大气科学学报　2022年　第45卷　第1期:1-13
综 述　http://dqkxxb.cnjournals.org

青藏高原雪盖的季节内变化及其影响

李文铠①*,郭维栋②**
① 南京信息工程大学 气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害教育部重点实验室,江苏 南京 210044;
② 南京大学 大气科学学院,江苏 南京 210023
*联系人,E-mail:wenkai@ nuist.edu.cn
**联系人,E-mail:guowd@ nju.edu.cn

2021-04-17 收稿,2021-05-07 接受
国家自然科学基金资助项目(41905074);第二次青藏高原综合科学考察研究专项(2019QZKK0103);江苏省自然科学基金资助项目(BK20190782)

摘要　回顾了青藏高原雪盖的季节内变化及其影响研究的新进展。高原大部分地区雪盖不稳定且持续时间短,导致高原雪盖具有显著的季节内快速变化特征。局地气温和降水的季节内变化是控制高原雪盖季节内变化的直接原因,这种直接关系是区域大气环流季节内活动的结果。高原雪盖季节内变化还与大尺度大气环流的季节内活动有关,热带季节内振荡、北极涛动和北大西洋涛动引起的大气季节内过程可解释部分高原雪盖季节内变率。高原雪盖季节内变化通过雪-反照率效应迅速对大气施加影响,雪盖造成的冷异常通过大气平流过程影响高原及其下游地区,造成东亚高空急流和东亚大槽增强。由于高原雪盖季节内变化的重要影响,数值预报中高原雪盖的初始场和预报场会影响次季节预报技巧。

关键词
陆气相互作用;
青藏高原;
雪盖;
大气季节内变化;
次季节预报

青藏高原在气候系统中扮演了重要角色。叶笃正先生等青藏高原气象学研究的先驱们率先发现了青藏高原的地形机械作用(Yeh,1950;顾震潮,1951)和热力强迫作用(叶笃正等,1957;叶笃正和高由禧,1979)。这些早期的开创性工作提出了大地形热力作用的概念,为青藏高原气象学奠定了科学基础。青藏高原海拔高、面积大,它作为抬升的大气热源、热汇,直接作用于对流层中、高层大气,改变海陆热力差异状况,深刻影响亚洲地区、乃至全球气候格局(Wu and Zhang,1998;徐祥德等,2002;Duan and Wu,2005;Wu et al.,2007;周秀骥等,2009;刘屹岷等,2017,2020)。

青藏高原热力强迫作用通过陆气耦合过程影响高原上空大气热力状况和大气环流,影响局地及邻近地区的大气环流和天气气候。在东亚季风区,青藏高原热力强迫作用的变化与我国气候异常事件相联系,例如可造成我国降水异常(赵平和陈隆勋,2001;段安民等,2003;Wang et al.,2014;Hu and Duan,2015;Wan et al.,2017;姚秀萍等,2019)。在全球增暖背景下,青藏高原热力状况和热力强迫作用(如气温、大气热源、地表感热通量等)发生了显著变化(Liu and Chen,2000;吴绍洪等,2005;Duan and Wu,2009;阳坤等,2010;You et al.,2011,2016;王美蓉等,2012),对全球增暖响应强烈,是全球气候变化的重要部分,并影响我国气候(丁一汇和张莉,2008;Wang et al.,2008;Liu et al.,2012;李菲等,2021)。

青藏高原还是大气季节内振荡的重要活跃区和来源地,学者们对高原及其临近地区的大气季节内振荡现象及其天气气候效应进行了深入且系统的研究。青藏高原大气季节内振荡,特别是青藏高原大气热源的季节内变化,一方面具有局地活动特征

引用格式:李文铠,郭维栋,2022.青藏高原雪盖的季节内变化及其影响[J].大气科学学报,45(1):1-13.
Li W K,Guo W D,2022.Intraseasonal variability of Tibetan Plateau snow cover and its influence[J].Trans Atmos Sci,45(1):1-13.doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20210417009.(in Chinese).

