

欧亚大陆冷季积雪与亚洲夏季风的关系:区域特征与季节性



通信作者简介:杨崧,教授/博士生导师。中山大学大气科学学院副院长、广东省气候变化与自然灾害研究重点实验室主任、中山大学学术委员会委员、热带海洋环境国家重点实验室学术委员会委员、中国气象学会副热带气象委员会副主任委员、*Journal of Tropical Meteorology* 主编、《气象学报》常务编委、*Journal of Climate* 副编委。主要从事季风、海陆气相互作用、大气遥相关和气候变化与预报等方面的研究。发表学术论文 230 余篇,2014—2018 年连续五年入选爱思唯尔(Elsevier)公布的高被引中国学者榜单。

鲁萌萌^{①②},吴仁广^{③④},杨崧^{①④⑤*},王志彪^⑥

① 中山大学 大气科学学院,广东 广州 510275;

② 哈佛大学 地球与行星科学系,马萨诸塞州 剑桥 02138;

③ 浙江大学 地球科学学院,浙江 杭州 310027;

④ 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海),广东 珠海 519000;

⑤ 中山大学 广东省气候变化与自然灾害重点实验室,广东 广州 510275;

⑥ 中国科学院 大气物理研究所季风系统研究中心,北京 100190

摘要 主要回顾了欧亚大陆冷季积雪与亚洲夏季风的关系,特别是积雪对季风演变和强度的影响。从 Blanford(1884)着眼喜马拉雅山测站积雪开始,到 20 世纪 70 年代卫星测量的大范围雪盖资料的问世,直至近几十年来全球气候模式模拟与资料分析的结合,回顾了人们在不同时期对积雪-季风关系的不同认识以及对积雪影响季风的物理过程的不同理解。一方面,积雪通过反照率效应影响温度、温度梯度和大气环流包括季风环流;另一方面,积雪通过融化效应影响大气,特别是增强大气异常信号的持续性。在这些过程中,陆面积雪与大气运动的相互作用是一个正反馈的过程。另外,特别关注不同地区和季节的欧亚大陆积雪对不同亚洲区域季风的的不同影响,以及积雪在季风演变过程中对不同阶段季风特征的作用。虽然积雪与季风的关系非常复杂,加深对这些复杂关系的认识,对理解季风系统的整体变化以及改进季风预报都尤为重要。

关键词 欧亚大陆积雪;积雪-季风关系;亚洲夏季风;青藏高原

亚洲季风的变化会受到许多因子的共同影响。对于大范围季风的季节-年际变化来说,陆面过程是仅次于海表温度的重要影响因子(Yang and Lau, 1998),而冷季积雪是影响季风变化的陆面过程因子的一个重要因素。关于欧亚大陆积雪对亚洲季风的影响之研究可以追溯到 100 多年前。Blanford(1884)利用喜马拉雅山两个测站的冬季积雪资料预报印度夏季风的强度,发现当喜马拉雅山的积雪偏多时,印度季风偏弱;反之亦然。然而,这种积雪-季风关系并不稳定,而是存在着较大的年代际变化。在某些年代,积雪和季风的相关性较强;而在另外一些年代,这种相关性则较弱。这使得很多学者从更大范围的海洋和陆地上各种要素包括气压场和高度场中寻找更多与季风变化有关的因子(Walker, 1925; Normand, 1953)。尽管 Walker 定义了南方涛动并分析了它与印度季风的关系,但由于海洋观测资料的缺乏和对海洋-大气相互作用认识的不足,直到南方涛动是与太平洋厄尔尼诺现象紧密耦合这一事实被认识(Bjerknes, 1969),大范围海洋状况和季风的遥相关关系才引起进一步的、较系统性的研究。因

* 联系人, E-mail: yangsong3@mail.sysu.edu.cn

2019-10-25 收稿, 2019-11-30 接受

国家重点研发计划项目(2018YFC1505801);

国家自然科学基金委重点项目(91637208);

江苏省气候变化协同创新中心

引用格式:鲁萌萌,吴仁广,杨崧,等,2020.欧亚大陆冷季积雪与亚洲夏季风的关系:区域特征与季节性[J].大气科学学报,43(1):93-103.

Lu M M, Wu R G, Yang S, et al., 2020. Relationship between Eurasian cold-season snows and Asian summer monsoons: regional characteristics and seasonality[J]. *Trans Atmos Sci*, 43(1): 93-103. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20191025001. (in Chinese).

此,如果 Walker(1925)关于海表面状况和季风的研
究是最早的工作,Blanford(1884)关于积雪和季风
关系的研究要早几十年。并且 Blanford(1884)使用
冬季积雪预报印度夏季风也许是人类最早的“官
方”气候预报。然而,积雪-季风关系的不稳定性和
积雪资料的匮乏和不确定性,妨碍了关于欧亚积雪
与季风关系研究的开展。一直到通过卫星遥感获得
雪盖资料之后才出现了相对大量的积雪-季风观测
研究(Hahn and Shukla, 1976; Sankar-Rao et al.,
1996; Halder and Dirmeyer, 2017)。早期相关的观测
研究工作大多数仍然偏重于欧亚积雪对印度季风的
影响。后来的研究表明,欧亚积雪对东亚季风的影
响与其对印度季风的影响很不相同:积雪-东亚季风
关系较弱,而且在空间上存在较大的不一致性(陈
烈庭和阎志新, 1979; Yang and Xu, 1994; Yim et al.,
2010; Zhang et al., 2017)。值得指出的是,对欧亚大
陆积雪与亚洲季风关系的研究包括研究思路与方法
也导致了关于北美洲冬季积雪和北美夏季风关系
的研究(Gutzler and Rosen, 1992)。

从20世纪80年代开始,大气环流模式被广泛
地应用到积雪-季风关系的研究中(Yeh et al., 1983;
Barnett et al., 1988, 1989; Yasunari et al., 1991; Ver-
nekar et al., 1995; Yang and Lau, 1998; Peings and
Douville, 2010; Halder and Dirmeyer, 2017)。与观测
事实一致,大气环流模式结果普遍表明夏季风和冬
季积雪存在着反相的变化关系,特别是南亚季风。
同时,大气环流模式也模拟出东亚季风与积雪关系
的复杂性。基于模式结果的分析更为注重积雪的反
照率和融化造成的土壤湿度变化对季风的影响以
及它们的相对作用。另外,地球系统模式的发展,也
促进了关于积雪以及积雪-季风关系的动力预报。例
如,美国国家环境预报中心的气候预报系统对于春
季的积雪覆盖率和雪水当量有较好的预报能力,至
少能提前3个月预报出春季融雪的时空变化特征。
分析还发现该系统四月份的起报能较好地预报出
与四月积雪相关的我国夏季降水异常(Zuo et al.,
2015; He et al., 2016)。

相对而言,欧亚大陆积雪与东亚冬季风包括冷
季温度变化的关系表现得更加显著和简单些(Yang
et al., 2002; Jhun and Lee, 2004; Wang et al., 2009; Li
and Yang, 2010; Wang et al., 2010; Li et al., 2017;
Luo and Wang, 2019)。积雪的增多降低欧亚大陆
的温度,使得大陆高压增强,南北温度梯度增大,西
风急流增强,东亚大槽加深,对流层低层出现偏北风

