

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0029

YOU Qinglong, KANG Shichang, LI Jiandong, et al. Several research frontiers of climate change over the Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(3):885-901. [游庆龙, 康世昌, 李剑东, 等. 青藏高原气候变化若干前沿科学问题[J]. 冰川冻土, 2021, 43(3): 885-901.]

# 青藏高原气候变化若干前沿科学问题

游庆龙<sup>1,2</sup>, 康世昌<sup>3,4</sup>, 李剑东<sup>5</sup>, 陈德亮<sup>6</sup>, 翟盘茂<sup>7</sup>, 吉振明<sup>8,9</sup>

- (1. 复旦大学 大气科学研究所 大气与海洋科学系, 上海 200438; 2. 中国气象局 复旦大学海洋气象灾害联合实验室, 上海 200438;  
3. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 4. 中国科学院大学, 北京 100049;  
5. 中国科学院 大气物理研究所 大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029; 6. 瑞典哥德堡大学  
地球科学系, 瑞典 哥德堡 40530; 7. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 8. 中山大学 大气科学学院,  
广东 珠海 519082; 9. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082)

**摘要:** 在全球变化的背景下, 青藏高原冰冻圈和大气圈正在发生快速变化, 对“亚洲水塔”和“第三极”的生态环境带来深刻影响。研究并梳理了近年来青藏高原气候变化的若干前沿科学问题的研究进展, 如高原极端气候事件变化及其与大气环流的关系; 高原变暖放大效应及海拔依赖型变暖的物理机制; 再分析资料在高原气候变化应用的适用性; 气候模式在高原资料稀缺地区的模拟偏差特征及不确定性; 以及不同升温阈值下高原气候变化的预估及其风险等。同时展望了高原气候变化研究的前沿问题和科学难点。认清高原气候变化研究的前沿科学问题, 可为“一带一路”倡议顺利实施提供科学依据。

**关键词:** 青藏高原; 气候变化; 前沿问题

**中图分类号:** P467 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)03-0885-17

## 0 引言

青藏高原(以下简称高原)下垫面复杂, 冰川、冻土、湖泊等广泛发育(图1), 被誉为地球第三极和“亚洲水塔”, 在我国气候系统稳定、水资源供应、生物多样性保护、碳收支平衡等方面具有重要的生态安全屏障作用, 也处于“泛第三极”和“一带一路”的核心区<sup>[1-12]</sup>。在全球变暖背景下, 高原正经历显著升温且未来将持续增暖, 生态环境和气候系统正在显著发生变化, 如气候变暖和变湿、水循环加强、生态系统总体趋好、冰川消融、冻土退化和沙漠化加剧等<sup>[1-2, 5, 13-14]</sup>。高原是中纬度地区冰冻圈发育最广泛的区域, 在受气候变化影响的各圈层中, 高原冰冻圈首当其冲, 是对气候系统的反馈作用较为显著和快速的圈层<sup>[7-8, 15-17]</sup>。在高原大气圈加速变暖过程中, 冰冻圈及其环境正在发生显著改变, 如积雪期缩短、冰川物质持续亏损、冰川跃动和冰崩加剧、多年冻土温度升高和持续退化等<sup>[15, 18-25]</sup>。高原气候快

速变暖及其带来的一系列影响, 得到科学界广泛关注, 是目前地球系统科学研究的热点区域之一。

本文主要基于前人研究成果, 通过梳理和分析近年来高原气候变化研究的主要进展, 包括极端气候事件变化及其与大气环流的关系、变暖放大效应和海拔依赖型增暖特征和机制、再分析资料在高原的适用性和模式模拟的不确定性, 以及未来气候变化预估几个方面, 并且提出在全球变暖背景下高原气候变化研究中存在的主要问题与挑战, 进而为未来高原气候变化研究提供思路与启发。

## 1 高原气候变化研究主要进展

### 1.1 高原极端气候事件变化及其与大气环流的关系

在全球变暖背景下, 极端气候事件频率、强度和持续时间正在发生改变, 由于其对社会经济、生命财产以及生态系统的灾害影响而受到越来越多

收稿日期: 2021-04-12; 修订日期: 2021-05-16

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0105); 国家自然科学基金项目(41971072)资助

作者简介: 游庆龙, 教授, 主要从事青藏高原现代气候环境变化研究. E-mail: qlyou@fudan.edu.cn

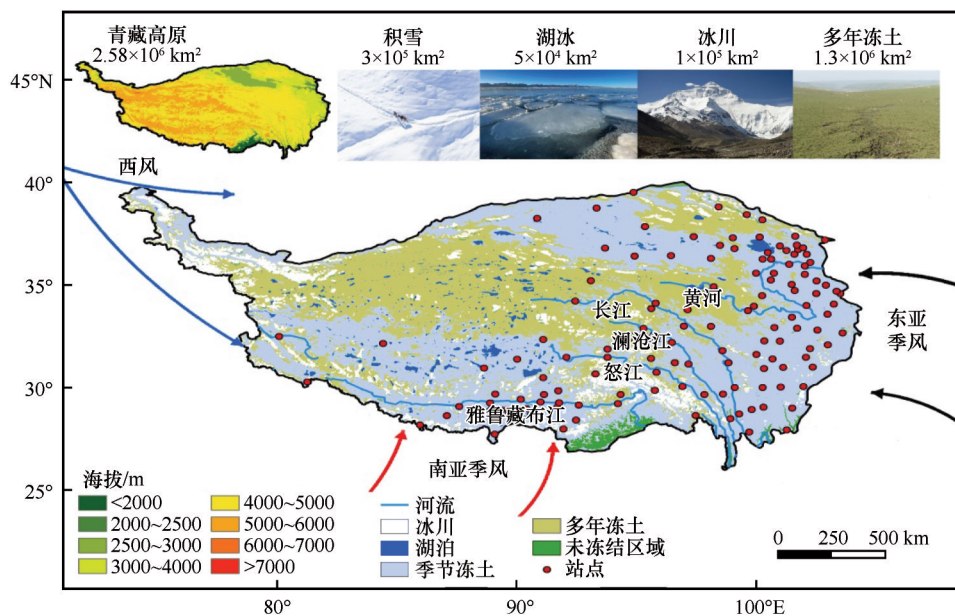


图1 青藏高原自然环境示意图。湖泊<sup>[26]</sup>、冰川<sup>[27]</sup>、冻土<sup>[28]</sup>数据来自国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn>); 积雪、湖冰、冰川和多年冻土面积数据来自(姚檀栋等, 2019)<sup>[29]</sup>;气象观测站点数据来源于中国气象局

Fig. 1 The environment of the Tibetan Plateau (TP). The data on lakes<sup>[26]</sup>, glaciers<sup>[27]</sup>, and permafrost<sup>[28]</sup> are from the National Tibetan Plateau Scientific Data Center (<http://data.tpdc.ac.cn>); the area data on snow, lake ice, glaciers and permafrost are from Yao et al. , (2019)<sup>[29]</sup> and the meteorological observational sites are from the China Meteorological Administration

的关注<sup>[30-31]</sup>。已有研究利用地面观测台站揭示了高原气温和降水极端气候事件指标的时空变化特征, 得出20世纪60年代以来, 高原大部分地区与日最低气温相关的极端事件(冷夜、持续冷期、霜日和冰冻日)的变化趋势普遍减少, 而与日最高气温相关的极端事件(热昼和持续暖期)则普遍从无显著变化转变为显著增强, 其变化幅度高于中国和全球平均水平; 极端降水事件指标(强降水量、强降水率、极强降水量、极强降水率、连续湿日、连续干日)和降水极值(最大一日降水量、最大连续五日降水量)总体上没有发现显著变化趋势。但高原极端降水变化趋势仍存在一定的区域性特征, 特别是在高原中部极端强降水事件、极值和连续湿日数存在显著的减小趋势<sup>[1, 25, 32-33]</sup>。高原极端降水事件变化可能与大尺度环流异常有关, 如偏南气流在高原地区增强, 使得孟加拉湾向北水汽输送明显加强, 从而引起高原夏季极端降水事件的增加; 同时, 近几十年来冬季欧亚大陆的反气旋系统和气旋系统之间的气压梯度加大, 导致经向环流减弱和西风急流加强, 通过环流调整增加高原上空水汽输送, 也引起了高原冬季极端降水事件的变化<sup>[34]</sup>。研究也发现高原极端降水事件变化与风暴轴变化有关, 具体物理机制如下: 北大西洋风暴轴加强(减弱), 瞬变波对基本气流的强迫作用加强(减弱), 高纬西风加速

(减弱), 进而通过罗斯贝波列造成高原极端降水事件减少(增加)<sup>[35-36]</sup>。高原强降雪极端事件也与西风急流变化异常密切相关, 研究指出了高原北支高空西风急流和南支高空西风急流的强度变化以及南北移动呈现明显的反位相变化特征, 二者的协同配置显著地影响高原强降雪极端事件的年际变率: 南支高空西风急流加强背景下, 西伯利亚地区出现暖高压异常, 北支高空西风急流被异常的东风削弱, 高原到中国东部出现冷低压异常, 西风异常加强, 南支高空西风急流南、北侧产生两个次级环流, 在高原上方产生异常上升运动, 产生极端强降雪事件<sup>[37]</sup>。从大尺度大气环流角度来阐述和解析高原极端气候事件变化及成因, 已成为高原现代气候变化研究的前沿科学问题之一。

## 1.2 高原变暖放大效应与海拔依赖型变暖特征及物理机制

高原变暖放大效应是指高原地面气温升温幅度高于中国、同纬度地区以及全球平均水平的现象[图2(a)]<sup>[38-39]</sup>。高原变暖放大效应现象在过往研究中已有提及, 如不少学者通过地面观测台站、遥感卫星以及气候多模式等多源数据集<sup>[34, 40-49]</sup>分析表明高原20世纪后半叶的变暖(20世纪50年代初)要早于北半球的趋势(20世纪70年代中期), 在过去半个世纪以来变暖趋势明显, 平均气温变暖的趋势与海

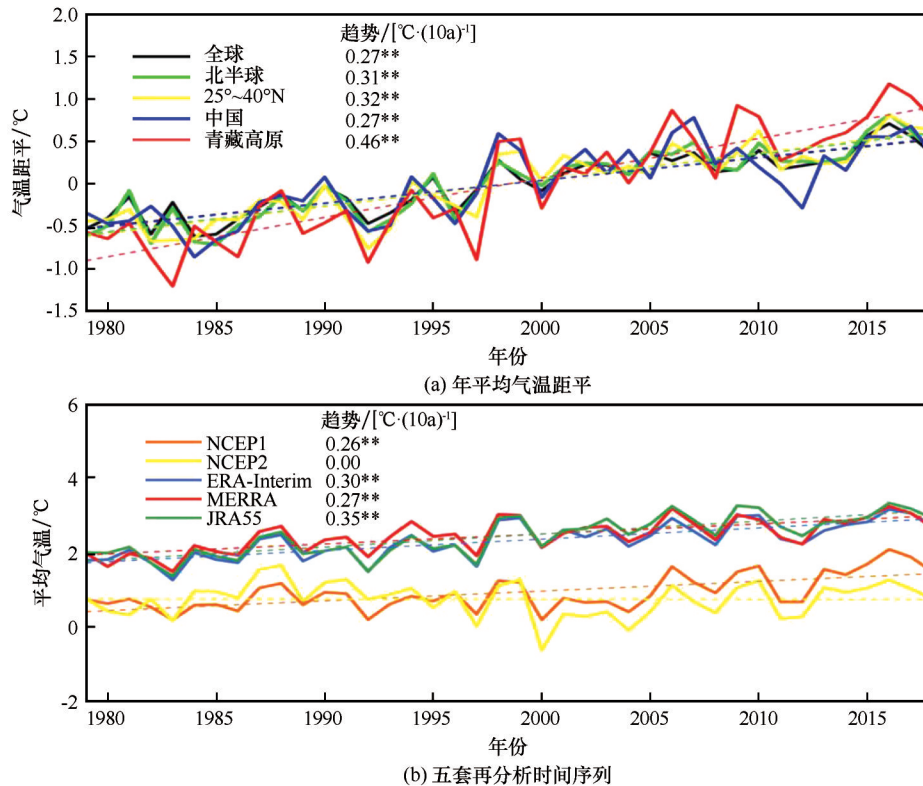


图2 1979—2018年高原及全球、北半球、25°~40°N、中国年平均气温基于1979—2018平均的距平序列(a)以及五套再分析时间序列(b), \*\*为通过95%显著性检验<sup>[49]</sup>

