文章编号：2096-1618(2022)06-0709-07

陇东局地地形对庆阳暴雨影响的定性分析

赵玉娟， 张洪芬， 张可心， 柳东慧
(庆阳市气象局，甘肃 庆阳 745000)

摘要：为研究陇东局地地形对庆阳暴雨的影响，利用 2013-2020 年汛期庆阳市 206 个气象站点的日降水资料及地面填图资料，对暴雨的时空特征进行分析，重点针对局地地形对暴雨的影响进行研究。结果表明：2013-2020 年暴雨频次呈波动状增加趋势，主要集中在 7 月下旬及 8 月上旬；暴雨出现频次多、降水极值较大的区域均出现在庆阳市中部；陇东局地地形对暴雨影响效应主要有地形坡强迫抬升，“喇叭口”地形、川道地形的辐合作用等，庆阳市产生的极端强降水均受多种地形效应共同影响；冷槽东移型暴雨主要受地形梁、沟及河流的作用及子午岭西坡地形坡抬升及阻挡作用；偏南型暴雨主要受地形沟、“喇叭口”地形的辐合及子午岭地形迎风坡的强迫抬升效应。

关 键 词：气象学；灾害性天气；暴雨；陇东；局地地形
中图分类号：P458.1+2.1　　**文献标志码**：A
doi：10.16836/j.cnki.jcuit.2022.06.014

0 引言

暴雨是中国主要的气象灾害之一，也是灾害性天气预报研究的重点，尤其是受地形影响的暴雨预报更重要，地形的复杂性及起伏多变成为暴雨预报的难点[1]。地形对暴雨的影响作用较复杂，主要分为动力、热力、云微物理过程[2]。随着各地地形降水观测实验的开展，以及高分辨数值模拟的发展，地形对暴雨的影响研究有了很大的进步[3]。主要集中在地形对暴雨的影响、物理机制及估算方法等的研究[4]，通过深入研究建立降水与地形、海拔高度及地区气候条件的数学模式[5]，概括地气过山时地形降水的主要动力效应[6]，分析地形对不同尺度及对流性天气系统降水的影响。通过探讨湿气流过山脉地形降水的机制，发现小山脉地形降水发生在迎风坡[7]，并指出对流降水在迎风坡为浅对流，而在背风坡为深对流，这时降水主要由山脉的热力效应产生，降水的强度在背风坡也强于迎风坡[8]。喇叭口地形主要增加了抬升处的垂直速度及低层辐合[11-12]，山地地形的迎风坡与喇叭口地形相结合时，其抬升作用比单纯的迎风坡地形及喇叭口地形强，增幅程度随喇叭口开放度增大而增大[9-10]。通过探讨地形走向与风向交角的关系，指出当暖湿气流与地形坡交角较大时，对流旺盛，易形成迎风坡降水中心[13]。深入研究得出了凝结函数法及水汽收支法两种雨量增幅法[14]。中国主要地形分为 3 类，分别是以爬流为主满足准地转平衡或者不满足准地转平衡及以绕流为主的运动多满足准地转平衡[15]。针对中国各大区内的主要山脉地形对降水的影响研究较多[16-18]，西北地区地形对降水的影响研究主要集中在祁连山[19-20]、贺兰山[21-23]、秦岭[24-26]、六盘山[27-28]等大型山脉，而陇东复杂地形对暴雨的影响研究甚少，本文利用气象观测资料，分析庆阳暴雨特征，重点探讨陇东局地地形对暴雨的影响。

庆阳市属黄河中游黄土高原沟壑区，东倚子午岭，北靠羊圈山，西接六盘山，东、西、北三面隆起，中南部低缓，北部马家大山最高为2089 m，南部政平河滩最低为885 m。其土质疏松，地质环境极其脆弱，滑坡、泥石流和土壤侵蚀等次生地质灾害频发。近年来，庆阳市多次出现由暴雨引发的洪涝灾害，造成较大的经济损失甚至人员伤亡。为给地方政府防灾减灾工作提供科学依据，及时有效防范暴雨诱发灾害带来的经济损失及人员伤亡，在智能网格预报业务中更加准确把握暴雨的落区及强度，深究导致暴雨产生的原因非常关键。为此利用气象观测资料，详细分析庆阳市暴雨的特征，深入研究其规律性，尤其是特殊地形对暴雨的影响规律，探索智能网格暴雨预报的订正方法，以提高其准确性，具有科学的研究意义。

1 资料与方法

降水资料选取庆阳市 206 个国家、区域自动气象站，2013-2020 年汛期(6-8 月)日观测降水量，资料来源于 CIMISS 气象数据统一服务器；地面观测资料为 1 h地面填图资料。暴雨个例选取，按甘肃河东降水等级标准，24 h(08:00-08:00)降水量≥50 mm计为一次暴雨过程。

收稿日期：2021-11-30
基金项目：甘肃省气象局气象科研资助项目(Ms2022-09)；甘肃省气象局气象科技资助项目(人才专项)(2122rczx-青年优秀科技人才-04)

