朱海斌，杨婧，陈宇曦，等，2026. 宁夏北部暖季不同盛行风向下对流风暴雷达气候学特征[J]. 气象，52(10)：1178-1190. Zhu H B，Yang J，Chen Y X，et al，2026. Radar climatological characteristics of convective storms under different prevailing winds in warm season in the northern Ningxia[J]. Meteor Mon，52(10)：1178-1190(in Chinese).

宁夏北部暖季不同盛行风向下对流风暴雷达气候学特征*

朱海斌[1,2] 杨 婧[1,3] 陈宇曦[4] 王雯卉[4] 李 婷[1,3]

1 宁夏气象防灾减灾重点实验室，银川 750002
2 宁夏气象服务中心，银川 750002
3 宁夏气象台，银川 750002
4 银川市气象局，银川 750002

提 要： 宁夏北部位于中国西北的温带大陆性气候区，地形复杂，暖季对流风暴(convective storm，CS)的气候特征尚未完全清楚。本研究使用 2011—2016 年 5—9 月银川 CINRAD/CD 雷达产品和探空资料，分析了宁夏北部在 500 hPa 和 700 hPa 不同盛行风向下 CS 的气候学特征，首次在该类研究中引入对平均环流形势、对流环境与 CS 强度的综合分析。结果表明，太阳辐射加热和贺兰山地形作用主导了宁夏北部 CS 气候特征的形成，在此基础上，动态变化的盛行风进一步调制了 CS 的发生频率、发生效率(定义为某一盛行风向下 CS 的发生频数与该盛行风频数的比值)、日变化、空间分布等，使其呈现出更为复杂多样的特征，特别是 500 hPa 盛行西南风、700 hPa 盛行偏东风时，盛行风的作用甚至更为显著。某一盛行风向下能够发生 CS 的 500 hPa 环流形势平均场，表征了该盛行风向下有利于 CS 发生的典型天气系统和对流环境，直接决定了 CS 的发生效率和强度。500 hPa 盛行偏北风和西北风时，宁夏北部处于槽后，CS 发生效率最低，对应最高的对流有效位能和对流抑制能量，CS 强度最强；盛行偏南风和西南风时，处于槽前脊后，水汽输送条件好，CS 发生效率最高，CS 发展相对较弱；盛行偏西风时，同纬度带环流平直，上游多短波槽活动，CS 发生效率、强度和各环境特征值均处于中等水平。700 hPa 各盛行风向下 CS 发生效率和强度差异相对较小，CS 强度与上下层温差有较好的对应关系。

关键词： 对流风暴，盛行风，雷达气候学，宁夏北部

中图分类号： P413，P466 **文献标志码：** A **DOI：** 10.7519/j.issn.1000-0526.2026.030401

Radar Climatological Characteristics of Convective Storms Under Different Prevailing Winds in Warm Season in the Northern Ningxia

ZHU Haibin[1,2] YANG Jing[1,3] CHEN Yuxi[4] WANG Wenhui[4] LI Ting[1,3]

1 Ningxia Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation, Yinchuan 750002
2 Ningxia Meteorological Service Center, Yinchuan 750002
3 Ningxia Meteorological Observatory, Yinchuan 750002
4 Yinchuan Meteorological Bureau, Yinchuan 750002

Abstract: The northern part of Ningxia Hui Autonomous Region is situated in the temperate continental climate zone of Northwest China, where complex topography and the climatological characteristics of warm-season convective storm (CS) have not been fully understood. This study utilizes CINRAD/CD radar products and sounding data in Yinchuan from May to September in 2011－2016 to investigate the

* 宁夏自然科学基金项目(2023AAC03804、2025AAC030580)共同资助
2025 年 6 月 26 日收稿； 2026 年 1 月 18 日收修定稿
第一作者：朱海斌，主要从事灾害性天气机理研究. E-mail：275227314@qq.com
通讯作者：杨婧，主要从事灾害性天气预报预警及机理研究. E-mail：297077644@qq.com

climatological characteristics of CS in northern Ningxia under different prevailing wind directions at 500 hPa and 700 hPa. In this research domain, we present a comprehensive analysis integrating the average circulation patterns, convective environments and CS intensity for the first time. The results demonstrate that solar radiative heating and topographic forcing from the Helan Mountains dominate the formation of CS climatological characteristics in northern Ningxia. Upon this foundation, dynamically varying prevailing winds induce more complex and diverse patterns in CS occurrence frequency, occurrence efficiency (defined as the ratio of CS occurrence frequency under a specific prevailing wind direction to the total frequency of that wind direction), diurnal variation, and spatial distribution. Notably, when southwesterly winds prevail at 500 hPa while easterly winds are blowing at 700 hPa, the influence of prevailing winds becomes particularly pronounced. The average 500 hPa circulation pattern associated with CS occurrence under a given prevailing wind direction characterizes the typical synoptic-scale systems and convective environments favorable for CS development under that flow regime, thereby directly determining CS occurrence efficiency and intensity. When northerly or northwesterly winds prevail at 500 hPa and northern Ningxia is positioned behind the trough, there is the lowest CS occurrence efficiency corresponding to the highest CAPE and CIN, and the CS intensity is the strongest. Under southerly or southwesterly wind regimes, northern Ningxia is situated between the ridge and trough, where favorable moisture transport conditions tend to cause maximum CS occurrence efficiency. During prevailing westerly flows, the mid-latitude circulation exhibits zonal characteristics with frequent upstream shortwave trough activity, causing the moderate levels of CS occurrence efficiency, CS intensity and environmental parameters. At 700 hPa, differences in CS occurrence efficiency and intensity across various prevailing wind directions are relatively smaller, with CS intensity showing a strong correspondence to the vertical temperature gradient.

Key words: convective storm (CS), prevailing wind, radar climatology, northern Ningxia

引　言

天气雷达是探测降水系统的主要手段，在对流天气监测预警中发挥着不可替代的作用(俞小鼎等，2006；郑永光等，2015)。应用天气雷达高时空分辨率的空间三维探测资料开展雷达气候学研究，能够帮助了解当地对流精细化的时空分布和生消演变等气候特征，为对流天气临近预报预警提供背景资料和科学依据(陈明轩等，2014；潘赫拉等，2020)。雷达气候学的研究对象主要是对流性降水和对流风暴(convective storm，CS)，前者基于雷达回波强度值，使用固定阈值判定(Murray and Colle，2011；Chen et al，2012；2014a)或带入 *Z-R* 关系得到(Carbone et al，2002；Carbone and Tuttle，2008)；后者进一步应用雷达回波的三维特征，使用识别和追踪算法获得 CS 单体信息(韩雷等，2009；Han et al，2009；Lock and Houston，2015；管理等，2020)，其中 CS 三维属性追踪算法 TITAN(Dixon and Wiener，1993)和 CS 质心追踪算法 SCIT(Johnson et al，1998)最具代表性。

由太阳辐射加热驱动的日变化是雷达气候学最基础的也是最重要的特征之一(Wallace，1975；Carbone et al，2002；肖玮等，2023)，表现为对流峰值通常于午后出现，但其具体特征存在地域性差异。Carbone et al(2002)、Carbone and Tuttle(2008)和 Ahijevych et al(2003；2004)使用美国 WSR-88D 业务雷达组网资料，发现暖季对流性降水表现出明显的日变化，美国西部地区对流性降水主要出现在下午，中部则更多地出现在夜间。Lock and Houston (2015)分析了 2005—2007 年美国大平原近 56 000 个 CS，发现 CS 大多发生在当地 10—18 时(地方时)，峰值出现在正午。韩雷等(2009)发现京津及邻近地区 CS 主峰出现在 13—18 时，次峰出现在 01—03 时。Chen et al(2014b；2015)揭示了珠江三角洲对流性降水 5—6 月的日变化呈双峰型，主峰出现在下午，次峰出现在午夜到清晨，而 7—9 月次峰要弱得多。