Fig. 2 Time series and trends of annual surface mean temperature anomalies with respect to the means during 1979—2018 over the TP, the whole of China, regions between 25° N and 40° N, the Northern Hemisphere, and the global mean (a), and time series of annual surface mean temperature over the TP are from five reanalysis data (b), the trends passed the significant test ( $P < 0.05$ ) are marked by double asterisks<sup>[49]</sup>

拔密切相关,且高原的升温速率具有明显的季节差异<sup>[24,45,50]</sup>。

海拔依赖型变暖(Elevation dependent warming)是指变暖速率随着海拔的增加而系统性变化的空间模态和物理现象<sup>[51-53]</sup>。虽然高原变暖放大效应达成共识,但其是否有海拔依赖型变暖存在学术争议。前人研究表明与高原周围地区相比,高海拔地区台站气候变暖更明显,且更高海拔的地区日最低气温的增温速率更大,且在冬季和春季较明显,并通过数值模拟得以证实<sup>[40]</sup>。从气候多模式输出得出海拔依赖型变暖可能会在未来气候变化情景气候下持续增强<sup>[43]</sup>,该机制可用来解释高海拔地区冰芯重建的快速变暖<sup>[50,54-55]</sup>。基于2000—2006年中分辨率成像光谱仪(MODIS)数据所得的高原气温趋势与地表观测的趋势一致,在高原海拔3 000~5 000 m之间存在海拔依赖型变暖,但在海拔5 000 m以上此现象不明显<sup>[56]</sup>。基于WRF模式模拟发现两种排放情景(RCP4.5和RCP8.5)下2016—2035年和2080—2100年高原最大变暖速率出现在海拔5 000 m

附近,其以上不存在海拔依赖型变暖特征<sup>[57]</sup>。最新的研究集成了高原的地面观测台站、MODIS遥感卫星地表温度、6套再分析资料以及21个CMIP5模式模拟气温数据等,对高原海拔依赖型变暖开展了系统的研究工作<sup>[58]</sup>,指出了由于高原观测数据缺乏以及再分析、模式资料应用的偏差,高原存在正、负以及不显著海拔依赖型变暖,其空间模态和物理机制在很大程度上仍然是未知等问题<sup>[58-60]</sup>。同时研究揭示了冰/雪-反照率反馈、云反馈、水汽反馈、气溶胶反馈以及土地利用变化、臭氧和植被变化等热力、动力及生物物理机制等在诠释高原海拔依赖型变暖上的前提条件和局限性(图3),给出了控制高原海拔依赖型变暖的主要物理机制还未达成共识的原因<sup>[58]</sup>。

高原西部资料缺乏特别是海拔5 000 m以上的观测十分有限,该地区气候变化(比如变暖特征、趋势幅度、年际和年代际特征等)的研究较少,高原变暖放大效应及海拔依赖型变暖现象及其具体物理机制在高原西部地区缺乏研究,该领域将会是高原大气圈和冰冻圈相互作用方面的重要研究课题。



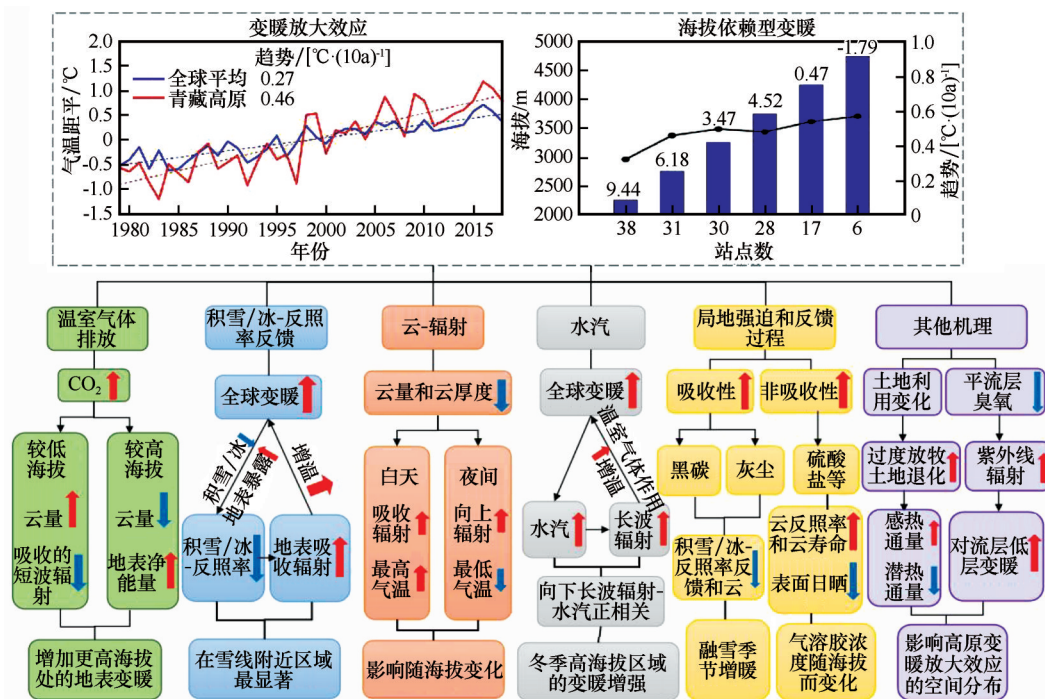


图3 高原变暖放大效应和海拔依赖型变暖的物理机制示意<sup>[39]</sup>

Fig. 3 Schematic diagram of the physical mechanisms controlling the profile of TP amplification and elevation dependent warming over the TP<sup>[39]</sup>

### 1.3 再分析资料在高原气候变化研究的适用性

再分析资料是指由不同业务数值预报模式的同化系统同化或融合地面或高空站定时观测资料、卫星等非定时观测资料,以及模式外推计算结果后产生的实时模式产品资料<sup>[61-62]</sup>。高原冰川、湖泊、冻土、高寒草甸等各种自然要素共存,下垫面复杂,且由于复杂的地形、自然条件严酷、环境艰苦和气候恶劣,高原常规地面观测台站稀少,限制了对高原资料稀缺区气候变化的了解。不少研究已经开展了多套再分析资料的气温<sup>[63]</sup>、土壤温湿度<sup>[64]</sup>、水汽<sup>[65]</sup>等数据在高原气候变化研究中的适用性评估。整体而言,不同再分析数据在同一要素上的刻画能力不同,同一套再分析数据在不同要素上的适用性也存在较大差异。

再分析与观测资料的比较与研究多集中在高原气温的空间分布、变化趋势与误差成因等方面。对6种再分析产品(MERRA、NCEP/NCAR、CFSR、ERA-40、ERA-Interim和GLDAS)进行评估后发现,ERA-Interim和MERRA在日和月气温综合表现上与高原观测数据最为接近<sup>[63]</sup>。NCEP/NCAR和EC-MWF再分析资料在高原地区没有显示明显的变暖和较大的地域差别,再分析气温资料尤其是NCEP/NCAR地面气温资料在高原上明显偏低<sup>[66]</sup>。相对于

地面观测台站,NCEP/NCAR多为减少趋势,但趋势幅度和年平均气温之间的关系在一定程度上较好。再分析资料低估地表气温的趋势可能是由于再分析系统采用与实际不一致的地形同化模型所致<sup>[67]</sup>。ERA-40与高原地表变暖的趋势更为接近,这可能是因为ERA-40的气温资料同化了地面观测台站而NCEP/NCAR却没有同化<sup>[68]</sup>。对比高原地面台站与ERA-40地表气温数据发现,ERA-40较少受局地的影响,同化系统使用的模式与真实地形有所不同,其气温偏差主要是由于台站和网格点之间海拔所造成<sup>[69]</sup>。然而,在地面观测台站数据中气温趋势幅度与年平均气温显著的关系在ERA-40不太明显,同化模型中地表各种参数也可能是造成差异的部分原因,但还需要进一步研究<sup>[70]</sup>。

最近的研究比较了高原地表海拔2 000 m以上的150个台站与同区域的多套再分析资料(NCEP1、NCEP2、ERA-Interim、MERRA、JRA55)气温变化趋势。整体而言,除NCEP2外,多数再分析资料能刻画高原近期变暖趋势[图2(b)],趋势的空间分布也是如此(图4)。与观测台站相比,NCEP1、NCEP2、ERA-Interim、MERRA、JRA55、CFSR等再分析资料数据在年和季节上都有冷偏差,年际偏差在67.4%(JRA55)到133.6%(NCEP2)之间。这种偏差可能

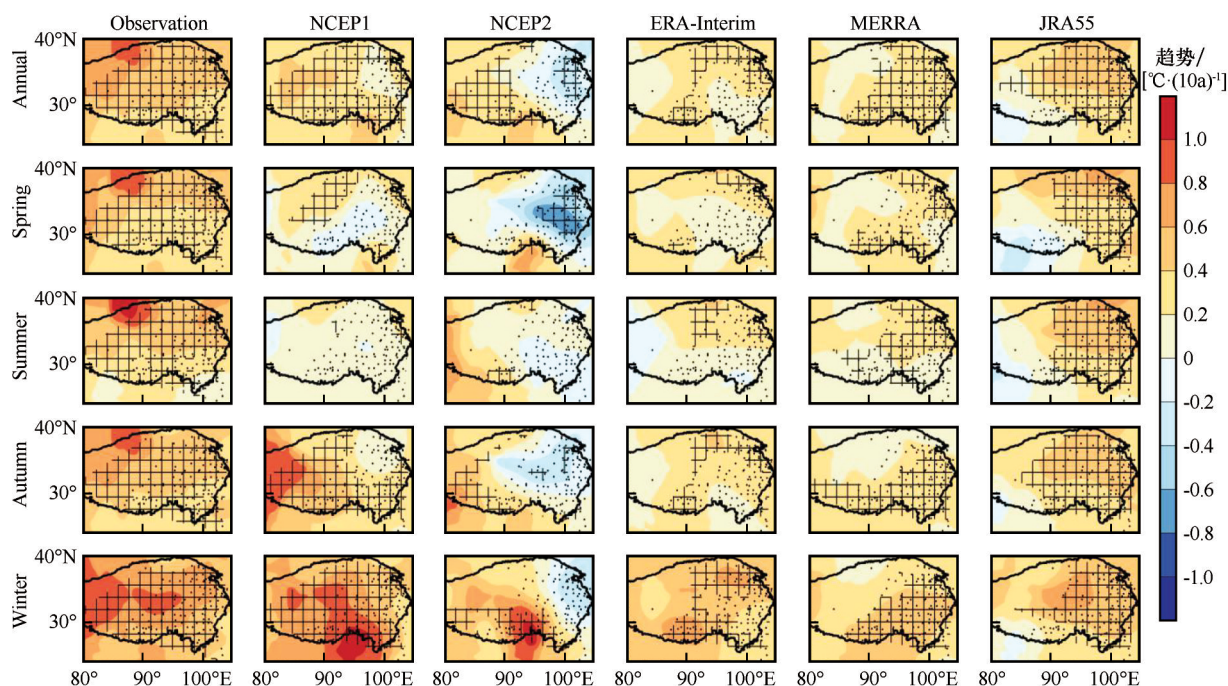


图4 1979—2018高原年和季节地面观测台站以及五种再分析资料气温变化趋势分布图,网格处为通过95%显著性检验<sup>[49]</sup>

Fig. 4 Spatial distribution of temporal trends of surface mean temperature from the observation and five reanalysis data over the TP on the annual and seasonal basis, and the trends passed the significant test ( $P < 0.05$ ) are marked by grids<sup>[49]</sup>

