

陈权亮,刘皓,胡森,等.2024.青藏高原东侧复杂地形区极端降水研究进展[J].暴雨灾害,43(3):255–265. CHEN Quanliang, LIU Hao, HU Miao, et al. 2024. A review of the studies on extreme precipitation in the complex terrain region on the eastern side of the Tibetan Plateau [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 43(3):255–265 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023–216

青藏高原东侧复杂地形区极端降水研究进展

陈权亮,刘皓,胡森,葛非,李扬

(成都信息工程大学大气科学学院/高原大气与环境四川省重点实验室,成都 610225)

摘要: 青藏高原东侧地形地貌多变,海拔高度起伏剧烈,陡峭而复杂地形下极端降水带来的气象灾害与地质次生灾害直接威胁着高原与下游地区,且这种独特的地形与地理位置,为极端降水的研究带来了巨大挑战。围绕青藏高原东侧复杂地形区极端降水,对近10 a降水数据观测分析新方法、极端降水气候演变特征和协同机制、云-降水物理特征及预报模拟和气候预估等方面取得的新进展进行了回顾,并就高原复杂地形区极端降水研究今后值得关注和思考的科学问题,从机器学习方法与多源降水数据结合以及高原地区降水资料的适用性研究、极端降水的气候变化特征与大气环流异常的机理研究、高原地区的云宏观特征和云微物理特征研究、气候模式历史模拟性能的评估及对未来极端降水模拟的预估研究等方面进行了展望。

关键词: 极端降水;青藏高原东侧;复杂地形区;物理机制;数值模拟

中图分类号: P426.6

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2023–216

A review of the studies on extreme precipitation in the complex terrain region on the eastern side of the Tibetan Plateau

CHEN Quanliang, LIU Hao, HU Miao, GE Fei, LI Yang

(1. College of Atmospheric Science/Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province,
Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225)

Abstract: The eastern side of the Tibetan Plateau is characterized by its variable terrain with dramatic elevation changes. The extreme precipitation in areas with steep and complex terrain can directly threaten the Tibetan Plateau and downstream regions with meteorological and subsequent geological disasters. The unique topography and geographical position of this area bring significant challenges to understanding extreme precipitation. For extreme precipitation in the complex terrain region on the eastern side of the Tibetan Plateau, a review of recent advances over the past decade was achieved in this paper. Different research areas are summarized, including precipitation observations and analysis using new methods, characteristics of climate evolution and synergistic mechanisms of extreme precipitation, cloud-precipitation physical characteristics and forecast simulations, as well as climate projections. On the scientific issues worth paying attention to and considering in the future of extreme precipitation research in complex terrain areas of the Tibetan Plateau, this paper also looks forward to several aspects of the related studies, such as combining machine learning methods with multi-source precipitation data and the applicability of precipitation data, climate change characteristics of extreme precipitation events and the mechanisms related to local weather systems and large-scale circulation anomalies, cloud macroscopic characteristics and microphysical characteristics over the Tibetan Plateau, evaluation of climate model performance for historical periods and projection of future extreme precipitation simulation.

Key words: extreme precipitation; eastern side of the Tibetan Plateau; complex terrain region; physical mechanisms; numerical modeling

引言

青藏高原是全球气候变化高敏感和高影响区域,同时是长江、黄河和雅鲁藏布江等河流源头,被誉为“亚洲水塔”,在水文循环中也有重要作用。从政府间

气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第六次评估结果来看,相比全球其他地区,青藏高原的变暖趋势更为明显,且未来青藏高原仍将保持增暖趋势,气候与生态环境灾害复合风险将加大(IPCC, 2021)。近年诸多研究侧重关注青藏

收稿日期: 2023–10–13;定稿日期: 2024–04–28

资助项目: 国家自然科学基金项目(U20A2097, 42375047)

第一作者: 陈权亮,主要从事青藏高原气象学、对流层-平流层相互作用研究。E-mail: chenql@cuit.edu.cn

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

高原的降水变化及其对于生态系统以及山洪、泥石流等灾害的影响(吴国雄等, 2013; 崔鹏等, 2015; 徐祥德等, 2019)。但是, 由于青藏高原地形复杂多样, 气象观测站点的长期实地观测主要集中在其东部(张利红等, 2011), 严重制约了对青藏高原降水变化的科学认识。

青藏高原东侧区域, 包括青藏高原主体东部川西高原、川渝盆地、云贵高原和秦巴山区, 地处东亚季风和印度季风的交汇区, 地形地貌多变, 这一区域的极端降水与青藏高原及其复杂地形等均有紧密联系。我国学者针对青藏高原东坡陡峭而复杂地形对局地强降水的直接影响开展了大量研究工作, 如青藏高原东侧“雅安天漏”现象的天气和气候、西南涡东移激发梅雨锋东段产生强降水的机理、复杂地形下横槽诱发双涡暴雨过程的模拟等(Zhang et al., 2018; 赵思雄和孙建华, 2019; 程晓龙等, 2021)。此外, 极端降水容易诱发滑坡、泥石流等气象-地质次生灾害, 位于青藏高原东侧的西南和陕西甘肃等地区是灾害高发区域(马洁华等, 2018)。如2019年四川“8·20”强降水由于降水时间长、降水落区集中, 引发山洪泥石流等次生灾害, 造成严重的人员伤亡和经济损失。由此可见, 对青藏高原东侧复杂地形区极端降水演变特征和形成机理的深入研究, 可为政府部门防灾减灾和生态保护提供重要的决策支持, 也可作为“川藏铁路”等国家重大工程实施提供科技支撑。近10 a来, 国内外气象工作者致力于生成高精度、高适用度的青藏高原降水数据集, 以基于此探明青藏高原东侧区域极端降水变化规律和协同演变机制, 提升数值模式对青藏高原东侧降水的模拟能力及对未来变化的预估能力。因此, 本文将从以下几个方面回顾青藏高原东侧复杂地形区极端降水的研究成果, 并展望今后应予以重视的研究内容和发展方向。

1 青藏高原多源降水数据的对比分析和适用性评估

由于青藏高原下垫面复杂、自然环境艰苦、气候恶劣, 青藏高原的实地观测站数量较少, 这限制了对青藏高原资料稀少区域降水变化的认识。为更好地理解青藏高原的降水变化特征, 目前研究主要采用动力降尺度和多源数据融合等方法生成青藏高原高精度降水数据。同时, 多种不同降水数据集对青藏高原的适用性问题也是研究的重点。

1.1 动力降尺度和多源数据融合

为得到青藏高原高精度降水数据集, 学者一般采用动力降尺度以及多源数据融合方法。基于区域天气气候模式对再分析降水数据进行动力降尺度生成

的高精度降水数据, 其性能优于美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)数据、欧洲中期天气预报中心再分析数据(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Re-Analysis-Interim, ERA-Interim)、中国区域地面气象要素驱动数据集(China Meteorological Forcing Dataset, CMFD)、美国气候预测中心使用形变技术获得的降水产品(Climate Prediction Center morphing method, CMORPH)和热带降水观测计划(Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM)等降水数据(Chen et al., 2018; Lundquist et al., 2019; Gao et al., 2020)。Ou等(2020)已发布一套青藏高原动力降尺度再分析数据集, 该数据在青藏高原地区时空分辨率为1 h和9 km, 能够反映更加精细的降水时空分布特征。

多源数据融合能够将青藏高原地区各具优势的多源降水数据加以整合, 形成对青藏高原降水特征具有相对全面描述的高精度数据。不同国家和地区的学者研究表明, 机器学习方法能够提升青藏高原地区降水数据融合质量(Hong et al., 2021; Ma et al., 2021; 南天一等, 2023)。Hong等(2021)使用人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)方法对青藏高原地区的站点降水、多源卫星降水和ERA5再分析降水等数据进行融合, 融合数据能较好反映数据缺乏地区的降水分布。南天一等(2023)对比了深度学习方法中的卷积神经网络模型(Convolutional Neural Networks, CNN)、机器学习方法中的ANN算法以及主流统计方法中的基于扩展三重搭配(Extended Triple Collocation, ETC)的融合算法对青藏高原多源降水(站点、格点、卫星、动力降尺度)融合和水文模拟的效果, 结果显示CNN融合降水数据在相对偏差以及场相关等方面均优于ANN与ETC融合降水数据。

