

## 青藏高原调控区域能量过程和全球气候的机理



**作者简介:**刘屹岷,中国科学院大气物理研究所 LASG 国家重点实验室研究员,博士生导师,国家杰出青年科学基金获得者。从事副热带高压形成和变异机理,青藏高原的动力和热力效应,和大气模式发展及应用等方面的研究。迄今在国内外核心期刊发表学术论文 180 余篇,被 SCI (E) 收录论文引用 4000 多次。曾获全国优秀博士学位论文奖、国家自然科学基金二等奖(第二完成人)、和赵九章优秀中青年科学家奖等奖励,并入选国家百千万人才工程,获得“庆祝中华人民共和国成立 70 周年”纪念章。

刘屹岷<sup>①②③</sup>, 李伟平<sup>④</sup>, 刘新<sup>⑤</sup>, 王晓聪<sup>①\*</sup>, FU Rong<sup>⑥</sup>,  
LIU Ping<sup>⑦</sup>

① 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;

② 中国科学院大学,北京 100049;

③ 中国科学院 青藏高原地球科学卓越创新中心,北京 100101;

④ 国家气候中心 气候研究开放实验室,北京 100081;

⑤ 中国科学院 青藏高原研究所青藏高原环境变化与地表过程重点实验室,北京 100101;

⑥ Jackson School of Geosciences, The University of Texas at Austin, Austin, Texas, USA;

⑦ Endeavor Hall 199, School of Marine and Atmospheric Sciences, Stony Brook University, Stony Brook, NY 11794-5000 USA

**摘要** 本文总结了中国国家自然科学基金委重点项目“青藏高原调控区域能量过程及其影响机理”的研究进展。着重阐明了春夏季伊朗高原和青藏高原(TIP)地表热通量特征及变化原因、TIP 上空独特的水汽、云宏观和微观垂直结构,以及降水和云辐射效应;在夏季两个高原地区的感热加热存在相互影响和反馈,形成观测到的加热与大气垂直环流之间的准平衡耦合系统,由此提出了 TIP 系统(TIPS)的概念;项目还从天文和水文的角度佐证了 TIPS 对亚洲夏季风的影响,揭示 TIPS 导致上对流层暖、下平流层冷的南亚高压的形成机理及 TIPS 影响北半球环流和印度洋海气相互作用的物理过程;揭示 TIPS 系统对南亚高压年际变化的影响,提出高原位涡强迫激发中国东部激烈天气过程的一种新机制。此外还揭示了 CMIP5 模式对高原表面温度模拟存在冷偏差的原因和其中的物理过程,这是大气环流与冰雪反照率的动力耦合的结果。

**关键词** 青藏高原和伊朗高原(TIP)系统影响;南亚高压热力结构;高原位涡强迫;年际变化和灾害天气;模式高原冷偏差

由大气、海洋、冰冻、陆面、以及海洋和陆地生物圈组成的气候系统是人类赖以生存的环境,研究其变化规律具有重要意义。全球能量和水循环试验(GEWEX)是世界气候研究计划(WCRP)的核心项目之一,致力于确定全球和区域水循环、辐射和能量转换的大气过程及热力学过程。青藏高原的特殊性使之成为 GEWEX 的重要研究对象:它位于欧亚大陆东部,平均海拔超过 4 000 m,其上空大气柱的质量只有海平面的约 60%,高原上特别是边界层中的辐射过程与低海拔地区显著不同,相应的大气物理过程、能量交换和水分收支也极其复杂。由于热带海陆分布和亚洲大地形在亚洲夏季风的形成中起着重要的作用,以及亚洲夏季风释放的巨大潜热是全球大气运动的一个重要能

\* 联系人, E-mail: wangxc@lasg.iap.ac.cn

2019-12-29 收稿, 2020-01-17 接受

国家自然科学基金资助项目(91437219; 91637312; 91937302); 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDY-SSW-DQC018); 全球变化与海气相互作用专项(GASI-IPOVAI-03)

引用格式: 刘屹岷, 李伟平, 刘新, 等, 2020. 青藏高原调控区域能量过程和全球气候的机理[J]. 大气科学学报, 43(1): 181-192.

Liu Y M, Li W P, Liu X, et al., 2020. Physics of the control of the Tibetan Plateau on regional energetic processes and global climate[J]. Trans Atmos Sci, 43(1): 181-192. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20191229006. (in Chinese).

源,青藏高原上复杂的陆气耦合系统如何影响亚洲区域能量和水循环,是研究区域性和全球性的“水、能量与气候”的一个核心科学问题。

自从叶笃正等(1957)和 Flohn(1957)发现了青藏高原在夏季是一个强大的热源后,国内外对青藏高原的热力结构及其影响机制进行了不断的研究。随着基础理论研究进展、新观测资料的获取和气候模式的改进,近年来研究着重于高原大地形热力状况及其对亚洲气候的影响(Liu et al., 2001, 2007, 2012; 李国平等, 2002; 刘新等, 2002; 段安民等, 2006; 马耀明等, 2006; Xu et al., 2010; Luo et al., 2011; Yang et al., 2011; Wu et al., 2012a, 2012b; Pan et al., 2013)。青藏高原上抬升的感热加热引发了特殊的局地降水,而降水会导致地面土壤湿度增大及地表温度下降,反过来会抑制局地的感热加热。这样降水的凝结潜热与局地感热加热常常呈现负相关。该负相关过程的形成机制和影响亚洲季风的综合效应显然与海平面上非抬升感热加热和潜热加热的气候效应不同,其间的差异和成因尚不清楚。

欧亚大陆上副热带地区大地形还包括伊朗高原(IP),其上空的热力结构与青藏高原(TP)存在显著的差异和相互作用(Zhang et al., 2002, 2014)。然而伊朗高原热源的三维结构、变化特征,及其与青藏高原相互影响的过程和机理的研究很少。另外青藏高原热源包括感热和凝结潜热各自的和共同的变化是如何影响伊朗高原热力结构的,伊朗高原影响下游青藏高原的物理过程等问题迄今尚不清楚,有待深入研究。青藏高原热力强迫影响南亚夏季风的争议(Boos and Kuang, 2010, 2013; Qiu, 2013)也从另一个方面说明青藏高原和伊朗高原(TIP)热力强迫影响季风的过程和机理需要进一步对比并完善。

为揭示青藏高原上的地气耦合过程,明确青藏高原的动力和热力影响,中国自然科学基金委员会设立重大研究计划“青藏高原地-气耦合系统变化及其全球气候效应”。其中的重点研究项目“青藏高原调控区域能量过程和全球气候的机理”的主要研究任务是研究 TP 抬升加热对 TP 热力状况的影响, IP 热力强迫对 TP 能量分布的影响、TP 热力强迫对 IP 和亚洲区域热力状况影响的过程,以及 TIP 作为一个整体对亚洲季风和全球气候的影响。经过 4 年多的研究,项目团队获得了一些新发现和新成果,深化了对青藏高原上的物理过程及其气候效应的认识。项目已于 2019 年完成总结验收,被评为优秀。本文对该项目的成果做概要总结,其详细内容参见相关文献。

