卢楚翰,黄丁安,秦育婧,等.2024.西南地区东部夏季降水转化率特征及成因分析[J].暴雨灾害,43(5):499-508. LU Chuhan, HUANG Dingan, QIN Yujing, et al. 2024. Characteristics and cause analysis of summer precipitation conversion rate in eastern Southwest China [J]. Torrential Rain and Disasters,43(5):499-508 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-010

西南地区东部夏季降水转化率特征及成因分析

卢楚翰[1,2],黄丁安[3,4],秦育婧[1],李永华[5],向波[5]

(1. 南京信息工程大学 气象灾害教育部重点实验室,南京 210044;2. 无锡学院中国气象局生态系统碳源汇重点开放实验室,无锡 214000;3. 福建省灾害天气重点实验室,福州 350001;4. 福建省三明市气象局,三明 365000;5. 重庆市气候中心,重庆 401147)

摘　要: 利用格点化降水观测数据集(CN05.1)以及ECMWF再分析资料(ERA5),分析1961—2020年夏季西南地区东部(Eastern Southwest China,ESWC)的降水、水汽含量及降水转化率特征,并利用天气学分析方法初步探究地形分布对降水转化率空间分布差异的影响,最后利用中尺度数值模式WRF4.0 (Weather Research and Forecasting Model)设计地形敏感性试验验证地形对西南地区东部夏季降水的作用。结果表明:(1) 1961—2020年夏季西南地区东部的降水呈现东多西少的分布特征,但水汽含量却在其东南部和西北部存在两个大值区,水汽大值区降水转化率偏低,强降水区与水汽含量大值区分布存在明显差异,通过分析强降水区与水平风场及垂直速度场的形势配合发现地形是导致此差异的重要因素。(2) WRF模式能较好地模拟出西南地区东部夏季降水的空间分布特征,通过地形敏感性试验发现,区域内大娄山、方斗山及大巴山组成的西南-东北向山地地形分布对降水强度有显著影响,地形高度的降低将导致区域东南部降水量显著减少。(3) 敏感性试验中将区域地形高度分别降低一半和去除地形后,区域东南部的降水在月时间尺度中将分别减少9.89%和19.90%。地形高度的改变也会引起区域垂直速度、水平风场、水汽输送及水汽辐合量发生改变,当地形高度降低后,上升运动及西南风明显减弱,水汽输送强度降低,水汽辐合量减少,不利于降水形成。

关键词: 西南地区东部;水汽含量;降水转化率;地形敏感性试验;数值模拟

中图法分类号: P426.6　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2023-010

Characteristics and cause analysis of summer precipitation conversion rate in eastern Southwest China

LU Chuhan[1,2], HUANG Dingan[3,4], QIN Yujing[1], LI Yonghua[5], XIANG Bo[5]

(1. *Nanjing University of Information Science & Technology, Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing* 210044; 2. *Key Laboratory of Ecosystem Carbon Source and Sink, China Meteorological Administration (ECSS-CMA), Wuxi University, Wuxi* 214000; 3. *Fujian Provincial Key Laboratory of Severe Weather, Fuzhou* 350001; 4. *Sanming Meteorological Bureau, Sanming* 365000; 5. *Chongqing Climate Center, Chongqing* 401147)

Abstract: Using CN05.1 and ECMWF Reanalysis v5 (ERA5) data, the characteristics of precipitation, water vapor content and precipitation conversion rate in eastern Southwest China (ESWC) during the summer of 1961-2020 were analyzed, and the influence of terrain distribution on the spatial distribution difference of precipitation conversion rate was preliminarily explored by means of synoptic analysis. Finally, the mesoscale numerical Weather Research and Forecasting Model (WRF4.0) was used to design terrain sensitivity tests to verify the effect of terrain on summer precipitation in the ESWC. The results are as follow. (1) In the summer of 1961-2020, the precipitation in the ESWC shows the characteristics of more precipitation in the east and less precipitation in the west, but there are two large value areas of water vapor content in the southeast and northwest of ESWC. The precipitation conversion rate in the large value area of water vapor is low, and the distribution of the strong precipitation area and the large value area of water vapor content are significantly different. By analyzing the situation of heavy precipitation areas in conjunction with horizontal wind fields and vertical velocity fields, it is found that topographic distribution is an

收稿日期: 2023-01-29;**定稿日期:** 2023-11-14

资助项目: 江苏省重点研发计划产业前瞻与关键核心技术项目(BE2022161);中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J031);国家自然科学基金项目(41875111)

第一作者: 卢楚翰,主要从事天气预报服务研究。E-mail: luchuhan@nuist.edu.cn

通信作者: 黄丁安,主要从事天气预报服务研究。E-mail: hda0125@163.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

important factor leading to this difference. (2) WRF model can well reflect the characteristics of summer precipitation in the ESWC. The terrain sensitivity test shows that the southwest to northeast mountain terrain distribution consisting of Dalou Mountain, Fangdou Mountain and Daba Mountain has a significant impact on the intensity of precipitation, and the decrease of terrain height will lead to a significant decrease of precipitation in the southeastern part of the region. (3) In particular, after reducing the topographic height of the region by half and to 0, respectively, the precipitation in the southeast of the region will decrease by 9.89% and 19.90% respectively on the monthly time scale. The change of topographic height will also cause the change of vertical velocity, horizontal wind field, water vapor transport and water vapor convergence, which will lead to the change of precipitation intensity. When the terrain height decreases, the upward motion and the southwest wind will weaken obviously, and the intensity of water vapor transport and water vapor convergence will decrease, which is not conducive to the formation of precipitation.

Key words: eastern Southwest China; moisture content; precipitation conversion rate; terrain sensitivity test; numerical simulation

引 言

近几十年来，全球变暖背景下极端天气事件频发，且强度不断增强(李永华等，2013；Asadieh et al.，2015；蔡芗宁等，2024)。作为极端天气典型事件之一的旱涝灾害，其发生给社会造成了巨大的损失与危害。中国西南地区东部(文中指105°—110°E，27°—32°N范围内的地区，主要包括四川东部、重庆、贵州北部以及湖南西部局部和湖北西部局部地区)位于东亚季风区，属于亚热带季风气候，临近气候带交界处，水汽特征变化明显，是夏季旱涝发生频率较高的地区之一(李永华等，2010)。同时，西南地区东部位于三峡大坝上游，该地区降水对三峡水库蓄水调度和长江中下游地区洪水调度决策具有重要影响。因此，对于西南地区东部降水研究备受关注。一般而言，降水受多种因素影响，气柱中的水汽含量只有一部分能转化为实际降水，而地形对水汽含量分布及降水形成具有重要影响，因此分析西南地区东部的地形对夏季降水的影响对于研究区域旱涝成因具有重要意义。

整层大气的水汽含量又称为可降水量，在一定程度上可作为表征区域降水能力的重要指标。由于大气水汽含量分布受到如海拔高度、地理纬度及大气环流等诸多因素的影响(邹进上等，1981；翟盘茂等，1997)，且降水形成过程复杂，因此水汽含量和降水效率可能在空间分布上表现出一定的差异性。如王维佳等(2011)通过分析四川上空大气可降水量的时空分布特征，发现大气可降水量的大值区出现在东部盆地区，而降水效率的高值区出现在西部高山高原区。周顺武等(2011)研究了1979—2008年夏季青藏高原上空水汽含量与地面降水的联系，发现青海东北部水汽含量较大，而降水量相对较少。

