

段安民, 肖志祥, 王子谦. 2018. 青藏高原冬春积雪和地表热源影响亚洲夏季风的研究进展 [J]. 大气科学, 42 (4): 755–766. Duan Anmin, Xiao Zhixiang, Wang Ziqian. 2018. Impacts of the Tibetan Plateau winter/spring snow depth and surface heat source on Asian summer monsoon: A review [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (4): 755–766, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17247.

青藏高原冬春积雪和地表热源影响亚洲 夏季风的研究进展

段安民¹ 肖志祥² 王子谦^{3,4}

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 广西壮族自治区气象台, 南宁 530022

3 中山大学大气科学学院, 广州 510275

4 中山大学广东省气候变化与自然灾害研究重点实验室, 广州 510275

摘 要 青藏高原冬春积雪和地表热源的气候效应是青藏高原气候动力学的两个重要内容。大量资料分析和数值试验研究均表明这两个因子对亚洲季风有一定的预测意义, 本文对此做了比较系统的回顾和总结, 并进一步比较了青藏高原积雪和地表热源影响东亚和南亚夏季降水的异同。结果表明, 东亚夏季降水在年际和年代际尺度上均存在“三极型”和“南北反相”型的空间分布特征, 高原春季地表热源在年代际和年际尺度上主要影响东亚夏季降水“三极型”模态; 在年代际尺度上它是中国东部出现“南涝北旱”格局的重要原因, 而高原冬季积雪的作用相反。另一方面, 高原冬季积雪在年际和年代际尺度上对印度夏季风降水的预测效果均要优于高原地表热源。无论是空间分布还是时间演变特征, 高原冬季积雪与春季地表热源整体上均无统计意义上的显著联系。不断完善高原地面观测网和改进模式在高原地区的模拟性能, 将是进一步深入理解高原积雪和地表热源影响亚洲季风物理过程和机制的关键所在。

关键词 青藏高原 积雪深度 地表热源 亚洲夏季风

文章编号 1006-9895(2018)04-0755-12

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17247

Impacts of the Tibetan Plateau Winter/Spring Snow Depth and Surface Heat Source on Asian Summer Monsoon: A Review

DUAN Anmin¹, XIAO Zhixiang², and WANG Ziqian^{3,4}

1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Guangxi Meteorological Observatory, Nanning 530022

3 School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275

4 Guangdong Province Key Laboratory for Climate Change and Natural Disaster Studies, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275

Abstract The climate effect of the Tibetan Plateau (TP) snow depth and surface heat source are two major topics of the TP climate dynamics. Numerous results from data analysis and numerical modeling have confirmed that both the TP snow depth and surface heat source can be utilized as the precursors of the Asian summer monsoon anomaly. This paper provides an

收稿日期 2017-10-08; 网络预出版日期 2018-01-31

作者简介 段安民, 男, 1973年出生, 研究员, 主要从事青藏高原气候动力学、海—气相互作用与亚洲季风数值模拟的研究。E-mail: amduan@lasg.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目91637312、41725018, 中国财政部和科技部公益性行业(气象)专项GYHY201406001

Funded by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (Grants 91637312, 41725018), the Special Fund for Public Welfare Industry (Meteorology) Administered by the Chinese Ministry of Finance and the Ministry of Science and Technology (Grant GYHY201406001).

overall review on relevant studies, and the differences and similarities between impacts of these two factors on the East Asian and South Asian summer precipitation are further discussed. It is shown that East Asian summer precipitation has two typical spatial patterns on both the interannual and interdecadal timescales, i.e., the triple pattern and the North and South reversed-phase pattern. On the interannual and interdecadal timescales, the triple rainfall pattern is mainly affected by the TP surface heat source, and decadal changes in the South flood-North drought rainfall pattern over eastern China is also largely affected by the surface heat source. However, the impact of the TP snow depth seems to be opposite to that of the surface heat source. Particularly, the TP winter snow depth has a better predictive meaning for the Indian summer monsoon rainfall than the TP surface heat source on both timescales. Statistically, there is no robust relationship between the TP winter snow depth and spring surface heat source on both their spatial distributions and time series. A better ground observation network and improved model performance over the TP are imperative to obtain more insights of the potential physical progresses and mechanisms for the impacts of the TP snow depth and surface heat source on the Asian summer monsoon.

Keywords Tibetan Plateau, Snow depth, Surface heat source, Asian summer monsoon

1 引言

一百多年来,随着观测资料的不断丰富和研究手段的多样化,人们对青藏高原(以下简称高原)的气候效应的认识不断深化。Blanford (1884)首先发现喜马拉雅山冬季雪盖与印度季风降水存在反相关关系,叶笃正等(1957)利用有限的观测资料发现夏季高原地表温度高于地面气温,由此得出高原夏季是热源,而冬季除了西南部是热源外其他地区可能是冷源的结论。后续大量研究陆续揭示了高原积雪和热源对亚洲季风具有预测意义(e.g. Hahn and Manabe, 1975; 张顺利和陶诗言, 2001; Zhao and Chen, 2001; Turner and Slingo, 2011; Duan et al., 2013; Wu et al., 2015)。

高原下垫面复杂、地广人稀、观测站点稀疏,当前观测数据及数值模式的准确性远不能满足研究需要(Qiu, 2014)。近百年来,人类活动及温室气体排放加剧,全球正经历着以变暖为主要特征的气候变化,气候增暖效应在高原地区更为显著(Liu and Chen, 2000; Ma et al., 2017),特别是在1998年以后,相较于全球增暖趋缓的大背景,高原呈现加速增暖的趋势(Duan and Xiao, 2015; You et al., 2016)。然而,气候变暖背景下高原地表热源却在持续减弱,而高原积雪总体上也呈现减少趋势(Duan and Wu, 2008; 除多等, 2015)。高原地面热源和积雪在不同时间尺度上的变化是否存在内在联系?二者影响亚洲夏季风的物理过程有何异同?本文将通过对已有研究的回顾和总结,辅以新的观测资料分析结果,对这些问题尽量予以解答,并对未来研究方向提出自己的观点和建议。

2 高原积雪和地表感热加热的空间分布特征

高原积雪分布的三个中心分别位于喜马拉雅山脉北麓、唐古拉山和念青唐古拉山东段山区、阿尼玛卿山和巴颜喀拉山地区(韦志刚等, 2002),卫星数据显示高原西部和南部边缘的高大山脉及雅鲁藏布河谷西部地区是高原雪盖最为持久的地区(Pu et al., 2007);高原地面全年都是热源,高原东部感热通量最大在5月,西部感热通量最大在6月,12月份高原感热通量最小(叶笃正和高由禧, 1979)。

图1为利用中国气象局在高原73个地面气象观测站获得的积雪深度(图1a-d)和基于观测资料利用总体动力学公式计算得到的高原地表感热通量(图1e-h; Duan and Wu, 2008)四个季节的空间分布特征。从图中可见,高原积雪冬季最厚,覆盖面积最大,而夏季积雪最少,春季积雪覆盖面积仅次于冬季。就气候平均而言,气象台站观测到的高原积雪最大深度仅2 cm左右,高原中东部大部分地区积雪深度在0.5 cm以下,这主要与常规气象观测站多位于低海拔、河谷及山谷地区有关。因此,气象台站的积雪观测资料难以全面反映高原积雪的时空变化特征。另一方面,高原地表感热加热在春季最强,感热最大区域位于高原中西部及藏东南地区(60 W m^{-2} 以上),冬季感热最小,大部分地区小于 40 W m^{-2} 。

比较高原积雪深度及地表感热加热的空间分布特征,发现积雪与感热并不存在反相变化的特征。例如,高原积雪冬季最厚,主要位于喜马拉雅山脉、唐古拉山和巴颜喀拉山等山脉(图1e),而冬季平均的地表感热通量在这些山地区也为正值(图1h)。此外,高原夏季积雪最薄,面积最

小(图 1b), 而感热通量在夏季仅次于春季, 二者并无简单的线性定义关系。这一方面是因为高原积雪空间布局地特征明显, 而感热主要受地面风速和地气温差影响, 空间分布相对均匀; 另一方面高原大部分地区积雪较薄, 受日照影响持续时间较短, 季节平均的结果掩盖了积雪与感热的反相联系。

3 高原冬春积雪的研究进展

积雪观测数据从早期气象台站观测发展到卫星反演获取, 使得高原积雪分布和变化的准确率得到明显提升。Pu et al. (2007) 指出 MODIS 卫星反演的积雪在高原地区的准确率可达到 90%。卫星资料使得高原积雪监测由点拓展到面, 对于揭示高原

