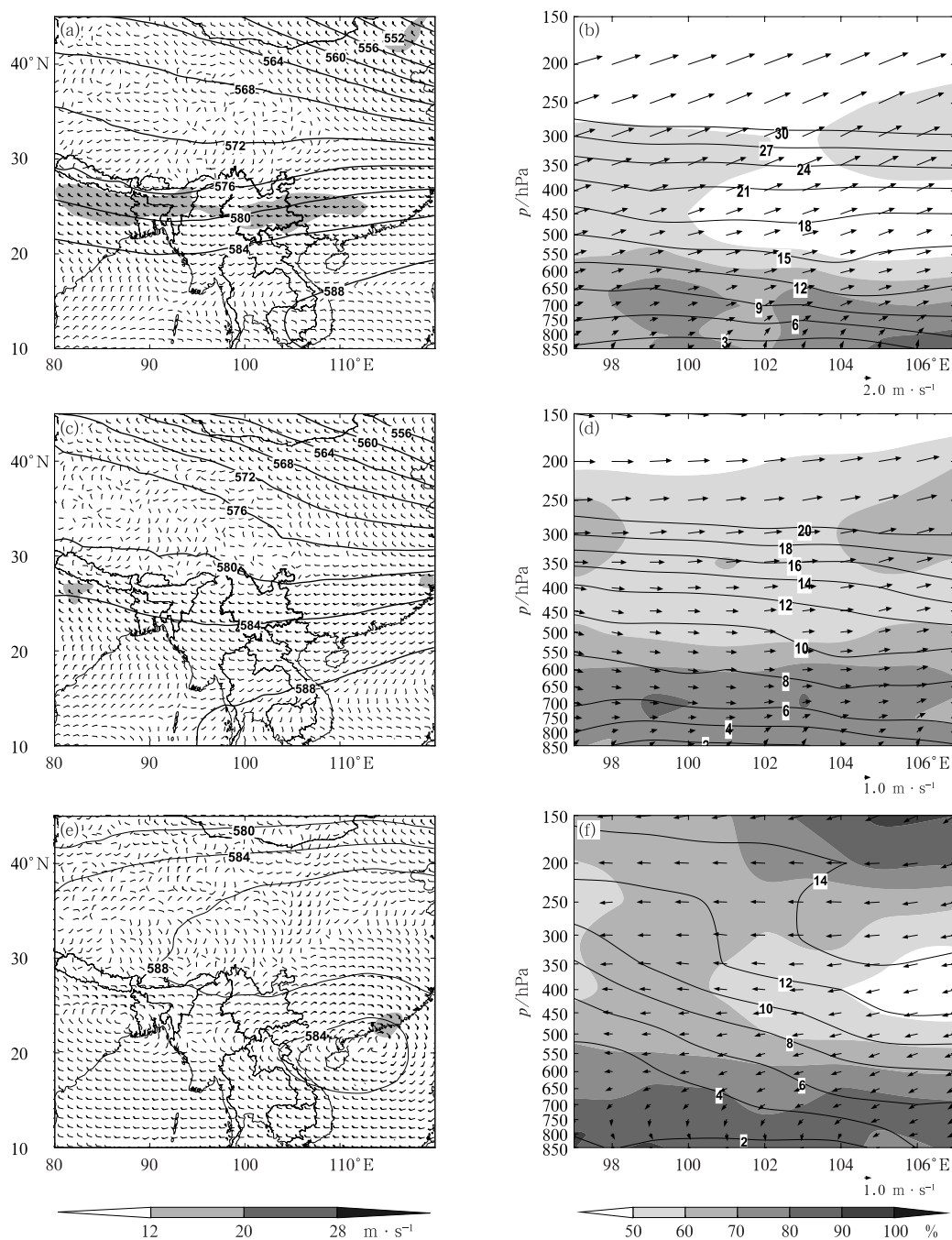


图 5 2011—2020 年云南区域性雷暴大风过程 08 时(a,c,e)高空环流形势合成分析

(等值线:500 hPa 位势高度,单位:dagpm;风羽、阴影:700 hPa 风场)和

(b,d,f)沿 21°~29°N 纬向平均的水平风(风矢:水平风;等值线:风速,

单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)以及相对湿度(阴影)垂直剖面合成分析

(a,b)南支槽型,(c,d)低压槽型,(e,f)准正压型

Fig. 5 (a, c, e) Composited synoptic situations (contour: 500 hPa geopotential height, unit: dagpm; barb and shaded: 700 hPa wind) and (b, d, f) vertical cross-sections of zonal mean horizontal wind (wind vector) and wind speed (contour, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), relative humidity (shaded) along 21°–29°N of regional thunderstorm gales in Yunnan at 08:00 BT during 2011–2020 (a, b) southern branch trough type, (c, d) low pressure trough type, (e, f) quasi-barotropic type

3.2 低压槽型

该型雷暴大风发生时高空 500 hPa 上(图 5c)四川东部至云南东部有低槽东移南压,槽后偏北风引导冷空气南下,700 hPa 上川滇间有东西向切变线南压,切变线南部偏南暖湿气流明显,形成高层干冷空气叠加在低层暖湿空气之上,大气层结不稳定度增大。从图 5d 水平风和相对湿度垂直剖面合成图上看,高低层垂直风切变数值大小不及南支槽型,但相对湿度 70% 以上的区域已上升至 600 hPa 附近,水汽条件要好于南支槽型,500 hPa 以上相对湿度在 50% 左右,700 hPa 以下低层为偏南风,之后风向随高度顺转到 500 hPa 附近的偏西风,再逐渐逆转到高层 200 hPa 附近的西偏南风,表明低层存在暖平流、高层存在冷平流,上干冷下暖湿不稳定层结明显。14 时地面图(图略),云南东北部及东部有冷高压中心存在,高压前部昆明准静止锋加强西移至云南中部,锋前抬升运动明显,与山区地形环流等共同作用均可触发强对流天气,雷暴大风、短时强降水、冰雹等天气过程。另外统计该型雷暴大风所有天气个例,均伴有昆明准静止锋的存在,这可能与冷空气南下影响昆明准静止锋的维持、摆动和加强西进有关(段旭等,2017)。

3.3 准正压型

由于该型雷暴大风发生在 8 月(图 4a),根据国家气候中心提供的 74 项环流指数,计算 8 月副高脊线位置,1951—2020 年平均为 28.1°N ,2011—2020 年平均为 30.2°N 。再将准正压型雷暴大风当天 NCEP 资料的 4 个时次平均处理为日值,计算得到准正压型副高脊线平均位置为 29.9°N ,南北区间为 $26.7^{\circ}\sim 33.6^{\circ}\text{N}$ 。可见当发生准正压型雷暴大风时,副高位置较 1951—2020 年 8 月平均值偏北,较 2011—2020 年 8 月平均值略偏南。