2 暴雨特征分析

2.1 时间特征

2.1.1 暴雨频次年分布

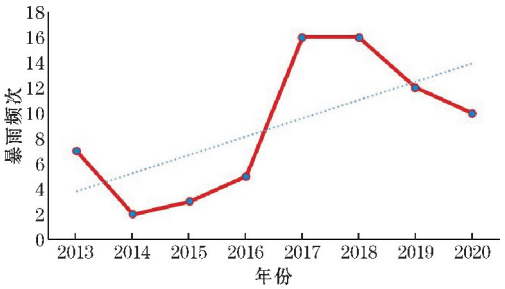


图 1 暴雨频次逐年变化

分析 2013-2020 年暴雨频次年变化(图 1),可以看出,庆阳市暴雨频次整体呈增多趋势,其中 2017 年、2018 年出现的频次最多(16 次),增加最明显,这主要是受气候原因的影响。2017 年 7-8 月北半球副热带高压强度偏强、位置偏西,中国平均温度较常年偏高,8 月全国平均降水较常年偏多 20%[29-30]。2018 年 7 月年西太平洋副热带高压强度较常年明显偏强,位置较常年明显偏北,8 月亚欧洲大陆中高纬为多波型,西北太平洋副热带高压西脊点偏西,且 7、8 月全国平均气温较常年均偏高,降水较常年均偏多[31-32]。

2.1.2 暴雨频次月分布

从 2013-2020 年逐年逐月暴雨发生的频次变化(图 2)可以看出,8 月发生的频次最多,达 35 次;其次是 7 月,29 次;6 月较少,16 次。2013 年 7 月发生暴雨的频次最多,其次是 8 月,6 月最少。2014 年 7 月、8 月均发生 1 次暴雨,6 月没有暴雨。2015 年 8 月发生的频次最多,7 月次之,6 月没有暴雨。2017 年、2018 年、2020 年 8 月暴雨发生的频次最多,7 月次之,6 月最少。2019 年 7 月、8 月发生暴雨的频次相当,6 月最少。

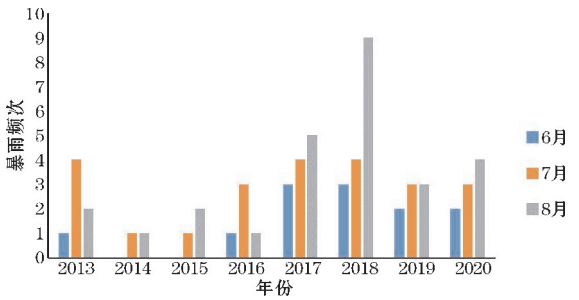
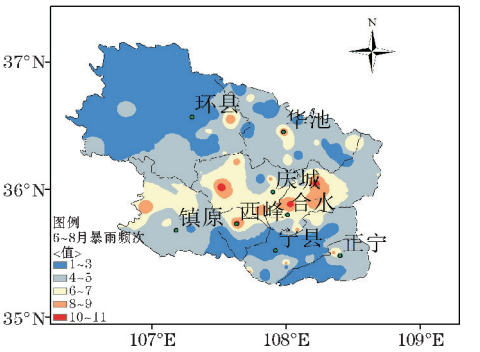


图 2 暴雨频次月变化

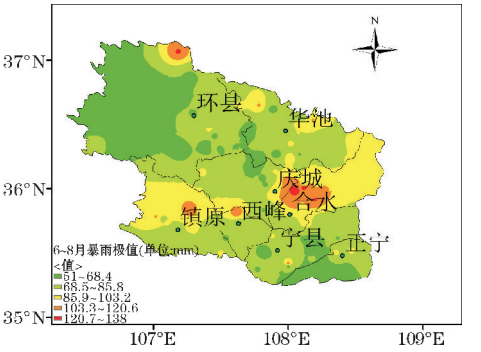
2.2 空间特征

2.2.1 暴雨整体空间分布

分析 2013-2020 年汛期暴雨空间分布(图 3),可以看出,暴雨出现频次较高的地方分布在合水、庆城、镇原西部、西峰北部、环县东部等。24 h降水极值较大的地方在环县北部、镇原东北部、西峰西部、庆城东部、合水西部等地,最大值出现在合水东关141 mm/24h(2020 年 8 月 4 日)。



(a)暴雨频次



(b)暴雨极值

图 3 暴雨频次及暴雨极值分布

2.2.2 暴雨月空间分布

分析暴雨空间分布特征(图 4)。其中 6 月,暴雨出现的频次相对较少(1 ~ 4 次),主要出现在合水东部、西峰西北部、华池西北部、宁县东部,宁县叶王出现的暴雨频次最多(4 次);降水量在 50 ~ 102 mm/24 h,极值为102.7 mm/24 h(2018 年 6 月 25 日华池城壕)。7 月,暴雨出现的频次在 1 ~ 5 次,主要出现在合水中西部、环县东部、镇原西部、宁县西部等,合水蒿咀铺出现的暴雨频次最多(5 次);降水量在 50 ~ 136.3 mm,极值为136.3 mm/24 h(2019 年 7 月 21 日合水刘家庄)。8 月,暴雨出现的频次较多(1 ~ 6 次),主要出现在合水、环县东部、镇原东部、西峰北部、庆城南部、宁县北部等,合水肖咀出现的暴雨频次最多(6 次);降水量在 50 ~ 141 mm/24 h,极值为141 mm/24 h(2020 年 8 月 4 日合水东关)。