地形分布是影响水汽含量变化的因子之一，在一定程度上对降水产生影响(吴胜刚等，2016)，因此地形对水汽含量以及降水的作用受到学者们的广泛关注。由于不同地形的高度和受热条件不同，其地表和高空温、压、湿的分布也因此产生变化，同时气流受到地形影响出现爬坡和绕流运动，将对降水产生重要影响(何光碧，2021)。以往研究表明，局地地形在区域气候的形成过程中起着重要的作用(Shi et al.，2019；何博翰等，2020)。当大地形发生改变后，影响系统、低空急流的位置和强度、冷空气路径等也随之发生改变(康岚等，2004)；而小尺度的地形因子则对降水的空间分布起决定性作用(张杰等，2008)，能改变降水的强度和范围(袁有林等，2015；于晓晶等，2016)。如刘洋等(2015)研究表明“8·31”云阳特大暴雨过程中，大巴山地形的改变会对降水的非均匀性、强降水中心的位置和强度产生重要影响。马思敏等(2022)利用WRF模式模拟发现随着六盘山区地形的增高，降水量会显著增大，且强降水主要出现在山脉的迎风坡。

西南地区东部的地理位置特殊，西临青藏高原与四川盆地，南北方向分别临近云贵高原与秦岭山脉，且距离海洋较近，海-陆-气相互作用显著。区域西南-东北走向一带的山地地形由大娄山、方斗山及大巴山组成，降水形成过程复杂。西南地区东部夏季降水呈东多西少的分布特征，但其水汽含量却表现为多-少-多的自西向东分布，降水大值区与水汽含量大值区的分布存在明显差异，其可能与该区域西南-东北走向的山地地形存在重要联系。为探究上述科学问题，本文分析了西南地区东部水汽含量和降水效率的分布特征，并通过中尺度数值模式揭示西南地区东部的山地地形对区域降水分布的影响，以期提升复杂地形下西南地区东部夏季降水成因的认识，提高区域夏季旱涝预测水平，为政府决策、公众防灾减灾、保障人民生活和财产安全提供科学参考。

1 资料及方法

1.1 资料说明

本文使用的资料有：(1) 欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的1961—2020年逐小时再分析资料(ERA5)，要素包括：位势高度、气温、纬向风、经向风、比湿、降水、海温、地面2 m气温、地面气压、10 m风场、

地表温度等，水平分辨率为0.25°×0.25°，垂直层次为1 000—1 hPa共37层(Hersbach et al.，2020)。(2) 由中国气象数据网提供的1961—2020年夏季(6—8月)逐月的格点化观测数据集CN05.1中的降水资料。

1.2 研究方法

为验证西南地区东部山地地形在夏季降水中的作用，利用数值模式WRF4.0 (Weather Research and Forecasting Model v4.0) (Skamarock et al.，2019)开展数值研究试验。在试验中模式使用开发团队发布的“CONUS”参数化方案，此套参数化方案已在许多研究中有较好的应用(吴志鹏等，2021；聂童等，2023)。具体的参数化方案如下：Thompson V3.1微物理过程、Tiedtke积云对流、Noah陆面过程、MYJ行星边界层及RRTMG长波辐射与短波辐射参数化方案。利用ERA5数据作为模式的初始场与侧边界，积分步长为90 s。图1为1961—2020年西南地区东部8月区域平均累计降水的距平值随时间的变化，从中可见1998年8月的累计降水为正异常的最大值。因此，本文选定1998年8月为模拟时段以探究西南地区东部的地形对降水的影响。为确定模式的积分时间，本研究首先以1998年(强降水年)夏季时段为初选的代表性时段。

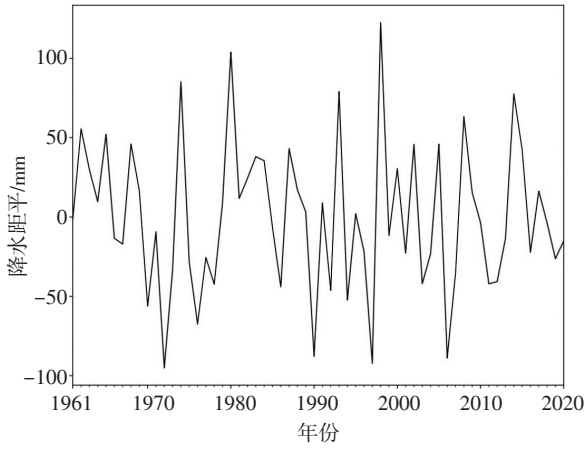


图1 1961—2020年西南地区东部8月平均累计降水的距平值(单位：mm)随时间的变化

Fig. 1 Changes of regional mean cumulative precipitation anomalies (unit: mm) over time in ESWC in August from 1961 to 2020

模式设定积分时长为1998年7月26日00时(北京时，下同)—9月1日00时，其中7月26日00时—8月1日00时为模式的自适应时间，8月1日00时—9月1日00时的模拟用于结果分析。采用如图2所示的双重嵌套，d01区域主要包括中国区域大部及中南半岛中北部，d02区域主要包括西南地区东部。d01和d02区域的水平分辨率分别为30 km和10 km。由上述分析及图2可知，西南地区东部(d02区域)的地势特征为西南–东北一带地势高而东南、西北部地势低。针对此特征，以区域的对角线划分，将西南地区东部分为东南和西北两个区域，并根据研究目标设定了如表1所示的地形敏感性试验方案。在敏感性试验中，区域地形高度改变后，原地形覆盖区域风场初始场将通过调整后近地面风场和原近地面风场线性插值获得。通过比较控制试验和敏感性试验的模拟结果，探究西南地区东部地形对该区域降水的影响。

表1 地形敏感试验方案

Table 1 Terrain sensitive test scheme

试验名称	试验方案
CTRL	保持原地形高度
NW_H0.5	西北部地形高度降为原来的1/2
SE_H0.5	东南部地形高度降为原来的1/2
H0.5	全域地形高度降为原来的1/2
H0	全域地形高度降为0

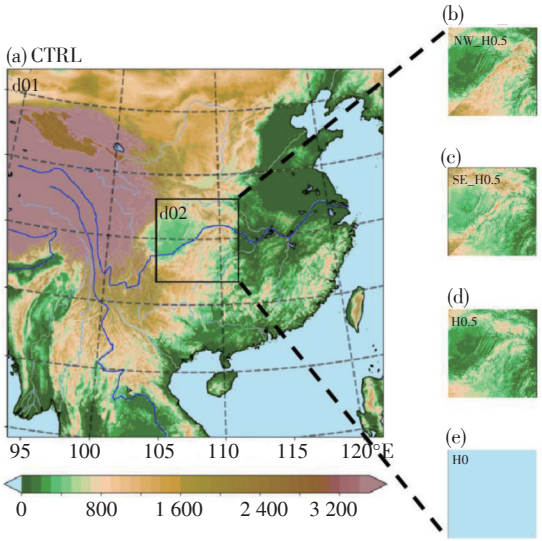


图2 控制试验CTRL (a)以及地形敏感试验NW_H0.5 (b)、SE_H0.5 (c)、H0.5 (d)和H0 (e)模拟区域嵌套设置和地形高度(填色，单位：m)

