

中国西南山地突发性暴雨特征 与机理研究的新进展

李国平^{1,2} 孙建华³ 王晓芳⁴

(1 成都信息工程大学大气科学学院, 成都 610225;

2 气象灾害预报预警与评估省部共建协同创新中心, 南京信息工程大学, 南京 210044;

3 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029; 4 中国气象局武汉暴雨研究所, 武汉 430205)

摘要: 我国西南多山地且地形十分复杂, 山地突发性暴雨及其诱发山洪地质灾害是我国西南山地灾害的主要类型。当前我国西南山地突发性暴雨预报水平不高、能力不足的一个重要原因就是未能有效考虑山地对暴雨及其突发性的影响, 缺乏山地突发性暴雨形成与发展的理论指导。对于国家重点研发计划项目支持下开展的山地突发性暴雨特征与机理研究所取得的重要进展进行了阶段性总结, 综述了我国西南特别是西南山地突发性暴雨及相关中尺度对流系统的基本特征和环境条件, 山地突发性暴雨的多尺度、多层次影响系统的协同作用, 地形引起的爬流和绕流对于山地突发性暴雨的不同作用, 惯性重力内波与对流耦合作用触发山地突发性暴雨的一种可能机理, 以及双低空急流对山地突发性暴雨的综合效应。最后对未来仍需深入开展的研究方向和切入点做了剖析和展望。

关键词: 突发性暴雨, 西南山地, 中尺度对流系统, 统计特征, 影响机理

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.04.010

New Research Progress on Characteristics and Mechanism of Sudden Rainstorm in Southwest China

Li Guoping^{1,2}, Sun Jianhua³, Wang Xiaofang⁴

(1 School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

2 Ministry of Education and Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

3 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

4 Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430205)

Abstract: Mountainous areas in Southwest China are very complicated. The sudden rainstorm and its induced flash flood are the main types of mountain disasters in Western China. At present, one of the important reasons for the low forecast level and insufficient ability of sudden rainstorm in Western China is that the influence of mountain on rainstorm and its outburst is not considered effectively, and the guidance of formation and development theory of mountain sudden rainstorm is lacking. This paper summarizes the important progress in the research on the characteristics and mechanism of mountain torrential rain, which was rarely seen in the past, under the support of the national key R & D program. The basic characteristics and environmental conditions of mountain sudden rainstorm and related mesoscale convective system in Western China, especially in Southwest China, and the multi-scale and multi-level influence system of mountain sudden rainstorm are discussed. The results show that there are different effects of creeping flow and circumfluence caused by topography on sudden rainstorm in mountainous area, the possible influence mechanism of coupling effect of inertial gravity internal wave and convection on sudden rainstorm in mountain area, and the comprehensive effect of double low-level jet stream on mountain sudden rainstorm. In the end, several research directions and breakthrough points that need to be strengthened in the future are analyzed and prospected.

Keywords: sudden rainstorm, southwest mountain, mesoscale convective system (MCS), statistical characteristics, mechanism

收稿日期: 2020年8月31日; 修回日期: 2021年4月13日

第一作者: 李国平(1963—), Email: liguoping@cuit.edu.cn

资助信息: 国家重点研发计划项目(2018YFC1507200);

国家自然科学基金项目(91937301, 41675057, 42075013)

0 引言

山地是海拔高度500 m以上且起伏大、多呈脉状分布的高地。山地地形对大气的影 响主要表现在以下几个方面: 1) 热力作用。同纬度地区, 地势越高, 气温越低。2) 动力作用(机械阻挡或屏障作用)。

地形是气流运行的主要障碍，可形成阻挡、爬坡、绕流和狭管等四种地形效应，也可以改变季风或寒潮的强度和方向。地形能够显著改变边界层的气流，如强风通过山脉时，在下风方向可形成一系列诸如背风槽、背风波、背风涡等背风天气系统。3) 对降水的影响。山脉可使湿润气团的水分在迎风坡由于地形抬升形成大量降水（地形雨），背风坡则由于气流下沉导致少雨而变得干燥，则山脉两侧的气候可以出现极大差异而成为气候分界线，如秦岭。4) 山地气候的形成。受海拔高度和山脉地形的影响，在山地地区形成的一种地方性气候^[1]。