## 1 春夏季伊朗高原和青藏高原地表能量平衡及其上空的云辐射特征

### 1.1 春夏季 TIP 地表能量平衡特征及其季节变化

伊朗高原与青藏高原表面热通量的气候分布及多时间尺度变化可能存在联系与差异,揭示这些关系需要结合站点观测和再分析资料,因此,项目首先确认再分析资料热通量的有效性。Yang et al. (2019)利用青藏高原多个观测站点的湍流地表热通量资料,对目前通用的 4 套再分析资料进行了评估分析。他们发现,对于感热通量,再分析资料在夏季的偏差最小,冬季最大,其中 JRA-55 和 ERA-Interim 资料资料更接近站点观测;而对于潜热通量,再分析资料的偏差在夏季最大,冬季最小,NCEP2 再分析则更适用。对于感热和潜热的日变化,再分析资料高估了日间峰值,而其余时段较为合理。多套再分析资料比较一致地表明,由春到夏亚洲大地形区域地表热状况的季节演变存在明显差异。青藏高原东南部低空气旋生成,增多局地降水,减弱地表西风,增加潜热释放,减弱感热上传,即减小波文比;这些过程同时加强了伊朗高原的东北风,抑制当地降水,增加感热上传,即增大波文比,从而形成青藏-伊朗高原感热通量季节演变的纬向非对称分布(刘超等, 2015)。另外,再分析资料比较一致表明近 30 a 来伊朗高原夏季感热有线性增加的趋势,而青藏高原夏季感热则线性减小。不过,两高原夏季感热通量的年际变化却显著不同。于威等(2018)研究了在不同季节和不同海拔上青藏高原地表感热的气候态特征及其在年际、年代际以及趋势变化上的时空分布特征。总体来说高原地表感热随着高度上升而增加,春季年际、年代际地表感热经验正交函数分解第一模态空间型分别具有高原南北反向分布和高原主体与其东北反向分布的特征,夏季与之相似。平均而言在年际时间尺度上表面风速对地表感热的贡献与地气温差对地表感热的贡献大小相当;而在年代际时间尺度上,表面风速对地表感热变化的贡献大于地气温差。

### 1.2 青藏高原和临近地区云的宏观和微观垂直结构及降水和云辐射效应

基于 CloudSat/CALIPSO 和 TRMM 降水资料,项目对比分析了青藏高原与其邻近的陆地和热带海洋上空的云垂直结构及降水和辐射效应特征,结果发现青藏高原地区的云具有独特的垂直结构和季节变化特征(图 1)。由于高原的地形特征及对大气低

层水汽供应的限制,大地形对云层厚度和层数有压缩效应(Yan et al., 2016; 刘屹岷等, 2018),与不同降水强度相对应的云体实际总厚度和最上层云的云顶高度的变化范围,在 TP 地区都明显小于其他两个区域,表明高原对云垂直结构多样性和降水的限制作用。青藏高原上空云辐射效应呈现独特的垂直结构,突出表现为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(Yan et al., 2018; Yan and Liu, 2019)。

## 2 TIP 热力相互反馈过程及其影响印度洋海气相互作用、亚洲季风和北半球环流的过程与机理

### 2.1 伊朗-青藏高原感热加热相互作用及 TIP 系统形成

Wu et al. (2016, 2017) 和 Liu et al. (2017) 基于数值模拟研究了夏季青藏高原主体上的表面感热加热和潜热加热的特征及其相互作用,以及伊朗高原-青藏高原感热加热的相互作用,从理论和数值模拟证实了青藏高原上双加热通过影响对流层上层的温度场和流场结构,从而在近对流层顶处激发出绝对涡度最小值和异常位涡强迫源,激发出大范围的季风经圈环流;另外,两大高原感热加热存在相互影响和反馈,比如,伊朗高原感热加热会减少青藏高原的表面加热,而青藏高原的感热加热则增加伊朗高原的表面加热。这些新发现的过程形成了观测到的伊朗高原感热加热-青藏高原感热加热和凝结潜热释放-大气垂直环流之间的准平衡耦合系统(TIPS),

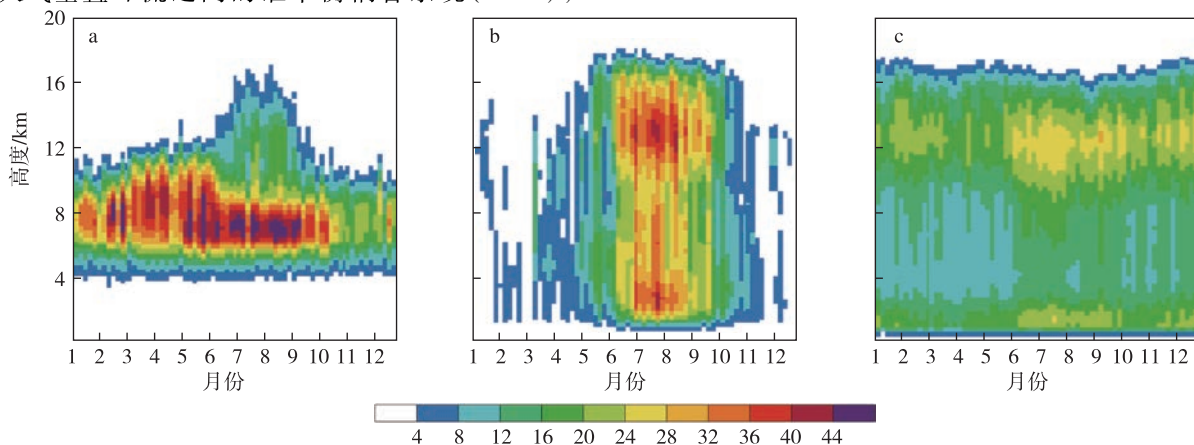


图 1 2006 年 6 月 15 日—2011 年 4 月 17 日青藏高原 TP(a)、高原以南陆地 NIST(b) 和热带海洋 TO(c) 地区候平均云量垂直分布的季节变化(单位:%;引自刘屹岷等(2018))

Fig.1 Pentad-averaged cloud amount over the (a) TP, (b) NIST and (c) TO (data period: 15 June 2006—17 April 2011; unit:%; from Liu et al. (2018))

进一步影响大气环流。青藏高原上的感热-潜热相互反馈在这个 TIPS 耦合系统中起主要作用。

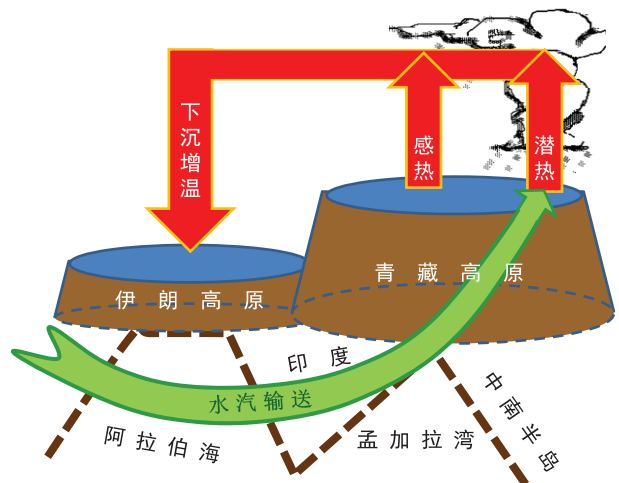


图 2 青藏高原、伊朗高原的热力强迫以及南亚的水汽输送所构成的一个相互反馈的耦合系统(TIPS)示意图(引自 Liu et al. (2017))

Fig. 2 Schematic figure of a feedback coupling system (TIPS) composed of thermal force over Tibetan Plateau, Iran Plateau, and water vapor transport in South Asia (from Liu et al. (2017))

### 2.2 从天文和水文的角度理解 TIP 对亚洲夏季风的影响

最近一些国际研究假设青藏高原大地形阻挡住了高纬度冷空气向南入侵到热带地区,使得高温高湿的气流在印度北部的喜马拉雅山堆积,导致强对流降水从而形成南亚夏季风。在本项目研究中,He et al. (2015) 基于对辐射的诊断分析和一系列数值试验(图 3),证明了青藏高原无法阻挡所谓的冷空气