Fig.2 The simulated area nesting settings and terrain (shaded, unit: m) control test of (a) CTRL and terrain sensitive test (b) NW_H0.5, (c) SE_H0.5, (d) H0.5 and (e) H0

2 西南地区东部夏季降水转化率特征

2.1 夏季降水转化率分布特征

为分析西南地区东部夏季降水的分布特征，图3a及3b首先给出了基于CN05.1再分析资料与ERA5再分析资料的西南地区东部6—8月多年平均降水量。可以看出夏季降水的大值区主要集中在区域的东部与北部，而在西部降水较少，特别是西南–东北一带为降水的低值区。ERA5再分析数据与观测资料的空间分布特征有着较好的一致性，但数值略有偏大，说明ERA5再分析数据对西南地区东部夏季降水特征有较

好的表现能力。

充足的水汽是形成降水的首要条件，图3c给出西南地区东部6—8月多年平均水汽含量分布。可见水汽含量的大值区分布与降水分布具有明显的差异，尤其在区域西北部和东南部的平原地带，水汽含量较为充足，而区域西南-东北一带为山地地形，海拔较高，导致水汽含量较西北、东南平原地带更少。值得注意的是，区域西北部的水汽含量大值区却与夏季降水在该地区的偏少分布特征鲜明对比。这表明该地区实际水汽的转化效率较低。为此，进一步将降水量与单位大气柱内水汽含量之比定义为降水转化率，以此表征可降水量能够转化为降水的能力(Simmonds et al., 1999；周顺武等，2011)。从西南地区东部6—8月降水转化率多年平均的空间分布(图3d)可知，西南地区东部各地的降水转化率明显不同。整体而言，区域东部的降水转化率在15 %以上，尤其是在重庆的北部及湖北的西部，最高值达到30 %以上。降水转化率的低值区出现在重庆西部，最低值在10 %以下。可见区域西部的降水量占可降水量的比重较小，降水转化率在西南地区东部表现出明显的东西分布不均匀的特征。

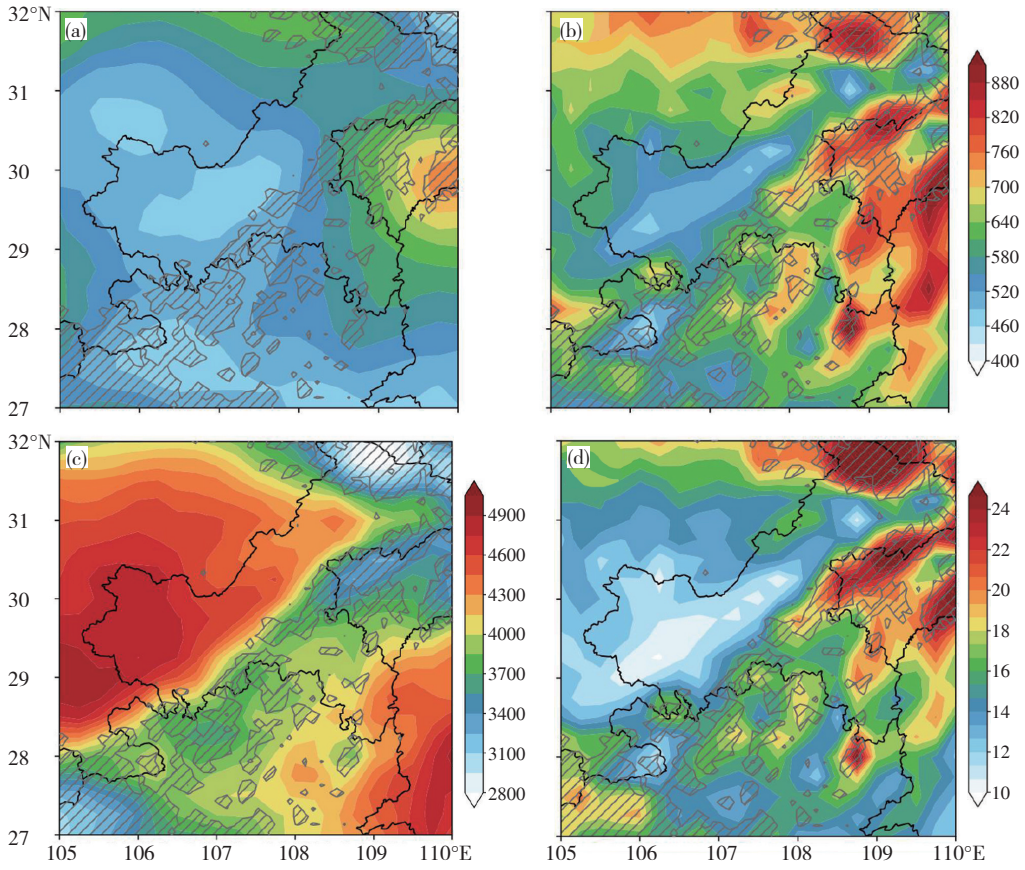


图3 基于CN05.1再分析资料(a)和ERA5再分析资料(b)的西南地区东部1961—2020年6—8月多年平均降水量(单位：mm)及基于ERA5再分析资料的6—8月多年平均水汽含量(c，单位：kg·m^{-2})和降水转化率(d，单位：%)的空间分布(其中灰色斜线区域代表地形高度大于1 000 m)

Fig. 3 The spatial distribution of annual mean precipitation (unit: mm) from June to August based on (a) CN05.1 reanalysis data and (b) ERA5 reanalysis data from 1961 to 2020 and the annual mean water vapor content (c, unit: kg·m^{-2}) and precipitation conversion rate (d, unit: %) from June to August based on the ERA5 reanalysis data in the ESWC (where the gray oblique line area represents the terrain height greater than 1 000 m)

2.2 夏季降水转化率分布差异的可能成因

降水的形成不仅需要充足的水汽，也需要强烈的上升运动。西南地区东部的水汽含量主要集中在该区域的西北部和东南部，而降水却主要集中在其东部，为探究其物理成因，图4a—c给出西南地区东部6—8月多年平均的925 hPa、850 hPa、700 hPa垂直速度分布。从中可见垂直速度的上升区主要出现在区域的东南部，而区域西北部则多为下沉区或弱上升区。在925 hPa和850 hPa高度层上，区域出现沿着西南-东北走向的狭长下沉带，而在700 hPa的高度层中，西南地区东部几乎全域均为上升区。因此，虽然水汽含量的大值区主要位于区域东南部和西北部，但西南地区东部的东部地区垂直抬升条件明显较好，从而对应较高降水转化率，而西南地区东部的西部地区垂直抬升偏弱，导致降水转化率偏低。