(徐国强和朱乾根,2000;周兵等,2000;Yang et al.,2017),另一方面还影响高原外地区,造成东亚季风季节内变化(巩远发等,2007;王跃男等,2009;Zhang et al.,2014;Wang and Duan,2015)。青藏高原大气季节内振荡的来源与高原地表加热有关(陈隆勋等,1985;彭玉萍等,2012),也与高原外部的大气季节内振荡信号传播有关(李崇银,2004;Hu et al.,2016;Yang and Li,2017;Li and Mao,2018;陈悦等,2019)。

雪盖是特殊而又重要的大气下垫面,雪盖-大气作用过程是陆-气相互作用过程的重要部分。雪盖的存在显著影响地表热力学特征(Zhang,2005),并通过反照率效应和水文效应来影响大气(段安民等,2018;鲁萌萌等,2020)。随着雪盖资料的丰富和数值模式的发展,大量研究揭示了雪盖对气候的显著影响(杨修群和黄士松,1992;Yang and Xu,1994;陈海山等,1999;Liu and Yanai,2002;Wu and Kirtman,2007;Wu et al.,2009,2011;左志燕等,2011;Li and Wang,2014;陈红,2017;Zhang et al.,2017;Han and Sun,2018;Jia et al.,2018)。雪盖还会影响水文循环,积雪形式的降水累积以及通过融雪释放的径流是水文循环的重要成分(Jeelani et al.,2012;Fayad et al.,2017)。

世界“第三极”——青藏高原,海拔高度高、气温寒冷,具有较高的积雪覆盖率,这与同纬度其他地区有非常明显的差异。超过一个世纪的研究表明,青藏高原雪盖的年际、年代际变化显著影响包括我国在内的亚洲气候。青藏高原雪盖对大气的影响首先是局地效应,进而是非局地效应。青藏高原雪盖通过反照率效应和水文效应影响高原局地地表能量平衡和水循环,进而影响高原热力强迫作用(Li et al.,2001,2018),并影响下游或其他地区的天气和气候。青藏高原雪盖的天气气候效应最早发现于南亚季风(Blanford,1884)。青藏高原雪盖对东亚地区的季风活动、天气和气候的影响非常重要,学者们对此进行了大量的翔实且深入的研究,揭示了青藏高原雪盖对东亚季风的影响(范广洲等,1997;杨秋明,1998;郑益群等,2000;张顺利和陶诗言,2001;Wu and Qian,2003;Zhao et al.,2007;Xu et al.,2012;Wu et al.,2016;Xiao and Duan,2016;Liu et al.,2017;Wang et al.,2017;Wang et al.,2018a;You et al.,2020;Jia et al.,2021)。青藏高原雪盖还有显著的年代际变化(Wang et al.,2018b;Qian et al.,2020),也对我国天气和气候造成影响(Zhang et al.,2004;Wu et al.,2012;Si and Ding,2013)。此外,青藏高原雪盖在水文系统中也起着重要作用,长江、黄河、雅鲁藏布江和湄公河等河流的源头都位于青藏高原,青藏高原雪盖对下游地区的水资源管理至关重要(Immerzeel et al.,2009;Zhang et al.,2012,2013)。

在北半球空间尺度上,雪盖时间变化主要是年循环,大部分地区的积雪是季节性积雪(例如冬季的西伯利亚地区积雪),雪盖变化缓慢、维持时间至少达到一个季节。然而,在季节性积雪区和无积雪区(例如我国华南)的过渡带,雪盖并不像季节性积雪区那样长时间存在,一个季节内的积雪可能会迅速变化(Clark and Serreze,2000;Wang et al.,2015;Suriano and Leathers,2018;Song and Wu,2019;Song et al.,2019a,2019b)。在季节内时间尺度上,一些不稳定积雪区的雪盖并非固定不变。例如,Clark and Serreze(2000)发现东亚雪盖在月时间内有较强变化。Song et al.(2019b)发现中国东部季节性积雪变化的主要时间尺度是30 d内,华东西北部和长江以北积雪变化有10~30 d周期。随着卫星遥感技术发展,青藏高原积雪监测由点拓展到面。利用青藏高原地区高时空分辨率雪盖资料,有学者注意到了青藏高原雪盖的多尺度变化特征(Pu et al.,2007;Shen et al.,2015;Li et al.,2018;车涛等,2019;Song et al.,2019a),表明青藏高原雪盖在季节内时间尺度上有较强变化。

“雪-反照率效应”的机制主要涉及雪盖反射太阳短波辐射过程,而“雪-水文效应”的机制则主要涉及土壤湿度变化、地表径流等过程,由于两者机制的不同,它们发生的时间尺度也不同,反照率效应在雪盖生成时可立即发生,而水文效应则需滞后数天至数月才发生(Xu and Dirmeyer,2013;Lin,2018)。由于“雪-反照率效应”对大气的快速影响,积雪的季节内快速变化对于理解大气中期、延伸期过程非常重要(Clark and Serreze,2000;Li et al.,2018;韩世茹等,2019;Zhang et al.,2019)。青藏高原作为抬升的大气冷热源,其雪盖的快速变化可通过“雪-反照率效应”迅速影响高原和下游大气。此外,青藏高原作为大气季节内活动的重要活跃区和来源地,雪盖的季节内变化可能受到大气季节内振荡的影响,也可能是该地区大气季节内振荡产生的原因。

