伍华丽,卢炳夫,植耀玲,等.2024. 2022年广西雷暴活动特征分析[J].暴雨灾害,43(6):702-712. WU Huali, LU Binfu, ZHI Yaoling, et al. 2024. Statistic analysis of thunderstorm characteristics in Guangxi in 2022 [J]. Torrential Rain and Disasters,43(6):702-712 (in Chinese). doi: 10.12406/byzh.2023-117

2022年广西雷暴活动特征分析

伍华丽,卢炳夫,植耀玲,何宽,黄丹,陈小艳
(广西壮族自治区气象灾害防御技术中心,南宁 530022)

摘　要:基于2022年广西三维闪电监测资料、雷达三维拼图数据,融合利用风暴识别追踪技术(Storm Cell Identification and Tracking,SCIT)和DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise)算法,识别提取1 131个雷暴单体构建雷暴特征数据集,并基于该数据集研究广西雷暴单体的时空分布、移动方向、持续时间、移动速度、移动距离等特征,并进一步对雷暴发生环境下雷达基本反射率、垂直积分液态水含量(VIL)、回波顶高等分布特征进行统计分析。结果表明:(1) 广西雷暴呈南多北少的特征,南部沿海地区的雷暴活动最强;夏季(6—8月)雷暴高发,占全年雷暴数的65.3%,冬季(12—2月)雷暴占比仅为0.18%。一天之中雷暴活动主要发生在11—19时。(2) 雷暴单体的移动速度集中在2~16 m·s^{-1},以4~6 m·s^{-1}为最多;移动距离集中在100 km以内,以10~20 km为最多;移动方向以东北向、北向、西北向和东向为主。不同移动方向的雷暴单体移动距离、速度均存在一定差异,其中朝东方向移动的雷暴单体速度偏快(8~16 m·s^{-1}),移动距离较远(10~40 km);朝南方向移动的雷暴单体速度总体偏慢(2~10 m·s^{-1}),移动距离较短(0~30 km);其他移动方向的雷暴单体速度集中在4~12m·s^{-1},但峰值区间略有差异。(3) 雷暴内初闪常发生于雷达反射率大于45 dBz且VIL小于30 kg·m^{-2}的区域中,初闪之后的闪电主要分布在雷达反射率为45~65 dBz且VIL≤40 kg·m^{-2}的区域内;45 dBz的雷达强回波核顶高达到6 km可作为闪电预警的参考指标之一。

关键词:雷暴追踪;雷暴识别;三维闪电定位仪;雷达回波
中图法分类号:P446　　**文献标志码:**A　　**DOI:**10.12406/byzh.2023-117

Statistic analysis of thunderstorm characteristics in Guangxi in 2022

WU Huali, LU Bingfu, ZHI Yaoling, HEKuan, HUANG Dan, CHEN Xiaoyan

(*Guangxi Meteorological Disaster Prevention Technology Center, Nanning* 530022)

Abstract: In order to improve the understanding of the characteristics of thunderstorms in Guangxi and better study its forecasting methods, based on the 2022 VLF/LF 3D lightning data and SWAN radar 3D composite data, 1 131 thunderstorm cases were identified and extracted by integrating SCIT (Storm Cell Identification and Tracking) and DBSCAN (Density Based Spatial Clustering of Applications with Noise), and thunderstorm feature data sets were constructed. Based on this data set, statistical analysis was carried out on the characteristics of thunderstorms in Guangxi, such as the spatiotemporal distribution, movement direction, duration, movement speed, and movement distance. Then further analyze the distribution characteristics of radar reflectivity, vertically integrated liquid water (VIL), and echo height in thunderstorm environments. The results are as follows. (1) Thunderstorms in Guangxi are characterized by more in the south and less in the north, with the highest thunderstorm activity in the southern coastal areas. Thunderstorms occur most frequently in summer (June-August), accounting for 65.3%, while they sharply decrease in winter (December-February), accounting for only 0.18%. Thunderstorms mainly occur from 11:00-19:00 BT during the day. (2) The thunderstorms speed was mainly concentrated in the range of 2~16 m·s^{-1}, with the most frequent speed being 4~6 m·s^{-1}. The movement distance was mainly within 100 km, with the most frequent distance being 10~20 km.The dominant movement directions of the thunderstorms were northeast, north, northwest, and east. There are certain differences in both speed and distance among thunderstorms moving in different directions. Specifically, thunderstorms moving eastward tend to be faster (8~16 m·s^{-1}) and travel

收稿日期: 2023-06-08;**定稿日期:**2024-03-25
资助项目: 广西重点研发计划项目(桂科AB22080101, 桂科AB20238035); 广西气象科研计划项目(桂气科2024ZL07,桂气科2023QN08); 广西自然基金项目(2016GXNSFAA380184); 广西壮族自治区气象灾害防御技术中心科研计划项目(桂气防2021M03)

第一作者: 伍华丽,主要从事强对流监测与预警技术研究。E-mail: whl128@163.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

farther (10~40 km), those moving southward are generally slower (2~10 m·s^{-1}) and travel shorter distances (0 to 30 km); thunderstorms moving in other directions have speeds concentrated 4~12 m·s^{-1}, though with varying peak ranges. (3) The initial flash in thunderstorms often occurs in areas with reflectivity greater than 45 dBz and VIL less than 30 kg·m^{-2}. Lightning after the initial flash is primarily occurs in the 45~65 dBz strong echo region and is highly correlated with VIL in the range of 0.1~40 kg·m^{-2}. The strong echo core which threshold greater than 45 dBz with top height exceeds 6 km can be used as one of the reference indicators for lightning occurrence.

Key words: thunderstorm tracking; thunderstorm identification; 3D lightning locator; radar echo

引　言

雷暴是常见的强对流天气，常伴随大量的闪电发生，闪电引发的雷击易造成人员伤亡，损毁电器及电子通信设备、建筑物，诱发火灾和爆炸事故，威胁人们的生命和财产安全。对雷暴的时空分布、移动规律、三维结构等特征进行研究，将有助于解释和预测雷暴的演变和发展，为雷暴的识别及预报提供实用参考。

过去学者们常利用地面人工观测的雷暴日数据对全国或地区的雷暴气候规律及时空分布特征进行研究(王学良等，2016；郑劲光等，2019)，然而人工观测的雷暴日观测资料时空分辨率较低，难以对雷暴的初生、持续时间、移动规律、闪电活动分布等进行全面分析。随着闪电定位技术的快速发展，利用闪电定位数据能够一定程度上弥补上述缺陷，一些学者开始利用闪电监测定位系统(ADTD)的数据研究地闪的极性、强度及时空分布等特征(王学良等，2010；王娟等，2015)；也有一些学者在利用ADTD资料研究地闪的雷电参数特征的基础上，追踪识别雷暴的发生发展特征(王婷波等，2020)。上述研究均基于地闪资料开展，只能对闪电母体雷暴的地闪活动分布等二维特征进行研究，而多普勒天气雷达能有效获取雷暴的体积、质心高度、顶高等三维结构信息，且其有较高的时空分辨率，因此可以为科学识别、追踪雷暴提供重要的探测手段。卓鸿等(2018)利用首都机场雷达资料识别提取雷暴过程，发现不同天气形势下首都国际机场雷暴的空间分布及移动特征各有不同；韩雷等(2009)利用2003—2007年夏季天津市的单站雷达数据基于TITAN法识别京津及邻近地区的强对流风暴，并对其结构特征、生命史和运动规律等进行统计分析，进一步加深了对该区域对流天气的气候特征认识。但单站雷达监测覆盖范围有限，需要进一步开展基于雷达三维拼图数据的雷暴特征统计研究。国外一些学者在利用雷达三维拼图数据的基础上，引入闪电定位闪电数据实现雷暴的精确识别追踪，并统计分析雷暴的特征(Wapler et al.，2015；Liu W et al.，2016)。此项工作可得到雷暴活动规律、时空分布及雷达参量阈值等特征，然而国内类似的研究工作鲜有开展。