该型雷暴大风发生时(图 5e),500 hPa 上副高呈带状分布,西脊点位于 90°E 附近,中心气压值高,强度较强,云南大部处于副高 588 dagpm 线南侧偏东气流控制下。副高引导热带气旋西移,热带气旋外围气流影响云南,若 700 hPa 风速增大,可形成东北风低空急流。另外从地形海拔分布图(图 1)可见,云南海拔高度呈现西北高东南低,热带气旋西北侧的偏东气流进入云南后将受到地形的阻挡风速减弱,因此在云南中部及南部存在风速由大变小的风

速辐合区,上升运动明显,为强对流天气提供较好的动力条件。从图 5f 水平风和相对湿度垂直剖面合成图上看,水汽条件明显好于前两种类型,550 hPa 附近相对湿度超过 70%,由于此类雷暴大风主要发生在云南东部和南部,故仅在 102°E 以东区域 500~300 hPa 相对湿度小于 60%,与低层高湿区形成上干下湿层结结构,利于强对流发生。另外热带气旋作为高能高湿的天气系统,其西侧较强的偏东气流可将其外围的水汽大量向云南境内输送,水汽较为充沛;加之该型主要发生在夏季, 0°C 和 20°C 层高度均偏高,不利于冰雹生成,以雷暴活动、短时强降水和雷暴大风天气为主。

综上所述,从各类型区域性雷暴大风看,南支槽型动力条件较好,而准正压型水汽条件较好,低压槽型介于两者之间。

4 雷暴大风发生前环境条件分析

4.1 热力条件

选取 14 时 CAPE、LI、 $\Delta T_{700-500}$ 等热力不稳定参数来分析雷暴大风发生前的热力条件,LI 越小表示大气越不稳定,CAPE 和 $\Delta T_{700-500}$ 越大则大气越不稳定。

CAPE 是风暴潜在强度的一个重要指标,从各月及各天气型雷暴大风的 CAPE 数值来看(图 6a),均值在 $100\sim 1000\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,相对中国中东部及沿海地区整体偏小(杨晓霞等,2014;杨新林等,2017;方翀等,2017;王迪等,2020;王亚男等,2020),这可能是由于云南海拔偏高所造成的(孙继松等,2014)。另外柴东红等(2017)研究指出西南地区强雷暴大风主要发生在春季,气候较干燥,CAPE 相对较低。云南春季 CAPE 均值大于 $300\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,这与胡娟等(2015)研究指出云南对流性大风潜势 CAPE 阈值相当。夏季对流不稳定能量有所增强,6—8 月 CAPE 变幅相似,第 25%~75% 分位值在 $600\sim 1200\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。南支槽型和低压槽型中位数都低于 $310\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,准正压型中位数在 $1000\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右。可见春季各月以及南支槽型需要的对流不稳定能量相对较低。

3—8 月 LI 指数(图 6b)第 75% 分位值分别为 -0.3 、 -0.9 、 -1.4 、 -2.5 、 -2.7 和 -3°C ,南支槽型和低压槽型为 -1°C 左右,准正压型小于 -3°C ,对

比华南地区(杨新林等,2017)春、夏季出现雷暴大风的 LI 指数第 75%分位值分别为 -0.9°C 和 -3.1°C , 其数值大致相当,而大于中国北方地区(王亚男等,2020)的第 75%分位值(-4°C)。可见雷暴大风发生时,云南大气层结不稳定性与华南大体相当,而弱于中国北方。

王秀明等(2012)研究指出 850~400 hPa 的自由大气中,NCEP 再分析资料温度差多在 1°C 以下,NCEP 再分析资料的温度与探空资料较接近。 $\Delta T_{700-500}$ 可反映对流层中低层的温度递减率情况,以此判断气层的稳定度状况(张小玲等,2012)。3—8 月 $\Delta T_{700-500}$ (图 6c)是先下降后平稳的变化趋势,

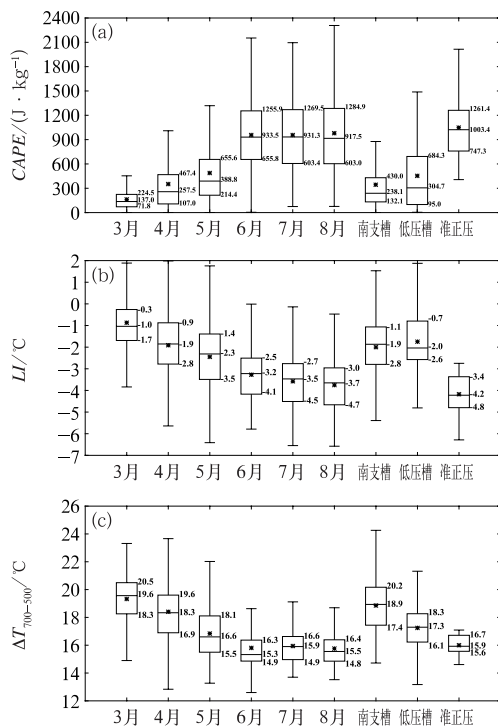


图 6 2011—2020 年云南雷暴大风日 3—8 月 14 时各天气型热力参数箱线图

(a)CAPE, (b)LI, (c) $\Delta T_{700-500}$

(箱线图中触须的上端和下端分别表示统计最大值和最小值,箱体三条横线自下而上分别代表第 25%、50%和 75%分位值,“*”表示平均值,下同)

Fig. 6 Synoptic box plots of thermal parameters for thunderstorm gale in Yunnan at 14:00 BT from March to August during 2011–2020

(a) CAPE, (b) LI, (c) $\Delta T_{700-500}$

(The upper and lower ends of whisker lines represent the statistical maximum and minimum while the three horizontal lines of the box from bottom to top indicate the 25th, 50th, 75th percentiles respectively, “*” is the mean value, the same below)

其中春季 3 月第 25%分位值为 18.3°C ,夏季 6—8 月第 25%分位值为 14.9°C 左右,可见春季整体高低层温差较夏季更大,表明发生雷暴大风时春季较夏季大气不稳定性更大。另外胡娟等(2015)研究指出云南对流性大风 $\Delta T_{700-500}$ 潜势预报指标大于 14°C ,与本研究各月和天气型第 25%分位值均大于 14°C 左右的结果相符。南支槽型箱线图箱体较宽,即高低空的温差值较分散,而准正压型温差值较集中。