与高原本身复杂的地形、模式空间分辨率及物理过程不完善以及稀少的地面、高空资料导致的同化结果有关;其差异也可能是一种系统性偏差,如观测资料的不确定性、数值预报模式误差和同化方法误差等系统性误差共同作用的结果<sup>[34]</sup>。多套再分析资料与地面观测台站的气温差异和同化地形差异呈负相关,表明再分析同化地形与观测海拔之间的差异在一定程度上可以解释冷偏差。在大多数情况下,同化高程模型的海拔高于地面观测台站的海拔高度,因为地面观测台站多位于平坦和谷底地区,表明在复杂的高原进行气温订正时准确的气温递减率至关重要<sup>[41,70-71]</sup>。最近基于地形因子指数和气温递减率建立了高原再分析资料误差订正方法,可以消除45%的再分析冷偏差,尤其是JRA55和MERRA资料<sup>[49]</sup>。由于大多全球再分析数据分辨率低,在高原地形复杂(喜马拉雅山、昆仑山、祁连山等等)地区的应用存在较大偏差,也有学者利用数据同化系统生成高原地区的再分析数据集<sup>[72]</sup>,为精细化研究高原气候变化提供了数据支撑。

#### 1.4 气候模式在高原的模拟偏差及主要不确定性

由于全球气候模式分辨率较低、且受物理过程和动力框架设计的限制,目前气候模型对资料稀缺地区的气候变化模拟特别是极端气候事件模拟还十分欠缺,地形复杂区域降水发生频率和降水量模

拟偏差较大,模拟出的极端降水事件就更加粗糙<sup>[73-77]</sup>。近年来高原气候变化及极端气候事件多基于耦合模式比较计划第三和第五阶段(CMIP3和CMIP5)全球气候模式和降尺度相结合的模拟结果。基于气候模式和统计降尺度分析方法的高原气温极值预估研究指出,21世纪高原极端高温和极端低温的概率变化均与平均气温的增暖趋势一致,但高原中部地区的极端高温对气候变暖的敏感性明显强于极端低温,呈现明显的区域差异特征<sup>[1-2,25,33]</sup>。基于CMIP5多模式集成预估未来高原地区气温和降水均将呈增加趋势,且辐射强迫情景越高预估的气温和降水变化越大,其变化速度高原中国和全球平均水平(图5)。全球气候模式在高原地形刻画上存在不足,预估的水汽输送和干湿变化与观测资料有差异,气候模式能较好地模拟出年和季节平均地表气温和降水分布型,但在高原都存在“冷偏差”和“湿偏差”<sup>[78-83]</sup>。例如,CMIP5模式低估了高原地区年和季节平均地表气温,年均平均偏低2~3℃,秋季和冬季冷偏差相对更大;CMIP5模式对高原地区降水模拟能力较差,模拟的年和季节降水量普遍偏大,年均降水平均偏多1.3 mm·d<sup>-1</sup>,这主要是源于春季和夏季降水被高估<sup>[78]</sup>。基于气候模式预估的极端气候事件未来变化结果表明21世纪高原地区极端气温和极端降水强度均显著增加,最长连续干



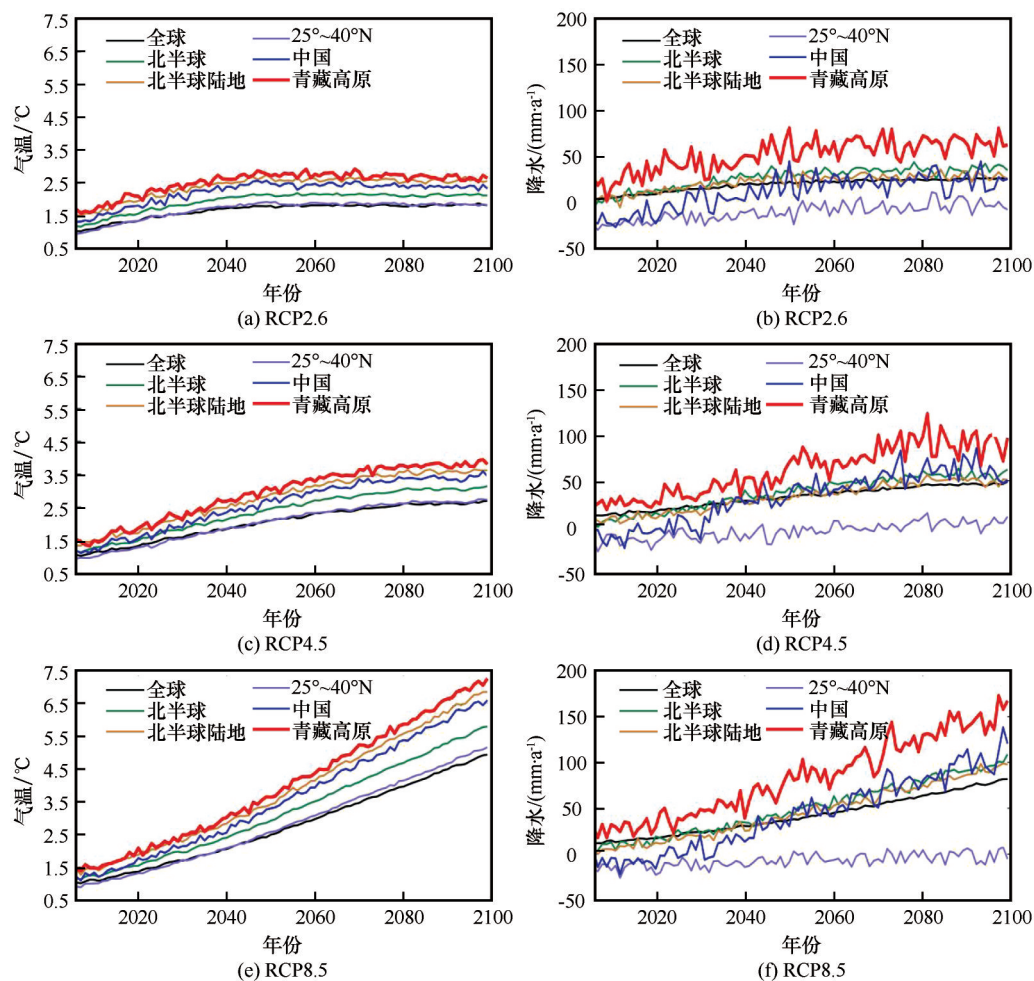


图5 全球、北半球、北半球陆地、25°~40°N、中国以及青藏高原在未来三种排放情景下2006—2100年气温 [(a), (c), (e)]和降水[(b), (d), (f)]变化的预估(相对1850—1900年)<sup>[38]</sup>

Fig. 5 Regionally-averaged surface annual mean temperature [(a), (c), (e)] and precipitation [(b), (d), (f)] (relative to 1850—1900) over the TP, the whole China, regions between 25° N and 40° N, Northern Hemisphere, Northern Hemisphere land, and the global mean during 2006—2100, projected under three Representative Concentration Pathways (RCP) scenarios in the future<sup>[38]</sup>

旱天气减少,但预估不确定性较大,年均气温、极端高温和极端低温均显著升高,平均及极端强降水均显著增加<sup>[81]</sup>。相比全球气候模式,区域气候模式水平分辨率较高且物理过程参数化方案较完善。以低分辨率的全球气候模式结果作为初始场和边界条件来驱动高分辨率的区域气候模式的运行,捕捉中小尺度的强迫信号,在地形复杂区域可得到相对精细化和可靠的模拟结果,特别是针对青藏高原地区,动力降尺度可以有效地改进全球模式存在的模拟冷偏差<sup>[84]</sup>。有学者在高原开展区域尺度气候模拟,并研究“国际区域气候降尺度试验”计划(CORDEX)和高亚洲地区精细化数据(HAR)在高原气候变化的适用性,提高气候模拟精度和减少误差<sup>[85-88]</sup>。

近年来,对流可分辨(convection-permitting mod-

eling,亦称作对流允许)模拟是数值模式应用和发展的热点方向<sup>[89]</sup>。早期的大气环流模式虽然能较好地再现大尺度气候要素的平均特征,但其分辨率普遍在100 km以上,难以对中小尺度系统和局地极端天气气候事件进行较准确的描述。由于对流过程的空间尺度远小于模式网格尺度,模拟对流降水实际是由网格内对流参数化方案产生,这些参数化方案对真实对流过程的表述通常较为简单且粗糙,因此通常被认为是模拟误差和不确定性<sup>[90]</sup>的重要来源。当模式水平分辨率达到4 km<sup>[91]</sup>或者更精细时,模式具有显式模拟深对流物理过程的能力<sup>[92-94]</sup>,可改进中小尺度对流降水的模拟效果<sup>[95-97]</sup>。此类超高分辨率的模式在模拟时可以考虑关闭对流参数化方案,避免对流参数非正确表达而出现的模拟错

误,改进模式对地形和局地地表强迫的表现能力。研究表明,对流可分辨对青藏高原降水模拟有较大的潜在增量<sup>[98-99]</sup>。有研究团队最近在 WCRP (World Climate Research Programme) 下面的 CORDEX 框架下实现了青藏高原区域的对流解析分辨率模拟,可为复杂山区和观测站点稀缺的中西部地区提供相对可靠的降水数据<sup>[100]</sup>。

气候变化模拟研究的不确定性主要来自气候系统的内部变率、模式对外强迫响应的不确定性及排放情形等三个方面<sup>[101-102]</sup>。高原地表温度及变暖的模拟偏差与气候模式中大气云辐射参数化过程及对关键云辐射特性的描述能力不足紧密联系<sup>[30,103]</sup>,而与地表状况(特别是积雪和地表反照率)有关的陆面过程模拟偏差也是造成模拟偏差的重要原因<sup>[104]</sup>。众多研究认为多模式加权集合是减少模式不确定性的的重要手段,并提出一些减少不确定性的方法,如可靠性加权平均、秩和比法、贝叶斯模式平均等集合加权方法<sup>[81,101-102,105]</sup>。同时,通过建立大尺度环流背景和观测资料构建模式,对分辨率较粗的模式输出变量进行统计次网格化,其计算量小且耗时少,能够直接与区域观测信息相结合,可灵活应用于特定研究目的,使其在近年来得到快速发展,相继出现了一些成熟的降尺度模型,并用于气候变化预估及影响评估工作<sup>[73-74,77,106]</sup>。未来针对于气候模式在高原资料稀缺地区应用的偏差特征,特别是针对高原冰冻圈要素的模拟,开展专门的模式能力评估,研究合适于复杂地形降尺度方法,减少模式应用的不确定性,以期服务于高原气候变化研究。

### 1.5 不同升温阈值下高原气候变化的预估及其风险评估

2015年12月在巴黎召开的气候变化大会上通过《巴黎协定》,其中明确指出:把全球平均增暖控制在较工业化前水平 $2.0^{\circ}\text{C}$ 以内,并为把增暖控制在 $1.5^{\circ}\text{C}$ 以内而努力,以降低气候变化所引起的风险与影响<sup>[107]</sup>。政府间气候变化专门委员会(IPCC)于2018年10月8日在韩国仁川发布《IPCC全球升温 $1.5^{\circ}\text{C}$ 特别报告》,再次使全球的目光聚焦于 $1.5^{\circ}\text{C}$ <sup>[108]</sup>。基于此,不少国内外专家学者研究了全球和区域范围内全球升温 $1.5^{\circ}\text{C}$ 和 $2.0^{\circ}\text{C}$ 的气候变化特征以及额外升温 $0.5^{\circ}\text{C}$ 的差异,结果表明将会对包括极端天气和气候事件、冰川、海平面、人体健康、粮食生产、水资源和生态系统等在内的社会经济等多个方面产生深刻的影响<sup>[108-109]</sup>。同时研究还