气南侵。在夏季,无论是大气层顶部还是地表的太阳辐射,以及地表位温在高原北部地区都更强于高原的南侧地区,从而导致了冷空气不可能从高纬度吹向低纬度。另一方面,从水分收支的分析上,本项目发现近地面相当位温在印度北部地区增强是由于高水汽含量的增强而导致的。这部分水汽的来源,动力上是由于青藏高原地表的感热加热在近地面层形成的一个气旋式环流异常,从而将印度洋上的水汽向南亚内陆地区抽吸,进一步形成了季风降水。项目基于位涡理论和数值试验证明了这一发现:是青藏高原表面的加热作用,而不是其隔断作用,导致

了水汽从海洋向陆地输送,进而形成了亚洲夏季风(Wu et al., 2012a; He et al., 2015)。

### 2.3 对流层上层南亚高压和暖中心的形成和变化机理

夏季北半球副热带对流层上层环流的主要特征是存在庞大的南亚高压(SAH)以及强大的对流层上层温度暖中心(UTTM)。本研究对UTTM形成的机制提出了新的解释(图4; Wu et al., 2015)。南亚大陆对流层上层暖中心的纬度与副高脊线的纬度重合,而它的经度是由大气非绝热加热/冷却的垂直梯度的纬向分布来决定,由此还修正了经典的

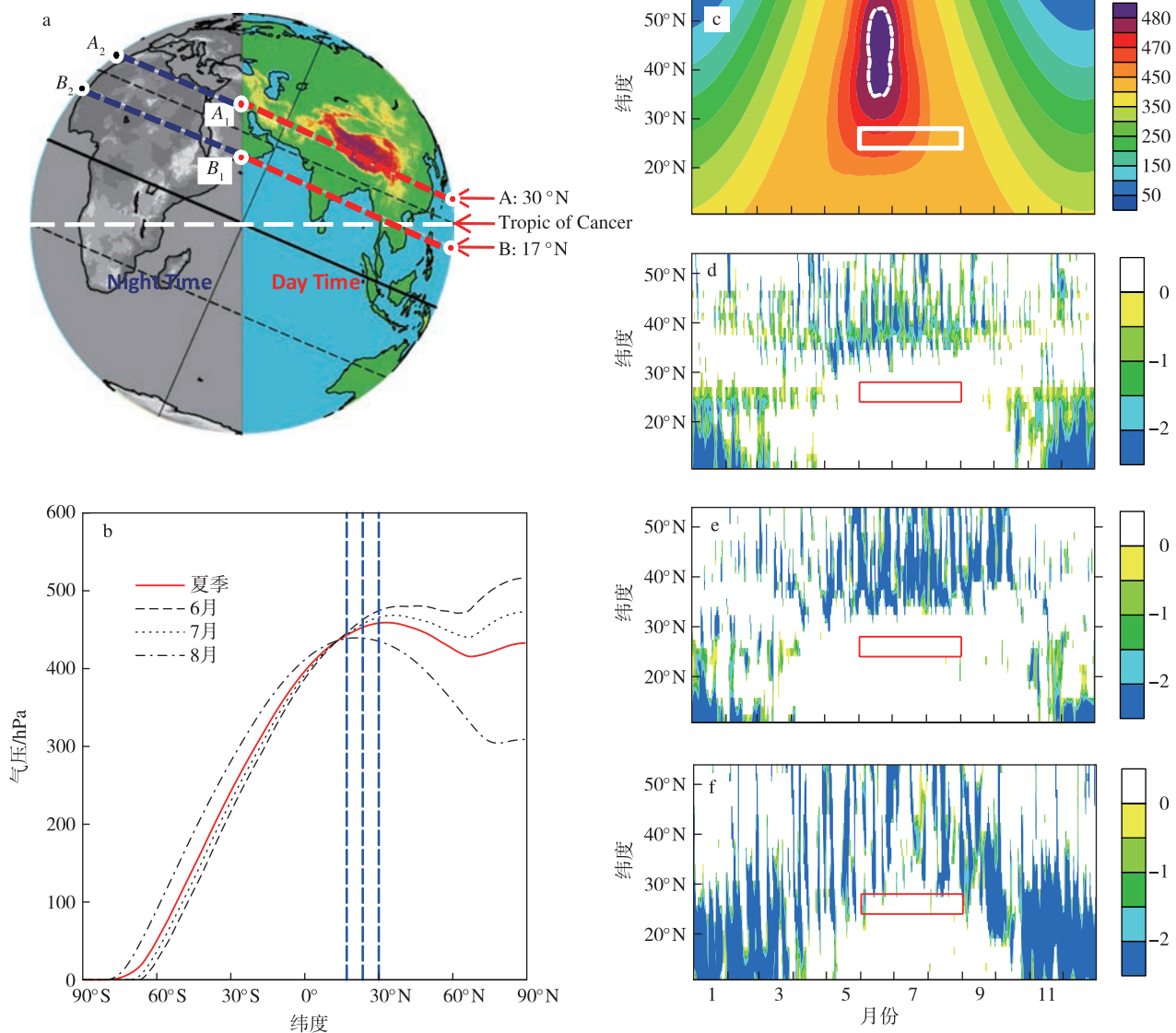


图3 夏季太阳入射辐射和净辐射在青藏高原以北大于高原以南,印度上空不存在冷平流;冬季即使高原存在,冷空气通过绕流到达南亚(引自 He et al.(2015))

Fig.3 There is no northerly intrusion into Indian monsoon area due to strong solar radiation on the top of the atmosphere and on the north of the TP than on the south of it in summer. However, in winter, the plateaus cannot block such a northerly intrusion(from He et al.(2015))

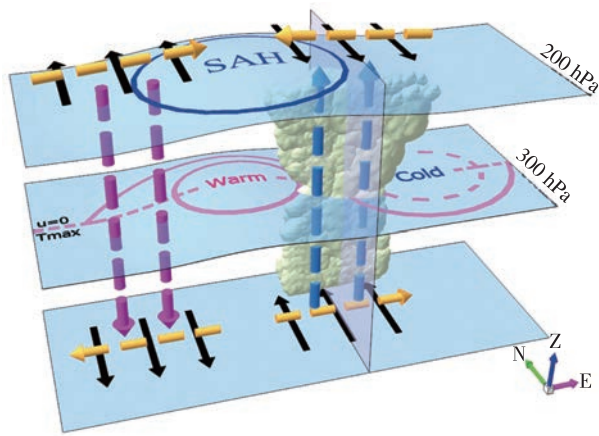


图4 上对流层温度最大中心的经度位置与加热垂直梯度分布的  $T-Q_z$  关系示意图(引自 Wu et al. (2015))

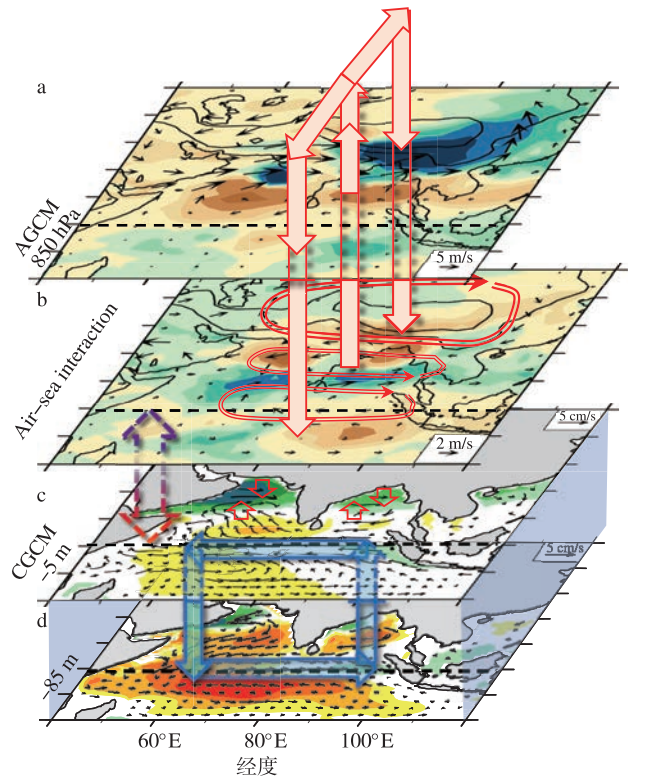
Fig.4 Schematic diagram of the  $T-Q_z$  mechanism contributing to the longitudinal location of the UTTM (from Wu et al. (2015))