地形的热动力效应是仅次于太阳辐射加热的关键影响因素，对对流的日变化、空间分布和传播等起

到重要作用(Banta and Schaaf,1987;Kottmeier et al,2008;Weckwerth et al,2011;支树林等,2021)。Lang et al(2007)和 Rowe et al(2008)发现西马德雷山脉是墨西哥西北部对流性降水最为频繁的地区,主导了当地对流性降水的日变化,对流性降水下午在山顶和山麓被触发,随后向西北方向移动并可能在夜间和清晨在沿海地区增强。Chen et al(2012)研究发现,京津冀地区暖季 CS 多从西北山区向丘陵传播,或进一步向东南平原传播,下午到傍晚山脚下的 CS 频数非常高,特别是在北京及其附近地区,CS 从山区传播到山脚下。朱海斌等(2023)进一步发现,贺兰山作为宁夏北部 CS 的高易发区,CS 的时空分布并不均匀,午后高山深谷地带 CS 发生效率最高。此外,与海陆差异(Chen et al,2014b;2015;顾问等,2017)、城市下垫面(Bentley et al,2010;Niyogi et al,2011)、大型水体(Haberlie et al,2016;Tucker and Crook,2005)相关的雷达气候学也有研究。

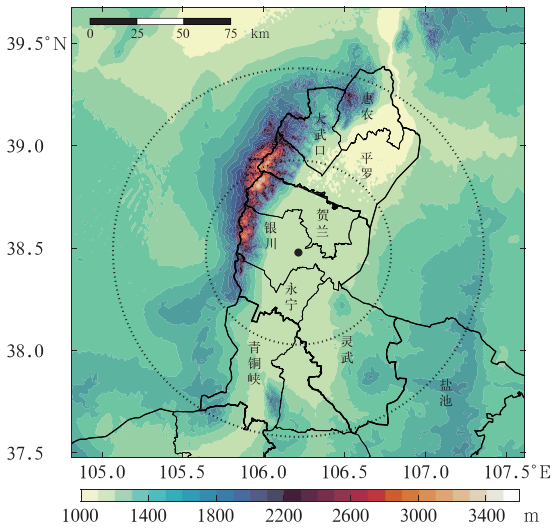
恒常存在的太阳辐射加热和地形强迫形成了雷达气候学特征的基本模态,在此基础上,发展变化的盛行风、环流形势(天气系统)等起到动态调节作用(Kuo and Orville,1973;孙康远等,2017),进一步塑造了雷达气候学的特征。Murray and Colle(2011)研究美国东北部地区雷达气候学特征发现,1998—2001 年新英格兰南部和长岛的对流较 2002—2005 年增加了 40%~50%,主要由低值系统活动的增加而非热力作用的变化造成。陈兴超(2016)研究发现,我国华南地区存在偏南低空急流时,对流性降水多发于海岸,否则多发于内陆山区迎风坡。管理等(2020)分析了弱天气尺度系统强迫下上海地区午后对流的环境特征、CS 空间分布等气候学特征。Chen et al(2014a)首次全面分析了不同盛行风对京津冀地区 CS 频率、时空分布的影响,发现 500 hPa 盛行西西南和西西北风时 CS 频率最高,这些 CS 主要在丘陵和平原上启动和发展,表现出良好的组织特征,持续时间较长且移动缓慢;925 hPa 盛行南西南和南东南风时 CS 频率最高,这与低层偏南暖湿气流有利于对流的启动和加强有关。

目前国内外雷达气候学研究多聚焦于对流的时空分布特征及其对地形强迫的响应,而对盛行风、环流形势(天气系统类)等动态调节因素如何系统影响雷达气候学特征的研究相对不足。现有相关研究也主要集中于容易触发对流的特定盛行风向或环流形势上,缺乏对不同盛行风背景下,特别是非典型触发条件下的全面分析。为填补这一研究空白,本文基于 2011—2016 年 5—9 月银川新一代天气雷达产品,结合实况探空资料,系统分析不同盛行风向下 CS 的时空分布特征及其对应的环流形势特征、强度特征和对流环境特征,旨在深入理解在宁夏北部盛行风如何影响对流活动,为强对流天气预报预警提供更为有力的科学依据。

1 资料与方法

研究区域为图 1 展示的宁夏北部地区,区域地处西北地区东部、黄河流域上游,东、西、北三面分别被毛乌素、腾格里、乌兰布和三大沙漠、沙地包围,最显著的地理特征是近南北走向的贺兰山山脉,山体海拔 2000~3000 m,主峰海拔 3556 m,是一座相对孤立的狭长山体,地形结构单一,构成了银川平原的天然屏障。

资料来源于银川 CINRAD/CD 新一代天气雷达日常业务观测。该雷达站布设在贺兰山东侧的银川市(海拔 1178 m),运行模式为 VCP21,5~6 min 完成 9 个仰角的体积扫描,雷达数据时间范围是 2011—2016 年 5—9 月。新一代天气雷达系统提供了丰富的导出产品(俞小鼎等,2006),其中风暴跟踪信息产品(storm tracking information,STI)采用



注:黑色圆点为银川雷达站位置,下同;虚线为雷达探测半径(小圆半径为 50 km,大圆半径为 100 km)。

图 1 宁夏北部高程(填色)

Fig. 1 Topography of northern Ningxia (colored)

SCIT 算法,包含 CS 当前时刻和过去最多 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。根据连续时刻 STI 包含的当前和过去位置信息,合并不同时刻 STI 中的同 1 个 CS,舍弃只在 1 个时刻被识别出的 36367 个 CS(韩雷等,2009;Han et al,2009),得到包含 2 个及以上位置信息的 35481 个 CS。首次被识别出的 CS 即初生对流风暴(convective initiation,CI)。使用核密度估计(kernel density estimation,KDE)方法分析 CI 的空间分布特征,KDE 能直观反映 CI 空间数量分布的聚集程度,长时间序列 CI 的 KDE 也就反映了 CI 空间分布的气候特征,指示了 CI 发生概率的相对大小。使用 CS 生命史中反射率强度、回波顶高、垂直累积液态水含量的最大值来综合表征 CS 的强度特征,分别由导出产品中的组合反射率产品、回波顶高产品、垂直累积液态水含量产品确定。考虑到雷达波束随距离抬升、展宽及信号衰减等的影响(俞小鼎等,2006),为保障 CS 强度特征值定量统计结果的可靠性,本文对 CS 反射率强度、回波顶高、垂直累积液态水含量的计算与统计分析,限定在距雷达站 30～120 km 的范围内。

探空资料使用国家基准气候银川站和亚欧范围探空观测站每日 08 时(北京时,下同)和 20 时的风向、风速、气压、温度等观测数据。为方便讨论,将盛行风向划分为偏北(337.5°～360°和 0°～22.5°)、东北(22.5°～67.5°)、偏东(67.5°～112.5°)、东南(112.5°～157.5°)、偏南(157.5°～202.5°)、西南(202.5°～247.5°)、偏西(247.5°～292.5°)、西北(292.5°～337.5°)8 个方位。对流有效位能(CAPE)、对流抑制能量(CIN)、500 hPa 与 700 hPa 温差($|T_{500}-T_{700}|$)、500 hPa 与 850 hPa 温差($|T_{500}-T_{850}|$)、相对湿度等表征 CS 发生的环境特征值由银川站探空资料计算得到。为定量表征不同盛行风向下 CS 发生的相对难易程度,本文定义"CS 发生效率"指标,其值为某一盛行风向下 CS 的发生频数与该盛行风频数的比值。对于宁夏,500 hPa 风场表征大尺度环流形势,700 hPa 风场表征暖湿空气的输送或低槽、切变等的影响,本文探讨在 500 hPa、700 hPa 不同盛行风向下 CS 的特征。