1.2 青藏高原降水数据适应性

近年来, 许多学者对青藏高原区域降水数据的适用性开展了研究, 通过对NCEP1、NCEP2、ERA-Interim、现代研究与应用回顾性分析(Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, MERRA)和气候预测系统再分析(Climate Forecast System Reanalysis, CFSR)等多套再分析数据, 雨量资料与卫星估计及NCEP再分析降水场合并分析(Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation, CMAP)、全球降水气候计划(Global Precipitation Climatology Project, GPCP)和全球陆面同化系统(Global Land Data Assimilation System, GLDAS)等多套融合分析数据与观测数据进行比较, 发现多数再分析降水数据的量级被高估, 且融合数据表现优于再分析数据, GLDAS数据在

日、月降水量上表现较好(Wang and Zeng, 2012; You et al., 2015; 温婷婷等, 2022)。近年来,第二次青藏高原综合科学考察研究使青藏高原地区逐日的直接观测数据集得到了发展和延伸,同时也出现了新的针对中国区域的降水数据集,包括中国区域高分辨率格点化观测数据集(CN05.1) (Xu et al., 2009; 吴佳和高学杰, 2013)、中国区域地面气象要素数据集(CMFD) (Yang et al., 2019)、日本综合地球环境研究所(RIHN)和日本气象厅气象研究所(MRI/JMA)日降水产品(Asian Precipitation-Highly Resolved Observational Data Integration Towards Evaluation of Water Resources, APHRODITE) (Yatagai et al., 2012)。栾澜和翟盘茂(2023)基于延伸的观测数据,对比评估了多套逐日格点分析数据集在青藏高原的适用性,发现CN05.1和CMFD数据在青藏高原区域平均降水量变化、降水量和极端降水量的空间分布及其变化趋势均与观测的相对偏差较小,场相关较高,具有较好的一致性,GPCP与TRMM降水分析数据在极端降水变化趋势方面与观测较吻合。

2 青藏高原东侧极端降水与大气环流异常的关系

2.1 青藏高原极端降水的变化特征

青藏高原是气候敏感变化区,对增温过程反应强烈,在全球持续变暖的背景下,青藏高原气候发生显著变化,独具特征。自1961年以来,青藏高原年平均降水量显著增加,但增速在不同时间段差异明显,其降水量随高原加速增温而迅速增加(段安民等, 2016),东北部年均降水量南北差异大于东西差异,干旱区增加趋势比半干旱区明显,而半湿润区呈减少趋势(杨昭明和张调风, 2021)。平均来看,青藏高原东部因深对流相比其西部要强(陈权亮等, 2022),更易发生极端降水。

不仅如此,“亚洲水塔”变化引起的下游水资源连锁效应与下游地区人民生活和社会发展息息相关,是地球系统科学研究的核心问题(汤秋鸿等, 2019)。雅鲁藏布江流域的降水变化严重影响青藏高原及其下游地区的水循环和水资源分布,研究发现流域尺度上年、干湿季、月和日降水量整体呈上升趋势,空间上呈现“湿的越湿、干的越干”的极端化空间变化趋势,加剧了流域降水的空间分异性;对极端降水而言,研究更多是针对日和小时尺度构建的极端降水指标进行分析,指出极端降水整体呈现上升趋势,且小时尺度极端降水(1 h、3 h、6 h最大降水量,记为 R_{x1h} 、 R_{x3h} 、 R_{x6h})空间分异性更明显(刘江涛, 2018; 张仪辉等, 2022)。

青藏高原东侧复杂地形区生态系统脆弱,频发的

极端降水对经济和生态可持续发展造成巨大影响。在月、季、年等长时间尺度上青藏高原东侧降水更加集中、极端降水为增多趋势且偏强。研究表明青藏高原东部地区夏季总降水量、极端降水量和极端降水日数表现为增加趋势(栾澜和翟盘茂, 2023)。同时,Zheng等(2022)分析了20世纪70年代末以来我国西南地区夏季极端降水的变化趋势及其对全年总降水的贡献率,发现全年总降水显著减少,但夏季极端降水显著上升,夏季极端降水对全年总降水的贡献率有明显提升。

由于复杂地形影响,极端降水在青藏高原东部复杂地形区的分布存在明显的空间不一致性,四川盆地和云贵高原极端降水发生频繁,降水强度大,川西高原若尔盖极端降水发生频率少于其他地区(Liu and Xu, 2016; 陈子凡等, 2022; 马玉坤等, 2022)。川渝地区夏季日极端降水总量和强度西高东低,极端降水频率西低东高,夜雨特征明显,日变化曲线呈“一峰一谷”特征,且海拔较高(低)地区日峰值出现在前(后)半夜(董新宁等, 2023; 李英等, 2023)。

2.2 青藏高原东侧极端降水与大气环流异常的联系

研究表明大气环流的异常能够显著影响青藏高原东侧极端降水变化。由于地理位置的原因,青藏高原东侧夏季天气及其系统不仅受低纬系统的影响,比如西太平洋副热带高压(以下简称副高)和夏季风系统,也受中高纬度系统以及与厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)有关的大气遥相关过程的共同影响(Shen et al., 2021; Chen et al., 2022a; 张仪辉等, 2022)。陈子凡等(2022)发现,在强El Niño年,青藏高原东侧地区的降水总量多、降水持续时间长且极端降水多;强La Niña年则降水总量少,但降水强度大,极端降水少,其极端降水会受强ENSO事件的影响而发展。并且两类El Niño事件由于大气响应不同也能对青藏高原东侧地区的降水产生不同影响(陶威和陈权亮, 2018)。孟加拉湾横跨欧亚大陆的大气遥相关波列可以作为大气桥传输动力、热力和水汽至青藏高原及其东侧。张仪辉等(2022)指出当北半球副高较强或北半球极涡较弱时,作为“亚洲水塔”河源区的雅鲁藏布江流域降水增多,极端降水发生频率增加。南亚高压、亚洲中高纬环流系统及印度洋-太平洋对流活动异常变化,均对青藏高原及其东侧夏季极端降水有潜在影响(陈权亮等, 2010a, 2010b)。Zhu等(2011)发现斯堪的纳维亚-东亚波列和地中海-东亚波列与夏季青藏高原极端干湿事件有关。Chen等(2022b)进一步研究了斯堪的纳维亚遥相关(Scandinavian teleconnection pattern, SCA),发现SCA与青藏高原东侧夏季极端降水呈显著负相关(相关系数可达-0.57)。奇异值分解

(Singular value decomposition, SVD)的分析结果(图1)也证实,当欧亚大陆中纬度地区呈“+--”三极纬向分布,即SCA负位相时,青藏高原东侧极端降水偏多。具体表现为:青藏高原东侧上空显著的异常西风将平均暖空气和湿空气从高原输送到高原东侧,形成异常暖平流和异常纬向水汽平流,在其共同作用之下,高原东侧上方出现显著的垂直向上运动和偏多的夏季极端降水(图2)。

此外,青藏高原局地生成的一些天气系统(如高原切变线、高原涡、西南涡),在其它纬度天气气候系统背景下,也会对高原东侧极端降水产生显著影响(韩林君和白爱娟,2019;姚秀萍等,2021;何钰等,2023)。第三次青藏高原大气科学试验(The Third Tibetan Plateau Atmospheric Scientific Experiment, TIPEX-III)通过多源观测和热力-动力诊断分析,建立了夏季西南涡引发青藏高原东侧暴雨过程的多尺度概念模型,青藏高原对流层上层为南亚高压与高空急流共同作用导致高原东侧

高空出现辐散中心,对流层中层为东北冷涡后的高空槽,副高东退减弱,对流层低层700 hPa存在东西向切变线,850 hPa有中尺度西南涡生成发展,低空急流加强,在高原东侧上空形成水汽辐合,为降水提供了有利的动力和水汽条件。同时,四川盆地北侧的冷空气与南侧的暖湿气流交汇,为形成降水提供了大气不稳定条件(杨舒楠等,2016)。由于有利的地理位置,夏季青藏高原上空云团能够东移并影响长江中下游地区,对应夏季深厚的对流降水从青藏高原至下游地区的东传特征同样显著(徐祥德和陈联寿,2006;潘晓和傅云飞,2015)。王婧羽等(2019)统计分析了2010—2016年夏季青藏高原云团东传过程,发现其6月出现最频繁,但7月持续时间较长;云团向东传播有三条路径,分别是平直东传、沿长江折向东传和复合东传,其中沿长江折向东传的次数较多且过程平均持续时间较长(62 h),为高影响过程,在下游地区引发的暴雨日数最多。