4.2 动力条件

强的垂直风切变有利于风暴的持续发展,可以增强中层干冷空气的吸入,加强风暴中下沉气流和低层冷空气外流。王秀明等(2012)研究指出 NCEP 再分析资料对流层中高层风与探空差异不大,其中 700~500 hPa 的风与探空近乎一致,NCEP 再分析资料计算的深层、中层风垂直切变参量可靠性较高。加之由于云南海拔大多在 1500 m 以上,850 hPa 多为地面,风速易受地形影响较大,因此这里选用中层垂直风切变($\text{SHRL}_{500-700}$)来分析动力条件,由图 7 可知,春季各月和各天气型的 $\text{SHRL}_{500-700}$ 均值在 $2 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,夏季各月中层垂直风切变均值在 $1 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。各天气型中南支槽型较大,其第 25%分位值为 $3.3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,这与张腾飞等(2018)研究中指出南支槽线型雷暴中低层垂直切变 $3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 大小相当。可见春季中层垂直风切变比夏季大,春季大气斜压性较强,利于对流发展,因此雷暴大风发生时,春季动力作用较夏季明显,这与我国一些地区春季的情况类似(杨晓霞等,2014;杨新林等,2017;高晓梅等,2019;王迪等,2020)。

另外从 $\text{SHRL}_{500-700}$ 均值的数值来看,云南相对于中国其他地区整体偏小,如北京地区在 $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$

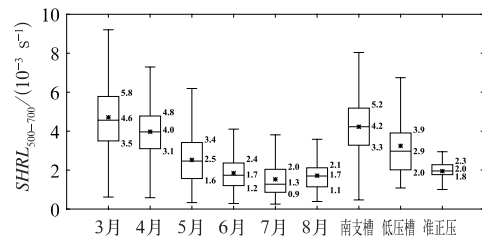


图 7 同图 6,但为动力参数 $\text{SHRL}_{500-700}$

Fig. 7 Same as Fig. 6, but for dynamic parameters $\text{SHRL}_{500-700}$

以上(雷蕾等,2011)和湖南在 $9 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 以上(许霖等,2017),这可能与西南地区地面海拔相对较高有关(费海燕等,2016)。

4.3 水汽条件

雷暴大风发生时,水汽含量和垂直分布影响风暴强度和结构特征,且水汽主要集中在对流层低层,因此本文选取大气可降水量(PW)和 700 hPa 比湿(Q_{700})来表征水汽条件。

从 PW 各月变化来看(图 8a),3—8 月 PW 平均值分别为 14.3、21.3、27.0、34.4、33.4、34.8 mm,夏季各月大于春季各月,均较贵州春季(35 mm)、夏季(45 mm)PW 平均值小(李力等,2020)。各天气型平均值分别为 19.0、23.5、34.2 mm,准正压型最大。

Q_{700} 与 PW 类似(图 8b),夏季水汽条件比春季充沛,春季第 25% 分位值在 $8 \sim 10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,夏季 25% 分位值为 $12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右,各天气型第 25% 分位值分别为 8.5、10.3 和 $13.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,准正压型最大。这种水汽分布可能与大尺度环流有关,夏季云南常处于副高外围,受到低层西南季风和东南季风的共同影响,使得该区域整层大气水汽含量相对较多。

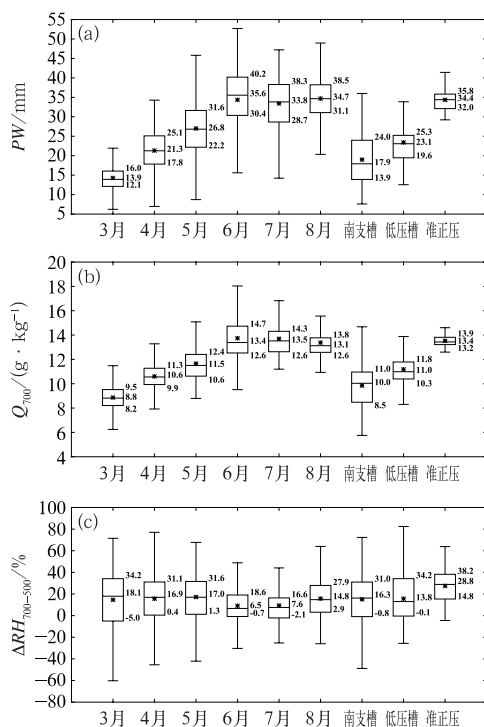


图 8 同图 6,但为水汽参数

(a)PW, (b) Q_{700} , (c) $\Delta RH_{700-500}$

Fig. 8 Same as Fig. 6, but for water vapor parameters

(a) PW, (b) Q_{700} , (c) $\Delta RH_{700-500}$

另外,雷暴大风发生不仅需要低层具有充沛的水汽,而且要求高层湿度相对较小,高层干冷空气的侵入有利于强雷暴的产生和发展,这里分析 $\Delta RH_{700-500}$ 在一定程度上能反映大气是否存在上干下湿的层结结构特点。从各月和各天气型高低层相对湿度差来看(图 8c),其中位数均为正值,说明在多数情况下,云南雷暴大风发生时高低层基本满足上干下湿的层结结构,其中 3—8 月中位数分别为 18.1%、16.9%、17.0%、6.5%、7.6%、14.8%,春季各月上干下湿的结构较夏季明显。各天气型中位数分别为 16.3%、13.8%、28.8%,可见准正压型上干下湿结构最明显。

4.4 物理量参数阈值

通过上述分析发现,云南出现雷暴大风前,热力和水汽条件夏季较春季明显,而动力条件则相反。南支槽型动力条件明显,准正压型热力和水汽条件明显,低压槽型情况介于这两者之间。

在以上箱线图分析结果基础上,将第 25% 分位值或第 75% 分位值左右作为参考阈值,即当大于或小于这个阈值时,有 75% 左右的样本都包括在其内,将此边界值作为物理量参数的参考阈值。分别给出云南 3—8 月和南支槽型、低压槽型、准正压型背景下,CAPE、LI、 $\Delta T_{700-500}$ 、 $SHRL_{500-700}$ 、PW、 Q_{700} 和 $\Delta RH_{700-500}$ 的参考阈值,具体阈值如表 3 所示。

4.5 散点密度分布

由于每个环境参数各有其特点,单一环境参数很难判断一个地方是否会出现雷暴大风等强对流天气,为更好了解雷暴大风发生时的大气环境,需对各参数进行综合分析。Brooks et al(2003)研究指出当存在一定 CAPE($100 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上),配合强垂直风切变,利于风雹天气发生。杨新林等(2017)、田付友等(2017)也在其研究中尝试综合应用多种物理量对不同类型强对流天气进行综合分析。本文选用 CAPE、 $SHRL_{500-700}$ 、PW 来分析散点密度分布,以获取雷暴大风发生时的热力、动力和水汽条件域值分布情况。

图 9a 为 3—8 月雷暴大风日 14 时 CAPE 和 $SHRL_{500-700}$ 散点密度图,圆点颜色代表散点密度,其计算过程为:首先将 CAPE 和 $SHRL_{500-700}$ 两个物理量的最小值和最大值之间分为若干等分,把散点数据网格化,然后求出每个网格点内的散点数。可

表 3 2011—2020 年云南雷暴大风物理量参数参考阈值

Table 3 Physical parameter thresholds of thunderstorm gales in Yunnan during 2011—2020