广西年平均雷暴日数为73 d，是我国雷暴日数最多的省份之一。据不完全统计，1998年至今广西雷电造成的人员伤亡事故达383起，造成714人伤亡；广西每年雷电灾害造成的各种直接经济损失高达数亿元。因此，亟需开展广西雷暴识别及特征研究工作，为更好地研究其临近预报与预警方法提供理论支撑。本文基于2022年广西三维闪电监测资料、雷达三维拼图数据，利用风暴识别追踪技术(Storm Cell Identification and Tracking，SCIT)及DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise)算法，识别提取1 131个雷暴单体，获得雷暴单体的发生及持续时间、质心高度和顶高等三维结构、移动路径、移动方向和速度及闪电活动分布等，基于此构建雷暴特征数据集，并利用该数据集对广西的雷暴活动规律、时空分布及雷达参量阈值等特征进行统计分析，以期为广西雷暴预报提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 数据来源

本文使用的各种资料时段均为2022年1月1日—12月31日，主要包括：(1) 广西壮族自治区气象局提供的甚低频/低频(VLF/LF)三维闪电定位数据。闪电定位系统包含20个三维闪电探测站(ADTD-2C型闪电定位仪)和1个数据处理中心，基线距离大于70 km，有效探测范围覆盖广西全区(图1)。系统可探测到闪电发生的时间、经纬度和高度、雷电流极性和强度等重要参数(马启明等，2014；孟晓阳等，2022)，实现了地闪和云闪的全面探测。该系统具有较高的三维定位精度，时间精度优于10^{-4} s，雷电流大于10 kA的闪电探测效率大于90%，网内平均水平定位误差小于300 m，垂直定位误差小于500 m (代发声等，2017；Yang et al.，2021)。为得到更准确的闪电定位结果，在闪电资料处理过程中剔除了同步定位站点数量小于4站的数据。该数据主要用于雷暴单体的识别以及闪电分布特征的统计分析。(2) 雷达拼图数据，由中国气象局SWAN (Severe Weather Automatic Nowcast)系统(韩丰和沃伟峰，2018)提供。SWAN系统对广西境内10部雷达基数据进行实时采集解析，经过数据质量控制、坐标系转换、重叠区域融合拼接等流程后，生成网格化的雷达拼图数据集，包括三维反射率拼图产品、垂直积分液

态水含量(Vertically Integrated Liquid Water, VIL)拼图等。数据水平分辨率为0.01°×0.01°,时间分辨率为6 min,空间范围为(102°—113°E, 19°—28°N)。该资料主要用于雷暴单体的识别追踪以及雷暴发生环境下雷达参量分布特征的统计分析。

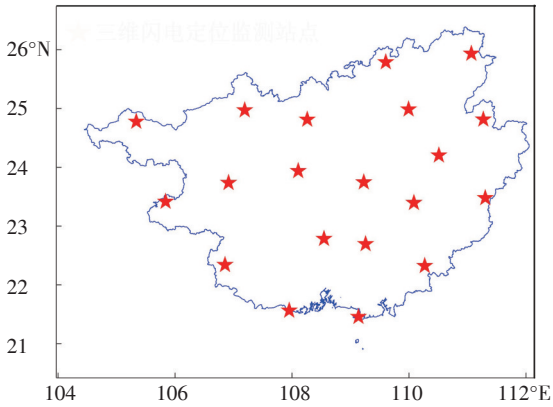


图1 广西三维闪电监测定位站点(红色五角星)空间分布

Fig. 1 The spatial distribution of 3D lightning monitoring and positioning stations (red five-pointed stars) in Guangxi

1.2 研究方法

本文融合应用SCIT追踪技术、DBSCAN算法对雷暴单体进行识别追踪,下面对雷暴单体识别追踪所涉及的相关概念及算法进行介绍。

1.2.1 雷暴单体定义

雷暴是由于强积雨云引起的伴有雷电活动和阵性降水的局地风暴。组成雷暴的单体称为雷暴单体,雷暴通常由一个或多个雷暴单体组成,水平尺度从0~30 km的雷暴单体到几十公里的积雨云系(王艳春等,2023)。

本文对雷暴单体样本的定义,利用刘娜等(2021)的标准,即6 min时间窗内雷暴单体的特征数据集为雷暴单体样本,每个雷暴单体样本数据包含时间、风暴单体质心、风暴边界信息、风暴顶高、雷达回波反射率因子、回波顶高、VIL等三维结构信息。

1.2.2 雷暴识别、追踪方法

SCIT是由美国国家强风暴试验室开发的风暴单体识别追踪算法(Johnson et al., 1998),该算法通过设定从小到大的一系列阈值,将所有三维风暴单体尽量识别出来,并给出三维风暴的质心坐标、风暴内最大反射率因子值等三维结构信息;然后比较识别出的风暴单体与上一次体扫风暴单体的位置,来实现同一风暴单体的追踪。

DBSCAN是一种典型的基于密度的空间聚类算法,该算法可将具有足够密度的区域划分为簇,并在具有噪声的空间数据库中发现任意形状的簇,其显著优点是聚类速度快且能够有效处理噪声点和发现任意形状的空间聚类,当空间聚类的密度均匀时聚类效果尤佳(袁方等,2014)。雷达拼图数据为网格化数据,可视为密度均匀的数据,适合应用DBSCAN实现风暴体的聚类识别。

1.2.3 基于多算法融合的雷暴单体识别流程

本文在SCIT算法的基础上,集成DBSCAN聚类法,基于雷达三维拼图产品(笛卡尔坐标系下的多层反射率因子)实现雷暴单体的识别追踪,具体流程见图2。

考虑到雷暴单体的生命周期一般大于30 min,因此将生命周期小于30 min的雷暴单体剔除,按照图2的方法共识别筛选出2022年广西境内1 131个雷暴单

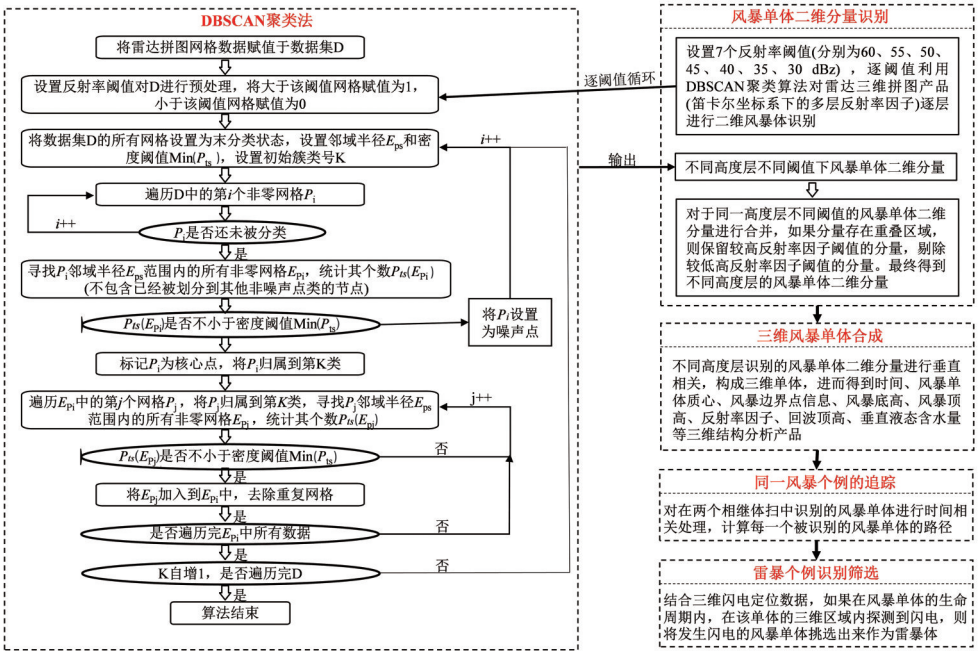


图2 雷暴单体识别追踪流程图

Fig. 2 The flowchart of thunderstorm identification and tracking

体，共包含12 360个雷暴单体样本，收集到雷暴单体内发生的云、地闪共计70 043次。

1.3 数据时空关联预处理方案

在对雷暴发生环境下的雷达产品分布特征进行统计分析之前，考虑到雷暴中闪电数据与雷达数据的时间及空间分辨率均不一致，需要对这两类数据进行时空关联预处理，以提高数据相关性分析的准确性，具体方案如下：