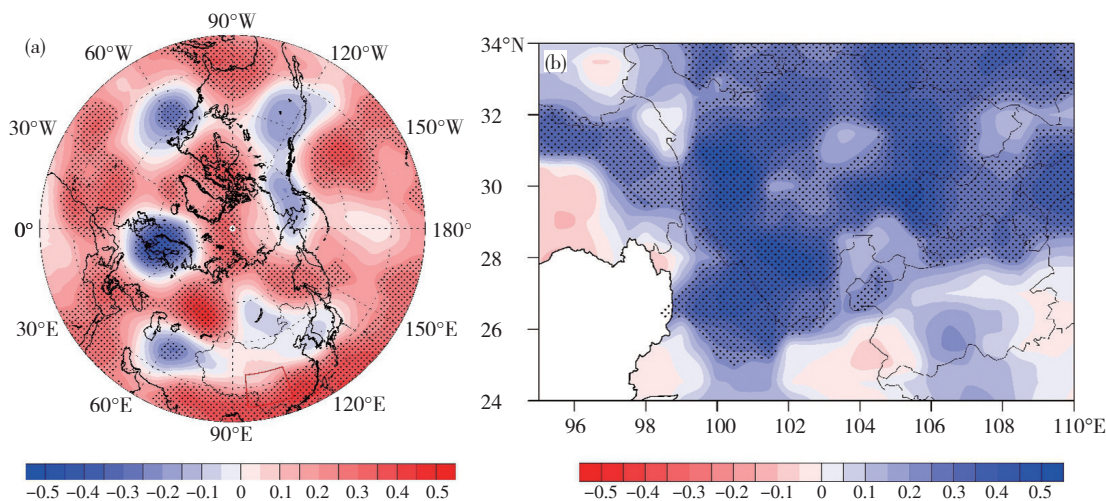


图1 500 hPa高度场异常(a)和高原东侧夏季极端降水异常SVD分析第一模态异向相关系数分布(b)

(打点区域表示通过90%显著性水平检验)(Chen et al., 2022b)

Fig. 1 (a) The 500 hPa height field anomalies and (b) correlation coefficients distribution of first mode of SVD analysis of extreme summer precipitation anomalies on the eastern side of the Tibetan Plateau, with the dotted area indicating the 90% significance level (Chen et al., 2022b)

3 青藏高原东侧复杂地形区云-降水物理特征

云通过“反照率效应”和“温室效应”对地-气系统起到冷却和加热作用,通过降水过程调节大气的温湿和辐射,对大气能量和水循环具有重要作用,了解高原云的分布和变化特征对于评估云在气候变化中的作用具有重要意义(刘屹岷等,2018)。从宏观特征来看,青藏高原东侧复杂地形区域不同云类型与云相态的水平分布特征受大地形影响明显,主导云类型与云相态具有显著的季节差异(Cai et al., 2022)。与全年主导的云类型分布情况相比,透光高积云在秋冬季分布范围显著增大,蔽光高层云也表现出秋冬多春夏少的特征,秋季与全年分布情况相比范围略有增大,冬季

则明显向东扩展,基本覆盖我国长江中下游地区。Teng等(2022)基于1998—2015年TRMM卫星数据,研究了青藏高原云的几何和物理特征,发现60%青藏高原的降雨云大小约为 $18\text{ km}\times 15\text{ km}$,面积大于 $100\text{ km}\times 90\text{ km}$ 的云少于1%,形状介于水平长条状和方形之间,降雨强度为 $0.5\sim 6.0\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。刘屹岷等(2018)回顾了国内外基于CloudSat/CALIPSO (Cloud Sat-Cloud Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations)卫星提供的定量云垂直结构信息,对云量及其分布等宏观特征和云微物理特征进行的研究得到,在云量及其季节变化上,单层云的相对贡献大于亚洲季风区的其他区域;夏季对流的云较浅薄,积云发生频率最高,云内滴谱较宽;降水云以积云和卷云为主,云对总

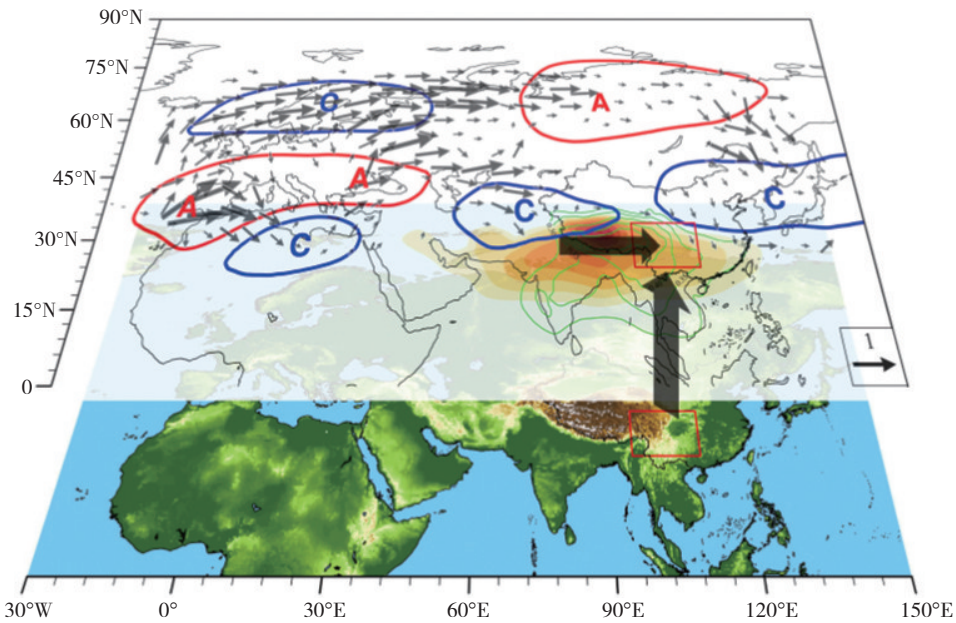


图2 SCA遥相关影响青藏高原东侧夏季极端降水的物理机制示意图(A、C分别表示500 hPa等压面上的异常反气旋和气旋(Chen et al., 2022b))

Fig. 2 Schematic diagram of the physical mechanism for the influence of SCA teleconnection on extreme summer precipitation on the Eastern Side of the Tibetan Plateau (A, C represents abnormal anticyclones and cyclones on the 500 hPa isobaric surface, respectively (Chen et al., 2022b))

降水的贡献随着云层数增多而减小,降水增强时高层冰粒子的密集度趋于紧密;夏季青藏高原地区云的净辐射效应在8 km高度存在一个厚度仅1 km左右但较强的辐射冷却层,而在其下(4—7 km高度之间)为强的辐射加热层。赵平等(2018)基于TIPEX-III的结果揭示了青藏高原主体对流云不是由南亚向北移动所致,可能是由局地发展起来;数值模式中 Γ 雨滴谱分布相比常用的M-P分布更适合青藏高原;通过对那曲的云雷达资料分析发现,青藏高原云-降水发生发展与局地加热有密切关系,有独特的日变化特征、云宏微观特征和云中水不同相态间的转化机制。

青藏高原地区的极端降水大多是由夜间持续的弱对流云而不是白天的强对流云产生(唐洁, 2022)。在青藏高原东部地区,弱深层对流降水是主要的降水形式(67.8%),其次是浅层降水(26.4%)和强深层对流降水(5.8%)。青藏高原东部和东南部地区降水强度和频率增加,而风暴顶高度则相反(潘晓和傅云飞, 2015; 傅云飞等, 2016)。青藏高原东侧的低云量与极端降水日数和极端降水量具有显著正相关。青藏高原东部边缘以及盆地的深层对流明显弱于高原上空,该地区的降水主要源于没有活跃混合相过程的风暴(Xu, 2013)。然而,青藏高原东部地区相对较弱的对流云是由白天形成的对流云转化而来(唐洁, 2022)。范思睿等(2021)基于NPP (National Polar-orbiting Partnership)卫星反演四川盆地夏季云降水物理特征,发现当高层云主要由中低层云发展而来时,过冷水云的广泛分布为粒子发

展成雨滴提供了有利条件,进而说明盆地极端降水的产生取决于高低云配置情况和过冷水云面积。马恩点等(2017)利用中尺度数值模式(WRF v3.4)对四川盆地降水进行模拟发现,青藏高原东侧的降水过程既有前期高原涡东移的影响,也有后期对流云团合并的作用。李跃清和张琪(2014)研究发现,贵州、重庆及四川夏季的雨层云、高层云、深对流云与降水量、降水日的关系较好,其中深对流云最为显著。另外,高原涡与西南涡相互作用的过程也会伴随着云体宏微观物理结构的演变,进而使对流云团不断发展,云团内的上升气流增强,随着来自高原对流云中的雪晶与霰粒子转化和碰并,云水和雨水增长,降水粒子在充分的动力条件快速增长,产生极端降水。