Gill 模型。由于在对流层上层对流加热和辐射冷却都随着高度递减,加热/冷却激发出垂直北风/南风切变,导致了加热场西/东侧和冷却场东/西侧出现了一个暖/冷中心。他们进一步对再分析资料的诊断表明在副热带地区,大气的温度场和加热场在年际尺度上满足内在的  $T-Q_z$  关系。在 20 世纪后半期,中国南部地区降水出现增加趋势,伴随着高空北风切变的增强和其西侧南亚高压和对流层上层暖中心的增强。结果表明,大气环流对降水异常的反馈是区域气候空间分布型变化的一个重要贡献因素。

#### 2.4 TIPS 对大气热力结构和印度洋海气相互作用的影响

基于有无感热加热数值模拟的定量分析等诊断结果表明,青藏高原感热加热引发的对亚洲副热带季风区水汽辐合贡献率为伊朗高原感热影响的 2 倍以上(Liu et al., 2017);两者共同作用对亚洲副热带季风区的水汽辐合作出最主要的贡献。TIPS 的加热作用使对流层温度升高,并抬升了其上空的对流层顶,造成了那里平流层下层温度偏低;与欧亚大陆大尺度热力强迫共同作用,形成了对流层上层的暖性但在平流层下层为冷性的强大的反气旋环流南亚高压,从而影响区域和全球的天气气候(吴国雄等, 2018)。研究还指出印度洋海气相互作用对青藏高原热力强迫有着调控作用。TIP 热力强迫可以导致与印度洋偶极子的分布相似的海温变化,该高原热力强迫造成的海气相互作用异常却是要减弱

地形的直接强迫作用(图 5;He et al., 2019)。基于卫星资料的研究还指出亚洲季风区的低层平流层是北半球夏季最突出的水汽中心,季节性增加的水汽中几乎一半是来自与地形变化有关的对流及其导致的脱水中心的变化(图 6;Zhang et al., 2016a)。



-- Equator Seawater Exchanges of radiation and heat fluxes  
 Seawater current Surface latent heat fluxes change (Indirect)  
 Meridional circulation (Indirect) Horizontal circulation (Indirect)

图5 青藏-伊朗高原对印度洋海气相互作用以及亚洲夏季季风系统的影响示意图(青藏-伊朗高原热力作用的直接效应导致是对流层低层形成气旋式环流,而其间接效应造成在高原周围的反气旋环流,并导致高原南侧出现气旋-反气旋环流偶极子型(细红线),与垂直方向的经向环流异常耦合(粗红线),减弱青藏-伊朗高原的直接加热作用;引自 He et al., 2019)

Fig.5 Schematic diagram on the thermal effect of the TIP on the ASM. The direct effect of the TIP thermal force generates a cyclonic circulation in the lower troposphere around the TIP while its indirect effect generates an anticyclonic flow surrounding the TIP, which causes a cyclone-anticyclone circulation dipole to its south in the lower troposphere (fine red arrows) coupled with a pair of meridional circulations (bold red arrows) and thus counteracts the TIP's direct impact on the ASM (from He et al., 2019)

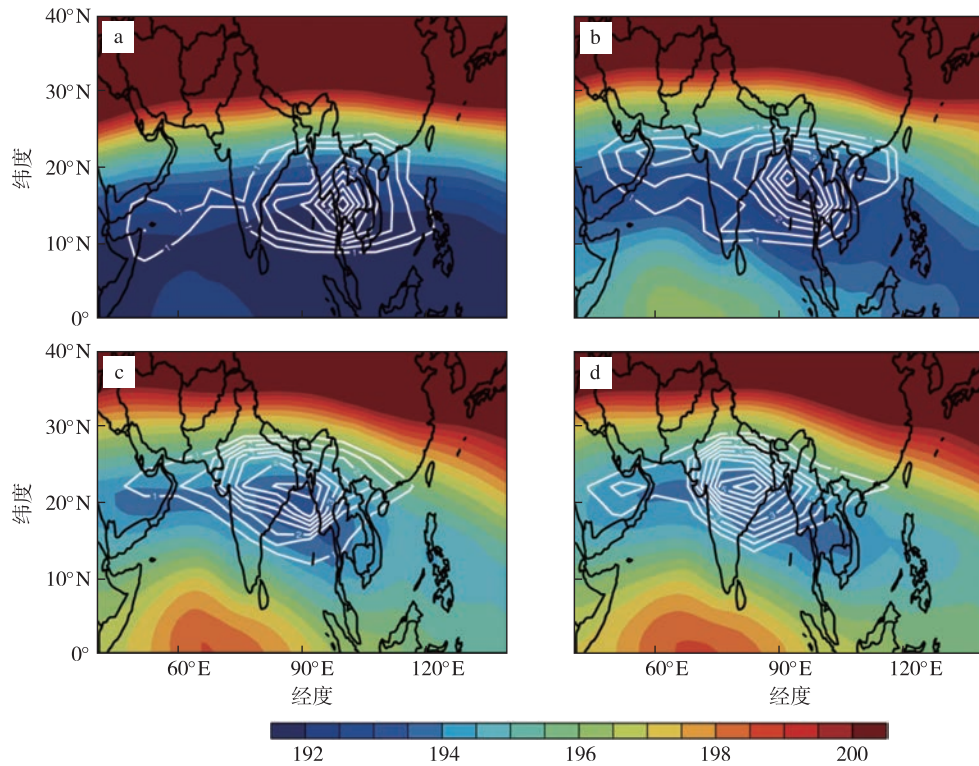


图6 5—8月(a—b)100 hPa空气气团最后脱水位置的概率密度分布(白色等值线,1%~5.5%,间隔0.5%;彩色为平均的对流层层顶的温度;基于ERA-Interim再分析资料;引自Zhang et al.(2016a))

Fig.6 Probability density distributions of last dehydration locations of air parcels at 100 hPa over the Asian monsoon region during (a—b) May and August derived from traj\_ERAi (white contours from 1% to 5.5% with an interval of 0.5%). Colored shadings denote averaged tropopause temperatures in ERA-Interim (from Zhang et al.(2016a))

### 3 TIPS 系统影响亚洲季风年际变化及极端灾害事件的过程与机理

#### 3.1 夏季青藏高原-东亚季风加热对南亚高压年际变化的影响

在年际时间尺度上,Zhang et al.(2016b)的研究指出南亚高原强度异常表现为其西、东部的位势高度(温度)异常,与高原东部到长江中下游一带的季风潜热释放的异常关系密切。潜热加热影响南亚高压的机理为:潜热的垂直分布在对流层上层是随高度递减的,使得东亚副热带地区上层出现反气旋性环流异常,南亚高压东部加强、东伸,同时激发西传 Rossby 波,在中亚地区形成反气旋性异常,造成地中海东岸高层大气的南风暖平流和伊朗高原上空的下沉增温等绝热加热,进而形成局地降水负异常和近地面感热作用的非绝热加热,它们共同使得南亚高压西部的位势高度升高。