异常因而冷平流增强,进一步降低东亚的温度。总
言之,虽然关于积雪-季风关系的研究取得了大量成
果,但仍然存在着许多亟需回答的科学问题。

1 欧亚大陆积雪对不同区域夏季风的影响

随着观测手段、研究方法和数值模式的日益发
展和进步,对积雪-季风变化关系的物理过程和机制
的认识也不断加深。积雪主要通过反照率效应和水
文效应改变地面辐射、温度、土壤湿度而引起大气
环流变化(大气遥相关)来影响局地和其他遥远区
域的天气气候。

1.1 积雪-季风关系中的物理过程和机制

Barnett et al.(1989)通过模式模拟来认识两种
过程对亚洲夏季风的相对影响。首先,他们分别将
观测中欧亚大陆区域较少和较多雪盖加入到大气环
流模式中并固定积雪厚度进行模拟,以考察积雪反
照率的作用。经过对两个试验的比较发现,仅有少
数变量如温度等出现明显变化,然而随着雪盖消失,
所有显著信号也随之消失。由此可见,由雪盖空间
分布异常引起的反照率效应没有较好持续性,对随
后季风发展的影响较小。而后,通过对比增加和减
少降雪率和陆面积雪厚度的两组试验,发现了显著
的大气环流和土壤温度、湿度异常。一方面,融化积
雪会吸收地表热量,冷却土壤温度;另一方面,积雪
融化后,土壤湿度增加,蒸发增大导致地表进一步冷
却,减弱海陆热力差异。此时水文效应扮演十分重
要的角色,为气候系统提供持续性和记忆性,从而使
得亚洲夏季风减弱。因此研究积雪对夏季风的影
响需要同时考虑多种过程,对不同时期哪一过程占
主导地位加以讨论。许多研究(Yasunari et al.,
1991; Vernekar et al., 1995; Lau and Bua, 1998; Yang
and Lau, 1998)也得出类似的结论,认为反照率虽
显著影响温度,但持续性小,且无法准确反映积雪厚
度的影响,Yasuari et al.(1991)相对地重视积雪反
照率的重要性。在相关的研究中,Lau and Bua(1998)
还讨论了积雪的正反馈和负反馈作用。Yang and
Lau(1998)指出了积雪和海表温度的相对作用,在
夏季风的季节变化中,海温的影响还是起到主导性
的作用。

1.2 积雪对南亚夏季风的影响

早期观测研究表明欧亚大陆冷季雪盖/积雪厚
度和随后的印度夏季风降水呈现较强负相关关系
(图1; Hahn and Shukla, 1976; Dey and Bhanu, 1982;

Dickson, 1983; Ropelewski et al., 1984; Dey et al., 1985; Shukla and Mooley, 1987; Khandekar, 1991; Sankar-Rao et al., 1996; Yang, 1996; Matsuyama and Masuda, 1998; Bamzai and Shukla, 1999; Kripalani and Kulkarni, 1999), 欧亚大陆冬季积雪与印度夏季风“均匀”性降水的变化也存在着这种负相关关系 (Parthasarathy and Yang, 1995), 这里的均匀性降水是指印度季风区中降水变化具有一致性的所有测站的降水总和。大量研究通过模式模拟也证实了此种联系并且揭示其中物理过程和机制 (Shukla, 1984; Barnett et al., 1988; Vernekar et al., 1995; Douville and Royer, 1996; Dong and Valdes, 1998; Bamzai and Marx, 2000; Gong et al., 2004; Dash et al., 2005; Turner and Slingo, 2011; Saha et al., 2013)。然而, Bamzai and Shukla (1999) 发现夏季风降水与欧亚大陆西部冬季雪盖之间才存在这种显著的负相关, 与喜马拉雅雪盖并无明显关系。还有一些研究通过使用积雪厚度变量也得到类似结果, 即与印度季风降水相联系的并不是欧亚大陆均一分布的积雪变化, 而是东西向偶极子的分布形态 (Kripalani and Kulkarni, 1999; Ye and Bao, 2001; Dash et al., 2005)。在一些统计分析研究中, 人们无法找到大范围陆面过程通过土壤湿度影响印度季风的证据, 从而积雪-印度季风关系受到了质疑 (Shinoda, 2001; Robock et al., 2003)。Peings and Douville (2010) 一方面使用较新的雪盖数据验证积雪-季风关系, 发现欧亚大陆雪盖偶极子分布和印度夏季风降水的关系 (即季风降水偏多时, 前期欧亚大陆西部雪盖偏少, 东部雪盖偏多) 存在较大年代际变化, 即该关系在长时间尺度上并不稳定; 另一方面, 基于对 CMIP3 历史模拟数据的分析, 发现在呈现较强积雪-季风关系的模式中, 厄尔尼诺/南方涛动 (ENSO) 对冬季积雪和夏季风都存在较明显且不真实的影响。

ENSO 与积雪和季风两者都密切相关。ENSO、积雪和季风三者之间的复杂关系常常使得由欧亚大陆区域平均的积雪指数与亚洲夏季风的相关显得不显著, 与 Blanford 假说不相符。另外, 基于 ENSO-季风关系, 在强 ENSO 事件的年份中评估 Blanford 提出的积雪-季风关系也许并不理想。Yang (1996) 发现 ENSO 事件会扰乱欧亚大陆积雪和印度夏季风之间的负相关关系, 甚至在有些厄尔尼诺年, 冬季偏多雪盖会伴随着偏强的印度夏季风。基于观测统计分析和模式模拟之间的不一致性, Fasullo (2004) 尝试通过证明 ENSO 对积雪-季风关系存在显著影

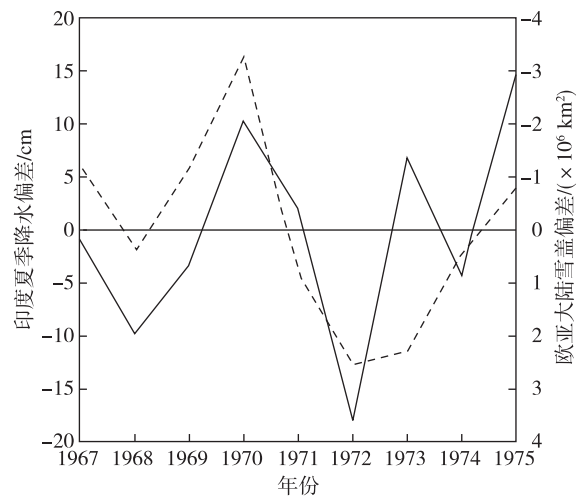


图1 欧亚大陆冬季雪盖(黑色虚线)和印度区域平均夏季降水(黑色实线)的时间序列(引自 Hahn and Shukla, 1976)

Fig.1 Time series of Eurasian winter snow cover (dashed black line) and Indian area-average summer rainfall (solid black line) (from Hahn and Shukla, 1976)