综上所述,近年来的一些研究揭示出青藏高原雪盖在季节内时间尺度上有较强变化,且对大气活动有重要影响。但是,与被研究较多的青藏高原雪

盖年际变化和长期变化相比，青藏高原积雪的季节内变化仍受到较少关注。本文将梳理季节内时间尺度上青藏高原雪盖快速变化及其影响研究的新进展，并提出一些未来有待研究的科学问题，希望引起更多学者参与解决这些科学问题。

1　青藏高原雪盖季节内变化特征

1.1　时空变化特征

青藏高原积雪并不同于其他中纬度地区或更高纬度地区的积雪，青藏高原积雪较浅且持续时间短（Qin et al.，2006）。青藏高原积雪的空间异质性强，稳定积雪和瞬时性积雪同时存在，年积雪覆盖日数从超过 200 d 到小于 5 d 都存在（车涛等，2019），并且大部分地区是非周期性不稳定积雪区（张廷军和钟歆玥，2014）。即使是在冬季，绝大部分气象台站的积雪覆盖日数都小于15 d（Xu et al.，2017）。这说明青藏高原积雪与冬季高纬度地区较厚的积雪（例如，冬季西伯利亚地区的稳定积雪）不同，青藏高原大部分地区的积雪不能在某个季节稳定维持。

以青藏高原北部部分区域（80°～92°E，33°～38°N）雪盖覆盖率在 2018/2019 年冬季的变化为例（图 1a），该区域平均的积雪覆盖率呈现出明显的季节内变化（根据交互式多传感器冰雪制图系统雪盖分析产品，即 IMS 雪盖资料，Helfrich et al.，2007）。图 1a 中红色实线为 1998—2020 年多年平均的积雪覆盖率，即年循环，可被认为是雪盖变化的气候背景。蓝色实线为逐日积雪覆盖率，对比年循环，该冬季大部分日期的积雪覆盖率高于正常年水平，但也有一些日期的积雪覆盖率低于正常年水平。相对于缓变的年循环，季节内变化成分（图 1a 中黑色实线）导致了最终逐日雪盖覆盖率的剧烈变化，变化周期短于一个季节。季节内变化成分振幅较大，图

