

孙永刚,孟雪峰,计燕霞,等,2025.河套地区边界层辐合线形成及其对流触发作用[J].气象,51(1):85-96. Sun Y G, Meng X F, Ji Y X, et al, 2025. Formation of boundary layer convergence lines in Hetao Area and their convection triggering effect[J]. Meteor Mon, 51(1):85-96(in Chinese).

河套地区边界层辐合线形成及其对流触发作用*

孙永刚¹ 孟雪峰² 计燕霞² 崔曲馨³ 刘珂² 云静波² 姜雨蒙²

1 内蒙古自治区气候中心,呼和浩特 010051

2 内蒙古自治区气象台,呼和浩特 010051

3 北京大学物理学院,北京 100871

提 要: 利用加密小球探空、野外地面加密观测站、ERA5 再分析资料、临河新一代天气雷达等资料,对 2022 年 7—8 月内蒙古黄河河套地区由河套灌区与库布奇沙漠地表差异形成的边界层辐合线(BLCL)及其在对流触发中的作用进行了详细分析。结果表明:河套 BLCL 是由地表差异、边界层大气环流、复杂地形共同影响所形成,主要发生在河套灌区东南部的库布奇沙漠地区,长度在 100~200 km,为浅薄系统,垂直厚度约为 1000~1100 m。BLCL 日变化明显,在 12:00—17:00 为高发时段,占 80%。7—8 月 BLCL 形成概率高达 60%,且有 39%的 BLCL 会触发对流。BLCL 形成的预报指标为:河套灌区杭锦后旗较库布奇沙漠哈百来更的 2 m 气温低 2.5℃以上、露点温度高 6℃以上、相对湿度高 20%以上;河套套内库布奇沙漠和毛乌素沙地区域为持续强劲的偏南风,地面 10 m 风速大值中心大于 4 m·s⁻¹;海平面气压场西低东高,黄河“几”字弯为等压线密集带,气压梯度达 3~4 hPa·100 km⁻¹。BLCL 的形成对对流触发具有重要意义,表现为对流触发、加强、组织等作用,在不同的环境条件和天气系统叠加配置下会触发局地对流、有组织强对流,导致河套地区暴雨等天气。河套 BLCL 在这一特定地区的生成和对流触发作用,与河套地区降水自西向东急剧增多的分布特征关系密切。

关键词: 河套地区,边界层辐合线,地表差异,复杂地形,对流触发,暴雨

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.100801

Formation of Boundary Layer Convergence Lines in Hetao Area and Their Convection Triggering Effect

SUN Yonggang¹ MENG Xuefeng² JI Yanxia² CUI Quxin³

LIU Ke² YUN Jingbo² JIANG Yumeng²

1 Inner Mongolia Climate Centre, Huhhot 010051

2 Inner Mongolia Meteorological Observatory, Huhhot 010051

3 School of Physics, Peking University, Beijing 100871

Abstract: Based on dense ball sound data, dense field surface observation, ERA5 and the Linhe New Generation Weather Radar data, detailed analysis is conducted on the boundary layer convergence lines (BLCL) formed by the surface differences between the Hetao irrigation area and the Kubuqi Desert in Hetao Area of the Yellow River in July and August 2022, and also on the role of BLCL in convection triggering. The results indicate that the BLCL in the Hetao Area was formed by the combined influence of surface differences, boundary layer atmospheric circulation and complex terrain, and mainly occurred in

* 国家自然科学基金重点项目(42030604)、内蒙古自治区自然科学技术重点研发和成果转化项目(2022YFSH0009)和内蒙古自治区科技成果转化专项资金项目(2021CG0047)共同资助

2024 年 2 月 6 日收稿; 2024 年 10 月 24 日收修定稿

第一作者:孙永刚,主要从事灾害性天气机理和预报技术研究. E-mail: sunyg5522.163.com

通讯作者:孟雪峰,主要从事灾害性预报预警及其技术研究. E-mail: xiaoxuhua_9@126.com

the Kubuqi Desert which lies in the southeast of the Hetao irrigation area, and the length of BLCL ranged from 100 to 200 km. The BLCL was a shallow system with vertical thickness of approximately 1000 to 1100 m. The daily variation of BLCL was significant, with a high incidence from 12:00 BT to 17:00 BT, accounting for 80%. The probability of BLCL formation in July and August was as high as 60%, and 39% of BLCL could trigger convection. The prediction indicators about the formation of BLCL are as follows. The temperature in Hangjinhou Banner in Hetao irrigation area is 2.5 °C lower than that in Habailaigeng in Kubuqi Desert, with dew point temperature higher than 6°C and relative humidity higher than 20%. Continuous strong southerly winds blow in the Kubuqi Desert and Mu Us Sandy Land in Hetao Area, with maximum wind of 10 m above the surface being stronger than $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. The sea level pressure is low in the west and high in the east. A dense isobaric zone is in the curved section of Yellow River and the pressure gradient is $3-4 \text{ hPa} \cdot 100 \text{ km}^{-1}$. The formation of BLCL is of great significance to the convection triggering in this area, which is manifested in convection triggering, strengthening, and organization. Under different environmental conditions and weather system superposition configurations, the BLCL could trigger local convection, organized severe convection, torrential rain in Hetao Area. The generation and convective triggering of Hetao BLCL in this specific area are closely related to the distribution characteristics of rapid increase in precipitation from west to east in Hetao Area.

Key words: Hetao Area, boundary layer convergence line (BLCL), surface difference, complex terrain, convection triggering, torrential rain

引 言

强对流天气的形成过程复杂,预报难度大,特别是对流初生及可能演变机制是强对流天气预报面临的难题(崔新艳等,2021;许冠宇等,2022)。强对流发生需要不稳定大气层结、水汽和动力抬升等基本条件的有效配合(王迪等,2020)。而对流能否被触发是强对流形成和发展的关键问题(Doswell III, 2001;俞小鼎等,2012;俞小鼎和郑永光,2020;孙继松等,2014;张一平等,2021;2022)。中尺度上升运动起主要的对流触发作用,天气尺度上升运动通常不直接触发雷暴,而是使得大气变得更加不稳定(Doswell III, 1987)。边界层辐合线(BLCL)是触发对流的重要中尺度天气系统之一(Doswell III, 2001;姚秀萍和曹晓敏,2023)。BLCL通常包括雷暴流出边界(阵风锋)(何娜等,2020)、干线、边界层水平对流卷(Weckwerth et al, 1997)以及由地表加热特征差异形成的中尺度辐合线,即海(湖)风锋辐合线(俞小鼎等,2012;苏爱芳等,2022)等。

BLCL的存在往往对应显著的局地抬升运动,并造成近地面层水汽充分混合,为强对流的形成、发展提供触发机制或有利条件。BLCL触发对流的过程较为复杂,即使环境大气具有较高的对流有效位