(1) 整理识别出的2022年广西境内1 131个雷暴单体中发生的闪电数据，记录每次闪电的发生时间、经纬度、高度等信息。

(2) 针对每一次闪电，提取与其发生时间最近的一帧雷达产品，计算与该次闪电空间关联度最高的雷达参量数值，并记录。

1.4 雷暴单体移动特征参量的计算方法

定义雷暴单体的移动方向α为其移动轨迹中相邻时刻质心连线方位角的平均值，以正北方向为0度，顺时针为正，直到360°(王婷波等，2020)，即为

$$\alpha=(\alpha_1+\alpha_2+\alpha_3+\cdots+\alpha_n)/n \tag{1}$$

定义雷暴单体的移动距离S为该雷暴单体移动轨迹的长度，即为移动轨迹中相邻时刻质心之间距离的总和

$$S=S_1+S_2+S_3+\cdots+S_n \tag{2}$$

定义雷暴单体的移动速度v为该雷暴单体的移动距离除以其持续时间。

图3为某一雷暴单体移动特征参量概念示意图，由逐6 min的质心位置相连而得。其中S_1、S_2、S_3、……、S_n为相邻时刻质心之间的距离，α_1、α_2、α_3、……、α_n为相邻时刻质心连线的方位角。

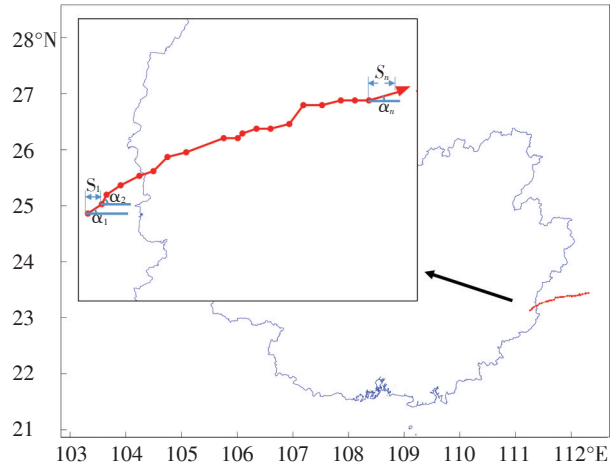


图3 雷暴单体移动特征参量概念示意图

Fig. 3 The schematic of characteristic parameters for thunderstorm movement

2 结果与分析

2.1 雷暴单体时空分布特征

2.1.1 时间分布特征

从雷暴单体发生的月分布(图4a)看，7—8月雷暴

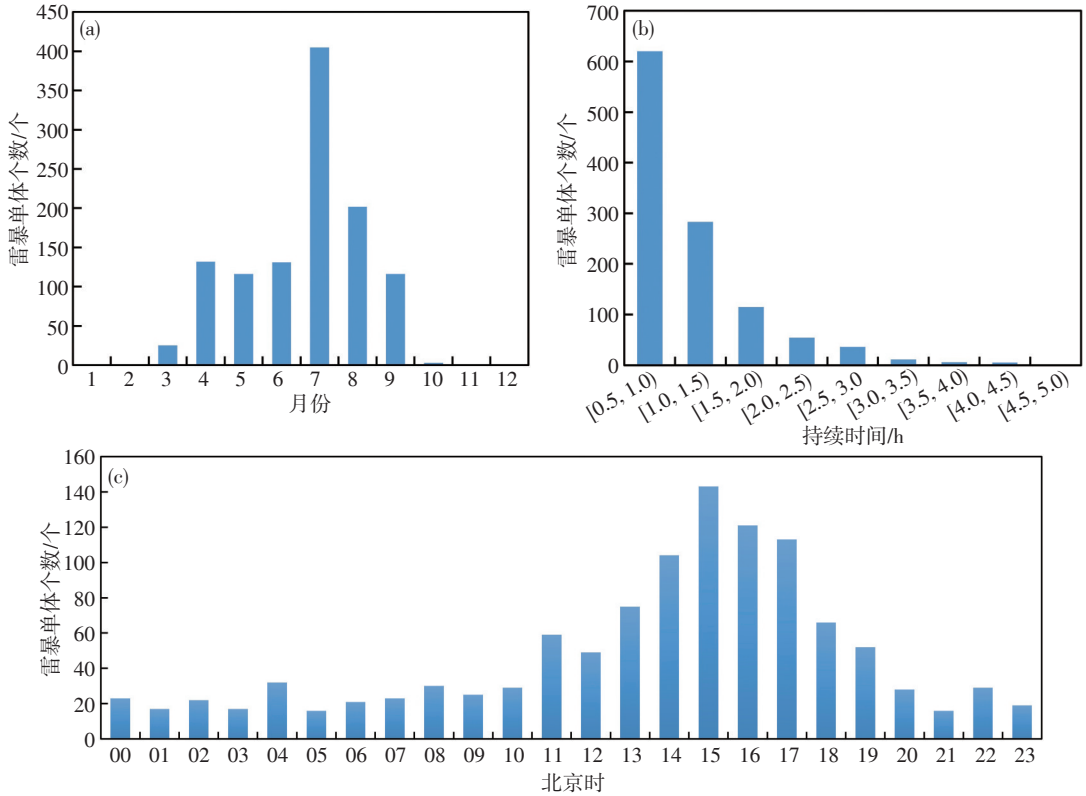


图4 2022年广西雷暴单体逐月(a)、持续时间(b)和逐时(c)分布

Fig. 4 The time distribution of (a) monthly, (b) duration distribution and (c) hourly of thunderstorms in Guangxi in 2022

高发，7月雷暴单体数量最多，约是8月的2倍；从季节来看，以夏季(6—8月)为主，雷暴单体数量占全年的65.3%，冬季(12—2月)雷暴单体数量骤减，占比仅0.18%。雷暴单体活动的逐时分布(图4c)呈单峰分布，雷暴活动主要发生在11—19时，占总数的70%。从持续时间(图4b)来看，雷暴单体持续最长为5 h，大部分雷暴单体(90%)生命周期小于2 h，其中55%持续时间小于1 h，25%持续时间为1~1.5 h，10.2%持续时间为1.5~2 h。

2.1.2 空间分布特征

图5a为2022年广西1 131个雷暴单体的轨迹分布，可见雷暴单体分布呈南多北少的特征，移动方向主要有四类：由西南至东北向(22.5°<α<67.5°)、由南至北向(−22.5°<α<22.5°)、由东南至西北向(292.5°<α<337.5°)及由西至东向(67.5°<α<112.5°)；移动距离差异大，短则仅有几公里，长则可达数百公里。

为定量研究雷暴的空间分布，将广西区域按0.3°×0.3°进行网格化，并计算每个网格上雷暴单体的出现频次。由图5b可知，雷暴活动有四个强中心(频次大于50次)，分别位于南部沿海一带(钦州市、北海市及防城港市)、东南部的玉林市一带、西北部的百色市以及河池市北部，其中南部沿海地区的雷暴活动最强，可达200次。