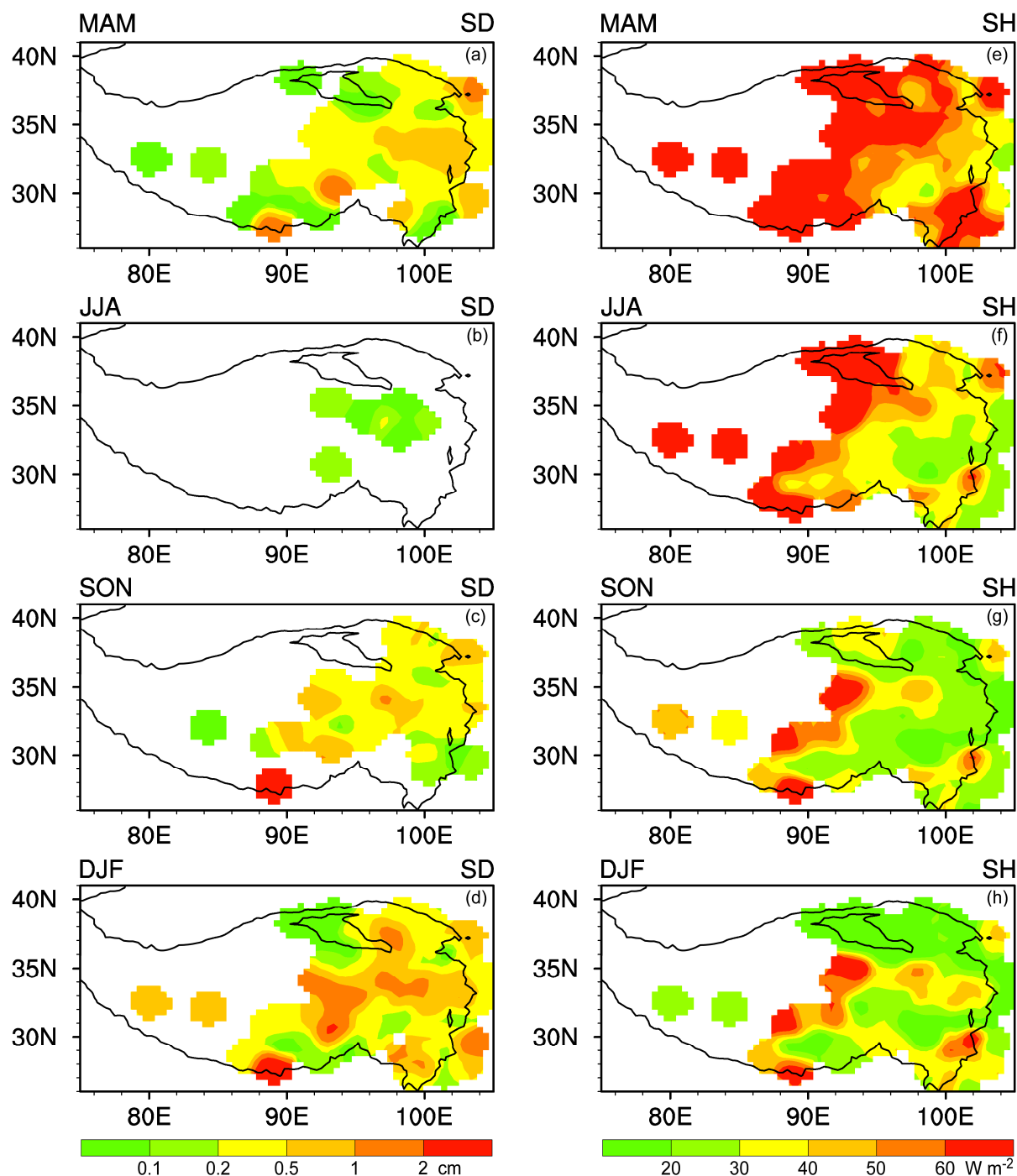


图1 高原(a-d)积雪深度(单位: cm)和(e-h)地表感热通量(单位: W m^{-2})气候态(1981~2010年)空间分布特征

Fig. 1 Climatological (1981–2010) distributions of the Tibetan Plateau (TP) (a–d) winter snow depth (units: cm) and (e–h) surface sensible heat fluxes (units: W m^{-2})

积雪的时空变化特征具有重要意义。

3.1 高原冬春积雪的时空变化特征

高原平均海拔超过 4000 米,东西横跨 31 个经度,南北纵贯 13 个纬度,面积超过 250 万平方公里,受地形、下垫面气候特征的影响,高原积雪空间分布极不均匀,高原四周积雪深度大于腹地,高原东部是积雪年际变化最显著区域(柯长青和李培基, 1998; 覃郑婕等, 2017)。海拔 6000 米以上是积雪最集中的地区,且积雪的持续时间随海拔高度增加而延长(Pu et al., 2007)。Wu and Qian (2003) 指出高原中东部 11 月到次年 3 月积雪具有少雪、多雪及西南部多雪三种典型空间分布特征,卫星反演资料还表明高原冬季存在东西反位相变化的特征(Yasunari et al., 2000; 覃郑婕等, 2017)。

在全球变暖背景下,高原大部分冰川长度减小、面积萎缩(Yao et al., 2012),同时积雪出现显著减少的趋势。除多等(2015)指出近 30 年来高原冬季积雪减幅最明显,且高寒内陆中东部和喜马拉雅山脉南麓等高频积雪区积雪减少更为显著。值得注意的是,高原高海拔地区积雪减少速率要大于低海拔地区(Huang et al., 2017),这可能与高海拔地区增暖幅度更大(Rangwala et al., 2013)有关。高原积雪除了整体变化趋势外,研究还表明气溶胶使积雪的微观特性也发生了极大的变化。例如, Ming et al. (2009) 研究发现附着在积雪表面的黑炭使得积雪反照率降低,导致积雪吸收的太阳辐射增加,从而加速积雪融化。沙漠粉尘、黑炭等吸收性气溶胶通过抬升加热气泵作用也导致了高原积雪的加速融化(Lau et al., 2010)。

3.2 高原冬春积雪预测亚洲季风的机理研究

随着观测资料及研究手段的日益丰富,高原积雪与亚洲季风关系的研究从简单的统计关系逐渐发展到内在机理的研究,并相继提出了积雪通过反照率效应(Hahn and Shukla, 1976)和水文效应(Yeh et al., 1983)改变地表辐射、土壤湿度、温度等途径影响周边气候的机制。

通常情况下,积雪的反照率效应与水文效应同时对大气产生影响,但是在不同阶段占据主导地位的因子有所不同。Yasunari et al. (1991) 指出春季高原积雪以反照率效应为主,而水文效应在夏季为主,而 Souma and Wang (2010) 则认为 5~6 月高原积雪的反照率效应是水文效应的三倍,在 7~8 月积雪水文效应增强而反照率效应减弱,最终反照

率效应和水文效应的差异趋于不明显。总体而言,高原春季积雪反照率效应对东亚夏季降水异常起主导作用。Barnett et al. (1989) 认为只考虑积雪反照率效应不足以对亚洲季风的发展产生持续影响,积雪水文效应应该起到了至关重要的作用。后续研究通过大气环流模式的模拟结果证实积雪的反照率效应与水文效应并非是简单的线性叠加作用(许立言和武炳义, 2012)。

积雪—季风关系的讨论始于喜马拉雅山积雪与印度季风(Blanford, 1884), Vernekar et al. (1995) 数值模拟结果表明高原积雪偏多,使得能量被用于融化积雪导致高原地表温度降低,从而地表向上的感热通量减小,高原对流层温度降低,与印度半岛温度梯度减小从而减弱了印度夏季风环流。Turner and Slingo (2011) 使用 HadCM3 全球模式开展的理想试验也得到了类似的结论。

基于高原中东部台站观测积雪数据,大量研究表明高原冬季积雪与东亚夏季风存在显著的负相关关系,冬季积雪偏多对长江中下游夏季降水有正贡献,而对华南与华北夏季降水有负贡献(e.g. 陈乾金等, 2000; 张顺利和陶诗言, 2001; Wu and Qian, 2003; Xu et al., 2012)。高原冬季积雪偏多会使得高原地表加热减弱,减小海陆热力梯度对比,使得亚洲夏季风减弱,从而导致我国长江流域夏季降水偏多(张顺利和陶诗言, 2001),而南亚和东南亚地区夏季降水偏少(Wu and Qian, 2003),这是目前被广泛接受的高原冬季积雪影响亚洲夏季风的理论解释之一。另一种理论则强调积雪水文效应的作用,认为积雪融水保存在土壤中,从而使得积雪的气候效应得到延长(Qian et al., 2003),即土壤湿度在积雪—季风关系中起到桥梁纽带的作用(Zhao et al., 2007)。积雪通过陆气耦合过程,可改变高原地表与大气的热通量、水汽交换,降低高原地表温度,从而造成了积雪与季风这种“隔季相关”(郭其蕴和王继琴, 1986)的关系。