#### 3.2 我国西南地区秋季降水年际变化的空间差异及其成因

西南地区秋季降水量占其年降水量的比重达20%以上,仅次于夏季。其年际变化涉及中高纬环流及热带海气相互作用。西南东、西区域秋季降水的年际变化、显著周期、旱涝异常年份、相关的环流系统都有明显差异。西南西部降水在秋季3个月与不同的环流形势对应:9月降水由中南半岛反气旋输送的暖湿气流决定;10月降水受高原以东反气旋环流和孟加拉湾低槽共同影响;11月降水主要受中高纬波动的影响,西南西部降水与斯堪的纳维亚(SCA)遥相关存在显著负相关,且具有非对称性。SCA正位相时,西南西部地区的东侧有暖异常,而其西侧的印度半岛北部及伊朗高原地区为冷异常,通过冷平流异常维持了我国西南西部区域对流层中下层的异常下沉运动,导致降水偏少(刘扬和刘屹岷,2016,2017)。

### 3.3 春夏季 TIP 地表热通量的时空分布特征、相互联系及对南亚高压和亚洲季风的影响

基于 ERA-interim 月平均再分析的研究结果表明,春夏季青藏高原与伊朗高原地表热通量在季节、年际和年代际尺度上具有不同的时空分布特征。两个高原地表热通量的春季同期变化上,伊朗高原地表感热与青藏高原西部地表感热具有同位相变化关系,与青藏高原东部地表感热具有反相变化关系;非同期变化,春季伊朗高原地表感热与夏季青藏高原东部地表感热存在反相变化关系(张浩鑫等,2017)。研究还发现5月伊朗高原和青藏高原地表感热通量的年际异常通常呈现出反位相变化,春末两个高原地区这种反相的地表感热通量异常可以持续到初夏,它们的共同作用会导致6月南亚高压位置的西北-东南向移动,并影响到后期的亚洲季风(Zhang et al.,2019)。Liu et al.(2018)研究指出夏季南亚高压还影响了对流层中层欧亚大陆上位势高度极大值持续稳定,以阻塞的形式存在,影响了西欧的极端热浪发生。

### 3.4 青藏高原地表位涡密度强迫对我国冬季南方降水过程的影响

位涡外部源汇是驱动大气环流的原动力。Ma

et al.(2019)和于佳卉等(2018)介绍了地表位涡制造和位涡密度强迫之间的联系,讨论了不同坐标系中位涡密度方程的特点及其在应用中应当注意的问题。他们还以2008年初南方低温雨雪冰冻灾害为例并开展敏感性试验,探讨了青藏高原地表位涡密度强迫及东传对下游地区灾害性过程的影响,由此揭示青藏高原位涡密度强迫激发中国东部激烈天气发生的一种新机制(图7)。

## 4 区域和全球气候系统模式改进和发展

### 4.1 发展云中水凝物抗相关厚度参数化方案和次网格云量参数化方案、揭示云垂直重叠对辐射传输的影响

项目利用云分辨模式(CRM)研究了云中水凝物的水平非均匀性以及垂直相关性对辐射传输过程的影响,发现垂直抗相关厚度在不同云型中表现出明显的差异:对流云中较大,卷云中较小。据此提出了一种新的考虑云型变化的抗相关厚度参数化方案(Wang et al.,2015,2016;Wang,2017)。新方案模拟下的云辐射效应以及辐射加热率均得到明显改进(图8)。此外,发展了基于隐式概率密度分布函数

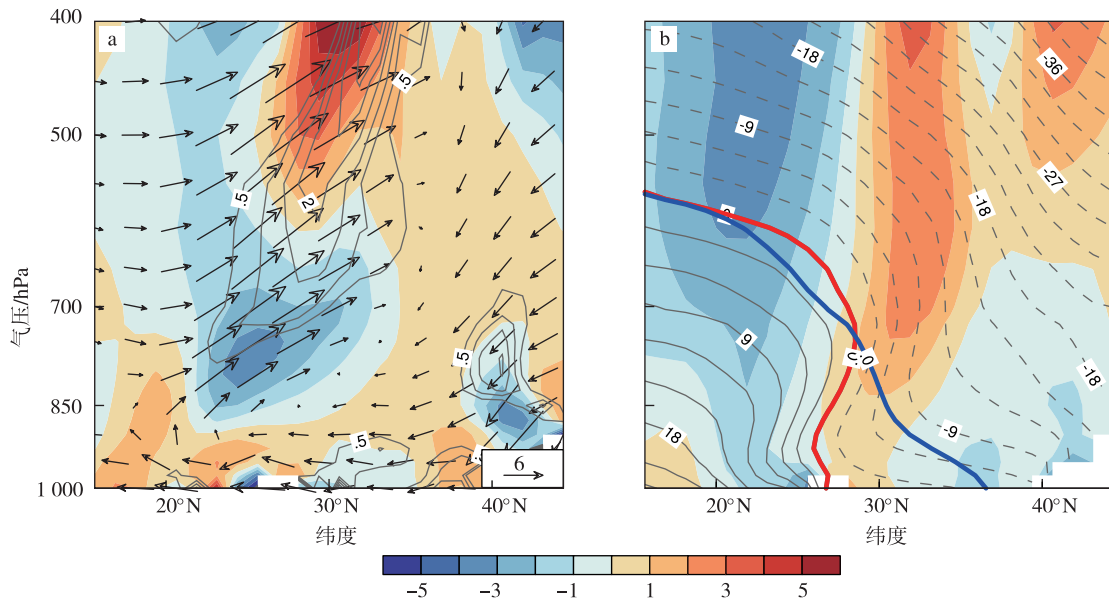


图7 2008年1月18日—2月2日 $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 平均的绝对涡度平流(色阶;单位: $10^{-10}/\text{s}^2$ )、绝对涡度平流随高度变化(等值线;单位: $10^{-12}/(\text{s}^2\cdot\text{hPa})$ )和风场(箭矢)(a);相对涡度(色阶;单位: $10^{-5}/\text{s}$ )和温度(等值线;单位: $^{\circ}\text{C}$ ;红色和蓝色等值线分别为雨雪期内和气候态的 $0^{\circ}\text{C}$ 等温线)的纬度-高度(单位:hPa)剖面(b)(引自Ma et al.(2019))

Fig.7 Vertical cross-sections of (a) absolute vorticity advection (shadings,  $10^{-10}/\text{s}^2$ ) and its vertical gradient (contours,  $10^{-12}/(\text{s}^2\cdot\text{hPa})$ ), (b) relative vorticity (shadings,  $10^{-5}/\text{s}$ ) and temperature (contours,  $^{\circ}\text{C}$ ; red and blue contours indicate the  $0^{\circ}\text{C}$  isothermal in the storm period and the January-February mean from 1980 to 2017) for  $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$  from 18 January to 2 February 2008 (from Ma et al.(2019))