为分析西南地区东部东、西部垂直速度的分布差

异的原因，图4d—f分别给出西南地区东部6—8月多年平均的925 hPa、850 hPa、700 hPa水平风场。由于我国夏季尤其是东部地区盛行西南风，同时西南地区东部位于青藏高原的东南部，受到大地形的绕流作用。因此，西南地区东部低层盛行偏南风，在925 hPa和850 hPa为东南风，700 hPa为西南风，从区域东南部吹向西北部。此外，西南地区东部的东南、西北部地势较低，而西南-东北一带为山地地形，因而东南部为迎风坡，由于山脉迎风坡的阻挡抬升作用，使得向北爬升的气流在区域东部的垂直运动更显著，从而导致西南地区东部夏季降水东部多而西部少，造成降水转化率的东西分布差异。

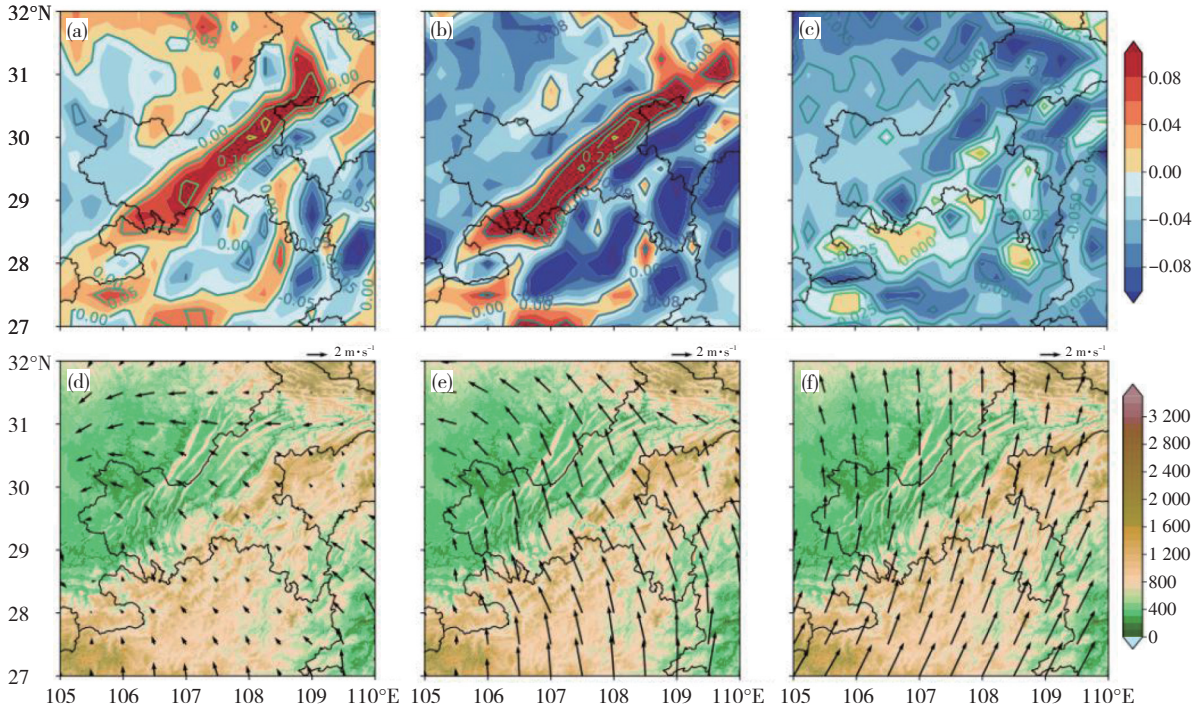


图4 西南地区东部1961—2020年6—8月多年平均925 hPa (a)、850 hPa (b)、700 hPa (c)垂直速度(阴影，单位：Pa·s^{-1})空间分布及925 hPa (d)、850 hPa (e)、700 hPa (f)水平风速(单位：m·s^{-1})空间分布(其中图d—f中的阴影代表地形高度)

Fig. 4 The spatial distribution of annual mean vertical velocity (unit: Pa·s^{-1}) distribution of (a) 925 hPa, (b) 850 hPa and (c) 700 hPa and horizontal wind velocity (unit: m·s^{-1}) of (d) 925 hPa, (e) 850 hPa and (f) 700 hPa from June to August in the ESWC (where shadows in Fig.d–f represent terrain height)

3 地形对降水的影响

3.1 控制试验结果验证

为验证数值模拟结果的可靠性，图5给出1998年8月CN05.1降水与WRF控制试验模拟的降水分布。可以发现模拟的降水分布特征与CN05.1降水特征一致，降水的大值区均出现在重庆的东部及湖北的西南部，低值区主要出现贵州东北部和湖南的西北部，且两者在四川东部均有一个降水的次低值区，具有相似的降水分布特征。数值模拟的降水量较CN05.1降水偏大，这可能是由于模式是以ERA5作为驱动场，其本身数值偏高所致(如图3)。另外，西南地区东部1998年8月累计降水模态与夏季累计降水的气候态(图3)也具有较好的一致性，因此利用该时段探究地形对降水的影响具有较好的代表性。

3.2 地形敏感性试验

为揭示西南地区东部夏季降水对地形的响应，图6给出西南地区东部1998年8月模式敏感性试验与控制试验的累计降水差值。从中可见四组地形敏感性试验均反映出西南地区东部累计降水量随地形改变发生的变化，其中负值代表累计降水的减少量。分析可知，累计降水量减少的区域主要出现在区域的东南部，且随着地形降低的程度越大，范围越大，累计降水量减少得越明显。特别地，由于重庆北部与大巴山南部接壤，NW_H0.5试验中将西北部的地形高度降低1/2，将导致重庆北部的地形梯度减小，使降水减少，但区域东南部的累计降水改变并不显著(1.32%)。而在SE_H0.5试验中，区域东南部的累计降水量总体减少更为明显(达3.62%)。如果考虑全地形梯度降低1/2或者去除区域地形，区域东南部降水减少程度显著增大，分别达9.89 %、19.90 %。此外，通过计算1974年和1980年8月模式SE_H0.5敏感性试验与控制试验的累计降水差值，发现将东南部的地形高度降低后，区域东南部的累计降水量明显减少(分别减少12.81%和

