Vol. 49 No. 9 September 2023

朱海斌,杨婧,纪晓玲,等,2023. 宁夏北部暖季对流风暴雷达气候学特征分析[J]. 气象,49(9):1085-1096. Zhu H B,Yang J,Ji X L,et al,2023. Radar climatic characteristics of convective storms during warm-season in northern Ningxia[J]. Meteor Mon,49 (9):1085-1096(in Chinese).

## 宁夏北部暖季对流风暴雷达气候学特征分析\*

朱海斌 $^{1,2,4}$  杨  $f_{1,2,3}$  纪晓玲 $^{1,2,3}$  杨苑媛 $^{1,2,5}$  姚姗姗 $^{1,2,5}$ 

- 1 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室,银川 750002
- 2 宁夏气象防灾减灾重点实验室,银川 750002
- 3 宁夏气象台,银川 750002
- 4 吴忠市气象局,吴忠 751100
- 5 银川市气象局,银川 750002

提 要:使用 2011—2016 年 5—9 月长时间序列的银川新一代多普勒天气雷达导出产品,对宁夏北部暖季对流风暴的气候特征进行了统计分析。结果表明:77%对流风暴的生命史小于 30 min,移动速度在  $9\sim13$  m·s<sup>-1</sup>,主要向偏东方向移动,且在该方向的移动速度大于其他方向。对流风暴最大反射率因子集中在  $35\sim50$  dBz,回波顶高大多在  $5\sim9$  km,垂直累积液态水含量普遍小于 10 kg·m<sup>-2</sup>。500 hPa 风为宁夏北部对流风暴的引导气流。500 hPa、700 hPa 受偏北风控制时,对流风暴产生的概率较低;500 hPa、700 hPa 受偏南风控制时,对流风暴产生的概率相对较高。逐月来看,每年 7 月对流风暴核密度达到峰值;逐时来看,每日 12 时、13 时达到峰值。贺兰山是对流风暴的高发区,其次位于灵武中北部至以北的鄂托克前旗地区的沙地。对流风暴在贺兰山的分布并不均匀,在高山一深谷地带对流风暴发生最多。

关键词:雷达气候学,宁夏,深厚湿对流,核密度估计(KDE)

中图分类号: P412,P462

文献标志码: A

**DOI:** 10.7519/j. issn. 1000-0526. 2023. 052501

# Radar Climatic Characteristics of Convective Storms During Warm-Season in Northern Ningxia

ZHU Haibin<sup>1,2,4</sup> YANG Jing<sup>1,2,3</sup> JI Xiaoling<sup>1,2,3</sup> YANG Yuanyuan<sup>1,2,5</sup> YAO Shanshan<sup>1,2,3</sup>

- 1 Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management of Characteristic Agriculture in Arid Region, CMA, Yinchuan 750002
- 2 Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Yinchuan 750002
- 3 Ningxia Meteorological Observatory, Yinchuan 750002
- 4 Wuzhong Meteorological Office, Ningxia, Wuzhong 751100
- 5 Yinchuan Meteorological Bureau, Yinchuan 750002

**Abstract:** Long-time series of Doppler radar products of Yinchuan from May to September of 2011-2016 are used to analyze the climatic characteristics of convective storms in northern Ningxia. The results indicate that 77% of all convective storms in northern Ningxia lasted for no more than 30 min and moved at a speed of 9-13 m·s<sup>-1</sup>. Most of them mainly moved eastward at higher speeds compared to the moving speeds in other directions. The maximum reflectivity factor of convective storms was concentrated between 35-50 dBz, the echo top height was between 5-9 km, and the vertical integrated liquid water content

<sup>\*</sup> 宁夏自然科学基金项目(2019AAC03256)、国家自然科学基金地区基金项目(41865008)、中国气象局复盘总结专项(FPZJ2023-148)和宁 夏回族自治区科技创新领军人才培养工程(2021GKLRLX05)共同资助

<sup>2022</sup>年6月28日收稿; 2023年6月20日收修定稿

第一作者:朱海斌,主要从事灾害性天气机理和预报技术研究. E-mail:275227314@qq.com

was generally less than 10 kg • m<sup>-2</sup>. The 500 hPa wind was the steering flow of convective storms. The probability of convective storm occurrence was lower when 500 hPa and 700 hPa were controlled by northerly winds, but relatively high when controlled by southerly winds. July was the peak month for convective storms, and the peak hours were 12:00 BT to 13:00 BT. Helan Mountain was the area with the highest occurrence of convective storms, followed by the sandy areas from the central-north of Lingwu to the north of Otog Front Banner. The distribution of convective storms was not uniform in Helan Mountain, and the most frequent occurrence was in the areas between high mountains and deep valleys.

Key words: radar climatology, Ningxia, deep moist convection, kernel density estimation (KDE)

## 引言

强对流天气通常指由深厚湿对流产生的包括冰 雹、雷暴大风、龙卷、短时强降水等灾害性天气 (Newton, 1967)。由于强对流天气空间尺度小、生 命史短、局地突发性强,使用常规探测手段很难对其 做出准确的预报和监测预警,这在当前和可预见的 未来仍是天气预报业务的难点(郑永光等,2015;俞 小鼎和郑永光,2020)。开展气候统计分析,为短时 临近预报提供气候背景资料,是强对流天气预报必 要的基础性工作。已有的研究使用常规观测站、卫 星、闪电定位、重要天气报、灾情报告等资料,开展不 同地区不同种类强对流的气候特征分析,取得了很 多重要成果(Lin et al, 2011; Zhang and Zhai, 2011; 陈国春等,2011; Chen et al,2013; 范雯杰和俞小鼎, 2015; 王娟和谌芸, 2015; 陈晓欣等, 2022; 周康辉等, 2021;郑永光等,2017)。多普勒天气雷达资料具有 更高的时空分辨率、包含三维空间信息,能够揭示更 丰富、更精细的强对流特征,开展强对流气候统计分 析具有独特的优势,这也就是所谓的雷达气候学 研究。