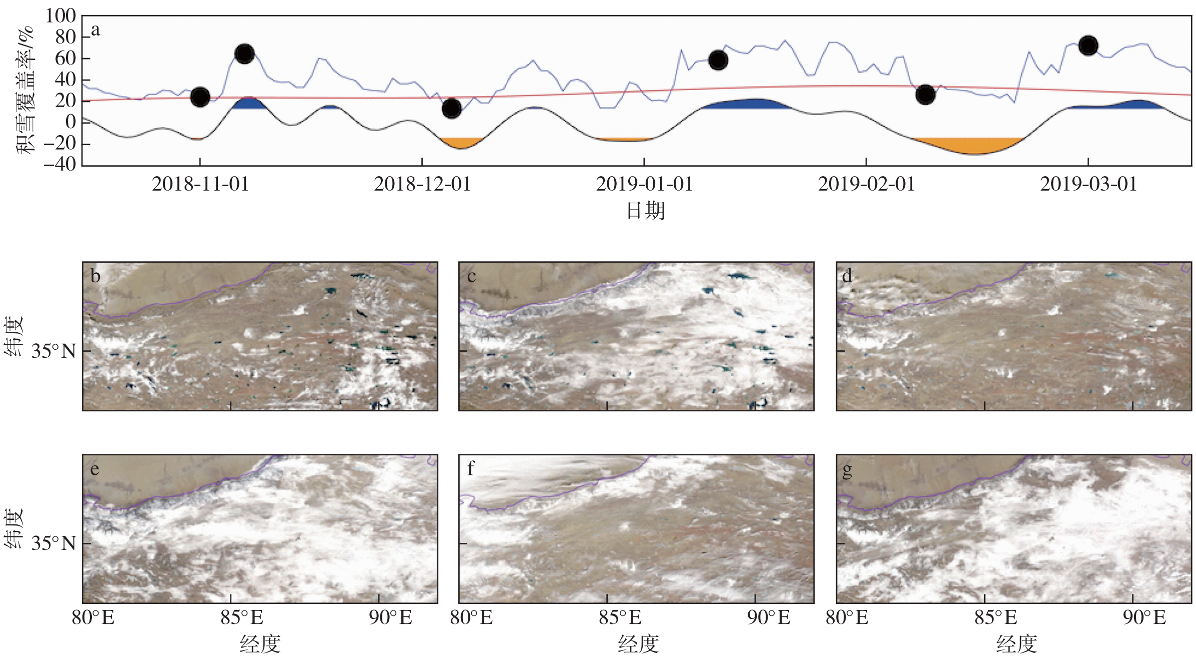

图 1　2018/2019 年冬季青藏高原北部部分区域（80°～92°E，33°～38°N）积雪实况：（a）该区域的积雪覆盖比例（单位：%；蓝线为逐日积雪覆盖比例，红线为年循环，黑实线为季节内分量（10～90 d，通过带通滤波计算得到），蓝色和黄色阴影标记了超过±1 个标准差的日期；黑色实心圆标记的是图 b—g 的日期）；（b—g）Terra/MODIS 真彩色遥感图像（b. 2018 年 11 月 1 日；c.2018 年 11 月 7 日；d.2018 年 12 月 5 日；e.2019 年 1 月 10 日；f.2019 年 2 月 7 日；g.2019 年 3 月 1 日；紫实线标记了 3 000 m 地形高度）

Fig.1　Snow cover over northern Tibetan Plateau（33°—38°N，80°—92°E）during winter 2018/2019：（a）percentage of the snow-covered area from the Interactive Multi-Sensor Snow and Ice Mapping System snow cover analysis products（units：%.Blue line shows the percentage.Black and red lines show the intraseasonal（10—90 d bandpass-filtered）components of snow cover and the annual snow cover cycle，respectively.Blue and yellow shadings mark dates exceeding ±1 standard deviation.Black filled circles mark the selected dates shown in（b—g））；（b—g）the true color Terra/MODIS satellite images（b.November 1，2018；c.November 7，2018；d.December 5，2018；e.January 10，2019；f.February 7，2019；g.March 1，2019.Purple contour marks the altitude of 3 000 m）

1a 中的蓝色阴影和橙色阴影标记了超过正负一个标准差日期，正负一个标准差之间的差异超过 25%，即超过四分之一高原面积。该冬季几个典型日期的 Terra/MODIS 真彩色遥感图像显示：在 2018 年 11 月 1 日（图 1b），该区域仅有少量积雪覆盖区域，地形轮廓、湖泊等清晰可见；仅一周后的 11 月 7 日（图 1c），雪盖面积迅速扩大，该区域较大部分被积雪覆盖，雪覆盖时呈现一定斑驳特征，雪盖区域隐约有裸土的颜色，推断积雪较浅；仅近一个月之后的 12 月 5 日（图 1d），该区域雪盖又基本消失；此后，又发生多次反复剧烈变化（图 1e—g）。这种雪盖的季节内快速变化在整个青藏高原都存在，青藏高原雪盖变化剧烈时，积雪覆盖面积在半个月内的变化可达青藏高原面积的三分之一以上（Li et al.，2018）。

由于青藏高原大部分地区积雪的不稳定存在，其逐日雪盖并非缓慢变化，而是经常快速变化。这导致就青藏高原整体雪盖而言，其变化较为复杂。这种逐日快速变化叠加在青藏高原雪盖的缓变分量（例如年循环、年代际变化、长期变化）之上，使得青藏高原雪盖具有多时间尺度变化特征。通过统计学方法，例如集合经验模态分解（Shen et al.，2015）、滤波（Li et al.，2018，2020a），可研究青藏高原雪盖不同时间尺度变化特征。Li et al.（2020a）研究了青藏高原雪盖的多时间尺度变化特征，并重点关注了季节内时间尺度（10～90 d）变化。结果表明，青藏高原雪盖通常以年循环变化为主，季节内变化次之，而天气尺度变化、季节变化、年际变化和长期变化对青藏高原雪盖的总日变化贡献相对较少。雪盖的季节内变率在青藏高原中部和东部地区占主导地位，占总雪盖变率的 22%～40%。这种快速变化在冷季更加活跃，一些区域（如羌塘高原）的冷季雪盖季节内变化甚至占总日变化的 50%以上。空间上，青藏高原雪盖季节内变化的活跃区分布不均匀。最主要的空间分布特征为：积雪覆盖比例较高的横断山脉西侧、念青唐古拉山、巴颜喀拉山、喜马拉雅山及帕米尔高原地区在冬半年因为积雪稳定存在而季节内变化较弱，但夏半年积雪变得不稳定之后季节内变化较强；积雪覆盖比例较低的青藏高原其他地区（如羌塘高原），在冬半年季节内变化较强，但夏半年由于积雪很少存在而使季节内变化较弱。概括而言，积雪覆盖日数过高（例如 60%比例）或过低（例如 10%比例）不利于雪盖的季节内变化，适当的积雪覆盖日数比例（例如 30%）会导致较强的雪盖季节内变化。