3 地形影响分析

3.1 地形对暴雨频次的影响分析

对 2013-2020 年暴雨频次在 5 ~ 11 站次的国家、区域自动气象站进行分析(图 5a),其主要位于庆城、合水、西峰、华池交界处,受“喇叭口”地形、川道、河流及地形爬坡等多种地形效应共同影响。经统计,暴雨频次在 5 ~ 11 站次的站共有 65 站,其中 28 站受地形

爬坡效应的强迫抬升影响;19 站处在马莲河及蒲河附近是山区和谷底的过渡区,夏季庆阳盛行西南风,为南风的迎风坡地带;其余的受“喇叭口”地形及川道地形的辐合作用共同影响。

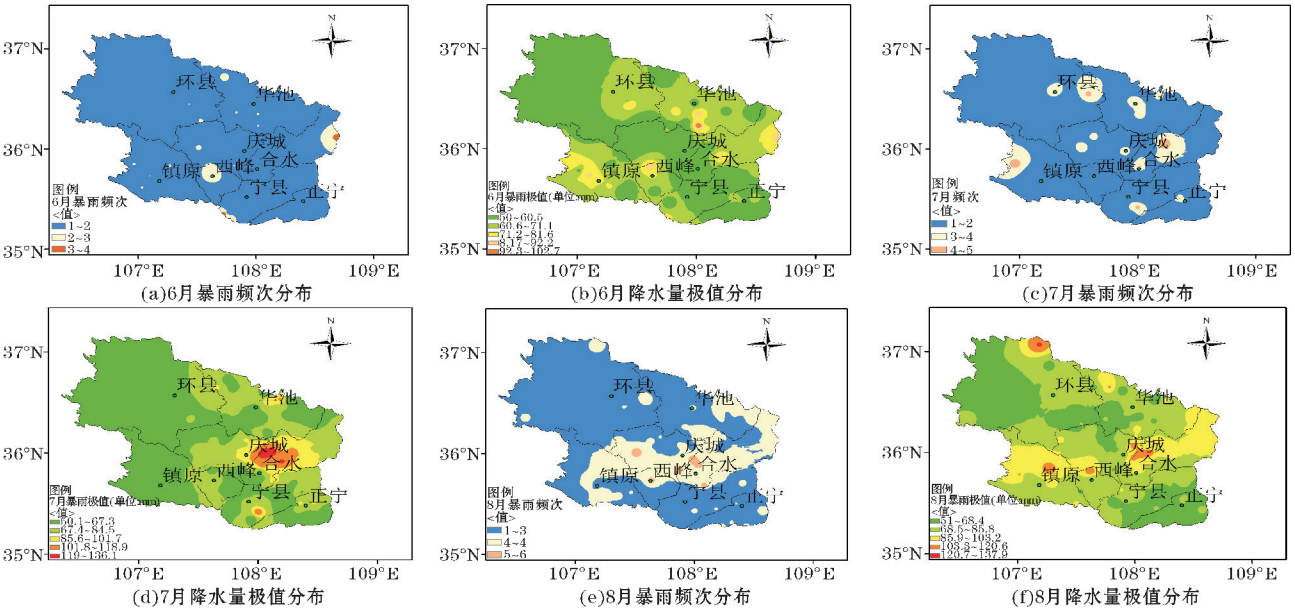


图 4　暴雨逐月空间分布

对 2013-2020 年暴雨频次在 7 ~ 11 次的站分析表明(图 5b),暴雨频次在 7 ~ 11 次的站,除镇原北部、合水东部分别出现 1 站次外,主要集中在庆城、合水、西峰、华池交界处,其受“喇叭口”地形、川道、河流及地形爬坡等多种效应共同影响。经统计,16 站受地形爬坡效应的强迫抬升影响;13 站受河流及“喇叭口”地形、川道地形的辐合作用共同影响。

对 2013-2020 年暴雨频次在 9 ~ 11 次的站分析看出(图 5c),暴雨频次在 9 ~ 11 次的站主要受地形爬坡效应的影响。经统计,4 站位于子午岭西侧,1 站次位于羊圈山南侧,2 站位于“喇叭口”地形的开口处,1 站位于地形坡西侧,其余站次受河流及地形低洼处各种效应共同影响。

对 2013-2020 年暴雨频次在 ≥10 次的站分析发现(图 5d),暴雨频次 ≥10 次的站主要集中在庆阳市中部,基本受地形爬坡效应的影响。经统计,1 站位于子午岭西侧,1 站位于董志塬边缘地形下坡处,1 站次受河流及地形低洼处各种效应共同影响,还有 1 站受其他地形综合影响。