目前雷达气候学研究主要包含对流性降水和对流风暴两个方面(陈明轩等,2014;潘赫拉等,2020),前一方面的研究集中在对流性降水的周期变化特征以及与地形分布的关系。Carbone et al(2002)、Carbone and Tuttle(2008)和 Ahijevych et al(2003;2004)使用美国自 1988 年开始布设的 WSR-88D 雷达站网多年累积资料,揭示了在太阳辐射和地形强迫共同作用下,美国大陆暖季降水回波存在明显的日循环和半日循环周期性传播和山区新生向东传播的特征。Lang et al(2007)和 Rowe et al(2008)通过对墨西哥西北地区三部雷达观测资料的分析,进一步证实了地形强迫对降水回波每日新生和传播起到

的决定性作用。Chen X C et al (2014)和 Chen (2015)研究了珠三角地区对流性降水日循环和传播 特征及其物理机制,发现珠三角南部的海岸线和东 北部的迎风山坡是对流性降水高发区。在对流风暴 的雷达气候学研究方面, Murray and Colle(2011)、 Chen et al(2012)和 Chen M X(2014)和孙康远等 (2017)以固定的回波强度(40 dBz 或 45 dBz)作为 阈值提取对流风暴,分析了对流风暴日际、月际、年 际变化特征以及与天气尺度系统的关系。另一些学 者充分应用雷达资料的三维空间信息,使用对流风 暴单体识别和追踪分析算法,进一步给出了对流风 暴的生命史、移向、移速、顶高等定量化的气候特征。 Mohee and Miller (2010) 使用风暴质心追踪算法 (storm cell identification and tracking, SCIT) (Johnson et al, 1998),对美国北达科他州的对流风 暴分析发现,对流风暴平均生命史为 23.6 min,平 均行程为 21.8 km,平均移速为 $16.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,移动 方向多为偏东北方向。Saxen et al(2008)使用风暴 三维属性追踪算法 TITAN (Dixon and Wiener, 1993),发现美国新墨西哥州南部多山地区绝大部分 对流风暴生命史小于 30 min,面积小于 25 km²,移 动速度小于 4 m·s<sup>-1</sup>,顶高超过 0℃层。Lock and Houston(2015)使用 ThOR 算法(Houston et al, 2015)分析了美国中部对流风暴初生点的时空分布 特征。韩雷等(2009)使用改进了的 TITAN 算法 SMC-ST(Han et al, 2008),在国内首次开展了对流 风暴的雷达气候学研究,发现京津及邻近地区对流 风暴生命史普遍小于 30 min,大多从西南向东北移 动,面积、体积等特征具有西弱东强的特点。管理等 (2020)使用雷达导出产品,统计分析了发生在上海 的三类对流风暴在生命史、质心高度、垂直液态含水 量和最大反射率因子及高度方面存在的差异。还有 一些学者,对于组织性更强的飑线(Hocker and Basara, 2008; Meng et al, 2013)、中尺度对流系统

(Zheng et al, 2013; Haberlie and Ashley, 2019)等也 开展了雷达气候学研究。

目前我国在雷达气候学方面的研究很少,主要集中在京津冀和珠三角地区,基于对流风暴单体识别和追踪分析的雷达气候学研究屈指可数,地形对对流风暴气候分布影响的研究很不深入。宁夏位于西北地区东部,南北走向的贺兰山给宁夏北部的强对流预报带来了巨大的挑战,开展雷达气候学研究,为强对流预报提供背景资料非常有必要。本文使用新一代天气雷达系统生成的导出产品,研究宁夏北部对流风暴的雷达气候学特征,特别是贺兰山对对流风暴气候分布的影响。

## 1 资料与方法

新一代天气雷达系统提供了丰富的导出产品(俞小鼎等,2006),包含组合反射率产品(CR)、回波顶高产品(ET)、垂直累积液态水含量产品(VIL)、风暴跟踪信息产品(STI)等。本文使用的导出产品来源于宁夏银川新一代多普勒天气雷达,雷达体扫模式为 VCP21,数据时间范围为 2011—2016 年 5—9 月。

STI 采用 SCIT 算法(Johnson et al, 1998),显 示半径为 250 km,包含对流风暴在当前时刻以及过 去最多 10 个连续时刻的位置信息,以及未来 15~ 60 min 位置预测信息等(俞小鼎等,2006)。通过读 取 STI 直接获得每一个对流风暴的位置信息,并进 行以下处理:(1)由于 STI 包含当前和过去时刻对 流风暴的位置信息,为避免重复累计,对于时间连续 的 STI,根据时间的前后顺序以及对流风暴当前和 过去的位置,将不同时刻 STI 中的同一对流风暴进 行合并,作为一个对流风暴;(2)只在一个时刻被识 别出的对流风暴不记入统计结果。2011-2016年 5-9月 STI 识别出对流风暴 71848 个,舍弃只在一 个时刻被识别出的对流风暴 36 367 个,对剩余 35 481 个对流风暴进行统计分析。对流风暴在不同 时刻的回波强度、顶高、液态水含量,分别由同一时刻 对流风暴所在位置的 CR、ET 和 VIL 确定,上述三个 产品的空间分辨率均为 1 km,其中 CR 显示半径为 250 km, ET 和 VIL 显示半径为 125 km。