2　不同盛行风向下 CS 分布特征

2.1　不同盛行风向下 CS 频率分布特征

图 2 展示了宁夏北部 2011—2016 年 5—9 月 500 hPa 和 700 hPa 不同风向盛行风的频率分布,以及不同盛行风向下 CS 频率和发生效率的分布。从盛行风频率分布看,500 hPa 主要受西北风(40%)和偏西风(36%)控制,其他风向频率不超过 10%,偏东风和东南风频率最低,不超过 2%(图 2a);700 hPa 各风向盛行风频率分布相对均匀,西北风频率最高,达到 23%,其他风向普遍在 8%～14%,其中偏东风和西南风频率较低,在 8%～9%(图 2c)。从 CS 频率分布看,一方面,CS 能够广泛

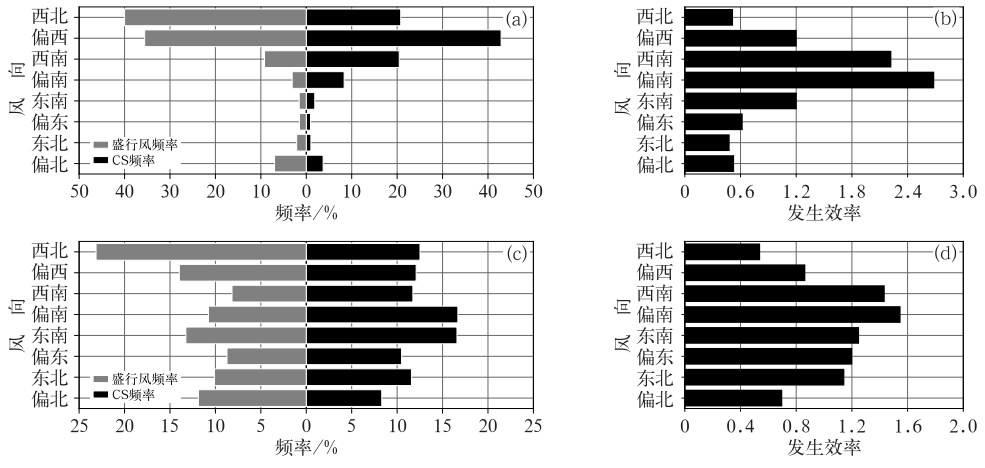


图 2　2011—2016 年 5—9 月(a,b)500 hPa 和(c,d)700 hPa 的(a,c)盛行风频率和 CS 频率及(b,d)CS 发生效率

Fig. 2　(a, c) Frequencies of prevailing wind and CS occurrence and (b, d) CS occurrence efficiency at (a, b) 500 hPa and (c, d) 700 hPa from May to September in 2011－2016

地发生在不同盛行风向下，从侧面反映出 CS 触发机制的多样性和复杂性；另一方面，不同盛行风向下 CS 发生的相对难易程度不同。500 hPa 盛行偏南风和西南风时，CS 发生效率高，分别为 2.69 和 2.23；盛行偏北风、东北风、偏东风、西北风时，CS 发生效率低，在 0.48～0.62；CS 发生效率最高的偏南风是东北风的 5.6 倍（图 2b）。在 700 hPa 各盛行风向下，CS 发生效率相对均匀，盛行东北风、偏东风、东南风、偏南风、西南风时，CS 发生效率较高，在 1.15～1.55；盛行偏北风、偏西风、西北风时，CS 发生效率较低，在 0.54～0.87；CS 发生效率最高的偏南风是西北风的 2.9 倍（图 2d）。可以看出，相较于 700 hPa 盛行风，CS 发生效率对 500 hPa 盛行风的变化更为敏感，也就是说，500 hPa 盛行风对 CS 发生起到的作用更为显著。

2.2 不同盛行风向下 CS 逐时分布特征

图 3 展示了在 500 hPa 和 700 hPa 不同盛行风向下 CS 频数和发生效率的逐时分布。500 hPa CS 频数最显著的特征是，盛行偏西风时的 14—18 时表现出明显的高值；盛行偏北风、东北风、偏东风、东南风、西北风时，CS 频数日变化呈单峰型，中午到下午 CS 频数明显高于其他时段，于 14—15 时或 15—16 时达到峰值；盛行偏南风时，08—20 时 CS 频数持续较高，峰值出现在 14 时；盛行西南风时，CS 频数全天维持较高水平，且变化幅度最小，峰值出现在 16 时（图 3a）。500 hPa CS 发生效率最显著的特征是，盛行偏南风时的 13—20 时表现出明显的高值；除西

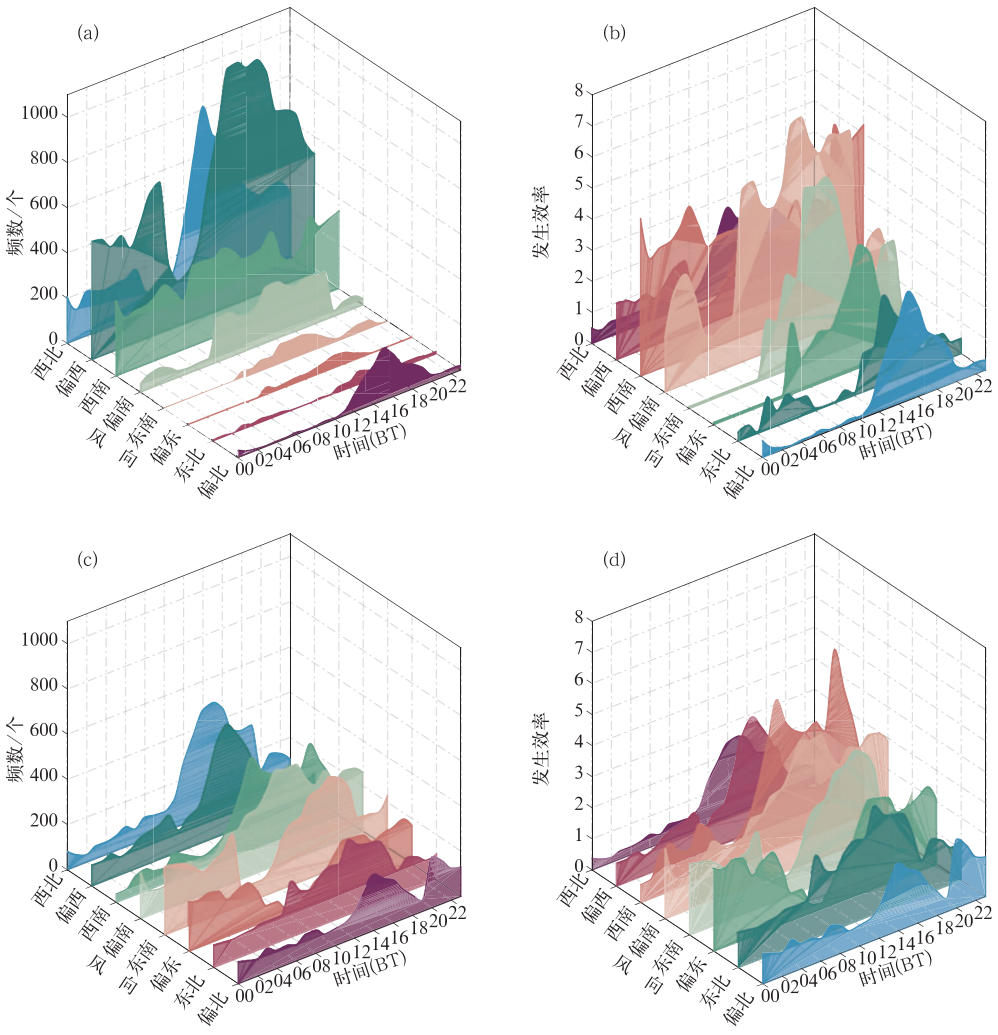


图 3 2011—2016 年 5—9 月不同盛行风向下(a,b)500 hPa 和(c,d)700 hPa 的(a,c)CS 频数及(b,d)CS 发生效率的逐时分布