卫星观测积雪数据及数值模式的结合,进一步推动了高原积雪与东亚夏季降水关系的研究。Liu et al. (2014) 使用卫星反演积雪数据指出高原夏季同期雪盖减弱了地表加热,高原垂直运动受抑制,有利于径向垂直环流在印度洋的上升运动,印度洋上升运动通过热带纬向环流在西北太平洋暖池激发东亚—太平洋波列从而增强梅雨区夏季降水。Xiao and Duan (2016) 资料分析与数值模拟都表明高原

西部和喜马拉雅山脉 5 月积雪可以持续到夏季, 并通过向下游输送水汽, 天气尺度扰动及减弱南亚高压等途径使得下游地区夏季降水增多。高原冬春积雪引起的非绝热加热异常还可导致 200 hPa 西风急流和 500 hPa 南支气流异常, 从而导致长江流域夏季降水偏多, 华南降水偏少。此外, 高原北部的积雪偏多还有利于水汽往北输送, 东亚季风雨带偏北 (Wang et al., 2017)。

综上所述, 无论是从积雪反照率效应还是从积雪水文效应的角度出发, 高原积雪与亚洲季风关系的机理解释都离不开高原地表热源的作用, 可见高原地表热状况对亚洲季风的影响不可忽略, 且更具直接性。

4 高原地表热源的研究进展

4.1 高原地表感热的计算

叶笃正和高由禧 (1979) 指出高原地面热源由地面湍流感热、地面蒸发潜热及地面有效辐射三部分组成, 除冬季高原地面有效辐射最大外, 其他月份及年平均地面湍流感热均最大, 可见高原地表感热在高原地面热源中占据主导地位。高原地表感热通量缺乏直接观测, 通常通过如下的总体动力学公式计算:

$$SH = c_p \rho C_d V (T_s - T_a), \quad (1)$$

其中, c_p 为干空气的定压比热容, ρ 为近地面大气密度, V 为 10 m 风速, T_s 和 T_a 分别为地面和 2 m 空气温度。

不同作者对公式 (1) 中热力学拖曳系数 C_d 的选取不同, 是导致高原地表感热计算结果差异较大的主要原因。当前主要通过两种方法确定拖曳系数 C_d , 第一种是考虑大气稳定性和地表热力粗糙度的影响, 包含日变化的信息 (阳坤等, 2010); 另外一种方法则是基于经验研究, 例如设定 C_d 为常数, 叶笃正和高由禧 (1979) 综合各家研究成果 C_d 取平均值 8×10^{-3} , Duan and Wu (2008) 在高原中东部取 4×10^{-3} , 而在高原西部取 4.75×10^{-3} ; C_d 的大小与稳定性和粗糙度有关, 粗糙度越大风速越小, 因此可

根据 C_d 与风速的反相关关系设定 $C_d = 0.00112 + \frac{0.01}{|V|}$ (李栋梁等, 2003)。

4.2 高原地表热源对亚洲季风预测作用

半个多世纪以来, 高原热力学效应对天气气候的影响一直是高原气象学的重要研究内容。近年来的“季风之争” (Qiu, 2013) 使得高原热力学效应对亚洲季风影响的讨论越发热烈。

4.2.1 对亚洲夏季风形成、爆发及推进的作用

理想实验和数值模拟使得大气科学从定性的描述上升到可做定量计算的一门科学, 叶笃正和张捷迁 (1974) 通过转盘实验发现高原的加热作用使得对流层中下层强烈辐合, 而对流层中高层辐散明显, 高原加热作用对西南季风和季风经圈环流的形成有密切的内在联系。吴国雄等 (1997) 提出了高原“感热气泵 (SHAP)”理论, 并证实高原表面感热加热显著调控着南亚、孟加拉湾、南海和西北太平洋季风的环流。全球模式敏感性数值试验则进一步证明高原和伊朗高原“感热气泵”在亚洲夏季风的形成中扮演着至关重要的作用, 南亚夏季风南支分量主要受到海陆热力差异的影响, 而北支分量的形成受到高原和伊朗高原的“感热气泵”的驱动作用, 而东亚夏季风的形成主要受海陆热力差异及高原热力作用的共同影响 (Wu et al., 2012)。高原与欧亚大陆尺度加热形成的环流在东亚和中亚同相叠加, 大大加强了东亚夏季风和中亚的干旱气候 (Duan and Wu, 2005; Wu et al., 2007)。

Flohn (1957) 发现高原地表加热导致 30°N 以南地区经向温度梯度反相, 从而激发了亚洲夏季风爆发。Wu and Zhang (1998) 进一步研究表明亚洲夏季风爆发主要经历三阶段, 五月初首先在孟加拉湾东部爆发, 随后东亚夏季风在中国南海爆发, 最后是南亚夏季风在印度爆发。高原春季地表感热加热在高原上空形成强大的暖心结构直接导致热带地区上空温度梯度转向, 对亚洲夏季风在不同地区爆发的时间不同起决定性作用 (张永生和吴国雄, 1999)。

4.2.2 高原地表感热加热年际、年代际变化对亚洲夏季降水的影响

高原地表感热加热是全球地面热源的重要组成部分, 具有显著的年际和年代际变化特征 (张艳和钱永甫, 2004), 并与亚洲夏季降水空间分布特征及变化密切联系。

大量研究表明高原地面热力状况是造成江淮流域夏季降水异常的重要原因, 对中国东部降水异常具有一定指示意义 (章基嘉等, 1995; Zhao and Chen, 2001; 段安民等, 2003)。高原春季感热异常可以持续到夏季, 激发的大尺度环流响应有利于冷暖气流在江淮流域汇合, 暖平流向下游地区的异常输送和天气尺度涡旋配合, 有利于江淮流域夏季降水增多 (Wang et al., 2014)。高原春季感热减弱, 将使得东亚夏季风主雨带偏南, 从而减少中国北方

夏季降水, 因此高原春季感热异常亦可作为预测中国北方地区夏季降水的关键因子 (Li and Liu, 2014)。反之当高原春季感热异常偏强, 将有利于副热带高压偏强和南亚高压偏强, 华南地区盛夏少雨 (戴逸飞等, 2017)。此外, 高原地面感热加热异常还与川渝地区 (梁玲等, 2013)、新疆北部 (赵勇等, 2013)、黄土高原 (叶燕华等, 2005)、南亚 (梁潇云等, 2005) 等地区降水紧密相连。

高原春季感热各关联预报因子对中国东部绝大部分地区各月年代际降水的方差贡献均超过 75%, 能够较好预测中国东部夏季降水的年代际变化 (刘森峰和段安民, 2017)。高原春季感热年代际减弱导致“感热气泵效应”受到抑制, 进而造成高原南坡和东坡夏季降水减少, 而印度东北部和孟加拉湾降水增多 (Duan et al., 2011)。此外, Duan et al. (2013) 还指出高原春季感热年代际减弱的趋势对中国东部夏季降水的影响要大于高原积雪的作用, 春季感热减弱有

利于华南夏季降水增多而华北和东北地区夏季降水减少。数值模拟结果证明高原感热减弱使得高原近地面气旋式环流和西太平洋副热带高压减弱, 从而导致东亚地区夏季偏南气流减弱, 水汽辐合位于华南地区, 在中国东部形成了“南涝北旱”的夏季降水空间分布特征 (Liu et al., 2012)。近 10 年来, 由于高原春季热源有回升的趋势, 中国东部夏季“南涝北旱”的降水格局开始转变 (徐祥德等, 2015)。

5 高原积雪与地表热源影响亚洲夏季降水的几个关键问题

前文回顾表明高原积雪与地表热源都与亚洲季风的变异及时空分布特征密切相关, 但是仍有如下问题急需在未来的研究工作中予以回答。

首先, 高原冬季积雪与春季感热对东亚夏季雨型的影响有何异同? 图 2 表明东亚夏季降水 (GPCC, Schneider et al., 2008) 第一主模态呈现典