4 青藏高原东侧极端降水的模拟和未来预估

4.1 青藏高原东侧极端降水的模拟评估

青藏高原地区气候变化模拟研究的不确定性主要来自气候模式中大气云辐射参数化过程、对关键云辐射特性的描述不足、与积雪和地表反照率有关的陆面过程的模拟偏差,而多模式加权集合是减少模式不确定性的的重要手段(Li et al., 2021; 游庆龙等, 2021)。

目前,全球气候模式(Global Climate Models, GCM)被广泛用于研究历史气候变化机理及预测未来气候。利用第六次耦合模式比较计划(The Coupled Model Intercomparison Project Phase Six, CMIP6)提供的多模式集合气候模拟结果对青藏高原降水量和极端降

水量进行评估发现,CMIP6数据对青藏高原降水的模拟能力有限。模式对青藏高原地区尤其是陡峭地形区的降水特征模拟不足(胡琴等,2014;Yu et al.,2015),高原降水模拟结果与观测资料相比存在一定的湿偏差(Jia et al.,2019;Zhu and Yang,2020)。CMIP6模式能模拟出青藏高原年平均降水东多西少的空间分布特征,具有比较高的场相关系数,但对高原春季和夏季降水存在高估(陈炜等,2021)。与上一代模式相比,CMIP6模式虽然模拟的相对误差与绝对误差较小,但青藏高原东部的总降水量、强降水及降水强度的模拟湿偏差仍然存在(Zhu et al.,2020;Li et al.,2021)。CMIP6模式对青藏高原1979—2014年的气候态降水量和降水频率有所高估,对降水强度有所低估,且高原南部和东部存在较大的模式间差异(肖雨佳,2021)。在极端降水模拟方面,CMIP6模式对青藏高原东部雨季年均极端降水量的空间分布模拟效果较好,但高估了其空间变率(栾澜,2023);对连续无雨日数(Consecutive Dry Days, CDD)、连续5 d最大降水量(Maximum Consecutive 5 days Precipitation, Rx5day)和降水强度(Simple Daily Intensity, SDII)的变化趋势模拟能力较

强,但对气候态CDD的模拟存在负偏差,对Rx5day和SDII的模拟则存在一定的高估(Cui et al.,2021)。另外,通过统计降尺度方法得到的高分辨率模式对CDD、年总降水量(Total Precipitation of Wet Days, PRCPTOT)、连续有雨日数(Consecutive Wet Days, CWD)和单日最大降水(Maximum consecutive 1 day Precipitation, Rx1day)的空间模拟能力好于时序模拟能力(陈虹举等,2021)。

CMIP6 高分辨率模式比较计划(High-Resolution Model Intercomparison Project, HighResMIP)为研究青藏高原东侧复杂地形区极端降水提供了重要数据支撑。由于高分辨率模式物理参数化方案不变,可用于评估分辨率的提升对高原东侧复杂地形区极端降水模拟性能的影响。肖雨佳等(2022)评估了CMIP6 HighResMIP模式对青藏高原夏季小时降水与极端降水的模拟能力,发现模式高估了青藏高原地区的降水量和频率(强度),过多的降水量主要来自模式对降水频率的高估,尤其是弱降水($<2\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$)频率;模拟偏差与地形海拔密切相关,偏差大值区主要位于高原南坡和东坡陡峭地形区。通过对比高、低分辨率模式对于

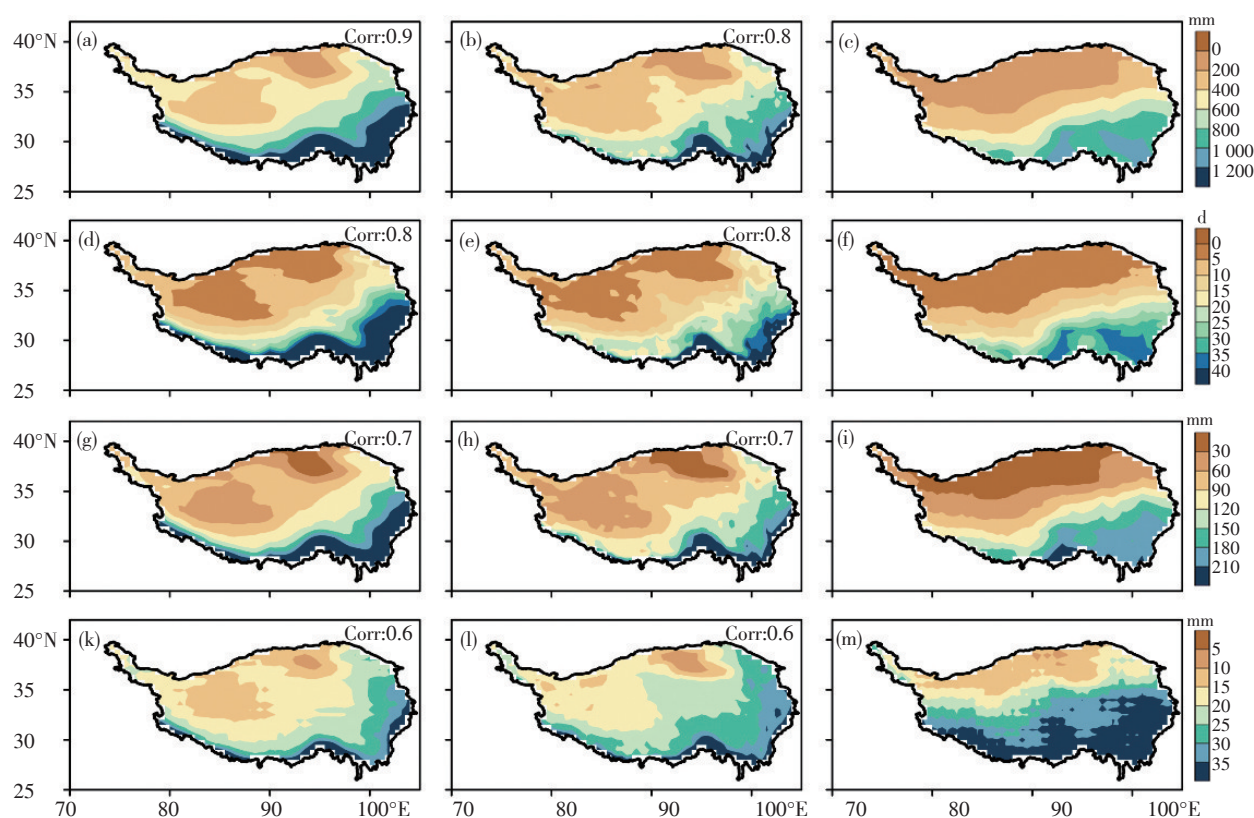


图3 基于CMIP6 HighResMIP低分辨率(左列)、高分辨率(中列)模型的1998—2014年青藏高原极端降水的降水总量(PRCPTOT, a—c)、大雨日数(R10mm, d—f)、极端降水量(R95p, g—i)、单日最大降水量(Rx1day, k—m)空间分布和GPCP观测结果(右列)(Corr表示CMIP6 HighResMIP模型和GPCP观测之间的空间相关系数)(Chen et al., 2022a)

Fig. 3 Spatial patterns of the (a—c) PRCPTOT, (d—f) R10mm, (g—i) R95p, (k—m) Rx1day of the extreme precipitation from (left column) low-resolution, (middle column) high-resolution models of the CMIP6 HighResMIP and (right-column) GPCP observations over the Tibetan Plateau during 1998–2014.