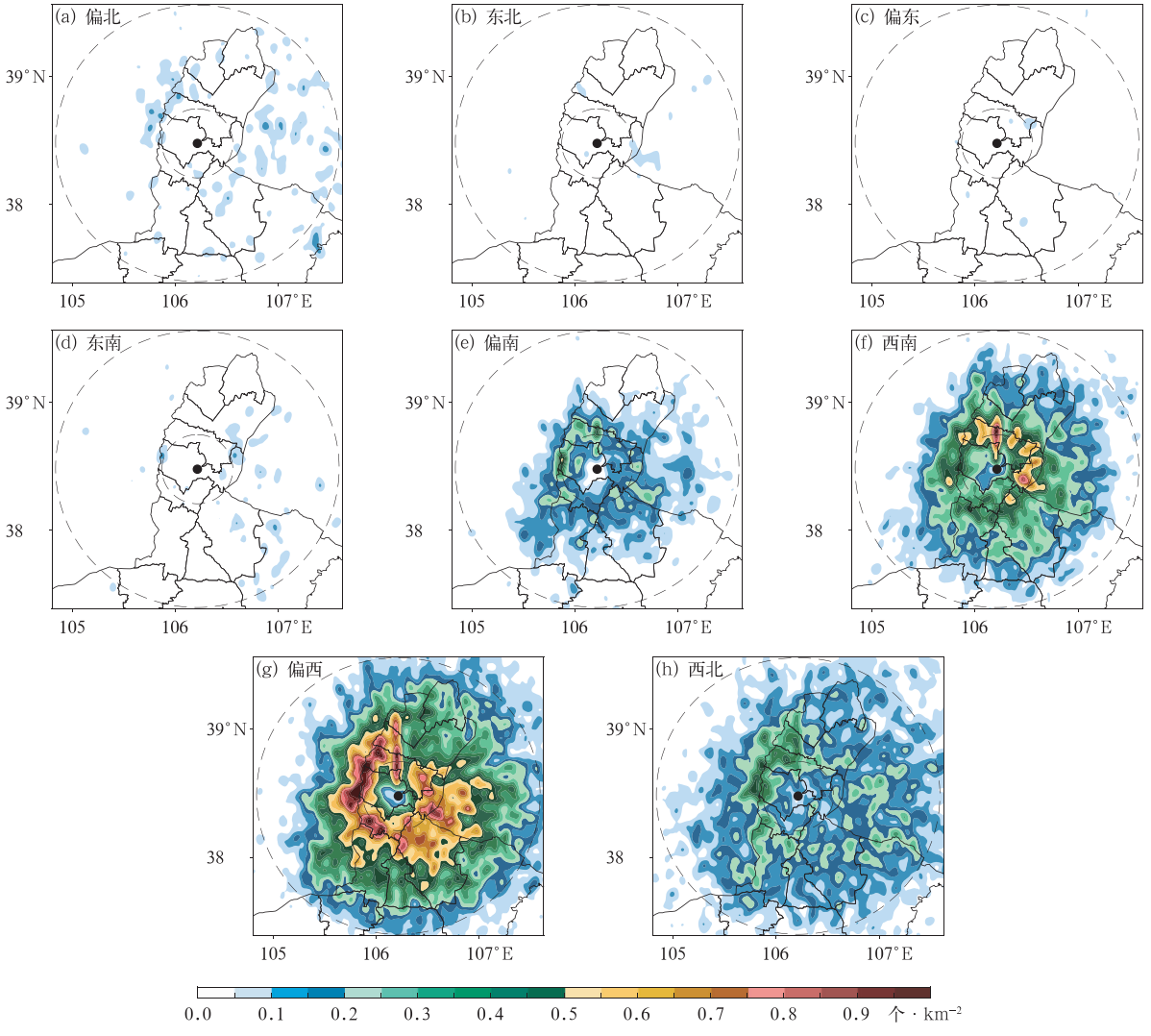
Fig. 3 Hourly distributions of (a, c) CS frequency and (b, d) CS occurrence efficiency at (a, b) 500 hPa and (c, d) 700 hPa from May to September in 2011—2016

南风外，在其他盛行风向下，CS 发生效率与频数的逐时分布特征相似，达到峰值的时间相同；盛行西南风时，CS 发生效率在 20 时达到峰值后逐步下降，夜间发生效率整体高于白天（图 3b）。700 hPa 不同盛行风向下 CS 频数的峰值出现在 14—17 时，盛行偏东风和东南风时，夜间还存在另一个较明显的次峰（图 3c）；700 hPa CS 发生效率与频数的逐时分布特征相似，达到峰值的时间基本相同，在盛行偏东风时，夜间 CS 发生效率与白天相当（图 3d）。

可以看出，在不同盛行风向下，宁夏北部 CS 频数和发生效率的峰值主要出现在 14—17 时，表明太阳辐射加热仍是驱动 CS 日变化最关键的因子。与此同时，盛行风对 CS 的日变化具有明显的调制作用，不同风向下 CS 频数和发生效率在峰值时段、持续时间及昼夜分布上存在差异。特别是当 500 hPa 盛行西南风、700 hPa 盛行偏东风时，盛行风的作用甚至更为重要。