我国西部多山地，其中西南地区地形更为复杂。山地突发性暴雨是我国重大自然灾害之一，山地突发性暴雨及其引发的次生灾害（如山洪、泥石流、滑坡、崩塌等）会造成严重的生命财产损失，其预警与防范是国家防灾减灾重大而迫切的战略需求，也是汛期重点防范的自然灾害。山地突发性暴雨预报预警难点是提升暴雨发生时间、区域和强度预报预警的准确性和时效性。当前我国西南山地突发性暴雨预报水平不高、能力不足的一个重要原因就是未能有效考虑山地对暴雨及其突发性的影响，缺乏山地突发性暴雨形成与发展的理论指导，亟需在综合观测的基础上，重点研究西南山地突发性暴雨的多尺度特征和动力学机理这一关键科学问题。希望通过对山地突发性暴雨触发机理、发展条件、中尺度对流系统的结构特征的研究，提出可指导建立山地突发暴雨的定量诊断技术与预报物理模型，发展西南山地突发性暴雨的预报理论和方法，丰富山地突发性暴雨的科学认识，为提高西南山地突发性暴雨预报准确率和山洪地质灾害防御能力提供科技支撑。

欧洲和美国已经开展山脉的动力、热力过程对局地环流形成的观测和理论研究，揭示了地形作用形成的上坡风、下坡风和山谷风的形成机制及其对局地天气的影响^[2]，以及中尺度地形的动力作用等^[3]。相较于长江下游江淮平原上以大别山等为代表的第三级阶梯地形，国内针对中国西南山地和对流发生环境的复杂性，开展了以青藏高原为代表的第一级阶梯地形和以四川盆地周边、云贵高原、秦岭—大巴山、巫山—三峡、武陵山—雪峰山等为代表的第二级阶梯地形背景下对流系统发生的环境条件、触发机制、结构特征等的分析^[4-7]，并利用新的观测手段得到的高分辨率资料，开展理论分析和数值模式试验，揭示了局地地形、山地边界层、地形重力波等过程对山地对流、降水系统发生发展的作用^[8-10]。当前，在山地突发性暴雨的特征与机理研究方面，急需基于综合观测数

据集获取多尺度信息，揭示山地突发性暴雨发生发展的条件、中尺度对流系统的结构与分布，阐明突发性暴雨发生发展的多尺度特征与动力学机制。下面本文将将以中国西南山区为例，对山地突发性暴雨事件的识别标准、影响系统与有利环境条件、高原中尺度对流系统的影响、地形绕流和爬流的作用、地形重力波的触发机理、双低空急流的综合效应、地形影响的数值研究等方面近5年以来的研究进展进行梳理、总结及展望。

1 西南山地突发性暴雨事件的识别标准

中国西部山地是暴雨及其次生灾害的多发区（高频区），这里的西部区主要涉及四川、重庆、贵州、湖北、湖南、陕西、甘肃、云南、广西，其中四川、重庆、贵州所代表的西南山地是本文关注的重点。

本文所指的西南山地突发性暴雨事件定义为：发生在西南山地（海拔高度介于500~3000 m）、降水区域直径小于200 km、1小时累计雨量 ≥ 20 mm且3小时累计雨量 ≥ 50 mm的强降水。

2 近十年四川山地暴雨的演变特征

黄楚惠等^[11]利用近十年（2010—2019年）国家气象基本站与加密气象自动站降水资料从气候态探究了四川省山地暴雨事件的空间分型与时间变化特征。在将四川山地暴雨事件划分为川西暴雨（SC-A）、川东北暴雨（SC-B）和川西、川东北两地并发型暴雨（SC-C）这三种类型的基础上，统计分析得到以下结果：1) 近十年四川山地暴雨的频次略有减少，但累计降雨量和地质灾害却有所增加。SC-A近十年发生的频次和强度呈增加趋势，而SC-B表现出不规则的振荡趋势。在三类暴雨事件中，SC-A在发生频次和强度上均为四川山地暴雨中最高的一类（图1）。2) 暴雨峰值逐年变化中，SC-A暴雨峰值雨量总体大于另两类暴雨，近十年中，峰值雨量除在8月呈上升趋势外，其余月份山地暴雨强度无明显的线性增减趋势。3) 三种类型的山地暴雨事件累计雨量和频次变化趋势比较一致，5—7月逐渐增加，7月达到最高，8—9月逐渐下降。5月和9月发生的暴雨事件主要为SC-B山地暴雨，6—8月则为SC-A山地暴雨为主。4) 四川山地暴雨事件夜间出现暴雨峰值的频次远高于白天，主要集中在后半夜（北京时00—06时），在研究的三种类型山地暴雨事件中，SC-A的夜间暴雨峰值出现次数最多。