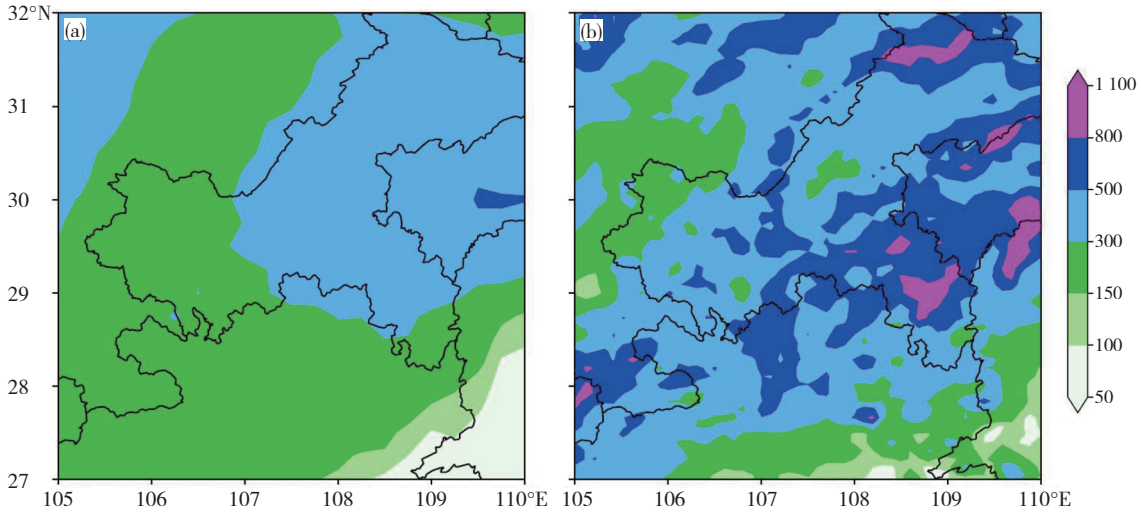


图5 西南地区东部1998年8月CN05.1降水(a,单位:mm)与WRF控制试验模拟降水(b,单位:mm)的空间分布

Fig. 5 The spatial distribution of (a) CN05.1 precipitation (unit: mm) and (b) simulated precipitation (unit: mm) of WRF control test in the ESWC in August 1998

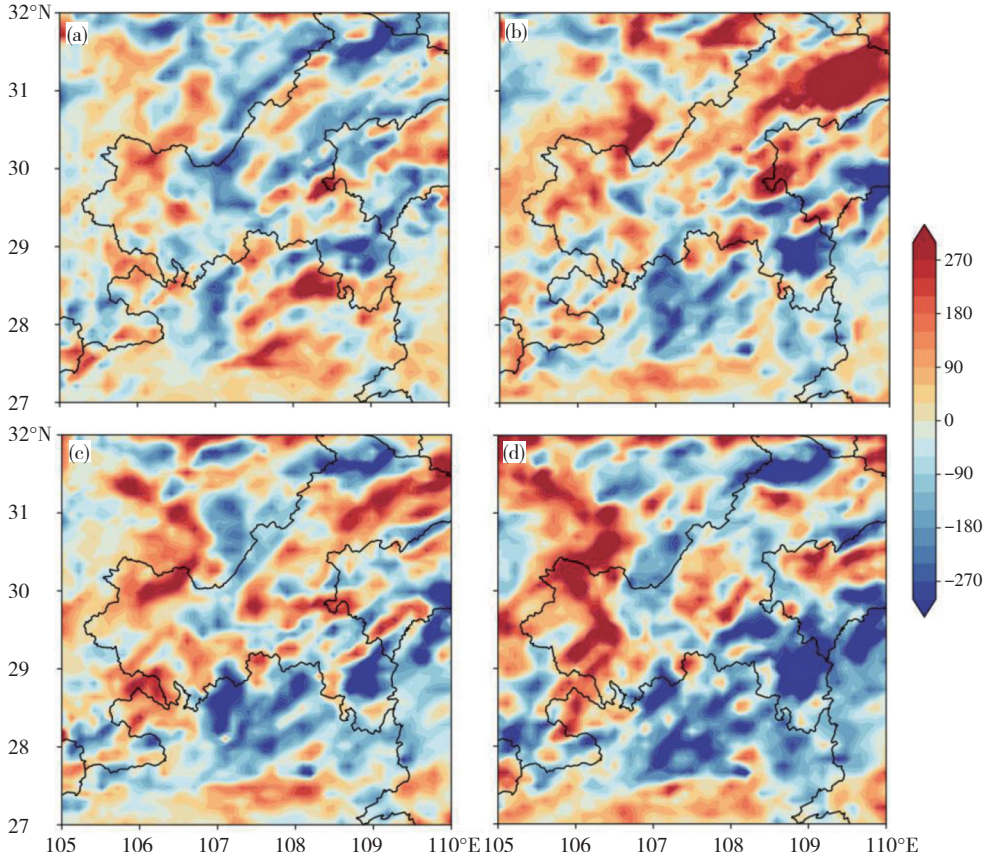


图6 西南地区东部1998年8月模式敏感性试验NW_H0.5 (a)、SE_H0.5 (b)、H0.5 (c)、H0 (d)与控制试验的累计降水差值(单位:mm)的空间分布

Fig. 6 The spatial distribution of cumulative precipitation difference (unit: mm) between model sensitivity test (a) NW_H0.5, (b) SE_H0.5, (c) H0.5, (d) H0 and control test in the ESWC in August 1998

14.05%),与1998年8月所得结果相似(图略)。说明影响西南地区东部夏季降水的主要地形因素是区域西北–东南一带的山地地形,大娄山、方斗山和大巴山对气流的阻挡抬升作用使该地降水过程更易发生。

地形的改变可能导致低层垂直速度和风场发生变化,进而影响降水的形成。由于西南地区东部区域内山地地形较高,850 hPa上部分区域因地形覆盖而缺失有效信息,因此本文以700 hPa层次来探究物理量的变化。为从垂直速度和水平风场的角度探究其对地形的响应,图7给出基于ERA5再分析资料的西南地区东部1998年8月700 hPa垂直速度场及水平风场。分析可知,西南地区东部几乎全域存在上升运

动，并在区域东北部较为剧烈。在水平方向上700 hPa主要盛行西南季风，携带大量暖湿空气，在受到地形的强迫抬升作用下，易在区域的中东部产生降水，这与实际降水情况较为吻合。

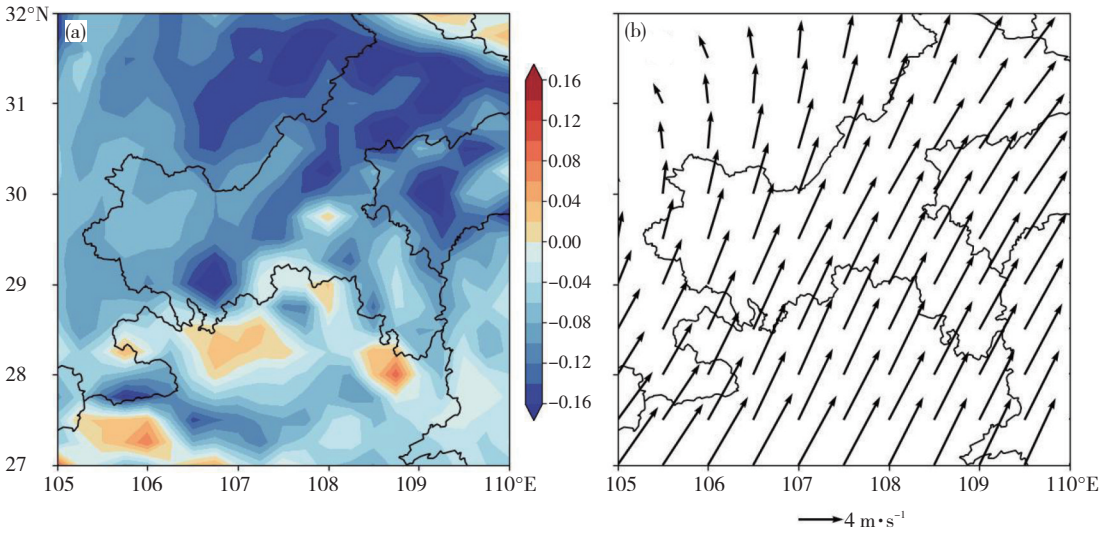


图7 基于ERA5再分析资料的西南地区东部1998年8月700 hPa垂直速度场(a，单位：Pa·s^{-1})及水平风场(b，单位：m·s^{-1})