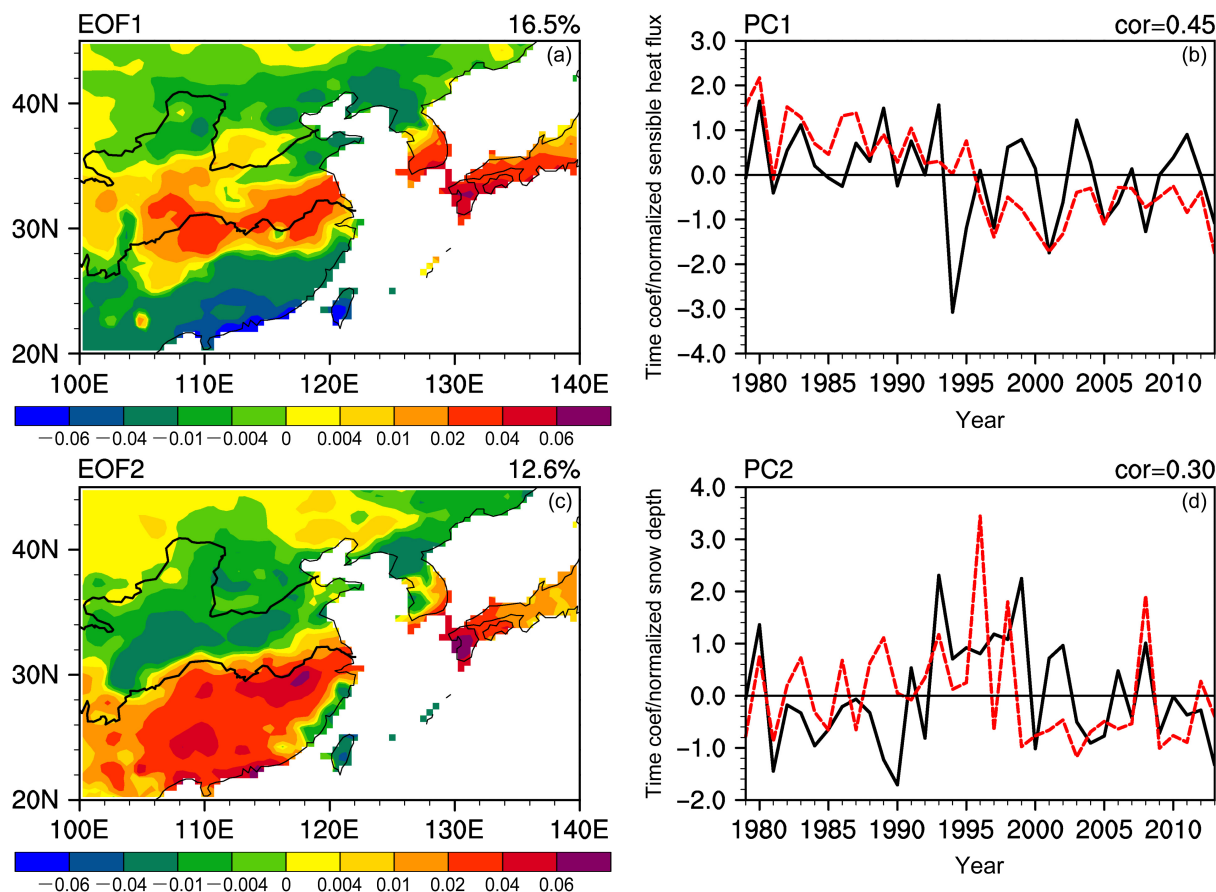


图 2 东亚夏季降水 EOF 分解前两个主模态 (a、c) 空间分布特征及 (b、d) 相应时间系数 (黑色实线)。(b、d) 中红色虚线分别表示高原中东部春季感热及冬季积雪深度标准化时间序列

Fig. 2 (a) EOF1 (the first EOF mode) and (c) EOF2 (the second EOF mode) of East Asian summer precipitation for 1979–2013 and (b, d) the corresponding time coefficients (PC1 and PC2, black lines). The red lines in (b) and (d) are normalized time series of spring sensible heat fluxes and winter snow depth in the central and eastern TP, respectively

型的“三极型”空间分布特征(中国东部 I 类雨型), 其近几十年呈年代际减弱趋势, 它与高原中东部春季地表感热加热的相关系数为 0.45 (通过 99% 显著性检验), 说明东亚夏季降水第一主模态与高原春季地表感热加热联系较好, 高原感热年代际减弱趋势有利于华南和华北夏季降水增多, 而长江流域—日本一带夏季降水减少 (Duan et al., 2013)。而东亚夏季降水第二主模态呈现“南北反相”(中国东部 III 类雨型)的年代际变化特征, 其时间系数与高原中东部冬季积雪深度的相关系数为 0.30 (通过 90% 显著性检验), 而与春季积雪相关系数不显著, 这表明高原冬季积雪年代际变化对东亚夏季降水“南涝北旱”的降水格局亦有一定贡献。

进一步对东亚夏季降水前两个模态时间系数进行功率谱分析, 可见第一模态表现为显著的准 5 年周期, 而第二模态是准 10 年周期和准 2 年周期叠加的结果 (图略), 说明东亚夏季降水具有显著的年际变化信号。

为了突出东亚夏季降水的年际变率, 使用傅立

叶滤波器滤除东亚夏季降水 9 年以上的信号, EOF 前两个主模态 (图 3) 表明在年际尺度上, 东亚夏季降水仍然存在“三极型”(图 3a) 和“南北反相”型 (图 3c) 的空间分布特征, 与年代际尺度的空间变化非常相似。东亚夏季降水年际变率第一主模态的时间系数与高原中东部春季感热的相关系数为 0.51 (通过 99% 显著性检验), 而东亚夏季“南北反相”型降水在年际尺度上与高原春季感热及冬季积雪的相关系数均没有通过显著性检验。这表明东亚夏季降水“三极型”空间特征在年际和年代际尺度上均与高原春季感热存在较强联系, 年际和年代际尺度同位相叠加大大加强了高原春季感热对东亚“三极型”夏季降水的作用; 而高原冬季积雪仅在年代际尺度上对东亚夏季降水“南涝北旱”的降水格局有负贡献。

其次, 高原积雪与感热对印度季风降水 (这里用 6~9 月全印度降水指数表示, Parthasarathy et al., 1994) 是否具有预测意义? 图 4 为傅立叶滤波器提取的高原冬季积雪、春季感热及印度夏季风降水的