3 山地突发性暴雨的多尺度影响系统

根据现有研究成果，可以概括出山地突发性

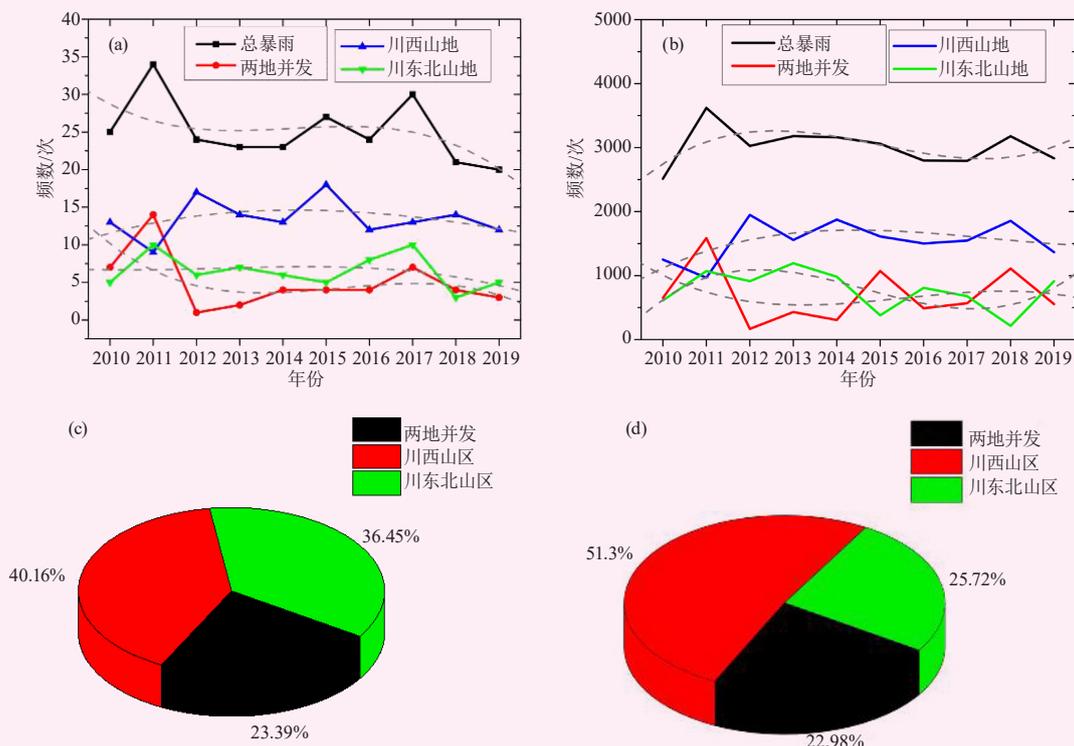


图1 变化趋势 (灰色虚线: 三次多项式拟合曲线): (a) 四川山地年暴雨频次、(b) 年累计暴雨量 (c) 区域占比: 暴雨频次、(d) 年累计暴雨量^[11]

Fig. 1 Variation trend of (a) annual frequency, (b) annual cumulative rainstorm over Sichuan mountains (grey dashed line: cubic polynomial fitting curve), (c) regional ratio of the frequency of rainstorms and (d) annual cumulative rainstorm^[11]

暴雨的影响系统主要有以下几类: 1) 高层系统 (200 hPa), 如高空急流、(惯性)重力波、南亚高压; 2) 中层系统 (500 hPa), 如高空槽、高原低涡 (简称高原涡)、高原切变线、西北太平洋副热带高压 (简称西太副高); 3) 中低层系统 (700 hPa), 如低空急流、低层切变线、西南低涡 (简称西南涡)、冷侵入 (冷空气); 4) 低层系统 (850 hPa): 边界层地形辐合线、西南β中尺度低涡、山区低空急流、暖湿输送 (暖湿气流); 5) (近) 地面系统, 如地面辐合线、地形准静止锋、东南沿海台风、中尺度对流系统 (Mesoscale Convective System, MCS), 其中MCS包括局地 (如四川盆地的丘陵地带) 生成的或上游地区 (如青藏高原) 东移而来的。

张芳丽等^[12]利用最新ERA5再分析资料、新一代雷达拼图资料, 对2017年5月初四川盆地东北部一次突发性暴雨事件的影响系统、动力和热力影响因子以及地形作用的分析表明: 此次暴雨事件的主要影响系统有中纬500 hPa东移低槽、西伸的西太副高、对流层中低层的西南低空急流以及低层切变线 (图2)。