响: 当不考虑显著 ENSO 年份时, 雪盖与印度夏季风的反相关关系才显现出来, 印证了 Blanford 假设和 Yang 的结果。然而, 一些模式研究也证明这种积雪-季风关系也可以独立于 ENSO-季风关系而存在的 (Ferranti and Molteni, 1999; Turner and Slingo, 2011)。

众所周知, 季风有其自身特征, 如爆发、发展、中断和衰退等不同阶段, 然而大多数研究均只考虑大范围季节平均的积雪和季风降水关系。Yang and Lau (1998) 发现积雪异常通过土壤湿度变化仅对夏季风早期有显著影响, 当季风发展至盛期后, 受陆面过程的影响则较小 (图 2)。对比图 2a 和图 2b, 初夏 200 hPa 风场对前期土壤湿度异常的响应要明显强于整个夏季平均的风场异常。相对 ENSO 的影响来说, 积雪对季风的影响范围较小, 在陆地地区和近海区域才有较显著的影响。Mamgain et al. (2010) 详细探讨了不同区域降雪开始、结束日期及其与印度夏季风爆发之间的关系, 发现降雪发生较早的区域, 其结束日期和最大积雪厚度也较晚; 欧亚大陆东部和西部降雪呈现反相关关系; 而降雪开始日期与夏季风爆发日期之间关系不大, 高纬度欧亚积雪厚度与印度半岛夏季降水存在显著相关。Halder and Dirmeyer (2017) 在次季节时间尺度上进一步对欧亚大陆东部雪盖和融雪影响早期印度夏季风进行了讨论, 发现在欧亚大陆西部积雪反照率效应占据主导地位, 但是持续性和记忆性较短, 而东部春季土壤湿

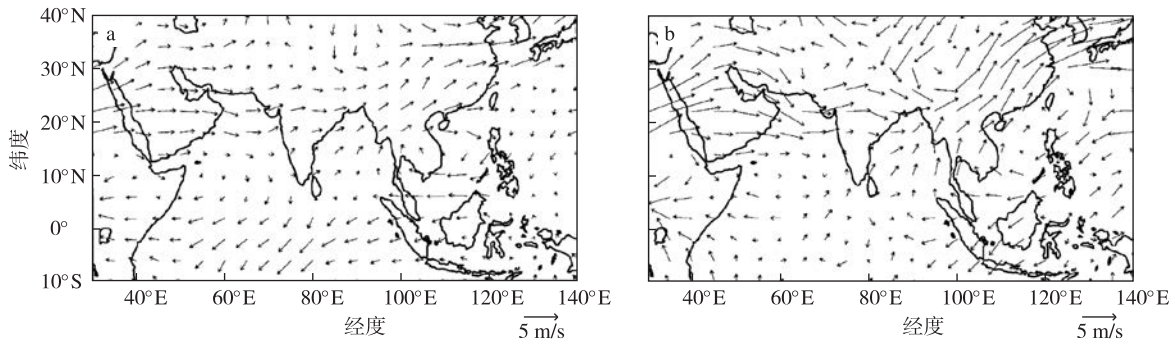


图2 土壤湿度异常偏多试验(CLSST_A)与控制试验(CLSST_B)之间5—9月平均(a)和5—6月平均(b)的200 hPa风场(箭头;单位:m/s)的合成差值场(引自 Yang and Lau, 1998)

Fig.2 Difference in 200 hPa wind between more soil moisture experiment(CLSST_A) and control experiment(CLSST_B) for (a) May-September mean and (b) May-June mean (from Yang and Lau, 1998)

度持续性较好,产生延迟水文效应,从而影响随后季风降水变化。

1.3 积雪对东亚夏季风的影响

与印度夏季风相比,欧亚积雪对东亚夏季风的影响在空间上存在较大的不一致性。不过,尽管欧亚冬季雪盖和中国区域平均夏季降水之间不存在明显相关关系,但若将其划分为几个区域,则冬季雪盖与每个区域夏季降水之间的相关性显著提高(图3; Yang and Xu, 1994)。其中,欧亚大陆冬季积雪与华北和华南的夏季降水都存在着较强的正相关关系,而与长江中下游的降水呈负相关。考虑到长江中下游的季风降水与印度季风降水变化的一致性(Liu and Ding, 2008a, 2008b),这一负相关关系应该是可信的。西伯利亚西部春季雪盖与中国南方春季降水存在显著正相关关系,其中也存在 ENSO 的作用,但在相关分析中因果关系并不清晰(Wu and Kirtmant, 2007)。另外,不同的积雪空间模态对东亚夏季降水的影响也大不相同。Yim et al. (2010) 发现春季欧亚大陆雪盖存在两个主要空间分布模态:均一变化型和纬向偶极子分布型(图4)。图5为东亚夏季降水回归到两个主模态对应的时间系数的空间分布特征。可见,相比于第一模态,第二模态与东亚夏季降水关系更为紧密。最近, Zhang et al. (2017) 通过对观测资料分析和模式模拟,发现春末-夏初欧亚中高纬度融雪对东亚夏季降水格局有重要影响。他们并没有像许多前人研究一样直接使用雪盖或积雪厚度,而是计算了春季融雪量,即相较于前一个月的积雪减少量。欧亚融雪具有东西反相型异常,即西伯利亚融雪少,贝加尔湖周围地区融雪多;这种融雪异常及其相联系的土壤湿度异常在热动力作用下可以激发出异常 Rossby 波,并与气候态准定常波列

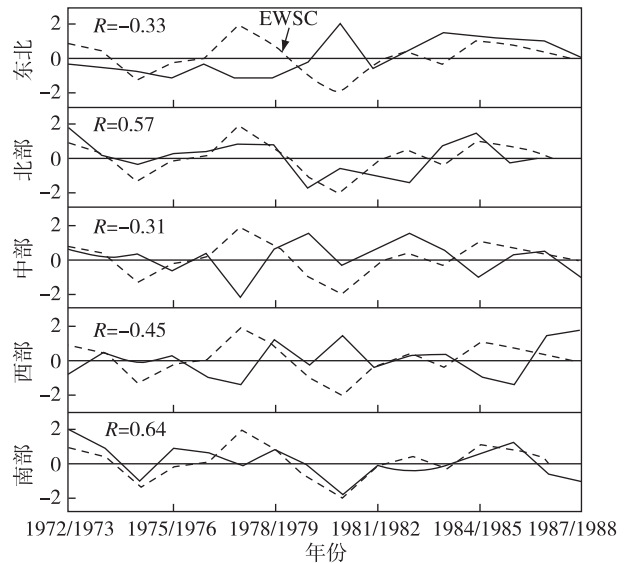


图3 欧亚大陆冬季雪盖(黑色虚线)和中国各区域夏季降水(黑色实线)的标准化时间序列(引自 Yang and Xu, 1994)

Fig.3 Normalized time series of Eurasian winter snow cover(dashed black lines) and summer rainfall in different regions in China (solid black lines) (from Yang and Xu, 1994)