1.2　可能原因

从局地大气环流来看，青藏高原雪盖的季节内变化直接受到区域气温和降水的影响（Li et al.，2020a）。青藏高原雪盖季节内变化与区域近地层气温和降水高度相关，气温和降水是青藏高原雪盖季节内变化的直接控制因子。在季节内时间尺度上，青藏高原雪盖和气温是同期负相关关系，与前期 5 d 异常降水正相关。青藏高原雪盖与气温和降水的直接关系是区域大气环流季节内变化的结果：异常垂直上升运动引起的绝热冷却引起增加青藏高原雪盖的对流层温度冷异常，有利于雪盖增加，垂直下沉运动则相反；区域水汽平流异常、积雪升华造成的局地水汽变化影响降水，并最终影响雪盖。

青藏高原雪盖季节内变化还与大尺度大气环流的季节内振荡有关。Li et al.（2016）发现热带季节内振荡（Madden-Julian Oscillation，MJO）调制青藏高原雪盖。当 MJO 对流负异常活动区（对流正异常活动区）位于海洋性大陆时，即在 MJO 第 8—1 位相（第 4—5 位相），青藏高原雪盖显著增加（减少）。但在随后的 MJO 第 2—3 位相（第 6—7 位相），青藏高原雪盖的变化不显著。MJO 抑制对流（增强对流）激发了 Matsuno-Gill 型响应，在造成的非绝热冷却（加热）中心的西北侧有反气旋（气旋）式异常低层水平风场。当反气旋（气旋）式异常风场的西部的偏南风（偏北风）位于阿拉伯海时会增加（减少）青藏高原来自上游地区的水汽输送。异常的水汽通过平流过程被输送进入青藏高原，造成青藏高原上空水汽的正异常（负异常）。随后青藏高原降水被影响，造成降水的正异常（负异常），并最终影响青藏高原雪盖，造成雪盖增加（减少）。数值试验证实了 MJO 影响青藏高原雪盖的因果性（李文铠，2017）。青藏高原雪盖季节内变化还受到中纬度大气环流的影响（Song et al.，2019a），且调制高原西部和高原东部雪盖季节内变化的大气过程并不相同：青藏高原西部的雪盖季节内变化受到北极涛动引起的中纬度波列调制，而高原东部雪盖季节内变化则与北大西洋涛动引起的副热带波列有关。两种情况中的罗斯贝波列都会导致异常的水汽辐合和上升运动，从而导致青藏高原雪盖正异常。但引起青藏高原西部地区雪盖异常的水汽来自里海，而引起高原东部地区雪盖异常的水汽则来自孟加拉湾。

2　青藏高原雪盖季节内变化的影响

2.1　对大气环流的影响

如引言所述,学者们对青藏高原雪盖的气候效应进行了详实研究,这些研究的着眼点一般是寻找气候预测因子,因而大部分研究是利用某一季节平均的青藏高原雪盖状况做气候异常的归因或预测研究。青藏高原雪盖季节内变化可通过“雪-反照率效应”对大气造成快速影响。Clark and Serreze(2000)发现东亚雪盖在月时间内的较强变化影响大气环流,并提出观点认为东亚积雪的影响对短期和中期天气预报非常重要,而不应仅注意其在长期时间尺度的气候效应问题。但限制于当时的观测资料,该研究并未涉及青藏高原雪盖。

