

河套地区一次短时强降水过程诊断分析

易慧¹, 刘娟², 李梦雨³, 向瑶⁴

¹湘阴县气象局, 湖南 岳阳

²宜章县气象局, 湖南 郴州

³鄂尔多斯伊金霍洛国际机场有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯

⁴华容县气象局, 湖南 岳阳

收稿日期: 2023年3月13日; 录用日期: 2023年5月23日; 发布日期: 2023年5月31日

摘要

本文利用自动站实况降水观测资料、风云2号卫星资料及美国气象环境预报中心(NCEP)提供的FNL再分析资料, 对2013年7月7日河套地区短时强降水的形成、发展过程进行了分析, 结果表明: 此次过程中, 环流形势场上, 本次过程是西风带槽脊与副热带系统相互作用导致。副高偏北, 贝加尔湖南部至河套南部为宽广槽区, 南部阶梯槽为前倾结构, 低层存在风场切变线, 且700 hPa上的西南低空急流为降水区输送大量的暖湿气流。副高西伸北抬, 南北方形成阶梯槽, 配合弱冷空气南下, 低层风场出现辐合, 是造成本次强对流过程的主要影响系统。水汽通量输送中心和水汽通量散度辐合中心几乎叠置, 动量下传促使低空急流形成, 显著的差动平流, 不稳定能量的大量积聚、地形和地面中尺度辐合线对能量的出发作用为本次短时强降水过程提供了水汽、动力、热力和不稳定条件。

关键词

短时强降水, 河套地区, 环流形势, 水汽辐合, 不稳定能量

Diagnostic Analysis of a Short-Time Heavy Rainfall Process in Hetao Area

Hui Yi¹, Juan Liu², Mengyu Li³, Yao Xiang⁴

¹Xiangyin County Meteorological Bureau, Yueyang Hunan

²Yizhang County Meteorological Bureau, Chenzhou Hunan

³Ordos Yijinhuoluo International Airport Co., Ltd., Ordos Inner Mongolia

⁴Huarong County Meteorological Bureau, Yueyang Hunan

Received: Mar. 13th, 2023; accepted: May 23rd, 2023; published: May 31st, 2023

Abstract

In this paper, the formation and development process of the short-term strong precipitation in

文章引用: 易慧, 刘娟, 李梦雨, 向瑶. 河套地区一次短时强降水过程诊断分析[J]. 自然科学, 2023, 11(3): 496-505.

DOI: 10.12677/ojns.2023.113059

Hetao region on 7th July, 2013 are analyzed by using the real-time precipitation observation data of the automatic station, the Fengyun 2 satellite data and the FNL reanalysis data provided by the United States Meteorological Environment Prediction Center (NCEP). The results show that: in this process, in the circulation situation field, this process is caused by the interaction between the trough ridge of the westerlies and the subtropical system. The subtropical high is to the north, the southern part of Baikal to the southern part of Hetao is a wide trough area, the southern step trough is a forward-dipping structure, there is a wind field shear line at the lower level, and the southwest low-level jet at 700 hPa delivers a large amount of warm and humid air for the precipitation area. The subtropical high extends to the west and lifts to the north, forms a stepped trough in the south and the north, cooperates with the weak cold air to the south, and the low-level wind field converges, which is the main influence system of this strong convection process. The water vapor flux transfer center and the water vapor flux divergence convergence center are almost superimposed. The momentum downward transfer promotes the formation of the low-level jet, the significant differential advection, the massive accumulation of unstable energy, and the starting effect of the terrain and the surface mesoscale convergence line on the energy provide the water vapor, power, heat and unstable conditions for this short-term strong precipitation process.

Keywords

Short-Time Heavy Rainfall, Hetao Area, Circulation Situation, Water Vapor Convergence, Unstable Energy

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

短时强降水是内蒙古地区夏季主要的灾害性天气之一，内蒙古地域辽阔，沙漠高原相间分布，气象观测站点相对较为稀疏，而暴雨具有持续时间短、强度大、局地性强的特征，极易引发洪水、滑坡、泥石流等气象衍生灾害，具有很强的危害性，预报短时强降水的形成和发展成为内蒙古地区气象预报的重点和难点。

夏季的极端降水事件是内蒙古地区的常见灾害性天气之一，对内蒙古地区短时强降水的洪涝灾害时空变化特征[1][2]、不同季节短时强降水的形成机制分析[3][4]等前人已做过一定的探讨。陶健红等[5]对河西走廊特定地域下暴雨的发生发展机理进行了分析，发现对流层中层形成的异常偏东气流为河西走廊西部暴雨的形成提供了较强烈的水汽输送，且受高原低涡及其前部弱高压脊的共同影响，将来自孟加拉湾的暖湿气流，不断输送至河西走廊以西地区，贡献于该地区的水汽辐合。孙尚瑜[6]对2016年8月16~18日巴彦淖尔市南部的极端降水过程进行了分析，发现此次暴雨天气的高空环流形势为：在200 hPa高空急流入口区右侧出现辐散、在700 hPa低空急流出口区左侧出现辐合、在500 hPa副热带高压外围存在短波槽东移以及在700 hPa存在暖湿切变为暴雨提供了较好的水汽以及动力条件配合。