耦合增强,向东频散能量,进而调制东亚夏季环流,使得中国东北地区夏季降水偏多、南方广大地区降水偏少。张若楠等(2018)进一步提出了北极海冰和欧亚积雪的协同影响理论,即当春季巴伦支海和巴芬湾海冰偏少时,欧亚中高纬度积雪出现“西少东多”偶极子型异常,二者通过调制夏季欧亚遥相关型进而影响我国北方夏季降水异常偏少,基于这两个前兆因子建立的降水异常预测模型表现出较高的预测技巧。

在 ENSO 相同位相的年份中,东亚夏季风存在着较大变率,这种不一致性在一定程度上降低了基

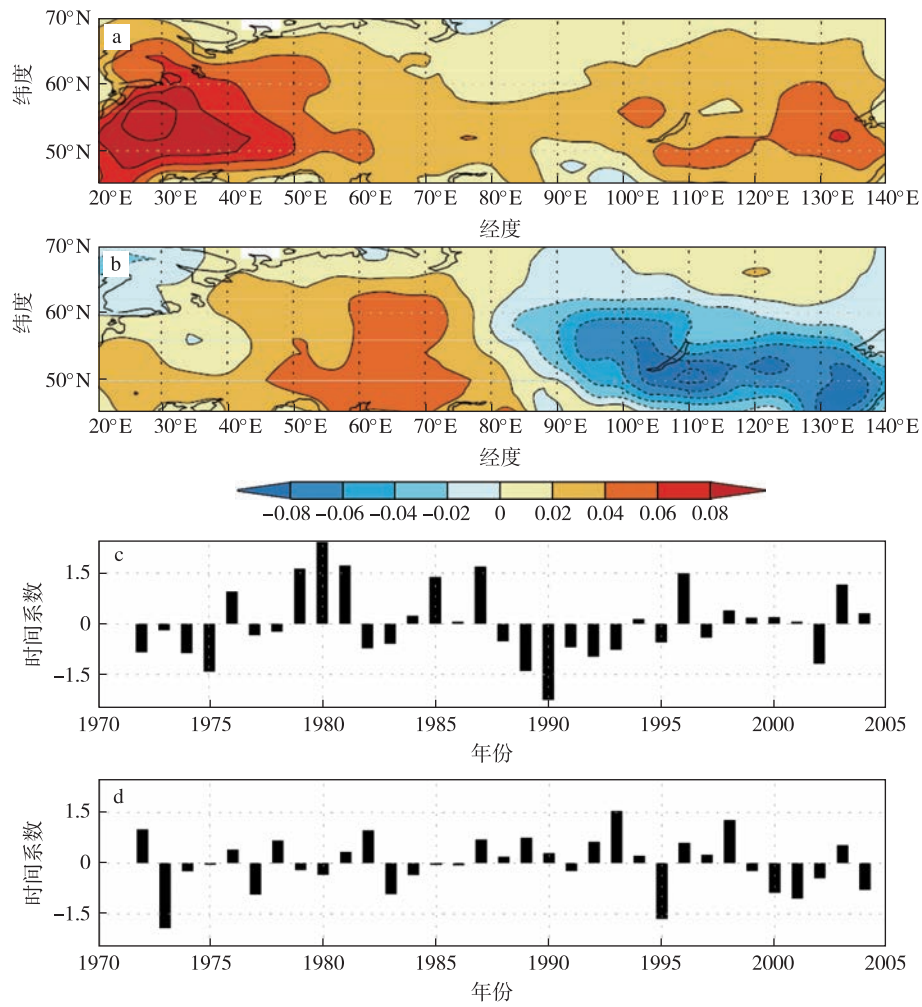


图4 春季欧亚大陆雪盖 EOF 分解的前两个主模态的空间分布特征(a,b)和相应的时间系数(c,d) (引自 Yim et al.,2010)

Fig.4 (a,b) Spatial distribution and (c,d) corresponding time coefficient of the first two EOF modes of the Eurasian spring snow cover(from Yim et al.,2010)

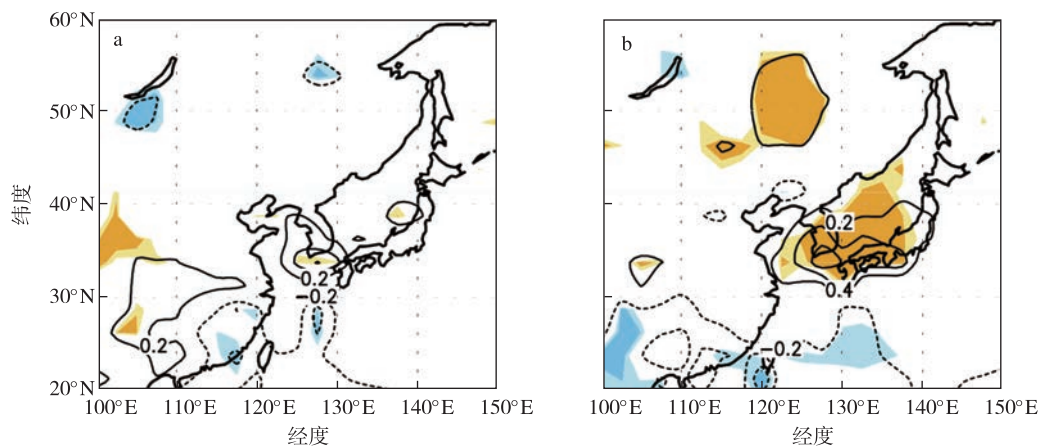


图5 东亚夏季降水(单位:mm/d)回归到春季欧亚大陆雪盖 EOF 第一模态时间系数(a)和第二模态时间系数(b)的空间分布特征(引自 Yim et al.,2010)

Fig.5 Spacial distribution of East Asian summer rainfall (unit: mm/d) against (a) the first and (b)second modes of Eurasian spring snow cover(from Yim et al.,2010)

于 ENSO 变率对东亚夏季风的可预报性。Wu et al. (2012) 发现高原雪盖能够通过调节 ENSO 遥相关, 转而改变 ENSO 和东亚夏季风的关系, 使得 1995 年以后高原雪盖较少年份中, 对 ENSO 非绝热强迫的罗斯贝波响应加强, 从而导致 ENSO-东亚夏季风之间的负相关显著增大。

2 青藏高原积雪对亚洲夏季风的影响

越来越多的研究表明, 素有“第三极”之称的青藏高原上的积雪对亚洲夏季风的变化具有重要影响和预测意义(郭其蕴和王继琴, 1986; 吴统文和钱正安, 2000; 郑益群等, 2000; 张顺利和陶诗言, 2001; Turner and Slingo, 2011; 霍飞等, 2014; Liu et al., 2014), 而且, 高原不同地区的积雪和不同季节(月份)的积雪有着不同的气候效应(Xiao and Duan, 2016; Bao and You, 2019; Xiao et al., 2019)。由于高原海拔较高, 常年积雪, 所以春季高原积雪的反照率效应对亚洲夏季降水变率起主要作用(Turner and Slingo, 2011), 而水文效应则在夏季占优(Yasunari et al., 1991; Souma and Wang, 2010)。其实, 青藏高原的积雪甚至可以影响到更大尺度如北半球的气候变化(Wu et al., 2011; Liu et al., 2017)。