发现降水的变化随气温升高呈现线性递增,强降水发生频次也明显增加,随着温度持续升高,超过一定阈值后的高温热浪天数随温度增加呈现出非线性增长关系<sup>[110]</sup>。然而从IPCC第五次评估报告可以看到21世纪末全球平均地表气温除RCP2.6以外的所有情景都超过 $2.0^{\circ}\text{C}$ <sup>[30,109]</sup>。世界银行2012年发布的报告指出:如果全球达到 $4^{\circ}\text{C}$ 升温阈值,在很多地区将会出现破纪录的极端气候事件如高温热浪事件和极端干旱、洪涝事件,而升温达到或超过 $4^{\circ}\text{C}$ 将导致粮食生产、水资源和生态系统等处于高或非常高的风险水平,对其构成严峻的威胁。因此世界各国必须尽一切努力避免出现 $2.0^{\circ}\text{C}$ 增温以防止带来灾难性的后果<sup>[111]</sup>。《IPCC全球升温 $1.5^{\circ}\text{C}$ 特别报告》还特别指出在未来升温背景下极端气候事件以及生态系统将会出现一些不可逆的“缓变”事件,譬如积雪和冰量减少以及海平面上升等<sup>[108]</sup>。未来升温加剧背景下,气候变化系统将出现一些不可逆的“临界”状态,一旦触发“临界”状态,气候系统就会进入新的平衡态,将对自然和人类系统带来更大的气候风险<sup>[108-109,112]</sup>。

已有研究表明全球升温 $1.5^{\circ}\text{C}$ 和 $2.0^{\circ}\text{C}$ 阈值下,高原变暖幅度明显更大(图6),在RCP4.5/RCP8.5情景下,高原区域平均的平均、最高、最低气温变暖分别为 $2.1^{\circ}\text{C}/2.1^{\circ}\text{C}$ 和 $3.0^{\circ}\text{C}/2.9^{\circ}\text{C}$ 、 $2.0^{\circ}\text{C}/2.0^{\circ}\text{C}$ 和 $2.9^{\circ}\text{C}/2.8^{\circ}\text{C}$ 、 $2.3^{\circ}\text{C}/2.3^{\circ}\text{C}$ 和 $3.2^{\circ}\text{C}/3.1^{\circ}\text{C}$ ,冬季平均气温的变暖幅度( $2.2^{\circ}\text{C}/2.3^{\circ}\text{C}$ 和 $3.1^{\circ}\text{C}/3.1^{\circ}\text{C}$ )较其他季节更大;从空间分布形势上看,年变暖呈西南高东北低的分布,而春、冬变暖呈南高北低的分布,夏、秋变暖则呈西高东低的分布<sup>[113]</sup>。有研究还预估了全球升温 $1.5^{\circ}\text{C}$ 和 $2.0^{\circ}\text{C}$ 时高原春季和冬季雪水当量的变化特征以及全球升温 $1.5^{\circ}\text{C}$ 和 $2.0^{\circ}\text{C}$ 的空间差异,结果表明高原冬、春季积雪水当量在未来将持续减少,春季减少幅度大于冬季,在全球升温 $1.5^{\circ}\text{C}$ 和 $2.0^{\circ}\text{C}$ 背景下减少最大的区域为高原西部,与同期变暖显著区域一致。发现全球升温 $1.5^{\circ}\text{C}$ 和 $2.0^{\circ}\text{C}$ 背景下高原积雪水当量趋势不是简单的海拔依赖关系,而是在模式模拟结果的4000~4500m的海拔范围损失最大,可能是由于表面反照率、云、水汽等因子的海拔依赖型空间模态的贡献所致<sup>[114]</sup>。

整体而言,由于高原是中纬度地区冰冻圈发育最集中的区域,研究全球升温 $1.5^{\circ}\text{C}$ 和 $2.0^{\circ}\text{C}$ 背景下高原气候变化的特征,特别是升温更高的阈值背

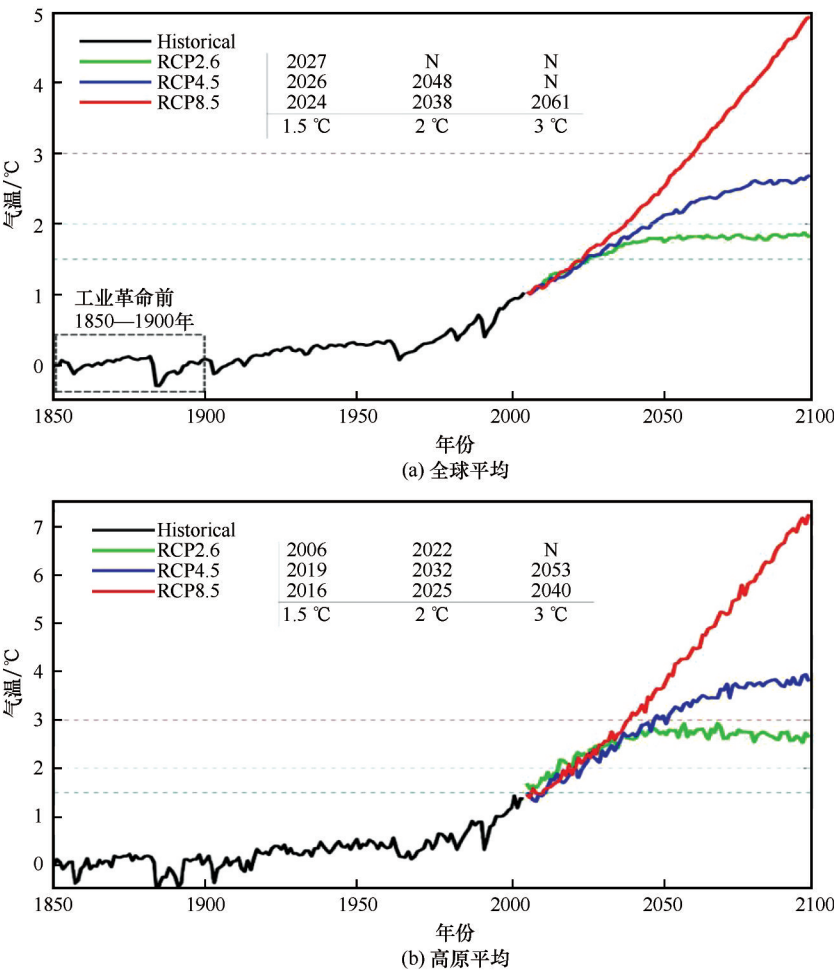


图6 历史(Historical)与未来RCP2. 6、RCP4. 5和RCP8. 5情景下CMIP5模式模拟的多模式集合平均(MMEM)的全球平均(a)和高原平均(b)1850—2100年的平均地表气温序列,以及平均地表气温首次达到或超过工业革命前(1850—1900)1. 5 °C、2. 0 °C和3. 0 °C的年份<sup>[38]</sup>

Fig. 6 Global-averaged (a) and Tibetan Plateau-averaged (b) surface annual mean temperature during 1850—2100 from the multi-model ensemble mean (MMEM) of the CMIP5 model simulations under the historical run, RCP2. 6, RCP4. 5 and RCP8. 5, respectively. Years in the MMEM at which the surface annual mean temperature reaches or exceeds 1. 5 °C、2. 0 °C and 3. 0 °C above pre-industrial levels (1850—1900) for the first time are presented<sup>[38]</sup>

景下极端气候事件变化以及其带给高原冰冻圈不可逆的“临界”状态研究,分析和理解其非线性变化过程以及潜在气候风险等科学问题显得尤为现实而紧迫。

## 2 高原气候变化前沿科学问题展望

### 2.1 深入认识高原复合极端事件变化及其生态环境影响

复合极端事件(compound extreme/concurrent extreme)一般有三种定义方法:一是至少有两种极端事件同时或持续发生;二是多种极端事件的组合事件比其中任何一个事件的影响程度要大(即复合事件的影响放大效应);三是尽管两个以上事件中

的任何一个事件没有达到极端事件程度,但当它们组合能导致极端事件的产生,并造成一定的破坏力<sup>[30,108]</sup>。相对于单要素极端事件,复合极端事件往往对人类社会和环境造成更大破坏性影响<sup>[115]</sup>。有关极端天气气候灾害事件的研究主要集中在单变量或单类型事件(例如极端高温、极端降水)的分析,对于复合极端事件的研究较为薄弱且关注较少,特别是针对于高原独特自然环境的复合极端事件变化研究缺乏。

高原对于全球增暖的响应较为敏感,在极端天气气候状态下,高原冰冻圈和生态系统发生相关联的变化可能产生级联放大的影响。虽然高原人口分布较为稀少,但高原生态环境正在遭受复合极端



气候事件变化带来的改变,如持续高温和极端强降水事件等极端气温和降水事件持续增加和相互关联将导致高原冰川不稳定性增加,进而导致冰川灾害风险的发生,大陆型冰川(发育于降水稀少的大陆性气候地区,主要分布在高原内陆)和海洋型冰川(发育于降水丰沛的海洋性气候地区,主要分布在高原东南部)都出现了冰崩、冰湖溃决等灾害;同时多年冻土的退化也导致山区不稳定性增强,导致滑坡等灾害发生,对该地区生命和财产安全带来重大威胁<sup>[6,9,15,20,22-24,48,50,116-118]</sup>。持续时间长的极端高温事件和极端无降水事件更容易造成高原大范围的生态失衡,从而对以高原为核心的“亚洲水塔”为源头的十多条江河产生重大影响,如长江、黄河、印度河、恒河、布拉马普特拉河、湄公河等,直接关系到约16亿人口的生产和生活<sup>[5,14,38,58,81,119-124]</sup>。识别高原复合极端事件规律及其对生态环境产生的影响,已受到了政府部门、社会公众和科研界的广泛关注。

## 2.2 结合机器学习加强高原资料稀缺地区气候变化研究

如何利用有限的站点资料进行高原资料稀缺地区的插值和填补,形成高分辨率的且空间分布合理的气象气候数据集一直是一个难点<sup>[125-126]</sup>。国内外研究机构目前已建立了不同版本的全球或区域格点数据集,这些数据集已成为很多研究工作的参考依据。但受制于高原高海拔、恶劣气候、复杂地形的影响,现存数据集在该地区的应用分析还存在很大的不确定性和低可信度,难以满足多数科学研究和气象业务的需求。机器学习方法的应用与发展,在高性能计算机、“大数据”和先进算法的支持下,为提高资料稀缺地区的数据集构建和生成提供了新的思路和契机<sup>[126]</sup>。深度学习是机器学习的一个重要分支,其算法包括卷积神经网络、循环神经网络、生成对抗网络和深度强化学习<sup>[127]</sup>。生成对抗网络模型(generative adversarial network, GAN)是一种成熟的深度学习,可以将缺失的图像补全为一幅完整的图像<sup>[128]</sup>。基于生成对抗网络优越的数据生成性能,可以使用生成对抗网络理论来建立神经网络模型,确定变量场自身时空变化特征及与相关变量间的关系,从而实现高原气候变化多元数据集,特别是高分辨率气候要素场的重建。另外,为快速高效地获取高时空分辨率的气候数据集,也可以针对现有分辨率较低的产品做升尺度处理。与此类似,在深度学习中,也包含一些新兴的超分

