

杨霞,周雅蔓,牟欢,等.新疆极端暴雨代表性事件的主要研究进展[J].沙漠与绿洲气象,2025,19(6):1-14. YANG Xia,ZHOU Yaman,MOU Huan,et al.Research Advances on Typical Extreme Rainstorm Events in Xinjiang[J].Desert and Oasis Meteorology, 2025,19(6):1-14.

新疆极端暴雨代表性事件的主要研究进展

杨霞,周雅蔓,牟欢,许婷婷,张林梅

(新疆维吾尔自治区气象台,新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要:随着全球气候变暖和新疆气候的暖湿化发展,近年来新疆极端暴雨事件频发,造成严重财产损失和人员伤亡。极端暴雨过程的复盘总结和系统研究是深入认识此类天气的重要手段,也是提高极端暴雨预报和预警准确率的关键。本文综述了20世纪90年代—21世纪10年代新疆极端暴雨过程代表性事件研究成果的主要进展,给出不同历史阶段新疆极端暴雨在大尺度环流背景、多尺度天气系统相互作用、水汽源地和输送、高低空急流、中尺度系统特征等方面研究取得的成就和不足,阐述了新疆极端暴雨过程代表性事件研究对新疆天气预报业务发展的重要作用。提出在继续完善新疆暴雨相关理论的基础上,需借助新型观测和数值模拟手段,持续性开展新疆极端暴雨中尺度系统精细特征研究,揭示新疆暴雨中尺度系统的三维结构特征、发生发展机理,以期有效提高新疆暴雨灾害的预报和防御能力。

关键词:极端暴雨;研究进展;新疆;干旱区

中图分类号:P426.62

doi:10.12057/j.issn.2097-6801.2501.20036

暴雨是一种灾害性天气^[1-4],新疆地处干旱半干旱地区,年平均降水量与中国东部季风区相比明显偏少^[5-6],但暴雨的强度较大,新疆局部地区一次暴雨过程的降水量能接近甚至超过当地的年平均降水量^[7],由于生态环境脆弱,新疆的暴雨易引发山洪和滑坡、泥石流等地质灾害,造成巨大的经济损失和人员伤亡^[8]。同时,新疆暴雨作为宝贵的水资源,可有效地补充水库、湖泊和地下水的水量,对于缓解干旱和满足用水需求具有重要作用^[9]。

对新疆暴雨的研究具有重要意义,不仅与国家“一带一路”建设的需求紧密相连,也是全球干旱区极端天气研究的重要内容,对认识全球极端天气具有深远影响^[10]。新中国成立到改革开放前,是新疆暴雨研究的初期探索阶段^[11-12],主要依靠天气学方法,从暴雨天气个例入手归纳总结新疆暴雨的典型环流背景、大尺度影响系统及其与暴雨落区的关系,并提出了“南支主雨,北支主风,重视南北结合”的暴雨宏观预报思路^[13]。改革开放以后,新疆暴雨

研究进入快速发展阶段,20世纪80年代《新疆降水概论》^[14]和《新疆短期天气预报指导手册》^[15]两部专著相继出版,系统地总结了新疆暴雨的一些新事实,通过天气学和动力学的结合,对新疆暴雨形成机理有了较深的认识^[16]。21世纪,新疆暴雨研究形成了较完整的体系,并取得了较丰硕的成果,通过加密自动气象站、雷达、卫星等多源高时空分辨率新资料的应用,发现了新疆暴雨新的观测特征,利用诊断分析和数值模拟等技术,揭示了新疆暴雨的多尺度天气系统相互作用、中小尺度天气系统发展演变、水汽输送和快速汇聚等机制^[17]。

极端暴雨过程的复盘总结和系统研究是深入认识暴雨天气的重要手段^[18-21],也是推动天气预报预警业务发展的重要环节^[22-25]。目前,针对新疆暴雨研究进展的总结多从宏观角度分析新疆暴雨的时空分布^[26-27]、影响系统和水汽输送等^[28],缺乏对新疆极端暴雨过程研究成果的系统性分析。本文对20世纪90年代—21世纪10年代新疆极端暴雨过程代表性事件的研究成果进行梳理和总结,以期帮助预报业务人员快速认识此类天气事件的特点,为深入开展新疆暴雨机理研究和预报技术优化、提高新疆暴雨预报预警准确率及防灾减灾能力提供参考。

收稿日期:2025-01-20;修回日期:2025-04-16

资助项目:自治区“天山英才”培养计划(2023TSYCCX0077)

作者简介:杨霞,主要从事灾害性天气机理研究。E-mail: yangxia921@163.com

1 极端暴雨成因研究

1.1 “96·7”极端暴雨(20世纪90年代)

1.1.1 暴雨概况

1996年7月,新疆经历了有气象记录以来持续时间最长、影响范围最广、受灾最严重的暴雨过程(简称“96·7”极端暴雨)^[29-30],13—16日为第一阶段,暴雨主要分布在新疆西部;17—21日为第二阶段,暴雨主要分布在新疆中部;22—28日为第三阶段,暴雨主要分布在新疆东部(图1)。“96·7”极端暴雨中,新疆平原地区的累计降水量为30~80 mm,山区为70~110 mm,共出现17站暴雨,单站日最大降水量出现在达坂城站(78 mm),达坂城、小梁子、大西沟、巴仑台4站的日降水量破历史极值^[31]。持续暴雨引发了特大洪水灾害,新疆3条铁路干线和主要的国道、省道全部中断,水利设施严重受损,新疆10个地州市、32个县(市)约50万km²的区域遭受重创,直接经济损失达40.94亿元,超过新疆1995年地方财政的总收入^[29]。

1.1.2 大尺度环流背景

“96·7”极端暴雨是高、中、低层天气系统相互作用、协同配合的一次中期天气过程^[32](图2)。大

尺度环流稳定,南亚高压双体型分布、伊朗副热带高压(简称“伊朗副高”)南北振荡、西太平洋副热带高压(简称“西太副高”)西伸北进和中亚低涡的发展与维持是此次极端暴雨的环流背景和天气学条件^[33]。南亚高压双体型、中亚地区副热带长波槽稳定维持20 d,为“96·7”极端暴雨提供了有利的环流背景^[33]。中亚低涡是“96·7”极端暴雨的影响系统,该系统的生命史一般为7~10 d,但在此次极端暴雨过程中,由于南支经向环流使中亚低涡脱离了极锋锋区,减少了扰动,加之低涡系统自身维持深厚的正压结构,为其维持超长生命史提供了条件,使中亚低涡的生命史达20 d,为历史罕见^[34]。

1.1.3 中尺度系统特征

大尺度环流造成的能量汇聚与释放为中尺度对流系统(简称“MCS”)的发展和演变提供了有利条件^[35]。在“96·7”极端暴雨过程中,中亚低涡长时间维持,为暴雨提供了持续的不稳定能量,在低层切变线附近MCS发展活跃^[36],其生命史一般为6~10 h,通常在夜间形成,午夜成熟,凌晨消散。在MCS发展阶段,冷云盖随对流层中上层引导气流的方向移动;MCS发展成熟后,其移动速度明显减慢,

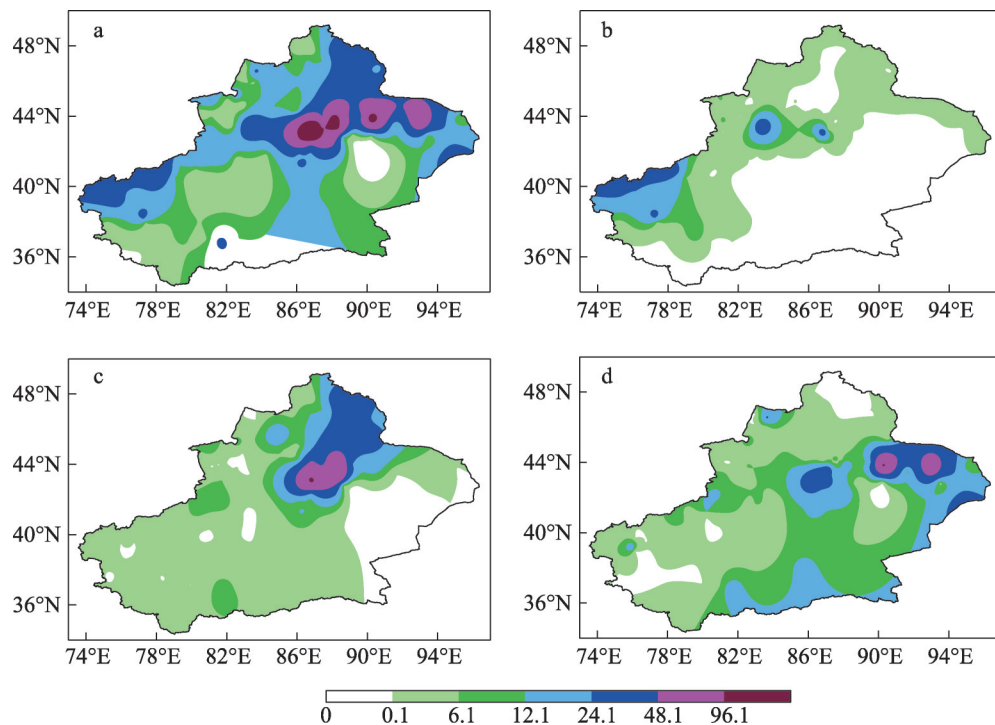


图1 “96·7”极端暴雨过程累计降水量分布(单位:mm):(a)13—28日;(b)第一阶段(13—16日);(c)第二阶段(17—21日);(d)第三阶段(22—28日)(审图号:GS(2020)4619)