能,但其能否触发对流依然存在很大的不确定性(Wakimoto and Murphey, 2010)。一般情况下,较弱的 BLCL 需要与天气尺度强迫或其他机制配合才有可能进一步发展成深对流(郑永光等,2015;俞小鼎等,2020)。干线、由地表加热特征差异形成的中尺度辐合线与地形分布、地表差异密切相关。干线多发生在高原或山地与平原的交界附近(郑永光等,2007;方祖亮等,2020),其两侧存在明显的露点温度梯度,但温度对比不明显;干线附近存在风向辐合;白天干线干空气一侧温度高于湿空气一侧,露点温度明显低于干线另一侧,夜晚相反(俞小鼎等,2020)。地表差异引发的热力差异会形成明显的 BLCL,除海(湖)风锋外,土壤湿度或不同的地表覆盖(如不同的植被森林和草地)空间分布差异导致的热力环流类似于海陆风/湖陆风辐合线,在某些有利条件下会触发和增强深厚湿对流(Pielke, 2001; Taylor, 2015)。

河套地区具有复杂地形地貌特征,黄河进入内蒙古形成“几”字湾,黄河湾向北形成河套灌区,受黄河水的滋润成为平原绿洲,土地湿润为粮食主产区。河套灌区西、北、东受阴山山脉围绕,黄河南岸是库布奇沙漠和毛乌素沙地,荒芜干旱。地势西高东低,不到 300 km 的距离,年降水量自西向东激增,从临河的 150 mm 增多至东胜的 400 mm,短时强降水、

雷暴、冰雹等强对流天气时有发生。河套地区形成的对流系统东移发展加强往往会对下游产生重大影响,北京“7·21”暴雨就是内蒙古河套地区形成气旋并发展东移造成的(孟雪峰等,2013;许东蓓等,2018;张桂莲等,2020;俞小鼎,2012)。特别是盛夏季节,在河套灌区黄河南岸的沙漠沙地的干旱区域沿黄河一线多 BLCL 生成,且发生频率较高。Huang et al(2019)还对河套地区雷达识别出的由于植被差异形成的 BLCL 进行了研究,发现其中 44% 引发了对流,干旱地区出现的辐合线明显多于绿洲,植被差异对辐合线特征的影响十分显著。由于河套地区观测相对稀疏,目前为止对河套 BLCL 的相关观测和研究还很少,很有必要开展系统的分析研究。

国家自然科学基金重点项目“具有不均匀植被分布的下垫面上强对流触发和组织演变机理研究”项目组于 2022 年 7 月 1 日至 8 月 9 日在河套地区的关键区域开展了 BLCL 野外加密观测试验。试验捕获了 29 次 BLCL、66 次阵风锋、12 次水平对流卷和 1 次龙卷风。观测揭示了跨越沙漠边界的完整热循环,其特点是水平宽度约为 25 km,地面以上约 1 km 的辐合高度,地面以上 2~3.5 km 的辐散,垂直风速高达 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Meng et al, 2024)。本文在此次野外加密观测试验数据的基础上,重点研究了河套 BLCL 生成的基本规律、气象要素特征、预报

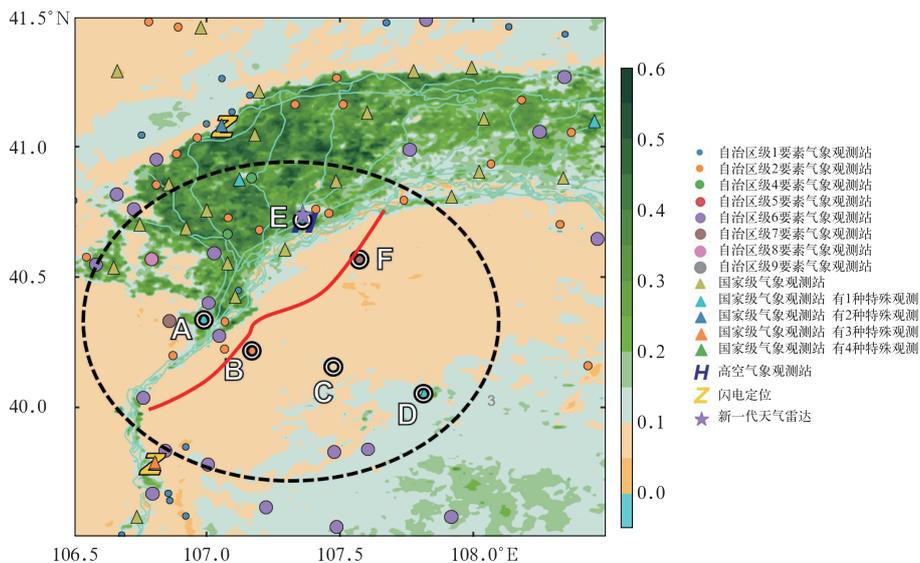
指标及其在强对流触发中的作用,以提升河套地区 BLCL 触发强对流天气监测和预报预警能力。

1 野外观测试验方案与资料

1.1 野外观测点选取

项目组为了实现对河套 BLCL 的精准观测,建立了 6 个观测点(图 1)。图 1 中红色线表示典型的 BLCL;A 点和 E 点位于绿洲上,以草地地形为特征;B 点和 F 点位于库布齐沙漠上,以沙漠景观为特征;C 点为草地荒漠化的过渡带;D 点则以荒漠草原为特征。加密观测时间为 2022 年 7—8 月,包括前期测试准备和后期延伸收尾工作,正式观测时间为 7 月 20 日至 8 月 10 日。

6 个观测点的选择主要考虑了 BLCL 的频率和方向、绿洲和沙漠地区之间的地理划分、实施可行性以及现有气象观测站的分布等因素。沿着 AD 和 EF 轴的观测点可以捕捉垂直于 BLCL 的剖面特征,沿 AE 和 BF 轴的观测点也可以揭示沿 BLCL 方向的特征。设计充分考虑了现有气象观测站网的利用,A、B、D、E 观测点分别位于磴口、巴音恩格尔、伊和乌素和临河的自动气象站,F 观测点是唯一位于沙漠腹地的哈百来更的自动气象站。另外,C 观测点选择了风电指挥部,临时安装了便携式自动气象站。



注:黑色椭圆为野外加密观测试验区,A~F 为野外加密观测试验点,填色为增强植被指数,红色线为典型的 BLCL。

图 1 河套地区观测站点分布
Fig. 1 Distribution of observation stations in Hetao Area

1.2 野外加密观测仪器部署

在现有气象观测站网基础上,补充了部分加密观测仪器设备。在 A、B、D 和 E 观测点安装了土壤温度和湿度传感器,观测沙漠绿洲辐合线与深对流观测试验(DECORDE)区域土壤温度和湿度的变化。在 A、B 观测点安装了涡动辐射计,监测沙漠和绿洲地区热量、动量和水分通量的日变化及其差异。绿洲观测点 A 和 E、沙漠观测点 B 和 F 配备了微波辐射计、多普勒激光雷达、便携式无线电探空仪,对比观测沙漠和绿洲的昼夜温度、湿度和风的变化和差异。

1.3 天气雷达资料

应用临河新一代天气雷达 0.5° 和 1.5° 两个仰角的组合反射率来识别 BLCL,其具体表现为:窄带晴空回波,一般宽度在 5 km 以内,长度在 50 km 以上,回波强度在 5~20 dBz。