率重建技术,如通过多层卷积神经网络建立输入和输出之间非线性端对端的映射关系,将已有的低分辨率图像转换成高分辨率图像。并将采用超分辨率卷积神经网络、高效子像素卷积网络等超分辨率网络技术对数据集进行升尺度处理,以获取高精度大范围的气候要素数据集<sup>[126]</sup>。

基于现有高原观测资料和第二次青藏高原综合科学考察研究成果,结合机器学习等方法填补高原资料稀缺地区数据缺陷,构建高时空水平分辨率的气候变化数据集,为深入开展精细化的高原气候变化提供重要思路。

## 2.3 深化高原海拔依赖型变暖空间模态与机理及影响研究

高原海拔依赖型变暖的空间和区域差异性以及主导机制目前还存在争论<sup>[58,123]</sup>。受观测台站、研究时段与研究手段限制,过去很少有系统地分析高原海拔依赖性变暖的规律与机制,目前缺乏较系统的南亚季风区、西风区以及两者过渡区的高原海拔依赖性变暖特征与机理研究。由于高原地面观测资料的缺乏以及模式模拟的不确定性,目前关于高原海拔依赖型变暖的研究还有很大提升空间。一方面关于增暖和积雪融化的海拔依赖型在多大时间尺度和空间尺度上存在有待进一步研究,同时其他一些要素的变化,如相关辐射要素、植被等在全球变暖背景下是否存在海拔依赖型也值得研究;另一方面考虑到海拔依赖型增暖的主导机制在不同时间尺度(如季节、年际等)和不同区域存在很大差异,需要增加相关定量研究(表1)。在全球变暖背景下,高原海拔依赖型变暖研究内容不断丰富与扩展,包括气候模式模拟中海拔依赖型的刻画与量化、气候代用指标重建海拔依赖型变暖的代表性、亚洲夏季风和海拔依赖型变暖的相互作用、海拔依赖型变暖对未来环境和水资源变化的重要性以及在极高海拔地区对海拔依赖型变暖理解的欠缺等科学问题<sup>[58]</sup>。鉴于此,未来需要结合观测、卫星遥感以及高分辨率模式输出数据,利用多源资料和多方法,建立更全面的大气圈与冰冻圈要素立体观测网络,对高原海拔依赖型变暖空间模态、机理及影响进行更系统的研究,有助于为预估极高海拔地区冰冻圈的变化提供基础。

## 2.4 加强多源再分析资料在高原气候变化的适用性研究

由于高原大部分地区缺乏地面观测,再分析资

表1 高原温度响应的物理机制<sup>[58]</sup>,包括平均温度( $T_{\text{mean}}$ )、最高温度( $T_{\text{max}}$ )和最低温度( $T_{\text{min}}$ )的响应

Table 1 The physical mechanism of TP temperature response<sup>[58]</sup>, the temperature response includes mean temperature ( $T_{\text{mean}}$ ), maximum temperature ( $T_{\text{max}}$ ) and minimum temperature ( $T_{\text{min}}$ )

气候驱动因素	机制	季节相关性	温度响应
积雪/冰-反照率降低	地表吸收太阳辐射增加	主要是春季;但在冬季低海拔地区也很重 要,夏季高海拔地区,与0℃等温线相关	$T_{\text{max}}$ 增加;如果土壤湿度增加并导致白 天蒸发冷却,则会抑制这种影响
云覆盖增加(白天)	到达地表太阳辐射减少	所有季节,但夏季影响更大	$T_{\text{max}}$ 降低
云覆盖增加(夜间)	向下长波辐射增加	所有季节,但冬季影响更大	$T_{\text{min}}$ 增加
水汽增加	向下长波辐射增加; 向下长波辐射对地表绝对湿度的 变化具有高敏感性	主要是冬季;秋季和春季影响可能会相 对较小	$T_{\text{min}}$ 增加
非吸收性气溶胶增加	地表吸收太阳辐射减少; 增加云反照率和云生存期	取决于季节性排放	$T_{\text{max}}$ 降低; 当云生存期增强时, $T_{\text{min}}$ 会小幅增加
吸收性气溶胶增加	地表吸收太阳辐射减少,但对流层 中部加热增加; 减少云和地面积雪的反照率	取决于季节性排放	$T_{\text{mean}}$ 增加; 当云覆盖减少时, $T_{\text{max}}$ 增加
土地利用变化	白天感热通量减少,潜热通量增加	多年冻土退化在夏季最强;过度放牧在 冬季最为严重	$T_{\text{max}}$ 增加
平流层臭氧总量减少	紫外线辐射增加	臭氧总量在各季节均呈下降趋势	对流层上部到平流层下部的 $T_{\text{mean}}$ 降低; 对流层中低层的 $T_{\text{mean}}$ 增加
植被增加	地表反照率增加; 蒸发冷却增加	生长季植被绿化最强	$T_{\text{max}}$ 降低

料是研究高原强有力的工具之一。近年来,随着地面站点观测、卫星遥感、数值模式模拟等数据和同化手段更新与发展,再分析资料推陈出新,目前使用较多的再分析资料包括ERA5、ERA-20C、ERA-20CM、ERA-Interim、JRA-55、JRA-55C、JRA-55AMIP、MERRA-2、NCEP CFSR、NOAA-CIRES 20CRv2c、NOAA-CIRES-DOE 20CRv3 等(表2)。由于不同再分析资料采用了不同的同化方案和预报模式,所同化的观测资料也不同,加之高原本身下垫面的复杂性和观测数据的稀缺,再分析资料在高原的适用性和可信性亟待研究。尽管前面所涉及也有不少研究开展过再分析资料在高原气候变化研究中的适用性,但多基于单一要素和有限的再分析资料,整体而言再分析资料是时间和空间分辨率较高的数据集,在高原气候变化研究中发挥着极其重要的作用,但是气温和降水以及各种环流资料与观测实测值相比存在一些偏差,在使用时需要特别引起注意。同时有些再分析资料由于同化观测数据较少,在高原大气圈和冰冻圈相互作用以及反馈过程中也缺乏深刻理解,再分析资料在复杂地形区和资料稀缺地区的研究还面临着很多挑战。

未来还需要加强再分析资料在不同季节不同空间尺度上的适用性研究以及多套再分析资料的

对比分析,并且加入观测资料对再分析资料进行订正。此外中国再分析资料CRA-40(CMA's Global Atmospheric Reanalysis)已经公开发布,但关于CRA-40在高原气候变化中的适用性研究还十分缺乏,加强其在复杂地形的适用性评估及其与欧美地区再分析资料的对比有利于我国再分析资料的发展。最后,针对特定研究区域,研发区域再分析资料也是未来值得发展的科学领域<sup>[72]</sup>。

### 2.5 开展人为活动对高原气候变化的影响研究

开展人类活动对高原气候变化的影响研究,提高对高原气候变化规律及成因机制认知,也是近来地球科学研究的一个重要方向。已有研究通过CMIP5多模式的分离强迫历史模拟试验,采用“最优指纹”检测与归因方法,评估了人类活动对高原变暖的贡献,并将观测到的高原快速升温(1961—2005年间增温1.23℃)归因为人类活动的影响,其中温室气体的最佳估计增温贡献为1.37℃,而人为气溶胶略微抵消了这种影响,自然强迫(包括太阳辐照度变化和火山活动)对高原长期温度变化的贡献较小。研究显示CMIP5多模式集合往往低估了受人类活动影响的变暖趋势,归因结果的约束表明高原模式直接预估增暖更加剧烈,意味着亚洲水塔的冰川退化加剧以及水文与地质灾害风险将增

表2 覆盖全球的主要再分析资料信息表  
Table 2 Main global reanalysis data information

来源	名称	时间	同化方案	分辨率
ECMWF	ECMWF Interim Reanalysis (ERA-Interim)	1979年—	4D-VAR	0.75°×0.75°
	ECMWF 40-year Reanalysis (ERA-40)	1958—2001年	3D-VAR	2.5°×2.5°/ 1.125°×1.125°
	ERA5	1950年—	4D-VAR	0.28°×0.28°
	ERA-20C	1900—2010年	4D-VAR	0.25°×0.25°
Japan Meteorological Agency (JMA)	Japanese 25-year Reanalysis (JRA-25)	1979—2004年	3D-VAR	1.25°×1.25°/ 2.5°×2.5°
	JMA Climate Data Assimilation System (JCDAS)	2005年—	3D-VAR	1.25°×1.25°/ 2.5°×2.5°
	Japanese 55-year Reanalysis (JRA-55)	1958年—	4D-VAR	1.25°×1.25°
NASA GMAO	NASA MERRA	1979年1月—2016年2月	3D-VAR	2/3 lon×1/2 lat deg
	NASA MERRA2	1980年1月—	3D-VAR	5/8 lon×1/2 lat deg
NCEP	NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFSR)	1979年—	3D-VAR	5°×5°/2.5°×2.5°
NCEP/DOE	NCEP/DOE Reanalysis AMIP-II (R2)	1979年—	3D-VAR	2.5°×2.5°
NCEP/NCAR	NCEP/NCAR Reanalysis I (R1)	1948年—	3D-VAR	2.5°×2.5°
NOAA PSL	NOAA-CIRES 20th Century Reanalysis (20CR)	1871—2012年	Ensemble Kalman Filter	2°×2°
NOAA/ESRL PSD	NOAA-CIRES 20th Century Reanalysis (20CRV2c)	1851—2014年	Ensemble Kalman Filter	2°×2°
NOAA/ESRL PSD	NOAA-CIRES 20th Century Reanalysis (20CRV3)	1836—2015年	Ensemble Kalman Filter	1°×1°
国家气象信息中心	CRA-40	1979年—	3D-VAR	34 km

注：数据来源：<https://reanalyses.org/atmosphere/comparison-table>。

加<sup>[129]</sup>。也有研究表明人类活动对高原极端气候事件的影响也不容忽略。如研究使用了均一化的包含中国西部492个站的1958—2015年台站观测日气温数据集和CMIP5多模式分离强迫历史模拟试验逐日数据,评估了人为强迫对极端气候事件的影响,结果表明人类活动很可能使2015年中国西部夏季极端气温事件,如年最高日最高气温和日最低气温的发生概率分别增加了至少3倍和42倍,表明利用观测计算的概率变化(以及归因风险分数)可能被低估<sup>[130]</sup>。

此外,也有学者利用观测和数值试验手段来研究人为排放污染物对高原气候变化的影响。吸光性气溶胶黑碳和粉尘也是高原变暖的贡献者。大多数污染物在相对较低的海拔(小于3 000 m)聚集。在季风前期,喜马拉雅地区5 000 m区域发现了较高含量的黑碳,在对流旺盛的季风活跃期,气溶胶在高原和亚洲中部的大部分地区输送高度超过10 km,可以解释该地区过去几十年来50%的变暖<sup>[131]</sup>。黑碳以两种方式影响辐射收支,即吸收对流层辐射和降低地表积雪表面反照率,从而影响高原气候变

化,如黑碳冰川表面沉降和富集将引起冰冻圈的快速变化。研究认为大气沉积的黑碳可以使高原冰川的可见光辐射吸收增加10%~100%,来自南亚的黑碳在高原冰川的沉降加速了冰川的融化<sup>[132]</sup>。然而,由于人为跨境污染物如黑碳等其难以观测且在高海拔地区几乎没有系统性的观测网络,过去的研究多在模式中进行分析,很难定量评估其对高原气候变化的影响。最近建立的大气污染物监测与冰冻圈变化研究网络[Atmospheric Pollution and Cryospheric Change (APCC) network]分析服务平台,通过第一手观测监测和数值模拟手段等综合集成研究,关注高原碳质气溶胶的含量水平、时空变化、区域来源、吸光特性及影响因素,为揭示大气污染物的跨境传输和气候环境的影响等前沿科学问题奠定坚实基础<sup>[118,133]</sup>。