使用银川站每日 08 时、20 时(北京时,下同)探

空资料分析对流风暴与高空风之间的关系。使用核密度估计(KDE)方法分析对流风暴的空间分布特征。选用通用性最强的 ArcGIS 进行 KDE,核函数为 Epanechnikov 核函数,与正态分布类似。带宽的选择是 KDE 的关键,本文通过对比不同带宽的分析结果,结合所研究区域的范围大小,确定 8 km 为最终带宽值。

## 2 对流风暴的基本特征

#### 2.1 对流风暴的生命史及运动规律

将某一对流风暴最初与最后被识别出的时间差作为该对流风暴的生命史,从图 1 展示的 35 481 个对流风暴生命史的分布频数看,生命史在 5~10 min 的对流风暴数量最多,占比为 27%,生命史大于 10 min 的对流风暴数量迅速减少。77%的对流风暴生命史不超过 30 min,超过 60 min 的对流风暴仅占总数的 5%。

按照 16 方位风向对对流风暴的移动方向进行划分和命名,图 2 展示了对流风暴不同移动方向的频数和移动速度。整体看来,对流风暴移动方向的频数和移动速度都呈单峰型分布,且波峰基本重合,移动方向频数的峰值出现在正东,最大移动速度出现在东东北。从移动方向上看,东东北、东、东东南三个方向的频数在 13%~15%,明显高于其他方向,西南、西西南、西、西西北、西北五个方向的频数较低,仅在 2%~3%。从移动速度上看,东北、东东北、东三个方向在 12~13 m·s<sup>-1</sup>,明显大于其他方向,西西南、西、西西北三个方向仅为 9.0~9.5 m·s<sup>-1</sup>。

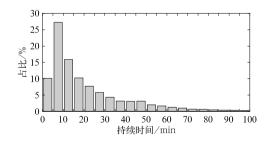


图 1 2011—2016 年 5—9 月对流 风暴生命史频数分布

Fig. 1 Frequency distribution of convective storm duration from May to September in 2011-2016

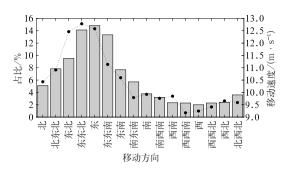


图 2 2011—2016 年 5—9 月对流风暴 移动方向的频数(柱状)和 移动速度(折线)分布

Fig. 2 Distribution of moving direction frequency (histogram) and moving speed of convective storms (broken line) from May to September in 2011—2016

#### 2.2 对流风暴的属性特征

CR能直观地显示对流风暴的最大反射率因 子,反映了风暴的强度特征。统计发现,对流风暴强 度呈单峰型分布,在40~45 dBz 的对流风暴占比最 高,达 30%,76%的对流风暴强度集中在 35~ 50 dBz,大于 55 dBz 的不到 6%(图 3a)。ET 能够 反映对流风暴在垂直方向上的发展程度,根据孙康 远等(2017)的分类方法,回波顶高低于 6 km 的为 浅对流,在 $6\sim12$  km 的为中深对流,高于 12 km 的 为深对流。在宁夏北部,37%的对流风暴属于浅对 流,62%属于中深对流,只有不到1%属于深对流 (图 3b)。VIL 反映了对流风暴云中降水的水资源 条件,从图 3c 可以看出,随着垂直累积液态水含量 的升高,对流风暴频数迅速下降,垂直累积液态水含 量在  $1\sim5$  kg·m<sup>-2</sup>的对流风暴占比最高,达 47%, 垂直累积液态水含量在 5~10 kg·m<sup>-2</sup>的占比 25%,大于 40 kg·m<sup>-2</sup>的占比不到 1%。

## 3 对流风暴与高空风的关系

#### 3.1 高空风风向与对流风暴发生频数的关系

以往研究表明,对流风暴与高空风有密切联系(Chen M X et al,2014)。对于宁夏预报员,500 hPa 风场表征了大尺度环流形势,700 hPa 风场表征了暖湿空气的输送或低槽、切变等的影响。从图 4 来看,宁夏北部暖季 500 hPa 主要受西西北(26%)、

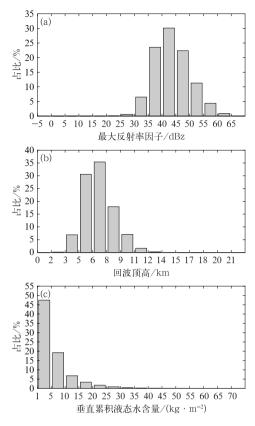


图 3 2011—2016 年 5—9 月对流风暴 (a)最大反射率因子,(b)回波顶高,

(c)垂直累积液态水含量频数分布

Fig. 3 Frequency distribution of (a) the maximum reflectivity factor,

(b) the echo top height,

(c) vertical integrated liquid water content of convective storms from May to September in 2011—2016

西北(22%)、西(18%)风控制,其他各风向频数不超过10%;700 hPa 各风向分布相对均匀,西北风频数最高达15%,西风(9%)次之,其他各风向普遍在4%~8%。500 hPa、700 hPa 不同风向的频数与对应风向下对流风暴频数总体呈成正比关系,说明对流风暴能够广泛地发生在不同的环流配置中。对于某一风向,如果对流风暴的频数明显高于该风向的频数,说明在该风向控制下对流风暴产生的概率相对较高,反之亦然,这反映了在不同的环流背景下对流风暴产生的难易程度是不同的。当500 hPa 受北、北西北、西北风控制时,三个风向频数合计为32%,对应槽后、脊前的大尺度环流形势,产生的对流风暴频数合计为14%,对流风暴产生的概率较低;受西西南、西南、南风控制时,四个风向