国内外的众多气象工作者们已经就短时强降水产生的基本条件、影响暴雨形成的不同尺度中的天气系统、产生暴雨的动力机制等不同方面，对发生于全球范围内的众多暴雨个例进行了详尽的分析研究，得到了大量有意义的研究成果，从而进一步提升了人们对于暴雨的认知水平和预报能力[7][8][9][10]。然而，由于短时强降水天气的突发性强，强度大，以及影响因子众多的特性，仍有诸多科学问题亟待解决，我们仍需对短时强降水做更多深入的探究。本文通过对多普勒天气雷达、卫星云图以及地面降水等

观测资料的分析,对2013年7月7日河套地区的一次短时强降水过程进行了诊断分析,以期对短时强降水过程建立更深入、全面的认识,防御和减轻旱涝所带来的灾害。

2. 资料与方法

2.1. 资料介绍

本文利用2013年7月6~7日的三套资料:

1) 高空、地面环流资料选自NCEP/NCAR FNL再分析资料,来自全球资料同化系统(GDAS),观测时次为每日的02时、08时、14时、20时(北京时间),其水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,垂直分辨率为26层,其中包括位势高度场、风场、湿度、温度等。

2) 降水资料为内蒙古自治区气象信息中心的整编资料,选取2013年7月6~7日内蒙古自治区河套地区(乌海市、巴彦淖尔市、鄂尔多斯市、包头市、呼和浩特市)国家级和区域级的自动气象观测站作为分析台站。

3) FY-2E卫星云图资料。

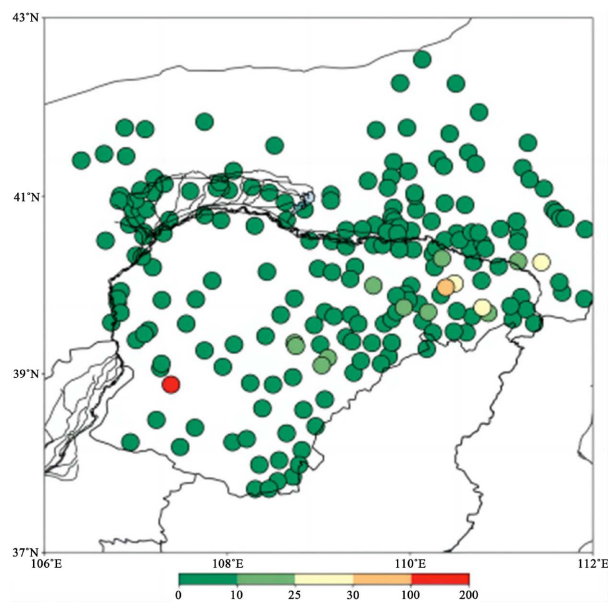
另外,全文中的时次如无特别说明,均为北京时间。

2.2. 方法

本文利用的主要方法为天气学分析法,对河套地区此次短时强降水天气过程中的环流背景和主要影响系统、强降水发生前后其影响区域的动力、热力、水汽等物理演变特征进行天气学诊断分析,旨在为作好该地区强降水天气的短临天气预报预警和气象服务工作提供分析依据。

3. 天气过程

2013年7月6~7日,内蒙古河套地区出现了一次短时强降水过程,最大24小时累积降雨量出现在鄂尔多斯市鄂托克旗,为124.2 mm,达到大暴雨量级(图1(a))。主要降水时段发生在7日19时,最大单小时降水量出现在鄂尔多斯市鄂托克旗,达到96.6 mm(图1(b)),且河套地区多站出现超过5级的对流性雷暴大风或者地面气旋大风,最大风速出现在鄂托克旗,超过18 m/s。



(a)