Fig. 7 (a) Vertical velocity (unit: Pa·s^{-1}) and (b) horizontal wind (unit: m·s^{-1}) at 700 hPa in August 1998 in the ESWC based on ERA5 reanalysis data

图8为西南地区东部1998年8月敏感性试验与控制试验700 hPa垂直速度场及水平风场的差值，其反映了垂直速度与水平风场随西南地区东部地形改变的响应。可以看出，垂直速度的差值主要呈带状分布，敏感性试验中垂直速度显著减弱的区域主要出现在重庆东南部及贵州北部一带，且区域地形减少的梯度越大，导致垂直速度差值场中正值区域的范围和数值增大，即敏感性试验中上升运动减弱的范围和程度增加。从水平风场的角度来看，NW_H0.5试验中水平风场的变化不明显，其他三组敏感性实验中水平风场的差值在区域东南部为异常的东北风，随着地形高度的降低而增强，即在敏感性试验当中，西南地区东部的西南风减小，不利于在区域形成降水。

700 hPa水汽通量及水汽通量散度对地形的响应与垂直速度和水平风场类似。在NW_H0.5试验中，水汽通量及水汽通量散度的变化不明显。而将区域东南部的地形高度降低后，东南部的西南水汽输送显著减小，水汽辐合量也呈现出显著减小的趋势，从而导

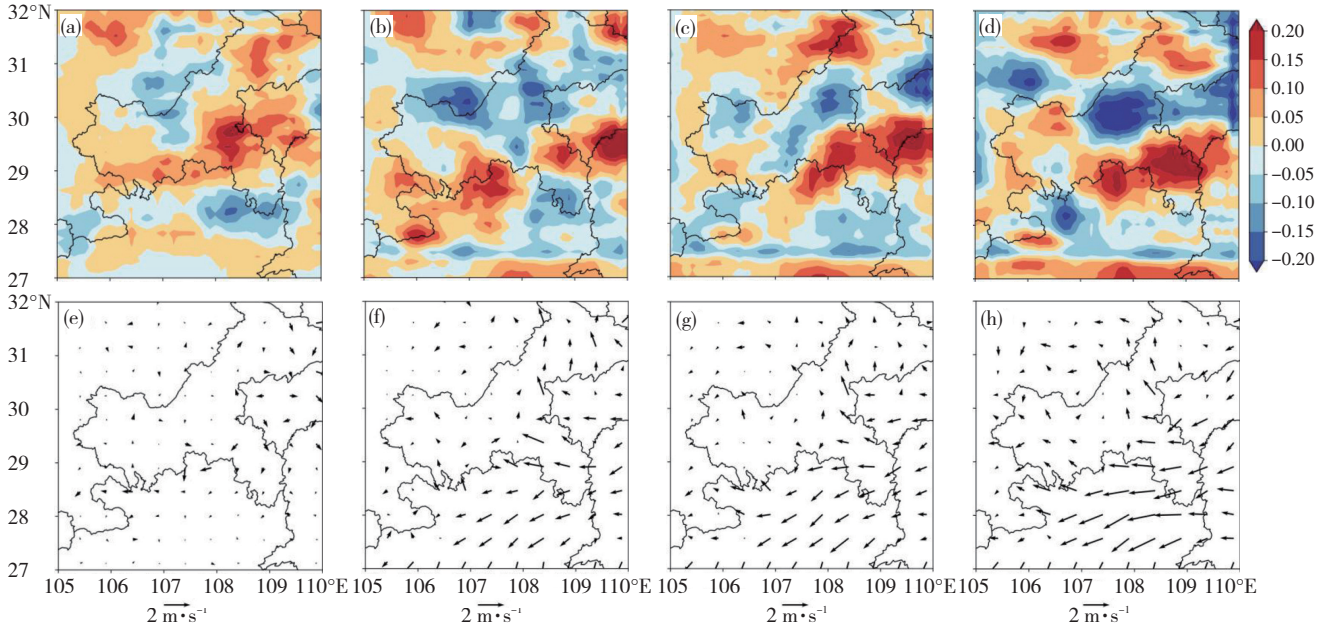


图8 西南地区东部1998年8月不同敏感性试验与控制试验NW_H0.5(a、b)、SE_H0.5(c、d)、H0.5(e、f)以及H0(g、h)的700 hPa垂直速度场(单位：Pa·s^{-1})及水平风场(单位：m·s^{-1})的差值

Fig. 8 The difference of 700 hPa vertical velocity field (unit: Pa·s^{-1}) and horizontal wind field (unit: m·s^{-1}) between simulated sensitivity test and control test (a, b) NW_H0.5, (c, d) SE_H0.5, (e, f) H0.5 and (g, h) H0 in August 1998 in the ESWC