Fig. 1 Distribution of accumulated precipitation during the "96·7" extreme rainfall event (unit: mm): (a) July 13 to 28; (b) the first stage (July 13-16); (c) the second stage (July 17-21); (d) the third stage (July 22-28) (Map Approval Number: GS(2020)4619)

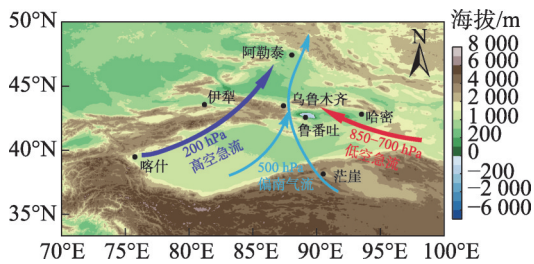


图2 “96·7”极端暴雨过程高低层气流配置^[38]

Fig.2 Configuration of low- and high-level airflows during the “96·7” extreme rainfall event

甚至停滞, MCS 活跃和停滞的区域与暴雨落区对应^[37]。“96·7”极端暴雨中,常规高空和地面观测资料的时空尺度较粗,观测资料未能捕捉到造成此次极端暴雨的中尺度系统的精细特征。

1.1.4 动热力条件

在“96·7”极端暴雨过程的不同阶段,对流层高、中、低层气流的相互作用不同^[38-39]。第一阶段的暴雨是对流层高层200 hPa西南急流和中层500 hPa偏南气流相互作用,第二阶段是对流层中层500 hPa切变线和低层700 hPa偏东急流、地面冷锋系统相互作用;第三阶段是对流层高层200 hPa南北向高空急流、中层500 hPa切变线和低层700 hPa偏东急流共同作用的结果^[40]。500 hPa偏南急流和700 hPa偏东急流对暴雨落区有一定指示意义^[36]。

卫星资料显示:在暴雨开始前,中亚低涡云系与极锋锋区云带相连,由于不断获得北方冷空气的补充,中亚低涡云系的强度增强且稳定少动;暴雨过程开始后,来自阿拉伯海和孟加拉湾的副热带云团不断北移,并越过青藏高原,进入塔里木盆地,促进了南北云系的相互作用^[41]。在“96·7”极端暴雨过程的前期,中亚低涡主要通过不断分裂冷锋云带对新疆造成影响;在过程的中后期,主要以暴雨云团的形式影响新疆^[41]。中亚低涡云系、极锋锋区云带和北涌的副热带云团之间通过复杂的相互作用,促进了各类云系在南北方向上合并和垂直方向上堆叠,以及冷暖空气的激烈交汇^[29]。

1.1.5 水汽条件

在“96·7”极端暴雨过程的研究中,新疆首次提出了“水汽次源地”的概念^[42],并指出“水汽次源地”对新疆暴雨的作用更大。新疆远离海洋,无法从海洋直接获得充沛的水汽,因此,新疆境内产生暴雨所需的水汽是在特定的环流条件下,以“接力”的方式提供的,即水汽先由源地输送到次源地,再借助合适的环流条件向暴雨区输送。“96·7”极端暴雨低

层水汽的源地主要位于阿拉伯海东岸、孟加拉湾北岸、中南半岛西部和南海北部,次源地主要位于巴尔喀什湖和四川盆地,其中巴尔喀什湖的水汽由西部山谷进入新疆,四川盆地的水汽由河西走廊进入新疆;高层水汽源地位于青藏高原,水汽由源地直接进入新疆。“96·7”极端暴雨过程中,中低层的增湿早于高层,中低层增湿量占总增湿量的80%,高层增湿量仅占20%^[43-44];暴雨过程的水汽主要有西、南、东三条输送路径,西路水汽通过伊朗副高北侧的副热带急流将水汽输送到巴尔喀什湖附近并集中;再由中亚低涡前部的西南气流向东输送至中天山一带;南路水汽在高原低压和季风的共同作用下,将来自南亚的水汽输送到高原并集中,再由高空偏南气流向北输送到新疆;东路水汽由西太平洋副热带高压西侧偏南气流把热带海洋的水汽向北输送,并在河西走廊东部集中,再由蒙古高压南部以及青藏高原上的低压北部的偏东气流沿河西走廊向西输送至新疆^[42-44]。从各边界水汽的收支来看,“96·7”极端暴雨前期,西边界低层流出、高层流入;在暴雨强度最大时,西边界高、低层均为流入,且为水汽流入的主要贡献者。东边界水汽前期为流入,后期为流出;北边界低层始终维持流入,后期中高层流出;南边界中低层以流入为主,高层流出^[42-44]。

1.2 “7·17”极端暴雨(21世纪00年代)

1.2.1 暴雨概况

2007年7月15—18日,新疆出现21世纪00年代降水范围最大、降水强度最强、致灾最严重的一次暴雨过程,由于最强降水时段集中在7月17日,因此称为“7·17”极端暴雨^[45]。“7·17”极端暴雨过程中(图3),全疆共出现20站暴雨,10站大暴雨和1站特大暴雨,6站日降水量突破历史极值(乌鲁木齐站、小渠子站、奇台站、吉木萨尔站、和布克赛尔站、伊吾站),7月17日16—17时和布克赛尔站1 h降水量达52.1 mm,为北疆小时降水量之最。“7·17”极端暴雨过程导致哈密市等地出现洪水、泥石流等灾害,造成25人死亡,100多人受伤,10万余人受灾,直接经济损失约8亿元^[46-47]。

1.2.2 大尺度环流背景

“7·17”极端暴雨出现在南亚高压呈双体型分布的大尺度环流背景下(图4),西部的高压中心与500 hPa上伊朗副高北抬时与乌拉尔山高压脊同位相叠加形成的阻塞高压对应,东部的高压中心与西太副高西伸北进后形成的大陆性高压对应。在里

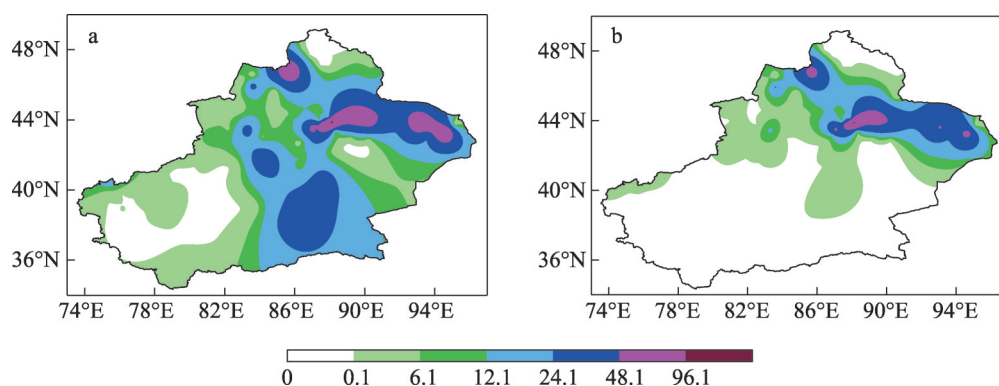


图3 “7·17”极端暴雨过程降水量(单位:mm)实况分布:(a)7月15—18日累计降水量;(b)7月17日降水量

Fig. 3 Distribution of observed precipitation (unit: mm) during the "7·17" extreme rainfall event: (a) accumulated precipitation from July 15 to 18; (b) precipitation on July 17

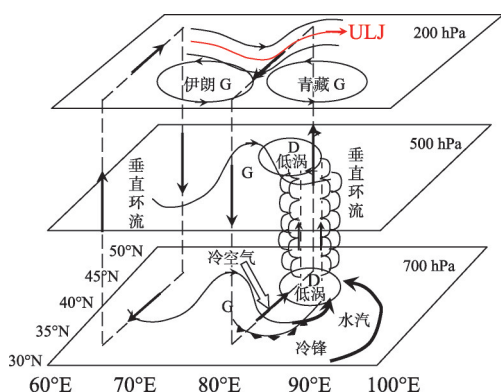


图4 “7·17”极端暴雨过程天气概念模型^[45]

Fig. 4 Conceptual weather model of the "7·17" extreme rainfall event^[45]

海高压脊和西西伯利亚阻塞高压的共同作用下,巴尔喀什湖附近的低压系统挤压成长条形,并形成一个闭合的低涡系统,随着伊朗副高的发展东扩,低涡系统进入新疆,先东南下到天山南侧,之后受天山北侧西风气流的强迫和残留弱南风引导,东北移至天山北坡东段并维持,成为“7·17”极端暴雨的主要影响系统^[45,48]。

1.2.3 中尺度系统特征

“7·17”极端暴雨过程整体以稳定层结为主,气团具有潜在不稳定特征,局部区域由于增湿加强了大气层结的不稳定性,在暴雨过程中,稳定性降水和对流性降水混合出现^[48],此次暴雨过程有多个中尺度对流云团发生,云顶纹理粗糙,强降水时段的云顶亮温值(简称“TBB”)为 $-40\sim-30\text{ }^{\circ}\text{C}$,对流系统发展不及我国东部地区旺盛。在雷达组合反射率因子产品上强降水回波呈絮状,呈现层状云降水和对流性降水混合的特征,中尺度对流雨团以中 γ 尺度为主,回波顶高距离地面 $4\sim 5\text{ km}$,具有悬垂、倾