Corr indicates the spatial correlation coefficient between CMIP6 HighResMIP models and GPCP observations (Chen et al., 2022a)

青藏高原降水模拟的差异可知,高、低分辨率模式均可很好地再现极端降水在高原呈现出的西北—东南逐渐增加的空间格局,模拟的极端降水的场相关系数可达0.6以上。然而,高、低分辨率模式均在青藏高原的东南侧(横断山脉附近)存在对极端降水强度和频率模拟的“湿偏差”。但是,高分辨率模式相较于低分辨率模式在青藏高原地区的PRCPTOT模拟偏差下降了31%,极端降水量R95p模拟偏差下降了14%,Rx1day模拟偏差下降了10%(图3)。因此,提升模式的水平分辨率可以一定程度上降低青藏高原及周边地区极端降水的模拟偏差(Chen et al., 2022a; Jin et al., 2023)。

4.2 青藏高原东侧极端降水的未来预估

对于青藏高原东侧极端降水的未来预估,目前多数以CMIP6中的情景模式比较计划(Scenario Model Intercomparison, ScenarioMIP)来开展研究。参与模拟的气候模式的分辨率虽不及HighResMIP中的模式分辨率(大气分辨率为 0.5°),但也可以为研究未来不同排放情境下青藏高原地区极端降水的变化提供预估数据支持。CMIP6模式结果表明,青藏高原地区未来降水总体呈现增加趋势,降水变幅近期小于中期和远期(陈炜等, 2021; 张佳怡等, 2022),高排放情景的变化趋势大于中等和低排放情景(Wang et al., 2021);在夏季增幅最大,冬季增幅最小(李博渊和胡琴, 2024)。未来年平均降水的增加主要由日间降水贡献,降水预估的不确定性大值区位于青藏高原西部(肖雨佳, 2021)。在不同时期及不同排放情景下,该地区年平均降水量变化速率的模式间差异较大(Wang et al., 2018)。对于青藏高原地区极端降水的未来预估表明,极端降水的变化总体呈现增加趋势(Zhou et al., 2014; Wen et al., 2016; Veiga and Yuan, 2021)。与中国其他地区相比,青藏高原地区未来极端降水频率的增加较为显著(Wang et al., 2022)。极端降水指数(PRCPTOT, R95p, CWD)的增幅多呈现出由西北向东南逐渐减小的空间分布特征(Gao et al., 2018; 张文青等, 2023)。在21世纪末,该地区雨季极端降水量(R95p)的增加幅度随排放情景的升高而变大(栾澜, 2023)。全球变暖达到 1.5°C 、 2°C 和 3°C 温升阈值时,随着排放情景的加强,青藏高原极端降水频率(R10 mm, R20 mm)、强度(Rx1day, R95p)和持续时间(CWD, CDD)的变化更快、波动更大(You et al., 2020; Airiken et al., 2023)。西南和青藏高原地区的强降水(R95p, R10 mm)和持续性降水(Rx5day, CWD)增多(Yang et al., 2018)。在青藏高原东南部、西部和南部边界地区,未来小时降水的变化趋势表现为频率减少、持续时间缩短和强度增大。同时,降水强度与海拔高度之间存在显著相关性,高海

拔地区极端降水强度(Rx1hr, Rx3hr, Rx6hr)的增加更为显著。复杂地形是该地区未来极端降水变化不均匀分布的重要影响因素(Ma et al., 2023)。

5 展望

近10 a来关于青藏高原东侧极端降水的研究,已在降水数据观测分析方法、极端降水演变特征和机制、云-降水宏微观物理特征和数值模拟及预估等方面取得了不少新进展,但还需要进一步深入系统地分析研究,尤其应重点关注和思考以下几个相关的科学问题:

(1) 基于机器学习和深度学习等方法的多源数据融合发展及应用。利用ANN、CNN、ETC等人工智能方法,将青藏高原地区各具优点的多源降水数据(如CMFD、GLDAS、APHRODITE、CN05.1)加以综合,形成高时空分辨率、高质量、适用于青藏高原及其周边地区的降水融合数据。随着机器学习算法的持续更新,以及区域气候模式动力降尺度数据与对流可分辨模式数据的不断完善,不仅可为站点稀少地区降水变化研究提供可靠的降水资料,而且可为深入研究青藏高原气候变化的规律及其预测提供理论依据。

(2) 青藏高原东侧复杂地形区极端降水变化的内在机理。在全球变暖背景下,青藏高原及周边地区极端降水频发,极端降水量(如R95p、Rx5day)和降水日数(CWD、R10mm、R20mm)呈增加趋势,极端降水受地形影响空间分异性明显。持续性降水(CWD)多发生在川西高原,而极端降水(R95p、Rx5day)更多发生在地形高度变化剧烈的高原与盆地交界地区。但目前对于极端降水变化的研究多关注青藏高原主体和四川盆地,对青藏高原东侧复杂地形区极端降水变化的认识不足。由于青藏高原东侧极端降水成因复杂,涉及不同纬度多种系统以及不同尺度系统之间的相互作用,加强对其演变关键物理过程和形成机制的研究,可提高青藏高原东侧复杂地形区降水的业务预报能力。

(3) 青藏高原东侧复杂地形区云-降水物理特征的定量刻画。基于CloudSat/CALIPSO卫星数据和TIPEX-III的观测试验资料,可深入了解青藏高原地区不同类型云的云量分布和云微物理特征。从宏观特征来看,青藏高原东侧复杂地形区不同云类型与云相态的水平分布特征受大地形影响明显,透光高积云在秋冬季分布范围显著增大。另外主导云类型与云相态具有显著的季节差异,蔽光高层云表现出秋冬多春夏少的特征。定量分析青藏高原云-降水发展的宏微观特征,对于改进数值模式参数化方案以及认识云-物理过程对极端降水的影响有重要作用。未来需要加强

对于青藏高原云与大气环流之间相互作用和变化机制的相关研究。

(4) 青藏高原东侧复杂地形区极端降水的模拟评估与未来预估。现有的全球气候模式对青藏高原极端降水的模拟能力有限。青藏高原降水的模拟偏差与模式的分辨率、模式对复杂地形的描述、云微物理过程和模式参数化方案等密切相关,并且模式在高海拔地区模拟结果的不确定性较大。在全球气候变化背景下,青藏高原未来极端降水的预估总体呈增加趋势,青藏高原极端降水也随增温而迅速增加,也存在“湿的越湿,干的越干”的空间分布差异。因此,采用不同的约束预估手段,提升青藏高原东侧区域极端降水的模拟及预估能力,可以更好地认识未来青藏高原东侧复杂地形区极端降水变化,为区域防灾减灾和生态保护科学决策提供理论依据和科技支撑。

参考文献(References):