由于青藏高原的特殊位置和地形,高原成为对流层中层的大气下边界,通过陆气相互作用过程影响局地和下游大气环流。青藏高原雪盖在季节内时间尺度上的不稳定存在,使青藏高原成为不稳定的大气变化外强迫热源。Li et al.(2018,2021)发现东亚大气环流对青藏高原雪盖季节内变化的响应是快速的,在一周以内即可完成响应过程(图 2)。在季节内,青藏高原雪盖反复变化,有时偏多,有时偏少,且变化幅度较大(图 2a)。大面积雪盖累积和消融使高原地表在无积雪和有积雪两种状态下反复且快速切换,并即刻改变地表反照率,通过雪-反照率效应影响地表能量平衡(图 2b)。高原雪盖季节内正异常导致高原对大气的异常冷却,反之则是异常加热。雪盖正异常时,雪盖使高原充当大气对流层中部异常冷源,迅速影响局地上空的大气热力状况,造成高原局地上空的冷异常响应(图 2c),气温的冷异

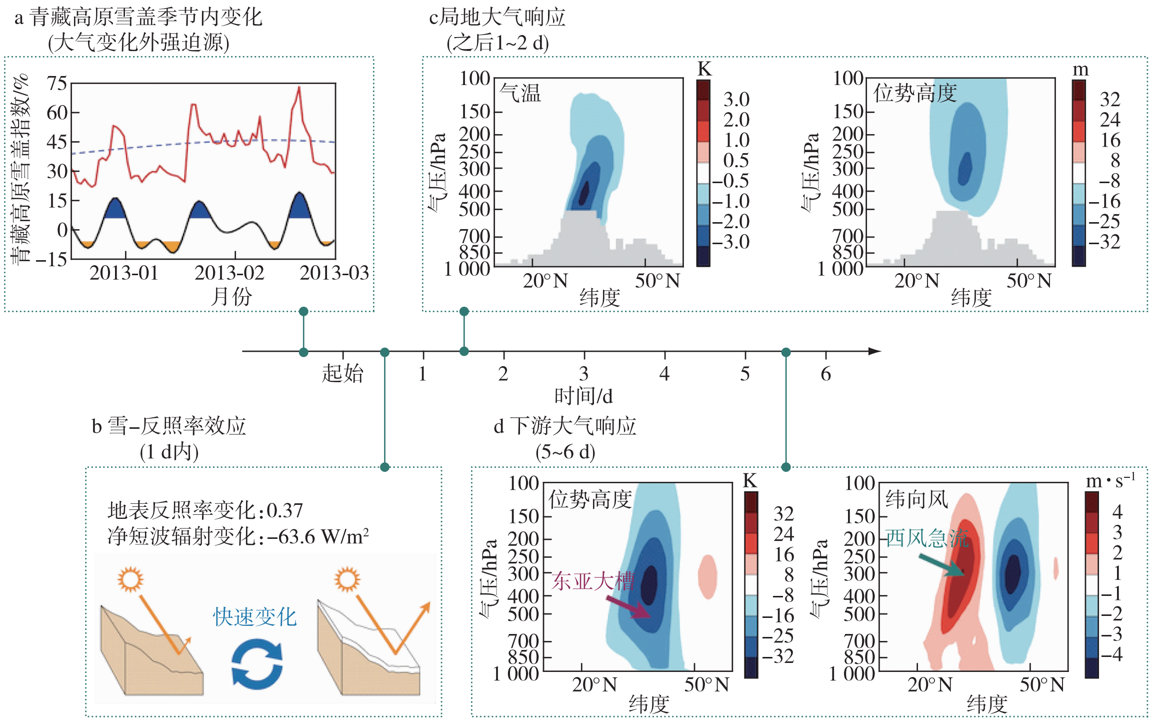

图 2　大气对青藏高原雪盖季节内快速变化响应过程示意图(根据 Li et al.(2018,2021)重新绘制):(a)青藏高原雪盖季节内快速变化(红线为青藏高原积雪覆盖面积比例,蓝虚线为其年循环,黑线为其 10~90 d 分量,蓝色和黄色阴影标记了超过±1 个标准差的日期);(b)青藏高原雪盖引起的雪-反照率效应(造成高原区域平均的地表反照率和净短波辐射滞后 1 d 内的响应);(c)青藏高原雪盖引起的局地气温和位势高度滞后 1~2 d 的响应(85°~105°E 平均,灰色阴影标记了地形高度);(d)高原雪盖引起的东亚大槽和西风急流滞后 5~6 d 的响应(120°~150°E 平均)