斜的特征和较强的垂直风切变。在雷达 1.5° 仰角的径向速度场上,强降水区存在明显的风场切变和辐合特征,这是低涡系统对流层低层风场在雷达径向速度场上的反映,低涡系统导致的中尺度风场切变和辐合是“7·17”极端暴雨过程触发中尺度对流系统的重要动力机制^[49]。

1.2.4 动热力条件

除暖湿气流外,干冷空气对中高纬地区的暴雨也有重要作用。“7·17”极端暴雨过程中,在低涡的西南方向存在明显的来自对流层中层到低层的干空气侵入,即高位涡异常。异常的正位涡区与锋区靠近时,由涡度异常引起的环流产生热力平流并引发气旋性环流,使高空由正位涡引起的环流进一步增强,导致垂直运动加强,低层的气旋性环流增强,为低涡系统维持提供有利条件^[45]。高层干冷空气的入侵使中低层斜压性增强,使对流层中低层风切变继续加强,在天山大地形的作用下,低层的偏北气流和天山北坡向北开口的喇叭口地形使垂直上升运动进一步增强,强切变的建立组织了较强的系统性抬升运动,为“7·17”极端暴雨提供了持续、深厚的动力条件^[46,48]。

1.2.5 水汽条件

“7·17”极端暴雨过程的水汽主要来自西风带和孟加拉湾^[50-51],500 hPa西南气流和700 hPa东北气流是水汽输送的两条主要通道;水汽收支整体呈现经向辐合、纬向辐散的特征^[45];暴雨期间,水汽流入总量为518亿t,流出总量为354亿t,水汽净收支为164亿t;西边界水汽输入贡献最大,南边界次之。“7·17”极端暴雨过程初期,来自孟加拉湾的水汽首先在偏南气流的作用下,向北输送至青藏高原东部;此时由西南气流输送的水汽已在高原上空聚集,两支水汽在高原中东部地区汇合,通过接力的

方式进入新疆。暴雨过程盛期,中亚低涡自身携带的水汽起主要作用,该系统将西路和东路水汽不断输入新疆,为暴雨区提供持续水汽供应^[46,52-53]。

1.3 “7·31”极端暴雨(21世纪10年代)

1.3.1 暴雨概况

2018年7月31日,哈密市出现历史极端特大暴雨过程(以下简称“7·31”极端暴雨,图5),多站降水量突破历史极值^[54],极端暴雨引发山洪造成哈密市出现新中国成立以来最大的一次暴雨洪水灾害^[55]。哈密市伊州区沁城乡小堡站是降水中心,累计降水量达115.5 mm,约为伊州区年平均降水量的3倍。“7·31”极端暴雨过程中,强降水时段集中在7月31日6—10时,多站连续出现短时强降水事件,暴雨中心小堡站连续2 h雨强均为 $29.2 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,在干旱区暴雨中较为罕见。“7·31”极端暴雨的强降水范围和降水时段集中,山区各沟口迅速汇流引发特大洪水,伊州区射月沟水库洪水入库最大洪峰流量 $>1\,800 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,为该水库300年一遇的洪水设计标准($537 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)的3.4倍,导致射月沟水库漫顶溃坝^[56-57],28人死亡。暴雨洪水还冲断312国道和兰新铁路,导致哈密市道路、桥梁、电力、水利等基础设施严重损毁,10.5万人受灾,经济损失约10亿元^[54-55]。

1.3.2 大尺度环流背景

“7·31”极端暴雨出现在南亚高压呈双体型分布的大尺度环流背景下(图6),其东部的高压中心较常年异常偏北,且明显强于其西部高压中心^[58]。500 hPa为“两脊一槽”型的环流形势,伊朗副高和西太副高位置较常年异常偏北,特别是西太副高的主体位置较常年偏北约10个纬距,584 dagpm线到达 47°N 附近,西伸脊线到达 92°E 附近,由于西太副高

的阻挡,中亚低槽移速缓慢,西太副高西侧偏南气流控制暴雨区^[59]。

1.3.3 中尺度系统特征

中尺度对流云团是造成“7·31”极端暴雨过程的直接影响系统^[58-61]，“7·31”暴雨初期中尺度云团对流触发主要是由锋生水平散度项和倾斜项决定,低层暖平流增强和偏南气流风速辐合,导致水平锋生并产生锋面次级环流,促进中小尺度对流系统发展。对流云团成熟阶段,变形项和倾斜项引起的锋生再次加强锋面次级环流,使对流云团得以发展^[58]。在“7·31”极端暴雨过程中,多个 β 中尺度和 γ 中尺度云团在低空东南急流左前方生成并向东北方向移动,移动过程中云团合并增强,对流云团北、西、东南部的TBB梯度大值区及其附近的冷空气侵入一侧是短时强降水事件的高发区,暴雨云团TBB最低值达 -60°C ,多个 γ 和 β 中尺度对流云团呈现明显的“列车效应”,持续影响哈密东南部地区,造成极端暴雨^[61]。

1.3.4 动热力条件

“7·31”极端暴雨过程中,暴雨区位于200 hPa西南高空急流入口右侧的强辐散区,500 hPa中亚低槽前西南气流与西太副高西侧偏南气流的汇合处,700 hPa东南低空急流出口区前部的强辐合区;高空西南急流、中层西南和偏南气流以及低层东南急流,3支气流在暴雨区上空产生强烈的垂直风切变,为暴雨区辐合上升运动和中尺度系统的发生发展提供了动力条件^[55,58]。目前,对“7·31”极端暴雨的热力性质存在两种观点,一种观点认为本次极端暴雨属于“暖区暴雨”,暴雨过程中无明显冷空气影响,对流层低层暖锋锋生是此次暴雨过程中尺度对

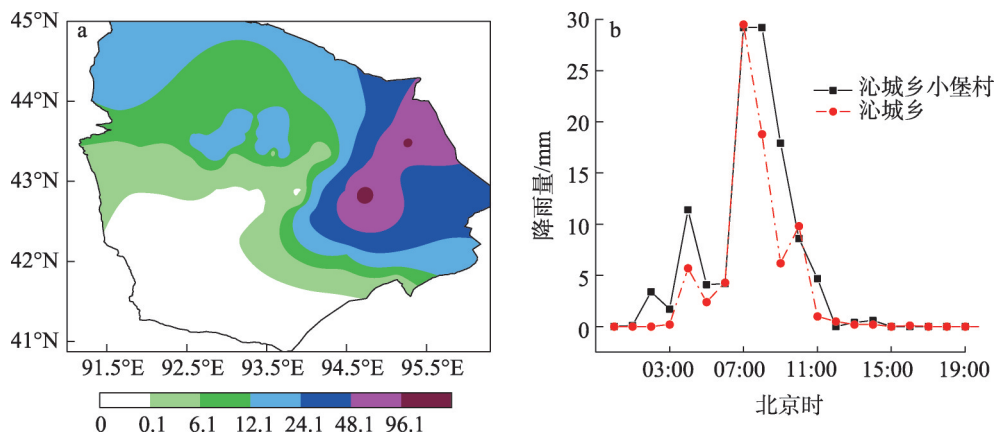


图5 “7·31”极端暴雨过程降水量(单位:mm)空间分布(a)和2个暴雨站点逐小时降水分布(b)

Fig. 5 (a) Spatial distribution of accumulated precipitation (unit: mm) and (b) hourly precipitation at two heavy rain stations during the “7·31” extreme rainfall event

流系统的触发因子,锋面次级环流上升运动与对流运动发生、发展密切相关,高空西南急流和低空东南急流的维持加强利于锋面次级环流发展,配合地形辐合抬升,是造成中尺度对流系统长时间维持的主要原因^[58-60]。另一种观点认为,“7·31”极端暴雨过程属于“高架对流”,由800~600 hPa的强锋区触发,但与典型高架对流主要发生在冷季、对流层低层逆温很强、大气层结为上干下湿、垂直风切变大等不同的是,“7·31”极端暴雨发生在夏季,低层逆温很弱,大气层结为高层和低层干、600~300 hPa湿,且垂直风切变较小^[61]。

1.3.5 水汽条件

“7·31”极端特大暴雨的水汽主要来自阿拉伯海、孟加拉湾、南海和西太平洋^[54,61],暴雨区的水汽存在波动增湿特征,与水汽接力输送密切相关^[62]。暴雨开始前2~3 d,受巴尔喀什湖低槽前偏南暖湿气流的影响,暴雨区完成一次缓慢增湿过程;暴雨开始前1 d,南海水汽与西太副高外围水汽在河北南部汇合并增强,由低空偏东急流通过接力输送完成暴雨区的快速增湿过程。南海水汽与西太副高外围水汽在河西走廊汇合加强,共同构成了偏东水汽接力输送的通道^[62-64]。“7·31”极端特大暴雨过程中,来自对流层低层的东边界水汽是暴雨区纬向水汽的主要贡献者,南边界水汽是经向水汽的主要贡献者。暴雨过程中,水汽主要集中在对流层中低层(900~600 hPa),水汽的垂直输送在对流层中低层(850~650 hPa)较明显^[54,62](图6)。

1.4 “21·6”极端暴雨(21世纪20年代)