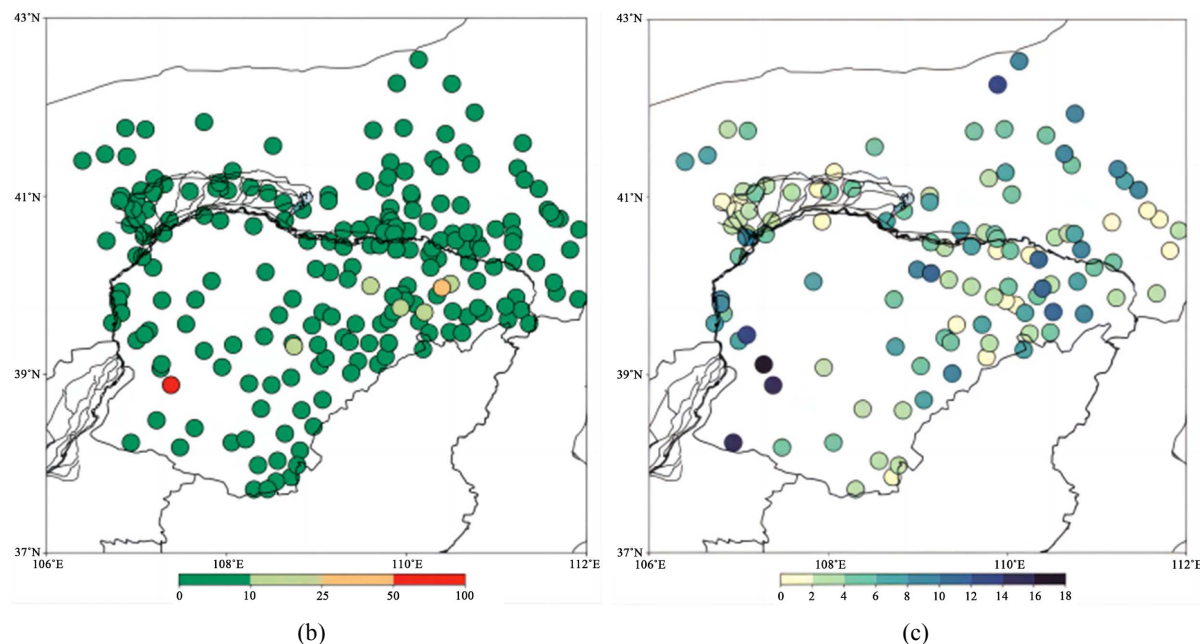


Figure 1. Distribution of stations of (a) 24 hours of accumulated rainfall from 20:00, 6th to the 7th; (b) 1 hour of rainfall at 19:00, 7th (unit: mm); (c) surface wind speed at 19:00, 7th (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) in Hetao area, Inner Mongolia on July, 2013

图 1. 内蒙古河套地区 2013 年 7 月; (a) 6 日~7 日 20 时 24 h 累计降雨量; (b) 7 日 19 时 1 小时降雨量(单位: mm); (c) 7 日 19 时地面风速(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)站点分布

4. 环流背景

强对流天气往往是由中尺度系统导致的, 常发生在一定的大尺度形势背景下。2013 年 7 月 7 日 08 时环流形势场上(图 2), 此次暴雨发生在副热带高压(以下简称副高)稳定少动且位置比较偏北的环流背景下, 内蒙古中西部地区位于副高边缘 584 dagpm 线附近。

中高纬度为两脊一槽形势, 贝加尔湖南部至河套南部为宽广槽区, 该低槽以 40°N 附近为界分为两部分, 北槽自贝加尔湖南部伸向河套西北部的海力素, 南槽位于河套地区东南部, 自河曲经延安伸向达川一线, 南、北两槽呈阶梯型分布, 北槽明显落后于南槽。700 hPa 高空图上, 北槽和 500 hPa 槽线比较接近, 南槽落后于 500 hPa 槽线。850 hPa 上, 风场切变线位于河套地区西南部。高、中、低层系统综合来看, 南槽在河套地区为明显的前倾配置, 有利于不稳定层结的建立。同时, 副高的加强西伸, 既阻碍了北部槽线的移动, 又促使西南气流加强, 为降水区输送大量的暖湿气流。河套地区北部在 700 hPa 上有显著的西南急流输送, 中心区域风速超过 18 m/s , 对应着较强的水汽输送, 为本次强对流天气的发生、发生在环流背景场上提供了水汽条件。高空环流形势分析表明, 副高西伸北抬, 南北方形形成阶梯槽, 配合弱冷空气南下, 低层风场出现辐合, 是造成本次强对流过程的主要影响系统。

地面图上(图 3), 蒙古气旋中心位于呼伦贝尔市西部, 中心气压为 992.5 hPa, 锋面位于内蒙古东北部至河套地区一线, 气旋底部偏西风 and 沿海高压后部偏南风在河套形成汇合(辐合)流场, 其西侧存在高压中心, 锋后等压线密集, 气压梯度较大, 产生较强的变压风, 在高压前侧气压梯度密集, 形成明显梯度风。

5. 强对流天气成因

5.1. 充沛的水汽

对 7 月 7 日 08 时和 14 时比湿和水汽通量散度沿 38.88°N 短时强降水中心鄂尔多斯市鄂托克旗(38.88°N , 107.38°E)剖面分析(图 4)可知, 低层水汽较为充沛, 08 时(图 4(a)), 鄂托克旗附近的比湿超过 $16 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,

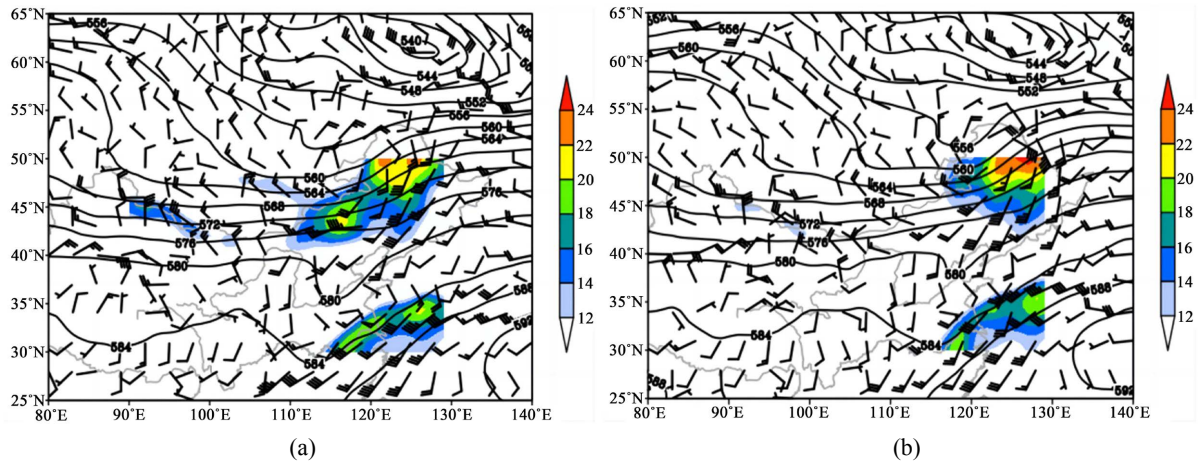


Figure 2. Geopotential height field at 500 hPa (black solid line, unit: dagpm), wind field (wind plume) and low-level jet (wind speed $\geq 12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, color filling, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) 700 hPa at (a) 08:00; (b) 14:00 on 7th July, 2013