1.4 再分析资料

采用欧洲中期天气预报中心第五代大气再分析资料(ERA5)分析河套地区 BLCL 发生的近地面要素特征以及降水个例,其水平分辨率为 0.25° 。

2 河套 BLCL 统计特征

地表加热特征差异引发的热力差异会形成明显的 BLCL,本文重点关注内蒙古河套灌区(湿润绿洲;东西长 250 km,南北宽约 50 km;总土地面积 1784 万亩,1 亩 \approx 666.7 m^2)与黄河南岸的库布奇沙漠和毛乌素沙地(荒芜干旱)地表差异形成的 BLCL(以下简称河套 BLCL)。夏季白天库布奇沙漠地表升温较快且干燥,河套灌区地表升温较慢且相对湿润,这一差异使得沿黄河东南岸沙漠干旱区多发 BLCL,由于河套灌区面积较小,河套 BLCL 通常发生在特定的较小区域。

2.1 发生频次分布

河套 BLCL 是地表热力差异引发的,因此,其形成受天气系统和云系影响较大,有天气过程时雷达观测很难判别是否有 BLCL 形成。在野外观测试验期间,有 10 天受多云天气影响,临河雷达组合反射率不能识别和观测到 BLCL 形成;12 天为晴好天气,无 BLCL 形成;18 天有 BLCL 形成。在有效

观测的 30 天中,BLCL 形成概率达 60%,可见在主汛期 BLCL 形成较为频繁。在有 BLCL 形成的 18 天中,7 天触发了不同强度的对流,触发率约为 39%,与 Huang et al(2019)有 44% 的 BLCL 引发对流的 research 结论接近。

2.2 发生位置分布

图 2 给出了野外观测期间发生的 18 条河套 BLCL 区域,可见,其主要发生在河套灌区与库布奇沙漠交界,沿黄河东南岸沙漠干旱的较小区域。河套干线多发生在河套套外西北部、套内东部地区,干线长度多在 300~800 km,集中在 400~700 km(张一平等,2021)。而河套 BLCL 发生在河套套内西北区域,长度在 100~200 km,由于发生区域不同,尺度明显较小,其生成和发展取决于河套灌区与库布奇沙漠地表植被差异、河套地区复杂地形等因素。

2.3 日变化特征

太阳辐射是河套灌区与库布奇沙漠热力差异的直接原因,河套 BLCL 形成和维持有明显的日变化特征。按照 BLCL 发生和维持的时间,统计 24 h 内逐小时 BLCL 存在次数(图略),结果显示河套 BLCL 主要活动时间为 09:00—20:00(北京时,下同),其中 12:00—17:00 为高发时段,占 BLCL 形成时段的 80%。

3 河套 BLCL 形成的气象条件

河套 BLCL 的形成除了河套灌区与库布奇沙漠热力差异外,与环境气象条件密切相关。并非所

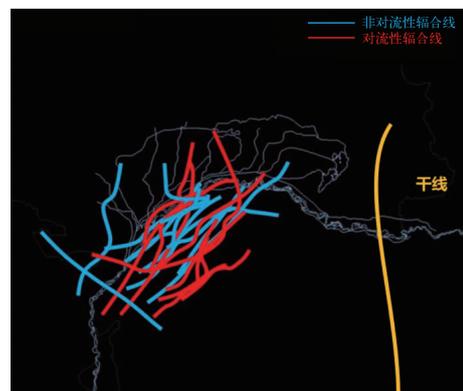


图 2 2022 年 7—8 月河套地区 18 条 BLCL 发生位置分布
Fig. 2 Distribution of 18 BLCL occurrence locations in Hetao Area from July to August 2022

有晴好天气,太阳辐射充足就会形成 BLCL,通常地表热力差异达阈值并与适宜的环境气象条件结合才会形成 BLCL。确定河套 BLCL 形成的地表热力差异阈值和环境气象条件阈值是监测预报 BLCL 形成的关键,为此,针对野外观测试验期间,基于 ERA5 再分析资料,将气象条件分成两组有 BLCL 形成和无 BLCL 形成进行统计对比分析,同时,确定杭锦后旗为河套灌区代表站,哈百来更为沙漠沙地区代表站进行分析。

3.1 2 m 气温和露点温度差异特征

河套灌区与黄河对岸库布奇沙漠两种不同地表性质,在太阳持续辐射作用下,2 m 气温和露点温度会产生明显的差异和日变化。总体来看,在观测期间的 11:00(通常要素已经出现明显差异)平均 2 m 气温,杭锦后旗为 25.4℃,较哈百来更站的 27.9℃低 2.5℃;16:00 平均露点温度差异最大,杭锦后旗(15.5℃)较哈百来更(8.5℃)高 7℃。

将有、无 BLCL 形成的两种情况分别进行统计分析。由图 3a,3b 可见,有 BLCL 形成时,杭锦后旗与哈百来更最大 2 m 气温差为 3.3℃,差异较大的时段在 10:00—15:00,气温差异相对较大的时段出

现较早;无 BLCL 形成时,杭锦后旗与哈百来更最大气温差为 2℃,差异较大时段在 14:00—17:00,相对较小、出现时间较晚。可见,河套灌区与沙漠沙地间的 2 m 气温差异大有利于 BLCL 生成,代表站杭锦后旗与哈百来更最大 2 m 气温差大于 2.5℃可以作为条件指标阈值。2 m 露点温度时间演变显示(图 3c,3d),其最大差异在 6~7℃,两种情景差异不明显。2 m 相对湿度最大差异在 20%左右。

3.2 10 m 风场特征

河套 BLCL 形成与 10 m 风场密切相关。从河套地区 2022 年 7—8 月 08:00 10 m 平均风场(图略)可见,盛夏时节河套套内的库布奇沙漠和毛乌素沙地区域为一致的偏南风,风速约 $2\sim 3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,而在河套灌区风向转为东北风(约 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),自然形成了沿黄河一线 10 m 风场辐合。河套套内的偏南风受到西北部的阴山山脉(狼山)阻挡,在河套灌区形成绕流转为东北风。可见,盛夏河套套内盛行偏南风,受复杂地形阻挡在河套灌区形成东北风绕流,是河套 BLCL 形成的有力条件。