1.4.1 暴雨概况

2021年6月14—18日,南疆西部出现21世纪

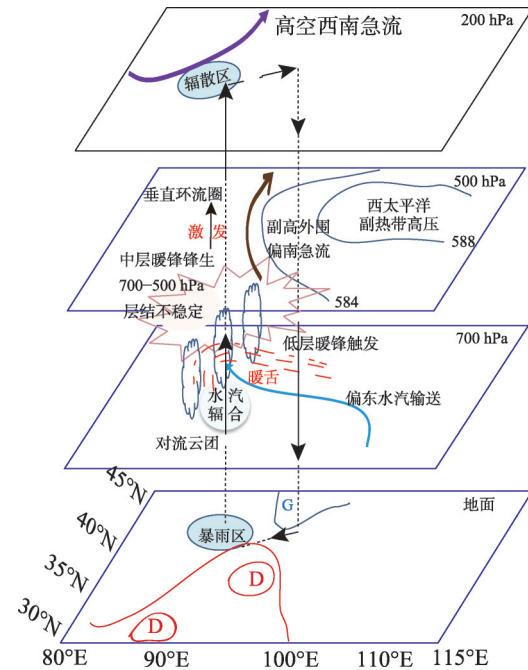


图6 “7·31”极端暴雨过程天气概念模型^[58]

Fig. 6 Conceptual weather model of the "7·31" extreme rainfall event^[58]

10年代暴雨强度最大、影响范围最广的极端暴雨过程(简称“21·6”极端暴雨,图7)。共出现148站暴雨、36站大暴雨和2站特大暴雨,过程最大降雨中心位于和田地区洛浦县山普鲁乡泥石流频发区1号站,累计降雨量达121.6 mm,暴雨站点的最长降水时间达62 h^[65-66]。“21·6”极端暴雨过程的对流特征明显,共出现54站次短时强降水事件,最大小时雨量为29.4 mm,最大3、6 h雨量分别达60.1、75.4 mm。和田地区洛浦站、墨玉站、和田站的日降水量突破有气象观测以来的极值,且均超过各自的年平均降水量;喀什地区莎车站、英吉沙站、叶城站日降水量

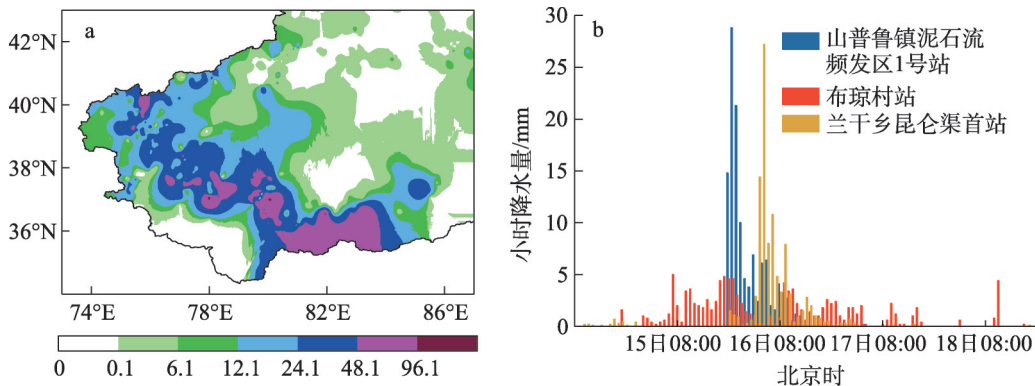


图7 “21·6”极端暴雨过程降水量(单位:mm)分布:(a)6月14—18日累计降水量;(b)3个暴雨站点逐小时降水量
Fig. 7 Distribution of observed precipitation (unit: mm) during the "21·6" extreme rainfall event: (a) accumulated precipitation from June 14 to 18; (b) hourly precipitation at three heavy rain stations

突破6月的历史极值^[67]。“21·6”极端暴雨引发山洪、泥石流等灾害,部分城市出现积涝,对交通、水利设施、人民生活等造成严重影响,12.6万人受灾,直接经济损失约1.1亿元^[65]。

1.4.2 大尺度环流背景

与南疆暴雨的典型环流形势类似^[68-70]，“21·6”极端暴雨过程中,100 hPa 南亚高压为“双体型”分布;500 hPa 中亚低涡与位于新疆东部的低槽,构成“东西夹攻”之势^[71];850 hPa 有塔里木东风低空急流配合,高、低空急流耦合,增强高空辐散和低层辐合,有利于整层垂直上升运动发展(图8)。与典型暴雨不同的是,“21·6”极端暴雨过程中,除西风带的“东西加攻”之外,还有中高纬与低纬环流系统形成的“南北结合”^[67]。暴雨前期,印度季风加强并北上至青藏高原,受高原切变线的影响水汽在高原北部汇聚;暴雨最强时段,中亚低涡前部的西南风与北上的印度季风汇合,促使高原偏南风增强并将水汽并向北输送至南疆;西风、季风和高原天气系统共同影响造成“21·6”极端暴雨过程^[65]。

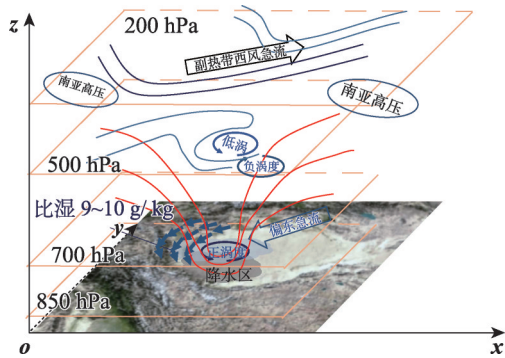


图8 “6·15”极端暴雨过程天气概念模型^[71]

Fig. 8 Conceptual weather model of the "6·15" extreme rainfall event^[71]

1.4.3 中尺度系统特征

低空切变线和中尺度地面辐合线是“21·6”极端暴雨的重要触发系统^[72]。“21·6”极端暴雨过程中,短时强降水事件主要由 β 中尺度和 α 中尺度的对流云团导致^[66],这些云团存在明显的列车效应和合并加强特征,持续性暴雨主要与长时间维持的涡旋状中尺度对流云带有关,暴雨区位于TBB梯度最大处,强降水出现时间与对流云团成熟和最低TBB出现时间一致。“21·6”极端暴雨中,强降水区雷达回波强度为35~50 dBZ,中心位置距离地面2~4 km,单体的水平尺度在20 km左右^[67],在雷达 $1.5^\circ\sim 3.4^\circ$

仰角的径向速度图上存在“逆风区”,径向速度辐合明显,且维持多个体扫,为强降水持续提供有利的动力条件。

1.4.4 动热力条件

除常规物理量外,“21·6”极端暴雨的研究中还使用二阶湿位涡^[73]对暴雨的动力和热力结构进行诊断分析。二阶湿位涡是在广义湿位涡的基础上进一步考虑了大气的梯度,既包含大气的湿斜压性、垂直涡度、垂直风切变和对流稳定度等动热力因子的一阶不连续性,又能反映这些物理信息的二阶梯度(即梯度本身的非均匀性),这是二阶湿位涡与其他诊断参数的最大差异^[73]。在“21·6”极端暴雨过程中,二阶湿位涡的大值区对暴雨的发展演变具有较好的指示性,在暴雨区上空,中层的负涡度覆盖在正涡度区之上,使垂直方向上的涡度梯度增强;随着水汽的抬升凝结,中层大气增湿增热,使对流稳定度在垂直方向的梯度增强。这两种垂直梯度都有利于促进垂直上升运动,导致极端暴雨形成^[71]。

1.4.5 水汽条件

“21·6”极端暴雨发生前大气可降水量出现明显跃增现象^[74],水汽主要由低层输入,随着暴雨增强,中高层水汽输入快速增加;暴雨开始前水汽通量迅速增大,600 hPa 以下的水汽强烈辐合;暴雨过程中,水汽通量的强度维持且大值区主要在800 hPa 以下,近地层水汽由辐合转为辐散,水汽辐合区主要位于对流层低层(800~650 hPa)^[75]。中亚到北大西洋地区是“21·6”极端暴雨过程水汽的主要源地,其中中亚地区的水汽输送量最大(占比33.2%),其次为北欧大陆(25.7%),地中海、黑海和里海区域第三(17.7%),上述3个区域共贡献了约80.0%的水汽量^[76]。“21·6”暴雨的极端性与水汽强度成正比,当水汽增加(减弱)时,暴雨区的上升运动明显增强(减弱),水汽辐合加强(减弱),低层水汽被抽吸并增加(减少)向中层的输送量,导致凝结潜热释放升高(降低),降水的极端性增加(减弱)^[77]。“21·6”极端暴雨过程中,对流的发展演变与整层水汽的变化有关,当改变水汽后,对流有效位能会发生明显变化。对流有效位能越强,对流触发后发展得更强,产生的垂直运动也更强,有利于进一步抽吸低层辐合水汽,形成有利于暴雨产生的正反馈机制^[78]。

2 极端暴雨代表性事件研究对预报业务发展的作用

“96·7”极端暴雨过程是新疆暴雨研究的里程碑事件,20世纪90年代,新疆仅有109个地面气象站和14个探空站;伊犁、阿克苏等地布设了用于防雹的711型模拟信号雷达;卫星资料主要以图片形式下发,自治区气象台每天仅能接收到2幅卫星云图,多数地州(市)气象台尚不能使用卫星监测资料^[51]。在有限的资料条件下,新疆气象科研人员对“96·7”极端暴雨的大尺度和天气尺度环流系统特征进行了深入分析,创新性地提出了“水汽次源地”的概念,为干旱区暴雨水汽研究提供了一个新的思路。基于“96·7”极端暴雨的相关研究,新疆维吾尔自治区气象局提出了人、机器和各种预报技术方法有机结合、优势互补的预报业务技术发展路线,并将发展人工智能专家系统列入“九五”期间的重点研发计划^[29],为新疆客观预报技术和智能网格预报发展奠定了基础。