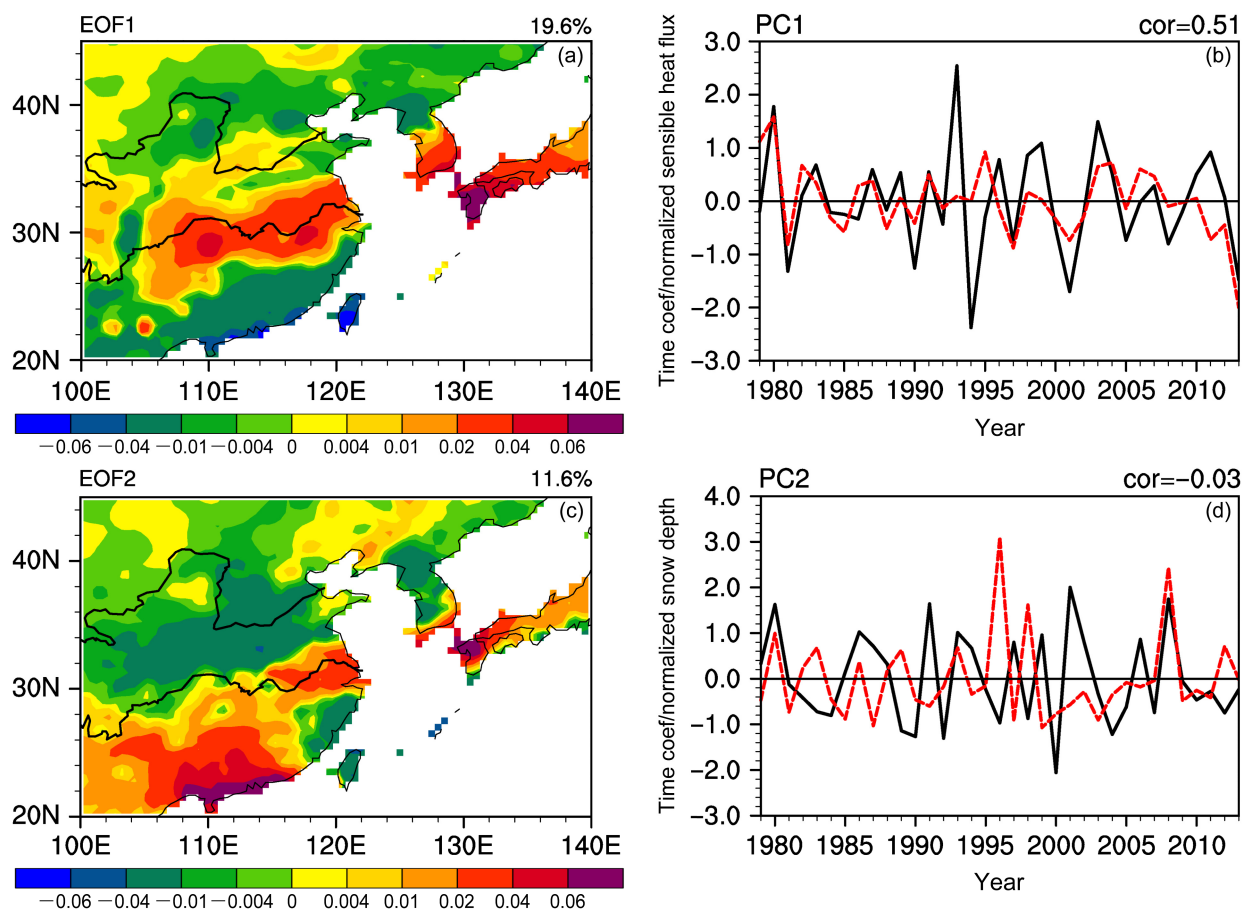


图 3 同图 2, 但滤除了 9 年以上的信号

Fig. 3 Same as Fig. 2, but signals above 9 years are removed

年代际 (图 4a) 和年际 (图 4b) 时间序列。在年代际尺度上, 高原冬季积雪与印度夏季风降水的相关系数为 0.30 (通过 90% 显著性检验), 而高原春季感热与印度夏季风降水相关系数不显著, 说明在年代际尺度上, 高原冬季积雪对印度夏季风降水的预测意义要好于春季感热, 积雪偏多有利于印度夏季风降水总体增加。而在年际尺度上, 高原冬季积雪与印度夏季风降水的相关系数为 -0.34 (通过 95% 显著性检验), 与春季感热的相关系数仅为 0.14, 表明在年际尺度上高原冬季积雪相较于春季感热对印度夏季风降水具有较好的预测意义。

最后, 前人研究表明高原冬季积雪与春季感热在年际、年代际尺度上都和亚洲夏季风有着不同程度的联系, 而涉及高原积雪与地表感热内在联系的研究较少。这里我们使用傅立叶滤波器, 分别提取标准化后的高原冬季积雪深度和春季地表感热的年代际 (9 年以上) 和年际 (9 年以下) 信号 (图 5)。

从图中可以看到高原冬季积雪与春季感热在年代际尺度上呈减弱的趋势 (图 5a), 而高原冬季积雪的年际变化振幅要强于春季感热 (图 5b)。值得注意的是, 高原冬季积雪与春季感热在年代际尺度和年际尺度的相关系数分别为 0.23 和 0.11, 表明二者在整体上的联系并不强。

仅通过统计分析不能完全揭示高原积雪与地面感热加热的联系, 这主要与当前我们所获取的高原积雪和感热观测资料代表性不够 (积雪大值区多位于高山, 站点观测多位于平地、谷地)、以及积雪与感热空间差异性的抵消作用等因素有关。值得庆幸的是, 数值模式的发展使得大气科学得到飞速发展, 在数值试验中往往能够识别出高原积雪与地表感热存在强烈的反相联系 (Turner and Slingo, 2011; 肖志祥, 2016; 杨凯等, 2017)。基于观测的统计分析结果和数值模拟试验存在的差异性一方面可能是由于数值模式刻画高原复杂下垫面不

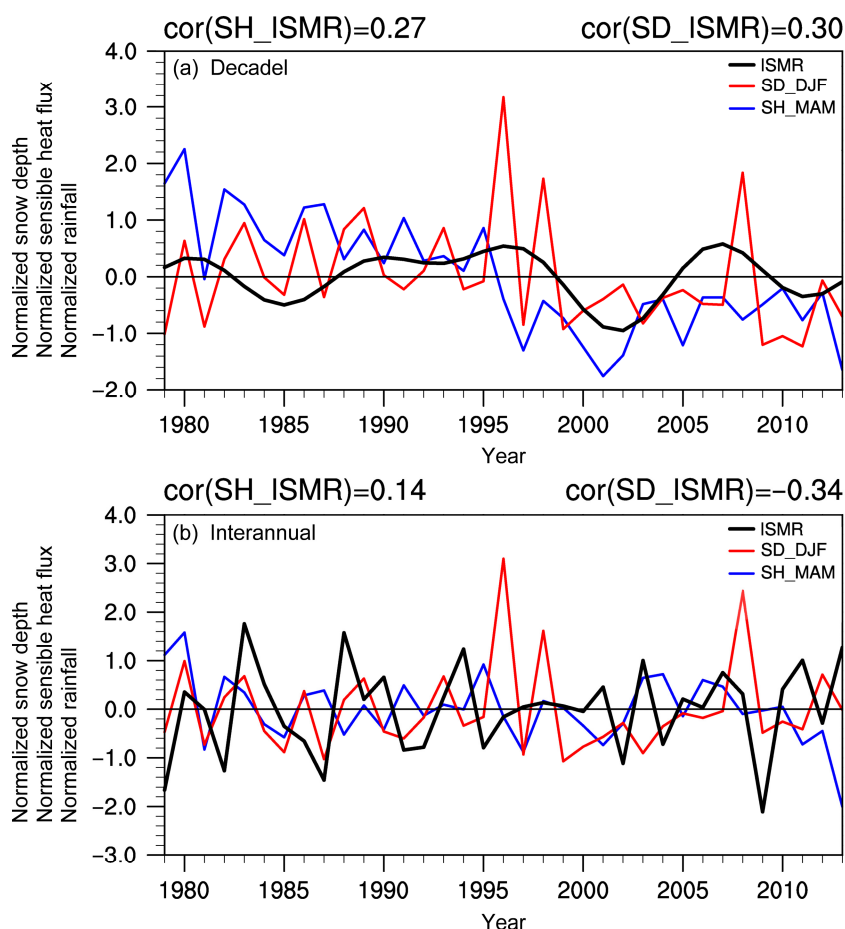


图 4 高原冬季积雪深度 (红色)、春季感热 (蓝色)、印度夏季风降水 (黑色) (a) 年代际和 (b) 年际标准化时间序列

Fig. 4 Normalized time series of winter snow depth (red) and surface sensible heat fluxes (blue) over the TP and Indian summer monsoon rainfall (black) on (a) interdecadal and (b) interannual timescales

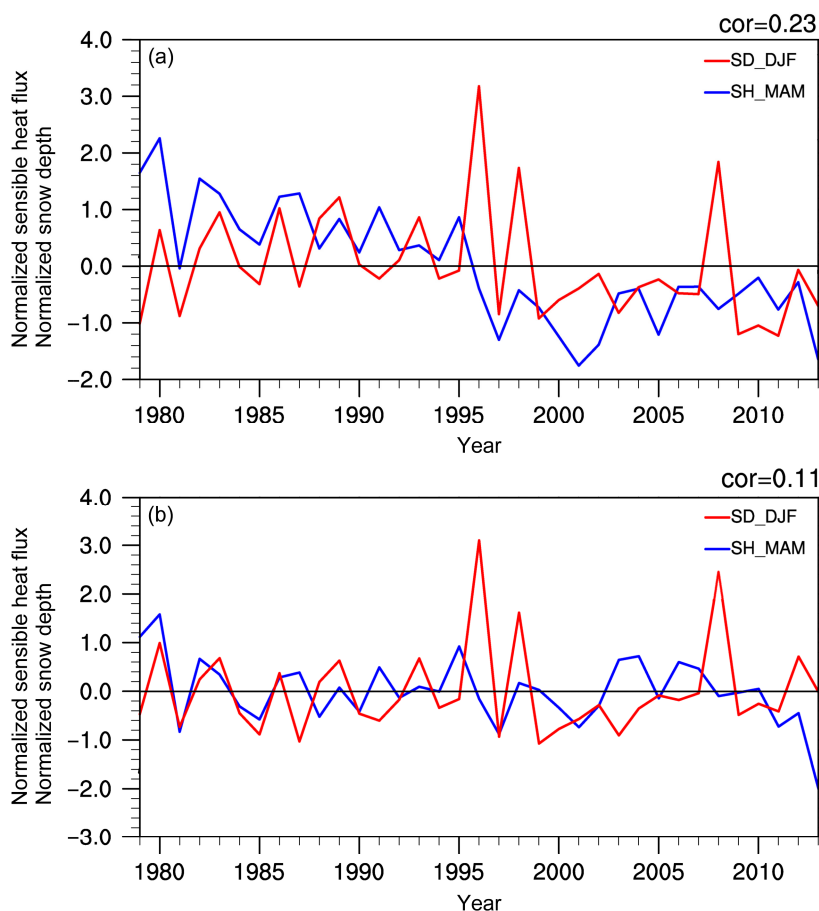


图5 高原中东部春季感热（蓝色实线）与冬季积雪深度（红色实线）（a）年代际和（b）年际标准化时间序列

Fig. 5 Normalized time series of the TP surface sensible heat fluxes (blue) and winter snow depth (red) on (a) interdecadal and (b) interannual timescales