频数合计为 17%,对应着槽前的大尺度环流形势,产生的对流风暴频数合计可达 37%,对流风暴产生的概率较高(图 4a)。当 700 hPa 受北、北西北、西北、西西北风控制时,四个风向频数合计为 36%,对应干冷空气的输送,产生的对流风暴频数合计为 21%,对流风暴产生的概率较低;受西西南、西南、南

西南、南风控制时,四个风向频数合计为17%,对应暖湿气流的输送或低槽、切变等的影响,配合贺兰山地形强迫抬升作用,产生的对流风暴频数合计为27%,对流风暴产生的概率较高(图4b)。

表 1 进一步展示了对流风暴频数由大到小排在前 12 的 500 hPa 和 700 hPa 的风向配置情况,其中

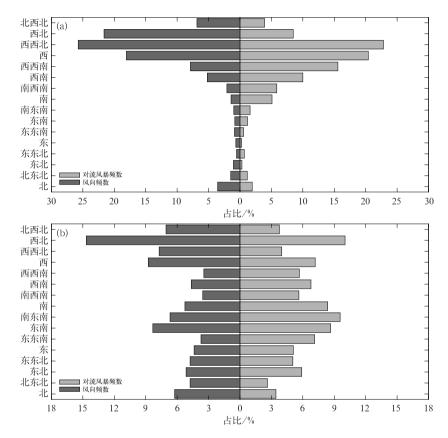


图 4 2011—2016 年 5—9 月(a)500 hPa 和(b)700 hPa 风向频数和各风向下对流风暴频数分布 Fig. 4 Frequency distribution of wind directions and convective storms under different wind directions at (a) 500 hPa and (b) 700 hPa from May to September in 2011—2016

表 1 2011—2016 年 5—9 月对流风暴出现次数排名前 12 的 500 hPa 和 700 hPa 风向配置 Table 1 Wind direction configurations at 500 hPa and 700 hPa for the top 12 ranked occurrences of convective storms from May to September in 2011—2016

排序	对流风暴 个数/个	风向配置			对流风暴个数
		500 hPa	700 hPa	出现次数/次	与出现次数之比
1	1313	西西北	西北	83	16
2	1052	西	东南	24	44
3	912	西西北	西	61	15
4	893	西南	南	14	64
5	865	西北	南	21	41
6	865	西南	东东南	9	96
7	812	西西北	西南	32	25
8	796	西	东北	16	50
9	762	南	南东南	9	85
10	754	西西南	东南	15	50
11	684	西	西西南	13	53
12	648	西西北	西西南	18	36

对流风暴个数与该种风向配置出现的次数之比表征了在某种风向配置下对流风暴产生概率的高低。可以看出,对流风暴频数排名靠前的风向配置主要可以分为两类:第一类是 500 hPa 是西西北风、700 hPa 是西北和西风,分别出现了 83 次和 61 次,风向配置出现次数远多于其他,但对流风暴个数与出现次数之比仅为 16 和 15,对流风暴产生的概率低;第二类是500 hPa 或 700 hPa 的风向上有南风分量,这种风向配置的特点是出现次数较少,但对流风暴个数与风向配置的特点是出现次数较少,但对流风暴个数与风向个数比值大,对流风暴产生的概率较高,特别是500 hPa 西南风、700 hPa 东东南风的配置只有 9次,但对流风暴个数与风向配置次数之比达 96,对流风暴产生的概率很高,产生了 865 个对流风暴。

#### 3.2 高空风风向与对流风暴移动方向的关系

通过统计长时间序列对流风暴的移动特征发现,如果对流风暴的移动方向与某一高度上的风向较为一致,可以认为该高度上的风是对流风暴的引导气流。一般而言,700~500 hPa 的风代表了影响对流系统移动的引导气流(陈明轩等,2014)。图 5对比了500 hPa 和700 hPa 不同风向下对流风暴移动方向的分布,结合图 4 可以看出,由于宁夏北部5—9 月500 hPa 盛行偏西风(西西北、西北、西风、西西南),在偏西风控制下,对流风暴的移动方向集中出现在偏东方向(东、东东北、东东南、东南)(图5a);相较之下,700 hPa 各风向分布相对均匀,与对流风暴的移动方向对应关系较差(图5b)。因此,500 hPa 风为宁夏北部对流风暴的引导气流。

## 4 对流风暴时空分布特征

宁夏北部海拔高度在 1000 m 以上,最显著的特征是存在纵跨南北的贺兰山。贺兰山南北长约为 200 km,东西宽为 20~40 km,海拔普遍在 1600~ 3000 m,主峰高达 3556 m。贺兰山西侧是腾格里沙漠,东侧是银川平原(图 6a)。贺兰山还是我国荒漠草原与荒漠、季风区与非季风区、外流区域与内流区域的分界线,具有重要的气候意义。为了方便描述贺兰山地形对对流风暴空间分布的影响,图 6b 中根据高程标注出了 3 个山峰(M1~M3)和 11 个山谷(V1~V11)。

#### 4.1 对流风暴逐月分布特征

核密度估计(KDE)分析结果能直观反映对流

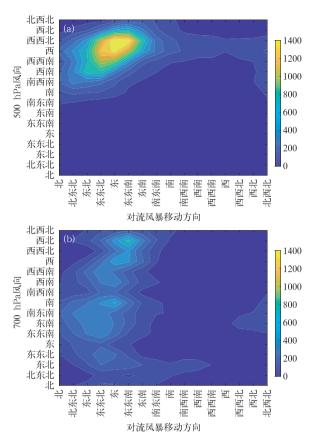


图 5 2011—2016 年 5—9 月(a)500 hPa 和
(b)700 hPa 各风向下对流风暴移动方向频数分布
Fig. 5 Frequency distribution of convective storm
moving direction under different wind directions at
(a) 500 hPa and (b) 700 hPa from May
to September in 2011—2016