将有、无 BLCL 形成的两种情况分别进行统计分析。有 BLCL 形成日的 08:00 10 m 平均风场(图 4a),

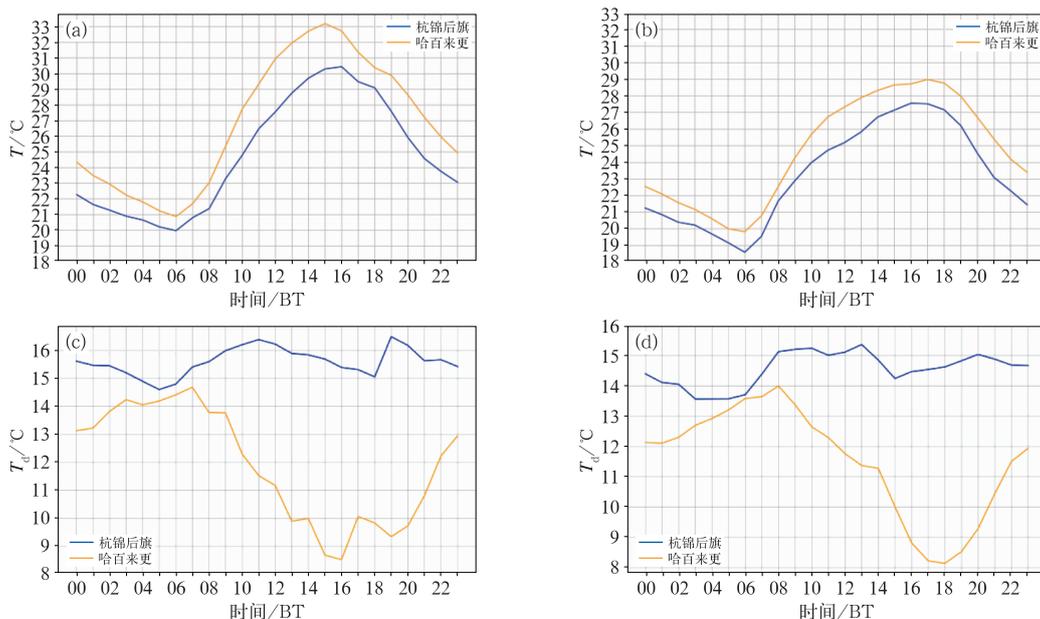


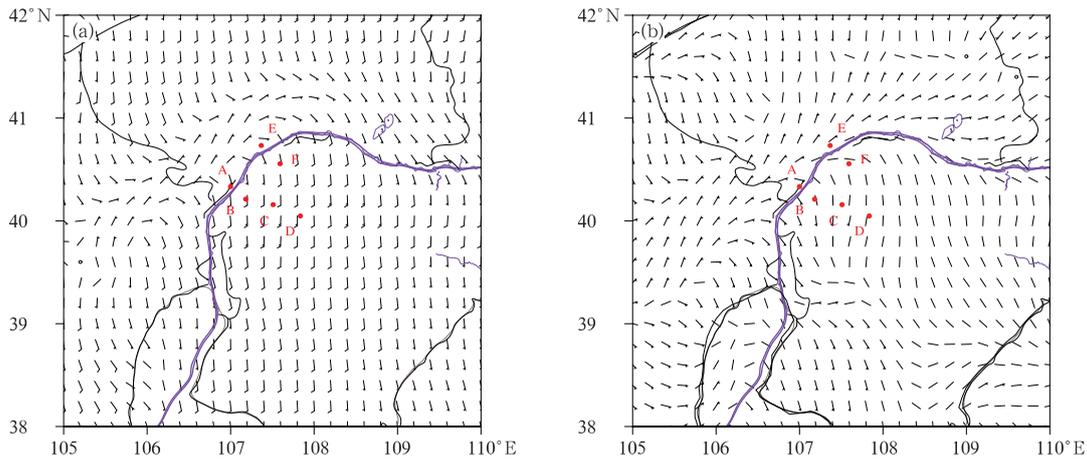
图 3 2022 年 7—8 月河套地区(a,c)有、(b,d)无 BLCL 形成日代表站逐小时 2 m (a,b)气温和(c,d)露点温度平均变化曲线

Fig. 3 Hourly average variation curves of 2 m (a, b) temperature and (c, d) dew point temperature at representative stations within 24 h (a, c) with and (b, d) without BLCL formation in Hetao Area from July to August 2022

库布奇沙漠和毛乌素沙地区依然存在一致的偏南风,且风速较盛夏平均的 $2\sim 3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增强至 $4\sim 6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,河套灌区保持东北风,其风速也增强至 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。而无 BLCL 形成日的 08:00 10 m 平均风场(图 4b),库布奇沙漠和毛乌素沙地区并非一致的偏南风且风速很弱,河套灌区是东北风但风速很弱。可见,河套套内的库布奇沙漠和毛乌素沙地的偏南风,河套灌区转为东北风,对河套 BLCL 形成至关重要,其稳定维持和一定的强度是 BLCL 形成的重要条件。可将河套套内一致的偏南风 $> 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,河套灌区东北风 $> 1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 作为 BLCL 形成的条件阈值。

3.3 海平面气压特征

河套 BLCL 形成与海平面气压形势场密切相关。盛夏时节河套上游多受大陆热低压控制,而下游受西太平洋副热带高压(以下简称副高)及其外围影响,海平面气压高,即西低东高形势。对有 BLCL 的 5 天的 08:00 海平面气压场作平均,发现河套西部低压系统较为强盛,中心闭合,配合东部高压系统控制,在黄河“几”字弯为西低东高等压线密集带,气压梯度达 $3\sim 4\text{ hPa}\cdot 100\text{ km}^{-1}$ (图 5a),这样的海平面气压配置与地面较强盛的偏南风是吻合的。对无 BLCL 的 12 天的 08:00 海平面气压场进行平均,



注:紫色线为黄河,A~F为野外加密观测试验站,下同。

图 4 2022 年 7—8 月河套地区(a)有、(b)无 BLCL 形成日 08:00 10m 平均风场(风羽)

Fig. 4 Average 10 m wind field (barb) (a) with and (b) without BLCL formation in Hetao Area at 08:00 BT from July to August 2022

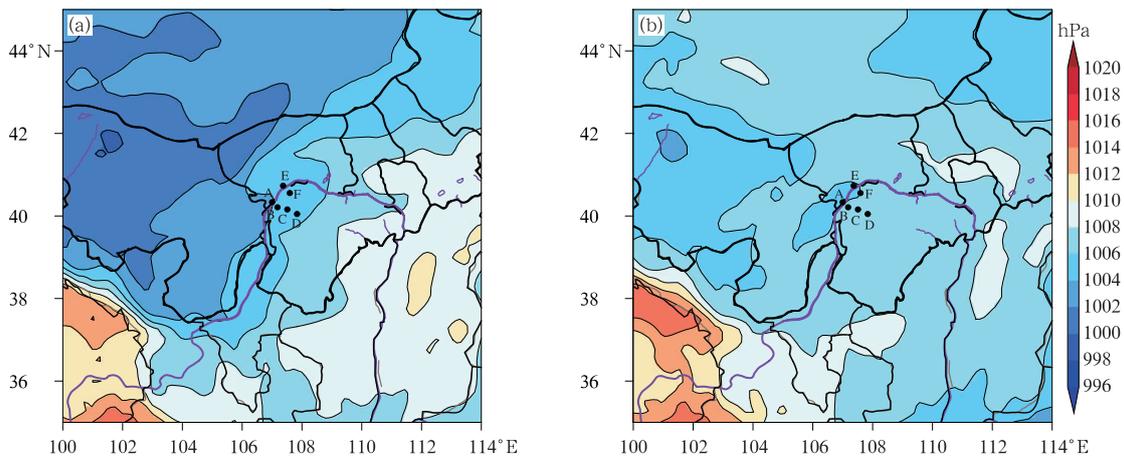


图 5 2022 年 7—8 月河套地区(a)有、(b)无 BLCL 形成日 08:00 平均海平面气压场(填色和等值线,单位:hPa)

Fig. 5 Average sea level pressure field (colored and contour, unit: hPa) (a) with and (b) without BLCL formation in Hetao Area at 08:00 BT from July to August 2022