如前面指出, 对印度夏季风最早的预报始于 Blanford(1884) 发现的喜马拉雅山积雪-印度季风关系, 数值试验也表明当高原积雪增多时, 地表温度降低, 感热减小, 大气对流层温度也随之降低, 使得经向温度梯度减小, 从而印度季风环流减弱、降水减少(Vernekar et al., 1995)。Turner and Slingo(2011) 发现在模式中印度夏季风较弱时, 前期高原和欧亚大陆西北部积雪呈现反相变化, 于是又进行两组敏感性实验对这两个区域分别加入积雪异常, 证明相比于欧亚大陆西北部, 高原积雪对减弱印度季风起主要贡献。Senan et al.(2016) 进一步表明喜马拉雅-青藏高原地区春季积雪厚度异常会推迟夏季风爆发。

青藏高原冬春季积雪异常对东亚夏季环流、气温(包括热浪)和降水也有重要影响(陈兴芳和宋文玲, 2000; Chen and Wu, 2000; Wu and Kirtman, 2007; Zhao et al., 2007; Wu et al., 2016; Xiao and Duan, 2016)。基于台站观测资料(主要分布在高原中东部地区), 许多研究发现高原冬季积雪偏多时, 长江中下游夏季降水增多, 同时华南和华北降水偏少(陈乾金和刘玉洁, 2000; 张顺利和陶诗言, 2001; Wu and Qian, 2003; Xu et al., 2012)。也有一些得到

的研究结果正相反, 即春季高原积雪偏多时, 长江中下游地区夏季降水偏少, 中国东南部降水增多(Zhao et al., 2007)。另外, 青藏高原积雪还存在着年代际的变化(You et al., 2011; 段安民等, 2018), 高原冬季积雪和东亚夏季降水的关系在 20 世纪 90 年代末也发生了年代际变化, 由于高原积雪从 20 世纪 90 年代末开始减少, 使得随后春夏高原地表感热增强, 海陆热力差异增大, 东亚夏季风降水向北推进(Si and Ding, 2013)。这意味着对积雪-东亚季风关系及机理的研究仍需采用更长时间的观测资料和更加合理的数值模拟进行反复求证。随着对卫星观测积雪数据的应用, 近年来研究发现高原夏季积雪异常也存在显著作用(Liu et al., 2014; Wang et al., 2018)。Liu et al.(2014) 阐述了高原夏季积雪通过引起热带印度-太平洋上大气直接环流, 影响西太暖池的对流活动, 从而激发东亚-太平洋遥相关型, 最终使得梅雨区夏季降水增多。Wang et al.(2018) 在此基础上, 分析发现夏季高原西部和南部积雪异常分别通过中纬度波列和热带印度-太平洋上空直接环流两个不同的途径影响东亚夏季降水, 但二者对其产生一致影响, 即当高原西部和南部积雪偏多时, 长江中下游地区和副热带西太平洋降水偏多, 印度北部和热带西太平洋降水偏少(图 6)。此外, 就像欧亚大陆积雪、ENSO 和季风存在着相互作用(Yang, 1996; Fasullo, 2004) 一样, 青藏高原积雪和 ENSO 及季风的变化也是密切相连的(Wu et al., 2012)。

在年代际时间尺度上, 高原积雪对亚洲夏季风也有着重要影响。在大西洋多年代际振荡呈现负位相时, 北大西洋海温异常通过影响大气遥相关(北大西洋涛动)导致青藏高原上雪盖异常偏多, 引起春夏季高原热源偏弱, 从而使得印度夏季风偏弱(Goswami et al., 2006; Feng and Hu, 2008; Ding et al., 2009; Shen et al., 2011)。

3 结语和展望

从十九世纪八十年代至今, 随着观测数据精确度的提高、研究手段的丰富以及数值模式的发展, 从单个或几个站点的积雪资料到复杂的数值模拟, 关于欧亚大陆积雪-亚洲夏季风关系的研究取得了较大进展, 积雪-季风变化关系的相关物理过程和机制在一定程度上得以揭示, 为提高季风预测技巧提供了重要指示意义。本文回顾了相关的前人研究成果, 在此也提出一些未来有待解决的科学问题。

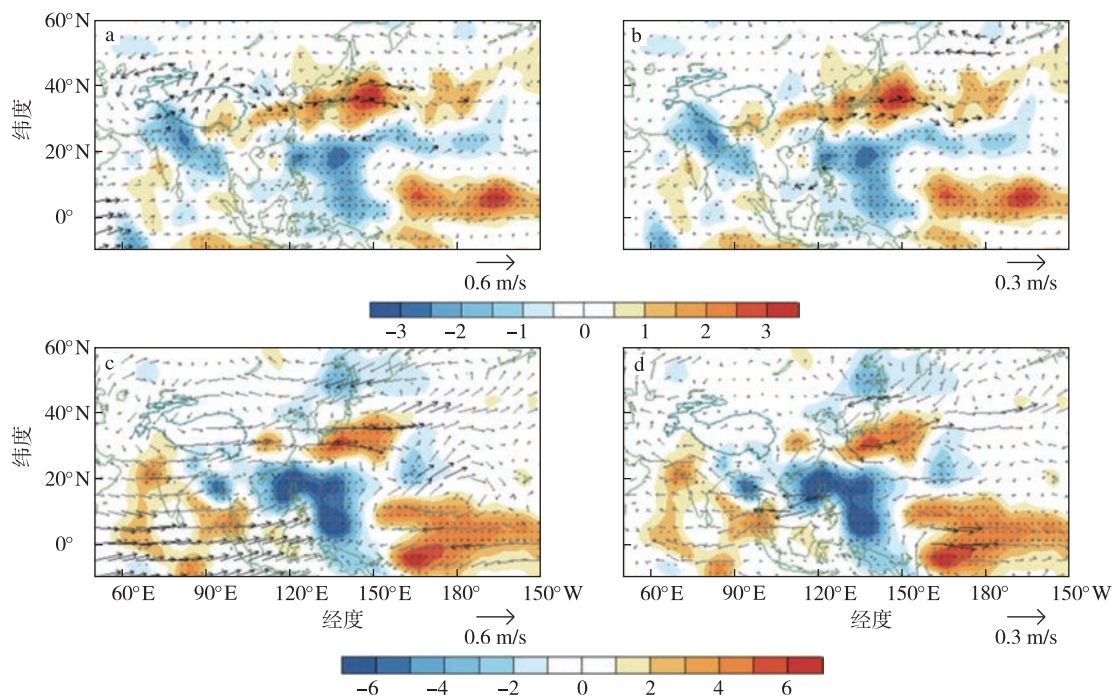


图6 夏季降水(阴影,单位:mm/mon)、150 hPa和850 hPa风场(箭矢,单位:m/s)回归到青藏高原西部区域平均雪盖指数(a,b)和南部区域平均雪盖指数(c,d)的空间分布(引自 Wang et al., 2018)