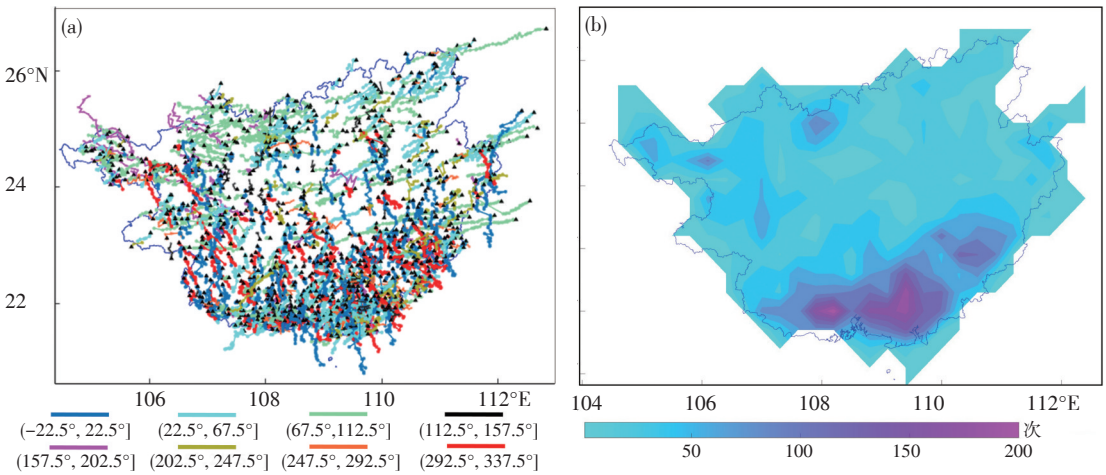


图5 2022年广西雷暴单体移动轨迹(a)和雷暴单体频次的空间分布(b)

Fig. 5 The spatial distribution of the (a) movement trajectory of thunderstorms and (b) grid distribution of the frequency of thunderstorms in Guangxi in 2022

2.2 雷暴单体移动特征统计

统计广西雷暴移动方向、速度和距离等运动特征，有助于加深对雷暴走向趋势、持续时间、生消趋势等的理解，从而为更好地预判雷暴生消发展提供有效参考。

2.2.1 雷暴移动方向

雷暴单体的移动方向以东北(NE)、西北(NW)、北(N)及东(E)向为主，这四个方向的雷暴单体数量占比达75% (图6)。图7为广西0.3°×0.3°网格上不同移动方向雷暴单体的出现频次空间分布，结合图6、图7及图4a可知，朝NE方向移动的雷暴单体数量最多，占雷暴单体总数的31%，大多生成于广西南部沿海、东南部的玉林市一带及东北部地区；朝NW方向移动的雷暴单体数量占比18%，大多生成于广西南部；朝N方向移动的雷暴单体数量占比15%，大多生成于广西东南部及南部沿海地区。朝E方向移动的雷暴单体数量占比11%，大多生成于广西西北部百色市、河池市一带。

2.2.2 雷暴移动速度及距离

图8a为不同速度区间内雷暴单体数量的分布，可见雷暴单体移动速度主要集中在2~16 m·s^{-1}，占总体

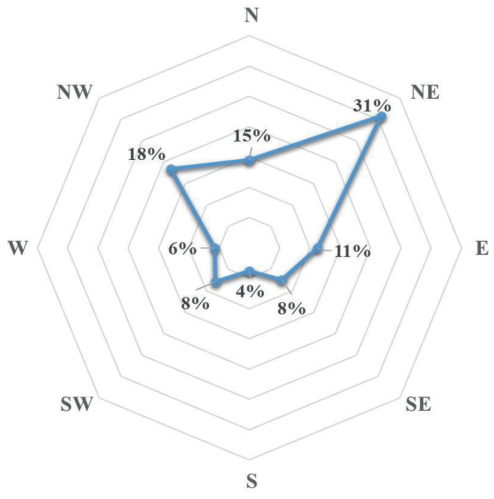


图6 2022年广西不同移动方向雷暴单体占总数玫瑰图

Fig. 6 Rose chart of the thunderstorms cells in different moving directions accounted for the total number in Guangxi in 2022

的90%；以4~6 m·s^{-1}为最多，约占总体的18%；其次为8~10 m·s^{-1}及10~12 m·s^{-1}，均占总体的17%。对比不同移动方向的雷暴单体移动速度特征(表1)，可见朝E方向移动的雷暴单体移动速度偏快，以8~16 m·s^{-1}为主，占朝E向移动雷暴单体的57%左右；朝NE、N、

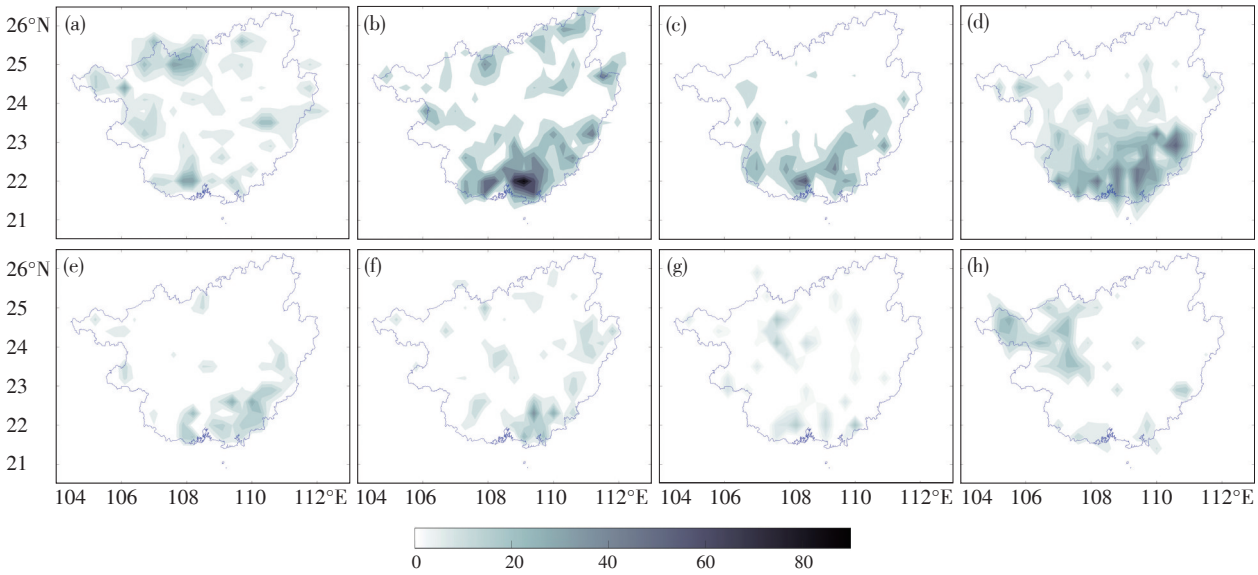


图7 2022年广西雷暴单体向东(a)、东北(b)、北(c)、西北(d)、西(e)、西南(f)、南(g)和东南(h)移动的频次空间分布

Fig. 7 The spatial distribution of thunderstorms frequency towards the (a) east, (b) northeast, (c) north, (d) northwest, (e) west, (f) southwest, (g) south, and (h) southeast in Guangxi in 2022

NW、W、SW移动方向雷暴单体的速度分布特征较为相似，均集中在4~12 m·s^{-1}，在NE、N、W、SW向雷暴单体数的占比均超过65%；朝S向的雷暴单体移动速度总体偏慢，集中在2~10 m·s^{-1}，约占朝S向移动雷暴单体的72%；朝SE向的速度分布范围跨度较大，在4~16 m·s^{-1}间较均匀分布，约占朝SE向移动雷暴单体的80%。