结果显示海平面气压场无明显的等压线密集带(图 5b)。

3.4 河套 BLCL 形成的预报指标

综上所述,可以确定河套 BLCL 形成的 3 项预报指标:(1)河套 BLCL 形成时地表差异是关键,中午前后,河套灌区代表站杭锦后旗较库布奇沙漠代表站哈百来更气温低 2.5°C 以上、相对湿度高 20% 以上;(2)河套套内库布奇沙漠和毛乌素沙地区域持续强劲的偏南风,地面 10 m 风速大值中心 $>4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,河套灌区东北风风速 $>1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;(3)河套上游多受大陆热低压控制,下游受副高及其外围影响,河套地区海平面气压场呈西低东高形势,黄河“几”字弯为等压线密集带,气压梯度达 $3\sim 4\text{ hPa}\cdot 100\text{ km}^{-1}$ 。

3.5 复杂地形和地表差异作用下河套 BLCL 次级环流特征

分析研究河套 BLCL 次级环流特征对深入认识其形成机制及在对流触发过程中的作用非常重要。河套 BLCL 形成是多种条件因素共同作用的结果。一是河套灌区与库布奇沙漠和毛乌素沙地明显的地表植被差异,在太阳辐射作用下形成较大的热力差异,这一条件是固有常态的。二是盛夏季节,受大陆热低压与副高影响,河套套内形成一致的偏南风,其稳定维持是河套 BLCL 形成的关键因素,这一条件在一定程度上受天气系统演变影响。三是阴山山脉复杂地形作用,一方面,其阻挡河套套内的偏南风,在河套灌区形成绕流,转为东北风;另一方面,其阻挡对流层中层的偏西气流。

2022 年 7 月 29 日 10:00 出现明显 BLCL,由各点小球探空观测可见(图 6),在 2200~2300 m 高度出现明显的偏南风转为偏西风的切变,该高度即为河套 BLCL 次级环流的顶高,其高出伊和乌素站(海拔为 1180.3 m)1000~1100 m,即观测到河套 BLCL 的垂直厚度。这与阴山山脉的狼山最高海拔为 2365 m,阻挡偏西气流越过山脉与近地层的偏南风形成风切变相吻合。项目组采用数值模拟也得到了相同的次级环流特征(Liu et al, 2023)。

河套 BLCL 次级环流(图 7)表现为,在太阳辐射作用下,河套灌区升温慢,在阴山山脉西、北面的包围下,易形成了冷湿气团;库布奇沙漠和毛乌素沙地升温快,通常形成干热气团,受一致的偏南风作用在冷堆上爬升。同时,偏南风受阴山山脉阻挡,在河

套灌区形成绕流,转为东北风并下沉,使冷堆稳定维持并向南扩展。在河套灌区冷湿气团与库布奇沙漠干热气团交界处形成次级环流上升支,对流层中层偏西气流越过山脉,将次级环流上升支抑制在约 2300 m 以下并在上层转为偏西风。可见,河套 BLCL 为浅薄系统,垂直厚度约为 1000~1100 m,发生区域相对固定,水平尺度较小,在 150~200 km。

4 河套 BLCL 在对流触发中的作用

在一定的有利对流环境条件下,BLCL 一般都能通过增加抬升强度触发对流。值得关注的是,并非所有的 BLCL 在看似适宜的环境条件下都能触发对流,即使环境具有较大的对流有效位能和弱的对流抑制能量,BLCL 的存在也并不一定意味着对流发展(Richter and Bosart, 2002; Cai et al, 2006; Wakimoto and Murphey, 2010)。浅薄的 BLCL 需要与天气尺度上升运动或大气低层风垂直切变或适当的大气热力条件相配合才能形成深对流,局地潜热和感热释放也会影响深对流的形成(Behrendt et al, 2011; 郑永光等, 2015)。河套 BLCL 是浅薄系统,在有利的环境条件和天气系统叠加配置下会触发对流。观测分析表明,通常出现两类触发情景,一是触发生成局地对流,在没有天气系统叠加配置情况下随后消散;二是上游移来系统触发加强形成组织对流并持续发展影响下游。下面用几个典型个例分析河套 BLCL 在对流触发中的作用。

4.1 触发局地对流

没有明显的天气系统配合(图略),在有利环境条件下,河套 BLCL 也能够触发生成对流单体。Huang et al(2019)认为,由植被差异引起的边界层辐合线附近,白天温差大更易于对流触发。Mueller and Carbone(1987)指出,地面 $2\sim 4^{\circ}\text{C}$ 的温度或露点温度扰动足以影响对流形成。本次 BLCL 两侧的温度和露点温度差异都达到了这一指标。

由 2022 年 7 月 29 日临河雷达反射率因子(图 8)可见,14:36, BLCL 开始在 B 点、F 点一线生成;15:05, BLCL 南部开始触发形成对流单体;16:03, BLCL 东侧沙漠干区一线有 4 个对流单体触发生成,回波中心强度为 50 dBz;16:37, 4 个对流单体发展加强,中心回波强度为 60 dBz;17:01, 北部的对流单体发展,南部对流单体有向北合并趋势;17:35