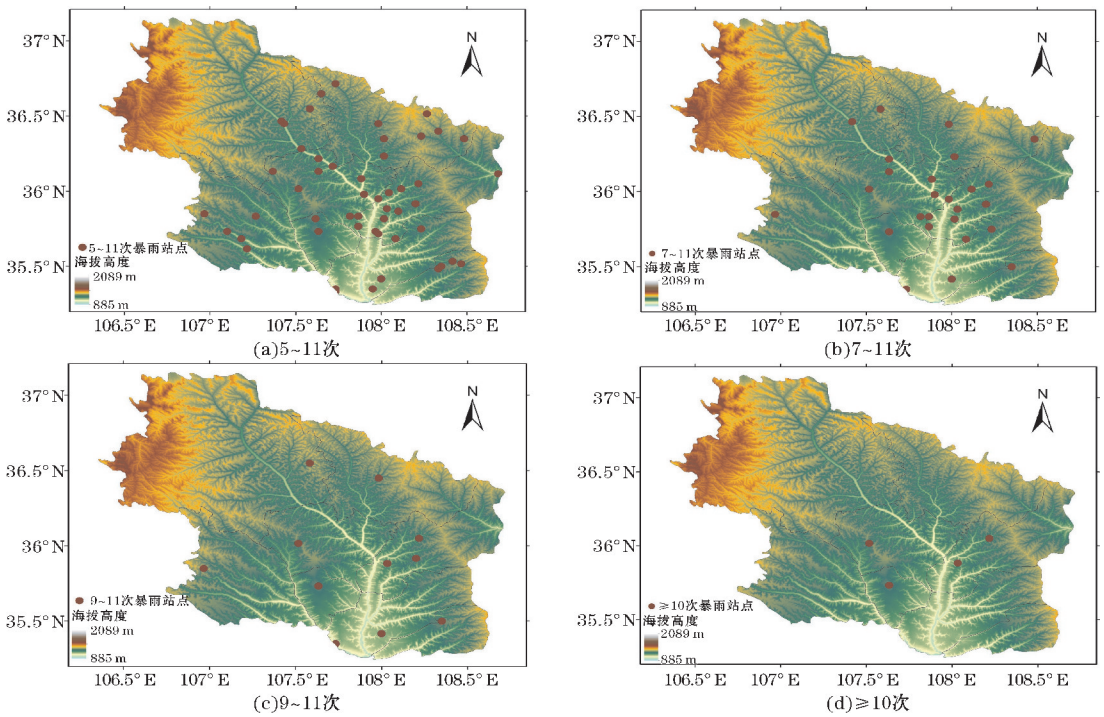


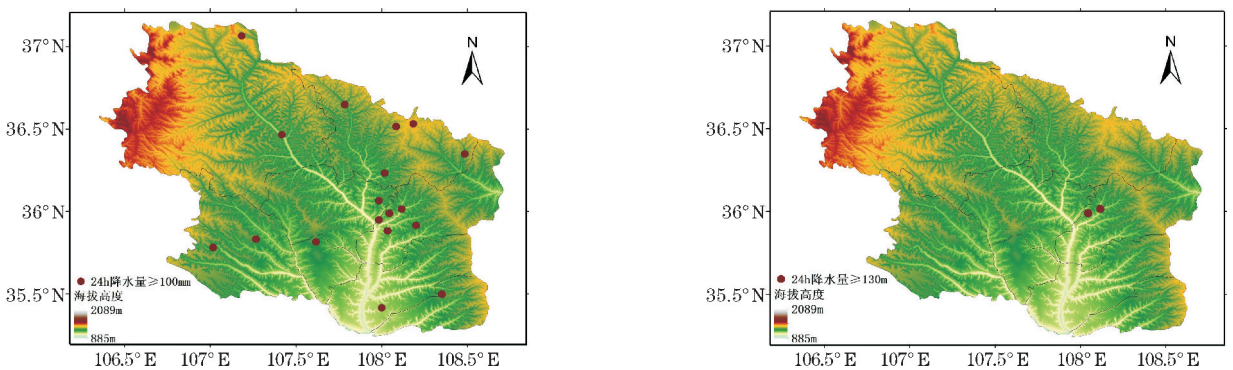
图 5　暴雨出现频次分布图

3.2 地形对暴雨极值的影响分析

极端降水在庆阳时有发生,其大多受该地区复杂地形影响所产生的增幅作用。文中主要选择降水量≥100 mm/24 h、≥130 mm/24 h的国家、区域自动气象站展开研究。