Fig.2　Schematic diagram describing the rapid response of atmosphere to the intraseasonal variations of Tibetan Plateau snow cover (TPSC) (modified based on Li et al.(2018,2021)):(a) intraseasonal variation of TPSC (Red line shows percentage of snow-covered area over the Tibetan Plateau.Black line and blue dashed line show the 10—90 d components and the annual cycle of TPSC.Blue and yellow shadings mark dates exceeding ±1 standard deviation);(b) snow-albedo effect induced by TPSC (responses of Tibetan Plateau surface albedo and net shortwave radiation to TPSC with 1 d);(c) responses of temperature and geopotential height over the Tibetan Plateau to TPSC at a lag of 1—2 d (averaged between 85°E and 105°E.Gray areas indicate the mean terrain elevation);(d) responses of East Asian trough and westerly jet to TPSC at a lag of 5—6 d (averaged between 120°E and 150°E)

常响应从高原地面可达对流层上层,并引起局地位势高度负异常,局地大气环流对雪盖异常的响应过程在 2 d 内即可达到最强。高原上空的冷异常响应通过大气水平运动造成的温度平流过程影响下游至西北太平洋地区的大气环流(图 2d),造成下游位势高度负异常,引起东亚大槽和东亚西风急流强度显著增强,下游大气环流对雪盖异常的响应过程在 6 d 内即可达到最强。这表明青藏高原雪盖的季节内变化可迅速影响东亚范围的大气环流活动。

2.2　对次季节预报的影响

天气和气候异常导致的自然灾害对社会经济有严重影响,对天气和气候异常情况进行具有足够预报时效(提前预报时长)的可靠预报有重大社会价值。随着数值天气预报技术和季节动力预报系统的发展,灾害天气的短期和中期(数小时至约两周)确定性预报及气候(3~6 mon)概率预测能力持续提高。但介于两者之间的次季节至季节预报(从两周左右到一个季节的预报)能力薄弱,限制了无缝隙天气-气候预报系统的发展(徐邦琪等,2020;朱跃建等,2020)。

大气、陆地和海洋对不同时效预报的可预报性贡献不同(图 3;WWRP/WCRP,2018)。大气初值对可预报性的贡献在一周内迅速降低,超过两周的更长时间的预报的主要依据是大气与地球系统其他变化较慢成分(如陆地或海洋)之间的相互作用(Mariotti et al.,2018;金蕊等,2020)。海洋是季节以上的气候预测的主要可预报性来源。陆地-大气耦合是次季节到季节预报的关键物理过程之一。特别是对次季节预报而言,陆面状况(包括土壤湿度、积雪、植被状态等)提供了大气变化过程中几天至几周时间尺度的可预报性来源。如果预报系统中对陆面状况的初始化或预报效果不好,则将降低次季节到季节预报技巧(Robertson et al.,2015;Dirmeyer et al.,2019)。

积雪是次季节至季节预报的可预报性来源之一。研究表明,数值模式中的积雪初始场通过积雪的局地辐射反馈、热力学反馈和水文反馈影响数值预报或数值模拟,数值模式中更准确的积雪初始化可以改善次季节至季节预报(Jeong et al.,2013;Lin et al.,2016,2020;Senan et al.,2016;Li et al.,2019;李菲等,2021)。在积雪初始场影响预报技巧的过程中,雪-反照率效应起了关键作用,优化积雪初始化对预报技巧的提高也集中在雪-反照率效应强的地区(Jeong et al.,2013),优化的积雪初始场还通过

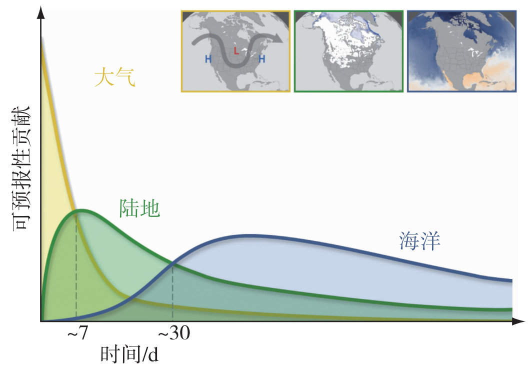

图 3　大气、陆地和海洋可预报性贡献随提前预报时效的变化(陆面在次季节预报中起着重要作用;引自 WWRP/WCRP(2018))

Fig.3　Impact of atmosphere, land and ocean on predictability as a function of lead time (Land plays an important role for subseasonal prediction. Source is WWRP/WCRP(2018))