风暴空间数量分布的聚集程度,长时间序列风暴的 KDE 也就反映了对流风暴空间分布的气候特征,指 示了对流风暴在不同时段、不同区域发生概率的相 对大小,能够为日常强对流预报提供背景支持。

图 7 展示了宁夏北部 5—9 月逐月对流风暴核密度分布特征,从整体看:(1)5—7 月对流风暴核密度迅速升高、范围迅速增大,7 月达到峰值,8 月明显减弱,9 月与 6 月相当,这是由于 7 月日照辐射加热作用最强,平均气温最高,热力抬升条件最好,6 月、8 月次之。另外,垂直探空资料统计结果表明,7 月、8 月 700 hPa 盛行偏南风的频数最高,水汽条件最好。(2)贺兰山是对流风暴核密度最高的区域,灵武以北的鄂托克前旗地区次之,上述两个区域分别是山地和沙地,主要是由于热力抬升作用产生的。(3)对流风暴向山下平原地区传播的特征不明显,离开贺兰山山麓地带后,对流风暴迅速减少。

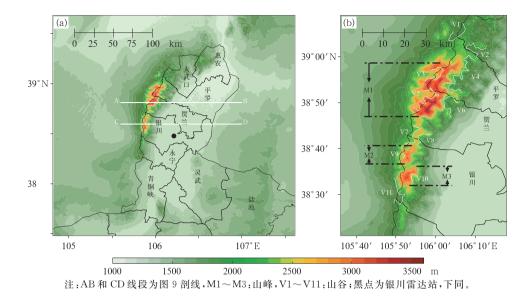


图 6 宁夏北部高程图 Fig. 6 The elevation map of northern Ningxia

逐月对流风暴核密度分布显示:(1)5月对流风暴的核密度最低、范围最小,对流风暴主要出现在银川、永宁。(2)6月贺兰山贺兰至银川段成为对流风暴核密度大值区,大值中心出现在 V7~V8一带。(3)相较6月,7月贺兰山对流风暴核密度大值区向北、向南、向东三个方向扩展,其最大值中心出现在 V5~M1平罗与贺兰交界段~V6一带,次大值中心

自北向南分别是 V4、V7~V8 一带和 M3~V11 一带,大值中心核密度值约为 6 月的 2 倍;在永宁与青铜峡交界处、灵武以北的鄂托克前旗地区核密度值也较高。(4)8 月对流风暴核密度大值中心出现在灵武以北的鄂托克前旗地区,相较 7 月,贺兰山一带明显减弱,灵武以北的鄂托克前旗地区有所加强。(5)9 月风暴的范围迅速减小,银川东部核密度值较高。

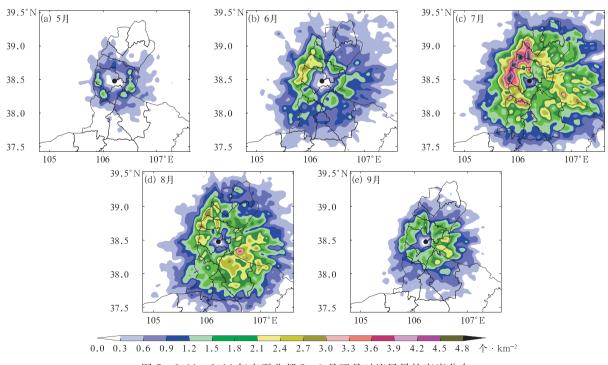


图 7 2011—2016 年宁夏北部 5—9 月逐月对流风暴核密度分布 Fig. 7 The kernel density distribution of monthly convective storms in northern Ningxia from May to September in 2011—2016

综上,6—8月贺兰山地形对对流风暴能够产生显著影响,其中7月最为明显。对流风暴在贺兰山的分布并不均匀,其中V4、V5~M1平罗与贺兰交界段~V6一带、V7~V8一带、M3~V11一带是对流风暴的高发区。对流风暴向山下平原地区传播的特征不明显。7—8月灵武以北的鄂托克前旗地区对对流风暴能够产生显著影响,其中8月最为明显。

#### 4.2 对流风暴逐时分布特征

宁夏北部 5—9 月的逐时对流风暴核密度分布 (图 8)可以分为三个阶段:10—20 时是对流风暴最 为活跃的时段,在太阳辐射与山地、沙地共同作用下,贺兰山仍然是对流风暴核密度值最大的区域,其 次是灵武北部至以北的鄂托克前旗地区。随着太阳