进入21世纪后,气象现代化水平快速提高,FY-2C和FY-2D双星观测每30 min可获取1幅云图;截至2007年,新疆105个国家气象站全部安装了自动气象站,并在乌鲁木齐市、石河子市等地建成7部新一代C波段多普勒天气雷达,高时空分辨率的新型观测资料为研究中小尺度天气系统提供了条件^[52]。“7·17”极端暴雨是新疆暴雨研究“由大到小,由粗到细”的重要节点,自动站、卫星、雷达资料的综合应用,清晰地捕捉到中小尺度系统的发展和演变特征,进一步完善了新疆暴雨的形成机理。然而,新疆地域辽阔,截至2018年,天气雷达在全疆仍未组网观测,哈密市等地甚至还未布设新一代天气雷达,加之卫星资料的应用水平较低,全疆气象灾害防御能力较弱。“7·31”极端暴雨导致哈密市射月沟水库溃坝,造成重大人员伤亡,引起自治区相关部门高度关注,新疆气象台在深入研究“7·31”极端暴雨的基础上,聚焦新疆水库安全风险预警关键技术研发和应用,获批了2022年自治区重点研发计划项目,该项目的落地实施使新疆气象灾害风险预警服务迈上一个新的台阶。随着我国第二代静止气象卫星FY-4A投入业务运行,时空分辨率较第一代静止气象卫星提高了6倍,截至2020年底,全疆自动气象站达2 190个,并在10个地州(市)建成15部C波段天气雷达,“21·6”极端暴雨中,高时空分辨率的卫星、雷达等多源资料,不仅清晰地刻画触发暴

雨的中尺度云团的列车效应及合并加强特征,还为数值模式提供了优质的同化资料,通过数值模拟揭示了西风和季风相互作用的物理机制和水汽变化对暴雨的动力响应机制等,“21·6”极端暴雨首次从观测特征、天气学分析、诊断分析、数值模拟等多维度较完整地揭示了干旱区极端暴雨的成因。

一场极端暴雨为何有如此大的降水量?为什么会发生在这样一个特定的区域和特定的时段?它需要经历哪些复杂的物理过程和具备怎样的必要条件?回答这些问题,做天气复盘尚且不易,事先预报则更难^[4]。新疆气象事业快速发展,为暴雨研究创造了前所未有的机遇和条件,相信通过几代气象人的共同努力,我们对新疆极端暴雨形成机制的认识会更加清晰和准确。

3 展望

对40年来新疆极端暴雨代表性事件的研究作简要回顾。4次极端暴雨过程均发生在100 hPa南亚高压呈“双体型”分布的大尺度环流背景下,虽然大尺度环流背景类似,但4次极端暴雨的空间分布、持续时间、降水强度等存在明显差异。新疆的极端暴雨问题异常复杂,还有大量的问题需要深入研究。以下是对其中一些问题的思考与展望。

(1)新疆暴雨的相关理论构建尚不完善,与季风区暴雨相比,造成干旱区暴雨的天气系统之间的关系更加复杂^[65],不同尺度天气系统的相互作用,西风、季风和高原天气系统对新疆暴雨的影响机制等,还需从更开阔的视野进行全面、深入研究。

(2)随着气象观测体系的不断完善,双偏振天气雷达、风廓线雷达、微波辐射计、云雷达等多源高分辨率新资料,为揭示新疆暴雨中尺度天气系统的精细结构和系统组织化发展的演变过程提供了条件,但目前新疆的预报业务人员更注重对传统资料的分析,对各类新资料的应用还不充分,需尽快推进各类新资料在暴雨预报业务和科研中的应用,加深对新疆暴雨中小尺度系统的认识。

(3)新疆暴雨的数值模拟工作相对薄弱,模式的物理过程和动力框架的协调性还不能准确描述真实暴雨系统的动力和热力发展过程^[79-81],未来需要加强多源观测资料的综合应用,揭示干旱区暴雨中尺度系统的精细结构,为数值模拟提供观测验证,同时改进模式的物理过程,优化模式动力框架,提升资料同化水平,加深对新疆暴雨形成机理的

认识。

(4)人工智能技术(Artificial Intelligence, AI)的快速发展为天气预报的革新创造了条件^[82-83],目前AI技术在新疆天气预报业务中的应用水平较低,仍以传统的机器学习为主,缺乏AI算法训练数据集,适用于新疆智能网格降水预报业务的深度学习算法尚处在起步阶段^[84-86]。未来迫切需要加大对AI技术人才的培养,建立基于AI技术的新疆智能网格预报体系,有效提高暴雨等灾害性天气的预报和防御能力。

参考文献(References):

- [1] 陶诗言,赵思雄,周晓平等. 天气学和天气预报的研究进展[J]. 大气科学,2003,27(4):451-467. TAO Shiyang, ZHAO Sixiong, ZHOU Xiaoping, et al. The research progress of the synoptic meteorology and synoptic forecast[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2003, 27(4): 451-467. (in Chinese)
- [2] 章淹. 我国暴雨研究与应用的进展[J]. 水科学进展, 1991, 2(2): 137-144. ZHANG Yan. Recent progress on torrential rain in China[J]. Advances in Water Science, 1991, 2(2): 137-144. (in Chinese)
- [3] 赵思雄,孙建华. 我国暴雨机理与预报研究进展及其相关问题思考[J]. 暴雨灾害, 2019, 38(5): 422-430. ZHAO Sixiong, SUN Jianhua. Progress in mechanism study and forecast for heavy rain in China in recent 70 years[J]. Torrential Rain and Disasters, 2019, 38(5): 422-430. (in Chinese)
- [4] 寿绍文. 中国暴雨的天气学研究进展[J]. 暴雨灾害, 2019, 38(5): 450-463. SHOU Shaowen. Progress of synoptic studies for heavy rain in China[J]. Torrential Rain and Disasters, 2019, 38(5): 450-463. (in Chinese)
- [5] 马淑红. 新疆暴雨路径的研究[J]. 新疆气象, 1993, 16(4): 19-26. MA Shuhong. Research on the path of heavy rainstorms in Xinjiang[J]. Xinjiang Meteorology, 1993, 16(4): 19-26. (in Chinese)
- [6] 马淑红,席元伟. 新疆暴雨的若干规律性[J]. 气象学报, 1997, 55(2): 239-248. MA Shuhong, XI Yuanwei. Some regularities of storm rainfall in Xinjiang, China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1997, 55(2): 239-248. (in Chinese)
- [7] 金晨,何清,黄乾. 南疆暴雨研究进展[J]. 大气科学学报, 2023, 46(1): 82-96. JIN Chen, HE Qing, HUANG Qian. A review on rainstorm research in southern Xinjiang[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2023, 46(1): 82-96. (in Chinese)
- [8] 姚秀萍,肖峰,马嘉理. 新疆地区夏季降水研究进展与展望[J]. 沙漠与绿洲气象, 2023, 17(1): 1-9. YAO Xiuping, XIAO Feng, MA Jiali. Research progress and prospect of summer precipitation in Xinjiang[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2023, 17(1): 1-9. (in Chinese)
- [9] 阿利亚·艾尼瓦尔,吉丽特孜·加米西提. 当代新疆洪旱灾害研究回顾与展望[J]. 新疆地方志, 2023(1): 47-56. Aliya A, Jilitizi J. Review and prospect of research on flood and drought disasters in Xinjiang[J]. Xinjiang Local Records, 2023(1): 47-56. (in Chinese)
- [10] 高守亭,周玉淑,冉令坤. 我国暴雨形成机理及预报方法研究进展[J]. 大气科学, 2018, 42(4): 833-846. GAO Shouting, ZHOU Yushu, RAN Lingkun. A review on the formation mechanisms and forecast methods for torrential rain in China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2018, 42(4): 833-846. (in Chinese)
- [11] 张家宝,邓子风,马建民. 新疆大降水及其预报的研究(一)[J]. 新疆气象, 1986, 9(1): 2-8. ZHANG Jiabao, DENG Zifeng, MA Jianmin. Research on heavy precipitation and its forecast in Xinjiang (I) [J]. Xinjiang Meteorology, 1986, 9(1): 2-8. (in Chinese)
- [12] 张家宝,邓子风,马建民. 新疆大降水及其预报的研究(二)[J]. 新疆气象, 1986, 9(2): 7-16. ZHANG Jiabao, DENG Zifeng, MA Jianmin. Research on heavy precipitation and its forecast in Xinjiang (II) [J]. Xinjiang Meteorology, 1986, 9(2): 7-16. (in Chinese)
- [13] 陆帼英,徐夔慧. 新疆夏季大降水短期预报技术研究新进展[J]. 新疆气象, 1994, 17(2): 1-7. LU Guoying, XU Genghui. Research progress on short-term forecasting technology of summer heavy precipitation in Xinjiang [J]. Xinjiang Meteorology, 1994, 17(2): 1-7. (in Chinese)
- [14] 张家宝,邓子风. 新疆降水概论[M]. 北京:气象出版社, 1987. ZHANG Jiabao, DENG Zifeng. An introduction to precipitation in Xinjiang[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1987. (in Chinese)
- [15] 《新疆短期天气预报指导手册》编写组. 新疆短期天气预报指导手册[M]. 乌鲁木齐:新疆人民出版社, 1986. 《Guidelines for Short-Term Weather Forecasting in Xinjiang》Writing Group. Guidelines for short-term weather forecasting in Xinjiang[M]. Urumqi: Xinjiang People's Publishing House, 1986. (in Chinese)
- [16] 马力. 新疆典型大暴雨路径与影响系统的关系[J]. 新疆气象, 1993, 16(2): 12-15. MA Li. Relationship between the path and influencing systems of typical heavy rainstorms in Xinjiang[J]. Xinjiang Meteorology, 1993, 16(2): 12-15. (in Chinese)
- [17] 姚俊强,陈静,周桂香,等. 新疆南部暴雨研究:科学认知与主要进展[J]. 沙漠与绿洲气象, 2024, 18(5): 1-8. YAO Junqiang, CHEN Jing, ZHOU Guixiang, et al. Research on heavy rainfall in southern Xinjiang: scientific knowledge and research advances[J]. Desert and Oasis Meteorology,