分析2013-2020年降水量≥100 mm/24 h的站(图6a)显示,共有25站次,其中3站次处在子午岭东侧,来自东南的水汽受地形抬升作用,利于对流性天气的增强,容易形成对流性大暴雨;5站次处在子午岭西侧,位于子午岭西坡,东移的冷空气在地形坡的强迫抬升作用下对流增强,对降水的增幅作用明显;6站次处在马莲河附近,河流附近是山区和谷底的过渡区,为南风的迎风坡地带,同时也位于"喇叭口"地形的收缩区,地形辐合作用强,利于降水的增强;1站次位于麻黄山南侧地势低洼处,局地的地形辐合效应有利于降水的增强;2站次(彭原、孟坝)受地形爬坡效应的强迫抬升作用,引起对流增强,产生强降水,1站次位于地形迎风坡的南坡,偏南气流输送的水汽及能量遇到地形坡产生集聚,且地形坡抬升作用有利于对流增强,使得降水增强;1站次(甄沟)位于蒲河流域附近,是山区和谷底的过渡区,为南风的迎风坡地带,易造成局地降水的增强。

2013-2020年降水量≥130 mm/24 h的站(图6b)表明,24 h降水量≥130 mm的站共有2站,位于子午岭西侧、"喇叭口"地形的收缩处、马莲河附近,地形收缩使气流辐合加强,从而加强了大气的上升运动,使对流旺盛,雨量加大,产生极端强降水。



(a)24 h降水量≥100 mm (b)24 h降水量≥130 mm

图6 暴雨极值分布图

4 地形对典型个例的影响分析

选择北部、中部、东部不同特征地形对降水的影响进行研究,并选择偏北气流型暴雨(冷槽东移)及偏南气流型暴雨两种不同的天气形势下,局地地形对暴雨的影响进行探讨,主要以2019年7月21日区域性大暴雨及2020年8月4日大暴雨过程展开讨论。

4.1 冷槽东移型暴雨

冷槽东移型暴雨一般强降水(≥20 mm/h)的落区在切变线左侧,200 hPa为高空分流区,高空辐散抽风作用明显,500 hPa高空槽东移并有温度槽随之东移南下,700 hPa东北—西南向切变线东移过程中触发对流产生,西南风显著流线为暴雨区输送水汽,地面主要是偏西北气流自西北向东南方向移动,在地形梁、沟及河流的作用及子午岭西坡地形坡抬升及阻挡作用下使风向转变产生辐合抬升,加强上升运动,从而使对流旺盛,利于降水增强。

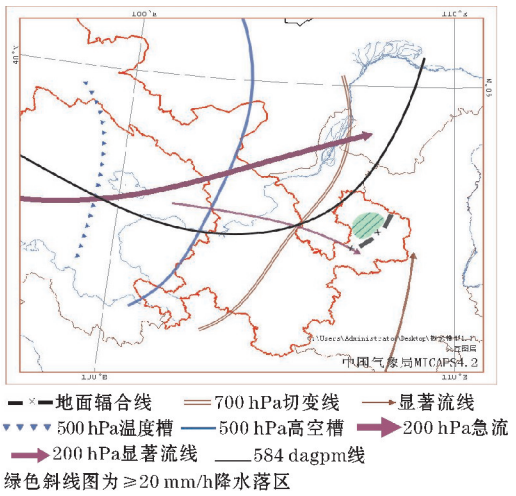
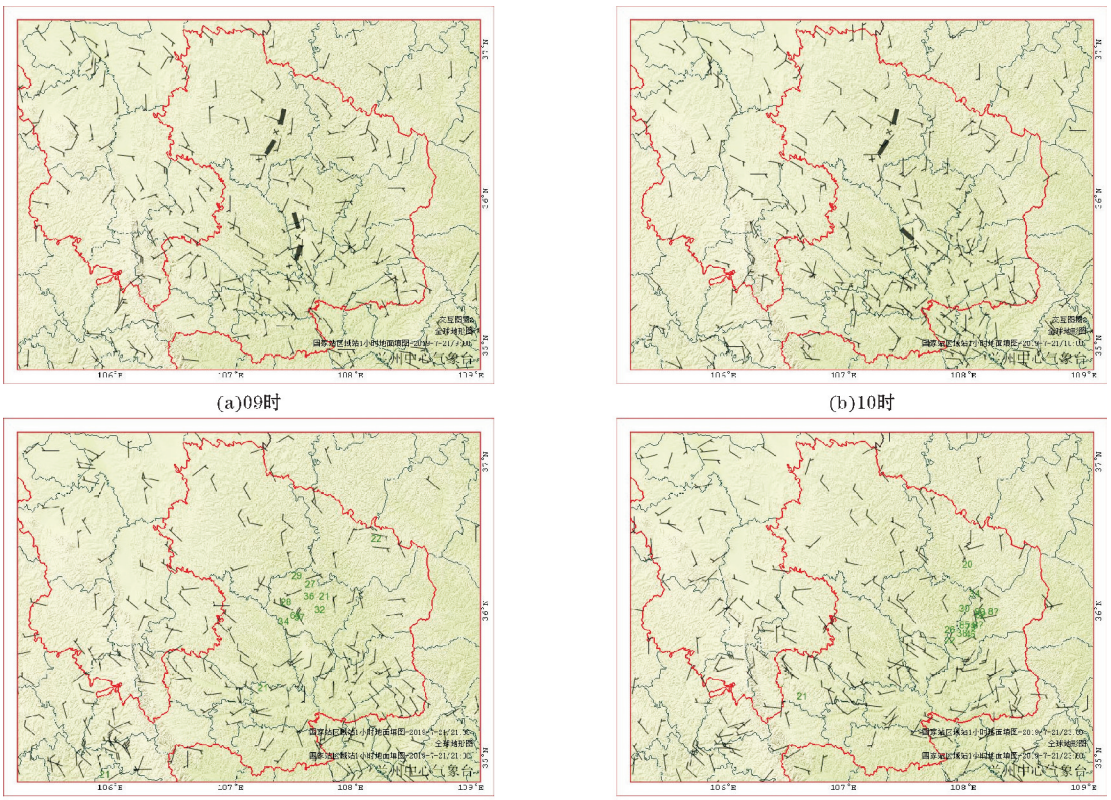