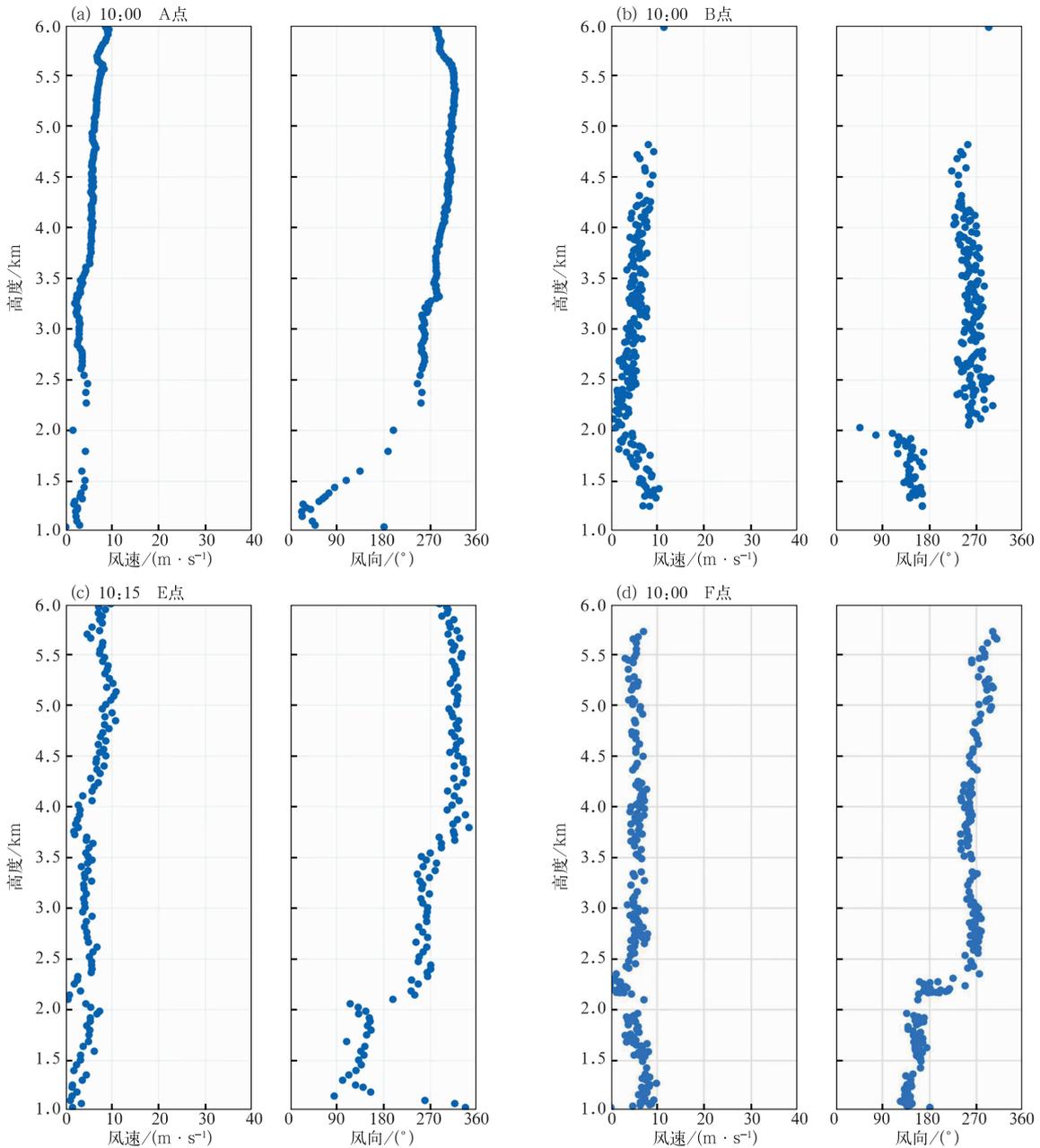


图 6 2022 年 7 月 29 日加密观测的小球探空风向、风速随高度变化

Fig. 6 Variations of wind direction and speed with height of small sounding balls at four dense observation points on 29 July 2022

对流单体向北移动合并与 BLCL 分离;18:04 后对流单体东移减弱消散。触发对流单体过程中,对流单体快速发展但维持时间较短,单体与 BLCL 分离后就开始减弱消散,BLCL 的触发对流作用很明显。

从 BLCL 生成和触发对流区域的 K 指数和假相当位温分布可以看出(图略),该区域是潜在不稳定能量高值区。可见,BLCL 生成区域具备一定的潜在不稳定能量即触发对流的有利环境条件,当潜

在不稳定能量达到足够强时,在没有天气系统配合的情况下 BLCL 也可以触发对流单体,但对流发展有限,当对流与 BLCL 分离后,不稳定能量条件不足,对流便开始减弱消散。

4.2 触发有组织强对流

当上游有较弱天气系统移来配合时(图略),通常表现为雷达分散性弱回波移入,与河套 BLCL 叠

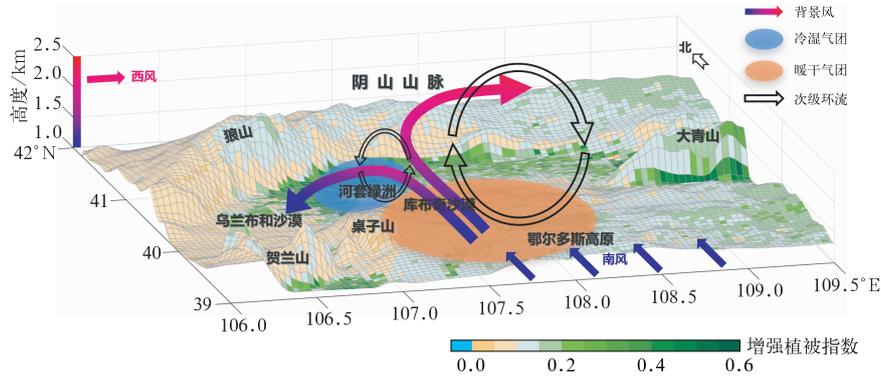


图 7 河套 BLCL 次级环流示意

Fig. 7 Secondary circulation of BLCL in Hetao Area

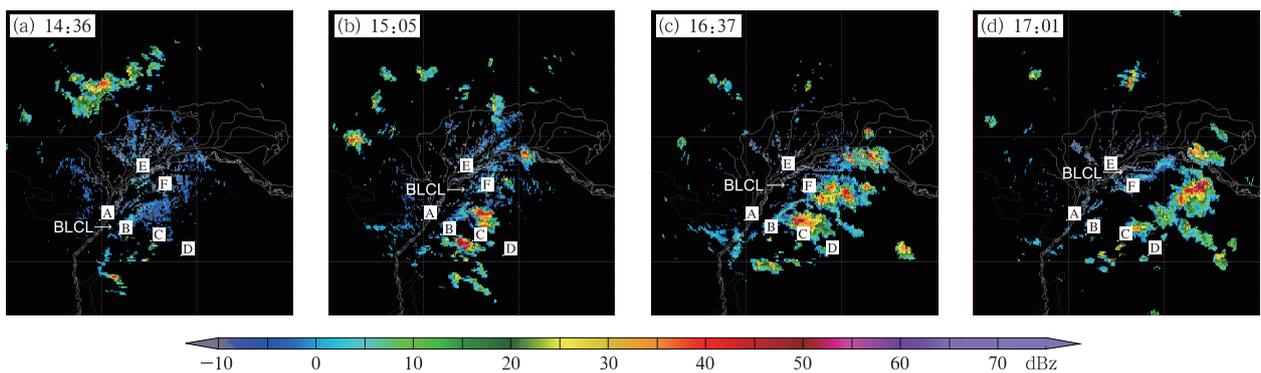


图 8 2022 年 7 月 29 日临河雷达 0.5°仰角反射率因子

Fig. 8 Reflectivity factor at 0.5° elevation of Linhe Radar on 29 July 2022

加、触发生成有组织的弓形强对流回波。

由 2022 年 7 月 23 日临河雷达反射率因子(图 9)可见,15:11 上游有分散性回波移入,强度约 45 dBz, BLCL 在 B 点、F 点一线;16:08 上游回波与 BLCL 叠加并再次强烈发展,强度增强至 50 dBz;16:59 原分散性回波在 BLCL 一线触发加强形成了有组织的弓形回波,强度增强至 55 dBz;17:33 弓形强对流回波发展向东南方向移出。

由 7 月 25 日临河雷达反射率因子(图 10)可见,17:04 上游有分散性回波移入,强度约 45 dBz; 18:13 上游回波与 BLCL 叠加强烈发展,对流回波强度增强至 60 dBz; 19:00 上游原分散性回波在 BLCL 一线触发加强形成了有组织的弓形回波,强度增至 65 dBz;20:03 弓形强对流回波持续发展向东南移出。