图 2. 2013 年 7 月 7 日(a) 08 时; (b) 14 时 500 hPa 位势高度场(黑色实线, 单位: dagpm)、700 hPa 风场(风羽)以及 700 hPa 低空急流(风速 $\geq 12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 填色, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

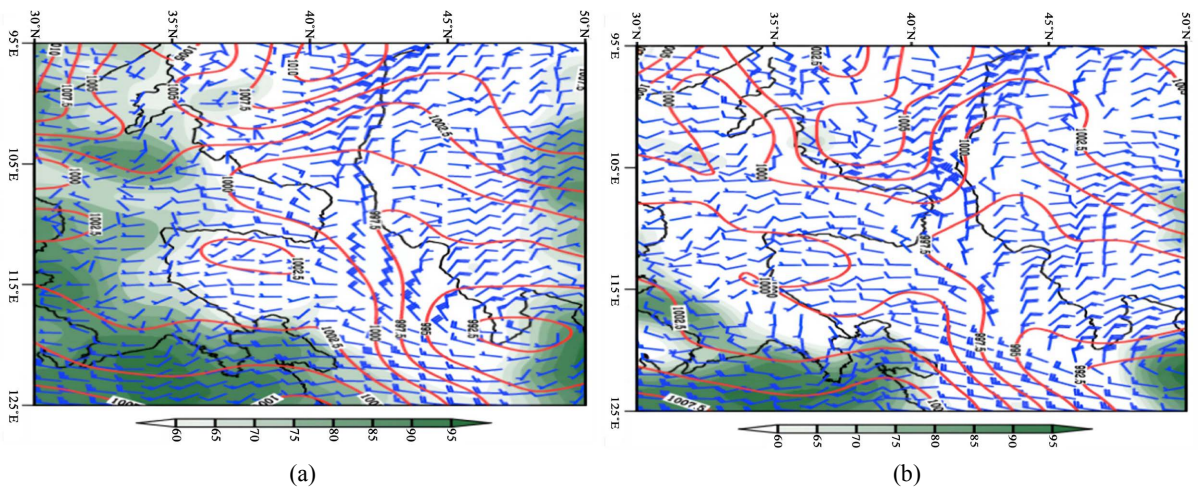


Figure 3. Surface pressure field (red solid line, unit: hPa), 10 m wind field (wind plume, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and 2 m relative humidity (unit: %) at 08:00; (b) 14:00 on 7th July, 2013

图 3. 2013 年 7 月 7 日(a) 08 时; (b) 14 时地面气压场(红色实线, 单位: hPa)、10 m 风场(风羽, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)以及 2 m 相对湿度(单位: %)

大于 $8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的比湿大值区发展至 700 hPa; 局地水汽是有限的, 暴雨的产生必须有来自暴雨区外水汽补充(或供应), 而水汽通量及其散度辐合可表征外地水汽对雨区内水汽的补充(陶祖铤, 2011); 在此次时强降雨中心(107°N 附近)水汽通量散度垂直辐合较为深厚, 上升至 600 hPa, 而高层 500~600 hPa 为水汽通量散度辐散, 中低层水汽强烈辐合, 高层水汽辐散, 水汽通量输送中心和水汽通量散度辐合中心几乎叠置, 两者的共同作用有利于短时强降水产生。

降水过程的发生发展与云的结构以及云系演变过程有着直接的关系。由 7 日 07 时红外云图(图 5)分析可知, 河套地区上空出现斜压叶状云系, 大气斜压性较强, 云系上存在若干对流云团, 其分布较密集, 在地面场形成小降水中心(图 1(a))。同时, 河套地区处于东北地区逗点云系后部, 有沿西北气流南下的冷气团侵入, 与南部气流在河套地区附近汇合, 并造成地面的带状降水分布。