Fig.6 Regressions of summer rainfall (shadings, unit: mm/month), 150 hPa winds (vectors, unit: m/s) and 850 hPa wind against (a, b) western Tibetan Plateau snow cover index and (c, d) southern Tibetan Plateau snow cover index (from Wang et al., 2018)

积雪主要通过两个过程影响大气环流和天气气候:积雪反照率效应和积雪水文效应。前人研究一致表明反照率效应在冬季以及海拔较高地区如青藏高原等起主要作用,而积雪融化后的水文过程主要在春季占主导作用,持续性较好,为气候系统提供了较长的记忆性。因此,在研究中细化不同过程在不同阶段的贡献对更好地解释其中物理机制尤为重要。

不同区域、季节的积雪对亚洲夏季风各个成员的影响已进行了大量研究。从观测中简单的相关关系到利用数值模拟对物理过程和机制的讨论,人们对积雪-季风变化关系的认识不断深入,但是对该关系的显著性和稳定性及相关物理机制解释的争议也一直存在。一直以来,海温都被认为是影响气候系统最为关键的因子。虽然不少研究认为欧亚大陆积雪偏多会使得海陆热力差异减小,从而导致南亚夏季风特别是印度夏季风减弱,但是此关系也会受到其他因子如海温的影响。研究表明 ENSO 变率会影响积雪-印度夏季风关系,使得负相关不明显,

Blanford 假说难以成立。当只考虑非 ENSO 年份时,这种负相关才突显出来。另外,海温对季风的影响范围较大,时段较长;而陆面过程则主要影响靠近陆地和前期阶段的季风现象。因此,对海温、积雪和季风三者之间相互作用的深入研究以及定量分析积雪和海温对季风变异的相对贡献是未来尤为重要的研究课题。相比较下,积雪对东亚夏季风的影响在空间上呈现出较大不一致性,相关物理机制如大气遥相关和罗斯贝波响应等亟待进步深入探讨。最后,欧亚大陆地域广阔,积雪分布的不同模态、不同异常中心对不同区域季风的影响也不相同。寻找对不同区域季风变化起重要作用的积雪关键区以及相关的物理过程和动力学解释,也是相关领域中的重要研究内容。

致谢:感谢国家重点研发计划项目(2018YFC1505801)、国家自然科学基金委重点项目(91637208)和江苏气候变化协同创新中心对本文的支持;感谢段安民、吴其冈、吴志伟、游庆龙、张若楠和左志燕等对本文撰写的帮助。

参考文献 (References)

- Bamzai A S, Shukla J, 1999. Relation between Eurasian snow cover, snow depth, and the Indian summer monsoon: an observational study [J]. *J Climate*, 12(10): 3117-3132.
- Bamzai A S, Marx L, 2000. COLA AGCM simulation of the effect of anomalous spring snow over Eurasia on the Indian summer monsoon [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 126(568): 2575-2584.
- Bao Y T, You Q L, 2019. How do westerly jet streams regulate the winter snow depth over the Tibetan Plateau? [J]. *Clim Dyn*, 53(1/2): 353-370.
- Barnett T P, Dümenil L, Schlese U, et al., 1988. The effect of Eurasian snow cover on global climate [J]. *Science*, 239(4839): 504-507.
- 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.
- Bjerknes J, 1969. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific [J]. *Mon Wea Rev*, 97(3): 163-172.
- 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.
- 陈烈庭, 阎志新, 1979. 青藏高原冬春季异常雪盖影响初夏季风的统计分析 [C]//1977—1978年青藏高原气象会议论文集. 北京: 科学出版社: 151-161. Chen L T, Yan Z X, 1979. Statistical analysis of the impact of winter-spring snow cover anomaly over the Tibetan Plateau on early summer monsoon [C]//Proceedings of the 1977—1978 Conference on Tibetan Plateau Meteorology Beijing: Sciences Press, 151-161. (in Chinese).
- Chen L T, Wu R G, 2000. Interannual and decadal variations of snow cover over Qinghai-Xizang Plateau and their relationships to summer monsoon rainfall in China [J]. *Adv Atmos Sci*, 17(1): 18-30.
- 陈乾金, 刘玉洁, 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 Q J, Liu Y J, 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 Meteorol Sin*, 58(5): 582-595. (in Chinese).
- 陈兴芳, 宋文玲, 2000. 冬季高原积雪和欧亚积雪对我国夏季旱涝不同影响关系的环流特征分析 [J]. *大气科学*, 24(5): 585-592. Chen X F, Song W L, 2000. Circulation analysis of different influence of snow cover over the Tibetan Plateau and Eurasia in winter on summertime droughts and floods of China [J]. *Chin J Atmos Sci*, 24(5): 585-592. (in Chinese).
- Dash S K, Singh G P, Shekhar M S, et al., 2005. Response of the Indian summer monsoon circulation and rainfall to seasonal snow depth anomaly over Eurasia [J]. *Clim Dyn*, 24(1): 1-10.
- Dey B, Bhanu Kumar O S R U, 1982. An apparent relationship between Eurasian spring snow cover and the advance period of the Indian summer monsoon [J]. *J Appl Meteor*, 21(12): 1929-1932.
- Dey B, Kathuria S N, Kumar O B, 1985. Himalayan summer snow cover and withdrawal of the Indian summer monsoon [J]. *J Climate Appl Meteor*, 24(8): 865-868.
- Dickinson R E, 1983. Land surface processes and climate—surface albedos and energy balance [M]//Advances in Geophysics. Amsterdam: Elsevier: 305-353. doi: 10.1016/s0065-2687(08)60176-4.
- Ding Y H, Sun Y, Wang Z Y, et al., 2009. Inter-decadal variation of the summer precipitation in China and its association with decreasing Asian summer monsoon Part II: possible causes [J]. *Int J Climatol*, 29(13): 1926-1944.
- Dong B W, Valdes P J, 1998. Modelling the Asian summer monsoon rainfall and Eurasian winter/spring snow mass [J]. *Quant J Roy Meteor Soc*, 124(552): 2567-2596.
- Douville H, Royer J F, 1996. Sensitivity of the Asian summer monsoon to an anomalous Eurasian snow cover within the Météo-France GCM [J]. *Clim Dyn*, 12(7): 449-466.
- 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 A M, Xiao Z X, Wang Z Q, et al., 2018. Impacts of the Tibetan Plateau winter/spring snow depth and surface heat source on Asian summer monsoon: a review [J]. *Chin J Atmos Sci*, 42(4): 755-766. (in Chinese).
- Fasullo J, 2004. A stratified diagnosis of the Indian monsoon: Eurasian snow cover relationship [J]. *J Climate*, 17(5): 1110-1122.
- Feng S, Hu Q, 2008. How the North Atlantic Multidecadal Oscillation May have influenced the Indian summer monsoon during the past two millennia [J]. *Geophys Res Lett*, 35: L01707.
- Ferranti L, Molteni F, 1999. Ensemble simulations of Eurasian snow-depth anomalies and their influence on the summer Asian monsoon [J]. *Quant J Roy Meteor Soc*, 125(559): 2597-2610.
- Gong G, Entekhabi D, Cohen J, et al., 2004. Sensitivity of atmospheric response to modeled snow anomaly characteristics [J]. *J Geophys Res*, 109(D6): 107.
- Goswami B N, Madhusoodanan M S, Neema C P, et al., 2006. A physical mechanism for North Atlantic SST influence on the Indian summer monsoon [J]. *Geophys Res Lett*, 33(2): L02706.
- 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 Q Y, Wang J Q, 1986. The snow cover on Tibet plateau and its effect on the monsoon over East Asia [J]. *Plateau Meteorol*, 5(2): 116-124. (in Chinese).