由不同移动距离区间内雷暴单体数量的分布(图8b)可知，雷暴单体移动距离基本在100 km以内，占总体的93%；其中以10~20 km为最多，约占总体的24.5%；其次为20~30 km，占总体的18.3%。对比不同移动方向的雷暴单体移动距离特征(表2)，可见除朝S方向外，其他七个移动方向的雷暴单体移动距离累积概率分布特征较为相似，均集中在10~40 km，占比均超过50%；而朝S方向移动的雷暴单体移动距离较短，集中在0~30 km，占比超70%。

2.3 雷暴单体雷达产品统计特征

2.3.1 雷达基本反射率特征

分别计算雷暴单体中初闪及初闪后的闪电位置半径5 km三维空间范围内所有格点上雷达基本反射率因子的最大值，统计它们的分布情况(图9)。由图9a可知93%雷暴单体的初闪发生在45~60 dBz的强回波区内(图9a)，且约50%集中在50~55 dBz之间。由此可推断，雷达反射率回波大于45 dBz是发生初闪的重要特征，而雷暴成熟阶段的雷达反射率回波一般大于60 dBz，对初闪的指示意义不大，因此基于雷达反射率的初闪预报阈值不宜设置过大。初闪之后发生的闪

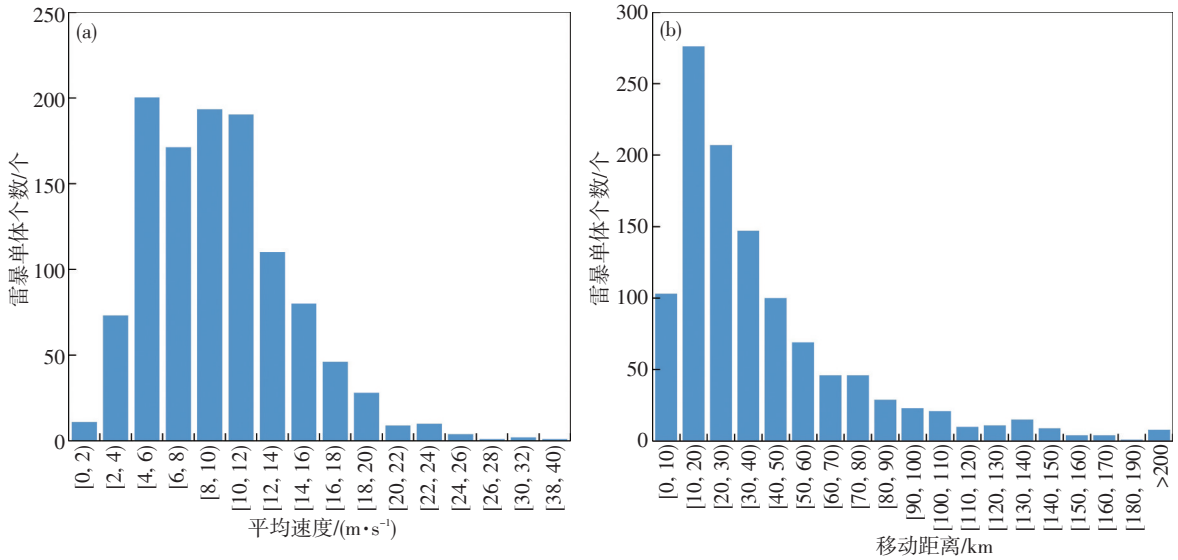


图8 2022年广西雷暴单体不同移动速度(a)及距离(b)下雷暴单体数量累积概率分布

Fig. 8 The cumulative probability distribution of thunderstorms with different (a) speeds and (b) distances in Guangxi in 2022

表1 2022年广西雷暴单体不同移动方向上雷暴单体移动平均速度占比统计

Table 1 Statistics on the average speed of thunderstorms in different directions in Guangxi in 2022

平均速度/(m·s^{-1})	占比%							
	E	NE	N	NW	W	SW	S	SE
[0，2)	1	1	1	0	2	1	2	4
[2，4)	9	6	7	3	9	7	21	5
[4，6)	9	16	17	24	20	19	21	18
[6，8)	9	18	14	17	17	14	12	13
[8，10)	14	15	21	18	22	21	19	12
[10，12)	22	17	22	18	11	10	5	13
[12，14)	9	10	9	10	8	10	14	13
[14，16)	12	8	5	6	5	6	2	11
[16，18)	7	5	1	2	6	6	5	4
[18，20)	6	2	2	1	2	2	0	5
[22，24)	1	1	0	1	0	0	0	1
[24，26)	1	1	1	0	0	3	0	0
[26，28)	0	0	0	0	0	1	0	1
[28，30)	1	0	0	0	0	0	0	0
[30，32)	0	0	1	0	0	0	0	1
[32，34)	0	0	0	0	0	0	0	0
[34，36)	0	0	0	0	0	0	0	0
[36，38)	0	0	0	0	0	0	0	0
[38，40)	0	0	0	0	0	0	0	1

表2 2022年广西雷暴单体不同移动方向上雷暴单体移动距离占比统计

Table 2 Statistics on the movement distance of thunderstorms in different directions in Guangxi in 2022

移动距离/km	占比%							
	E	NE	N	NW	W	SW	S	SE
[0，10)	9	7	9	7	14	11	26	7
[10，20)	17	26	25	28	22	24	26	21
[20，30)	14	20	16	18	17	22	19	21
[30，40)	12	14	13	13	15	11	12	14
[40，50)	9	8	7	8	14	13	7	9
[50，60)	7	6	9	5	6	6	2	5
[60，70)	6	4	4	6	0	2	5	2
[70，80)	6	3	4	4	6	2	5	5
[80，90)	2	3	4	1	3	2	0	2
[90，100)	3	2	2	2	0	0	0	4
[100，110)	4	1	2	1	2	2	0	2
[110，120)	2	1	0	2	2	0	0	0
[120，130)	2	1	1	1	0	0	0	1
[130，140)	1	2	2	1	0	3	0	0
[140，150)	3	1	1	0	0	0	0	1
[150，160)	0	0	0	1	0	0	0	1
[160，170)	1	0	1	0	0	0	0	1
[170，180)	0	0	0	0	0	0	0	0
[180，190)	1	0	0	0	0	0	0	0
[190，200)	0	0	0	0	0	0	0	0
≥200	1	1	1	0	0	0	0	2

电对应的雷达基本反射率因子分布呈单峰特征(图9b)，主要集中在45~65 dBz，占总闪电数的84%，表明闪电主要分布于45~65 dBz的强回波区域。从云闪和地闪的分类统计结果看，当反射率小于45 dBz时，地闪比(地闪数量与总闪数量的比值)维持在55%左右；随着反射率增大，地闪的发生概率增大，地闪比最大增至72.6%；当大于65 dBz后，地闪比回落至55%。