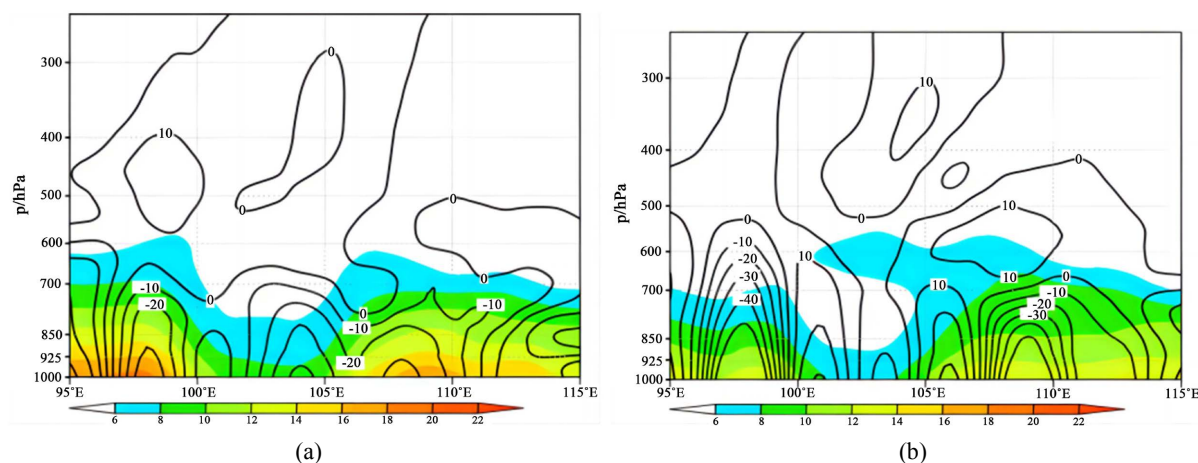


Figure 4. Specific humidity (shadow, unit: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), water vapor and dispersion (black line, unit: $\times 10^{-6} \text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}$) along 38.88°N profile at (a) 08:00; (b) 14:00 on 7th July, 2013

图 4. 2013 年 7 月 7 日(a) 08 时; (b) 14 时比湿(阴影, 单位: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)及水汽及其散度(黑线, 单位: $\times 10^{-6} \text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}$)沿 38.88°N 剖面

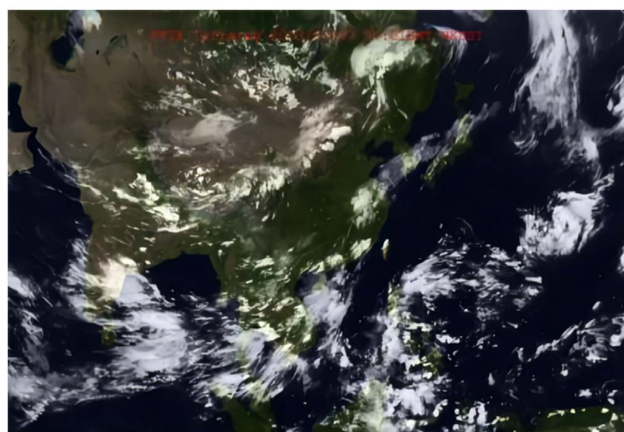


Figure 5. Infrared cloud image distribution at 07:00, 7th July, 2013

图 5. 2013 年 7 月 7 日 07 时红外云图分布

5.2. 大尺度上升运动

继续沿鄂托克旗所在纬度(38.88°N)作经向风速和垂直环流(u, ω)的垂直剖面(图 6), 可以看到, 7 日 08 时(图 6(a)), $105^\circ\sim 115^\circ\text{E}$ 区域上 $925\sim 400 \text{hPa}$ 间存在一个垂直环流圈, 即次级环流, 环流的上升支位于 106°E 附近, 即位于河套地区, 下沉支则位于 113°E 附近; 7 日 14 时(图 6(b)), 垂直环流圈持续维持, 鄂托克旗附近的上升支最高至 500hPa , 高层 110°E 附近对流层中上层的垂直环流下沉支从高空急流区出口处下沉, 不断将高空强风速下传至中下层, 有明显的动量下传过程, 促进低空急流形成, 上升-下沉运动的交替出现不断导致干冷和暖湿气流交汇, 使强对流天气维持和发展。

从温度平流的剖面, 可看出, 7 日 8 时(图 6(a)), $100^\circ\sim 110^\circ\text{E}$ 区域上空低层受冷平流控制, 14 时(图 6(b))低层 850hPa 附近出现强冷平流中心, 强度地区 $-16 \times 10^{-3} \text{C}\cdot\text{s}^{-1}$, 高层为较强的暖平流, 差动平流有利于不稳定能量的增长; 且午后较强的太阳辐射使地面气温迅速增加, 其近地面加热、中低层冷却的结构导致了大气层结不稳定[11], 地表感热通量增大及中低层上空存在冷平流有利于增强大气层结不稳定性及垂直方向的湍流运动, 助于强对流天气的发生、发展。