物理量	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	天气型		
							南支槽	低压槽	准正压
CAPE/(J · kg ⁻¹)	>70	>100	>210	>650	>600	>600	>130	>90	>740
LI/℃	<0	<-1	<-1	<-2	<-2	<-3	<-1	<-1	<-3
ΔT ₇₀₀₋₅₀₀ /℃	>18	>16	>15	>14	>14	>14	>17	>16	>15
SHRL ₅₀₀₋₇₀₀ /(10 ⁻³ s ⁻¹)	>3	>3	>1	>1	>1	>1	>3	>2	>1
PW/mm	>12	>17	>22	>30	>28	>31	>13	>19	>32
Q ₇₀₀ /(g · kg ⁻¹)	>8	>9	>10	>12	>12	>12	>8	>10	>13
ΔRH ₇₀₀₋₅₀₀ /%	>-5	>0	>1	>-1	>-2	>2	>-1	>0	>14

注：除 LI 外以小于第 75% 分位值作为参考阈值，其他物理量均以大于第 25% 分位值作为参考阈值。

Note: Reference threshold value of LI is less than 75th percentile value, and other physical parameters' are more than 25th percentile value.

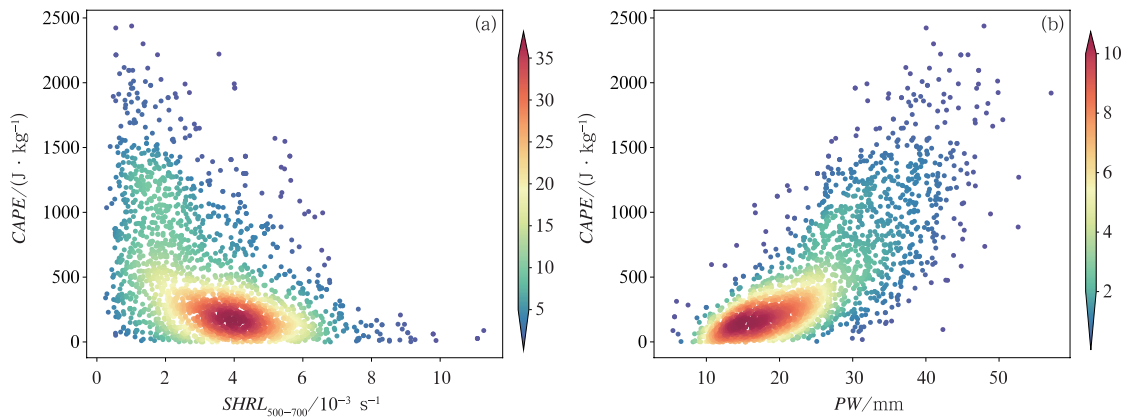


图 9 2011—2020 年 3—8 月云南雷暴大风日 14 时散点密度图

(a)CAPE 和 SHRL₅₀₀₋₇₀₀, (b)CAPE 和 PW

(圆点颜色为散点密度)

Fig. 9 The scatter density plots (colored dot: scatter density) of (a) CAPE and SHRL₅₀₀₋₇₀₀, and (b) CAPE and PW for thunderstorm gales at 14:00 BT from March to August in Yunnan during 2011—2020

见高密度大值区所对应 CAPE 大致在 50~250 J · kg⁻¹, SHRL₅₀₀₋₇₀₀ 约在 3 × 10⁻³ ~ 5 × 10⁻³ s⁻¹, CAPE 中心位置约在 100 J · kg⁻¹, SHRL₅₀₀₋₇₀₀ 中心位置约为 4 × 10⁻³ s⁻¹, 越接近中心位置散点密度越高。CAPE 和 PW 散点密度图呈现递减形态分布 (图 9b), 其高密度大值区所对应 CAPE 在 50~250 J · kg⁻¹, PW 在 11~20 mm, CAPE 中心位置约在 150 J · kg⁻¹, PW 中心位置约在 15 mm。以上分析表明, 只有当处于一定范围内的热力、动力和水汽环境条件下, 才越有利于雷暴大风出现, 在实际业务中综合考虑多种环境变量更利于提高预报雷暴大风准确度。

统计云南发生雷暴大风个例的大气可降水量情况 (表 4), 当日出现 20 个站次以上的雷暴大风个例主要发生在 3—5 月, 其中 3—4 月大气可降水量平均值大多在 10~20 mm, 加之该时段出现雷暴大风次数占全年的比例较大 (图 2a), 这也可能导致发生

雷暴大风高密度大值区的 PW 集中在 11~20 mm (图 9b); 而 5 月大气可降水量平均值超过 25 mm。20 个站次以下的雷暴大风个例全年各月均可发生, 这里仅给出 3—8 月一些个例的大气可降水量情况, 对比其与图 8a 的差别, 从两者值域范围来看, 对应月份大气可降水量结果是相符合的。

刘丹等 (2013) 研究指出 1948—2009 年在云贵高原地区, 年均大气可降水量日值大约在 11~31 mm, 其中云南西南部大气可降水量较多, 这可能是受西南季风的影响。任菊章等 (2014) 对比研究了三类再分析资料大气可降水量与 GPS 探测大气可降水量的差别, 从 2009 年大气可降水量日均值看, NCEP/NCAR 再分析资料中云南一些代表站点, 除西南部、南部的一些站点 (例如勐腊、蒙自) 日均大气可降水量在 20~30 mm, 其他大部分站点大气可降水量在 10~20 mm。王黄等 (2020) 研究了川藏地区海拔高于 1 km 的高原地区雷暴大风时指出, 高

原地区缺乏水汽,大气可降水量中值仅为 18 mm,第 25% 和第 75% 分位值分别为 13.7 mm 和 24.2 mm。本研究得出云南雷暴大风发生前大气可降水量在 11~20 mm,再结合王黄等(2020)、刘丹等(2013)和任菊章等(2014)的研究,也可以看出本研究中大气可降水量从数值范围上看是可信的。

云南发生雷暴大风前 CAPE 值较一些使用常规探空资料研究雷暴大风的地区整体偏小,例如北京出现雷暴大风时 CAPE 值达到 $1307\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ (雷蕾等,2011),山东 4—9 月发生雷暴大风时 CAPE 值在 $250\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上(杨晓霞等,2014),为说明云南雷暴大风发生前常规探空资料与 NCEP 再分析资料中 CAPE 的差别,下文将进行具体讨论。

4.6 云南雷暴大风发生前常规探空资料与 NCEP 再分析资料 CAPE 比较

这里选取当日云南发生 20 个站次以上的区域性雷暴大风个例,对探空站资料与 NCEP 再分析资料 CAPE 的差别进行比较,结果如表 5。

从昆明和腾冲两个站的 08 时探空资料上看,CAPE 主要表现为大气稳定(CAPE 值接近零),或有一定对流不稳定能量,但 CAPE 值均较小,14 时探空订正之后 CAPE 基本上都有大幅增加。例如从多个例平均值来看,昆明 CAPE 值从 08 时的 $33.0\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增大至 14 时的 $581.7\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,这与胡娟等(2015)研究指出云南省出现对流性大风前,