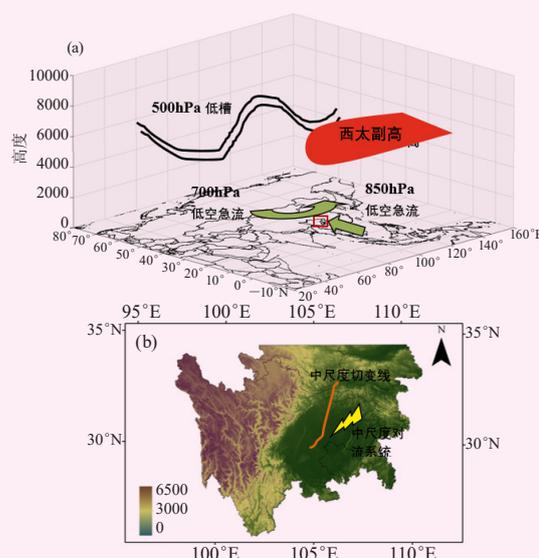


图2 四川盆地东北部突发性暴雨的影响系统示意图^[12] (a) 空中影响系统 (红色矩形框代表研究区域); (b) 近地面影响系统

Fig. 2 Diagram of influence systems on the sudden rainstorm in Northeast Sichuan Basin^[12] (a) influence systems above 850 hPa (the red rectangle represents the interesting area), (b) influence systems near the surface

利用高时空分辨率的相当黑体温度 (TBB) 数据, 基于模式匹配的自动识别追踪方法, 对2000—2016年暖季 (5—8月) 长江中游第二级阶梯地形区附近 (106°—113°E, 28°—35°N) 的MCSs进行识别、追踪和分类, 发现东移个例主要集中生成在研究区域的东部地区, 而准静止个例则主要生成在研究区域的西部。东移个例比准静止个例生命史更长, 移动距离更远 (图3), 成熟时刻云团面积更大, 对流发展更为旺盛, 对长江中下游地区的降水系统影响更大。得出有利于MCSs东移的大尺度环流背景条件: 青藏高原以东对流层中层浅槽和西太副高的配合为第二级阶梯地形东部对流的生成和东移提供了有利的环境条件; 低层正相对涡度和较强的风垂直切变为对流的组织和发展提供了动力条件; 强盛的低空急流不断向第二级阶梯地形东部和以东地区输送暖湿气流, 大量水汽的辐合有利于对流的发展和长时间维持^[13]。

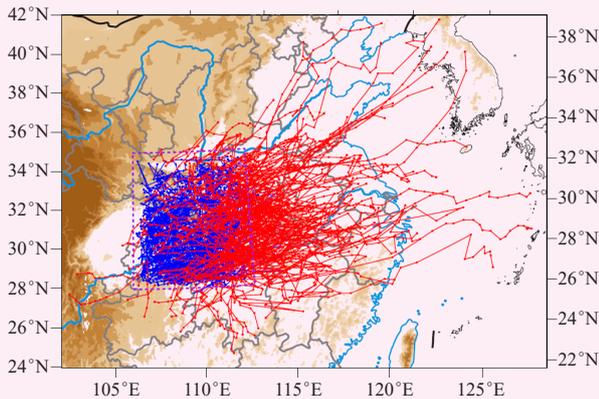


图3 长江中游第二级阶梯地形区移出和准静止MCSs个例路径图^[13]

(阴影为地形高度, 单位: m; 紫色方框代表研究区域, 红色实线代表移出个例的路径, 红色圆点代表移出个例各时刻的中心位置, 蓝色实线代表准静止个例的路径, 蓝色圆点代表准静止个例各时刻的中心位置)

Fig. 3 Tracks of all MCSs^[13]

(Colored shading denotes elevations higher than 500 m, units: m; the purple box denotes the study area, the red solid lines mark trajectories of MCSs propagating out of the study region, with their central locations at each recording time represented by red dots. the blue lines mark trajectories of quasi-stationary MCSs, with their central locations at each recording time represented by blue dots)

4 高原中尺度对流系统的影响

青藏高原高耸入云端, 平均海拔在4000 m以上, 是山地的极端情形。这使得它在暖季 (5—9月) 比同纬度地区能够接收更多的太阳短波辐射, 在太阳的炙烤下, 青藏高原成为一个巨大的热源。在暖季充沛的水汽供应下, 青藏高原上对流活动异常旺盛, 平均每1万 km²的面积上约有20~50个成熟的对流云生成。对

流云在西风带短波槽、切变线、高原涡等系统的影响下, 趋于组织化从而形成更大尺度的高原MCS。

基于逐小时的卫星TBB资料对近16个暖季的高原MCSs进行了统计, 共得到了9754个高原MCSs个例, 平均每天4个。分片位涡收支的结果表明, 在高原MCSs未移出高原以前, 它就开始了对于下游地区的影响, 它的影响主要通过降压与增加气旋式风场扰动来实现 (这有利于青藏高原东侧西南涡的形成); 当高原MCSs移出高原后, 这两种影响达到最强。数值模式敏感性试验表明, 对流凝结潜热释放是高原MCSs形成的必要条件, 高原MCSs除了通过产生降水直接影响高原东部与高原下游地区外, 还可以通过调整高原及其周边地区的大尺度环流形势, 以及与下游天气系统的相互作用从而对更广阔范围的降水包括山地突发性暴雨产生一定的间接影响^[7]。