### 3 结论与展望

数十年来,高原气候变化研究取得了大量的进展,获得的认识包括但不限于:

(1)基于观测数据的高原极端气候事件频率、



强度和持续时间正在发生改变,但研究时段较短且高原西部地区极端气候事件认识不足,极端气候事件成因机制特别是与大气环流的定量关系研究缺乏;

(2)高原变暖放大效应及海拔依赖型变暖特征明显,结合积雪/冰反照率、云、水汽和辐射通量调节和气溶胶等角度开展高原海拔依赖型变暖机制方面的研究,不同机制在区域和时间尺度上未有一致结论;

(3)再分析资料在高原气候变化研究中的适用性分析十分必要,且不同再分析数据在同一要素上的刻画能力不同,适用性存在较大差异,通过基于地形因子指数和气温递减率建立高原再分析资料误差订正方法需引起重视;

(4)高原正在经历以变暖和变湿为特征的气候变化,几乎所有模式在高原都存在气温“冷偏差”和降水“湿偏差”,同时气候模式在高原资料稀缺地区应用的偏差特征及不确定性缺乏深入分析;

(5)由不同研究的对比可见,不同升温阈值下气候变化会出现“临界”状态且给生态环境带来严重风险,且冰冻圈对气候变化的响应是非线性的,但在高原缺乏系统的针对该问题或现象的研究。

尽管现有相关研究已经取得了很大进展,高原气候变化仍然存在一些难点问题,还需多学科多团队的集成综合研究,我们归纳但不也限于如下几点:

(1)复合极端事件变化及其生态环境影响研究较为薄弱且关注较少,而高原对于全球增暖的响应较为敏感,其冰冻圈和生态系统对复合极端事件发生相关联的变化可能产生级联放大的影响,需要加强高原复合极端事件变化及其生态环境影响研究;

(2)高原资料稀缺、自然环境恶劣、观测资料不足,现有的气候变化数据集在该地区的应用分析还存在很大的不确定性,严重影响了高原气候变化规律与机制的认识,亟需结合机器学习等先进技术填补高原资料稀缺地区气候变化研究;

(3)以往研究高原海拔依赖型变暖研究常基于单一数据源,但其都有各自缺点,如再分析资料受同化数据影响和模式资料分辨率较粗等,都得出了各自有研究成果和结论,但是,尚没有研究建立基于多源资料系统的对比分析,统一到同一参考标准下的研究,这使得基于单一数据源的海拔依赖型变暖现象还存在局限性和片面性;

(4)加强多源再分析资料在复杂地形的适用性评估及其与欧美地区再分析资料的对比,针对缺乏高海拔地区冰冻圈区域开展多源再分析资料在高原气候变化的适用性研究,研发区域再分析资料,解决高原再分析资料应用存在的理论和方法障碍;

(5)加强高原气候变化综合立体观测网络建设,强化大气污染物监测与冰冻圈变化研究网络服务平台建设,开展人为活动对高原气候变化的影响研究,提高高原气候变化规律认识和预判其带来的气候风险预警能力。

谨以此文,纪念李吉均先生!

**致谢:** 课题组蔡子怡、吴芳营、靳铮、杨叶和张晋韬等同学参与了数据和图表整理,一并感谢。

#### 参考文献(References):

- [1] Chen Deliang, Xu Baiqing, Yao Tandong, et al. Assessment of past, present and future environmental changes on the Tibetan Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(32): 3025-3035. [陈德亮, 徐柏青, 姚檀栋, 等. 青藏高原环境变化科学评估: 过去、现在与未来[J]. 科学通报, 2015, 60(32): 3025-3035.]
- [2] Zhang Renhe, Su Fengge, Jiang Zhihong, et al. An overview of projected climate and environmental changes across the Tibetan Plateau in the 21st century[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(32): 3036-3047. [张人禾, 苏凤阁, 江志红, 等. 青藏高原21世纪气候和环境变化预估研究进展[J]. 科学通报, 2015, 60(32): 3036-3047.]
- [3] Chen Fahu, An Chengbang, Dong Guanghui, et al. Human activities, environmental changes, and rise and decline of Silk Road civilization in Pan-third Pole region[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(9): 967-975. [陈发虎, 安成邦, 董广辉, 等. 丝绸之路与泛第三极地区人类活动、环境变化和丝路文明兴衰[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(9): 967-975.]
- [4] Yao Tandong, Chen Fahu, Cui Peng, et al. From Tibetan Plateau to Third Pole and Pan-third Pole[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(9): 924-931. [姚檀栋, 陈发虎, 崔鹏, 等. 从青藏高原到第三极和泛第三极[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(9): 924-931.]
- [5] Xu Xiangde, Dong Lili, Zhao Yang, et al. Effect of the Asian Water Tower over the Qinghai-Tibet Plateau and the characteristics of atmospheric water circulation[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(27): 2830-2841. [徐祥德, 董李丽, 赵阳, 等. 青藏高原“亚洲水塔”效应和大气水分循环特征[J]. 科学通报, 2019, 64(27): 2830-2841.]
- [6] Yao Tandong, Yu Wusheng, Wu Guangjian, et al. Glacier anomalies and relevant disaster risks on the Tibetan Plateau and surroundings[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(27): 2770-2782. [姚檀栋, 余武生, 邬光剑, 等. 青藏高原及周边地区近期冰川状态失常与灾变风险[J]. 科学通报, 2019, 64(27): 2770-2782.]
- [7] Qin Dahe, Yao Tandong, Ding Yongjian, et al. Establishment and significance of the scientific system of cryospheric science[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(4): 393-406. [秦大河, 姚檀栋, 丁永建, 等. 冰冻圈科学体系的

- 建立及其意义[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(4): 394-406.]
- [8] Qin Dahe, Yao Tandong, Ding Yongjian, et al. The cryospheric science for sustainable development[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(1): 1-10. [秦大河, 姚檀栋, 丁永建, 等. 面向可持续发展的冰冻圈科学[J]. 冰川冻土, 2020, 42(1): 1-10.]
- [9] Wu G X, Duan A M, Liu Y M, et al. Tibetan Plateau climate dynamics: recent research progress and outlook[J]. *National Science Review*, 2015, 2: 100-116.
- [10] Wu Guoxiong, Mao Jiangyu, Duan Anmin, et al. Recent progress in the study on the impacts of Tibetan Plateau on Asian summer climate[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, 62(5): 528-540. [吴国雄, 毛江玉, 段安民, 等. 青藏高原影响亚洲夏季气候研究的最新进展[J]. 气象学报, 2004, 62(5): 528-540.]
- [11] Yao Tandong, Piao Shilong, Shen Miaogen, et al. Chained impacts on modern environment of interaction between westerlies and indian monsoon on Tibetan Plateau[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2017, 32(9): 976-984. [姚檀栋, 朴世龙, 沈妙根, 等. 印度季风与西风相互作用在现代青藏高原产生连锁式环境效应[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(9): 976-984.]
- [12] Fu Y F, Ma Y M, Zhong L, et al. Land surface processes and summer cloud-precipitation characteristics in the Tibetan Plateau and their effects on downstream weather: a review and perspective[J]. *National Science Review*, 2020, 7(3): 500-515.
- [13] Ding Yihui, Zhang Li. Intercomparison of the time for climate abrupt change between the Tibetan Plateau and other regions in China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(4): 794-805. [丁一汇, 张莉. 青藏高原与中国其他地区气候突变时间的比较[J]. 大气科学, 2008, 32(4): 794-805.]
- [14] Immerzeel W W, Bierkens M F P. Asia's water balance[J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(12): 841-842.
- [15] Kang Shichang, Guo Wanqin, Zhong Xinyue, et al. Changes in the mountain cryosphere and their impacts and adaptation measures[J]. *Climate Change Research*, 2020, 16(2): 143-152. [康世昌, 郭万钦, 钟歆玥, 等. 全球山地冰冻圈变化、影响与适应[J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(2): 143-152.]
- [16] Liu Y M, Lu M M, Yang H J, et al. Land-atmosphere-ocean coupling associated with the Tibetan Plateau and its climate impacts[J]. *National Science Review*, 2020, 7(3): 534-552.
- [17] Qin D H, Yang J P, Ren J W, et al. Cryospheric Science: research framework and disciplinary system[J]. *National Science Review*, 2018, 5(2): 255-268.
- [18] Wang Ninglian, Yao Tandong, Xu Baiqing, et al. Spatiotemporal pattern, trend, and influence of glacier change in Tibetan Plateau and surroundings under global warming[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1220-1232. [王宁练, 姚檀栋, 徐柏青, 等. 全球变暖背景下青藏高原及周边地区冰川变化的时空格局与趋势及影响[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1220-1232.]
- [19] Che Tao, Hao Xiaohua, Dai Liyun, et al. Snow cover variation and its impacts over the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1247-1253. [车涛, 郝晓华, 戴礼云, 等. 青藏高原积雪变化及其影响[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1247-1253.]
- [20] Hu Wentao, Yao Tandong, Yu Wusheng, et al. Advances in the study of glacier avalanches in high Asia[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(6): 1141-1152. [胡文涛, 姚檀栋, 余武生, 等. 高亚洲地区冰崩灾害的研究进展[J]. 冰川冻土, 2018, 40(6): 1141-1152.]
- [21] Yang M X, Wang X J, Pang G J, et al. The Tibetan Plateau cryosphere: observations and model simulations for current status and recent changes[J]. *Earth Science Reviews*, 2019, 190: 353-369.
- [22] Yao T D, Thompson L, Yang W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(9): 663-667.
- [23] Yao T D, Wu F Y, Ding L, et al. Multispherical interactions and their effects on the Tibetan Plateau's earth system: a review of the recent researches[J]. *National Science Review*, 2015, 2(4): 468-488.
- [24] Yao T D, Xue Y K, Chen D L, et al. Recent Third Pole's rapid warming accompanies cryospheric melt and water cycle intensification and interactions between monsoon and environment: multi-disciplinary approach with observation, modeling and analysis[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2019, 100(3): 423-444.
- [25] Duan Anmin, Xiao Zhixiang, Wu Guoxiong. Characteristics of climate change over the Tibetan Plateau under the global warming during 1979-2014[J]. *Climate Change Research*, 2016, 12(5): 374-381. [段安民, 肖志祥, 吴国雄. 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, 2016, 12(5): 374-381.]
- [26] Observational and Big Data Center Geospatial Data Cloud. Spatial distribution maps of lakes over the Tibetan Plateau (1995-2015)[DB]. National Tibetan Plateau Data Center, 2018.
- [27] Center Global Land Ice Measurements from Space National Snow Ice Data. RGI Qinghai Tibet Plateau glacier data (2015)[DB]. Beijing: National Tibetan Plateau Data Center, 2019.
- [28] Zhao L. A new map of permafrost distribution on the Tibetan Plateau (2017)[DB]. Beijing: National Tibetan Plateau Data Center, 2019.
- [29] Yao Tandong, Wu Guangjian, Xu Baiqing, et al. Asian Water Tower change and its impacts[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1203-1209. [姚檀栋, 邬光剑, 徐柏青, 等. “亚洲水塔”变化与影响[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1203-1209.]
- [30] IPCC. Summary for policymakers of climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on climate change[J]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.
- [31] Coumou D, Rahmstorf S. A decade of weather extremes[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(7): 491-496.
- [32] You Q L, Kang S C, Aguilar E, et al. Changes in daily climate extremes in the eastern and central Tibetan Plateau during 1961-2005[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113: D07101.
- [33] Wu Guoxiong, Duan Anmin, Zhang Xueqin, et al. Extreme weather and climate changes and its environmental effects over the Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2013, 35(3): 167-171. [吴国雄, 段安民, 张雪芹, 等. 青藏高原极端天气气候变化及其环境效应[J]. 自然杂志, 2013, 35(3): 167-171.]
- [34] You Qinglong, Kang Shichang. Research on characteristics of modern climate change in Tibetan Plateau[M]. Changsha: Hunan Education Press, 2019. [游庆龙, 康世昌. 青藏高原现代气候变化特征研究[M]. 长沙: 湖南教育出版社, 2019.]
- [35] Bothe O, Fraedrich K, Zhu X H. Large-scale circulations and Tibetan Plateau summer drought and wetness in a high-resolu-