图7 冷槽东移型暴雨概念模型

2019年7月21日中午到夜间,受200 hPa高空分流区,500 hPa高空冷槽东移,副高588 dagpm外围高温高湿的环境条件,配合700 hPa切变线及西南风显著流线的共同影响及地面冷锋的抬升作用,庆阳市出现了区域性大暴雨天气过程,全市共出现大暴雨11站,暴雨48站,大雨72站,最大过程降水量出现在合水县刘

家庄136.3 mm,最大雨强90.8 mm/h(合水刘家庄,2019 年 7 月 21 日 22-23 时)。分析 7 月 21 日国家站区域站1 h地面填图(图 8),在降水发生前期 9-10 时(图 8a~b)在环县南部及喇叭口地形收缩处一直有地面辐合线存在为对流的产生提供了较好的触发条件,19-23 时受冷空气东移南下影响降水强度明显增强,21 时(图 8c)西北气流在向东南移动的过程中受地形梁东侧地形阻挡,风向发生改变产生了西南风(土桥站),而西北风顺沟道下滑过程中受马莲河影响,顺河道而吹,从而形成了地形东北风(马岭站),产生了风向辐合,利于能量和水汽的辐合,产生了63 mm/h的极端降水;22-23 时(图 8d),冷锋移至庆阳市东部受子午岭西坡地形坡抬升及阻挡作用,产生了持续时间较长的地面辐合线,因此出现了罕见的极端降水90.8 mm/h(合水刘家庄,2019 年 7 月 21 日 22-23 时)。



(a)09时　(b)10时　(c)20时　(d)21时

图 8　2019 年 7 月 21 日国家站区域站 1 小时地面填图(降水量只显示 1 h≥20 mm的观测站)

4.2　偏南气流型暴雨

偏南气流型暴雨一般强降水(≥20 mm/h)的落区在切变线两侧,200 hPa位于高空急流右侧,具有反气旋性切变,利于对流的维持及加强,500 hPa高空槽东移,700 hPa有低涡切变线触发对流产生,西南风显著流线为暴雨区输送水汽,地面主要是东南或西南气流自南向北移动,移动过程中受地形沟的辐合、“喇叭口”地形收缩及子午岭地形迎风坡的强迫抬升效应影响,增强上升运动,利于极端降水的产生,见图 9。

2020 年 8 月 4 日庆阳市出现了区域性大暴雨,其中大暴雨 5 站,暴雨 13 站,最大降水量141 mm(合水东关)。分析 2020 年 8 月 4 日 08 时-25 日 00 时地面流场及1 h地面填图(图 10)表明,该次过程主要受偏南气流影响,偏东气流自关中盆地经泾河附近海拔较低处进入庆阳市境内,受地形影响转为偏东南气流。22 时(图 10a),

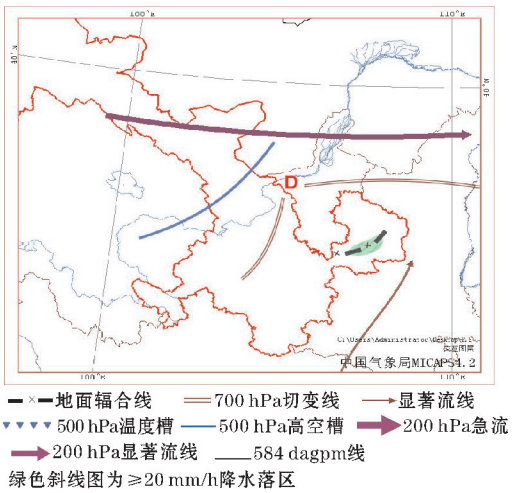
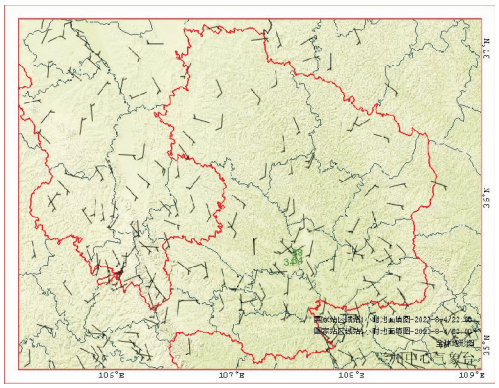