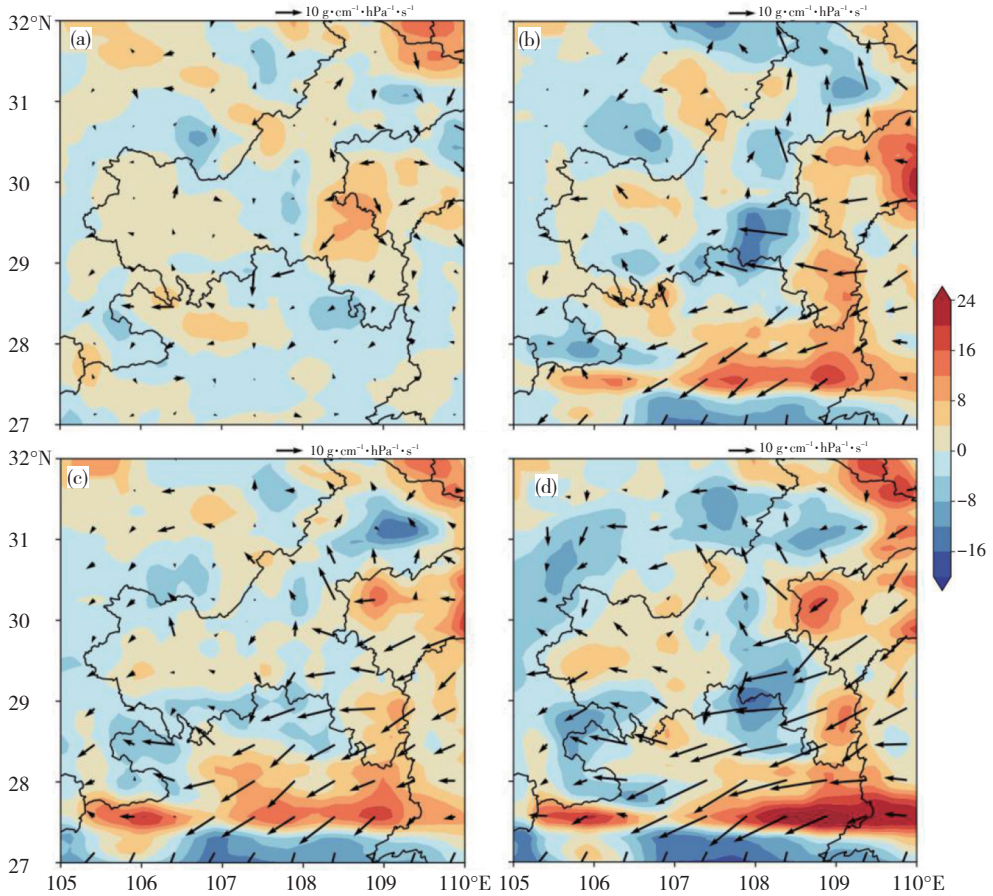


图9 西南地区东部1998年8月模拟敏感性试验NW_H0.5 (a)、SE_H0.5 (b)、H0.5 (c)、H0 (d)与控制试验700 hPa水汽通量(单位：g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1})及水汽通量散度(单位：10^{-8} g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1})差值的空间分布

Fig. 9 The spatial distribution of the difference between the simulated sensitivity test (a) NW_H0.5, (b) SE_H0.5, (c) H0.5, (d) H0 and the control test in August 1998 for 700 hPa water vapor flux (unit: g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1}) and the water vapor flux divergence (unit: 10^{-8} g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1}) in the ESWC

致东南部降水随地形高度降低而减少。

上述分析主要讨论地形在水平方向上对降水的影响，此外地形对降水的影响在垂直方向上也可产生重要作用。图10为模拟敏感性试验与控制试验水平

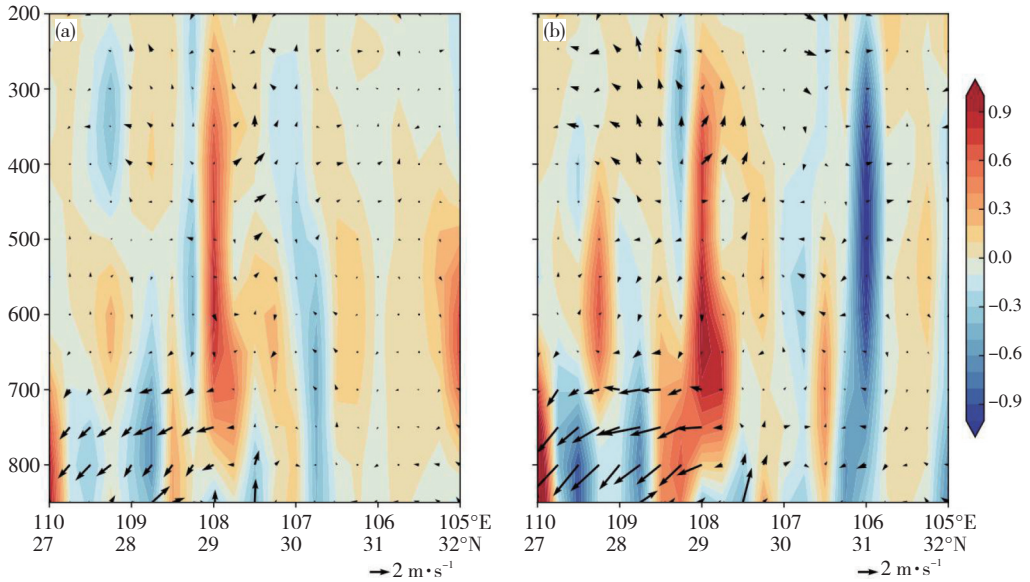


图10 西南地区东部1998年8月模拟敏感性试验H0.5(a)、H0(b)与控制试验垂直速度场(单位：Pa·s^{-1})、水平风场(单位：m·s^{-1})的差值沿东南-西北方向随高度的变化

Fig. 10 The difference between vertical velocity (unit: Pa·s^{-1}) and horizontal wind (unit: m·s^{-1}) along the southeast–northwest path with height in the simulated sensitivity test (a) H0.5, (b) H0 and control test in August 1998 in the ESWC

风场与垂直速度场的差值沿东南-西北路径随高度的变化。从水平风场来看，地形的改变主要导致了低层(850—700 hPa)风场的变化，而对650 hPa以上的风场没有显著影响。具体地，在850—700 hPa之间区域东南部出现东北风异常，且随着地形的降低，东北风异常增强，说明地形的降低导致此高度上西南风的减弱。850—700 hPa之间的水汽较为充沛，西南风的减弱也将导致降水更不易于形成。从低层垂直速度的变化来看，在(110°E，27°N)至(109°E，28°N)之间为弱的垂直速度负异常，表明地形降低之后此区域间降水会略偏多，而在(108°E，29°N)附近为垂直速度正异常，并向上延伸至200 hPa，说明此区域的垂直速度随地形降低后明显减弱，导致降水减少。此外，在H0敏感性试验中，(106°E，31°N)附近区域出现较强的垂直速度负异常，将导致此区域降水增多。上述分析中的降水分布情况与图6中显示的结果也较为一致。

4 结论

本文利用ERA5再分析资料分析1961—2020年夏季西南地区东部降水转化率的区域差异特征，并初步探究导致该差异特征的原因，最后利用WRF中尺度数值模式进行验证。主要结论如下：

(1) ERA5再分析资料能较好地反映1961—2020年夏季西南地区东部的降水特征，具体表现为东部降水多而西部降水少。西南地区东部的西南—东北走向一带为山地地形，水汽含量分布受地形高度的影响，区域东南部和西北部的含量较高，西南—东北沿线一带水汽含量较少，降水与水汽含量的空间差异性使得降水转化率也呈现出东部大而西部偏小的特征。

(2) 西南地区东部位于青藏高原的东南部，因此夏季西南地区东部主要盛行偏南风，在大娄山、方斗山及大巴山组成的山地地形的强迫抬升作用下，使得区域的东部降水多而西部偏少。

(3) 敏感实验表明，地形高度的增加对降水具有明显的促进作用，将区域地形高度分别降低1/2和去除地形后，区域东南部的降水在月时间尺度中将分别减少9.89%和19.90%；相应物理量场也会随着地形改变产生明显变化，当地形高度降低后，垂直速度场的上升运动及西南风明显减弱，水汽输送强度降低，水汽辐合量减少，导致降水更不利于形成。

参考文献(References):

蔡芗宁，马杰，刘晓波，等.2024.气候变化对延伸期预报的影响[J].沙漠与绿洲气象，18(1)：12-19. Cai X N, Ma J, Liu X B, et al. 2024. Impact of climate change on extended range forecast [J]. Desert and Oasis Meteorology，18(1)：12-19 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2024.01.002

何博翰，孙建奇，于恩涛，等.2020.大兴安岭和长白山地形影响东北夏季降水的数值模拟研究[J].气候与环境研究，25(3)：268-280. He B H, Sun J Q, Yu E T, et al. 2020. Simulation study on the influence of the Great Khingan Strip and Changbai Mountain on summer rainfall in Northeast China [J]. Climatic and Environmental Research，25(3)：268-280 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19189