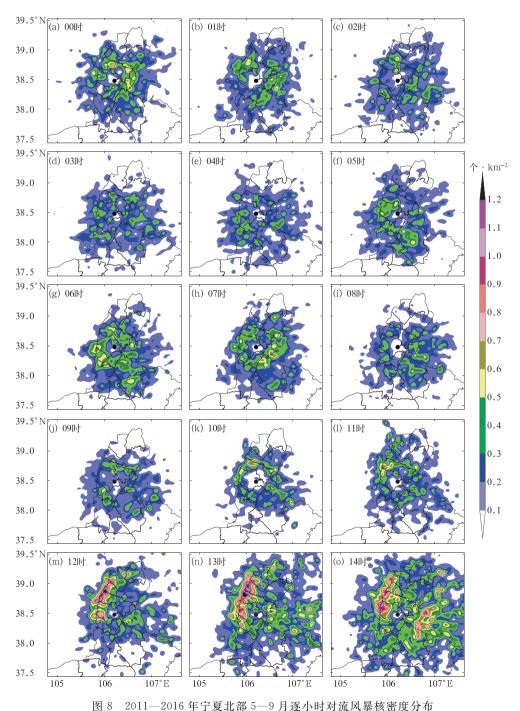
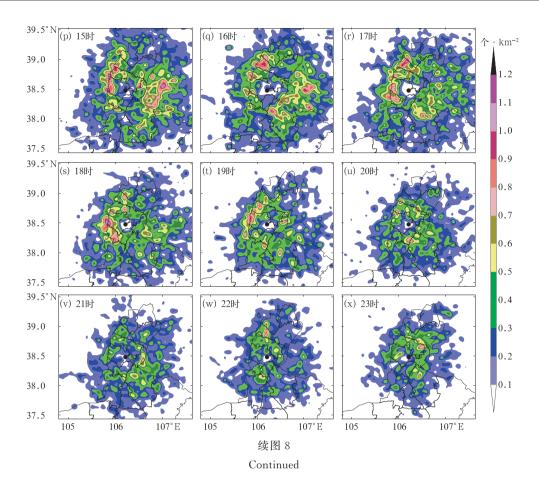


Fig. 8 The kernel density distribution of hourly convective storms in northern Ningxia from May to September in 2011—2016



辐射的减弱,20 时至次日 01 时对流风暴活动明显减弱,山地和沙地作用不再显著,大值区(大于 0.7 个·km<sup>-2</sup>)范围缩小;01—10 时对流风暴活动是全天最弱的时段,核密度值最大不超过 0.7 个·km<sup>-2</sup>。下面主要分析贺兰山和灵武中北部至以北的鄂托克前旗地区对流风暴核密度大值的分布特征。

在贺兰山,对流风暴核密度大值区首先于10时开始出现在V6~贺兰山平罗与贺兰交界段东麓,11时出现在V7~V8一带。12时、13时达到峰值,12时最大值中心出现在V5~M1平罗与贺兰交界段~V6一带,两个次大值中心分别出现在V2和V7~V8一带。13时对流风暴核密度最大值中心相较12时有所南移,出现在V5~M1贺兰北段~V6一带,次大值中心出现在V3~M1平罗南段、V2和M3~V10一带。相较12时、13时,14时、15时对流风暴核密度明显减弱,大值区向南移。14时大值区出现在海拔较低的M2和M3附近,大值中心分别在M2西侧的V9和M3西坡,次大值中心在V5和V1;15时大值中心出现在V7和V11,次大值中心在V5~M1贺兰北段。16时对流风暴核密度进一步减弱,17时、18时又增强至与14时、15时相

当的水平,16 时、17 时大值中心都出现在 V4 一带,18 时出现在  $V11 \sim M3$  南坡。19 时开始对流风暴核密度迅速减弱,大值区出现在  $M2 \sim M3$  和 V6; 20 时最大值出现在 V8 和 M1 平罗与贺兰交界段。

沿对流风暴的主要移动方向(偏东方向),从图 6a 中的 AB、CD 两条纬向线段做对流风暴核密度的时间-距离剖面图(图 9),可以看出,核密度最大值区分布在贺兰山山峰附近,并偏向西坡,也就是偏向盛行风的迎风坡。海拔较高山峰的核密度总体大于海拔较低的山峰,海拔较高的山峰出现核密度最大值的时间也早于海拔较低的山峰。

在灵武中北部至以北的鄂托克前旗地区,13—18 时是对流风暴较为活跃的时段,对流风暴核密度大值区首先于 13 时出现,14 时、15 时达到最强,对流风暴核密度大值区自银川以东的鄂托克前旗延伸至灵武中北部地区,基本呈南北向的带状分布,从16 时开始逐渐减弱。

综上, 贺兰山在太阳辐射加热作用下,在 10—20 时对对流风暴产生了显著影响, 其中 12—13 时最为明显。贺兰山的  $V5\sim M1$  平罗与贺兰交界段  $\sim V6$  一带、 $V3\sim M1$  平罗南段、V2、 $V7\sim V8$ 、V4、

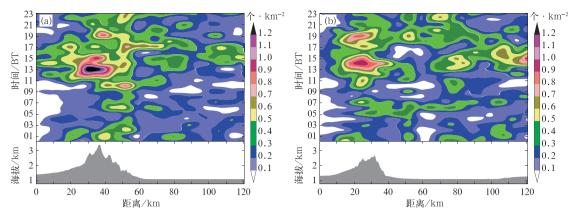


图 9 对流风暴核密度沿图 6a(a)A(38.8°N、105.6°E)点到 B(38.8°N、107.0°E)点, (b)C(38.6°N、105.6°E)点到 D(38.6°N、107.0°E)点的时间-距离剖面 Fig. 9 Time-distance profile of convective storm kernel density

(a) from point A (38.8°N, 105.6°E) to point B (38.8°N, 107.0°E) and

(b) from point C (38.6°N, 105.6°E) to point D (38.6°N, 107.0°E)

M2 和 M3 附近以及 V11 是对流风暴的高发区。对流风暴向山下平原地区传播的特征仍不明显。灵武中北部至以北的鄂托克前旗地区的对流风暴在14 时、15 时最为活跃。对流风暴在贺兰山的分布并不均匀,但无论从逐月还是逐时来看,对流风暴的最大值区都出现在贺兰山的 V5~M1 平罗与贺兰交界段~V6 一带,这里的山脉海拔最高,并且山脊两侧分布着很深的山谷(V5 和 V6)。