2.3.2 VIL特征

计算初闪位置半径5 km内VIL及雷达反射率的值，统计不同VIL及雷达反射率阈值下发生初闪的雷

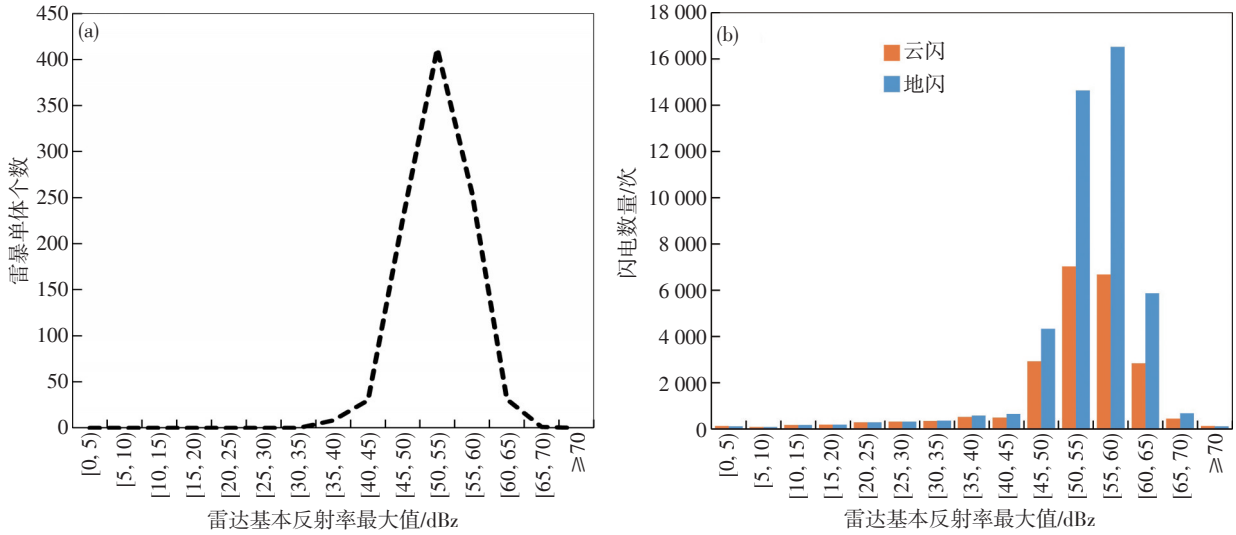


图9 2022年广西不同反射率阈值下发生初闪的雷暴单体个数占比分布(a)和初闪之后发生的闪电发生位置5 km范围内反射率因子最大值分布特征(b)

Fig. 9 The distribution of the (a) proportion of thunderstorms with initial lightning under different radar reflectivity thresholds and (b) maximum radar reflectivity within the range of 5 km after the initial flash occurring in Guangxi in 2022

暴单体个数占比，由图10a可见，85%雷暴单体的初闪发生于反射率大于45 dBz且VIL小于30 kg·m^{-2}的阈值区间内。计算雷暴单体中初闪后发生的闪电位置半径5 km范围内所有格点上VIL的最大值，统计它们的分布情况，由图10b可知，闪电位置附近VIL的值主要集中在0.1~40 kg·m^{-2}，与该区间关联的闪电数量占总闪电数的80%，其中峰值在10~20 kg·m^{-2}，占总闪电数的27%。当VIL小于10 kg·m^{-2}时，地闪比约55%；随着VIL增大，地闪的发生概率发生跃增，地闪比最大增至73%；当VIL大于60 kg·m^{-2}后，占比回落至60%。综上，雷暴中初闪常发生于反射率较强但VIL较小的区域，且初闪之后的闪电与VIL低值区间关联度高，这一特征与基于数值模拟得到的规律特征(梁梦雪等，2016)相似。冰相粒子碰撞分离过程中的非感应起电是雷暴云内最重要的起电机制，在一定的反射率强度(反射率强度反映的是对流系统中粒子的直径大小以及粒子数量的综合状态)下，若VIL较小可推断雷暴中冰相粒子较多，则更易于引起闪电的发生，此为闪电活动与VIL低值区间关联度高的原因。

2.3.3 回波顶高特征

计算每个闪电发生时刻其母体雷暴单体中大于45 dBz、50 dBz、55 dBz、60 dBz (以下分别记为V_{45}、V_{50}、

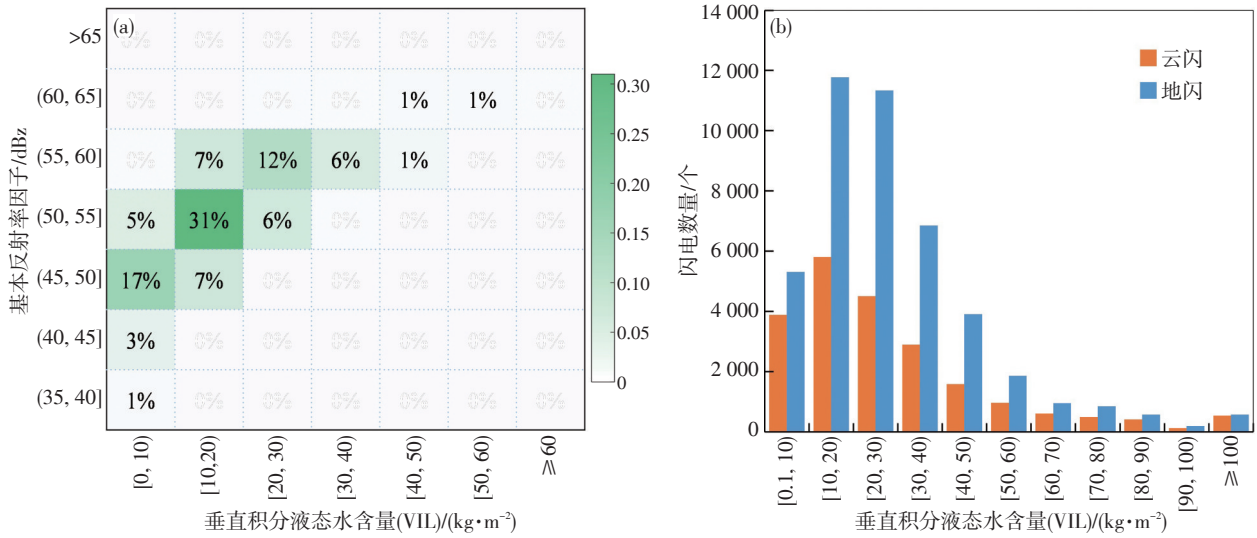


图10 2022年广西不同VIL及雷达基本反射率下发生初闪的雷暴单体个数占比(a)和闪电发生位置半径5 km内VIL最大值分布特征(b)

Fig. 10 The (a) proportion distribution of thunderstorms with initial lightning flash under different VIL and radar reflectivity and (b) maximum VIL within the region of 5 km of lightning in Guangxi in 2022

V_{55}、V_{60})的强回波核的回波顶高,统计它们的分布情况(图11)。总体而言,随着强回波核阈值的增大,与其关联的闪电数量呈减小的趋势;当V_{45}的回波顶高延伸至6~11 km(海拔高度,下同)时,与该区间关联的闪电数量占比达83%(图11a);当V_{50}的回波顶高延伸至5~11 km时,与该区间关联的闪电数量占总闪电数的80%(图11b);当V_{55}的回波顶高延伸至4~11 km时,与该区间关联的闪电数量占总闪电数的62%(图11c);当V_{60}的回波顶高延伸至4~11 km时,与该区间关联的闪电数量占总闪电数的23%(图11d)。在6~10 km的高度区间内,V_{45}、V_{50}、V_{55}、V_{60}的回波顶高伸展高度越高,伴随的闪电数也越多,且地闪出现跃增,地闪比增大至70%左右,表明强回波核顶部延伸越高,对流风暴的强度大,更容易引发闪电;当强回波核顶高伸展至13 km以上时,闪电数量呈现断崖式回落,可能是由于强回波核顶高大于13 km的雷暴单体数量过少所致。相较于我国青藏高原(孟青等,2018)、东北(武智君等,2013)、华北(王秀玲等,2014)、华东(孙哲等,2016)、西南(张腾飞等,2013)等地区,广西的雷暴强度偏强,闪电大多分布在回波强度≥45 dBz且强回波核顶高≥6 km的区域。因此针对广西地区,可以考虑将V_{45}顶高达到6 km作为闪电发生的参考指标之一。