- Gutzler D S, Rosen R D, 1992. Interannual variability of wintertime snow cover across the Northern Hemisphere [J]. *J Climate*, 5(12): 1441-1447.
- 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.
- Halder S, Dirmeyer P A, 2017. Relation of Eurasian snow cover and Indian summer monsoon rainfall: importance of the delayed hydrological effect [J]. *J Climate*, 30(4): 1273-1289.
- He Q, Zuo Z, Zhang R H, et al., 2016. Prediction skill and predictability of Eurasian snow cover fraction in the NCEP Climate Forecast System version 2 reforecasts [J]. *Int J Climatol*, 36(12): 4071-4084.
- 霍飞, 江志红, 刘征宇, 2014. 春夏季青藏高原积雪对中国夏末秋初降水的影响及其可能机制 [J]. *大气科学*, 38(2): 352-362. Huo F, Jiang Z H, Liu Z Y. 2014. Impacts of late spring Tibetan Plateau snow cover on early autumn precipitation [J]. *Chin J Atmos Sci*, 38(2): 352-362. (in Chinese).
- Jhun J G, Lee E J, 2004. A new East Asian winter monsoon index and associated characteristics of the winter monsoon [J]. *J Climate*, 17(4): 711-726.
- Khandekar M L, 1991. Eurasian snow cover, Indian monsoon and El Niño/Southern Oscillation—a synthesis [J]. *Atmosphere-Ocean*, 29(4): 636-647.
- Kripalani R H, Kulkarni A, 1999. Climatology and variability of historical Soviet snow depth data: some new perspectives in snow-Indian monsoon teleconnections [J]. *Clim Dyn*, 15(6): 475-489.
- Lau K M, Bua W, 1998. Mechanisms of monsoon-Southern Oscillation coupling: insights from GCM experiments [J]. *Clim Dyn*, 14(11): 759-779.
- Li Q P, Yang S, Wu T W, et al., 2017. Subseasonal dynamical prediction of East Asian cold surges [J]. *Wea Forecasting*, 32(4): 1675-1694.
- Li Y Q, Yang S, 2010. A dynamical index for the East Asian winter monsoon [J]. *J Climate*, 23(15): 4255-4262.
- 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.
- Liu S, Wu Q G, Ren X J, et al., 2017. Modeled northern hemisphere autumn and winter climate responses to realistic Tibetan Plateau and Mongolia snow anomalies [J]. *J Climate*, 30(23): 9435-9454.
- Liu Y Y, Ding Y H, 2008a. Analysis and numerical simulations of the teleconnection between Indian summer monsoon and precipitation in North China [J]. *Acta Meteor Sinica*, 22(4): 489-501.
- Liu Y Y, Ding Y H, 2008b. Teleconnection between the Indian summer monsoon onset and the Meiyu over the Yangtze River Valley [J]. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 51(7): 1021-1035.
- Luo X, Wang B, 2019. How autumn Eurasian snow anomalies affect East Asian winter monsoon: a numerical study [J]. *Clim Dyn*, 52(1/2): 69-82.
- Mangain A, Dash S K, Sarthi P P, 2010. Characteristics of Eurasian snow depth with respect to Indian summer monsoon rainfall [J]. *Meteorol Atmos Phys*, 110(1/2): 71-83.
- Matsuyama H, Masuda K, 1998. Seasonal/interannual variations of soil moisture in the former USSR and its relationship to Indian summer monsoon rainfall [J]. *J Climate*, 11(4): 652-658.
- Normand C, 1953. Monsoon seasonal forecasting [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 79: 463-473.
- Parthasarathy B, Yang S, 1995. Relationships between regional Indian summer monsoon rainfall and Eurasian snow cover [J]. *Adv Atmos Sci*, 12(2): 143-150.
- Peings Y, Douville H, 2010. Influence of the Eurasian snow cover on the Indian summer monsoon variability in observed climatologies and CMIP3 simulations [J]. *Clim Dyn*, 34(5): 643-660.
- Robock A, 2003. Land surface conditions over Eurasia and Indian summer monsoon rainfall [J]. *J Geophys Res*, 108(D4): 4131.
- Ropelewski C F, Robock A, Matson M, 1984. Comments on “An apparent relationship between Eurasian spring snow cover and the advance period of the Indian summer monsoon” [J]. *J Climate Appl Meteor*, 23(2): 341-342.
- Saha S K, Pokhrel S, Chaudhari H S, 2013. Influence of Eurasian snow on Indian summer monsoon in NCEP CFSv2 freerun [J]. *Clim Dyn*, 41(7/8): 1801-1815.
- Sankar-Rao M, Lau K M, Yang S, 1996. On the relationship between Eurasian snow cover and the Asian summer monsoon [J]. *Int J Climatol*, 16(6): 605-616.
- Senan R, Orsolini Y J, Weisheimer A, et al., 2016. Impact of springtime Himalayan-Tibetan Plateau snowpack on the onset of the Indian summer monsoon in coupled seasonal forecasts [J]. *Clim Dyn*, 47(9/10): 2709-2725.
- Shen C M, Wang W C, Zeng G, 2011. Decadal variability in snow cover over the Tibetan Plateau during the last two centuries [J]. *Geophys Res Lett*, 38(10): 703.
- Shinoda M, 2001. Climate memory of snow mass as soil moisture over central Eurasia [J]. *J Geophys Res*, 106(D24): 33393-33403.
- Shukla J, 1984. Predictability of time averages. Part II: the influence of the boundary forcing [M] // *Problems and Prospects in Long and Medium Range Weather Forecasting*, Topics in Atmospheric and Oceanographic Sciences. Springer-Verlag: 155-206.
- Shukla J, Mooley D A, 1987. Empirical prediction of the summer monsoon rainfall over India [J]. *Mon Wea Rev*, 115(3): 695-704.
- Si D, Ding Y H, 2013. Decadal change in the correlation pattern between the Tibetan Plateau winter snow and the East Asian summer precipitation during 1979—2011 [J]. *J Climate*, 26(19): 7622-7634.
- 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*, 115(D2): D02115.
- 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]. *Clim Dyn*, 36(9/10): 1717-1735.
- 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.
- Walker G T, 1925. Correlation in seasonal variations of weather; a further study of world weather I[J]. *Mon Wea Rev*, 53(6): 252-254.
- Wang B, Wu Z W, Chang C P, et al., 2010. Another look at interannual-to-interdecadal variations of the East Asian winter monsoon; the northern and southern temperature modes[J]. *J Climate*, 23(6): 1495-1512.
- Wang L, Huang R H, Gu L, et al., 2009. Interdecadal variations of the East Asian winter monsoon and their association with quasi-stationary planetary wave activity[J]. *J Climate*, 22(18): 4860-4872.
- Wang Z B, Wu R G, Chen S F, et al., 2018. Influence of Western Tibetan Plateau summer snow cover on East Asian summer rainfall[J]. *J Geophys Res Atmos*, 123(5): 2371-2386.
- Wu Q G, Hu H B, Zhang L J, 2011. Observed influences of autumn-early winter Eurasian snow cover anomalies on the hemispheric PNA-like variability in winter[J]. *J Climate*, 24(7): 2017-2023.
- Wu R G, Kirtman B P, 2007. Observed relationship of spring and summer East Asian rainfall with winter and spring Eurasian snow[J]. *J Climate*, 20(7): 1285-1304.
- 吴统文, 钱正安, 2000. 青藏高原冬春积雪异常与中国东部地区夏季降水关系的进一步分析[J]. *气象学报*, 58(5): 570-581. Wu T W, Qian Z A, 2000. Further analyses of the linkage between winter and spring snow depth anomaly over Qinghai-Xizang plateau and summer rainfall of Eastern China[J]. *Acta Meteorol Sin*, 58(5): 570-581. (in Chinese).
- 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.
- Wu Z W, Li J P, Jiang Z H, et al., 2012. Modulation of the Tibetan Plateau snow cover on the ENSO teleconnections; from the East Asian summer monsoon perspective[J]. *J Climate*, 25(7): 2481-2489.
- Wu Z W, Zhang P, Chen H, et al., 2016. Can the Tibetan Plateau snow cover influence the interannual variations of Eurasian heat wave frequency? [J]. *Clim Dyn*, 46(11/12): 3405-3417.
- 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.
- Xiao Z X, Duan A M, Wang Z Q, 2019. Atmospheric heat sinks over the Western Tibetan Plateau associated with snow depth in late spring[J]. *Int J Climatol*, 39(13): 5170-5180.
- 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.
- Yang S, 1996. Enso-snow-monsoon associations and seasonal-interannual predictions[J]. *Int J Climatol*, 16(2): 125-134.
- Yang S, Xu L Z, 1994. Linkage between Eurasian winter snow cover and regional Chinese summer rainfall[J]. *Int J Climatol*, 14(7): 739-750.
- Yang S, Lau K M, 1998. Influences of sea surface temperature and ground wetness on Asian summer monsoon[J]. *J Climate*, 11(12): 3230-3246.
- Yang S, Lau K M, Kim K M, 2002. Variations of the East Asian jet stream and Asian-Pacific-American winter climate anomalies[J]. *J Climate*, 15(3): 306-325.
- 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[J]. *J Meteor Soc Japan*, 69(4): 473-487.
- Ye H C, Bao Z H, 2001. Lagged teleconnections between snow depth in northern Eurasia, rainfall in Southeast Asia and sea-surface temperatures over the tropical Pacific Ocean[J]. *Int J Climatol*, 21(13): 1607-1621.
- 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.
- Yim S Y, Jhun J G, Lu R Y, et al., 2010. Two distinct patterns of spring Eurasian snow cover anomaly and their impacts on the East Asian summer monsoon[J]. *J Geophys Res*, 115(D22): D22113.
- You Q L, Kang S C, Ren G Y, et al., 2011. Observed changes in snow depth and number of snow days in the eastern and central Tibetan Plateau[J]. *Climate Res.*, 46: 171-183.
- Zhang R N, Zhang R H, Zuo Z, 2017. Impact of Eurasian spring snow decrement on East Asian summer precipitation[J]. *J Climate*, 30(9): 3421-3437.
- 张若楠, 孙丞虎, 李维京, 2018. 北极海冰与夏季欧亚遥相关型年际变化的联系及对我国夏季降水的影响[J]. *地球物理学报*, 61(1): 91-105.
- Zhang R N, Sun C H, Li W J, 2018. Relationship between the interannual variations of Arctic sea ice and summer Eurasian teleconnection and associated influence on summer precipitation over China[J]. *Chin J Geophys*, 61(1): 91-105. (in Chinese).
- 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 S L, Tao S Y, 2001. Influences of snow cover over the Tibetan Plateau on Asian summer monsoon[J]. *Chin J Atmos Sci*, 25(3): 372-390. (in Chinese).
- 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.
- 郑益群, 钱永甫, 苗曼倩, 等, 2000. 青藏高原积雪对中国夏季风气候的影响 [J]. *大气科学*, 24(6): 761-774. Zheng Y Q, Qian Y F, Miao M Q, et al., 2000. Effect of the Tibetan Plateau snow cover on China summer monsoon climate [J]. *Chin J Atmos Sci (in Chinese)*, 24(6): 761-774.
- Zuo Z, Yang S, Zhang R H, et al., 2015. Response of summer rainfall over China to spring snow anomalies over Siberia in the NCEP CFSv2 reforecast [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 141(688): 939-944.