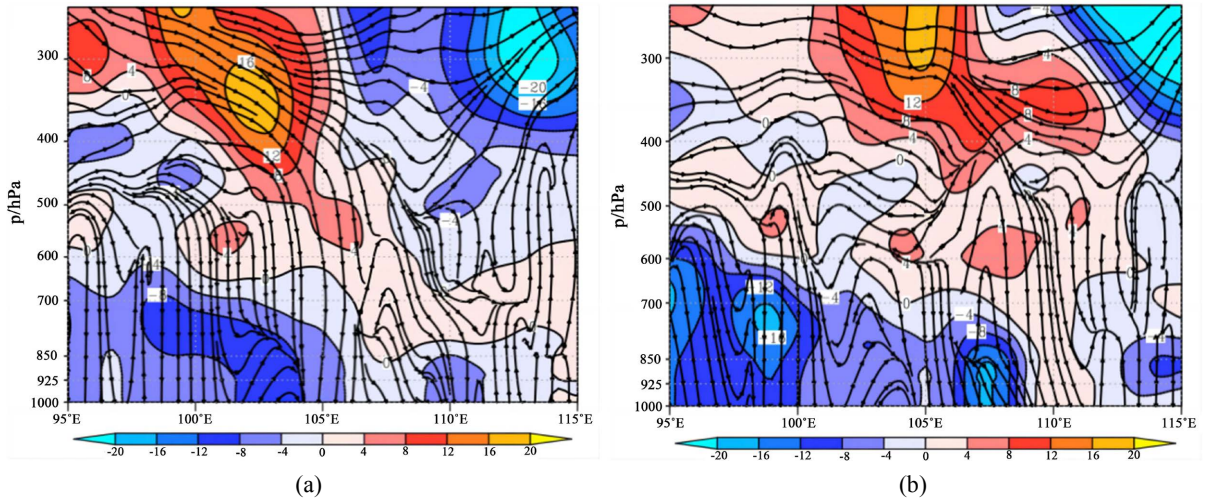


Figure 6. Temperature advection (shadow, unit: $10^{-3} \text{C}\cdot\text{s}^{-1}$) and zonal wind and vertical motion (u, ω) Vector composite wind field (vector, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) along 38.88°N profile at (a) 08:00; (b) 14:00 on 7th July, 2013

图 6. 2013 年 7 月 7 日(a) 08 时; (b) 14 时温度平流(阴影, 单位: $10^{-3} \text{C}\cdot\text{s}^{-1}$)及纬向风与垂直运动(u, ω)的矢量合成风场(矢量, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)沿 38.88°N 剖面

5.3. 垂直不稳定层结以及触发条件

可供释放的对流不稳定能量的大小是降水强弱的潜在量度, 而 K 指数是表征大气热力不稳定度的常用指数。由图 7 可知, 7 日 08 时(图 7(a)), 超过 35 的 K 指数大值区位于河套地区西南部, 中心区域超过 45; 至 7 日 14 时(图 7(b)), 大气层结不稳定性进一步加强, 河套地区出现东北西南向的带状 K 指数大值区, 中心位于黄河“几”字湾东北侧, 中心数值超过 40; 此外, 图 7 中还表征了 850 hPa~500 hPa 之间的温度差, 随 K 指数的增加, 温度差也增大, 这表明在垂直方向上的湍流运动增强, 为短时强降水的形成与发展进一步提供了热力不稳定条件。

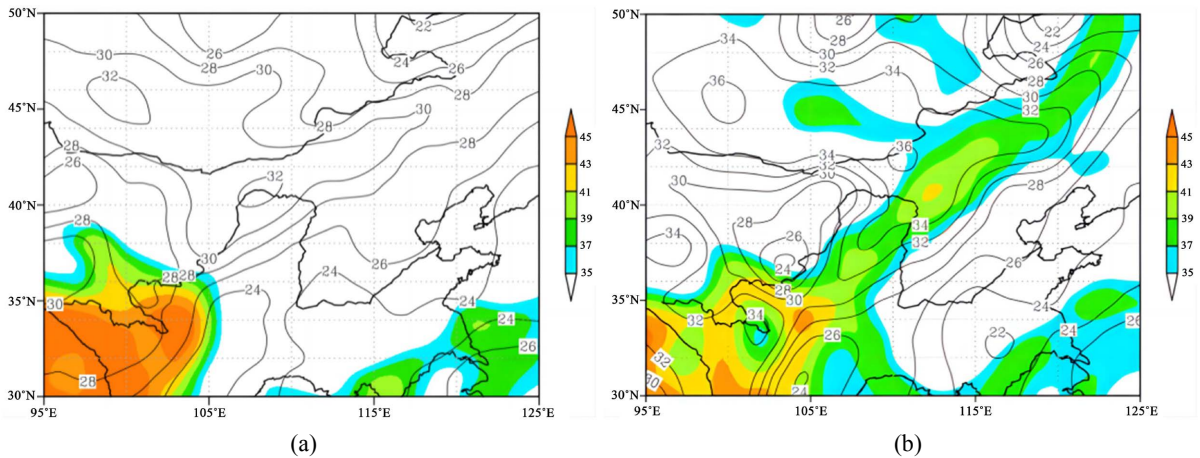


Figure 7. K index (shadow) and vertical temperature difference between 850 hPa and 500 hPa (isoline, unit: $^\circ\text{C}$) at (a) 08:00; (b) 14:00 on 7th July, 2013

图 7. 2013 年 7 月 7 日(a) 08 时; (b) 14 时 K 指数(阴影)及 850 hPa 与 500 hPa 垂直温度差(等值线, 单位: $^\circ\text{C}$)

假相当位温(θ_{se})是表征大气温度和湿度特征的物理量, 在对流层中, θ_{se} 的数值越高, 代表着对应的区域温度和湿度越高[11]。在短时强降水过程发生前, 河套地区持续高温, 前期的高温导致该地区近地层

的高能存在。由图 4 可知，外围和南侧的阶梯槽不断将水汽输送到河套地区，北槽后的西北气流加强了南北温差，在河套地区形成了冷的温度槽，干冷气流与南上的暖湿气流在河套地区汇集，使得不稳定能量积聚。7 日 08 时(图 8(a))，河套地区以南地区存在明显的假相当位温大值区，不断将能量向北传送，在鄂托克旗附近存在偏南风 and 偏北风切变，并在 14 时(图 8(b))切变加强，风场和高能区在河套地区的配合为短时强降水的发生提供了不稳定能量条件。