2.3　不同盛行风向下 CI 空间分布特征

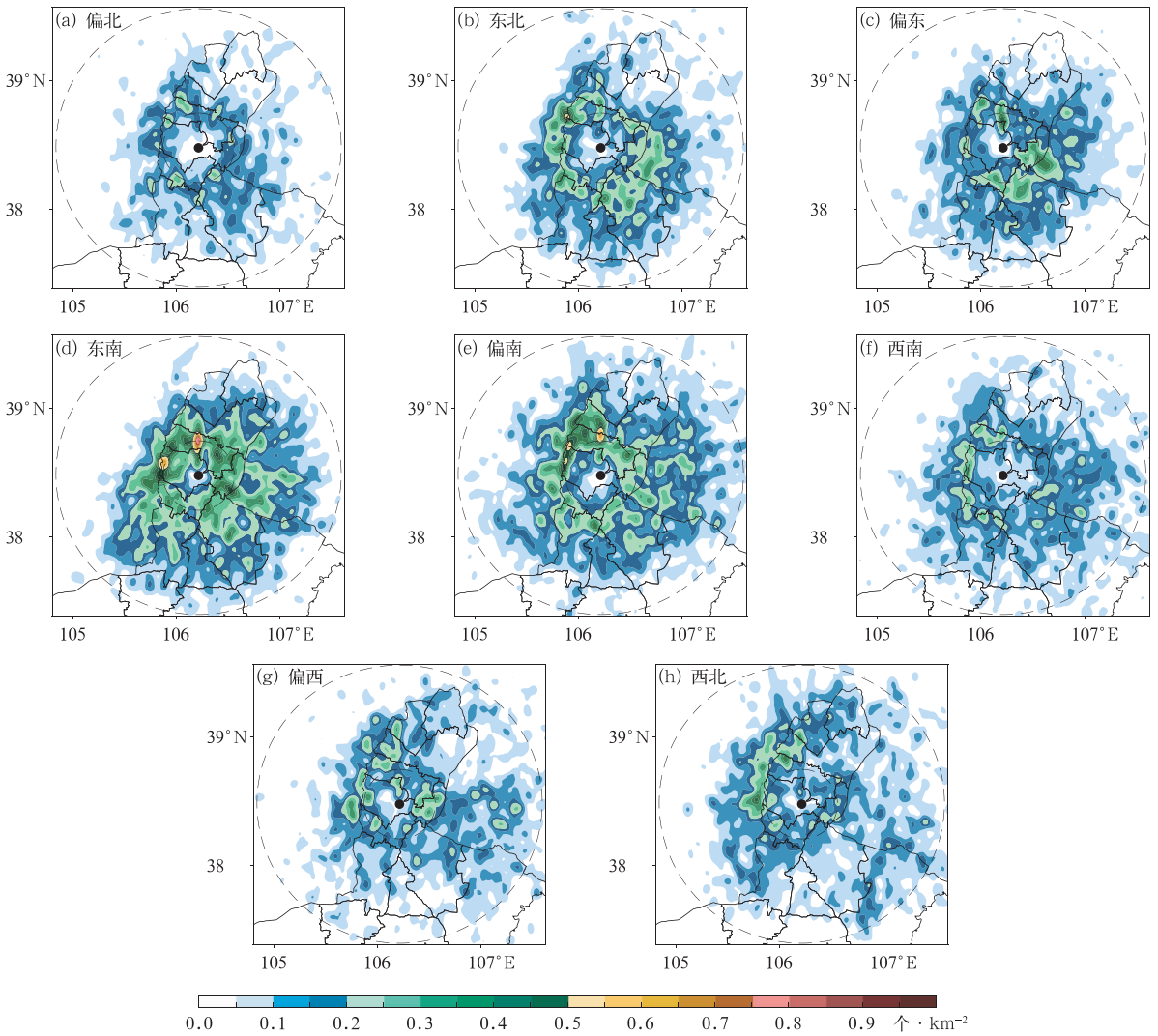
图 4 和图 5 分别展示了在 500 hPa 和 700 hPa 不同盛行风向下，宁夏北部 CI 核密度的空间分布。在 500 hPa 不同盛行风向下，CI 核密度的空间分布存在显著差异，主要表现出如下特征：（1）盛行偏西风时，CI 核密度值最高，大值区分布最广，其次是西



注：两个虚线圆（小圆半径为 30 km，大圆半径为 120 km）之间的环形区域为 CS 强度特征值的计算区域。

图 4　2011—2016 年 5—9 月 500 hPa 不同盛行风向下宁夏北部 CI 核密度的空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of CI kernel density in northern Ningxia under different prevailing wind directions at 500 hPa from May to September in 2011－2016



注：两个虚线圆(小圆半径为 30 km，大圆半径为 120 km)之间的环形区域为 CS 强度特征值的计算区域。

图 5 2011—2016 年 5—9 月 700 hPa 不同盛行风向下宁夏北部 CI 核密度的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of CI kernel density in northern Ningxia under different prevailing wind directions at 700 hPa from May to September in 2011—2016

南风和西北风；(2)盛行东北风、偏东风、东南风时，CI 核密度值低，分布特征不明显；(3)盛行偏北风、偏南风、偏西风、西北风时，贺兰山是 CI 核密度的大值区，其次是灵武中北部至以北的鄂托克前旗地区、银川东部；(4)盛行西南风时，贺兰至银川东部一带是 CI 核密度的大值区，核密度值高于贺兰山；(5)在所有盛行风向下，北部的大武口和惠农 CI 核密度值相对较小。在 700 hPa 不同盛行风向下，CI 核密度的空间分布主要表现出如下特征：(1)盛行东南风、偏南风时，CI 核密度值相对较高，大值区分布较广；(2)在除偏东风外的其他盛行风向下，贺兰山是 CI 核密度的大值区，其次是灵武中北部至以北的鄂托克前旗地区、银川东部；(3)盛行偏东风时，灵武中北部至以北的鄂托克前旗地区、银川东部是 CI 核密度的大值区，核密度值高于贺兰山。

可以看出，除 500 hPa 西南风、700 hPa 偏东风外，在其他盛行风向下，贺兰山地形的热动力作用都是影响宁夏北部 CI 空间分布最为重要的因素，其次是灵武中北部至以北的鄂托克前旗地区、银川东部地区沙地的热力作用。另外，在 500 hPa 盛行偏南风、西南风、偏西风，700 hPa 盛行偏东风、东南风、偏南风时，贺兰山东侧的贺兰西部一带常出现 CI 核密度的大值区，这可能是由于该区域处于贺兰山东侧的中部，山地地形作用产生的绕流在此区域形成