表 4 云南雷暴大风个例大气可降水量
Table 4 PW of thunderstorm gales in Yunnan

20 个站次以上		20 个站次以下	
个例日期/年-月-日	平均值/mm	个例日期/年-月-日	平均值/mm
2018-3-3	11.1	2018-3-6	13.8
2018-3-18	14.9	2012-4-22	23.6
2020-3-3	15.6	2016-5-12	22.7
2014-4-5	16.9	2014-6-4	37.2
2016-4-21	25.9	2016-6-7	35.3
2020-4-2	12.2	2016-7-10	33.8
2018-4-15	19.4	2017-7-31	38.3
2016-5-13	31.3	2016-8-14	34.1
2020-5-13	27.8	2018-8-16	38.3

表 5 云南区域性雷暴大风个例常规探空资料与 NCEP 再分析资料 CAPE 比较
Table 5 Differences of CAPE between observations and NCEP reanalysis data in Yunnan

个例日期	昆明 CAPE				腾冲 CAPE			
	08 时探空 /($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$)	14 时探空订正 /($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$)	14 时 NCEP /($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$)	差值 比率/%	08 时探空 /($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$)	14 时订正探 空/($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$)	14 时 NCEP /($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$)	差值 比率/%
2019-2-17	0	409.7	237.8	-42	16.1	273.5	110.5	-59.6
2020-3-3	0	652.8	245.1	-62.5	0	390.3	358.1	-8.3
2018-3-3	82.0	529.5	186.7	-64.7	0	1331.9	319.3	-76.0
2016-4-21	240.5	361.7	353.5	-2.3	0	475.8	593.7	24.8
2018-3-18	0	644.9	179.3	-72.2	0	546.0	189.2	-65.3
2019-3-19	0	83.2	181.9	118.6	0	1093.9	108.8	-90.1
2018-4-15	0	774.0	112.4	-85.5	0	396.3	246.5	-37.8
2020-1-6	84.1	319.9	485.6	51.8	214.4	286.2	12.2	-95.7
2020-5-13	78.2	827.8	115.5	-86.1	9.9	1007.0	603.1	-40.1
2017-4-20	0	1504.8	469.0	-68.8	116.6	850.5	480.5	-43.5
2020-4-10	42.6	351.2	235.1	-33.1	0	357.4	269.7	-24.5
2020-4-2	0	554.8	72.6	-86.9	0	487.7	197.0	-59.6
2020-4-17	0	607.3	246.4	-59.4	0.6	723.3	529.3	-26.8
2019-4-23	0	554.2	237.5	-57.2	0	993.5	67.6	-93.2
2016-4-22	0	864.7	380.5	-56.0	0	1775.6	740.1	-58.3
2019-3-20	0	266.2	213.4	-19.8	0	287.7	254.1	-11.7
平均值	33.0	581.7	247.0	-39.1	22.3	704.8	317.5	-47.9

注:差值比率表示 14 时 NCEP 资料与探空订正的 CAPE 差值,再除以 14 时探空订正所得的百分率。
Note: Percentage difference indicates the proportion of corrected sounding's CAPE minus NCEP's CAPE, and divided by corrected sounding's CAPE at 14:00 BT.

高空观测计算的对流不稳定能量不一定很大,70%的个例 CAPE 大于 $300 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 相类似。加之考虑云南雷暴大风发生时段主要在午后,因此在研究云南雷暴大风时,选用 14 时 CAPE 比选用 08 时的资料更具有代表性。

另外,从 14 时的探空订正与 NCEP 资料对比来看,探空订正资料 CAPE 相对于 NCEP 再分析资料,表现为整体偏大,例如昆明、腾冲的探空资料与 NCEP 资料 CAPE 差值比率分别为 -39.1% 、 -47.9% ,即 14 时 NCEP 资料 CAPE 与 14 时探空订正相比偏少了 39% 以上,这与王秀明等(2012)研究指出 NCEP 再分析资料直接输出的地面 CAPE 与探空资料计算结果相比明显偏小,不到其 60% 的结果相类似。

综上可知,在应用 NCEP 再分析资料对流有效位能时,应考虑其较探空资料 CAPE 整体偏小,并在实际工作中结合探空资料订正以后再加以合理应用。

4.7 物理量 6 h 变量分析

由于 NCEP 再分析资料存在一些局限性,如中低层温湿廓线与探空观测差异较大(王秀明等,2012),加之西南高原地区海拔大多超过 850 hPa,有时大气层结稳定度参数的数值表现出来似乎是稳定层结,但实际上却发生了强烈对流现象(孙继松

等,2014),因此只研究某一时次的物理量参数阈值还不足以很好地反映雷暴大风天气发生前的环境条件,基于前述雷暴大风出现时间的统计结论,云南绝大多数雷暴大风出现在 14—20 时,参考雷蕾等(2011)的方法,对 08—14 时 6 h 变量进行统计,来反映雷暴大风天气发生前物理量变化趋势(表 6)。热力参数 6 h 变量均为增大趋势,表明雷暴大风发生前大气层结不稳定加强,其中 CAPE、LI、 $\Delta T_{700-500}$ 的 6 h 变量均值分别为 $344.5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 -2.8°C 、 1.6°C 。动力条件方面,SHRL₅₀₀₋₇₀₀ 的 6 h 变量均值增大了 $0.6 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。大气可降水量和 Q_{700} 6 h 变量均值都小幅增大,分别为 0.8 mm 和 $0.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,可见雷暴大风发生前水汽条件变化不明显。另外 $\Delta RH_{700-500}$ 6 h 变化量均值为 -6.7% ,即 500 hPa 上相对湿度有所增加,结合表 3 可知雷暴大风发生前上干下湿层结结构维持但有所减弱,这可能与方翀等(2017)研究指出高原区域雷暴大风发生前 500 hPa 大多为湿平流而非干平流的结论有相似之处。

可见绝大多数物理量 6 h 变量均向着有利于雷暴大风发生方向发展,在合适的环流背景下,需要关注模式预报的热力、动力和水汽等参数指标及其未来 6 h 变化趋势,当各指标总体表现出增大的趋势时,应当在预报服务中提高雷暴大风潜势预报发布概率。

表 6 2011—2020 年云南雷暴大风发生前物理量 6 h 变量

Table 6 The 6 h variations of physical parameters for thunderstorm gales in Yunnan during 2011—2020

物理量	平均值	指标 1		指标 2		指标 3	
		变化量	百分率/%	变化量	百分率/%	变化量	百分率/%
CAPE/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)	344.5	≥ 100	74.3	≥ 300	39.3	≥ 500	24.1
LI/ $^\circ\text{C}$	-2.8	≤ -2	64.7	≤ -3	41.5	≤ -4	24.3
$\Delta T_{700-500}/^\circ\text{C}$	1.6	≥ 0	82.6	≥ 2	38.2	≥ 4	7.8
SHRL ₅₀₀₋₇₀₀ /(10^{-3} s^{-1})	0.6	≥ 0	66.1	≥ 1	34.6	≥ 2	13.9
PW/mm	0.8	≥ 0	67.7	≥ 1	49.0	≥ 2	28.0
$Q_{700}/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.9	≥ 0	87.0	≥ 1	38.8	≥ 2	12.5
$\Delta RH_{700-500}/\%$	-6.7	≤ 0	61.2	≤ -5	50.2	≤ -10	40.3

注:平均值表示样本变化量均值,百分率表示相应变化量的个例数占比。

Note: Average value indicates mean of changes in different samples, percentage indicates proportion of changes for different samples in total number of thunderstorm gales.