以上 2 个个例非常相似,均为上游有较弱天气

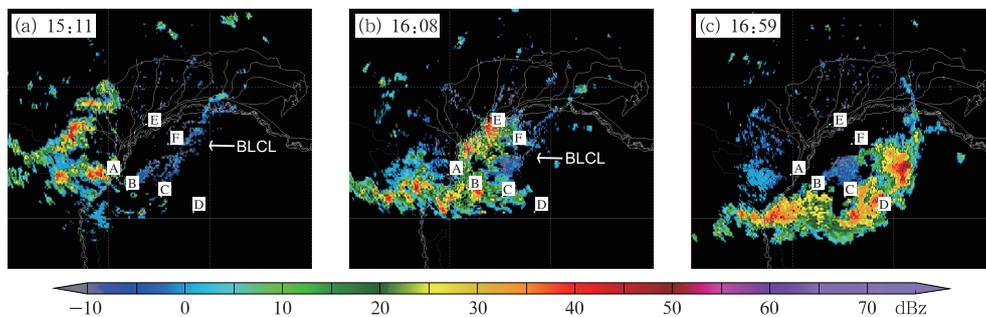


图 9 2022 年 7 月 23 日临河雷达 0.5°仰角反射率因子

Fig. 9 Reflectivity factor at 0.5° elevation of Linhe Radar on 23 July 2022

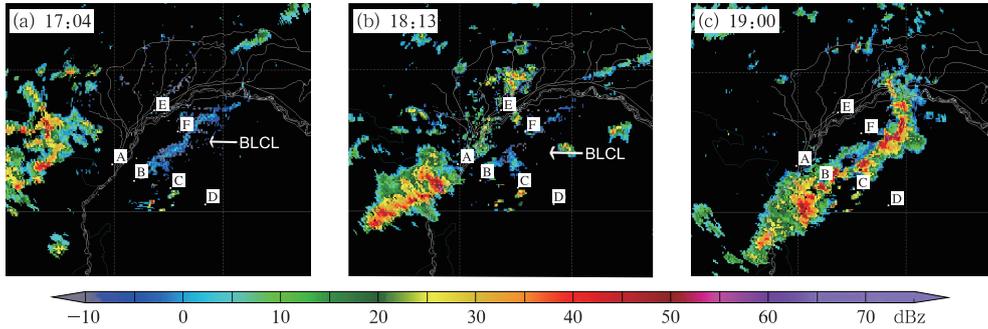


图 10 2022 年 7 月 25 日临河雷达 0.5°仰角反射率因子

Fig. 10 Reflectivity factor at 0.5° elevation of Linhe Radar on 25 July 2022

系统分散性弱回波移入,在 BLCL 一线重新强烈发展,形成了有组织的弓形强回波。可见 BLCL 在对流触发过程中起到了触发、加强、组织的关键作用。

4.3 触发河套地区暴雨

在强天气系统影响(图略)下,河套 BLCL 也起到触发大范围强回波,不同程度影响暴雨落区的作用。

2022 年 8 月 13 日临河雷达反射率因子(图略)显示,15:34,上游西南方向有系统强回波移来,在 BLCL 上有对流单体发展生成;16:32, BLCL 上触发多个对流单体强烈发展,强度达到 50 dBz,与西南移来强回波处于分离状态;18:04,对流单体强烈发展,形成西北—东南带状回波并向东北移动,强度增至 55 dBz,与西南移来的强回波距离加大,形成南、北两块强回波;19:31,北部强回波持续快速发展东移,南部移来回波基本维持,南、北回波面积和强度相当,其后,北部回波继续发展,形成河套暴雨天气。

8 月 21 日临河雷达反射率因子(图略)显示,11:19, BLCL 在 B 点、F 点一线生成,上游西北方向有系统强回波移入;12:04, BLCL 一线触发多个对流单体发展并排列成线形回波,强度达到 45 dBz;13:01,西北移来的强回波接近, BLCL 触发的线形对流回波强烈发展,回波范围快速增加,强度达到 50 dBz;14:03,西北移来强回波与 BLCL 线形对流回波合并,再次强烈发展形成宽带状回波,强度达到 55 dBz,之后回波东移面积快速发展扩大,强度为 50 dBz,形成河套暴雨天气。

以上 2 次河套地区暴雨天气过程,强天气系统的雷达回波来向不同,触发暴雨回波的特点不同。2022 年 8 月 13 日过程强天气系统从西南方向移

入,在系统前方 BLCL 上触发新对流新对流系统快速发展形成暴雨;21 日过程强天气系统从西北方向移入,在系统前方 BLCL 上触发新对流,二者叠加快速发展形成暴雨。但形成暴雨的强回波都是在 BLCL 上触发发展起来的。可见, BLCL 在河套暴雨天气过程中起到了对流触发的作用,但与天气系统配合后会在不同程度上会影响暴雨落区。

综上所述,河套 BLCL 虽然发生在特定的较小区域内,但在对流触发中具有重要作用,主要表现为对流触发、加强及组织。在不同的环境条件和天气系统叠加配置下会触发局地对流、有组织强对流,造成河套地区暴雨。BLCL 生成时,通常其周边区域内潜在不稳定能量较高,在没有天气系统配合情况下也可以触发局地对流,但发展有限,对流移出该区域便减弱消散;当上游有弱天气系统移入时,上游分散回波在 BLCL 触发下加强,并在 BLCL 一线形成有组织的对流系统(如飑线等);当上游有强天气系统移入时,在上游强回波前部的 BLCL 一线对流系统触发并迅速发展,回波强度和范围迅速扩大、东移形成短时强降水和暴雨天气。

5 结论与讨论

(1)河套边界层辐合线(BLCL)是由河套灌区与黄河南岸的库布奇沙漠和毛乌素沙地(荒芜干旱)地表差异形成的,主要发生在河套灌区与库布奇沙漠交界,沿黄河东南岸沙漠干旱的较小区域。BLCL 长度在 100~200 km。与太阳辐射密切相关,12:00—16:00 为高发时段,占 BLCL 形成时段的 80%。盛夏 7—8 月形成概率高达 60%,有 39% 的 BLCL 触发对流。

(2)河套 BLCL 形成的预报指标有:地表差异

是关键,中午前后,河套灌区代表站杭锦后旗较库布奇沙漠代表站哈百来更的地面气温低 2.5°C 以上、露点温度高 6°C 以上、相对湿度高 20% 以上;河套套内库布奇沙漠和毛乌素沙地区域维持强偏南风,地面 10 m 风速大值中心 $>4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,河套灌区东北风风速 $>1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;河套地区平均海平面气压场呈西低东高形势,黄河“几”字弯为等压线密集带,气压梯度达 $3\sim 4\text{ hPa}\cdot 100\text{ km}^{-1}$ 。

(3)河套 BLCL 次级环流受地形影响明显,其顶高在 2300 m 以下,垂直厚度为 $1000\sim 1100\text{ m}$,为浅薄系统,与地形阻挡西风气流越山密切相关。

(4)河套 BLCL 虽然尺度小、发生区域小,但在对流触发中具有重要作用,主要表现为对流触发、加强及组织。在不同的环境条件和天气系统叠加配置下,会触发局地对流、有组织强对流,造成河套地区暴雨。

(5)河套 BLCL 在这一特定地区的存在与河套地区降水自西向东急剧增多的分布特征关系密切,其触发的对流系统通常东移发展加强,在下游产生降水,且降水量级逐步增大。因此,对河套 BLCL 生成和对流触发的预报预警在防灾减灾工作中至关重要。