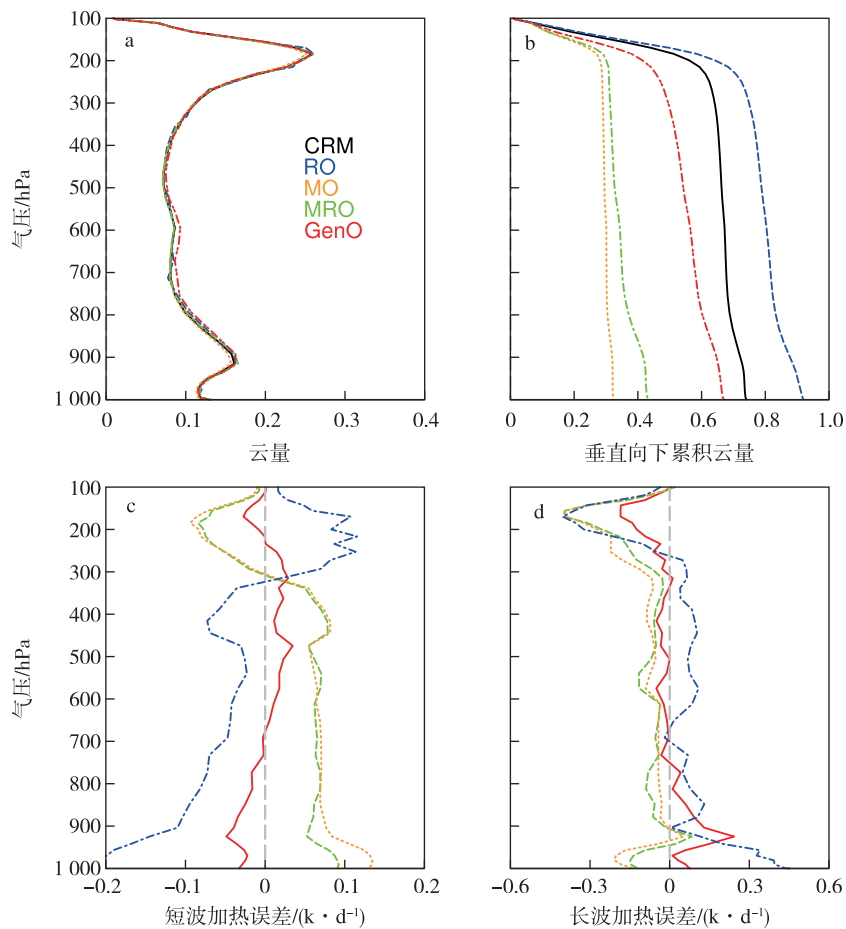


图8 不同云垂直重叠假设对模拟结果影响:(a)云量(引自 Wang et al.(2016));(b)垂直向下累积云量;(c)短波加热误差( $K \cdot d^{-1}$ );(d)长波加热误差( $K \cdot d^{-1}$ )

Fig.8 Period-averaged simulations of KWAJEX case under different cloud overlap assumptions (from Wang et al.(2016)): (a) Layer cloud fraction(100%); (b) downward cumulative cloud fraction(100%); (c) biases of shortwave heating rate against CRM( $K \cdot d^{-1}$ ); (d) biases of longwave heating rate against CRM( $K \cdot d^{-1}$ )

(PDF)的次网格统计云参数化方案,并利用 LASG F/SAMIL 单柱大气模式(Wang, 2015)对高原夏季对流系统进行检验测试。结果表明,新方案明显减小了原方案对云量的过高估计,尤其是对于中高层云;同时对低云模拟也有明显改进。较 F/SAMIL 原方案相比,新方案对青藏高原夏季对流云系的模拟能力明显提高。

#### 4.2 WRF 模式不同参数化方案影响青藏高原南坡夏季降水模拟的分析

青藏高原对全球气候变化以及灾害性天气的形成和演变都有重要的影响。高原南坡地形复杂,经向海拔高度变化极大,数值模式对复杂地形降水的模拟能力有限。因此,利用高分辨率的数值模式研究高原南坡的降水具有重要的意义。利用中尺度数值模式 WRF,吴胜刚等(2016)研究了积云对流参数化方案、网格嵌套技术和模式分辨率对陡峭的青藏

高原南坡夏季降水模拟的影响。结果表明降水对积云对流参数化方案的选择很敏感,使用积云对流参数化方案、提高模式分辨率和网格嵌套技术能改善降水的强度和空间分布的模拟。为利用 WRF 模式进行青藏高原南坡降水的研究提供了一套较好的物理过程参数化方案。

#### 4.3 青藏高原上的感热通量模拟的改进及其对东亚夏季风模拟的影响

Zhuo et al.(2016)研究指出,东亚环流和气候的模拟误差与高原模拟误差有关联。通过改进 WRF 中包括青藏高原的干旱半干旱地区热传导过程的数值模拟,降低了青藏高原地区地表温度的冷偏差,减小了高原地表的感热通量,使高原的抽吸作用减弱,在中国东北部地区和南部地区分别产生了气旋式环流和反气旋式环流。这些过程改善了夏季东亚地区的季风雨带模拟。项目还进行了高原湖面



模型改进,揭示 WRF 模型中湖面过程对天气气候模拟的影响(Zhu et al.,2018)。

#### 4.4 影响 CMIP5 模式表面温度冷偏差的原因和物理过程

项目研究表明模式中冷偏差与模式对高原冬、春季积雪覆盖面积偏大的模拟有关。Chen et al.(2017)基于 CMIP5 多模式模拟的高原上的表面能量平衡分析,研究了青藏高原表面温度模拟的离散性。结果表明模拟的冷偏差包含的物理过程有:模拟的积雪覆盖面积偏大,使得地表反照率增大,地表吸收的短波辐射减少、地表感、潜热通量减少,因而地表向大气输送的热量和水汽(尽管很小)偏少,大气温度偏低、水汽含量减少,导致晴空向下长波辐射减小,与反照率影响共同作用,地表温度偏冷。该冷偏差影响了模拟的季风爆发和东亚夏季风。

## 5 结论与未来展望

位于副热带欧亚大陆东部的青藏高原和其西部的伊朗高原表面感热通量存在不同的季节变化及相互作用,形成观测到的伊朗高原感热加热-青藏高原感热加热和凝结潜热释放-大气垂直环流之间的准平衡耦合系统(TIPS)。该系统与欧亚大陆大尺度热力强迫共同作用,形成了对流层上层的暖性但在平流层下层为冷性的强大的反气旋环流南亚高压,从而影响区域和大尺度的环流和能量过程。冬季冷空气绕流青藏高原到达南亚,即使喜马拉雅山脉存在,该地区为干冷的冬季风控制;而夏季这里地面比其以北地区接收到较少的短波辐射,不存在冷平流。TIP 大地形斜坡上的加热增加了移向高原的气块的能量使其在该区域上升,TIP 加热所产生的位涡强迫在对流层低层激发出绕高原的强度大、范围广的

气旋式环流,把海洋上的丰沛水汽输向大陆从而支持着陆地上的季风对流降水。TIP 的感热加热改变了其上方的温度和环流结构,产生绝对涡度最小值,激发出大范围的季风经圈环流,形成南亚夏季风的北支和东亚夏季风,影响印度洋海温的分布和北半球定长波。TIP 系统还调节亚洲季风的年际变化及极端灾害事件的发生。

本文只回顾了重点基金支持下开展的青藏高原陆气过程及其影响的研究。TIP 热源不同时间尺度上的变化及影响与基本气流和季节差异有关,动力强迫也对季风的变化有贡献;高原热源与海洋和中高纬系统相互作用表明,高原热源是大气环流的驱动因子但也是环流变化的结果,其综合效应构成了季风系统的各种时间和空间尺度的复杂变化。这些研究也表明将亚洲季风与多圈层相互作用作为整体来理解季风的多尺度变化是一个重大挑战。另一方面,各种观测、卫星和再分析资料及环流模式在青藏高原上的显著误差使得定量研究的难度变大。以提高模式物理过程模拟能力为目标的观测实验是很必要的,但尚未在青藏高原上开展。类似的研究需要进行观测的科研人员与模式发展团队密切合作,进行有效的场地实验。随着观测资料的丰富完善和数值模拟水平的提高,进一步理解高原对海气相互作用的调控将有助于季风动力学的完善和气候预测水平的提高。