5 结 论

(1)云南雷暴大风主要集中出现在 2—8 月,呈现双峰型分布,主峰出现在 4 月,次峰出现在 8 月,春季多于夏季,与西南地区单站平均月分布情况类

似。14—20 时易出现雷暴大风,日峰值出现在 16—17 时,日变化与我国华北、湖南等一些省份或地区有类似分布特征,这可能与午后至傍晚是一天中热力条件和不稳定条件最佳的时段,最有利于风暴的形成和发展有关。多数雷暴大风过程持续时间为 1~4 h。超过 50% 雷暴大风风速在 $17.0 \sim 18.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,

$25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的强雷暴大风只占 4.8%, 8 级风 ($17.2 \sim 20.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 最多。对比发现云南 $19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下雷暴大风的比例较北京地区大; 雷暴大风风力以 8~9 级风 ($17.2 \sim 24.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 为主, 与山东、华北地区的情况类似; 云南 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的极端雷暴大风占比与我国平均情况基本一致。

(2) 云南雷暴大风高发区主要分布在玉龙雪山和苍山以东, 以及哀牢山、无量山附近等区域, 年均发生次数为 4 次以上, 空间分布可能与影响云南天气系统和地形有密切的关系。

(3) 根据高空大气环流背景将云南区域性雷暴大风分类为南支槽型、低压槽型、准正压型, 各类型雷暴大风天气个例数分别为 65、9、3 个, 样本数合计约占全部雷暴大风样本数的 50.9%。南支槽型主要出现在冬春季, 低压槽型主要出现在 4—6 月, 这两个类型出现最多均在 4 月; 准正压型仅出现在 8 月。各类型雷暴大风与所有雷暴大风日分布趋势基本一致, 集中在 12—20 时。并分析了各天气型下高低层大气环流形势、水平风以及相对湿度配置情况, 发现南支槽型动力条件较好, 准正压型水汽条件较好, 低压槽型介于两者之间。

(4) 采用 CAPE、LI、 $\Delta T_{700-500}$ 、 $\text{SHRL}_{500-700}$ 、PW、 Q_{700} 和 $\Delta \text{RH}_{700-500}$ 等环境物理量参数, 按月和分天气型分析云南雷暴大风发生前的热力、动力和水汽条件情况, 并给出各物理量预报阈值。发现春季以动力作用为主, 夏季以热力作用为主, 这与我国华南、山东等地区情况相似。多数情况下, 云南雷暴大风发生时高低层基本满足上干下湿的层结结构, 其中准正压型上干下湿结构最明显; 春季水汽含量差别大, 夏季差别小。

(5) CAPE、 $\text{SHRL}_{500-700}$ 以及 PW 散点密度分布显示, 高密度大值区所对应的 CAPE 大致在 $50 \sim 250 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{SHRL}_{500-700}$ 约在 $3 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, PW 在 $11 \sim 20 \text{ mm}$, 当这些环境物理量越多分布于这些高密度区, 就越有利于雷暴大风出现, 在实际业务中综合考虑多种环境变量更利于提高预报雷暴大风准确度。另外, 在应用 NCEP 再分析资料 CAPE 时, 应考虑其较探空资料 CAPE 整体偏小, 并在实际工作中结合探空资料订正以后再加以合理应用。而本研究中 PW 的统计结果是根据雷暴大风日的 14 时 NCEP 再分析资料所得, 可能与实际的 PW 存在差异, 在实际工作中应用也需注意。

(6) 分析了雷暴大风发生前 6 h 物理量变化情

况, 发现绝大多数变量均有不同程度的增大趋势, 表明均向着有利于雷暴大风发生方向发展, 因此在合适的环流背景下, 需要关注模式预报的热力、动力和水汽等参数指标及其未来 6 h 变化趋势, 当各指标总体表现出增大的趋势时, 应当在预报服务中提高雷暴大风潜势预报发布概率。

以上分析得到的环境物理量阈值分布可以为云南雷暴大风潜势预报提供一定参考依据, 但雷暴大风过程可能同时伴有短时强降水、冰雹等其他强对流天气现象, 各种天气现象的发生发展机制有所差异, 如何应用物理量参数区分和描述各类强对流天气有待进一步研究。另外本文所得结果未详细考虑云南复杂地形对雷暴大风的作用, 同时研究受到所选用再分析资料的时空分辨率限制, 无法完全精确刻画雷暴大风发生时环境条件, 这些因素都使得用物理量统计雷暴大风环境特征受到一定影响。

参考文献

- 柴东红, 杨晓亮, 吴紫煜, 等, 2017. 京津冀地区雷暴大风天气的统计分析[J]. 暴雨灾害, 36(3): 193-199. Chai D H, Yang X L, Wu Z Y, et al, 2017. The statistical analysis of thunderstorm gales over Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Torr Rain Dis, 36(3): 193-199(in Chinese).
- 段旭, 段玮, 王曼, 等, 2017. 昆明准静止锋[M]. 北京: 气象出版社: 21-23. Duan X, Duan W, Wang M, et al, 2017. Kunming Quasi-stationary Front[M]. Beijing: China Meteorological Press: 21-23 (in Chinese).
- 樊李苗, 俞小鼎, 2020. 杭州地区夏季午后雷暴大风环境条件分析[J]. 气象, 46(12): 1621-1632. Fan L M, Yu X D, 2020. Analysis on the environment conditions of afternoon thunderstorm in Hangzhou[J]. Meteor Mon, 46(12): 1621-1632(in Chinese).
- 方翀, 王西贵, 盛杰, 等, 2017. 华北地区雷暴大风的时空分布及物理量统计特征分析[J]. 高原气象, 36(5): 1368-1385. Fang C, Wang X G, Sheng J, et al, 2017. Temporal and spatial distribution of North China thunder-gust winds and the statistical analysis of physical characteristics[J]. Plateau Meteor, 36(5): 1368-1385(in Chinese).
- 费海燕, 王秀明, 周小刚, 等, 2016. 中国强雷暴大风的气候特征和环境参数分析[J]. 气象, 42(12): 1513-1521. Fei H Y, Wang X M, Zhou X G, et al, 2016. Climatic characteristics and environmental parameters of severe thunderstorm gales in China[J]. Meteor Mon, 42(12): 1513-1521(in Chinese).
- 高晓梅, 俞小鼎, 马守强, 等, 2019. 鲁中地区强对流天气的气候特征及相关环境参数特征分析[J]. 海洋气象学报, 39(3): 43-54. Gao X M, Yu X D, Ma S Q, et al, 2019. Climatic characteristics and environmental parameters of severe convective weather in central region of Shandong Province[J]. J Mar Meteor, 39(3): 43-54(in Chinese).