Relationship between Eurasian cold-season snows and Asian summer monsoons: regional characteristics and seasonality

LU Mengmeng^{1,2}, WU Renguang^{3,4}, YANG Song^{1,4,5}, WANG Zhibiao⁶

¹*School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;*

²*Department of Earth and Planetary Sciences, Harvard University, Cambridge, 02138, USA;*

³*School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;*

⁴*Southern Marine Sciences and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519000, China;*

⁵*Guangdong Province Key Laboratory for Climate Change and Natural Disaster Studies, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;*

⁶*Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*

This paper reviews the progress of research on the relationship between Eurasian cold-season snows and Asian summer monsoons, especially the impact of snow on monsoon evolution and intensity. From Blanford (1884)'s research on snow at the Himalayan station to the appearance of large-scale snow datasets based on satellite measurement since the 1970s, together with the combination of global climate modeling and observational analysis, snow-monsoon relationship and the related physical processes have been investigated extensively. On one hand, snow influences atmospheric temperature, corresponding temperature gradient, and atmospheric circulation through the snow albedo effect. On the other hand, it affects the atmosphere especially the persistency of atmospheric anomalous signals through the snow-melt hydrological effect. There exists a positive interaction between snow and atmospheric circulations in those processes. This paper mainly focuses on various impacts of Eurasian snow at different places and in different seasons on Asian summer monsoons in different regions. It also studies the effects of snow on the characteristics of monsoon evolution at different stages. Revealing those complicated relationships is crucial for better understanding the overall variations of the monsoon system and is useful for improving the seasonal forecast of summer monsoons.

Eurasian snow; snow-monsoon relationship; Asian summer monsoon; Tibetan Plateau

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20191025001

(责任编辑:袁东敏)