- 陈虹举,杨建平,丁永建,等.2021.多模式产品对青藏高原极端气候模拟能力评估[J].高原气象,40(5):977–990. Chen H J, Yang J P, Ding Y J, et al. 2021. Evaluation of extreme weather indices over Qinghai–Xizang Plateau in NEX–GDDP [J]. Plateau Meteorology,40(5):977–990 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0534.2020.00104
- 陈权亮,高国路,李扬.2022.青藏高原深对流及其在对流层—平流层物质输送中作用的研究进展[J].大气科学,46(5):1198–1208. Chen Q L, Gao G L, Li Y. 2022. Advances in studies of deep convection over the Tibetan Plateau and its effect on stratospheric–tropospheric material transport [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,46(5):1198–1208 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006–9895.2201.21118
- 陈权亮,刘晓冉,范广洲等. 2010b.川西高原夏季降水变化特征及其异常年环流形势[J].中国沙漠,30(3):706–711. Chen Q L, Liu X R, Fan G Z. 2010. Features of summer precipitation change over the West Sichuan Plateau and its relationship with large–scale circulations [J]. Chinese Journal of Desert Research,30(3):706–711 (in Chinese)
- 陈权亮,倪长健,万文龙.2010a.川渝盆地夏季早涝变化特征及成因分析[J].高原气象,29(3):587–594. Chen Q L, Ni C J, Wan W L. 2010a. Features of summer precipitation change of the Chuanyu Basin and its relationship with large–scale circulations [J]. Plateau Meteorology,40(6):29(3):587–594 (in Chinese)
- 陈炜,姜大膀,王晓欣.2021.CMIP6模式对青藏高原气候的模拟能力评估与预估研究[J].高原气象,40(6):1455–1469. Chen W, Jiang D B, Wang X X. 2021. Evaluation and projection of CMIP6 Models for climate over the Qinghai–Xizang (Tibetan) Plateau [J]. Plateau Meteorology,40(6):1455–1469 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0534. 2021. zk003
- 陈子凡,王磊,李谢辉,等.2022.西南地区极端降水时空变化特征及其与强 ENSO 事件的关系[J].高原气象,41(3):604–616. Chen Z F, Wang L, Li X H, et al. 2022. Spatiotemporal change characteristics of extreme precipitation in South–western China and its relationship with intense ENSO events [J]. Plateau Meteorology,41(3):604–616 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0534.2022.00004
- 程晓龙,李跃清,衡志伟.2021.川贵渝复杂地形下横槽诱发双涡贵州暴雨过程的数值模拟[J].气象学报,79(4):626–645. Cheng X L, Li Y Q, Heng Z W. 2021. Numerical simulation of a torrential rain process in Guizhou triggered by two vortices originating from a transverse trough over the Sichuan–Guizhou–Chongqing complex terrain [J]. Acta Meteorologica Sinica,79(4):626–645 (in Chinese). doi:10.11676/qxb2021.039
- 崔鹏,苏凤环,邹强,等.2015.青藏高原山地灾害和气象灾害风险评估与减灾对策[J].科学通报,60(32):3067–3077. Cui P, Su F H, Zou Q, et al. 2015. Risk assessment and disaster reduction strategies for mountainous and meteorological hazards in Tibetan Plateau [J]. Chinese Science Bulletin,60(32):3067–3077 (in Chinese). doi:10.1360/N972015–00849
- 董新宁,吴遥,黄安宁,等.2023.川渝地区夏季极端降水日变化特征分析[J].大气科学,47(2):259–272. Dong X N, Wu Y, Huang A N, et al. 2023. Analysis of diurnal variation characteristics of summer extreme precipitation in Sichuan and Chongqing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,47(2):259–272 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006–9895.2108.21032
- 段安民,肖志祥,吴国雄.2016. 1979—2014 年全球变暖背景下青藏高原气候变化特征[J].气候变化研究进展,12(5):374–381. Duan A M, Xiao Z X, Wu G X. 2016. Characteristics of climate change over the Tibetan Plateau under the global warming during 1979 [J]. Climate Change Research,12(5):374–381 (in Chinese). doi:10.12006/j.issn.1673–1719.2016.039
- 傅云飞,潘晓,刘国胜,等. 2016. 基于云亮温和降水回波顶高度分类的夏季青藏高原降水研究[J].大气科学,40(1):102–120. FU Y F, PAN X, LIU G S, et al. 2016. Characteristics of precipitation based on cloud brightness temperatures and storm tops in summer Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,40(1):102–120 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006–9895.1507.15165
- 韩林君,白爱娟.2019. 2004—2017 年夏半年西南涡在四川盆地形成降水的特征分析[J].高原气象,38(3):552–562. Han L J, Bai A. 2019. Precipitation characteristics of southwest vortex in Sichuan Basin from May to October in 2004–2017 [J]. Plateau Meteorology,38(3):552–562 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0534.2018.00100
- 何钰,朱莉,李国平等.2023.青藏高原东坡地形对影响云南降水的高原涡的作用机理[J].高原气象,43(1):42–58. He Y, Zhu L, Li G P, et al. 2023. Action mechanism of Tibetan Plateau’s Eastern slope topography on the PLV affecting Yunnan precipitation [J]. Plateau Meteorology,43(1):42–58 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0534.2023.00037
- 胡芬,姜大膀,范广洲.2014. CMIP5 全球气候模式对青藏高原地区气候模拟能力评估[J].大气科学,38(5):924–938. Hu Q, Jiang D B, Fan G Z. 2014. Evaluation of CMIP5 models over the Qinghai–Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,38(5):924–938 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006–9895.2013.13197
- 李博渊,胡芬.2024.基于 CMIP6 模式评估结果对未来青藏高原降水多情景预估[J].高原气象,43(1):59–72. Li B Y, Hu Q. 2024. Multi–scenario projection of future precipitation over the Qinghai–Xizang (Tibetan) Plateau based on CMIP6 Model assessment results [J]. Plateau Meteorology,43(1):59–72 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0534.2023.00029
- 李英,卢萍,赵兴炳.2023.青藏高原及周边地区近地层小气候特征分析[J].沙漠与绿洲气象,17(2):81–90. Li Y, Lu P, Zhao X B. 2023. Ob-

- servational characteristics of surface layer meteorological elements over Tibetan Plateau and its surrounding area [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 17(2):81–90 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2023.02.011
- 李跃清,张琪.2014.西南地区夏季云量与降水的关系特征分析[J]. *自然资源学报*, 29(3):441–453. Li Y Q, Zhang Q. 2014. Contemporaneous relationships between summer cloudiness and precipitation over Southwest China [J]. *Journal of Natural Resources*, 29(3):441–453 (in Chinese). doi:10.11849/zrzyxb.2014.03.008
- 刘江涛,徐宗学,赵焕,等.2018. 1973—2016年雅鲁藏布江流域极端降水事件时空变化特征[J]. *山地学报*, 36(5):750–764. Liu J T, Xu Z X, Zhao H, et al. 2018. Spatiotemporal variation of extreme precipitation events in the Yarlung Zangbo river basin from 1973 to 2016 [J]. *Mountain Research*, 36(5):750–764 (in Chinese). doi:10.16089/j.cnki.1008-2786.000371
- 刘屹岷,燕亚菲,吕建华,等.2018.基于CloudSat/CALIPSO卫星资料的青藏高原云辐射及降水的研究进展[J]. *大气科学*, 42(4):847–858. Liu Y M, Yan Y F, Lu J H, et al. 2018. Review of current investigations of cloud, radiation and rainfall over the Tibetan Plateau with the CloudSat/CALIPSO dataset [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 42(4):847–858 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1805.17281
- 栾澜.2023.青藏高原降水及其极端事件变化:观测与预估[D].北京:中国气象科学研究院. Luan L. 2023. Changes in precipitation and its daily extremes over the Qinghai-Tibet Plateau: Observation and Projection [D]. Beijing:Chinese Academy of Meteorological Sciences (in Chinese)
- 栾澜,翟盘茂.2023.基于多源数据的青藏高原雨季降水特征变化分析[J]. *气候变化研究进展*, 19(2):173–190. Luan L, Zhai P M. 2023. Changes in rainy season precipitation properties over the Qinghai-Tibet Plateau based on multi-source datasets [J]. *Climate Change Research*, 19(2):173–190 (in Chinese). doi:10.12006/j.issn.1673-1719.2022.046
- 马洁华,孙建奇,汪君,等.2019.2018年夏季我国极端降水及滑坡泥石流灾害预测[J]. *大气科学学报*, 42(1):93–99. Ma J H, Sun J Q, Wang J, et al. 2019. Real-time prediction for 2018 JJA extreme precipitation and landslides [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 42(1):93–99 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20181214001
- 马恩点.2017.青藏高原东部和四川盆地强对流降水的数值模拟[D].南京:南京信息工程大学. Ma E D. 2017. Numerical simulation of deep convective precipitation in the eastern Tibet Plateau and Sichuan Basin [D]. Nanjing:Nanjing University of Information Science & Technology (in Chinese)
- 马玉坤,马俊强,李菲,等.2022.青藏高原边坡临夏地区短时强降水时空分布及海拔特征分析[J]. *沙漠与绿洲气象*, 16(3):16–23. Ma Y K, Ma J Q, Li F, et al. 2022. Spatial and temporal characteristics of short-time strong rainfall and its altitude distribution characteristics in Linxia at Plateau Slope [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 16(3):16–23 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2022.03.010
- 南天一,陈杰,丁智威,等.2023.基于深度学习的青藏高原多源降水融合[J]. *中国科学:地球科学*, 53(4):836–855. Nan T Y, Chen J W, Ding Z, et al. 2023. Deep learning-based multi-source precipitation merging for the Tibetan Plateau [J]. *Science China Earth Sciences*, 66(4):852–870 (in Chinese). doi:10.1360/SSTe-2022-0077
- 潘晓,傅云飞.2015.夏季青藏高原深厚及浅薄降水云气候特征分析[J]. *高原气象*, 34(5):1191–1203. Pan X, Fu Y F. 2015. Analysis on climatological characteristics of deep and shallow precipitation cloud in summer over Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Plateau Meteorology*, 34(5):1191–1203 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00112
- 陶威,陈权亮.2018.两类El Niño事件对我国西南地区冬季降水的影响[J]. *气候与环境研究*, 23(6):749–757. Tao W, Chen Q L. 2018. Impacts of two types of El Niño events on winter precipitation in Southwest China [J]. *Climatic and Environmental Research*, 23(6):749–757 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17165
- 唐洁.2022.青藏高原云和降水与极端灾害天气事件分布、趋势及其成因研究[D].南京:南京信息工程大学. Tang J. 2022. Distribution, trends and causes of clouds, precipitation and extreme disastrous weather events on the Tibetan Plateau [D]. Nanjing:Nanjing University of Information Science & Technology (in Chinese)
- 汤秋鸿,刘星才,周园园,等.2019.“亚洲水塔”变化对下水水资源的连锁效应[J]. *中国科学院院刊*, 34(11):1306–1312. Tang Q H, Liu X C, Zhou Y Y, et al. 2019. Cascading impacts of asian water tower change on downstream water systems [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 34(11):1306–1312 (in Chinese). doi:10.16418/j.issn.1000-3045.2019.11.013
- 王婧羽,王晓芳,汪小康,等.2019.青藏高原云团东传过程及其中中尺度对流系统的统计特征[J]. *大气科学*, 43(5):1019–1040. Wang J Y, Wang X F, Wang X K, et al. 2019. Statistical characteristics of eastward propagation of cloud clusters from the Tibetan Plateau and mesoscale convective systems embedded in these cloud clusters [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 43(5):1019–1040 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1812.18167
- 温婷婷,郭英香,董少睿,等.2022. 1979–2017年CRU、ERA5、CMFD格点降水数据在青藏高原适用性评估[J]. *干旱区研究*, 39(3):684–697. Wen T T, Guo Y X, Dong S R, et al. 2022. Assessment of CRU, ERA5, CMFD grid precipitation data for the Tibetan Plateau from 1979 to 2017 [J]. *Arid Zone Research*, 39(3):684–697 (in Chinese). doi:10.13866/j.azr.2022.03.03
- 吴国雄,段安民,张雪芹,等.2013.青藏高原极端天气气候变化及其环境效应[J]. *自然杂志*, 35(3):167–171. Wu G X, Duan A M, Zhang X Q, et al. 2013. Extreme weather and climate changes and its environmental effects over the Tibetan Plateau [J]. *Chinese Journal of Nature*, 35(3):167–171 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.0253-9608.2013.03.002
- 吴佳,高学杰.2013.一套格点化的中国区域逐日观测数据及与其它数据的对比[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
- 肖雨佳.2021.CMIP6模式对青藏高原降水的模拟和预估[D].北京:中国气象科学研究院. Xiao Y J. 2021. Simulation and Projection of Precipitation over Tibetan Plateau by CMIP6 models [D]. Beijing:Chinese Academy of Meteorological Sciences (in Chinese). doi:10.27631/d.cnki.gzqky.2021.000011
- 肖雨佳,李建,李妮娜.2022. CMIP6 HighResMIP高分辨率气候模式对青藏高原降水模拟的评估[J]. *暴雨灾害*, 41(2):215–223. Xiao Y J, Li J, Li L N. 2022. Evaluation of CMIP6 HighResMIP models in simulating precipitation over Tibetan Plateau [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 41(2):215–223 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2022.02.012