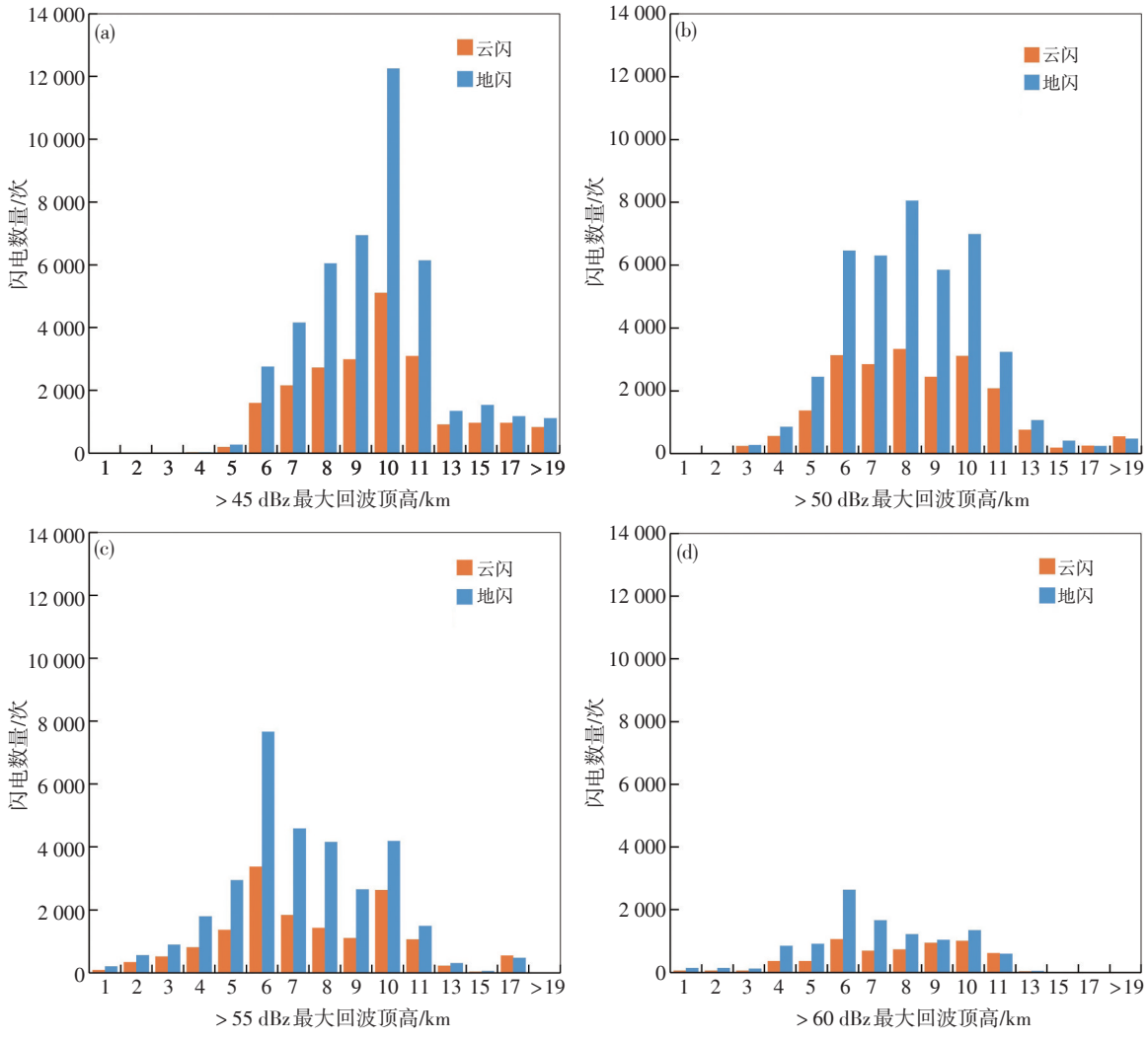


图11 2022年广西闪电发生时其母体雷暴单体中>45 dBz (a)、>50 dBz (b)、>55 dBz (c)和>60 dBz (d)强回波核的回波顶高分布特征

Fig. 11 The distribution characteristics of the top height of strong echo nuclei in the parent thunderstorms to which lightning occurs at greater than (a) 45 dBz, (b) greater than 50 dBz, (c) greater than 55 dBz and (d) greater than 60 dBz in Guangxi in 2022

3 结论与讨论

利用2022年广西三维闪电监测资料、雷达三维拼图数据,采用风暴识别追踪技术(SCIT)和空间聚类(DBSCAN)法对2022年广西全域的雷暴单体进行识别追踪,对得到1 131个雷暴单体共计12 360个雷暴单体样本进行雷暴活动特征及其雷达参量特征统计分析,得出以下结论:

(1)广西雷暴在空间分布上呈南多北少,其中南部沿海、东南部的玉林市一带、西北部的百色市以及河池市北部为四个雷暴活动强中心,南部沿海地区的雷暴活动最强。夏季雷暴活动高发,特别是7—8月;冷

季雷暴最少，占比仅为0.18%；一天之中雷暴活动主要发生在11—19时，雷暴单体持续时间最长可达5 h，但90%持续时间为0.5~2 h。

(2) 广西雷暴单体的移动速度主要集中在2~16 m·s^{-1}，以4~6 m·s^{-1}为最多。移动距离主要集中在100 km以内，以10~20 km为最多，移动方向以东北向、北向、西北向和东向为主。其中，朝东北方向移动的雷暴单体占总体的31%，主要分布在广西南部沿海地区、东南部的玉林市一带以及东北部地区；朝西北方向移动的占比18%，主要分布在广西南部；朝北方向移动的占比15%，主要分布在广西东南部及南部沿海地区；朝东方向移动的占比11%，主要分布在广西西北部百色市、河池市一带。不同移动方向的雷暴单体移动速度和距离均存在差异，朝东方向移动的雷暴单体速度偏快，以8~16 m·s^{-1}为主，移动距离集中在10~40 km；朝南方向移动的雷暴单体速度总体偏慢，以2~10 m·s^{-1}为主，移动距离较短，集中在0~30 km；朝东北、北、西北、西、西南方向移动的雷暴单体的速度均集中在4~12 m·s^{-1}，但峰值区间有所差异；朝东南方向移动的雷暴单体的速度集中在4~16 m·s^{-1}。

(3) 雷暴内初闪常发生于反射率大于45 dBz且VIL小于30 kg·m^{-2}的区域中，初闪之后的闪电主要分布在雷达反射率为45~65 dBz且VIL≤40 kg·m^{-2}的区域内；45 dBz的雷达强回波核顶高达到6 km可作为闪电发生的参考指标之一。

上述研究结果有助于加深对广西雷暴演变特征的认识，为雷暴预警预报工作中雷暴发生发展过程的研判、预警指标的选择及模型的构建提供科学参考。此外，本文研究工作还存在一些不足。一是未使用温、湿、压等物理场数据来分析环境条件，下一步将加强再分析资料的应用，开展雷暴过程三维热力、水汽和云物理精细特征研究，以期加强对雷暴中闪电与雷达参量之间时空关系物理原因的认识。二是仅使用一年的数据进行分析研究，相关结论的可靠性有限，有待进一步研究和检验。

参考文献(References)：

代声发，黄启俊，马启明.2017.基于粒子群算法的闪电定位网优化布站[J].武汉大学学报(理学版),63(6):506–512. Dai F S, Huang Q J, Ma Q M. 2017. Sites Distribution optimization of lightning location network based on particle swarm optimization [J]. Journal of Wuhan University (Natural Science Edition),63(6):506–512 (in Chinese). doi:10.14188/j.1671–8836.2017.06.007

韩丰，沃伟峰.2018. SWAN2.0系统的设计与实现[J].应用气象学报,29(1):10. Han F, Wo W F. 2018. Design and implementation of SWAN2.0 platform [J]. Journal of Applied Meteorological Science,29(1):10 (in Chinese). doi:10.11898/1001–7313.20180103