**致谢:**感谢吴国雄、徐祥德、周秀骥、黄建平、何金海、李建平的支持和建设性的意见。感谢参加研究的团队合作学者和青年学生。也感谢孙燕斌在项目管理工作中的辛勤劳动。

## 参考文献(References)

- Boos W R, Kuang Z M, 2010. Dominant control of the South Asian monsoon by orographic insulation versus plateau heating[J]. *Nature*, 463(7278): 218-222.
- Boos W R, Kuang Z M, 2013. Sensitivity of the South Asian monsoon to elevated and non-elevated heating[J]. *Sci Rep*, 3:1192.
- Chen X L, Liu Y M, Wu G X, 2017. Understanding the surface temperature cold bias in CMIP5 AGCMs over the Tibetan Plateau[J]. *Adv Atmos Sci*, 34(12): 1447-1460.
- 段安民, 吴国雄, 刘屹岷, 2006. 定常条件下感热和地形影响的 Rossby 波[J]. *气象学报*, 64(2): 129-136. Duan A M, Wu G X, Liu Y M, 2006. Steady wave-like solution of the rossby wave with sensible heating and topographic effects[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 64(2): 129-136. (in Chinese).
- Flohn H, 1957. Large-scale aspects of the "summer monsoon" in south and east Asia[J]. *J Meteor Soc Japan*, 35A:180-186.
- He B, Wu G X, Liu Y M, et al., 2015. Astronomical and hydrological perspective of mountain impacts on the Asian summer monsoon[J]. *Sci Rep*, 5:17586.
- He B, Liu Y M, Wu G X, et al., 2019. The role of air-sea interactions in regulating the thermal effect of the Tibetan-Iranian Plateau on the Asian summer monsoon[J]. *Clim Dyn*, 52(7/8): 4227-4245.

- 李国平,赵邦杰,卢敬华,2002.青藏高原总体输送系数的特征[J].气象学报,60(1):60-67. Li G P,Zhao B J,Lu J H,2002.Characteristics of bulk transfer coefficients over the Tibetan Plateau[J].Acta Meteorol Sin,60(1):60-67.(in Chinese).
- 刘超,刘屹岷,刘伯奇,2015.6种地表热通量资料在伊朗—青藏高原地区的对比分析[J].气象科学,35(4):398-404. Liu C,Liu Y M,Liu B Q,2015.Comparison of six sensible heat flux datasets over the Iranian-Tibetan Plateaus[J].J Meteorol Sci,35(4):398-404.(in Chinese).
- Liu P,Zhu Y J,Zhang Q,et al.,2018.Climatology of tracked persistent maxima of 500 hPa geopotential height[J].Clim Dyn,51(1/2):701-717.
- 刘新,吴国雄,刘屹岷,等,2002.青藏高原加热与亚洲环流季节变化和夏季风爆发[J].大气科学,26(6):781-793. Liu X,Wu G X,Liu Y M,et al.,2002.Diabatic heating over the Tibetan Plateau and the seasonal variations of the Asian circulation and summer monsoon onset[J].Chin J Atmos Sci,26(6):781-793.(in Chinese).
- 刘扬,刘屹岷,2016.我国西南地区秋季降水年际变化的空间差异及其成因[J].大气科学,40(6):1215-1226. Liu Y,Liu Y M,2016.Spatial pattern and causes of interannual variability of autumn rainfall in southwest China[J].Chin J Atmos Sci,40(6):1215-1226.(in Chinese).
- 刘扬,刘屹岷,2017.斯堪的纳维亚遥相关对我国西南西部深秋降水的影响[J].气候与环境研究,22(1):80-88. Liu Y,Liu Y M,2017.The impact of the Scandinavian teleconnection pattern on late autumn rainfall in the western region of southwest China[J].Clim Environ Res,22(1):80-88.(in Chinese).
- Liu Y M,Wu G X,Liu H,et al.,2001.Condensation heating of the Asian summer monsoon and the subtropical anticyclone in the Eastern Hemisphere[J].Clim Dyn,17(4):327-338.
- Liu Y M,Hoskins B J,Blackburn M,2007.Impact of Tibetan orography and heating on the summer flow over Asia[J].J Meteor Soc Japan,85B:1-19.
- Liu Y M,Wu G X,Hong J L,et al.,2012.Revisiting Asian monsoon formation and change associated with Tibetan Plateau forcing:II.change[J].Climate Dynamics,39(5):1183-1195.
- Liu Y M,Wang Z Q,Zhuo H F,et al.,2017.Two types of summertime heating over Asian large-scale orography and excitation of potential-vorticity forcing II.sensible heating over Tibetan-Iranian Plateau[J].Science China Earth Sciences,60(4):733-744.
- 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,Lyu J H,et al.,2018.Review of current investigations of cloud,radiation and rainfall over the Tibetan Plateau with the CloudSat/CALIPSO dataset[J].Chin J Atmos Sci,42(4):847-858.(in Chinese).
- Luo Y L,Zhang R H,Qian W M,et al.,2011.Intercomparison of deep convection over the Tibetan Plateau-Asian monsoon region and subtropical North America in boreal summer using CloudSat/CALIPSO data[J].J Climate,24(8):2164-2177.
- Ma T T,Wu G X,Liu Y M,et al.,2019.Impact of surface potential vorticity density forcing over the Tibetan Plateau on the south China extreme precipitation in January 2008.Part 1:data analysis[J].Journal of Meteorological Research,33:400-415.
- 马耀明,姚檀栋,王介民,等,2006.青藏高原复杂地表能量通量研究[J].地球科学进展,21(12):1215-1223. Ma Y M,Yao T D,Wang J M,et al.,2006.The study on the land surface heat fluxes over heterogeneous landscape of the Tibetan Plateau[J].Adv Earth Sci,21(12):1215-1223.(in Chinese).
- Pan W J,Mao J Y,Wu G X,2013.Characteristics and mechanism of the 10—20-day oscillation of spring rainfall over southern China[J].J Climate,26:5072-5087.
- Qiu J,2013.Monsoon melee[J].Science,340:1400-1401.
- Wang X C,2015.Development of a toy column model and its application in testing cumulus convection parameterizations[J].Sci Bull,60(15):1359-1365.
- Wang X C,2017.Effects of cloud condensate vertical alignment on radiative transfer calculations in deep convective regions[J].Atmos Res,186:107-115.
- Wang X C,Liu Y M,Bao Q,et al.,2015.Comparisons of GCM cloud cover parameterizations with cloud-resolving model explicit simulations[J].Sci China Earth Sci,58(4):604-614.
- Wang X C,Liu Y M,Bao Q,2016.Impacts of cloud overlap assumptions on radiative budgets and heating fields in convective regions[J].Atmos Res,167:89-99.
- Wu G X,Liu Y M,He B,et al.,2012a.Thermal controls on the asian summer monsoon [J].Nature Sci Rep,2:404.
- Wu G X,Liu Y M,Dong B W,et al.,2012b.Revisiting Asian monsoon formation and change associated with Tibetan Plateau forcing:I.formation [J].Clim Dyn,39(5):1169-1181.
- Wu G X,He B,Liu Y M,et al.,2015.Location and variation of the summertime upper troposphere temperature maximum over South Asia[J].Clim Dyn,45:2757-2774.
- Wu G X,Zhuo H F,Wang Z Q,et al.,2016.Two types of summertime heating over the Asian large-scale orography and excitation of potential vorticity forcing I.over Tibetan Plateau [J].Science China Earth Sciences,59(10):1996-2008.
- Wu G X,He B,Duan A M,et al.,2017.Formation and variation of the atmospheric heat source over the Tibetan Plateau and its climate effects[J].Adv Atmos Sci,34(10):1169-1184.
- 吴国雄,刘屹岷,何编,等,2018.青藏高原感热气泵影响亚洲夏季风的机制[J].大气科学,42(3):488-504. Wu G X,Liu Y M,He B,et al.,2018.Review of the impact of the Tibetan Plateau sensible heat driven air-pump on the Asian summer monsoon[J].Chin J Atmos Sci,42(3):