### 5 结 论

本文使用雷达导出产品对宁夏北部 2011—2016 年 5—9 月对流风暴进行了统计分析,结果表明:

(1)对流风暴的基本特征:宁夏北部 77%的对流风暴生命史小于 30 min,超过 60 min 的对流风暴仅占总数的 5%;移动速度集中分布在 9~13 m·s<sup>-1</sup>,主要向偏东方向移动,且在该方向的速度大于其他方向。76%的对流风暴最大反射率因子集中在 35~50 dBz,大于 55 dBz 的不到 6%;回波顶高集中在 5~9 km,其中 62%属于中深对流,37%属于浅对流;72%的对流风暴垂直累积液态水含量小于  $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,大于  $40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 的占比不到 1%。

(2)对流风暴与高空风的关系:当 500 hPa 受北、北西北、西北风控制时,对流风暴产生的概率较低;受西西南、西南、南西南、南风控制时,对流风暴产生的概率相对较高;当 700 hPa 受北、北西北、西北、西西北风控制时,对流风暴产生的概率较低;受

西西南、西南、南西南、南风控制时,对流风暴产生的概率相对较高。产生对流风暴较多的风向配置分为两类:第一类是 500 hPa 是西西北风、700 hPa 是西北或西风,第二类是 500 hPa 或 700 hPa 的风向上存在南风分量。第一类是由于此种风向配置出现次数多,第二类是由于在此种风向配置下,对流风暴产生概率较高。500 hPa 风为宁夏北部对流风暴的引导气流。

(3)对流风暴的时空分布特征:从逐月分布看,7月对流风暴核密度达到峰值,8月次之,7月贺兰山是对流风暴核密度的最大值区,8月灵武以北的鄂托克前旗地区是对流风暴的最大值区。从逐时分布看,核密度10—20时是对流风暴核密度最为活跃的时段,12时、13时达到峰值,贺兰山仍是对流风暴的最大值区,其次是灵武中北部至以北的鄂托克前旗地区的沙地。对流风暴在贺兰山的分布并不均匀,但无论从逐月还是逐时来看,对流风暴核密度的最大值区都出现在"高山—深谷"的 V5~M1 平罗与贺兰交界段~V6 一带。

#### 参考文献

陈国春,郑永光,肖天贵,2011. 我国暖季深对流云分布与日变化特征分析[J]. 气象,37(1):75-84. Chen G C, Zheng Y G, Xiao T G, 2011. Distribution and spatiotemporal variations of deep convective clouds over China during the warm season[J]. Meteor Mon, 37(1):75-84(in Chinese).

陈明轩,王迎春,高峰,等,2014. 雷达气候研究进展及其在城市区域 强天气临近预报中的应用[J]. 气象科技进展,4(5):30-41. Chen M X,Wang Y C,Gao F,et al,2014. An overview of progresses