5 地形引起的绕流和爬流对山地性突发暴雨的不同作用

通过绕流和爬流方程, 将低层流场分解为绕流和爬流分量, 探讨地形对于过山气流的影响及其对四川盆地西南部山区强降水的影响, 揭示地形引起的爬流和绕流对于山地突发性暴雨的不同作用。由于地形的阻挡作用, 使得来自东北方向的气流发生旋转, 产生绕流运动, 在盆地内形成局地涡旋。同时盆地和盆周山地之间的地形高度差强迫过山气流产生爬流运动, 导致系统性垂直上升运动加强。在绕流与爬流的共同作用下, 为此次突发性暴雨的发生发展提供了有利的流场条件。

将绕流和爬流矢量模的大小进行比较, 得到如图4所示的比值分布图。图中暴雨区 (102°—104°E, 29°—30°N) 内基本是爬流分量略大于绕流分量, 说明爬流运动要强于绕流运动, 爬流作用占主导地位。由此可见, 2018年5月21—22日发生在四川盆地西南部的山地突发性暴雨天气过程中, 过山气流由于地形海拔高度的变化而产生的地形适应运动, 主要是以爬流运动为主, 绕流运动次之, 并且爬流产生的地形垂直上升运动与雨带分布的相关性比系统性垂直上升运动更为密切^[14]。

6 地形重力波与对流耦合作用触发山地突发性暴雨的一种可能机理

谢家旭和李国平^[15]以四川盆地西南部2018年5月21日山地突发性暴雨事件为例, 通过天气动力学诊断与小波交叉谱能量分析, 得出该山地突发性暴雨过程中存在波长为150 km、周期为5 h的中尺度惯性重力内波 (简称重力波)。山地重力波是在地形、切变不稳

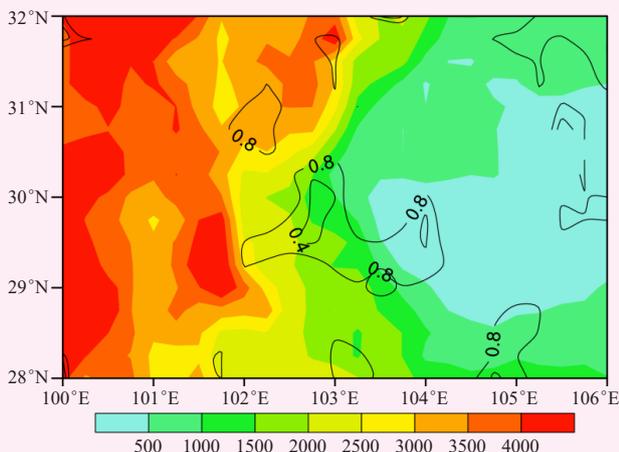


图4 平均绕流矢量模与爬流矢量模之比(经过九点平滑), 填色为地形高度(单位: m)^[14]

Fig. 4 Ratio (9-point smoothing) between mean vector modes of flow around and flow over, fill with terrain height (unit: m)^[14]

定以及非地转平衡三者的共同作用下形成, 其中切变不稳定是主导机制; 切变不稳定先于重力波的传播出现在下游降水区域, 可表征切变不稳定的理查孙数对重力波传播方向及降水落区有很好指示作用。

就整个物理过程而言(图5), 由于重力波的波动结构建立了低层辐合一高层辐散的流型, 使得低层水汽辐合上升, 输送到高空形成有组织的对流云。与此同时, 波动的下沉支气流促使低层不稳定能量累积; 低空急流产生的临界层效应导致波动扰动能量下传, 触发不稳定能量释放, 进一步加强对流, 最终引起突发性暴雨。因此可认为地形重力波与对流的耦合作用是山地对流发展并引发暴雨的一种可能机制。



图5 地形重力波与对流耦合作用触发山地突发性暴雨机制示意图

Fig. 5 Mechanism of sudden rainstorm in mountainous area triggered by coupling of topographic gravity wave and convection