够完善所致，另一方面也可能是在真实大气环境中高原积雪与感热的关系更容易受到大气环流的影响，而数值模式更容易保留人为给定的“不够真实”的外强迫信号。

6 总结和展望

一百多年来，高原积雪和地面热源气候效应的研究取得了很大进展。随着观测资料的丰富及数值模式的发展，关于高原积雪与热源这两个因子对亚洲季风预测作用的研究逐步深入，高原积雪和地面热源与亚洲季风相联系的物理机制得到了部分解答。本文系统回顾了前人取得的研究成果，并提出了未来亟待解决的几个方面的问题。

首先，由于高原独特的地理特性，积雪和感热的直接观测资料相对缺乏，且存在准确性、覆盖率低等特点，难以准确描述高原积雪和感热的时空变化特性，高原气象观测数据问题是阻碍高原气象学取得突破进展的瓶颈所在。正在进行的第二次高原

综合科学考察和第三次高原大气科学试验有望为我们进一步深入认识高原天气气候效应提供新的观测事实。

其次，数值模式对高原气象学的发展起到了巨大的推动作用，但当今数值模式在高原地区仍存在较大偏差，尤其是模式对高原复杂下垫面的描述能力明显不足。数值模式的不确定性包括模式动力和物理过程的不确定性和初值的不确定性。因此，更多的观测资料将有助于减小模式的初值不确定性，完善当前数值模式的动力和物理过程可望有效减小模式在高原地区的模拟偏差。

最后，前人研究成果表明高原积雪和感热都对东亚夏季降水有重要影响，但对各自影响的东亚夏季降水主模态认识不足。本文进一步指出高原春季感热在年际和年代际尺度上与东亚夏季降水“三极型”的空间分布特征有重要联系，而高原冬季积雪主要是在年代际尺度上与东亚夏季“南北反相型”降水存在联系。对南亚季风降水而言，高原积雪在

年际和年代际尺度上的预测意义均好于高原春季地表感热。在今后的研究工作中应进一步加强对高原积雪和地面感热影响亚洲夏季降水的具体物理过程和动力学机制研究。

参考文献 (References)

- Barnett T P, Dümenil L, Schlese U, et al. 1989. The effect of Eurasian snow cover on regional and global climate variations [J]. *J. Atmos. Sci.*, 46 (5): 661–686, doi:10.1175/1520-0469(1989)046<0661:TEOESC>2.0.CO;2.
- Blanford H F. 1884. On the connexion of the Himalaya snowfall with dry winds and seasons of drought in India [J]. *Proc. Roy. Soc. London*, 37 (232–234): 3–22, doi:10.1098/rspl.1884.0003.
- 陈乾金, 高波, 李维京, 等. 2000. 青藏高原冬季积雪异常和长江中下游主汛期旱涝及其与环流关系的研究 [J]. *气象学报*, 58 (5): 582–595.
- Chen Qianjin, Gao Bo, Li Weijing, et al. 2000. Studies on relationships among snow cover winter over the Tibetan Plateau and droughts/floods during Meiyu season in the middle and lower reaches of the Yangtze River as well as atmosphere/ocean [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 58 (5): 582–595, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2000.05.007.
- 除多, 杨勇, 罗布坚参, 等. 2015. 1981–2010 年青藏高原积雪日数时空变化特征分析 [J]. *冰川冻土*, 37 (6): 1461–1472.
- Chu Duo, Yang Yong, Luobu Jiancan, et al. 2015. The variations of snow cover days over the Tibetan Plateau during 1981–2010 [J]. *J. Glaciol. Geocryol.* (in Chinese), 37 (6): 1461–1472, doi:10.7522/j.issn.1000-0240.2015.0162.
- 戴逸飞, 李栋梁, 王慧. 2017. 青藏高原感热指数的建立及与华南降水的联系 [J]. *应用气象学报*, 28 (2): 157–167.
- Dai Yifei, Li Dongliang, Wang Hui. 2017. A new index for surface sensible heat flux over the Tibetan Plateau and its possible impacts on the rainfall in South China [J]. *J. Appl. Meteor. Sci.* (in Chinese), 28 (2): 157–167, doi:10.11898/1001-7313.20170203.
- 段安民, 刘屹岷, 吴国雄. 2003. 4~6 月青藏高原热状况与盛夏东亚降水和大气环流的异常 [J]. *中国科学(D 辑)*, 33 (10): 997–1004.
- Duan Anmin, Liu Yimin, Wu Guoxiong. 2005. Heating status of the Tibetan Plateau from April to June and rainfall and atmospheric circulation anomaly over East Asia in midsummer [J]. *Sci. China Ser. D Earth Sci.*, 48 (2): 250–257, doi:10.3969/j.issn.1674-7240.2003.10.011.
- Duan A M, Wu G X. 2005. Role of the Tibetan Plateau thermal forcing in the summer climate patterns over subtropical Asia [J]. *Climate Dyn.*, 24 (7–8): 793–807, doi:10.1007/s00382-004-0488-8.
- Duan A M, Wu G X. 2008. Weakening trend in the atmospheric heat source over the Tibetan Plateau during recent decades. Part I: Observations [J]. *J. Climate*, 21 (13): 3149–3164, doi:10.1175/2007jcli1912.1.
- Duan A M, Xiao Z X. 2015. Does the climate warming hiatus exist over the Tibetan Plateau? [J]. *Sci. Rep.*, 5: 13711, doi:10.1038/srep13711.
- Duan A M, Li F, Wang M R, et al. 2011. Persistent weakening trend in the spring sensible heat source over the Tibetan Plateau and its impact on the Asian summer monsoon [J]. *J. Climate*, 24 (21): 5671–5682, doi:10.1175/Jcli-D-11-00052.1.
- Duan A M, Wang M R, Lei Y H, et al. 2013. Trends in summer rainfall over China associated with the Tibetan Plateau sensible heat source during 1980–2008 [J]. *J. Climate*, 26 (1): 261–275, doi:10.1175/Jcli-D-11-00669.1.
- Flohn H. 1957. Large-scale aspects of the “summer monsoon” in South and East Asia [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 35A: 180–186, doi:10.2151/jmsj1923.35A.0_180.
- 郭其蕴, 王继琴. 1986. 青藏高原的积雪及其对东亚季风的影响 [J]. *高原气象*, 5 (2): 116–124.
- Guo Qiyun, Wang Jiqin. 1986. The snow cover on Tibet Plateau and its effect on the monsoon over East Asia [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 5 (2): 116–124.
- Hahn D G, Manabe S. 1975. The role of mountains in the South Asian monsoon circulation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 32 (8): 1515–1541, doi:10.1175/1520-0469(1975)032<1515:TROMIT>2.0.CO;2.
- Hahn D G, Shukla J. 1976. An apparent relationship between Eurasian snow cover and Indian monsoon rainfall [J]. *J. Atmos. Sci.*, 33 (12): 2461–2462, doi:10.1175/1520-0469(1976)033<2461:AARBES>2.0.CO;2.
- Huang X D, Deng J, Wang W, et al. 2017. Impact of climate and elevation on snow cover using integrated remote sensing snow products in Tibetan Plateau [J]. *Remote Sens. Environ.*, 190: 274–288, doi:10.1016/j.rse.2016.12.028.
- 柯长青, 李培基. 1998. 用 EOF 方法研究青藏高原积雪深度分布与变化 [J]. *冰川冻土*, 20 (1): 64–67.
- Ke Changqing, Li Peiji. 1998. Research on the characteristics of distribution and variation of snow cover on the Tibetan Plateau by using EOF analysis [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 20 (1): 64–67.
- Lau W K M, Kim M K, Kim K M, et al. 2010. Enhanced surface warming and accelerated snow melt in the Himalayas and Tibetan Plateau induced by absorbing aerosols [J]. *Environ. Res. Lett.*, 5 (2): 025204, doi:10.1088/1748-9326/5/2/025204.
- 李栋梁, 李维京, 魏丽, 等. 2003. 青藏高原地面感热及其异常的诊断分析 [J]. *气候与环境研究*, 8 (1): 71–83.
- Li Dongliang, Li Weijing, Wei Li, et al. 2003. A diagnostic study of surface sensible heat flux anomaly over the Qinghai–Xizang Plateau [J]. *Climatic Environ. Res.* (in Chinese), 8 (1): 71–83, doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2003.01.009.
- Li X Z, Liu X D. 2014. Numerical simulation of the impact of spring sensible heat anomalies over Tibetan Plateau on rainy season precipitation in North China [J]. *J. Earth Environ.*, 5 (3): 207–215, doi:10.7515/JEE201403004.
- 梁玲, 李跃清, 胡豪然, 等. 2013. 青藏高原夏季感热异常与川渝地区降水关系的数值模拟 [J]. *高原气象*, 32 (6): 1538–1545.
- Liang Ling, Li Yueqing, Hu Haoran, et al. 2013. Numerical study of influence of sensible heat anomalies in summer over Qinghai–Xizang Plateau on rainfall in Sichuan–Chongqing regions [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 32 (6): 1538–1545, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00028.
- 梁潇云, 刘屹岷, 吴国雄. 2005. 青藏高原隆升对春、夏季亚洲大气环流的影响 [J]. *高原气象*, 24 (6): 837–845.
- Liang Xiaoyun, Liu Yimin, Wu Guoxiong. 2005. The Impact of Qinghai–Xizang Plateau uplift on Asian general circulation in spring and summer [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 24 (6): 837–845, doi:10.3321/j.issn.1000-0534.2005.06.001.
- Liu G, Wu R G, Zhang Y Z, et al. 2014. The summer snow cover anomaly over the Tibetan Plateau and its association with simultaneous precipitation over the Mei-yu-Baiu region [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 31(4): 755–764, doi:10.1007/s00376-013-3183-z.
- 刘森峰, 段安民. 2017. 基于青藏高原春季感热异常信号的中国东部夏