参考文献

- 崔新艳,陈明轩,秦睿,等,2021. 对流初生理的研究进展[J]. 气象, 47(11):1297-1318. Cui X Y, Chen M X, Qin R, et al, 2021. Research advances in the convective initiation mechanisms[J]. Meteor Mon, 47(11):1297-1318(in Chinese).
- 方祖亮,俞小鼎,王秀明,2020. 东北暖季干线统计分析[J]. 气象学报, 78(2):260-276. Fang Z L, Yu X D, Wang X M, 2020. Statistical analysis of drylines in Northeast China[J]. Acta Meteor Sin, 78(2):260-276(in Chinese).
- 何娜,丁青兰,俞小鼎,等,2020. 北京及周边地区雷暴阵风锋特征统计分析[J]. 气象学报, 78(2):250-259. He N, Ding Q L, Yu X D, et al, 2020. Statistical analysis of thunderstorm gust front characteristics in Beijing and surrounding areas[J]. Acta Meteor Sin, 78(2):250-259(in Chinese).
- 孟雪峰,孙永刚,萨日娜,等,2013. 河套气旋发展东移与北京 721 暴雨的关系[J]. 气象, 39(12):1542-1549. Meng X F, Sun Y G, Sarina, et al, 2013. Correlation between eastward developing of Hetao cyclone and the severe rainstorm in Beijing on 21 July 2012[J]. Meteor Mon, 39(12):1542-1549(in Chinese).
- 苏爱芳,郑永光,张宁,等,2022. 边界层辐合线触发深厚湿对流研究进展[J]. 气象学报, 80(2):177-189. Su A F, Zheng Y G, Zhang N, et al, 2022. A review of research on boundary convergence lines triggering of deep and moist convection[J]. Acta Meteor

Sin, 80(2):177-189(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:22-161. Sun J S, Dai J H, He L F, et al, 2014. Basic Principles and Techniques of Severe Convective Weather Forecasting: Handbook of Severe Convective Weather Forecasting in China[M]. Beijing:China Meteorological Press:22-161(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).
- 许东蓓,苟尚,肖玮,等,2018. 两种类型短时强降水形成机理对比分析—以甘肃两次短时强降水过程为例[J]. 高原气象, 37(2):524-534. Xu D B, Gou S, Xiao W, et al, 2018. Case study on the formation mechanism of two types of short-term strong rainfall occurred in Gansu Province[J]. Plateau Meteor, 37(2):524-534(in Chinese).
- 许冠宇,黄龙飞,吴涛,等,2022. 华中地区春季一次强对流触发的多尺度影响机制分析[J]. 气象, 48(8):979-992. Xu G Y, Huang L F, Wu T, et al, 2022. Analysis of multi-scale influence mechanism of a severe convection initiation in spring in Central China [J]. Meteor Mon, 48(8):979-992(in Chinese).
- 姚秀萍,曹晓敏,2023. 大气对流初生的研究进展与展望[J]. 大气科学学报, 46(6):940-949. Yao X P, Cao X M, 2023. Research progress and prospect of atmospheric convection initiation [J]. Trans Atmos Sci, 46(6):940-949(in Chinese).
- 俞小鼎,2012. 2012年7月21日北京特大暴雨成因分析[J]. 气象, 38(11):1313-1329. Yu X D, 2012. Investigation of Beijing extreme flooding event on 21 July 2012[J]. Meteor Mon, 38(11):1313-1329(in Chinese).
- 俞小鼎,王秀明,李万莉,等,2020. 雷暴与强对流临近预报[M]. 北京:气象出版社. Yu X D, Wang X M, Li W L, et al, 2020. Nowcasting of Thunderstorms and Severe Convection[M]. Beijing: China Meteorological Press(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).
- 俞小鼎,周小刚,王秀明,2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J]. 气象学报, 70(3):311-337. Yu X D, Zhou X G, Wang X M, 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection[J]. Acta Meteor Sin, 70(3):311-337(in Chinese).
- 张桂莲,杭月荷,付丽娟,等,2020. “列车效应”诱发的一次河套地区致灾暴雨成因[J]. 高原气象, 39(4):788-795. Zhang G L, Hang Y H, Fu L J, et al, 2020. Causes of a torrential rainstorm induced by “train effect” in Hetao Area[J]. Plateau Meteor, 39(4):788-795(in Chinese).
- 张一平,俞小鼎,王迪,等,2021. 河套及周边地区干线触发对流天气特征初步分析[J]. 高原气象, 40(5):1024-1037. Zhang Y P, Yu

- X D, Wang D, et al, 2021. A preliminary analysis of the characteristics of drylines and its triggering convections in the Hetao and surrounding regions[J]. *Plateau Meteor*, 40(5): 1024-1037 (in Chinese).
- 张一平, 俞小鼎, 王迪, 等, 2022. 河套地区典型干线的形成及其在对流触发中的作用[J]. *气象学报*, 80(1): 39-53. Zhang Y P, Yu X D, Wang D, et al, 2022. The formation of typical dry lines in Hetao and its role in triggering convection[J]. *Acta Meteor Sin*, 80(1): 39-53 (in Chinese).
- 郑永光, 张春喜, 陈炯, 等, 2007. 用 NCEP 资料分析华北暖季对流性天气的气候背景[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 43(5): 600-608. Zheng Y G, Zhang C X, Chen J, et al, 2007. Climatic background of warm-season convective weather in North China based on the NCEP analysis[J]. *Acta Sci Nat Univ Pekinensis*, 43(5): 600-608 (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).
- Behrendt A, Pal S, Aoshima F, et al, 2011. Observation of convection initiation processes with a suite of state-of-the-art research instruments during COPS IOP 8b[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 137(S1): 81-100.
- Cai H Q, Lee W C, Weckwerth T M, et al, 2006. Observations of the 11 June dryline during IHOP_2002—a null case for convection initiation[J]. *Mon Wea Rev*, 134(1): 336-354.
- Doswell III C A, 1987. The distinction between large-scale and meso-scale contribution to severe convection: a case study example[J]. *Wea Forecasting*, 2(1): 3-16.
- Doswell III C A, 2001. *Severe Convective Storms* [M]. Boston: Springer: 1-26.
- Huang Y P, Meng Z Y, Li W B, et al, 2019. General features of radar-observed boundary layer convergence lines and their associated convection over a sharp vegetation-contrast area[J]. *Geophys Res Lett*, 46(5): 2865-2873.
- Liu H J, Meng Z Y, Zhu Y N, et al, 2023. Convection initiation associated with a boundary layer convergence line over a real-world sharp vegetation-contrast area[J]. *Mon Wea Rev*, 151(5): 1189-1212.
- Meng Z Y, Meng X F, Wang C G, et al, 2024. Desert-oasis Convergence line and Deep convection Experiment (DECODE)[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 105(12): 2355-2384.
- Mueller C K, Carbone R E, 1987. Dynamics of a thunderstorm outflow[J]. *J Atmos Sci*, 44(15): 1879-1898.
- Pielke R A, 2001. Influence of the spatial distribution of vegetation and soils on the prediction of cumulus convective rainfall[J]. *Rev Geophys*, 39(2): 151-177.
- Richter H, Bosart L F, 2002. The suppression of deep moist convection near the southern Great Plains dryline[J]. *Mon Wea Rev*, 130(7): 1665-1691.
- Taylor C M, 2015. Detecting soil moisture impacts on convective initiation in Europe[J]. *Geophys Res Lett*, 42(11): 4631-4638.
- Wakimoto R M, Murphey H V, 2010. Analysis of convergence boundaries observed during IHOP_2002[J]. *Mon Wea Rev*, 138(7): 2737-2760.
- Weckwerth T M, Wilson J W, Wakimoto R M, et al, 1997. Horizontal convective rolls: determining the environmental conditions supporting their existence and characteristics[J]. *Mon Wea Rev*, 125(4): 505-526.

(本文责编:张芳)