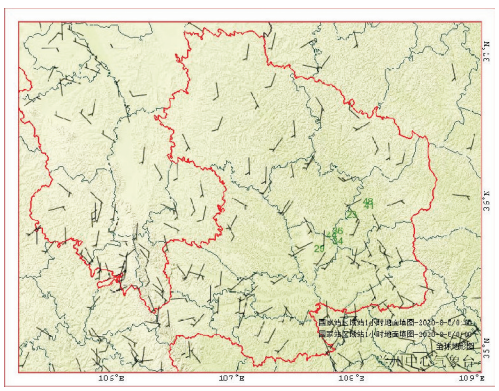
图 9　偏南气流型暴雨概念模型

东南气流在向北移动的过程中遇到地形沟产生了辐合生成局地地形北风,从而有利于对流的增强;至 5 日

00 时(图 10b),偏西南气流受喇叭口地形的辐合作用、子午岭地形迎风坡的强迫抬升及局地地形沟的影响,利于水汽和能量的辐合,使得降水增强明显产生强降水(4 日 23 时-5 日 00 时,合水唐家塬48 mm)。



(a)4 月 22 时



(b)5 月 00 时

图 10 2020 年 8 月 4-5 日国家站区域站 1 h 地面填图
(降水量只显示 1 h≥20 mm 的观测站)

5 结论与讨论

利用庆阳市国家、区域自动气象站 2013-2020 年汛期(6-8 月)日观测降水资料,及1 h地面填图资料,分析了庆阳市暴雨的时空分布特征,按照暴雨出现的频次及降水量级探讨了陇东局地地形对暴雨的影响,并通过典型个例分析了不同天气形势下陇东局地地形对暴雨的影响。结论如下:

(1)2013-2020 年暴雨频次呈波动状增加趋势,8 月最多,主要集中在 7 月下旬及 8 月上旬;暴雨出现频次及降水极大值区集中在庆阳市中部,最大日降水极值出现在 8 月(2020 年 8 月 4 日合水东关141 mm)。

(2)不同暴雨频次的站点所受地形效应不尽相同,主要有地形坡强迫抬升、"喇叭口"地形收缩辐合、川道地形的辐合作用及河流效应等。降水量≥130 mm/24 h的站主要位于子午岭西侧、"喇叭口"地形的收缩处且在马莲河附近,受多种地形效应共同影响。

(3)典型天气形势下,地形对暴雨的影响效应不同。冷槽东移型暴雨,环县南部川道受地形影响风向发生改变,易产生风向辐合,庆阳市中部受地形梁、沟及河流的作用,而庆阳市东部受子午岭地形坡抬升及阻挡作用;偏南气流型暴雨,庆阳市中南部主要受地形沟的辐合,中东部主要受"喇叭口"地形的收缩辐合、子午岭地形迎风坡的强迫抬升及局地地形沟等地形效应共同影响。

初步探索了陇东局地地形对暴雨的影响,但研究中没有对坡度及坡向进行修正,为更加深入地了解陇东局地地形对暴雨的作用,今后需要在坡度及坡向的修正、地形爬流(地形抬升)及能量、水汽辐合的定量计算方面努力。

致谢:感谢庆阳市气象局科研资助项目(QY2021-1)对本文的资助

参考文献:

[1] 陈明,傅抱璞,于强. 山区地形对暴雨的影响[J]. 地理学报,1995,(3):256-263.

[2] 王凌梓,苗峻峰,韩芙蓉. 近 10 年中国地区地形对降水影响研究进展[J]. 气象科技,2018,46(1):64-75.

[3] 刘国纬. 关于地形对降水的影响研究简介[J]. 水文,1982(2):59-63+53.

[4] 傅抱璞. 地形和海拔高度对降水的影响[J]. 地理学报,1992(4):302-314.

[5] Roe G H. Orogrphic precipitation[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences,2005,33:645-671.

[6] 廖菲,洪延超,郑国光. 地形对降水的影响研究概述[J]. 气象科技,2007(3):309-316.

[7] 李子良. 地形降水试验和背风回流降水机制[J]. 气象,2006(5):10-15.

[8] 朱素行,徐海明,徐蜜蜜. 亚洲夏季风区中尺度地形降水结构及分布特征[J]. 大气科学,2010,34(1):71-82.

[9] 段海霞,刘新伟. 喇叭口地形对一次暴雨影响的数值试验[J]. 干旱气象,2009,27(4):327-333.

[10] 赵海英,薄燕青,邱贵强,等. 地形对山西暴雨影响的数值模拟研究[J]. 气象与环境科学,2017,40(2):84-91.

[11] 付炜,叶成志,王东海,等. 一次南岭山脉前汛期强对流天气过程诊断分析[J]. 暴雨灾害,2018,37(6):511-521.

[12] 王坚红,杨艺亚,苗春生,等. 华南沿海暖区辐合线暴雨地形动力机制数值模拟研究[J]. 大气科学,2017,41(4):784-796.