- 季降水统计预测模型 [J]. 气象学报, 75 (6): 903–916. Liu Senfeng, Duan Anmin. 2017. A statistical forecast model for summer precipitation in eastern China based on spring sensible heat anomaly in the Tibetan Plateau [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 75 (6): 903–916, doi:10.11676/qxxb2017.066.
- Liu X D, Chen B D. 2000. Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades [J]. Int. J. Climatol., 20 (14): 1729–1742, doi:10.1002/1097-0088(20001130)20:14<1729::AID-JOC556>3.0.CO;2-Y.
- 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 Dyn., 39 (5): 1183–1195, doi:10.1007/s00382-012-1335-y.
- Ma J R, Guan X D, Guo R X, et al. 2017. Mechanism of non-appearance of hiatus in Tibetan Plateau [J]. Sci. Rep., 7 (1): 4421, doi:10.1038/s41598-017-04615-7.
- Ming J, Xiao C D, Cachier H, et al. 2009. Black carbon (BC) in the snow of glaciers in West China and its potential effects on albedos [J]. Atmos. Res., 92 (1): 114–123, doi:10.1016/j.atmosres.2008.09.007.
- Parthasarathy B, Munot A A, Kothawale D R. 1994. All-India monthly and seasonal rainfall series: 1871–1993 [J]. Theor. Appl. Climatol. 49 (4): 217–224, doi:10.1007/BF00867461.
- Pu Z X, Xu L, Salomonson V V. 2007. MODIS/Terra observed seasonal variations of snow cover over the Tibetan Plateau [J]. Geophys. Res. Lett., 34 (6): L06706, doi:10.1029/2007GL029262.
- Qian Y F, Zheng Y Q, Zhang Y, et al. 2003. Responses of China's summer monsoon climate to snow anomaly over the Tibetan Plateau [J]. Int. J. Climatol., 23 (6): 593–613, doi:10.1002/joc.901.
- 覃郑婕, 侯书贵, 王叶堂, 等. 2017. 青藏高原冬季积雪时空变化特征及其与北极涛动的关系 [J]. 地理研究, 36 (4): 743–754. Qin Zhengjie, Hou Shugui, Wang Yetang, et al. 2017. Spatio-temporal variability of winter snow cover over the Tibetan Plateau and its relation to Arctic Oscillation [J]. Geogr. Res. (in Chinese), 36 (4): 743–754, doi:10.11821/dlyj201704012.
- Qiu J. 2013. Monsoon melee [J]. Science, 340 (6139): 1400–1401, doi:10.1126/science.340.6139.1400.
- Qiu J. 2014. Tibetan plateau gets wired up for monsoon prediction [J]. Nature, 514 (7520): 16–17, doi:10.1038/514016a.
- Rangwala I, Sinsky E, Miller J R. 2013. Amplified warming projections for high altitude regions of the Northern Hemisphere mid-latitudes from CMIP5 models [J]. Environ. Res. Lett., 8 (2): 024040, doi:10.1088/1748-9326/8/2/024040.
- Schneider U, Fuchs T, Meyer-Christoffer A, et al. 2008. Global precipitation analysis products of the GPCC [R]. Offenbach am Main, Germany: Global Precipitation Climatology Centre (GPCC), DWD, Internet Publication, 1–12.
- Souma K, Wang Y Q. 2010. A comparison between the effects of snow albedo and infiltration of melting water of Eurasian snow on East Asian summer monsoon rainfall [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 115 (D2): D02115, doi:10.1029/2009JD012189.
- Turner A G, Slingo J M. 2011. Using idealized snow forcing to test teleconnections with the Indian summer monsoon in the Hadley Centre GCM [J]. Climate Dyn., 36 (9–10): 1717–1735, doi:10.1007/s00382-010-0805-3.
- Vernekar A D, Zhou J, Shukla J. 1995. The effect of Eurasian snow cover on the Indian monsoon [J]. J. Climate, 8 (2): 248–266, doi:10.1175/1520-0442(1995)008<0248:TEOESC>2.0.CO;2.
- Wang Z Q, Duan A M, Wu G X. 2014. Time-lagged impact of spring sensible heat over the Tibetan Plateau on the summer rainfall anomaly in East China: Case studies using the WRF model [J]. Climate Dyn., 42 (11–12): 2885–2898, doi:10.1007/s00382-013-1800-2.
- Wang C H, Yang K, Li Y L, et al. 2017. Impacts of spatiotemporal anomalies of Tibetan Plateau snow cover on summer precipitation in eastern China [J]. J. Climate, 30 (1–3): 885–903, doi:10.1175/JCLI-D-16-0041.1.
- 韦志刚, 黄荣辉, 陈文, 等. 2002. 青藏高原地面站积雪的空间分布和年代际变化特征 [J]. 大气科学, 26 (4): 496–508. Wei Zhigang, Huang Ronghui, Chen Wen, et al. 2002. Spatial distributions and interdecadal variations of the snow at the Tibetan Plateau weather stations [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (4): 496–508, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.04.07.
- 吴国雄, 李伟平, 郭华, 等. 1997. 青藏高原感热气泵和亚洲夏季风 [C]// 叶笃正. 赵九章纪念文集. 北京: 科学出版社, 116–126. Wu Guoxiong, Li Weiping, Guo Hua, et al. 1997. Tibetan Plateau sensible heating air-pump and Asian summer monsoon [C]// Ye Duzheng. Essays in Honor of Zhao Jiuzhang (in Chinese). Beijing: Sciences Press, 116–126.
- Wu G X, Zhang Y S. 1998. Tibetan Plateau forcing and the timing of the monsoon onset over South Asia and the South China Sea [J]. Mon. Wea. Rev., 126 (4): 913–927, doi:10.1175/1520-0493(1998)126<0913:TPFATT>2.0.CO;2.
- Wu T W, Qian Z A. 2003. The relation between the Tibetan winter snow and the Asian summer monsoon and rainfall: An observational investigation [J]. J. Climate, 16 (12): 2038–2051, doi:10.1175/1520-0442(2003)016<2038:TRBTW>2.0.CO;2.
- Wu G X, Liu Y M, Wang T M, et al. 2007. The influence of mechanical and thermal forcing by the Tibetan Plateau on Asian climate [J]. J. Hydrometeor., 8 (4): 770–789, doi:10.1175/Jhm609.1.
- Wu G X, Liu Y M, He B, et al. 2012. Thermal controls on the Asian summer monsoon [J]. Sci. Rep., 2: 404, doi:10.1038/srep00404.
- Wu G X, Duan A M, Liu Y M, et al. 2015. Tibetan Plateau climate dynamics: Recent research progress and outlook [J]. Nat. Sci. Rev., 2 (1): 100–116, doi:10.1093/nsr/nwu045.
- 肖志祥. 2016. 青藏高原冬春积雪对东亚夏季风年际变率的影响 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 133pp. Xiao Zhixiang. 2016. Impacts of Tibetan Plateau winter/spring snow cover on the interannual variability of East Asian summer monsoon [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 133pp.
- Xiao Z X, Duan A M. 2016. Impacts of Tibetan Plateau snow cover on the interannual variability of the East Asian summer monsoon [J]. J. Climate, 29 (23): 8495–8514, doi:10.1175/JCLI-D-16-0029.1.
- 许立言, 武炳义. 2012. 欧亚大陆积雪两种物理效应对 2010 年春末夏初华南降水的影响 [J]. 大气科学, 36 (2): 271–282. Xu Liyan, Wu Bingyi. 2012. Two physical effects of Eurasian snow cover on the late-spring and early-summer rainfall in South China of 2010 [J]. Chinese

- Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (2): 271–282, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11054.
- 徐祥德, 赵天良, 施晓晖, 等. 2015. 青藏高原热力强迫对中国东部降水和水汽输送的调制作用 [J]. 气象学报, 73 (1): 20–35. Xu Xiangde, Zhao Tianliang, Shi Xiaohui, et al. 2015. A study of the role of the Tibetan Plateau's thermal forcing in modulating rainband and moisture transport in eastern China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 73 (1): 20–35, doi:10.11676/qxxb2014.051.
- Xu X D, Guo J B, Koike T, et al. 2012. "Downstream Effect" of winter snow cover over the eastern Tibetan Plateau on climate anomalies in East Asia [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 90C: 113–130, doi:10.2151/jmsj.2012-C08.
- 杨凯, 胡田田, 王澄海. 2017. 青藏高原南、北积雪异常与中国东部夏季降水关系的数值试验研究 [J]. 大气科学, 41 (2): 345–356. Yang Kai, Hu Tiantian, Wang Chenghai. 2017. A numerical study on the relationship between the spring–winter snow cover anomalies over the northern and southern Tibetan Plateau and summer precipitation in East China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (2): 345–356, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1604.16119.
- 阳坤, 郭晓峰, 武炳义. 2010. 青藏高原地表感热通量的近期变化趋势 [J]. 中国科学: 地球科学, 40 (7): 923–932. Yang Kun, Guo Xiaofeng, Wu Bingyi. 2011. Recent trends in surface sensible heat flux on the Tibetan Plateau [J]. Sci. China Earth Sci., 54 (1): 19–28, doi:10.1007/s11430-010-4036-6.
- Yao T D, Thompson L, Yang W, et al. 2012. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings [J]. Nat. Climate Change, 2 (9): 663–667, doi:10.1038/Nclimate1580.
- Yasunari T, Kitoh A, Tokioka T. 1991. Local and remote responses to excessive snow mass over Eurasia appearing in the northern spring and summer climate—A study with the MRI-GCM [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 69 (4): 473–487, doi:10.2151/jmsj1965.69.4_473.
- Yasunari T, Kanehira A, Koike T. 2000. Interannual variability of snow cover over the Tibetan Plateau and its impact on Asian summer monsoon [C]// Proceedings of International Conference & Young Scientist Workshop on Asian Monsoon Environmental System and Global Change. Nanjing, China, 118.
- 叶笃正, 张捷迁. 1974. 青藏高原加热作用对夏季东亚大气环流影响的初步模拟实验 [J]. 中国科学, (3): 301–320. Ye Duzheng, Zhang Jieqian. 1974. A preliminary experimental simulation on the heating effect of the Tibetan Plateau on the general circulation over eastern Asia in summer [J]. Sci. China Ser. A (in Chinese), (3): 397–420.
- 叶笃正, 高由禧. 1979. 青藏高原气象学 [M]. 北京: 科学出版社, 278pp. Ye Duzheng, Gao Youxi. 1979. Meteorology of the Qinghai–Xizang Plateau (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 278pp.
- 叶笃正, 罗四维, 朱抱真. 1957. 西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, 28 (2): 108–121. Ye Duzheng, Luo Siwei, Zhu Baozhen. 1957. The wind structure and heat balance in the lower troposphere over Tibetan Plateau and its surrounding [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 28 (2): 108–121, doi:10.11676/qxxb1957.010.
- 叶燕华, 王平鲁, 李栋梁. 2005. 青藏高原感热与黄土高原春季降水异常关系研究 [J]. 干旱气象, 23 (1): 21–25. Ye Yanhua, Wang Pinglu, Li Dongliang. 2005. Relationships between surface sensible heat over the Tibetan Plateau and spring precipitation on the Loess Plateau [J]. Arid Meteor. (in Chinese), 23 (1): 21–25, doi:10.3969/j.issn.1006-7639.2005.01.004.
- Yeh T C, Wetherald R T, Manabe S. 1983. A model study of the short-term climatic and hydrologic effects of sudden snow-cover removal [J]. Mon. Wea. Rev., 111 (5): 1013–1024, doi:10.1175/1520-0493(1983)111<1013:AMSOTS>2.0.CO;2.
- You Q L, Min J Z, Kang S C. 2016. Rapid warming in the Tibetan Plateau from observations and CMIP5 models in recent decades [J]. Int. J. Climatol., 36 (6): 2660–2670, doi:10.1002/joc.4520.
- 章基嘉, 徐祥德, 苗峻峰. 1995. 青藏高原地面热力异常对夏季江淮流域持续暴雨形成作用的数值试验 [J]. 大气科学, 19 (3): 270–276. Zhang Jijia, Xu Xiangde, Miao Junfeng. 1995. A numerical experiment of the effect of anomalous thermal forcing of Tibetan Plateau ground surface on the formation of persistent heavy rain in summer over the Yangtze–Huaihe basin [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 19 (3): 270–276, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1995.03.02.
- 张顺利, 陶诗言. 2001. 青藏高原积雪对亚洲夏季风影响的诊断及数值研究 [J]. 大气科学, 25 (3): 372–390. Zhang Shunli, Tao Shiyuan. 2001. The influences of snow cover over the Tibetan Plateau on Asian summer monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25 (3): 372–390, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2001.03.0.
- 张艳, 钱永甫. 2004. 地表感热的时空分布特征及其与邻近海洋海温异常的关系 [J]. 高原气象, 23 (3): 330–338. Zhang Yan, Qian Yongfu. 2004. Temporal and spatial patterns of surface sensible heat flux and their relationship with the SST anomaly over adjacent oceans [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23 (3): 330–338, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2004.03.006.
- 张永生, 吴国雄. 1999. 关于亚洲夏季风爆发及北半球季节突变的物理机理的诊断分析 II. 青藏高原及邻近地区地表感热加热的作用 [J]. 气象学报, 57 (1): 56–73. Zhang Yongsheng, Wu Guoxiong. 1999. Diagnostic investigations on the mechanism of the onset of Asian summer monsoon and abrupt seasonal transitions over the Northern Hemisphere. Part II: The role of surface sensible heating over Tibetan Plateau and surrounding regions [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 57 (1): 56–73, doi:10.11676/qxxb1999.005.
- Zhao P, Chen L X. 2001. Climatic features of atmospheric heat source/sink over the Qinghai–Xizang Plateau in 35 years and its relation to rainfall in China [J]. Sci. China Earth Sci., 44 (9): 858–864, doi:10.1007/BF02907098.
- Zhao P, Zhou Z J, Liu J P. 2007. Variability of Tibetan spring snow and its associations with the hemispheric extratropical circulation and East Asian summer monsoon rainfall: An observational investigation [J]. J. Climate, 20 (15): 3942–3955, doi:10.1175/Jcli4205.1.
- 赵勇, 李如琦, 杨霞, 等. 2013. 5 月青藏高原地区感热异常对北疆夏季降水的影响 [J]. 高原气象, 32 (5): 1215–1223. Zhao Yong, Li Ruqi, Yang Xia, et al. 2013. Impact of the anomaly of surface sensible heat in Qinghai–Xizang Plateau and its surrounding areas on summertime precipitation in northern Xinjiang [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 32 (5): 1215–1223, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00117.