李永华，徐海明，高阳华，等.2010.西南地区东部夏季旱涝的水汽输送特征[J].气象学报，68(6)：932-943. Li Y H, Xu H M, Gao Y H, et al. 2010. The characteristics of moisture transport associated with drought/flood in summer over the east of the southwestern China [J]. Atca Meteorologica Sinica，68(6)：932-943 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2010.088

李永华，青吉铭，李强，等.2013.西南地区东部夏季旱涝的西太平洋副高特征[J].西南大学学报：自然科学版，35(3)：106-116. Li Y H, Qing J M, Li Q, et al. 2013. Features of Western Pacific Subtropical High (WPSH) associated with drought/flood in summer over the Eastern Part of Southwest China [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition)，35(3)：106-116 (in Chinese). doi:10.13718/j.cnki.xdzk.2013.03.012

刘洋，钱贞成，朱宇宁，等.2015.“8·31”云阳特大暴雨地形动力作用数值研究[J].高原山地气象研究，35(3)：9-17. Liu Y, Qian Z C, Zhu Y N, et al. 2015. Numerical study of the dynamic effect of terrain on “8. 31” extreme torrential rain in Yunyang [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research，35(3)：9-17 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674.2184·2015.03.002

康岚，沈桐立，蔡新玲，等.2004.青藏高原东侧一次典型暴雨过程的数值模拟试验[J].高原气象，23(S1)：37-45. Kang L, Shen T L, Cai X L, et al. 2004. Numerical simulation experiment about a typical heavy rain process on the east side of Qinghai -Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology，23(S1)：37-45 (in Chinese). doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2004.z1.007

马思敏，穆建华，舒志亮，等.2022.六盘山区一次典型暴雨过程的地形敏感性模拟试验[J].干旱气象，40(3)：457-468. Ma S M, Mu J H, Shu Z L, et al. 2022. Topography sensitivity simulation test of a typical rainstorm process in Liupan Mountain region [J]. Journal of Arid Meteorology，40(3)：457-468 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2022)-03-0457

聂童，高玉芳，彭涛，等.2023.WRF-Hydro模式结合不同降水产品模拟清江流域径流的效果分析[J].暴雨灾害，42(4)：395-405. Nie T, Gao Y F, Peng T, et al. 2023. Effect analysis of WRF-Hydro model combined with different precipitation products to simulate runoff in the Qingjiang River Basin [J]. Torrential Rain and Disasters，42(4)：395-405 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022-205

王维佳，陈碧辉.2010.四川上空大气可降水量时空分布特征[J].高原山地气象研究，30(3)：52-57. Wang W J, Chen B H. 2010. Spatial-Temporal characteristics of precipitable water over Sichuan [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research，30(3)：52-57 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674-2184·2010.03.009

吴胜刚，刘屹岷，邹晓蕾，等.2016. WRF模式对青藏高原南坡夏季降水的模拟分析[J].气象学报，74(5)：744-756. Wu S G, Liu Y M, Zou X L, et al. 2016. The simulation analysis of the precipitation over the southern slopes of the Tibetan Plateau based on WRF model [J]. Atca Meteoro-

logica Sinica,74(5):744–756 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2016.048

吴佳,高学杰.2013.一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比[J].地球物理学报,56(4):1102–1111. Wu J, Gao X J. 2013. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets [J]. Chinese Journal of Geophysics,56(4):1102–1111 (in Chinese). doi:10.6038/cjg20130406

吴志鹏,李跃清,李晓岚,等.2021.WRF模式边界层参数化方案对川渝盆地西南涡降水模拟的影响[J].大气科学,45(1):58–72. Wu Z P, Li Y Q, Li X L, et al. 2021. Influence of different planetary boundary layer parameterization schemes on the simulation of precipitation caused by Southwest China vortex in Sichuan Basin based on the WRF model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,45(1):58–72 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006–9895.2005.19171

袁有林,左洪超,董龙翔,等.2015.地形和水汽对“7.13”陕西暴雨影响的数值试验[J].干旱气象,33(2):291–302. Yuan Y L, Zuo H C, Dong L X, et al. 2015. Numerical simulation of the effect of elevation and water vapor on “7.13” rainstorm in shaanxi province [J]. Journal of Arid Meteorology,33(2):291–302 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006–7639(2015)–02–0291

于晓晶,赵勇.2016.地形对天山夏季降水影响的模拟[J].中国沙漠,36(4):1133–1143. Yu X J, Zhao Y. 2016. Simulation of orographic effects on summer rain in the Tianshan Mountains [J]. Journal of Desert Research,36(4):1133–1143 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–694X.2015.00116

翟盘茂,周琴芳.1997.中国大气水分气候变化研究[J].应用气象学报,8(3):342–351. Zhai P M, Zhou Q F. 1997. A study of climate changes of atmospheric water vapour in China [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology,8(3):342–351 (in Chinese). doi:CNKI:SUN:YYQX.0.1997–03–010

邹进上,刘惠兰.1981.我国平均水汽含量分布的基本特点及其控制因子[J].地理学报,36(4):377–391. Zou J S, Liu H L. 1981. The basic features of distribution of water vapour content and their controlling factors in China [J]. Atca Geographica Sinica,36(4):377–391 (in Chinese). doi:10.11821/xb198104004

周顺武,吴萍,王传辉,等.2011.青藏高原夏季上空水汽含量演变特征及其与降水的关系[J].地理学报,66(11):1466–1478. Zhou S W, Wu P, Wang C H, et al. 2011. Spatial distribution of atmospheric water vapor and its relationship with precipitation in summer over the Tibetan Plateau [J]. Atca Geographica Sinica,66(11):1466–1478 (in Chinese). doi:10.11821/xb201111003

张杰,李栋梁,王文.2008.夏季风期间青藏高原地形对降水的影响[J].地理科学,28(2):235–240. Zhang J, Li D L, Wang W. 2008. Influence of terrain on precipitation in Qinghai–Tibet Plateau during summer monsoon [J]. Atca Geographica Sinica,28(2):235–240 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1000–0690.2008.02.019

Asadieh B, Krakauer N Y. 2014. Global trends in extreme precipitation: climate models versus observations [J]. Hydrology and Earth System Sciences,19:877–891. doi:10.5194/hess–19–877–2015

Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,146:1999–2049. doi:10.1002/qj.3803

Shi Z, Sha Y, Liu X, et al. 2019. Effect of marginal topography around the Tibetan Plateau on the evolution of central Asian arid climate: Yunnan–Guizhou and Mongolian Plateaux as examples [J]. Climate Dynamics,53(7):4433–4445. doi:10.1007/s00382–019–04796–z

Skamarock C, Klemp B, Dudhia J, et al. 2019. A description of the advanced research WRF Model Version 4 [C]. doi:10.5065/1DFH–6P97

Simmonds I, Bi D, Hope P. 1999. Atmospheric water vapor flux and its association with rainfall over China in summer [J]. Journal of Climate,12(5):1353–1367. doi: 10.1175/1520–0442(1999)012<1353:AWVFAI>2.0.CO;2

（责任编辑 闵爱荣）