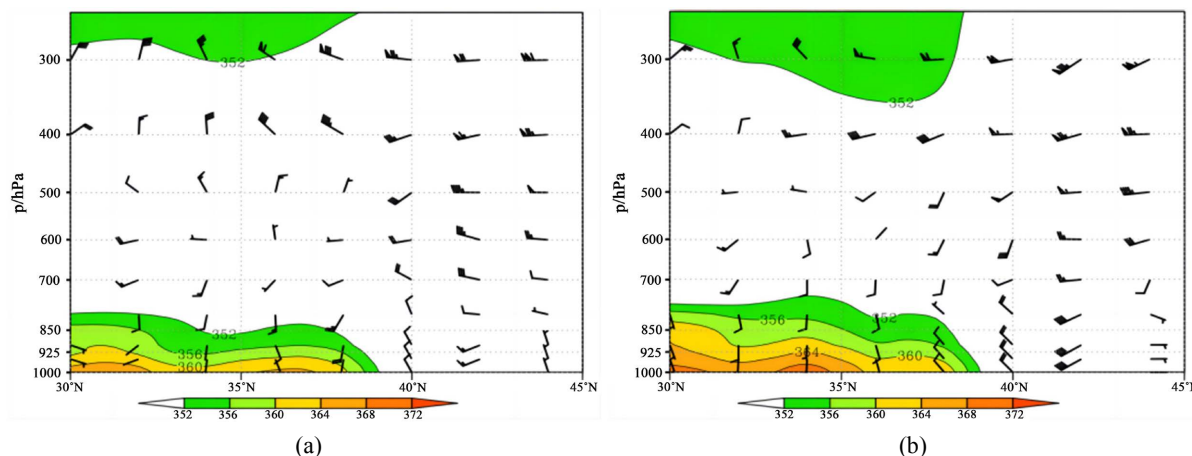


Figure 8. The false equivalent potential temperature (shadow, unit: K) and the combination of u, v wind vectors (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) along 107.38°N profile at 08:00; (b) 14:00 on 7th July, 2013

图 8. 2013 年 7 月 7 日(a) 08 时; (b) 14 时假相当位温(阴影, 单位: K)及 u, v 风矢量合成(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)沿 107.38°N 剖面

中国暴雨与地形常具有密切联系[12] [13] [14] [15] [16]，它主要取决于低空风场和地形之间的配置[17]，另一方面，地形与风场相互作用也对强对流触发有重要作用[18]，本次短时强降水过程和东西向阴山山脉特殊地形密切相关。

从 7 日 08 时 925 hPa 风场、850 hPa 散度和地形的配置(图 9)中可以看出，08 时(图 9(a)-(b))，阴山西北侧有散度辐散中心，阴山西南侧有散度辐合中心和 $\geq 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 超低空西南急流，且有明显风速辐合区，散度辐合区和风速辐合区基本重合，有利于阴山南麓迎风坡风速的进一步增强。阴山南麓的低层西南暖湿气流在上升运动过程中受东西方向阴山山脉地形的阻挡而强迫抬升，地形强迫抬升有利于对流在阴山南麓的触发和组织，同时低空急流不断输送丰富水汽和不稳定能量也有利于对流环境重建和维持。辐散和辐合中心之间有明显的东西向散度梯度密集区，散度梯度密集区同阴山山脉南麓几乎重合，进一步激发和加强了阴山南麓迎风坡的作用，本次的短时强降水过程就发生在阴山南麓的散度梯度密集区内。良好的系统配置，充沛的水汽，强的上升运动，较长的持续时间以及一定的地形作用，是此次河北暴雨过程的成因。

6. 结论

本文利用多源实况及再分析资料对 2013 年 7 月 7 日河套地区短时强降水的形成、发展过程进行了分析，结果表明：

1) 此次过程中，最大 24 小时累积降雨量出现在鄂尔多斯市鄂托克旗，为 124.2 mm，达到大暴雨量级，主要降水时段发生在 7 日 19 时，鄂托克旗最大单小时降水量达到 96.6 mm，且河套地区多站出现超过 5 级的对流性雷暴大风或者地面气旋大风。