- 徐祥德,陈联寿.2006.青藏高原大气科学试验研究进展[J].应用气象学报,17(6):756–772. Xu X D, Chen L S. 2006. Advances of the study on Tibetan Plateau Experiment of atmospheric sciences [J]. Journal of Applied Meteorological Science,17(6):756–772 (in Chinese)
- 徐祥德,董李丽,赵阳,等.2019.青藏高原“亚洲水塔”效应和大气水分循环特征[J].科学通报,64(27):2830–2841. Xu X D, Dong L L, Zhao Y, et al. 2019. Effect of the Asian Water Tower over the Qinghai–Tibet Plateau and the characteristics of atmospheric water circulation [J]. Chinese Science Bulletin,64(27):2830–2841 (in Chinese). doi:10.1360/TB-2019-0203
- 杨舒楠,张芳华,徐珺,等.2016.四川盆地一次暴雨过程的中尺度对流及其环境场特征[J].高原气象,35(6):1476–1486. Yang S N, Zhang F H, Xu J, et al. 2016. Mesoscale convective systems and characteristics of environment field of a heavy rainfall process occurred in Sichuan Basin [J]. Plateau Meteorology,35(6):1476–1486 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2015.00105
- 杨昭明,张调风.2021.1961—2017年青藏高原东北部雨季降水量变化及其贡献度分析[J].干旱区研究,38(1):22–28. Yang Z M, Zhang T F. 2021. Analysis of precipitation change and its contribution in the rainy season in the northeast Qinghai–Tibet Plateau from 1961 to 2017 [J]. Arid Zone Research,38(1):22–28 (in Chinese). doi:10.13866/j.azr.2021.01.03
- 姚秀萍,包晓红,刘俏华,等.2021.近10 a高原切变线研究进展综述[J].暴雨灾害,40(6):569–576. Yao X P, Bao X H, Liu Q H, et al. 2021. Review on the research advances of the Tibetan Plateau shear line in the last decade [J]. Torrential Rain and Disasters,40(6):569–576 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2021.06.001
- 游庆龙,康世昌,李剑东,等.2021.青藏高原气候变化若干前沿科学问题[J].冰川冻土,43(3):885–901. You Q L, Kang S C, Li J D, et al. 2021. Several research frontiers of climate change over the Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,43(3):885–901 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0029
- 张佳怡,伦玉蕊,刘浏,等.2022. CMIP6多模式在青藏高原的适应性评估及未来气候变化预估[J].北京师范大学学报(自然科学版),58(1):77–89. Zhang J Y, Lun Y R, Liu L, et al. 2022. CMIP6 evaluation and projection of climate change in Tibetan Plateau [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science),58(1):77–89 (in Chinese). doi:10.12202/j.0476-0301.2021114
- 张利红,李跃清,秦宁生,等.2011.青藏高原坡面观测信息对我国夏季降水预报的作用[J].气象,37(10):1233–1240. Zhang L H, Li Y Q, Qin N S, et al. 2011. The Role of observations from Tibetan Plateau slope in summer rainfall NWP in China [J]. Meteorological Monthly,37(10):1233–1240 (in Chinese)
- 张文青,刘浏,伦玉蕊,等.2023.青藏高原未来极端降水时空变化特征及海拔依赖性研究[J].水土保持学报,37(2):149–158. Zhang W Q, Liu L, Lun Y R, et al. 2023. Spatial-temporal variation characteristics of future extreme precipitation and its elevation dependency over the Qinghai–Tibet Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation,37(2):149–158 (in Chinese). doi:10.13870/j.cnki.stbxb.2023.02.018
- 张仪辉,刘昌明,梁康等.2022.雅鲁藏布江流域降水时空变化特征[J].地理学报,77(3):603–618. Zhang Y H, Liu C M, Liang K, et al. 2022. Spatio-temporal variation of precipitation in the Yarlung Zangbo river basin [J]. Acta Geographica Sinica,77(3):603–618 (in Chinese). doi:10.11821/dlxb202203008
- 赵平,李跃清,郭学良,等.2018.青藏高原地气耦合系统及其天气气候效应:第三次青藏高原大气科学试验[J].气象学报,76(6):833–860. Zhao P, Li Y Q, Guo X L, et al. 2018. The Tibetan Plateau surface-atmosphere coupling system and its weather and climate effects: The Third Tibetan Plateau Atmospheric Scientific Experiment [J]. Acta Meteorologica Sinica,76(6):833–860 (in Chinese). doi:10.11676/qxb2018.0670
- 赵思雄,孙建华.2019.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,38(5):422–430. Zhao S X, Sun J H. 2019. Progress in mechanism study and forecast for heavy rain in China in recent 70 years [J]. Torrential Rain and Disasters,38(5):422–430 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2019.05.004
- Airiken M, Li S, Abulaiti A, et al. 2023. Prediction of extreme climate on the Tibetan Plateau based on NEX-GDDP-CMIP6 [J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal,2023: 1–15. doi:10.1080/10807039.2023.2260493
- Cai H K, Yang Y, Chen Q L. 2022. Distribution characteristics of cloud types and cloud phases over China and their relationship with cloud temperature [J]. Remote Sensing,14(21):5601. doi:10.3390/rs14215601
- Chen J, Chen H, Guo S. 2018. Multi-Site precipitation downscaling using a stochastic weather generator [J]. Climate Dynamics,50:1975–1992. doi:10.1007/s00382-017-3731-9
- Chen Q L, Ge F, Jin Z R, et al. 2022b. How well do the CMIP6 HighResMIP models simulate precipitation over the Tibetan Plateau? [J]. Atmospheric Research,279:106393. doi:10.1016/j.atmosres.2022.106393
- Chen Q L, Zhang Z Q, Li Y, et al. 2022a. Influence of Scandinavian teleconnection pattern on summer precipitation over the eastern side of the Tibetan Plateau [J]. International Journal of Climatology,43:1898–1911. doi:10.1002/joc.7952
- Cui T, Li C, Tian F. 2021. Evaluation of temperature and precipitation simulations in CMIP6 models over the Tibetan Plateau [J]. Earth and Space Science,8(7):e2020EA001620. doi:10.1029/2020EA001620
- Gao Y, Chen F, Jiang Y. 2020. Evaluation of a convection-permitting modeling of precipitation over the Tibetan Plateau and its influences on the simulation of snow-cover fraction [J]. Journal of Hydrometeorology,21:1531–1548. doi:10.1175/JHM-D-19-0277.1
- Gao Y, Xiao L, Chen D, et al. 2018. Comparison between past and future extreme precipitations simulated by global and regional climate models over the Tibetan Plateau [J]. International Journal of Climatology,38(3):1285–1297. doi:10.1002/joc.5243
- Hong Z, Han Z, Li X, et al. 2021. Generation of an improved precipitation data set from multisource information over the Tibetan Plateau [J]. Journal of Hydrometeorology,22:1275–1295. doi:10.1175/JHM-D-20-0252.1
- IPCC. 2021. Summary for Policymakers of Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press
- Jia K, Ruan Y, Yang Y, et al. 2019. Assessing the performance of CMIP5 global climate models for simulating future precipitation change in the Tibetan Plateau [J]. Water,11(9):1771. doi:10.3390/w11091771
- Jin Z R, Ge F, Chen Q L, et al. 2023. To what extent horizontal resolution