7 双低空急流对山地突发性暴雨的协同效应对2017年5月初四川盆地东北部一次突发性暴雨

事件的诊断分析发现(图2a): 大尺度的西南低空急流和中尺度的山区低空急流在暴雨前8小时建立, 低空急流的增强(减弱)超前于暴雨发生(结束)。大尺度的低空急流与中尺度的山区低空急流的叠加使四川盆地东北部形成正涡度柱和低层强辐合柱的动力耦合, 低空急流最大风速出口辐合上升区与地形的辐合抬升作用叠加形成盆地东北部强烈的垂直上升运动, 成为山地暴雨突发的动力触发条件, 因低空急流建立的位势不稳定层结构成了暴雨的热力条件^[16]。

进一步通过天气动力学诊断分析与欧拉-拉格朗日方法相结合的水汽计算技术, 阐明了双(两类)低空急流对山地突发性暴雨的综合作用。山地突发性暴雨爆发时, 850 hPa的山区中尺度低空急流强度首先达最强, 即山区边界层低空急流与暴雨的发生同步; 而700 hPa的大尺度、偏南风低空急流随后达最强。因此双低空急流对暴雨有重要的综合效应, 不仅将暖湿空气输送到四川盆地, 促使对流层低层大气的的不稳定性增加, 为暴雨的发生创造必要的热力、动力触发条件^[16]。

此外, 大尺度低空急流对暴雨必需的水汽供应提供了载体, 并且在有利地形配合下形成水汽辐合汇聚。Zhang等^[16]明确了四川山地突发性暴雨的水汽源地和水汽输送路径, 量化确定出不同水汽源对暴雨的贡献。研究认为四川盆地东北部突发性暴雨事件的水汽主要来自孟加拉湾-中国南海和印度半岛-孟加拉湾, 对暴雨的水汽输送贡献率分别为66%和31%, 其中孟加拉湾-中国南海的水汽输送主要位于850 hPa以下的对流层低层, 印度半岛-孟加拉湾的输送主要来自600 hPa以下对流层的中低层(图6), 850 hPa山区边界层低空急流与700 hPa西南低空急流并发时其对水汽的汇聚作用更为显著。与西北暴雨不同的是, 由于青藏高原和秦巴山脉的地形阻挡, 源自中东经西风气流输送的水汽不仅量少而且主要位于中高层, 并非四川山地暴雨的主要来源。

8 地形对西南涡大暴雨影响的数值试验

在中尺度数值模式WRF成功模拟的基础上, 通过敏感性试验研究了西南涡移出盆地的东北路径上的秦巴山区地形对一次西南涡大暴雨过程的影响, 得到以下几点认识: 1) 地形通过对低涡本身的摩擦阻挡以及对山脉两侧南北气流的阻挡从而影响西南涡移动, 地形高度降低有利于低涡向东、向北移动。2) 地形对西南涡降水的增幅作用明显, 并且随着地形高度的升高, 降水强度增大, 雨带位置向西偏移。3) 地形主要通过影响水汽输送、辐合汇聚和垂直上升运动来