韩雷，俞小鼎，郑永光，等.2009.京津及邻近地区暖季强对流风暴的气候分布特征[J].科学通报,2009(11):1585–1590. Han L, Yu X D, Zheng Y G, et al. 2009. Statistic characteristics of severe convective storm durmg Warm–Season in Beijing–Tianjin and its vicinity [J]. Chinese Science Bulletin,2009(11):1585–1590. doi:10.1360/csb2009–54–11–1585

梁梦雪，郭凤霞，吴鑫，等.2016.冰相粒子的相对增长对非感应起电影响的模拟研究[J].高原气象,35(2):538–547. Liang M X, Guo F X, Wu X, et al. 2016. Numerical simulation of influence of relative qrowth of ice and qraupel on noninductive electrification [J]. Plateau Meteorology,35(2):538–547 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0534. 2015. 00013

刘娜，熊安元，张强，等.2021.强对流天气人工智能应用训练基础数据集构建[J].应用气象学报,2(5):530–541. Liu N, Xiong A Y, Zhang Q, et al. 2021. Development of basic dataset of severe convective weather for artificial intelligence training [J]. Journal of Applied Meteorological Science,2(5):530–541 (in Chinese). doi:10.11898/1001–7313.20210502

马启明，苑尚博.2014.基于斜向通道的云闪放电特性研究[J].科学技术与工程,14(25):6–11. Ma Q M, Yuan S B. 2014. Calculation of lightning electromagnetic field by oblique channel [J]. Science Technology and Engineering,14(25):6–11 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1671–1815.2014.25.002

孟青，樊鹏磊，郑栋.2018.青藏高原那曲地区地闪与雷达参量关系[J].应用气象学报,9(5):524–533. Meng Q, Fan P L, Zheng D, et al. 2018. Relationships between cloud–to–ground lightning and radar parameters at Naqu of the Qinghai–Tibet plateau [J]. Journal of Applied Meteorological Science,9(5):524–533 (in Chinese). doi:10.11898/1001–7313.20180502

孟晓阳，王佳权，马启明.2022. 2020年基于VLF/LF三维闪电定位系统的全国闪电数据集[J].中国科学数据,7(1):31–44. Meng X Y, Wang J Q, Ma Q M. 2022. A dataset of lightning in China based on VLF/LF lightning location monitoring system [J]. China Scientific Data,7(1):31–44 (in Chinese). doi:10.11922/11–6035.csd.2021.0059.zh

孙哲，魏鸣.2016.春季与夏季两次雷暴大气结构及地闪特征对比[J].大气科学学报,39(2):260–269. Sun Z, Wei M. 2016. Influence factors comparing of thunderstorm between spring and summer in Nanjing [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,39(2):260–269 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20130823001

王娟，谌芸.2015. 2009–2012年中国闪电分布特征分析[J].气象,41(2):160–170. Wang J, Chen Y. 2015. Analysis of the 2009–2012 lightning distribution characteristics in China [J]. Meteorological Monthly,41(2):160–170 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2015.02.004

王婷波，周康辉，郑永光.2020.我国中东部雷暴活动特征分析[J].气象,46(2):189–199. Wang T B, Zhou K H, Zheng Y G. 2020. Statistic analysis of thunderstorm characteristics in Central and Eastern China [J]. Meteorological Monthly,46(2):189–199 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2020.02.005

王学良，余田野，汪姿荷，等.2016. 1961—2013年中国雷暴气候特征及东亚夏季风影响研究[J].暴雨灾害,35(5):471–481. Wang X L, Yu T Y, Wang Z H, et al. 2016. Analysis on climate characteristics of thunderstorm in China and effect of East Asian summer monsoon on it during 1961–2013 [J]. Torrential Rain and Disasters,35(5):471–481 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2016.05.009

王学良，刘学春，黄小彦，等.2010.湖北地区云地闪电时空分布特征分析[J].气象,36(10):91–96. Wang X L, Liu X C, Huang X Y, et al. 2010. Analysis of the spatial and temporal distribution characteristics of the cloud–

ground lightning in Hubei area [J]. Meteorological Monthly,36(10):91–96 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2010.10.015

王秀玲,曹晓霞,朱靖民.2014.汛期短历时强降水过程的闪电特征[J].气象科技,42(1):140–144. Wang X L, Cao X X, Zhu J M. 2014. Characteristics of lightning in three short–duration heavy rains in flood season [J]. Meteorological Science and Technology,42(1):140–144 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1671–6345.2014.01.023

袁方,郭江,张广洲,等.2020.基于DBSCAN算法处理的无线电干扰和温度相关性分析[J].电测与仪表,57(3):7–11. Yuan F, Guo J, Zhang G Z, et al. 2016. Radio interference and temperature correlation analysis based on DBSCAN algorithm [J]. Electrical Measurement & Instrumentation,57(3):7–11 (in Chinese). doi:10.19753/j.issn1001–1390.2020.03.002

王艳春,陈宏,尉英华,等.2023.天津雷暴大风天气的环流场及雷达回波特征分析[J].沙漠与绿洲气象,17(6):119–126. Wang Y C, Chen H, Wei Y H, et al. 2023. Circulation field and radar characteristics of thunderstorm gales in Tianjin [J]. Desert and Oasis Meteorology,17(6):119–126 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002–0799.2023.06.016

武智君,郄秀书,王东方,等.2013.大兴安岭林区负地闪电荷源的反演[J].气象学报,71(4):783–795. Wu Z J, Qin X S, Wang D F, et al. 2013. Retrieval of the charge sources neutralized by negative cloud–to–ground lightning flashes in the Daxing'anling Forest region [J]. Acta Meteorologica Sinica,71(4):783–795 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2013.057

卓鸿,王冀,霍苗,等.2018.不同天气影响形势下首都国际机场雷暴的空间分布及移动特征[J].暴雨灾害,37(1):57–66. Zhuo H, Wang J, Huo M, et al. 2018. Study on thunderstorm characteristics over the capital international airport of diurnal and spatial distribution and moving under different weather situations [J]. Torrential Rain and Disasters,37(1):57–66 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2018.01.008

郑劲光,蔡小琴.2019.抚州市近59 a雷暴气候特征及影响系统分析[J].暴雨灾害,38(4):386–392. Zheng J G, Cai X Q. 2019. Analysis of the climate characteristics and influence system of thunderstorms in Fuzhou in recent 59 years [J]. Torrential Rain and Disasters,38(4):386–392 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2019.04.012

张腾飞,张杰,尹丽云.2013.云南一次秋季雷暴过程的闪电特征及形成条件分析[J].高原气象,32(1):268–277. Zhang T F, Zhang J, Yin L Y. 2013. Analyses on lightning feature and formation condition for a thunderstorm process in Yunnan [J]. Plateau Meteorology,32(1):268–277 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0534.2012.00026

Johnson J T, Mackeen P L, Witt A, et al. 1998. The storm cell identification and tracking algorithm: An enhanced WSR–88D algorithm [J]. Weather Forecasting,13(2):263–276. doi:10.1175/1520–0434(1998)0132.0.CO;2

Liu W, Li X. 2016. Life cycle characteristics of warm–season severe thunderstorms in central united states from 2010 to 2014 [J]. Climate,4(3):45. doi:10.3390/cli4030045

Wapler K, James P. 2015. Thunderstorm occurrence and characteristics in Central Europe under different synoptic conditions [J]. Atmospheric Research,5(158/159):231–244. doi:10.1016/j.atmosres.2014.07.011

Yang Q, Wang J, Zhou X, et al. 2021. Preliminary evaluation of Hai–Nan lightning detection network (HNLDN) [J]. Radio Science,9(56):1–18. doi:10.1029/2021RS007321

（责任编辑　唐国瑛）