- in radar climatology and its prospective applications in nowcasting severe weather over urban regions [J]. Adv Meteor Sci Technol,4(5):30-41(in Chinese).
- 陈晓欣,俞小鼎,王秀明,2022. 中国大范围雷暴大风事件(Derechos) 研究:时空分布、环境背景和对流系统形态特征[J]. 气象学报,80(1):67-81. Chen X X, Yu X D, Wang X M,2022. Investigation of Derechos in China: spatiotemporal distribution, environmental characteristics, and morphology of Derechos producing convective systems[J]. Acta Meteor Sin,80(1):67-81(in Chinese).
- 范雯杰,俞小鼎,2015. 中国龙卷的时空分布特征[J]. 气象,41(7): 793-805. Fan W J, Yu X D, 2015. Characteristics of spatial-temporal distribution of tornadoes in China[J]. Meteor Mon,41 (7):793-805(in Chinese).
- 管理,戴建华,赵渊明,等,2020. 上海地区暖季午后对流的雷达气候学特征分析[J]. 气象,46(12):1543-1554. Guan L, Dai J H, Zhao Y M, et al,2020. Radar climatology analysis of warm season afternoon convective storm over Shanghai[J]. Meteor Mon, 46(12):1543-1554(in Chinese).
- 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,54(11):1585-1590. Han L, Yu X D, Zheng Y G, et al,2009. Statistic characteristics of severe convective storm during warm-season in the Beijing-Tianjin Region and its vicinity[J]. Chin Sci Bull,54(11):1585-1590(in Chinese).
- 潘赫拉,许东蓓,陈明轩,等,2020. 天气雷达气候学研究新进展[J]. 干旱气象,38(6):887-894. Pan H L,Xu D B,Chen M X, et al, 2020. An overview of progresses on weather radar climatology [J]. J Arid Meteor,38(6):887-894(in Chinese).
- 孙康远,郑媛媛,慕瑞琪,等,2017. 南京及周边地区雷达气候学分析 [J]. 气象学报,75(1):178-192. Sun K Y, Zheng Y Y, Mu R Q, et al,2017. An analysis of radar climatology in Nanjing and its vicinity[J]. Acta Meteor Sin,75(1):178-192(in Chinese).
- 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]. Meteor Mon,41(2):160-170(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:181-197. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al,2006. Principle and Application of Doppler Weather Radar [M]. Beijing: China Meteorological Press:181-197(in Chinese).
- 俞小鼎,郑永光,2020. 中国当代强对流天气研究与业务进展[J]. 气象学报,78(3):391-418. Yu X D, Zheng Y G,2020. Advances in severe convective weather research and operational service in China[J]. Acta Meteor Sin,78(3):391-418(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,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).
- 周康辉,郑永光,韩雷,等,2021. 机器学习在强对流监测预报中的应用进展[J]. 气象,47(3):274-289. Zhou K H, Zheng Y G, Han L, et al,2021. Advances in application of machine learning to severe convective weather monitoring and forecasting[J]. Meteor Mon,47(3):274-289(in Chinese).
- Ahijevych D A, Carbone R E, Davis C A, 2003. Regional-scale aspects of the diurnal precipitation cycle [C] // 31st International Conference on Radar Meteorology. Seattle: American Meteorological Society: 349-353.
- Ahijevych D A, Davis C A, Carbone R E, et al, 2004. Initiation of precipitation episodes relative to elevated terrain[J]. J Atmos Sci, 61(22):2763-2769.
- Carbone R E, Tuttle J D, 2008. Rainfall occurrence in the U. S. warm season; the diurnal cycle[J]. J Climate, 21(16):4132-4146.
- Carbone R E, Tuttle J D, Ahijevych D A, et al, 2002. Inferences of predictability associated with warm season precipitation episodes [J]. J Atmos Sci, 59(13):2033-2056.
- Chen J, Zheng Y G, Zhang X L, et al, 2013. Distribution and diurnal variation of warm-season short-duration heavy rainfall in relation to the MCSs in China[J]. Acta Meteor Sin, 27(6):868-888.
- Chen M X, Wang Y C, Gao F, et al, 2012. Diurnal variations in convective storm activity over contiguous North China during the warm season based on radar mosaic climatology[J]. J Geophys Res Atmos, 117(D20): D20115.
- Chen M X, Wang Y C, Gao F, et al, 2014. Diurnal evolution and distribution of warm-season convective storms in different prevailing wind regimes over contiguous North China[J]. J Geophys Res Atmos, 119(6):2742-2763.
- Chen X C, Zhao K, Xue M, 2014. Spatial and temporal characteristics of warm season convection over Pearl River Delta region, China, based on 3 years of operational radar data[J]. J Geophys Res Atmos, 119(22): 12447-12465.
- Chen X C, Zhao K, Xue M, et al, 2015. Radar-observed diurnal cycle and propagation of convection over the Pearl River Delta during Mei-Yu season [J]. J Geophys Res Atmos, 120 (24): 12557-12575.
- Dixon M, Wiener G, 1993. TITAN: Thunderstorm identification, tracking, analysis, and nowcasting-A radar-based methodology [J]. J Atmos Ocean Tech, 10(6):785-797.
- Haberlie A M, Ashley W S, 2019. A radar-based climatology of mesoscale convective systems in the United States[J]. J Climate, 32(5):1591-1606.
- Han L, Fu S X, Yang G, et al, 2008. A stochastic method for convective storm identification, tracking and nowcasting [J]. Prog Nat Sci, 18(12):1557-1563.
- Hocker J E, Basara J B, 2008. A 10-year spatial climatology of squall line storms across Oklahoma[J]. Int J Climatol, 28(6):765-775.
- Houston A L, Lock N A, Lahowetz J, et al, 2015. Thunderstorm

- observation by radar(ThOR); an algorithm to develop a climatology of thunderstorms[J]. J Atmos Ocean Tech, 32(5):961-981.
- Johnson J T, MacKeen P L, Witt A, et al, 1998. The storm cell identification and tracking algorithm: an enhanced WSR-88D algorithm[J]. Wea Forecasting, 13(2):263-276.
- Lang T J, Ahijevych D A, Nesbitt S W, et al, 2007. Radar-observed characteristics of precipitating systems during NAME 2004[J]. J Climate, 20(9): 1713-1733.
- Lin P F, Chang P L, Jou B J D, et al, 2011. Warm season afternoon thunderstorm characteristics under weak synoptic-scale forcing over Taiwan Island[J]. Wea Forecasting, 26(1):44-60.
- Lock N A, Houston A L, 2015. Spatiotemporal distribution of thunderstorm initiation in the US Great Plains from 2005 to 2007 [J]. Int J Climatol, 35(13): 4047-4056.
- Meng Z Y, Yan D C, Zhang Y J, 2013. General features of squall lines in East China[J]. Mon Wea Rev, 141(5):1629-1647.
- Mohee F M, Miller C, 2010. Climatology of thunderstorms for North Dakota, 2002-06[J]. J Appl Meteor Climatol, 49(9):1881-1890.

- Murray J C, Colle B A, 2011. The spatial and temporal variability of convective storms over the Northeast United States during the warm season[J]. Mon Wea Rev, 139(3):992-1012.
- Newton C W,1967. Severe convective storms[J]. Adv Geophys,12: 257-308.
- Rowe A K, Rutledge S A, Lang T J, et al, 2008. Elevation-dependent trends in precipitation observed during NAME[J]. Mon Wea Rev, 136(12): 4962-4979.
- Saxen T R, Mueller C K, Warner T T, et al, 2008. The operational mesogamma-scale analysis and forecast system of the U. S. army test and evaluation command. Part IV: the white sands missile range auto-nowcast system[J]. J Appl Meteor Climatol, 47(4): 1123-1139.
- Zhang H, Zhai P M, 2011. Temporal and spatial characteristics of extreme hourly precipitation over Eastern China in the warm season[J]. Adv Atmos Sci, 28(5):1177-1183.
- Zheng L L,Sun J H,Zheng X L,et al,2013. Organizational modes of mesoscale convective systems over central East China[J]. Wea Forecasting,28(5):1081-1098.

(本文责编:俞卫平 王蕾)