- improves the simulation of precipitation in CMIP6 HighResMIP models over Southwest China? [J]. *Frontiers in Earth Science*,10:1003748. doi:10.3389/feart.2022.1003748
- Li J D, Sun Z A, Liu Y M, et al. 2021. Top-of-atmosphere radiation budget and cloud radiative effects over the Tibetan Plateau and adjacent monsoon regions from CMIP6 simulations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*,126(9):e2020JD034345. doi:10.1029/2020JD034345
- Liu L, Xu Z X. 2016. Regionalization of precipitation and the spatiotemporal distribution of extreme precipitation in southwestern China [J]. *Natural Hazards*,80:1195–1211. doi: 10.1007/s11069-015-2018-x
- Lundquist J, Hughes M, Gutmann E, et al. 2019. Our skill in modeling mountain rain and snow is bypassing the skill of our observational networks [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*,100: 2473–2490. doi:10.1175/BAMS-D-19-0001.1
- Ma M, Tang J, Ou T, et al. 2023. Sub-Daily extreme precipitation and its linkage to global warming over the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research:Atmospheres*,e2023JD039062. doi:10.1029/2023JD039062
- Ma Y, Sun X, Chen H, Hong Y, et al. 2021. A two-stage blending approach for merging multiple satellite precipitation estimates and rain gauge observations:An experiment in the northeastern Tibetan Plateau [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*,25(1):359–374. doi:10.5194/hess-25-359-2021
- Ou T, Chen D, Chen X, et al. 2020. Simulation of summer precipitation diurnal cycles over the Tibetan Plateau at the gray-zone grid spacing for cumulus parameterization [J]. *Climate Dynamics*,54:3525–3539. doi: 10.1007/s00382-020-05181-x
- Shen H, Zhao J, Cheung K Y, et al. 2021. Causes of the extreme snowfall anomaly over the northeast Tibetan plateau in early winter 2018 [J]. *Climate Dynamics*,56:1767–1782. doi:10.1007/s00382-020-05556-0
- Teng K Y, Cai H K, Sun X B, et al. 2022. Geometric and physical characteristics of precipitation clouds in Tibetan Plateau [J]. *Advances in Meteorology*,56:76–81. doi:10.1155/2022/9181219
- Veiga S F, Yuan H. 2021. Performance-based projection of precipitation extremes over China based on CMIP5/6 models using integrated quadratic distance [J]. *Weather and Climate Extremes*,34:100398. doi:10.1016/j.wace.2021.100398
- Wang A H, Zeng X B. 2012. Evaluation of multireanalysis products with in situ observations over the Tibetan Plateau [J]. *Journal of geophysical research:Atmospheres*,117:D05102. doi:10.1029/2011JD016553
- Wang C P, Huang M T, Zhai P M. 2021. Change in drought conditions and its impacts on vegetation growth over the Tibetan plateau [J]. *Advances in Climate Change Research*,12(3):333–341. doi:10.1016/j.accre.2021.04.004
- Wang L, Li Y, Li M, et al. 2022. Projection of precipitation extremes in China's mainland based on the statistical downscaled data from 27 GCMs in CMIP6 [J]. *Atmospheric Research*,280:106462. doi:10.1016/j.atmosres.2022.106462
- Wang X, Pang G, Yang M. 2018. Precipitation over the Tibetan Plateau during recent decades: a review based on observations and simulations[J]. *International Journal of Climatology*,38(3):1116–1131. doi:10.1002/joc.5246
- Wen X, Fang G, Qi H, et al. 2016. Changes of temperature and precipitation extremes in China: past and future [J]. *Theoretical and Applied Climatology*,126:369–383. doi: doi:10.1007/s00704-015-1584-x
- Xu W. 2013. Precipitation and convective characteristics of summer deep convection over East Asia observed by TRMM [J]. *Monthly Weather Review*,141(5):1577–1592. doi:10.1175/MWR-D-12-00177.1
- Xu Y, Gao X J, Shen Y, et al. 2009. A daily temperature dataset over China and its application in validating a RCM simulation [J]. *Advances in Atmospheric Science*,26(4):763–772. doi:10.1007/s00376-009-9029-z
- Yang K, He J, Tang W, et al. 2019. China meteorological forcing dataset (1979–2018) [R]. National Tibetan Plateau Data Center
- Yang Y, Tang J, Wang S, et al. 2018. Differential impacts of 1.5 °C and 2 °C warming on extreme events over China using statistically downscaled and bias-corrected CESM low-warming experiment [J]. *Geophysical Research Letters*,45(18):9852–9860. doi:10.1029/2018GL079272
- Yatagai A, Kamiguchi K, Arakawa O, et al. 2012. APHRODITE:constructing a long-term daily gridded precipitation dataset for Asia based on a dense network of rain gauges [J]. *Bulletin of The American Meteorological Society*,93(9):1401–1415. doi:10.1175/BAMS-D-11-00122.1
- You Q, Min J, Zhang W, et al. 2015. Comparison of multiple datasets with gridded precipitation observations over the Tibetan Plateau [J]. *Climate Dynamics*,45(3–4):791–806. doi:10.1007/s00382-014-2310-6
- You Q, Wu F, Shen L, et al. 2020. Tibetan Plateau amplification of climate extremes under global warming of 1.5 °C, 2 °C and 3 °C [J]. *Global and Planetary Change*,192:103261. doi:10.1016/j.gloplacha.2020.103261
- Yu R, Li J, Zhang Y, et al. 2015. Improvement of rainfall simulation on the steep edge of the Tibetan Plateau by using a finite-difference transport scheme in CAM5 [J]. *Climate Dynamics*,45(9–10):2937–2948. doi: 10.1007/s00382-015-2515-3
- Zhang Y C, Zhang F Q, Davis C A, et al. 2018. Diurnal evolution and structure of long-lived mesoscale convective vortices along the Mei-yu front over the East China plains [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*,75(3):1005–1025. doi:10.1175/JAS-D-17-0197.1
- Zheng G W, Li Y, Chen Q L, et al. 2022. The increasing predominance of extreme precipitation in Southwest China since the late 1970s [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*,15(5):659. doi:10.1016/j.aossl.2022.100227
- Zhou B, Wen Q H, Xu Y, et al. 2014. Projected changes in temperature and precipitation extremes in China by the CMIP5 multimodel ensembles [J]. *Journal of Climate*,27:6591–6611. doi:10.1175/JCLI-D-13-00761.1
- Zhu H, Jiang Z, Li J, et al. 2020. Does CMIP6 inspire more confidence in simulating climate extremes over China? [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*,37:1119–1132. doi:10.1007/s00376-020-9289-1
- Zhu X H, Bothe O, Fraedrich K. 2011. Summer atmospheric bridging between Europe and East Asia: Influences on drought and wetness on the Tibetan Plateau [J]. *Quaternary International*,236(1–2):151–157. doi: 10.1016/j.quaint.2010.06.015
- Zhu Y Y, Yang S. 2020. Evaluation of CMIP6 for historical temperature and precipitation over the Tibetan Plateau and its comparison with CMIP5 [J]. *Advances in Climate Change Research*,11(3):239–251. doi: 10.1016/j.accre.2020.08.001