- 2024,18(5):1-8.(in Chinese)
- [18] 王晓芳,崔春光.暴雨中尺度对流系统研究的若干进展[J].暴雨灾害,2011,30(2):97-106.WANG Xiaofang,CUI Chunguang. A number of advances of the research on heavy rain mesoscale convective systems[J]. *Torrential Rain and Disasters*,2011,30(2):97-106.(in Chinese)
- [19] 赵玉春.暴雨中尺度过程研究进展[J].气象科技进展,2014,4(2):36-44.ZHAO Yuchun. Research progress on mesoscale processes of heavy rain[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*,2014,4(2):36-44.(in Chinese)
- [20] 闵锦忠,吴乃庚.近二十年来暴雨和强对流可预报性研究进展[J].大气科学,2020,44(5):1039-1056. MIN Jinzhong, WU Naigeng. Advances in atmospheric predictability of heavy rain and severe convection[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*,2020,44(5):1039-1056.(in Chinese)
- [21] 孙淑清,周玉淑.近年来我国暴雨中尺度动力分析研究进展[J].大气科学,2007,31(6):1171-1188.SUN Shuqing, ZHOU Yushu. Advances in meso-scale dynamical analysis of torrential rain systems in recent years in China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*,2007,31(6):1171-1188.(in Chinese)
- [22] 高守亭,赵思雄,周晓平等.次天气尺度及中尺度暴雨系统研究进展[J].大气科学,2003,27(4):618-627.GAO Shouting,ZHAO Sixiong,ZHOU Xiaoping,et al. Progress of research on sub-synoptic scale and mesoscale torrential rain systems[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*,2003,27(4):618-627.(in Chinese)
- [23] 张文龙,崔晓鹏.近50年华北暴雨研究主要进展[J].暴雨灾害,2012,31(4):384-391.ZHANG Wenlong, CUI Xiaopeng. Main progress of torrential rain researches in north China during the past 50 years[J]. *Torrential Rain and Disasters*,2012,31(4):384-391.(in Chinese)
- [24] 丁一汇.论河南“75·8”特大暴雨的研究:回顾与评述[J].气象学报,2015,73(3):411-424.DING Yihui. On the study of the unprecedented heavy rainfall in Henan Province during 4-8 August 1975:review and assessment[J]. *Acta Meteorologica Sinica*,2015,73(3):411-424. (in Chinese)
- [25] 姚秀萍,李若莹.河南“21·7”极端暴雨的研究进展[J].气象学报,2023,81(6):853-865. YAO Xiuping, LI Ruoying. Progress in research of the July 2021 extreme precipitation event in Henan Province, China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*,2023,81(6):853-865.(in Chinese)
- [26] 黄玉霞,王宝鉴,黄武斌,等.我国西北暴雨的研究进展[J].暴雨灾害,2019,38(5):515-525. HUANG Yuxia, WANG Baojian, HUANG Wubin, et al. A review on rainstorm research in northwest China[J]. *Torrential Rain and Disasters*,2019,38(5):515-525.(in Chinese)
- [27] 张丙午.新疆主要气象灾害研究的进展[J].新疆气象,1994,17(5):1-5.ZHANG Bingwu. Research progress on major meteorological disasters in Xinjiang[J]. *Xinjiang Meteorology*,1994,17(5):1-5.(in Chinese)
- [28] 杨莲梅,李霞,张广兴.新疆夏季强降水研究若干进展及问题[J].气候与环境研究,2011,16(2):188-198. YANG Lianmei, LI Xia, ZHANG Guangxing. Some advances and problems in the study of heavy rain in Xinjiang[J]. *Climatic and Environmental Research*,2011,16(2):188-198.(in Chinese)
- [29] 徐羹慧.“96·7”新疆特大暴雨洪水预报服务技术研究的综述与启示[J].新疆气象,1997,20(1):1-4,11. XU Genghui. Review and insights of the forecasting technology for the "96·7" Extraordinary Rainstorm in Xinjiang[J]. *Xinjiang Meteorology*,1997,20(1):1-4,11.(in Chinese)
- [30] 张家宝.关于建设一支高素质的气象预报队伍的思考——在“96·7”新疆特大暴雨预报服务总结会上的讲话[J].新疆气象,1997,20(1):41-44,47. ZHANG Jiabao. Building a high-quality weather forecasting team - Speech at the summary meeting of the "96·7" extraordinary rainstorm in Xinjiang forecasting service [J]. *Xinjiang Meteorology*,1997,20(1):41-44,47. (in Chinese)
- [31] 陆帼英.“96·7”新疆特大暴雨洪水预报服务总结[J].新疆气象,1997,20(1):31-33. LU Guoying. Summary of the "96·7" Extraordinary Rainstorm in Xinjiang forecasting service[J]. *Xinjiang Meteorology*,1997,20(1):31-33. (in Chinese)
- [32] 刘惠云,吕新生,杨莲梅.“96·7”新疆特大暴雨中期天气过程分析[J].新疆气象,1998,21(1):17-20. LIU Huiyun, LYU Xinsheng, YANG Lianmei. Analysis of the medium-term weather process of the "96·7" Extraordinary Rainstorm in Xinjiang[J]. *Xinjiang Meteorology*,1998,21(1):17-20.(in Chinese)
- [33] 肖书君,魏荣庆.“96·7”特大暴雨大尺度环流形势分析[J].新疆气象,1997,20(1):5-7. XIAO Shujun, WEI Rongqing. Large-scale circulation analysis of the "96·7" extraordinary rainstorm in Xinjiang[J]. *Xinjiang Meteorology*,1997,20(1):5-7.(in Chinese)
- [34] 汪宏伟,王旭.“96·7”新疆特大暴雨诊断分析[J].新疆气象,1998,21(3):12-14. WANG Hongwei, WANG Xu. Diagnostic analysis of the "96·7" extraordinary rainstorm in Xinjiang[J]. *Xinjiang Meteorology*,1998,21(3):12-14.(in Chinese)
- [35] 汤浩,肖开提·多莱特,李霞,等.“96·7”新疆大暴雨过程