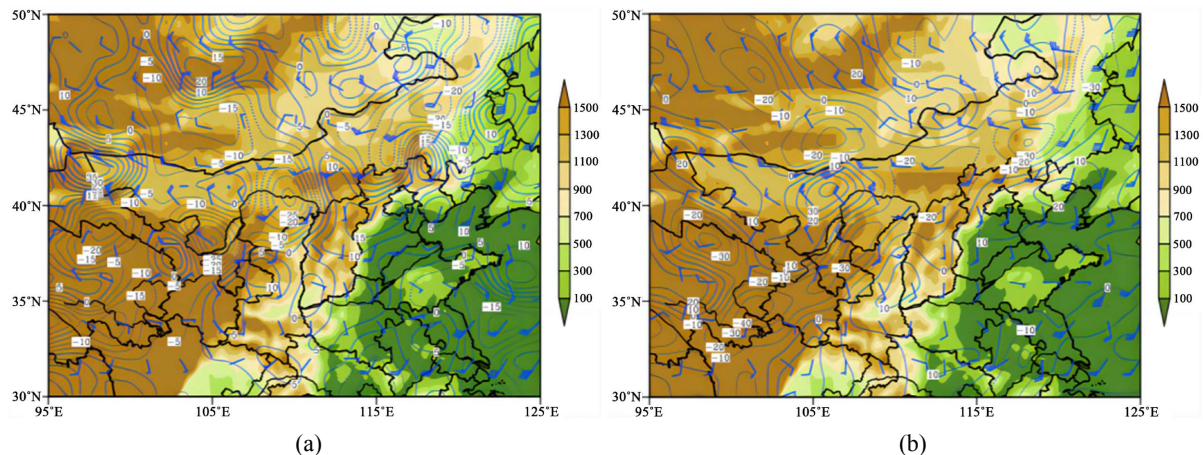


Figure 9. Altitude (shadow, unit: m), divergence field at 850 hPa divergence field (isoline, unit: $\times 10^{-6} \text{s}^{-1}$) and 925 hPa wind farms (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) (a) 08:00 on July 7, 2013; (b) 14:00 on July 7, 2013

图 9. 2013 年 7 月 7 日 (a) 08 时; (b) 14 时海拔高度(阴影, 单位: m)、850 hPa 散度场(等值线, 单位: $\times 10^{-6} \text{s}^{-1}$)及 925 hPa 风场(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) (a) 2013 年 7 月 7 日 08 时; (b) 2013 年 7 月 7 日 14 时

2) 环流形势场上, 本次过程是西风带槽脊与副热带系统相互作用导致。副高偏北, 贝加尔湖南部至河套南部为宽广槽区, 南部阶梯槽为前倾结构, 低层存在风场切变线, 且 700 hPa 上的西南低空急流为降水区输送大量的暖湿气流。副高西伸北抬, 南北方形成阶梯槽, 配合弱冷空气南下, 低层风场出现辐合, 是造成本次强对流的的主要影响系统。

3) 此次过程中, 水汽通量输送中心和水汽通量散度辐合中心几乎叠置, 动量下传促使低空急流形成, 显著的差动平流, 不稳定能量的大量积聚、地形和地面中尺度辐合线对能量的出发作用为本次短时强降水过程提供了水汽、动力、热力和不稳定条件。

参考文献

- [1] 李丹, 李云鹏, 刘朋涛. 内蒙古近 30a 气象灾害时空变化特征[J]. 干旱气象, 2016(4): 663-669.
- [2] 李喜仓, 白美兰, 杨晶, 等. 基于 GIS 技术的内蒙古地区暴雨洪涝灾害风险区划及评估研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(7): 71-77.
- [3] 常煜, 李秀娟, 陈超, 等. 内蒙古一次暴雨过程中尺度特征及成因分析[J]. 高原气象, 2016, 35(2): 432-443.
- [4] 韩经纬, 吴学宏, 宋桂英, 等. 2006 年春季内蒙古久旱转雨过程分析[J]. 气象科学, 2009, 29(2): 2235-2240.
- [5] 陶健红, 孔祥伟, 刘新伟. 河西走廊西部两次极端暴雨事件水汽特征分析[J]. 高原气象, 2016, 35(1): 107-117.
- [6] 孙尚瑜. 2016 年 8 月 16-18 日巴彦淖尔市局地大暴雨诊断分析[J]. 现代农业科技, 2018(10): 234-242.
- [7] 陶诗言. 中国之暴雨[M]. 北京: 气象出版社, 1980: 13-24.
- [8] 纪晓玲, 桑建人, 马筛艳, 等. 贺兰山东麓宁夏一次极值暴雨过程分析[J]. 气象科学, 2010, 30(3): 332-337.
- [9] 高梦竹, 张月, 陈雪. 一次东北冷涡暴雨成因分析[J]. 科学技术创新, 2019(35): 35-36.
- [10] 李杰, 宋歌, 张薇, 等. 2014 年 9 月 1-3 日北京市房山区局地暴雨天气过程分析[J]. 现代农业科技, 2018(12): 196-197.
- [11] 王若男, 刘宁微, 马林, 等. 辽宁中部地区持续性污染的天气分型[J]. 大气科学学报, 2018, 41(4): 533-540.
- [12] 刘蕾, 张凌云, 李家文. 中尺度地形对柳州一次大暴雨过程影响的数值试验[J]. 暴雨灾害, 2015, 34(1): 74-79.
- [13] 赵玉春, 许小峰, 崔春光. 中尺度地形对梅雨锋暴雨影响的个例研究[J]. 高原气象, 2012, 31(5): 1268-1282.
- [14] 张芹, 王洪明, 张秀珍, 等. 2017 年山东雨季首场暖区暴雨的特征分析[J]. 高原气象, 2018, 37(6): 1696-1704.
- [15] 王华, 李宏宇, 仲跻芹, 等. 京津冀一次罕见的双雨带暴雨过程成因分析[J]. 高原气象, 2019, 38(4): 856-871.
- [16] 韩国泳, 李兰兰, 荆涛, 等. 鲁中山区一次漏报的强对流天气过程中地形触发作用分析[J]. 干旱气象, 2016,

34(3): 540-546.

[17] 陶祖钰. 基础理论与预报实践[J]. 气象, 2011, 37(2): 129-135.

[18] 孙军, 谌芸, 杨舒楠, 等. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(二)极端性降水成因初探及思考[J]. 气象, 2012, 38(10): 1267-1277.