- 胡娟,李华宏,李湘,等,2015.云南对流性大风天气的潜势预报及雷达回波特征[J].气象科技,43(6):1074-1084. Hu J, Li H H, Li X, et al, 2015. Radar echo characteristics and potential prediction of convective gale in Yunnan Province[J]. Meteor Sci Technol, 43(6):1074-1084(in Chinese).
- 雷蕾,孙继松,魏东,2011.利用探空资料判别北京地区夏季强对流的天气类别[J].气象,37(2):136-141. Lei L, Sun J S, Wei D, 2011. Distinguishing the category of the summer convective weather by sounding data in Beijing[J]. Meteor Mon, 37(2): 136-141(in Chinese).
- 李力,万雪丽,齐大鹏,等,2020.贵州省雷暴大风时空分布及对流参数特征分析[J].中低纬山地气象,44(2):1-8. Li L, Wan X L, Qi D P, et al, 2020. Temporal and spatial distribution of Guizhou thunderstorm gales and the characteristic analysis of convective parameters[J]. Mid-Low Latitude Mount Meteor, 44(2): 1-8(in Chinese).
- 廖晓农,2009.北京雷暴大风日环境特征分析[J].气候与环境研究,14(1):54-62. Liao X N, 2009. Analysis on environmental condition for wind gust in Beijing Area[J]. Climatic Environ Res, 14(1): 54-62(in Chinese).
- 刘丹,邱新法,史岚,等,2013.基于NCEP资料的我国大气可降水量的计算及其时空分布[J].南京信息工程大学学报:自然科学版,5(2):113-119. Liu D, Qiu X F, Shi L, et al, 2013. Estimation of atmospheric precipitable water in China with NCEP data and its spatio-temporal distribution[J]. J Nanjing Univ Inf Sci Technol Nat Sci Ed, 5(2): 113-119(in Chinese).
- 刘雪涛,谢屹然,许迎杰,等,2019.云南闪电活动的时空分布特征[J].干旱气象,37(5):729-735,746. Liu X T, Xie Y R, Xu Y J, et al, 2019. Temporal and spatial distribution characteristics of lightning activity over Yunnan Province[J]. J Arid Meteor, 37(5): 729-735, 746(in Chinese).
- 马淑萍,王秀明,俞小鼎,2019.极端雷暴大风的环境参量特征[J].应用气象学报,30(3):292-301. Ma S P, Wang X M, Yu X D, 2019. Environmental parameter characteristics of severe wind with extreme thunderstorm[J]. J Appl Meteor Sci, 30(3): 292-301(in Chinese).
- 秦丽,李耀东,高守亭,2006.北京地区雷暴大风的天气-气候学特征研究[J].气候与环境研究,11(6):754-762. Qin L, Li Y D, Gao S T, 2006. The synoptic and climatic characteristic studies of thunderstorm winds in Beijing[J]. Climatic Environ Res, 11(6): 754-762(in Chinese).
- 任菊章,孙绩华,李建,等,2014.云南地区GPS探测与3类再分析可降水量的对比分析[J].高原气象,33(6):1480-1489. Ren J Z, Sun J H, Li J, et al, 2014. Comparison of precipitation in Yunnan from GPS observation data and three reanalysis data[J]. Plateau Meteor, 33(6): 1480-1489(in Chinese).
- 盛杰,郑永光,沈新勇,等,2019.2018年一次罕见早春飚线大风过程演变和机理分析[J].气象,45(2):141-154. Sheng J, Zheng Y G, Shen X Y, et al, 2019. Evolution and mechanism of a rare squall line in early spring of 2018[J]. Meteor Mon, 45(2): 141-154(in Chinese).
- 孙继松,戴建华,何立富,等,2014.强对流天气预报的基本原理与技术方法:中国强对流天气预报手册[M].北京:气象出版社:13-18,52-58,171-181. Sun J S, Dai J H, He L F, et al, 2014. Fundametal and Technical Method of Severe Convection Prediction in Middle and East China: Handbook of China Severe Convection Prediction[M]. Beijing: China Meteorological Press: 13-18, 52-58, 171-181(in Chinese).
- 孙继松,陶祖钰,2012.强对流天气分析与预报中的若干基本问题[J].气象,38(2):164-173. Sun J S, Tao Z Y, 2012. Some essential issues connected with severe convective weather analysis and forecast[J]. Meteor Mon, 38(2): 164-173(in Chinese).
- 田付友,郑永光,张涛,等,2017.我国中东部不同级别短时强降水天气的环境物理量分布特征[J].暴雨灾害,36(6):518-526. Tian F Y, Zheng Y G, Zhang T, et al, 2017. Characteristics of environmental parameters for multi-intensity short-duration heavy rainfalls over East China[J]. Torr Rain Dis, 36(6): 518-526(in Chinese).
- 王迪,牛淑贞,曾明剑,等,2020.河南省分类强对流环境物理条件特征分析[J].气象,46(5):618-628. Wang D, Niu S Z, Zeng M J, et al, 2020. Analysis on the characteristics of environmental and physical conditions for the classified severe convections in Henan Province[J]. Meteor Mon, 46(5): 618-628(in Chinese).
- 王冀,李英,宋丽莉,等,2020.川藏地区雷暴大风活动特征和环境因子对比[J].应用气象学报,31(4):435-446. Wang H, Li Y, Song L L, et al, 2020. Comparison of characteristics and environmental factors of thunderstorm gales over the Sichuan-Tibet Region[J]. J Appl Meteor Sci, 31(4): 435-446(in Chinese).
- 王秀明,俞小鼎,朱禾,2012. NCEP再分析资料在强对流环境分析中的应用[J].应用气象学报,23(2):139-146. Wang X M, Yu X D, Zhu H, 2012. The applicability of NCEP reanalysis data to severe convection environment analysis[J]. J Appl Meteor Sci, 23(2): 139-146(in Chinese).
- 王亚男,刘一玮,易笑园,2020.渤海西部雷雨大风统计特征及对流参数指标分析[J].气象,46(3):325-335. Wang Y N, Liu Y W, Yi X Y, 2020. Statistical characteristics and convection indexes of thunderstorm and gale over western Bohai Sea[J]. Meteor Mon, 46(3): 325-335(in Chinese).
- 徐安伦,董保举,刘劲松,等,2010.洱海湖滨大气边界层结构及特征分析[J].高原气象,29(3):637-644. Xu A L, Dong B J, Liu J S, et al, 2010. Structure and characteristic of the atmospheric boundary layer in Erhai Lakeside Region of Dali[J]. Plateau Meteor, 29(3): 637-644(in Chinese).
- 许霖,姚蓉,王晓雷,等,2017.湖南省雷暴大风的时空分布和变化特征[J].高原气象,36(4):993-1000. Xu L, Yao R, Wang X L, et al, 2017. Study of temporal-spatial distribution and variation characteristics of thunderstorm gales in Hunan[J]. Plateau Meteor, 36(4): 993-1000(in Chinese).
- 许鲁君,刘辉志,曹杰,2014.大理苍山-洱海局地环流的数值模拟[J].大气科学,38(6):1198-1210. Xu L J, Liu H Z, Cao J, 2014. Numerical simulation of local circulation over the Cangshan Mountain-Erhai Lake Area in Dali, Southwest China[J]. Chin J