- 中大气能量及层结稳定度分析[J]. 新疆气象, 1998, 21(2): 21-23. TANG Hao, Xiaokaiti Duolaite, LI Xia, et al. Analysis of atmospheric energy and stratification stability during the "96·7" extraordinary rainstorm in Xinjiang[J]. Xinjiang Meteorology, 1998, 21(2): 21-23. (in Chinese)
- [36] 魏荣庆, 肖书君. "96·7" 新疆特大暴雨强度和落区[J]. 新疆气象, 1997, 20(1): 12-14. WEI Rongqing, XIAO Shujun. Intensity and location of the "96·7" extraordinary rainstorm in Xinjiang[J]. Xinjiang Meteorology, 1997, 20(1): 12-14. (in Chinese)
- [37] 马禹, 王旭, 陶祖钰. 新疆特大暴雨过程中的中尺度对流系统特征[J]. 新疆气象, 1998, 21(6): 3-7. MA Yu, WANG Xu, TAO Zuyu. Characteristics of mesoscale convective systems during the Xinjiang flood[J]. Xinjiang Meteorology, 1998, 21(6): 3-7. (in Chinese)
- [38] 白惠星, 李霞, 肖开提·多莱特, 等. "96·7" 新疆大暴雨中的大气三维流场结构[J]. 新疆气象, 1997, 20(6): 14-15, 23. BAI Huixing, LI Xia, Xiaokaiti Duolaite, et al. Three-dimensional airflow structure during the "96·7" extraordinary rainstorm in Xinjiang[J]. Xinjiang Meteorology, 1997, 20(6): 14-15, 23. (in Chinese)
- [39] 肖开提·多莱特, 汤浩, 李霞. "96·7" 新疆特大暴雨中 T63 产品预报能力的天气学检验[J]. 新疆气象, 1998, 21(1): 12-16. Xiaokaiti Duolaite, TANG Hao, LI Xia. Synoptic test of T_{63} product forecasting capability during the "96·7" extraordinary rainstorm in Xinjiang[J]. Xinjiang Meteorology, 1998, 21(1): 12-16. (in Chinese)
- [40] 李霞, 白惠星, 汤浩, 等. 新疆"96·7" 大暴雨过程中主要天气系统结构的天气动力学分析[J]. 新疆气象, 1997, 20(5): 10-12. LI Xia, BAI Huixing, TANG Hao, et al. Weather dynamics analysis of major weather systems during the "96·7" extraordinary rainstorm in Xinjiang[J]. Xinjiang Meteorology, 1997, 20(5): 10-12. (in Chinese)
- [41] 陈勇航, 徐希慧. "96·7" 新疆特大暴雨的卫星云图分析[J]. 新疆气象, 1997, 20(1): 14-16. CHEN Yonghang, XU Xihui. Satellite cloud image analysis of the "96·7" extraordinary rainstorm in Xinjiang[J]. Xinjiang Meteorology, 1997, 20(1): 14-16. (in Chinese)
- [42] 肖开提·多莱特, 汤浩, 李霞, 等. "96·7" 新疆特大暴雨的水汽条件研究[J]. 新疆气象, 1997, 20(1): 8-11. Xiaokaiti Duolaite, TANG Hao, LI Xia, et al. Moisture conditions during the "96·7" extraordinary rainstorm in Xinjiang[J]. Xinjiang Meteorology, 1997, 20(1): 8-11. (in Chinese)
- [43] 马禹, 王旭, 陶祖钰. 新疆"96·7" 特大暴雨水汽场特征综合研究[J]. 新疆气象, 1998, 21(5): 9-13. MA Yu, WANG Xu, TAO Zuyu. Comprehensive study on moisture field characteristics during the "96·7" extraordinary rainstorm in Xinjiang[J]. Xinjiang Meteorology, 1998, 21(5): 9-13. (in Chinese)
- [44] 王旭, 马禹, 赵兵科, 等. 新疆"96·7" 特大暴雨水汽输送通道的研究[J]. 新疆气象, 1999, 22(5): 5-9. WANG Xu, MA Yu, ZHAO Bingke, et al. Study on moisture transport channels during the "96·7" extraordinary rainstorm in Xinjiang[J]. Xinjiang Meteorology, 1999, 22(5): 5-9. (in Chinese)
- [45] 陈春艳, 孔期, 李如琦. 天山北坡一次特大暴雨过程诊断分析[J]. 气象, 2012, 38(1): 72-80. CHEN Chunyan, KONG Qi, LI Ruqi. Analysis of a major rainstorm in the north slope of Tianshan Mountains[J]. Meteorological Monthly, 2012, 38(1): 72-80. (in Chinese)
- [46] 王敏仲, 魏文寿, 杨莲梅, 等. 新疆2007年"7·17" 大降水天气过程诊断分析[J]. 中国沙漠, 2011, 31(1): 199-206. WANG Minzhong, WEI Wenshou, YANG Lianmei, et al. Meteorological process of "7·17" heavy rain event of 2007 in Xinjiang[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(1): 199-206. (in Chinese)
- [47] 王荣梅, 道然, 屠月青. 哈密地区7·17暴雨天气过程分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2010, 4(1): 36-40. WANG Rongmei, DAO Ran, TU Yueqing. Analysis of rainstorm on 7th July 2007 in Hami Area[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2010, 4(1): 36-40. (in Chinese)
- [48] 孔期, 郑永光, 陈春艳. 乌鲁木齐7·17暴雨的天气尺度与中尺度特征[J]. 应用气象学报, 2011, 22(1): 12-22. KONG Qi, ZHENG Yongguang, CHEN Chunyan. Synoptic scale and mesoscale characteristics of 7·17 Urumqi heavy rainfall in 2007[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2011, 22(1): 12-22. (in Chinese)
- [49] 姜彩莲, 郭琪, 李建刚, 等. 天山北坡一次暴雨天气成因初探[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(6): 160-166. JIANG Cailian, GUO Qi, LI Jiangang, et al. A preliminary analysis of formational causes of a heavy rain in north slope of Tianshan Mountains[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(6): 160-166. (in Chinese)
- [50] 杨莲梅, 张云惠, 汤浩. 2007年7月新疆三次暴雨过程的水汽特征分析[J]. 高原气象, 2012, 31(4): 963-973. YANG Lianmei, ZHANG Yunhui, TANG Hao. Analyses on water vapor characteristics in three heavy rainstorm processes of Xinjiang in July 2007[J]. Plateau Meteorology, 2012, 31(4): 963-973. (in Chinese)
- [51] 冯瑶. 东疆"7·17" 暴雨分析及预报服务偏差总结[J]. 沙漠与绿洲气象, 2010, 4(3): 41-44. FENG Yao. Analysis of 7·17 rainstorm and forecasting service deviation in eastern Xinjiang[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2010, 4(3): 41-44. (in Chinese)

- [52] 朱伟军,廖芷仪,何清,等.天山暴雨数值模拟的试验研究[J].中国沙漠,2012,32(4):1102-1109. ZHU Weijun, LIAO Zhiyi, HE Qing, et al. Numerical simulation of rainstorm in Tianshan Mountains Area[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(4): 1102-1109. (in Chinese)
- [53] 吴春霞,郭金强,赵俊荣. T213 预报产品对新疆“2007·07·17”大暴雨成因解析[J].新疆农垦科技,2009,32(4):65-66. WU Chunxia, GUO Jinqiang, ZHAO Junrong. T213 forecast product analysis of the causes of the "2007·07·17" heavy rainstorm in Xinjiang[J]. Xinjiang Farm Research of Science and Technology, 2009, 32(4): 65-66. (in Chinese)
- [54] 阿不力米提江·阿布力克木,汤浩,张俊兰.新疆一次罕见的暖区暴雨过程特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2019,13(6):1-12. Ablimitjan Ablkim, TANG Hao, ZHANG Junlan. Analysis of a rare warm-sector rainstorm process in Xinjiang[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2019, 13(6): 1-12. (in Chinese)
- [55] 冯瑶,阿依先木·尼牙孜,热依拉·玉努斯.新疆哈密“7·31”极端大暴雨过程成因分析[J].干旱气象,2021,39(3):426-435, 456. FENG Yao, Ayixianmu Niyazi, Reyila Yunusi. Cause analysis of an extreme heavy rainstorm process on July 31 of 2018 in Hami of Xinjiang[J]. Journal of Arid Meteorology, 2021, 39(3): 426-435, 456. (in Chinese)
- [56] 赵悬涛,刘昌军,王文川,等.射月沟水库溃坝洪水模拟及溃坝原因分析[J].中国农村水利水电,2022(5):171-177, 183. ZHANG Xuantao, LIU Changjun, WANG Wenchuan, et al. Dam break flood simulation of Sheyuegou reservoir and reasons for the dam break[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(5): 171-177, 183. (in Chinese)
- [57] 王梅霞,张太西,余行杰,等.新疆哈密2018·7·31特大暴雨山洪汇水量估算与应用研究[J].干旱区地理,2020,43(4):939-945. WANG Meixia, ZHANG Taixi, YU Xingjie, et al. Estimation and application of water-collecting amount during an extreme heavy rainfall induced flash flooding in Hami City on 31st July 2018 [J]. Arid Land Geography, 2020, 43(4): 939-945. (in Chinese)
- [58] 刘晶,刘兆旭,张晋茹,等.东天山哈密地区典型暴雨事件对流触发机制对比分析[J].大气科学,2022,46(4):965-988. LIU Jing, LIU Zhaoxu, ZHANG Jinru, et al. Comparison of convective triggering mechanisms of typical rainstorm events in the Hami Area of east Tianshan Mountains[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2022, 46(4): 965-988. (in Chinese)
- [59] 白松竹,热依拉·玉努斯,洪月,等.新疆哈密一次罕见暖区暴雨的成因分析[J].气象科技进展,2022,12(2):58-63, 80. BAI Songzhu, Reyila Yunusi, HONG Yue, et al. Cause analysis on rare warm-sector heavy rainfall in Hami of Xinjiang[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2022, 12(2): 58-63, 80. (in Chinese)
- [60] Liu J, Zhang J R, Liu F, et al. Drivers of a sudden mesoscale rainstorm in arid and semi-arid regions at the edge of the western Pacific subtropical high[J]. Meteorol Appl, 2020, 27(2): e1884.
- [61] 庄晓翠,李博渊,秦榕,等.新疆东部一次区域极端暴雨环境场特征[J].高原气象,2020,39(5):947-959. ZHUANG Xiaocui, LI Boyuan, QING Rong, et al. Analysis on the causes of an extreme rainstorm in the eastern Xinjiang[J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(5): 947-959. (in Chinese)
- [62] 刘晶,刘兆旭,杨莲梅,等.西风带大陆高压外围新疆哈密地区典型暴雨事件水汽输送特征对比分析[J].气象,2023,49(9):1045-1062. LIU Jing, LIU Zhaoxu, YANG Lianmei, et al. Water vapor transport characteristics during typical rainstorm events around westerlies continental high in Hami Area, Xinjiang[J]. Meteorological Monthly, 2023, 49(9): 1045-1062. (in Chinese)
- [63] Liu J, Liu F, Tuoliewubieke D, et al. Analysis of the water vapour transport and accumulation mechanism during the “7·31” extreme rainstorm event in the southeastern Hami area, China[J]. Meteorol Appl, 2020, 27(4): e1933.
- [64] Zou S, Duan W L, Christidis N, et al. An extreme rainfall event in summer 2018 of Hami city in eastern Xinjiang, China[J]. Adv Clim Change Res, 2021, 12(6): 795-803.
- [65] 张俊兰,李火青,汤浩.西风和印度季风协同作用对塔里木盆地极端暴雨影响的初步分析[J].大气科学学报,2023,46(2):242-258. ZHANG Junlan, LI Huoqing, TANG Hao. Preliminary analysis of the synergistic influence of westerly wind and Indian monsoon on rainstorm over Tarim Basin[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2023, 46(2): 242-258. (in Chinese)
- [66] 李晓萌,杨莲梅,李建刚,等.昆仑山北坡“6·14”极端暴雨过程的中尺度对流系统特征分析[J].干旱区地理,2024,47(10):1700-1712. LI Xiaomeng, YANG Lianmei, LI Jiangan, et al. Mesoscale convective systems characteristic analysis of the “6·14” extreme rainstorm in northern slope of the Kunlun Mountains[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(10): 1700-1712. (in Chinese)
- [67] 唐鹏,黄艳,张丽,等.中昆仑山北坡一次极端暴雨天气过程分析[J].沙漠与绿洲气象,2022,16(6):34-41. TANG Peng, HUANG Yan, ZHANG Li, et al. Causes analysis of