- 488-504. (in Chinese).
- 吴胜刚,刘屹岷,邹晓蕾,等,2016.WRF模式对青藏高原南坡夏季降水的模拟分析[J].气象学报,74(5):744-756. Wu S G,Liu Y M,Zou X L, et al.,2016.The simulation analysis of the precipitation over the southern slopes of the Tibetan Plateau based on WRF model[J].Acta Meteorol Sin,74(5):744-756.(in Chinese).
- Xu X D,Lu C G,Shi X H,et al.,2010.Large-scale topography of China;a factor for the seasonal progression of the Meiyu rainband? [J].J Geophys Res,115(D2):D02110.
- Yan Y F,Liu Y M,2019.Vertical structures of convective and stratiform clouds in boreal summer over the Tibetan Plateau and its neighboring regions [J].Adv Atmos Sci,36(10):1089-1102.
- Yan Y F,Liu Y M,Lu J H,2016.Cloud vertical structure,precipitation,and cloud radiative effects over Tibetan Plateau and its neighboring regions[J].J Geophys Res Atmos,121(10):5864-5877.
- Yan Y F,Wang X C,Liu Y M,2018.Cloud vertical structures associated with precipitation magnitudes over the Tibetan Plateau and its neighboring regions[J].Atmos Oceanic Sci Lett,11(1):44-53.
- Yang K,Guo X F,He J,et al.,2011.On the climatology and trend of the atmospheric heat source over the Tibetan Plateau;an experiments-supported revisit[J].J Climate,24(5):1525-1541.
- Yang Y X,Liu Y M,Li M S,et al.,2019.Assessment of reanalysis flux products based on eddy covariance observations over the Tibetan Plateau[J].Theoretical and Applied Climatology,138(1/2):275-292.
- 叶笃正,罗四维,朱抱真,1957.青藏高原及其附近的流场结构和对流层大气的热量平衡[J].气象学报,15(2):108-121. Ye D Z,Luo S W,Zhu B Z,1957.The wind structure and heat balance in the lower troposphere over Tibetan Plateau and its surroundings[J].Acta Meteorologica Sinica,15(2):108-121.(in Chinese).
- 于佳卉,刘屹岷,马婷婷,等,2018.青藏高原地表位涡密度强迫对2008年1月中国南方降水过程的影响II:数值模拟[J].气象学报,76(6):887-903. Yu J H,Liu Y M,Ma T T,et al.,2018.The influence of surface potential vorticity density forcing over the Tibetan Plateau in the 2008 winter storm.Part II: numerical simulation[J].Acta Meteorologica Sinica,76(6):887-903.(in Chinese).
- 于威,刘屹岷,杨修群,等,2018.青藏高原不同海拔地表感热的年际和年代际变化特征及其成因分析[J].高原气象,37(5):1161-1176. Yu W,Liu Y M,Yang X Q,et al.,2018.The interannual and decadal variation characteristics of the surface sensible heating at different elevations over the Qinghai-Tibetan Plateau and attribution analysis[J].Plateau Meteorol,37(5):1161-1176.(in Chinese).
- 张浩鑫,李维京,李伟平,2017.春夏季青藏高原与伊朗高原地表热通量的时空分布特征及相互联系[J].气象学报,75(2):260-274. Zhang H X,Li W J,Li W P,2017.Spatial and temporal distribution characteristics of surface heat fluxes over both Tibetan Plateau and Iranian Plateau in boreal spring and summer and their relationships[J].Acta Meteorologica Sinica,75(2):260-274.(in Chinese).
- Zhang H X,Li W P,Li W J,2019.The influence of late springtime surface sensible heat flux anomalies over the Tibetan and Iranian Plateaus on the location of South Asian High in early summer[J].Adv Atmos Sci,36(1):93-103.
- Zhang K,Fu R,Wang T,et al.,2016a.Impact of geographic variations of the convective and dehydration center on stratospheric water vapor over the Asian monsoon region[J].Atmos Chem Phys,16(12):7825-7835.
- Zhang P F,Liu Y M,He B,2016b.Impact of East Asian summer monsoon heating on the interannual variation of the South Asian High [J].J Climate,29(1):159-173.
- Zhang Q,Wu G X,Qian Y F,2002.The bimodality of the 100 hPa south Asia high and its relationship to the climate anomaly over east Asia in summer [J].J Meteor Soc Japan,80(4):733-744.
- Zhang Y N,Wu G X,Liu Y M,et al.,2014.The effects of asymmetric potential vorticity forcing on the instability of South Asia High and Indian summer monsoon onset[J].Science China Earth Sciences,57(2):337-350.
- Zhu L J,Jin J M,Liu X,et al.,2018.Simulations of the impact of lakes on local and regional climate over the Tibetan Plateau[J].Atmosphere-Ocean,56(4):230-239.
- Zhuo H F,Liu Y M,Jin J M,2016.Improvement of land surface temperature simulation over the Tibetan Plateau and the associated impact on circulation in East Asia[J].Atmos Sci Lett,17(2):162-168.

## Physics of the control of the Tibetan Plateau on regional energetic processes and global climate

LIU Yimin<sup>1,2,3</sup>, LI Weiping<sup>4</sup>, LIU Xin<sup>5</sup>, WANG Xiacong<sup>1</sup>, FU Rong<sup>6</sup>, LIU Ping<sup>7</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Science and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>CAS Center for Excellence in Tibet Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China;

<sup>4</sup>Laboratory for Climate Studies, National Meteorological Centre, Beijing 100081, China;

<sup>5</sup>Key Laboratory of Tibetan Environment Change and Land Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

<sup>6</sup>Jackson School of Geosciences, The University of Texas at Austin, Austin, Texas USA;

<sup>7</sup>Endeavor Hall 199, School of Marine and Atmospheric Sciences, Stony Brook University, Stony Brook, NY 11794-5000, USA

This paper is the outcome of the research on the way Tibetan Plateau (TP) regulates regional energetic processes and global climate, which is a key project sponsored by NSFC. The results can be summarized as follows. The concept of Tibetan-Iranian Plateau coupling system (TIPS) was proposed, which was characterized by a unique vertical motion over the Asian subtropical monsoon region. The TIPS was formed by surface sensible heating of the Iranian Plateau (IP) and TP as well as the interaction between them. Studies revealed the variability surface heat flux in TIPS and a unique cloud-precipitation-radiation structure over TP. The influence of TIPS on Asian summer monsoon, in view of astronomical and hydrological perspectives, was verified. Studies clarified the effect of TIPS on South Asian High, which led to warm upper troposphere and cool lower stratosphere. Their influences on northern hemisphere circulation, Indian Ocean air-sea interaction and the inter-annual variability of South Asian High were also explored. A new mechanism was proposed on how the plateau forced to trigger intense weather events in eastern China. The studies also revealed the physical process of the cold surface temperature bias in CMIP5 models, which was a result of dynamical coupling between atmospheric circulation and snow albedo.

**Tibetan-Iranian Plateaus (TIP), TIP system (TIPS), thermal structure, impact mechanism of the TP, cold bias over the TP in climate model**

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20191229006

(责任编辑:张福颖)