[13] 何光碧,屠妮妮,张利红,等. 青藏高原东侧一

次低涡暴雨过程地形影响的数值试验[J]. 高原气象,2013,32(6):1546-1556.
[14] 刘裕禄,黄勇. 黄山山脉地形对暴雨降水增幅条件研究[J]. 高原气象,2013,32(2):2608-2615.
[15] 王其伟,谈哲敏. 我国主要地形上空理想定常流的流域分界分析[J]. 地球物理学报,2006(4):971-982.
[16] 舒守娟,王元,李艳. 西藏高原地形扰动对其降水分布影响的研究[J]. 水科学进展,2006(5):585-591.
[17] 董海萍,赵思雄,曾庆存. 低纬高原地形对强降水过程影响的数值试验研究[A]. 北京气象学会. 2012 北京气象学会中青年优秀论文评选论文集[C]:北京气象学会,2012:16.
[18] Wang D,Miao J F,Tan Z M. Impacts of topography and land cover change on thunderstorm over the Huangshan(Yellow Mountain)area of China[J]. Natural Hazards,2013,67(2):675-699.
[19] 孙晶,楼小凤,胡志晋. 祁连山冬季降雪个例模拟分析(Ⅰ):降雪过程和地形影响[J]. 高原气象,2009,28(3):485-495.
[20] 陈添宇,郑国光,陈跃,等. 祁连山夏季西南气流背景下地形云形成和演化的观测研究[J]. 高原气象,2010,29(1):152-163.
[21] 宁贵财,尚可政,王式功,等. 贺兰山对银川一次致灾暴雨过程影响的数值模拟[J]. 中国沙漠,2015,35(2):464-473.
[22] 杨侃,纪晓玲,毛璐,等. 贺兰山两次特大致洪暴雨的数值模拟与地形影响对比[J]. 干旱气象,2020,38(4):581-590.
[23] 陶林科,杨侃,胡文东,等. "7·30"大暴雨的数值模拟及贺兰山地形影响分析[J]. 沙漠与绿洲气象,2014,8(4):32-39.
[24] 慕建利,李泽椿,李耀辉. 高原东侧特大暴雨过程中秦岭山脉的作用[J]. 高原气象,2009,28(6):1282-1290.
[25] 毕宝贵,刘月巍,李泽椿. 秦岭大巴山地形对陕南强降水的影响研究[J]. 高原气象,2006(3):485-494.
[26] 李双双,汪成博,延军平,等. 面向事件过程的秦岭南北极端降水时空变化特征[J]. 地理学报,2020,75(5):989-1007.
[27] 赵庆云,张武,陈晓燕,等. 一次六盘山两侧强对流暴雨中尺度对流系统的传播特征[J]. 高原气象,2018,37(3):767-776.
[28] 李伟,穆建华,马思敏,等. 2017 年夏季六盘山地区一次强对流天气过程云降水宏微观特征分析[J]. 黑龙江气象,2019,36(3):14-16.
[29] 霍达,孙军,储文宗. 2017 年 7 月大气环流和天气分析[J]. 气象,2017,43(10):1302-1308.
[30] 谢超,马学款. 2017 年 8 月大气环流和天气分析[J]. 气象,2017,43(11):1446-1452.
[31] 张夕迪,孙军. 2018 年 7 月大气环流和天气分析[J]. 气象,2018,44(10):1370-1376.
[32] 王晴,张玲. 2018 年 8 月大气环流和天气分析[J]. 气象,2018,44(11):1501-1508.

Qualitative Analysis on the Influence of Longdong Local Topography on Qingyang Rainstorm

ZHAO Yujuan, ZHANG Hongfen, ZHANG Kexin, LIU Donghui
(Qingyang Meteorological Bureau of Gansu Province, Qingyang 745000, China)

Abstract: In order to study the influence of local topography in Eastern Gansu on rainstorm in Qingyang, the daily precipitation data and ground mapping data of 206 meteorological stations in Qingyang city during the flood season from 2013 to 2020 were used to analyze the spatial and temporal characteristics of rainstorm, which emphasised on the influence of local topography on the rainstorm. The results are as follows: The frequency of rainstorm from 2013 to 2020 showed a fluctuating increasing trend, which is mainly occurred in late July and early August. The areas withhigh rainstorm frequency and high precipitation extreme value are in the central part of Qingyang. Forced uplift of topographic slope, "bell mouth" topography, convergence of Chuandao area and river effects were the factors that influence the rainstorm by the local topography of Longdong. The extremely heavy rainfall in Qingyang City was affected by multiple topographic effects. The type of cold trough eastward-moving rainstorm was mainly affected by the action of topographic beams, gullies and rivers, and the topographical slope uplift and blocking of the western slope of Ziwuling mountain. The southerly airflow rainstorm was mainly affected by the convergence of the topographic gullies, the convergence of the "bell mouth" topography and the forced uplifting effect of the windward slope of the Ziwuling topography.

Keywords: meteorology; disastrous weather; rainstorm; eastern Gansu province; local topography