- an extreme torrential rain on the north slope of middle Kunlun Mountains[J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2022,16(6):34-41.(in Chinese)
- [68] 杨霞,张云惠,张超,等. 南疆西部“5·21”极端大暴雨成因分析[J]. *沙漠与绿洲气象*,2020,14(1):21-30. YANG Xia, ZHANG Yunhui, ZHANG Chao, et al. Causation analysis of the 21 May 2018 torrential rain in the west of southern Xinjiang[J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2020,14(1):21-30.(in Chinese)
- [69] 张云惠,李海燕,蔺喜禄,等. 南疆西部持续性暴雨环流背景及天气尺度的动力过程分析[J]. *气象*,2015,41(7):816-824. ZHANG Yunhui, LI Haiyan, LIN Xilu, et al. Analysis of continuous rainstorm circulation background and the dynamic process of synoptic-scale in west of southern Xinjiang[J]. *Meteorological Monthly*, 2015,41(7):816-824.(in Chinese)
- [70] 李如琦,李建刚,唐治,等. 中亚低涡引发的两次南疆西部暴雨中尺度特征对比分析[J]. *干旱气象*,2016,34(2):297-304. LI Ruqi, LI Jiangang, TANG Ye, et al. Comparison analysis on the mesoscale characteristics of two rainstorms processes caused by central Asian vortex in the west of south Xinjiang[J]. *Journal of Arid Meteorology*,2016,34(2):297-304.(in Chinese)
- [71] 胡素琴,希热娜依·铁里瓦尔地,李娜,等. 南疆西部干旱区两次极端暴雨过程对比分析[J]. *大气科学*,2022,46(5):1177-1197. HU Suqin, Xerinay Tiliwaldi, LI Na, et al. Comparative analysis of two extreme rainstorms in the arid area of western south Xinjiang[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2022, 46(5): 1177-1197. (in Chinese)
- [72] 希热娜依·铁里瓦尔地,玛依热·艾海提,孟凡雪,等. 南疆西部两次极端暴雨中尺度特征对比分析[J]. *沙漠与绿洲气象*,2022,16(5):47-55. Xerinay Tiliwaldi, Mayire Ahat, MENG Fanxue, et al. Comparative analysis on mesoscale characteristics of two extreme rainstorms in the west of southern Xinjiang[J]. *Desert and Oasis Meteorology*,2022,16(5):47-55.(in Chinese)
- [73] Li N, Gao S T, Ran L K. A PV-gradient related quantity in moist atmosphere and its application in the diagnosis of heavy precipitation[J]. *Atmos Res*,2016,167:285-297.
- [74] 李海花,闵月,李校宇,等. 昆仑山北麓两次极端暴雨水汽特征对比分析[J]. *干旱区地理*,2022,45(3):715-724. LI Haihua, MIN Yue, LI Anbei, et al. Comparative analysis of on water vapor characteristics of two extreme rainstorms in the north slope of Kunlun Mountains[J]. *Arid Land Geography*,2022,45(3):715-724.(in Chinese)
- [75] 李如琦,李校宇,李海花,等. 塔克拉玛干沙漠南缘两次极端暴雨的气流模型与水汽输送特征[J]. *沙漠与绿洲气象*,2022,16(6):1-10. LI Ruqi, LI Anbei, LI Haihua, et al. Air flow model and water vapor transport characteristics of two extreme rainstorms in the southern edge of Taklimakan Desert[J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2022,16(6):1-10.(in Chinese)
- [76] Chen Y R X, Liu B, Cai X, et al. Moisture transport and sources of an extreme rainfall event of June 2021 in southern Xinjiang, China[J]. *Adv Clim Change Res*,2022, 13(6):843-850.
- [77] 常友治. 南疆干旱区暴雨水汽变化影响与动力响应机制研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2023. CHANG Youzhi. Study on the impact of water vapor variation on heavy rainstorm in the arid region of southern Xinjiang and the dynamic response mechanism[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology,2023.(in Chinese)
- [78] 常友治,张杰,李娜,等. 水汽影响南疆干旱区极端降水的数值试验研究[J]. *大气科学*,2024,48(6):2424-2444. CHANG Youzhi, ZHANG Jie, LI Na, et al. Advanced numerical simulation to examine the impact of moisture on extreme precipitation in the arid zone of south Xinjiang[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2024,48(6):2424-2444.(in Chinese)
- [79] 谢越. 一次天山地区暴雨触发过程中地形作用机制的数值敏感性研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2023. XIE Yue. A numerical sensitivity study on the mechanism of topographic effects in the triggering process of a heavy rainstorm in the Tianshan Region[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology,2023.(in Chinese)
- [80] 曾勇,周玉淑,杨莲梅. 新疆西部一次大暴雨形成机理的数值模拟初步分析[J]. *大气科学*,2019,43(2):372-388. ZENG Yong, ZHOU Yushu, YANG Lianmei. A preliminary analysis of the formation mechanism for a heavy rainstorm in western Xinjiang by numerical simulation[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2019,43(2):372-388.(in Chinese)
- [81] 李伟,张俊兰,曾勇. 沿天山地区一次暴雨动力过程和云中水凝物粒子特征的数值模拟研究[J]. *沙漠与绿洲气象*,2020,14(5):19-26. LI Wei, ZHANG Junlan, ZENG Yong. Numerical simulation of the dynamic process and the characteristics of condensate particles in the cloud of a heavy rain process in the area along the Tianshan Mountains[J]. *Desert and Oasis Meteorology*,2020,14(5):19-26.(in Chinese)
- [82] 杨绚,代刊,朱跃建. 深度学习技术在智能网格天气预报中的应用进展与挑战[J]. *气象学报*,2022,80(5):649-

667. YANG Xuan, DAI Kan, ZHU Yuejian. Progress and challenges of deep learning techniques in intelligent grid weather forecasting[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2022, 80(5):649-667.(in Chinese)
- [83] 马雷鸣. 天气预报中的人工智能技术进展[J]. *地球科学进展*, 2020, 35(6):551-560. MA Leiming. Development of artificial intelligence technology in weather forecast[J]. *Advances in Earth Science*, 2020, 35(6): 551-560. (in Chinese)
- [84] 金荣花, 代刊, 赵瑞霞, 等. 我国无缝隙精细化网格天气预报技术进展与挑战[J]. *气象*, 2019, 45(4):445-457. JIN Ronghua, DAI Kan, ZHAO Ruixia, et al. Progress and challenge of seamless fine gridded weather forecasting technology in China[J]. *Meteorological Monthly*, 2019, 45(4):445-457.(in Chinese)
- [85] 张学文, 张家宝. 新疆气象手册[M]. 北京: 气象出版社, 2006. ZHANG Xuwen, ZHANG Jiabao. *Xinjiang meteorological handbook*[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006.(in Chinese)
- [86] 高浩, 唐世浩, 韩秀珍. 风云气象卫星发展及其应用[J]. *科技导报*, 2021, 39(15):9-22. GAO Hao, TANG Shihao, HAN Xiuzhen. China's Fengyun (FY) meteorological satellites, development and applications[J]. *Science & Technology Review*, 2021, 39(15):9-22.(in Chinese)

Research Advances on Typical Extreme Rainstorm Events in Xinjiang

YANG Xia, ZHOU Yaman, MOU Huan, XU Tingting, ZHANG Linmei
(Xinjiang Meteorological Observatory, Urumqi 830002, China)

Abstract With global warming and the increasing trend of warmer and wetter climate in Xinjiang, extreme rainfall events have occurred frequently in recent years, causing significant property losses and casualties. The retrospective analysis and systematic study of extreme rainfall processes are important for deepening our understanding of such weather events and for enhancing the accuracy of forecasting and early warning for extreme rainfall. This paper reviews the main research advances on representative extreme rainfall events in Xinjiang from the 1990s to the 2010s. It summarizes the achievements and deficiencies in studies of large-scale circulation backgrounds, interactions among multi-scale weather systems, moisture sources and transport, low- and high-level jets, and the mesoscale system characteristics of extreme rainfall in Xinjiang during different historical periods. The paper discusses the significant role of research on representative extreme rainfall events in the development of weather forecasting services in Xinjiang. It is emphasized that, with the continuous improvement of theories related to heavy rainfall in Xinjiang, new observational and numerical simulation techniques should be employed to conduct sustained research on the fine-scale characteristics of mesoscale systems in extreme rainfall in Xinjiang. A more detailed understanding of the three-dimensional structure and development mechanisms of these systems is essential for improving forecasting capabilities and disaster mitigation capacity for extreme rainfall events in Xinjiang.

Keywords extreme rainstorms; research advance; Xinjiang; arid region