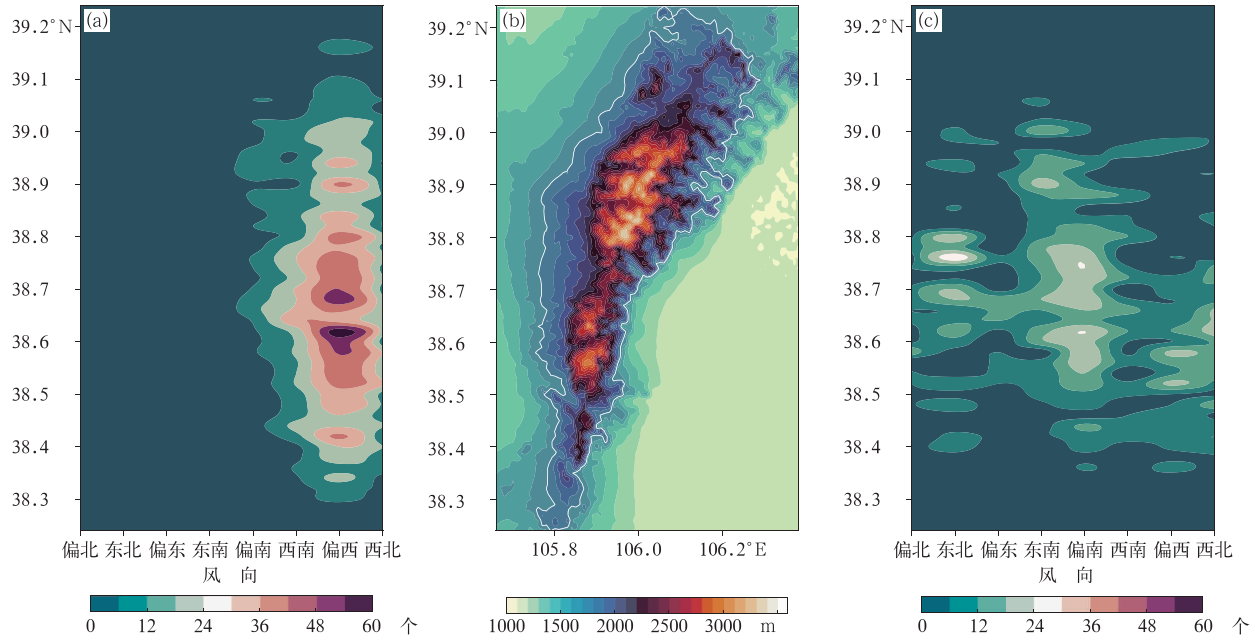
了稳定辐合所造成的。

从上述分析可以看出，贺兰山显著影响了 CI 的空间分布，图 6 进一步展示了在 500 hPa 和 700 hPa 不同盛行风向下，在 CI 最为活跃的贺兰山中段海拔高于 1700 m 区域 CI 频数的精细化分布特征。可以看出：(1)CI 集中分布在贺兰山中段 38.4°～39.0°N，对应贺兰山高海拔区域，南北两端海拔较低的 38.2°～38.4°N 和 39.0°～39.2°N 频数较低；(2)贺兰山海拔最高的区域分布在 38.8°～39.0°N，海拔次高的区域分布在 38.5°～38.8°N，而 CI 最多发生在海拔次高的区域；(3)相较于多山峰地带，CI 更容易发生在山峰附近的狭长山谷；(4)500 hPa 盛行偏南风、西南风、偏西风、西北风时，CI 存在高发区，且高发区位置相近；(5)在 700 hPa 不同盛行风向下，CI 高发区位置并不相同，其中东南风和偏南风对应的高发区最为广泛且位置相近，主要在 38.5°～39.0°N；东北风、西南风、偏西风、西北风对应的高发区分别在38.6°～38.8°N、38.6°～38.8°N、38.5°～38.6°N、38.5°～38.7°N。

可以看出，在 500 hPa 和 700 hPa 不同盛行风向下，CI 的空间分布表现出一致的海拔偏好性，并更容易在山峰附近的狭长山谷发生，但在 700 hPa 不同盛行风向下 CI 高发区的位置存在显著差异。这可能是由于贺兰山地形的热动力作用，在不同层次的盛行风背景下都占主导地位，致使 CI 的空间分布在整体上显现出较为一致的特征；在垂直方向上，700 hPa 盛行风高度与贺兰山中段海拔高度相近，该层次的风场与地形之间的相互作用更为直接和复杂，使得 CI 高发区的位置和范围呈现出更丰富的空间变化特征。

3　不同盛行风向下环流形势及对流环境特征

盛行风与环流形势密切相关，某一风向的盛行风通常与特定类型的环流形势相对应。通过将某一



注：图 b 白色实线包围区域为海拔大于 1700 m 地形。

图 6　2011—2016 年 5—9 月不同盛行风向下贺兰山中段海拔高于 1700 m 区域不同纬度带 CI 频数分布

(a)500 hPa CI 频数，(b)贺兰山中段高程，(c)700 hPa CI 频数

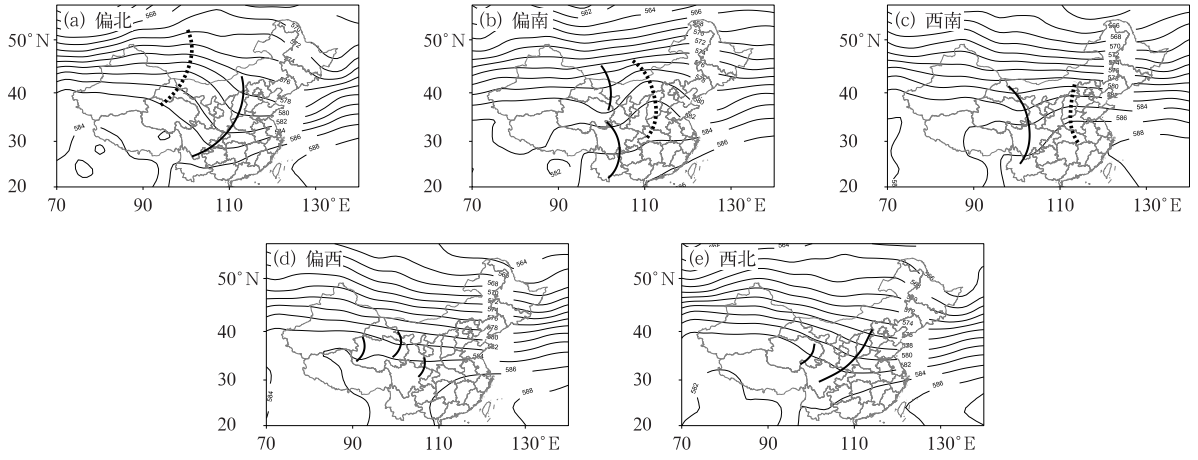
Fig. 6　Distribution of CI frequency across different latitude zones in the central Helan Mountains region with elevations above 1700 m under different prevailing wind directions from May to September in 2011－2016

(a) CI frequency at 500 hPa, (b) elevation of the central Helan Mountains region, and (c) CI frequency at 700 hPa

盛行风向下CS发生所对应的500 hPa位势高度场进行平均，得到500 hPa和700 hPa不同盛行风向下的500 hPa平均环流形势场(图7，图8)，表征了与特定盛行风相对应的、在不同程度上有利于产生CS的环流形势的整体特征。

由于500 hPa盛行东北风、偏东风、东南风时，CS的个数不超过总数的2%，对应的环流形势个例少、差异大，对位势高度场进行平均不具有统计意义，不予以讨论。当500 hPa盛行偏北风时，宁夏北部处于槽后脊前，垂直方向上以下沉运动为主，不利于CS发生，是CS发生效率最低的盛行风。盛行偏南风和西南风时，环流形势相似，宁夏北部处于槽前脊后，垂直方向上以上升运动为主，水汽输送条件好，有利于CS发生，CS发生效率明显大于其他盛行风，槽前持续的上升运动使得较高的CS频数和发生效率得以在日变化中维持更多时次(图3)，特别是在西南风控制下，宁夏处于副热带高压584 dagpm边缘，有利于不稳定能量的积聚，即使在夜间仍能保持较高的CS发生效率。盛行偏西风时，宁夏北部同纬度带环流平直，上游多短波槽活动，较有利于CS的发生，是宁夏北部CS发生最常见的环流形势，CS发生效率居中。盛行西北风时，宁夏北部处于槽后，上游有弱短波槽活动，但位置偏南，垂直方向上以下沉运动为主，不利于CS的发生，CS发生效率与偏北风相当。

表1展示了在500 hPa不同盛行风向下CS的反射率强度、回波顶高、垂直累积液态水含量等强度特征值，以及相对湿度、上下层温差、CAPE、CIN等对流环境特征值。当500 hPa盛行偏北风和西北风时，CS强度特征值最大，CS发展最为旺盛，通常表现为局地强对流；盛行偏北风时，对应脊前下沉气流，整层湿度条件差，上下层温差最小，但对应最高



注：粗实线为槽线，粗虚线为脊线。

图7 2011—2016年5—9月500 hPa不同盛行风向下500 hPa平均位势高度场(单位：dagpm)

Fig. 7 500 hPa average geopotential height (unit: dagpm) under different prevailing wind directions at 500 hPa from May to September in 2011－2016