- tion climate model[J]. *International Journal of Climatology*, 2011, 31(6): 832-846.
- [36] Chen X Y, You Q L. Effect of Indian Ocean SST on Tibetan Plateau precipitation in the early rainy season[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(22): 8973-8985.
- [37] Bao Y T, You Q L. How do westerly jet streams regulate the winter snow depth over the Tibetan Plateau?[J]. *Climate Dynamics*, 2019, 53(1): 353-370.
- [38] You Q L, Wu F Y, Shen L C, et al. Tibetan Plateau amplification of climate extremes under global warming of 1.5 °C, 2 °C and 3 °C [J]. *Global and Planetary Change*, 2020, 192: 103261.
- [39] You Q L, Cai Z Y, Pepin N, et al. Warming amplification over the Arctic Pole and Third Pole: trends, mechanisms and consequences[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 217: 103625.
- [40] Chen B, Chao W C, Liu X. Enhanced climatic warming in the Tibetan Plateau due to doubling CO<sub>2</sub>: a model study[J]. *Climate Dynamics*, 2003, 20(4): 401-413.
- [41] You Q L, Jiang Z H, Moore G, et al. Revisiting the relationship between observed warming and surface pressure in the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30: 1721-1737.
- [42] Cai D L, You Q L, Klaus F, et al. Spatiotemporal temperature variability over the Tibetan Plateau: altitudinal dependence associated with the global warming hiatus [J]. *Journal of Climate*, 2017, 30: 969-984.
- [43] Liu X D, Cheng Z G, Yan L B, et al. Elevation dependency of recent and future minimum surface air temperature trends in the Tibetan Plateau and its surroundings [J]. *Global & Planetary Change*, 2009, 68(3): 164-174.
- [44] Liu X D, Yin Z Y, Shao X M, et al. Temporal trends and variability of daily maximum and minimum, extreme temperature events, and growing season length over the eastern and central Tibetan Plateau during 1961-2003 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, 111(D19): 4617-4632.
- [45] Liu X D, Chen B D. Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades [J]. *International Journal of Climatology*, 2000, 20(14): 1729-1742.
- [46] Palazzi E, Filippi L, Von H J. Insights into elevation-dependent warming in the Tibetan Plateau-Himalayas from CMIP5 model simulations [J]. *Climate Dynamics*, 2017, 48 (11) : 3991-4008.
- [47] Yan L B, Liu Z Y, Chen G S, et al. Mechanisms of elevation-dependent warming over the Tibetan Plateau in quadrupled CO<sub>2</sub> experiments[J]. *Climatic Change*, 2016, 135(3): 509-519.
- [48] Yang K, Ye B S, Zhou D G, et al. Response of hydrological cycle to recent climate changes in the Tibetan Plateau [J]. *Climatic Change*, 2011, 109(3/4): 517-534.
- [49] Yan Y P, You Q L, Wu F Y, et al. Surface mean temperature from the observational stations and multiple reanalyses over the Tibetan Plateau [J]. *Climate Dynamics*, 2020, 55(9): 2405-2419.
- [50] Kang S C, Xu Y W, You Q L, et al. Review of climate and cryospheric change in the Tibetan Plateau [J]. *Environmental Research Letters*, 2010, 5(1): 015101.
- [51] Rangwala I, Miller J R. Twentieth Century temperature trends in Colorado's San Juan Mountains [J]. *Arctic Antarctic & Alpine Research*, 2010, 42(1): 89-97.
- [52] Pepin N, Bradley R S, Diaz H F, et al. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world [J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5: 424-430.
- [53] Rangwala I, Miller J R. Climate change in mountains: a review of elevation-dependent warming and its possible causes [J]. *Climatic Change*, 2012, 114(3/4): 527-547.
- [54] Tian L D, Yao T D, Li Z, et al. Recent rapid warming trend revealed from the isotopic record in Muztagata ice core, eastern Pamirs [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, 111(D13): 2767-2781.
- [55] Kang S C, Zhang Y J, Qin D H, et al. Recent temperature increase recorded in an ice core in the source region of Yangtze River [J]. *Science Bulletin*, 2007, 52(6): 825-831.
- [56] Qin J, Yang K, Liang S L, et al. The altitudinal dependence of recent rapid warming over the Tibetan Plateau [J]. *Climatic Change*, 2009, 97(1/2): 321.
- [57] Gao Y H, Chen F, Lettenmaier D P, et al. Does elevation-dependent warming hold true above 5 000 m elevation? Lessons from the Tibetan Plateau [J]. *Climate and Atmospheric Science*, 2018, 1(1): 19.
- [58] You Q L, Chen D L, Wu F Y, et al. Elevation dependent warming over the Tibetan Plateau: patterns, mechanisms and perspectives [J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 210: 103349.
- [59] Niu X R, Tang J P, Chen D L, et al. The performance of CORDEX-EA-II simulations in simulating seasonal temperature and elevation-dependent warming over the Tibetan Plateau [J]. *Climate Dynamics*, 2021: 1-19.
- [60] Niu X R, Tang J P, Chen D L, et al. Elevation-dependent warming over the Tibetan Plateau from an ensemble of CORDEX-EA regional climate simulations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, 126(9): e2020JD033997.
- [61] Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, et al. NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2) [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2002, 83(11): 1631-1643.
- [62] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77(3): 437-472.
- [63] Wang A H, Zeng X B. Evaluation of multireanalysis products with in situ observations over the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 2012, 117 (D5) : D05102.
- [64] Ding Xu, Lai Xin, Fan Guangzhou, et al. Analysis on the applicability of reanalysis soil temperature and moisture datasets over Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Plateau Meteorology*, 2018, 37(3): 626-641. [丁旭, 赖欣, 范广洲, 等. 再分析土壤温湿度资料在青藏高原地区适用性的分析 [J]. *高原气象*, 2018, 37(3): 626-641. ]
- [65] Zhao Y, Zhou T J. Asian water tower evinced in total column water vapor: a comparison among multiple satellite and reanalysis data sets [J]. *Climate Dynamics*, 2020, 54(1): 231-245.
- [66] Li Chuan, Zhang Yanjun, Chen Jing. Climatic change of Qinghai Xizang Plateau region in recent 40 year reanalysis and surface observation data-contrast of observational data and NCEP, ECMWF surface air temperature and precipitation [J]. *Plateau Meteorology*, 2004, 23(1): 97-103. [李川, 张廷军, 陈静. 近40年青藏高原地区的气候变化——NCEP和ECMWF地面气温及降水再分析和实测资料对比分析 [J]. *高原气象*, 2004, 23(1): 97-103. ]
- [67] Ma L J, Zhang T J, Li Q X, et al. Evaluation of ERA-40, NCEP-1, and NCEP-2 reanalysis air temperatures with ground-based measurements in China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113: D15115.
- [68] Simmons A J, Jones P D, Bechtold V D, et al. Comparison of trends and low-frequency variability in CRU, ERA-40, and NCEP/NCAR analyses of surface air temperature [J]. *Journal*



- of Geophysical Research: Atmospheres, 2004, 109: D24115
- [69] Frauenfeld O W, Zhang T J, Serreze M C. Climate change and variability using European Centre for Medium-Range Weather Forecasts reanalysis (ERA-40) temperatures on the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2005, 110(D2): D02101.
- [70] You Q L, Kang S C, Pepin N, et al. Relationship between temperature trend magnitude, elevation and mean temperature in the Tibetan Plateau from homogenized surface stations and reanalysis data[J]. *Global and Planetary Change*, 2010, 71(1/2): 124-133.
- [71] You Q L, Kang S C, Pepin N, et al. Relationship between trends in temperature extremes and elevation in the eastern and central Tibetan Plateau, 1961-2005[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35: L04704.
- [72] He J, Zhang F Q, Chen X C, et al. Development and evaluation of an ensemble-based data assimilation system for regional reanalysis over the Tibetan Plateau and Surrounding regions[J]. *Journal of advances in modeling earth systems*, 2019, 11(8): 2503-2522.
- [73] Jiang Z H, Li W, Xu J J, et al. Extreme precipitation indices over China in CMIP5 models. Part I: model evaluation[J]. *Journal of Climate*, 2015, 28: 8603-8619.
- [74] Jiang Z H, Song J, Li L, et al. Extreme climate events in China: IPCC-AR4 model evaluation and projection[J]. *Climatic Change*, 2012, 110(1/2): 385-401.
- [75] Marotzke J. Quantifying the irreducible uncertainty in near-term climate projections[J]. *WIREs Climate Change*, 2019, 10(1): e563.
- [76] Pfahl S, Ogorman P A, Fischer E M. Understanding the regional pattern of projected future changes in extreme precipitation[J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7(6): 423-427.
- [77] Shepherd T G. The dynamics of temperature extremes[J]. *Nature*, 2015, 522: 425.
- [78] Hu Qing, Jiang Dabang, Fan Guangzhou. Evaluation of CMIP5 models over the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2014, 38(5): 924-938. [胡琴, 姜大膀, 范广洲. 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*, 2014, 38(5): 924-938.]
- [79] Su F G, Duan X L, Chen D L, et al. Evaluation of the global climate models in the CMIP5 over the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(10): 3187-3208.
- [80] Yang T, Hao X B, Shao Q X, et al. Multi-model ensemble projections in temperature and precipitation extremes of the Tibetan Plateau in the 21st century[J]. *Global and Planetary Change*, 2012, 80: 1-13.
- [81] Zhou Tianjun, Zhang Wenxia, Chen Xiaolong, et al. The near-term, mid-term and long-term projections of temperature and precipitation changes over the Tibetan Plateau and the sources of uncertainties[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2020, 40(5): 697-710. [周天军, 张文霞, 陈晓龙, 等. 青藏高原气温和降水近期、中期与长期变化的预估及其不确定性来源[J]. *气象科学*, 2020, 40(5): 697-710.]
- [82] Li Hongmei, Li Lin. Mean and extreme climate change on the Qinghai-Tibetan Plateau with a 2 °C global warming[J]. *Climate Change Research*, 2015, 11(3): 157-164. [李红梅, 李林. 2 °C全球变暖背景下青藏高原平均气候和极端气候事件变化[J]. *气候变化研究进展*, 2015, 11(3): 157-164.]
- [83] Liu Xiaodong, Cheng Zhigang, Zhang Ran. The A1B scenario projection for climate change over the Tibetan Plateau in the next 30~50 years[J]. *Plateau Meteorology*, 2009, 28(3): 475-484. [刘晓东, 程志刚, 张冉. 青藏高原未来30~50年A1B情景下气候变化预估[J]. *高原气象*, 2009, 28(3): 475-484.]
- [84] Ji Z M, Kang S C. Double-nested dynamical downscaling experiments over the Tibetan Plateau and Their projection of climate change under two RCP scenarios[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2013, 70(4): 1278-1290.
- [85] Guo D L, Sun J Q, Yu E T. Evaluation of CORDEX regional climate models in simulating temperature and precipitation over the Tibetan Plateau[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2018, 11(3): 219-227.
- [86] Wang X, Tolksdorf V, Otto M, et al. WRF-based dynamical downscaling of ERA5reanalysis data for High Mountain Asia: towards a new version of the High Asia refined analysis[J]. *International Journal of Climatology*, 2021, 41(1): 743-762.
- [87] Pritchard D M W, Forsythe N, Fowler H J, et al. Evaluation of upper indus near-surface climate representation by WRF in the High Asia refined analysis[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2019, 20(3): 467-487.
- [88] Ou T H, Chen D L, Chen X C, et al. Simulation of summer precipitation diurnal cycles over the Tibetan Plateau at the gray-zone grid spacing for cumulus parameterization[J]. *Climate Dynamics*, 2020, 54(7/8): 3525-3539.
- [89] Prein A F, Langhans W, Fosser G, et al. A review on regional convection-permitting climate modeling: demonstrations, prospects, and challenges[J]. *Reviews of Geophysics*, 2015, 53(2): 323-361.
- [90] Deque M, Rowell D P, Luethi D, et al. An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections[J]. *Climatic Change*, 2007, 81: 53-70.
- [91] Weisman M L, Skamarock W C, Klemp J B. The resolution dependence of explicitly modeled convective systems[J]. *Monthly Weather Review*, 1997, 125(4): 527-548.
- [92] Richard E, Buzzi A, Zaengl G. Quantitative precipitation forecasting in the Alps: the advances achieved by the Mesoscale Alpine Programme[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2007, 133(625): 831-846.
- [93] Lean H W, Clark P A, Dixon M, et al. Characteristics of high-resolution versions of the Met Office Unified Model for forecasting convection over the United Kingdom[J]. *Monthly Weather Review*, 2008, 136(9): 3408-3424.
- [94] Skamarock W C, Klemp J B. A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications[J]. *Journal of Computational Physics*, 2008, 227(7): 3465-3485.
- [95] Kendon E J, Roberts N M, Senior C A, et al. Realism of rainfall in a very high-resolution regional climate model[J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(17): 5791-5806.
- [96] Ban N, Schmidli J, Schär C. Evaluation of the convection-resolving regional climate modeling approach in decade-long simulations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(13): 7889-7907.
- [97] Fosser G, Khodayar S, Berg P. Benefit of convection permitting climate model simulations in the representation of convective precipitation[J]. *Climate Dynamics*, 2015, 44(1/2): 45-60.
- [98] Li P X, Furtado K, Zhou T J, et al. Convection-permitting modelling improves simulated precipitation over the central and eastern Tibetan Plateau[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2021, 147(734): 341-362.
- [99] Zhou Y H, Zhang Y, Li J, et al. Configuration and evaluation