- Atmos Sci, 38(6):1198-1210(in Chinese).
- 许美玲,段旭,杞明辉,等,2011. 云南省天气预报员手册[M]. 北京:气象出版社:1-20. Xu M L, Duan X, Qi M H, et al, 2011. Yunnan Weather Forecaster's Manual[M]. Beijing: China Meteorological Press: 1-20(in Chinese).
- 严仕尧,李昀英,齐琳琳,等,2013. 华北产生雷暴大风的动力热力综合指标分析及应用[J]. 暴雨灾害, 32(1): 17-23. Yan S Y, Li Y Y, Qi L L, et al, 2013. Analysis and application of thermodynamical and dynamical indexes associated with thunderstorm gale in North China[J]. Torr Rain Dis, 32(1): 17-23(in Chinese).
- 杨波,王园香,蔡雪薇,2019. 我国华南江南春季雷暴气候特征分析[J]. 热带气象学报, 35(4): 470-479. Yang B, Wang Y X, Cai X W, 2019. Analysis on the climatological characteristics of thunderstorms in the south and southeast of China in spring[J]. J Trop Meteor, 35(4): 470-479(in Chinese).
- 杨芳园,沈茜,周稀,等,2018. 云南省一次飑线大风天气过程的中尺度特征分析[J]. 暴雨灾害, 37(1): 48-56. Yang F Y, Shen Q, Zhou X, et al, 2018. Analysis of mesoscale characteristics of a squall line storm event in Yunnan[J]. Torr Rain Dis, 37(1): 48-56(in Chinese).
- 杨晓霞,胡顺起,姜鹏,等,2014. 雷暴大风落区的天气学模型和物理量参数研究[J]. 高原气象, 33(4): 1057-1068. Yang X X, Hu S Q, Jiang P, et al, 2014. Research of synoptic model and physical quantity parameter of thunder-gust winds impact area[J]. Plateau Meteor, 33(4): 1057-1068(in Chinese).
- 杨新林,孙建华,鲁蓉,等,2017. 华南雷暴大风天气的环境条件分布特征[J]. 气象, 43(7): 769-780. Yang X L, Sun J H, Lu R, et al, 2017. Environmental characteristics of severe convective wind over South China[J]. Meteor Mon, 43(7): 769-780(in Chinese).
- 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等,2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社:122-123, 169. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al, 2006. Principle and Operational Applications of Doppler Weather Radar[M]. Beijing: China Meteorological Press: 122-123, 169(in Chinese).
- 张腾飞,张杰,张思豆,等,2018. 云南南支槽飑线雹暴中尺度特征及环境条件[J]. 高原气象, 37(4): 958-969. Zhang T F, Zhang J, Zhang S D, et al, 2018. Mesoscale characteristics and environmental conditions of south trough squall-line hailstorm in Yunnan[J]. Plateau Meteor, 37(4): 958-969(in Chinese).
- 张小玲,湛芸,张涛,2012. 对流天气预报中的环境场条件分析[J]. 气象学报, 70(4): 642-654. Zhang X L, Chen Y, Zhang T, 2012. Meso-scale convective weather analysis and severe convective weather forecasting[J]. Acta Meteor Sin, 70(4): 642-654(in Chinese).
- 郑永光,陶祖钰,俞小鼎,2017. 强对流天气预报的一些基本问题[J]. 气象, 43(6): 641-652. Zheng Y G, Tao Z Y, Yu X D, 2017. Some essential issues of severe convective weather forecasting[J]. Meteor Mon, 43(6): 641-652(in Chinese).
- 郑永光,田付友,孟智勇,等,2016. “东方之星”客轮翻沉事件周边区域风灾现场调查与多尺度特征分析[J]. 气象, 42(1): 1-13. Zheng Y G, Tian F Y, Meng Z Y, et al, 2016. Survey and multi-scale characteristics of wind damage caused by convective storms in the surrounding area of the capsizing accident of cruise ship “Dongfangzhixing”[J]. Meteor Mon, 42(1): 1-13(in Chinese).
- 郑永光,周康辉,盛杰,等,2015. 强对流天气监测预报预警技术进展[J]. 应用气象学报, 26(6): 641-657. Zheng Y G, Zhou K H, Sheng J, et al, 2015. Advances in techniques of monitoring, forecasting and warning of severe convective weather[J]. J Appl Meteor Sci, 26(6): 641-657(in Chinese).
- 钟利华,曾鹏,李勇,等,2011. 广西雷暴大风环流特征和物理量诊断分析[J]. 气象, 37(1): 59-65. Zhong L H, Zeng P, Li Y, et al, 2011. Diagnostic analysis of the circulation and physical quantities of thunderstorm gales in Guangxi[J]. Meteor Mon, 37(1): 59-65(in Chinese).
- Brooks H E, Lee J W, Craven J P, 2003. The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data[J]. Atmos Res, 67-68: 73-94.
- Doswell III C A, 1987. The distinction between large-scale and mesoscale contribution to severe convection; a case study example[J]. Wea Forecasting, 2(1): 3-16.
- Feng G L, Qie X S, Yuan T, et al, 2007. Lightning activity and precipitation structure of hailstorms[J]. Sci China Ser D Earth Sci, 50(4): 629-639.
- Xie Y R, Xu K, Zhang T F, et al, 2013. Five-year study of cloud-to-ground lightning activity in Yunnan Province, China[J]. Atmos Res, 129-130: 49-57.
- Yang X L, Sun J H, 2014. The characteristics of cloud-to-ground lightning activity with severe thunderstorm wind in South and North China[J]. Atmos Ocean Sci Lett, 7(6): 571-576.
- Yang X L, Sun J H, Li W L, 2015. An analysis of cloud-to-ground lightning in China during 2010-13[J]. Wea Forecasting, 30(6): 1537-1550.

(本文责编:王婷波)