表1 2011—2016年5—9月500 hPa不同盛行风向下CS强度特征值和对流环境特征值

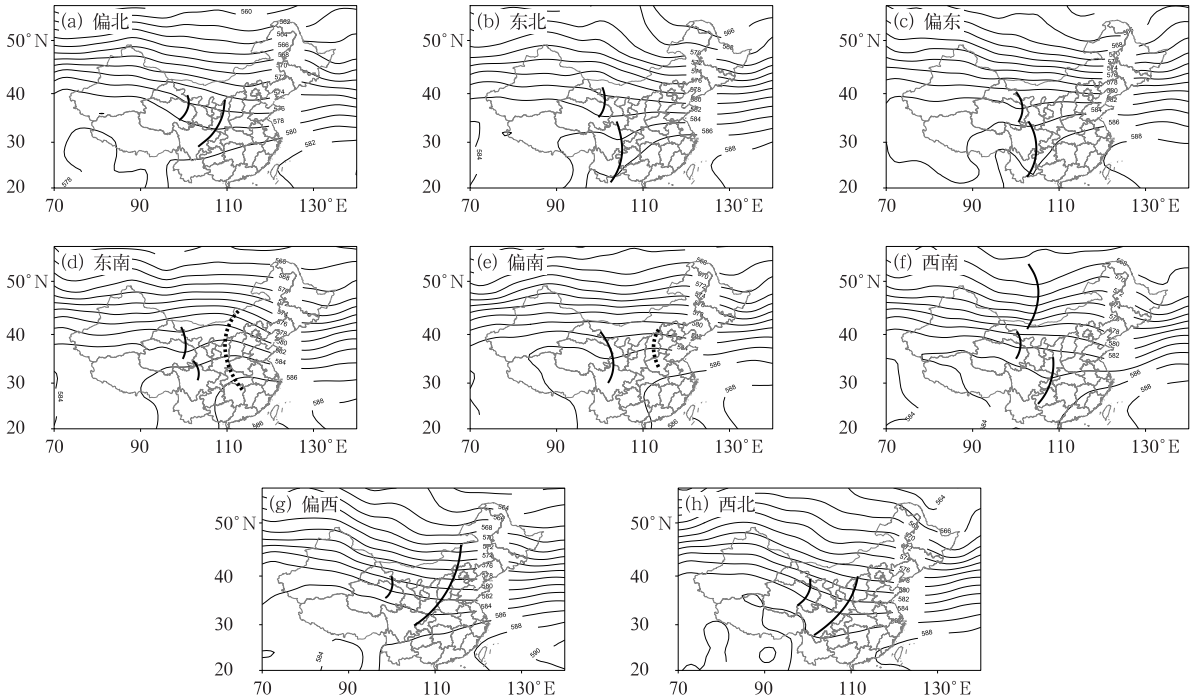
Table 1 The intensity characteristic values and environmental characteristic values of CS under different prevailing wind directions at 500 hPa from May to September in 2011－2016

特征值		偏北	偏南	西南	偏西	西北
CS强度特征值	反射率强度/dBz	46.1	42.4	40.9	43.3	44.8
	回波顶高/km	7.2	6.2	6.1	6.6	7.3
	垂直累积液态水含量/(kg·m^{-2})	7.6	5.1	3.2	5.2	6.7
相对湿度	500 hPa/%	42.2	51.4	71.2	63.3	50.7
	700 hPa/%	46.4	67.0	70.7	61.9	47.6
	850 hPa/%	48.3	62.7	57.1	52.1	47.6
上下层温差	$\lvert T_{500}-T_{700}\rvert$/℃	10.4	15.5	15.1	17.1	19.8
	$\lvert T_{500}-T_{850}\rvert$/℃	20.7	25.8	26.2	28.2	30.6
对流能量参数	CAPE/(J·kg^{-1})	246.6	151.0	227.1	222.8	427.0
	CIN/(J·kg^{-1})	276.9	149.7	99.2	143.4	223.7

的 CIN 和较高的 CAPE，有利于不稳定能量的蓄积；盛行西北风时，对应最大的上下层温差和 CAPE，以及较高的 CIN。盛行偏南风和西南风时，整层湿度条件较好，有一定的 CIN 和 CAPE，上下层温差大小居中，通常表现为大范围的混合性降水，CS 发展相对较弱。盛行偏西风时，CS 强度特征值和各项环境特征值大小居中。

700 hPa 盛行偏北风、偏西风、西北风时，500 hPa 平均环流形势相似，宁夏北部处于槽后，上游有短波槽活动，是 CS 发生效率较低的盛行风，东移的短波槽是触发 CS 的重要原因。在其他盛行风向下，CS 发生效率较高。盛行东北风和偏东风时，环流形势相似，宁夏北部上游有短波槽活动，南支槽和高原槽同位相叠加，位置超前于短波槽。盛行东南风和偏南风时，环流形势相似，宁夏北部处于槽前脊后，垂直方向上以上升运动为主，宁夏处于副热带高压 584 dagpm 边缘，有利于不稳定能量的积聚。盛行西南风时，蒙古国中部存在明显的低值系统，同时宁夏北部上游有短波槽，高原槽位置明显超前于短波槽。

如表 2 所示，在 700 hPa 不同盛行风向下，CS



注：粗实线为槽线，粗虚线为脊线。

图 8　2011—2016 年 5—9 月 700 hPa 不同盛行风向下 500 hPa 平均位势高度场（单位：dagpm）

Fig. 8　500 hPa average geopotential height (unit: dagpm) under different prevailing wind directions at 700 hPa from May to September in 2011－2016

表 2　2011—2016 年 5—9 月 700 hPa 不同盛行风向下 CS 强度特征值和对流环境特征值

Table 2　The intensity characteristic values and environmental characteristic values of CS under different prevailing wind directions at 700 hPa from May to September in 2011－2016

	特征值	偏北	东北	偏东	东南	偏南	西南	偏西	西北
CS 强度特征值	反射率强度/dBz	43.3	42.3	41.8	42.6	43.4	44.0	43.9	44.7
	回波顶高/km	6.5	6.2	6.3	6.4	6.9	7.1	7.0	7.0
	垂直累积液态水含量/(kg·m^{-2})	5.6	4.8	3.7	4.7	6.0	5.9	5.5	6.3
相对湿度	500 hPa/%	66.5	66.2	69.4	50.1	61.4	57.2	61.8	54.9
	700 hPa/%	59.0	63.9	61.4	65.6	63.5	52.9	59.4	56.4
	850 hPa/%	54.6	57.6	49.8	50.3	56.8	52.1	51.1	52.0
上下层温差	$\lvert T_{500}-T_{700}\rvert$/℃	9.5	15.3	16.5	16.0	17.2	19.3	18.7	17.9
	$\lvert T_{500}-T_{850}\rvert$/℃	20.7	26.3	27.9	27.6	27.9	29.3	29.2	28.7
对流能量参数	CAPE/(J·kg^{-1})	296.4	171.6	326.3	156.1	410.1	192.9	321.3	202.7
	CIN/(J·kg^{-1})	163.8	119.2	128.3	128.7	148.9	241.9	158.1	188.5

强度特征值相对均匀、差值较小，上下层温差与CS强度有较好的对应关系。盛行西南风、偏西风、西北风时，CS发展相对旺盛，上下层温差较大，其次具有较高的CIN；盛行东北风、偏东风、东南风时，CS发展相对较弱，上下层温差和CIN较小，700 hPa湿度条件较好。盛行偏北风和偏南风时，CS强度处于中等水平，盛行偏南风时，上下层温差大小居中，具有最高的CAPE；盛行偏北风时，上下层温差最小，但具有较高的CIN和CAPE。

4 结 论

本文使用2011—2016年5—9月雷达导出产品和探空资料分析了宁夏北部暖季不同盛行风向下CS的时空分布特征，以及相应的平均环流形势场、强度特征值和对流环境特征值，结果表明：