- of a global unstructured mesh atmospheric model (GRIST-A20.9) based on the variable-resolution approach[J]. *Geoscientific Model Development*, 2020, 13(12): 6325-6348.
- [100] Zhou X, Yang K, Ouyang L, et al. Added value of kilometer-scale modeling over the Third Pole region: a CORDEX-CPTP pilot study[J]. *Climate Dynamics*, 2021, in press.
- [101] Hawkins E, Sutton R. The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90(8): 1095-1107.
- [102] Hawkins E, Sutton R. The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change[J]. *Climate Dynamics*, 2011, 37(1/2): 407-418.
- [103] Li J D, Sun Z A, Liu Y M, et al. 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*, 2021, 126(9): e2020JD034345.
- [104] Gao Y H, Chen D L. Modeling of regional climate over the Tibetan Plateau[M]. Oxford, UK: Oxford University Press, 2017.
- [105] Jiang Zhihong, Chen Weilin, Song Jie, et al. Projection and evaluation of the precipitation extremes indices over China based on seven IPCC AR4 coupled climate models[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2009, 33(1): 109-120. [江志红, 陈威霖, 宋洁, 等. 7个IPCC AR4模式对中国地区极端降水指数模拟能力的评估及其未来情景预估[J]. *大气科学*, 2009, 33(1): 109-120.]
- [106] Ding Yuguo, Li Jiayun, Jiang Zhihong, et al. Advances in extremes statistics and their application to climate change study[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2011, 7(4): 248-252. [丁裕国, 李佳耘, 江志红, 等. 极值统计理论的进展及其在气候变化研究中的应用[J]. *气候变化研究进展*, 2011, 7(4): 248-252.]
- [107] UNFCCC. Adoption of the Paris agreement[R]. United Nations Framework Convention on Climate Change, 2015.
- [108] Masson-Delmotte V, Zhai P M, Pörtner H O, et al. An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, developmentsustainable, and efforts to eradicate poverty[R]. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018.
- [109] Zhai Panmao, Yu Rong, Zhou Baiquan, et al. Research progress in impact of 1.5 °C global warming on global and regional scales[J]. *Climate Change Research*, 2017, 13(5): 465-472. [翟盘茂, 余荣, 周佰铨, 等. 1.5 °C增暖对全球和区域影响的研究进展[J]. *气候变化研究进展*, 2017, 13(5): 465-472.]
- [110] Knutti R, Rogelj J, Sedlacek J, et al. A scientific critique of the two-degree climate change target[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(1): 13-18.
- [111] The World Bank. Turn down the heat: why a 4 °C warmer world must be avoided[R]. Washington, DC: The World Bank, 2012.
- [112] Kraaijenbrink P D A, Bierkens M F P, Lutz A F, et al. Impact of a global temperature rise of 1.5 degrees Celsius on Asia's glaciers[J]. *Nature*, 2017, 549(7671): 257-260.
- [113] Wu Fangying, You Qinglong, Xie Wenxin, et al. Temperature change on the Tibetan Plateau under the global warming of 1.5 °C and 2 °C[J]. *Climate Change Research*, 2019, 15(2): 130-139. [吴芳营, 游庆龙, 谢文欣, 等. 全球变暖1.5 °C和2 °C阈值时青藏高原气温的变化特征[J]. *气候变化研究进展*, 2019, 15(2): 130-139.]
- [114] You Q L, Wu F Y, Wang H G, et al. Projected changes in snow water equivalent over the Tibetan Plateau under global warming of 1.5 °C and 2 °C[J]. *Journal of Climate*, 2020, 33(12): 5141-5154.
- [115] Aghakouchak A, Chiang F, Huning L S, et al. Climate extremes and compound hazards in a warming world[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2020, 48(1): 519-548.
- [116] Wu Guangjian, Yao Tandong, Wang Weicai, et al. Glacial hazards on Tibetan Plateau and surrounding alpine[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1285-1292. [邬光剑, 姚檀栋, 王伟财, 等. 青藏高原及周边地区的冰川灾害[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(11): 1285-1292.]
- [117] Gao J, Yao T D, Valérie M, et al. Collapsing glaciers threaten Asia's water supplies[J]. *Nature*, 2019, 565: 19-21.
- [118] Kang S C, Zhang Q G, Qian Y, et al. Linking atmospheric pollution to cryospheric change in the Third Pole region: current progress and future prospects[J]. *National Science Review*, 2019, 6: 796-809.
- [119] Zhang Jianyun, Liu Jiufu, Jin Junliang, et al. Evolution and trend of water resources in Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1264-1273. [张建云, 刘九夫, 金君良, 等. 青藏高原水资源演变与趋势分析[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(11): 1264-1273.]
- [120] Tang Qihong, Lan Cuo, Su Fengge, et al. Streamflow change on the Qinghai-Tibet Plateau and its impacts[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(27): 2807-2821. [汤秋鸿, 兰措, 苏凤阁, 等. 青藏高原河川径流变化及其影响研究进展[J]. *科学通报*, 2019, 64(27): 2807-2821.]
- [121] Xu Xiangde, Ma Yaoming, Sun Chan, et al. Effect of energy and water circulation over Tibetan Plateau[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1293-1305. [徐祥德, 马耀明, 孙婵, 等. 青藏高原能量、水分循环影响效应[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(11): 1293-1305.]
- [122] You Q L, Wu T, Shen L C, et al. Review of snow cover variation over the Tibetan Plateau and its influence on the broad climate system[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 201: 103043.
- [123] You Q L, Zhang Y Q, Xie X Y, et al. Robust elevation dependency warming over the Tibetan Plateau under global warming of 1.5 °C and 2 °C[J]. *Climate Dynamics*, 2019, 53: 2047-2060.
- [124] Immerzeel W W, Van Beek L P H, Bierkens M F P. Climate change will affect the Asian Water Towers[J]. *Science*, 2010, 328(5984): 1382-1385.
- [125] Zhang H B, Immerzeel W W, Zhang F, et al. Creating 1-km long-term (1980-2014) daily average air temperatures over the Tibetan Plateau by integrating eight types of reanalysis and land data assimilation products downscaled with MODIS-estimated temperature lapse rates based on machine learning[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 97: 102295.
- [126] Reichstein M, Camps-Valls G, Stevens B, et al. Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science[J]. *Nature*, 2019, 566(7743): 195-204.
- [127] He Shengping, Wang Huijun, Li Hua, et al. Machine learning and its potential application to climate prediction[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2021, 44(1): 26-38. [贺圣平, 王会军, 李华, 等. 机器学习的原理及其在气候预测中的潜在应用[J]. *大气科学学报*, 2021, 44(1): 26-38.]
- [128] Cheng Xianyi, Xie Lu, Zhu Jianxin, et al. Review of genera-

- tive adversarial network[J]. Computer Science, 2019, 46(3): 74-81. [程显毅, 谢璐, 朱建新, 等. 生成对抗网络 GAN 综述[J]. 计算机科学, 2019, 46(3): 74-81.]
- [129] Zhou T J, Zhang W X. Anthropogenic warming of Tibetan Plateau and constrained future projection[J]. Environmental Research Letters, 2021, 16(4): 044039.
- [130] Sun Y, Song L C, Yin H, et al. Human Influence on the 2015 extreme high temperature events in Western China[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2016, 97(12): S102-S106.
- [131] Ramanathan V, Carmichael G. Global and regional climate changes due to black carbon[J]. Nature Geoscience, 2008, 36(1): 335-358.
- [132] Xu B Q, Cao J J, Hansen J, et al. Black soot and the survival of Tibetan glaciers[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106(52): 22114-22118.
- [133] Kang S C, Zhang Y L, Qian Y, et al. A review of black carbon in snow and ice and its impact on the cryosphere[J]. Earth-Science Reviews, 2020, 210: 103346.

## Several research frontiers of climate change over the Tibetan Plateau

YOU Qinglong<sup>1,2</sup>, KANG Shichang<sup>3,4</sup>, LI Jiandong<sup>5</sup>, CHEN Deliang<sup>6</sup>,  
ZHAI Panmao<sup>7</sup>, JI Zhenming<sup>8,9</sup>

(1. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences & Institute of Atmospheric Sciences, Fudan University, Shanghai 200438, China; 2. CMA-FDU Joint Laboratory of Marine Meteorology, Shanghai 200438, China; 3. State Key Laboratory of Cryospheric Science, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 5. State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 6. Department of Earth Sciences, University of Gothenburg, Gothenburg 40530, Sweden; 7. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 8. School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, Guangdong, China; 9. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, Guangdong, China)

**Abstract:** Under the background of global change, the cryosphere and atmosphere over the Tibetan Plateau (TP) are changing rapidly, which seriously affects the ecological environment of “Asian Water Tower” and “the Third Pole”. This paper reviews some issues in the research on climate change over the TP in recent years, including the change of extreme climate events over the TP and its relationship with the atmospheric circulation, the amplified warming and the physical mechanism of elevation dependent warming, applicability of modern re-analysis data, the bias and inaccuracy of climate models in the areas with scarce data over the TP, and the projection and risk study of climate change over the TP under the different warming threshold. Finally, some important issues and associated scientific challenges in the study of climate change over the TP are identified and their prospects are discussed. Addressing these will support the implementation of the Belt and Road Initiative.

**Key words:** Tibetan Plateau; climate change; research frontiers

(责任编辑: 孟宪红; 编辑: 周成林)