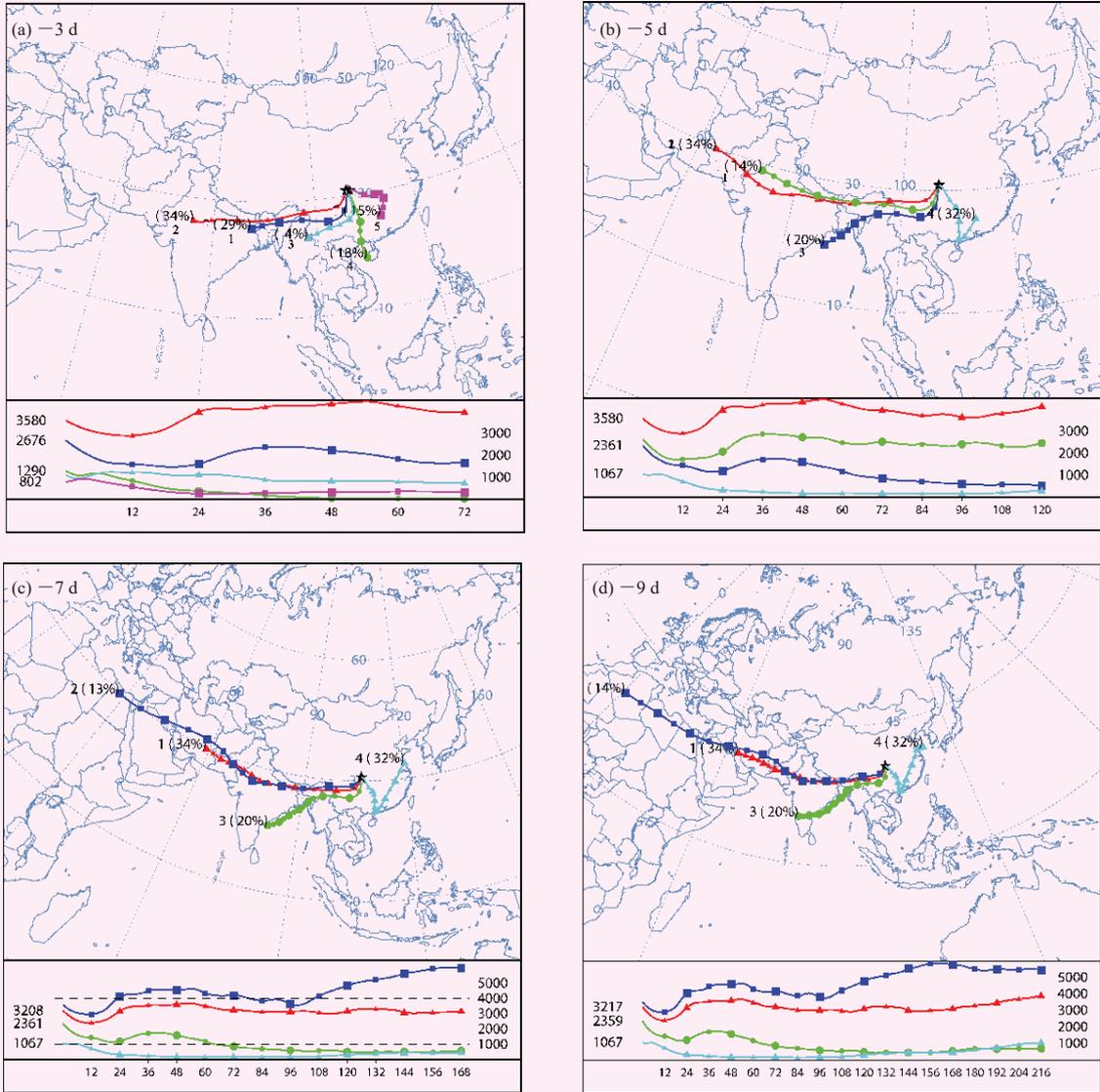


图6 气块在3天 (a)、5天 (b)、7天 (c) 和9天 (d) 前的平均轨迹及其对应的水汽贡献率^[16]

Fig. 6 The average trajectory (bold lines) and the corresponding percentage on the 3rd day (-3 d, a), 5th day (-5 d, b), 7th day (-7 d, c), 9th day (-9 d, d) before reaching the target area^[16]

影响降水强度和分布。雨带位置和强度与迎风坡水汽通量辐合区一致。地形强迫作用包括地形抬升与边界层摩擦辐合，其中地形抬升起主要作用，但在迎风坡边界层摩擦辐合也有重要贡献。地形强迫出的垂直上升速度以及6 h累计雨量在迎风坡随地形升高而增大，降水大值位于垂直上升运动大值的南侧。降水区外围的弱下沉运动和其北部的强上升运动在迎风坡形成一个局地垂直环流圈（次级环流），从而影响西南涡与地形辐合线的相互作用以及山地暴雨的演变^[17]。

地形高度的变化对山地突发性暴雨的强度与落区有重要影响。山脉高度上升能增强其对于气流的阻挡作用从而加强气流的低空辐合和高空辐散，叠加迎风坡的地形抬升作用形成强烈的垂直上升运动，加强大

气层结不稳定性，触发不稳定能量释放，配合充足的水汽最终促成暴雨发生。即地形通过改变山地动力、水汽等物理量场从而影响暴雨的落区和强度。地形的抬升作用造成水汽与不稳定能量在迎风坡堆积，使层结不稳定性增强，在强烈的上升运动作用下触发对流不稳定发展^[18]。

9 结论

深入认识中国不同气候区和地理位置极端强降水的演变特征及其发生机理、天气尺度强迫、中尺度过程、云微物理过程、气溶胶影响、城市和地形等复杂下垫面的独立影响和相互作用等问题，应是暴雨科学和预报未来需要进一步加强研究的重要方面^[19]。我国是一个多山地国家，西南地区的山地尤其复杂。因而

针对西南山地突发性暴雨特征与机理的研究有助于从机理上深化对西南山地突发性暴雨的科学认识,对山地突发性暴雨的准确预报具有重要意义,在山地突发性暴雨的形成发展机理这一核心科学问题的基础理论创新、关键技术方法突破及未来的成果推广应用等方面均具有重要价值。

展望地形暴雨特别是山地突发性暴雨特征与机理方面的未来研究,以下几个方向值得重点关注:

1) 西南山地突发性暴雨事件长序列的时空统计特征、发生发展的环境条件以及变化趋势的合成研究。

2) 与西南山地突发性暴雨密切相关的中尺度对流系统大样本的统计特征、三维结构特征和影响机制的深入研究。

3) 西南山地突发性暴雨过程中的地形与降水系统相互作用机理的细化研究,地形影响的高分辨率模式数值模拟研究,与非山地突发性暴雨的对比研究,分类的山地突发性暴雨物理概念模型的研究,以及山地暴雨夜发性(山地夜间暴雨)的成因分析与数值模拟。

4) 地形激发的重力波对西南山地突发性暴雨影响机理的系统性研究,重力波提取方法与诊断量的业务化应用研究。

5) 山区低空急流的时空分布特征及其与西南山地突发性暴雨关系的气候统计研究,与山地突发性暴雨有关的低空急流分型、判据与前兆信号的研究,以及低空急流对山地突发性暴雨作用机制的研究。

参考文献

- [1] 李国平. 近25年来中国山地气象研究进展. 气象科技进展, 2016, 5(3): 115-122.
- [2] Whiteman, C D. Observations of thermally developed wind systems in mountainous terrain. *Atmospheric Processes over Complex Terrain, Meteorological Monographs*, 1990, (45): 5-42.
- [3] Zhang F, Koch S E. Numerical simulations of a gravity wave event over CCOPE. Part II: waves generated by an orographic density current. *Monthly Weather Review*, 2000, 128(8): 2777-2796.
- [4] 崔春光, 闵爱荣, 胡伯威. 中尺度地形对“98.7”鄂东特大暴雨的动力作用. 气象学报, 2002, 60(5): 602-612.
- [5] 毕宝贵, 刘月巍, 李泽椿, 等. 秦岭大巴山地形对陕南强降水的影响研究. 高原气象, 2006, 25(3): 485-494.
- [6] 王婧羽, 王晓芳, 汪小康, 等. 青藏高原云团东传过程及其中MCS统计特征. 大气科学, 2019, 43(5): 1019-1040.
- [7] Mai Z, Fu S, Sun J. et al. Key statistical characteristics of the mesoscale convective systems generated over the Tibetan Plateau and their relationship to precipitation and southwest vortices. *International Journal of Climatology*, 2021, doi: 10.1002/joc.6735
- [8] 肖庆农, 伍荣生. 地形对于气流运动影响的数值研究. 气象学报, 1995, 53(1): 38-49.
- [9] 翟国庆, 高坤, 俞樟孝, 等. 暴雨过程中中尺度地形作用的数值试验. 大气科学, 1995, 19(4): 475-480.
- [10] 李唐棣, 谈哲敏. 条件不稳定大气中二维小尺度双脊地形上空对流及降水特征. 气象学报, 2012, 70(3): 536-548.
- [11] 黄楚惠, 李国平, 张芳丽, 等. 近10年气候变化影响下四川山地暴雨事件的演变特征. 暴雨灾害, 2020, 39(4): 335-343.
- [12] 张芳丽, 李国平, 罗潇. 四川盆地东北部一次突发性暴雨事件的影响系统分析. 高原气象, 2020, 39(2): 321-332.
- [13] Yang R, Zhang Y, Sun J, Li J. The comparison of statistical features and synoptic circulations between the eastward-propagating and quasistationary MCSs during the warm season around the second-step terrain along the middle reaches of the Yangtze River. *Science China Earth Sciences*, 2020, 63(8): 1209-1222.
- [14] 金妍, 李国平. 爬流和绕流对山地突发性暴雨的影响. 高原气象, 2021, 40(2): 314-323.
- [15] 谢家旭, 李国平. 重力波与对流耦合作用在一次山地突发性暴雨触发中的机理分析. 大气科学, 2021, 45(3): 617-632.
- [16] Zhang F L, Li G P, Yue J. The moisture sources and transport processes for a sudden rainstorm associated with double low-level jets in the northeast Sichuan Basin of China. *Atmosphere*, 2019, 10(3): 160, doi:10.3390/atmos10030160.
- [17] 王沛东, 李国平. 秦巴山区地形对一次西南涡大暴雨过程影响的数值试验. 云南大学学报(自然科学版), 2016, 38(3): 418-429.
- [18] 高珩洲, 李国平. 黔东南地形影响局地突发性暴雨的中尺度天气分析与数值试验. 高原气象, 2020, 39(2): 301-310.
- [19] 罗亚丽, 孙继松, 李英, 等. 中国暴雨的科学和预报: 改革开放40年研究成果. 气象学报, 2020, 78(3): 419-450.