(1)宁夏北部CS的频率和发生效率在500 hPa不同盛行风向下存在显著差异，在700 hPa不同盛行风向下则相对均匀；相较于700 hPa，500 hPa盛行风对CS发生起到的作用更为显著。500 hPa主要受西北风(40%)和偏西风(36%)控制，分别产生了21%和43%的CS；700 hPa西北风频率最高为23%，其他盛行风频率在8%～14%，各盛行风向下CS频率分布在8%～17%。在500 hPa和700 hPa偏南风均为CS发生效率最高的盛行风向，西南风次之。

(2)在不同盛行风向下，CS频数和发生效率存在显著的日变化特征。太阳辐射加热仍是驱动CS日变化最关键的因子，形成了CS日变化的基本模态，CS频数和发生效率的峰值主要出现在14—17时。盛行风具有明显的调制作用，不同盛行风向下CS频数和发生效率在峰值时段、持续时间及昼夜分布上呈现出多样化的特征，特别是当500 hPa盛行西南风、700 hPa盛行偏东风时，盛行风的作用甚至更为重要。

(3)在不同盛行风向下，CI的空间分布特征各异，500 hPa(除去分布特征不明显的东北风、偏东风、东南风)除西南风、700 hPa除偏东风，在其他盛行风向下，贺兰山都是CI的高发区，其次是在灵武中北部至以北的鄂托克前旗地区、银川东部地区的沙地。500 hPa盛行西南风时，贺兰山至银川东部一带是CI的高发区；700 hPa盛行偏东风时，灵武中北部至以北的鄂托克前旗地区、银川东部是CI的高发区。CI多发于贺兰山海拔次高的38.5°～38.8°N区域，而非海拔最高的区域；相较于多山峰的区域，CI多发于山峰附近多狭长山谷的地带；在500 hPa各盛行风向下，贺兰山中段CI高发区位置相近，在700 hPa各盛行风向下，贺兰山中段CI高发区位置并不相同。

(4)不同风向的盛行风与特定的环流形势场和对流环境相对应，对CS发生效率和CS强度影响不同。500 hPa盛行偏北风和西北风时，宁夏北部处于槽后，CS发生效率低，但对应最高的CAPE和CIN，CS强度最大；盛行偏南风和西南风时，宁夏北部处于槽前脊后，水汽输送条件好，CS发生效率高，有一定的CIN和CAPE，上下层温差居中，CS发展相对较弱。盛行偏西风时，宁夏北部同纬度带环流平直，上游多短波槽活动，CS发生效率、强度特征值和各项环境特征值均处于中等水平。在700 hPa不同盛行风向下，CS强度特征值相对均匀、差值较小，上下层温差与CS强度有较好的对应关系；盛行偏北风、偏西风、西北风时，宁夏北部处于槽后，东移的短波槽是触发CS的重要原因，CS发生效率低；盛行东北风和偏东风时，宁夏北部上游有短波槽，南支槽和高原槽位置超前于短波槽；盛行东南风和偏南风时宁夏北部处于槽前脊后，宁夏处于584 dagpm边缘；盛行西南风时，蒙古国中部存在明显的低值系统。

综上所述，宁夏北部CS气候特征的形成，仍然主要由太阳辐射加热和地形作用主导，在此基础上，叠加动态变化的盛行风的影响，CS的日变化、空间分布、发生强度等都表现出更为复杂多样的特征，当500 hPa盛行西南风、700 hPa盛行偏东风时，盛行风的作用甚至更为显著。相较于700 hPa盛行风，500 hPa盛行风作用更为关键，也就是说500 hPa大尺度环流形势较700 hPa暖湿空气输送或低槽、切变等的作用更为重要，这是由于大尺度环流形势在一定程度上决定了影响CS发生发展的天气系统和大气环境，从而直接影响着CS的发生效率和强度。另外，在不同盛行风向下，在地形复杂的贺兰山山脉，CS的发生存在一定的规律，后续可以开展更进一步的研究。

参考文献

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).

陈兴超, 2016. 华南暖季对流的雷达气候学特征及其机制研究[D]. 南京: 南京大学. Chen X C, 2016. The characteristics and physical mechanisms of warm season convection based on long-term radar observations and mesoscale model[D]. Nanjing: Nanjing University(in Chinese).

顾问, 张晶, 谈建国, 等, 2017. 上海夏季海风锋及其触发对流的时空分布和环流背景分析[J]. 热带气象学报, 33(5): 644-653. Gu W, Zhang J, Tan J G, et al, 2017. Characteristics and circulation background of Shanghai summer sea breeze front and its induced convection[J]. J Trop Meteor, 33(5): 644-653(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 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).

肖玮, 刘维成, 傅朝, 等, 2023. 甘肃东南部暖季对流活动的雷达气候学特征[J]. 高原气象, 42(6): 1536-1547. Xiao W, Liu W C, Fu Z, et al, 2023. Radar climatological characteristics of warm season convection in southeast of Gansu[J]. Plateau Meteor, 42(6): 1536-1547(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. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al, 2006. Doppler Weather Radar Principles and Operational Applications[M]. Beijing: China Meteorological Press(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).

支树林, 许东蓓, 潘赫拉, 等, 2021. 陕西汉中及其周边地区对流活动的雷达气候特征分析[J]. 干旱气象, 39(4): 620-630. Zhi S L, Xu D B, Pan H L, et al, 2021. Analysis on radar climatic characteristics of convective activities in and around Hanzhong areas in Shaanxi Province[J]. J Arid Meteor, 39(4): 620-630(in Chinese).

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).

Ahijevych D A, Carbone R E, Davis C A, 2003. Regional-scale aspects of the diurnal precipitation cycle[C]//Proceedings of the 31st International Conference on Radar Meteorology. Seattle: American Meteorological Society.

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.

Banta R M, Schaaf C B, 1987. Thunderstorm genesis zones in the Colorado Rocky Mountains as determined by traceback of geosynchronous satellite images[J]. Mon Wea Rev, 115(2): 463-476.

Bentley M L, Ashley W S, Stallins J A, 2010. Climatological radar delineation of urban convection for Atlanta, Georgia[J]. Int J Climatol, 30(11): 1589-1594.

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 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, 2014a. 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, 2014b. 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 Technol, 10(6): 785-797.

Haberlie A M, Ashley W S, Fultz A J, et al, 2016. The effect of reservoirs on the climatology of warm-season thunderstorms in Southeast Texas, USA[J]. Int J Climatol, 36(4): 1808-1820.

Han L, Yu X D, Zheng Y G, et al, 2009. Statistic characteristics of severe convective storm during warm-season in Beijing-Tianjin Region and its vicinity[J]. Chin Sci Bull, 54(14): 2493-2498.

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.

Kottmeier C,Kalthoff N,Barthlott C,et al,2008. Mechanisms initiating deep convection over complex terrain during COPS[J]. Meteor Z,17(6):931-948.

Kuo J T,Orville H D,1973. A radar climatology of summertime convective clouds in the Black Hills[J]. J Appl Meteor Climatol,12(2):359-368.

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.

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.

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.

Niyogi D,Pyle P,Lei M,et al,2011. Urban modification of thunderstorms:an observational storm climatology and model case study for the Indianapolis urban region[J]. J Appl Meteor Climatol,50(5):1129-1144.

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.

Tucker D F,Crook N A,2005. Flow over heated terrain. Part Ⅱ: generation of convective precipitation[J]. Mon Wea Rev,133(9):2565-2582.

Wallace J M,1975. Diurnal variations in precipitation and thunderstorm frequency over the conterminous United States[J]. Mon Wea Rev,103(5):406-419.

Weckwerth T M,Wilson J W,Hagen M,et al,2011. Radar climatology of the COPS region[J]. Quart J Roy Meteor Soc,137(S1):31-41.

(本文责编:俞卫平)