改进模式中的局地雪-大气耦合过程或对流层和平流层大气环流过程提高预报技巧(Li et al.,2019)。由于青藏高原积雪在整个冰雪圈的重要地位,准确的青藏高原积雪的初始化对次季节至季节预报意义重大。Senan et al.(2016)发现青藏高原地区积雪初始场影响模式对印度夏季风爆发时间的预报技巧。Lin et al.(2016,2020)定量研究了积雪同化对全球模式季节预报的影响,发现使用积雪同化方案将改进改进季节气温预报技巧,这种技巧改进在青藏高原和高纬度地区尤其明显,并且青藏高原地区是优化积雪初始化的关键地区。青藏高原位于中低纬地区,受太阳短波辐射影响强烈,积雪同化通过雪-反照率效应改进该区域净短波辐射和近地层气温预报技巧(Lin et al.,2016);在更长的季节尺度上,冷季进入暖季时青藏高原积雪融化吸收潜热导致的陆面潜热通量影响雪-大气耦合过程,也会造成积雪同化对预报技巧的影响(Lin et al.,2020)。

除积雪的初始场影响次季节预报之外,模式对积雪的预报技巧也会影响模式对其他大气要素的预报技巧,特别是通过雪-气温耦合影响模式对气温的预报技巧(Diro and Lin,2020)。Li et al.(2020b)使用次季节至季节国际合作计划数据库(Vitart et al.,2017)中的欧洲中期天气预报中心(ECMWF)、美国国家环境预报中心(NCEP)和中国气象局(CMA)模式回报数据,比较了这些模式对青藏高原雪盖的预报技巧。这三家业务单位模式对青藏高原雪盖变化能提前 2 周进行有效预报,但对 3 周及之后的青藏高原雪盖则预测能力有限。与观测资料相比,这

三家预报模式都高估了青藏高原雪盖面积,并且高估程度随着预报时效增加(模式积分时间增长)而增加。青藏高原雪盖的这种系统性偏差会影响局地陆面能量平衡,进而影响模式预报的地面气温,造成预报模式中,青藏高原地表气温随着预报时效增加而变得更冷。上述青藏高原雪盖的系统性偏差是由于陆面模式低估了青藏高原雪盖的消融过程,也与三家预报模式都强烈高估青藏高原的降水有关。韩世茹等(2019)也指出,青藏高原积雪对延伸期预报技巧有重要贡献,为东亚延伸期预报的潜在可预报源。这表明除了改进积雪初始化之外,优化积雪预测模型也可以提高次季节预报技巧。模式中积雪参数化方案(积雪模式)的改进,对提高次季节预报技巧至关重要。

3 总结和展望

3.1 总结

从季节平均视角来看,青藏高原积雪大多在秋季建立,并持续到第二年春季。但值得注意的是,与更高纬度地区的积雪相比,青藏高原雪盖明显浅且持续时间短,这种独特的特征会导致高原雪盖在季节内快速变化。局地气温和降水的季节内变化是控制青藏高原雪盖快速变化的直接原因。青藏高原雪盖和同期区域气温负相关、与前期降雪正相关,这种直接关系是区域大气环流季节内变化的结果,包括大气垂直运动引起的异常绝热加热和水汽平流异常、积雪蒸发。此外,青藏高原雪盖季节内变化还与大尺度大气环流的季节内活动有关,MJO、北极涛动和北大西洋涛动引起的大气季节内过程可解释部分青藏高原雪盖季节内变率。

青藏高原雪盖季节内变化通过“雪-反照率效应”对大气造成快速影响。青藏高原雪盖造成的地表反照率快速增强,将迅速调制青藏高原地表热力状况,造成青藏高原对大气加热的冷异常,高原上空立即产生冷却响应,气温在 2 d 内迅速降低,位势高度场相应发生变化。雪盖造成的冷异常通过大气平流过程影响下游地区,造成东亚高空急流和东亚大槽增强,下游大气环流对雪盖异常的响应过程在 6 d 内即可达到最强。由于青藏高原雪盖季节内变化的重要影响,数值预报中青藏高原雪盖的初始场和预报场会影响次季节预报技巧,模式中积雪初始化方案和积雪模式的改进对提高次季节预报技巧至关重要。

3.2 挑战与展望

次季节预报是天气预报和气候预测的间隙,目前气象学界对次季节至季节预报的可预报性来源的认识仍然有限,这对提高次季节预报技巧、实现无缝隙预报造成了一定障碍。陆地表面状态影响地表热量、水分和向大气的辐射通量,并且可能对昼夜周期的演变产生很大影响,进而影响更长的时间尺度。陆地状态与自由大气状态相比发展缓慢,因此陆地状态可以提供从几天到几周的时间尺度的可预报性来源。这种可预报性能够提高次季节至季节预报技巧,但前提是实现模式中准确的陆地初始化状态和陆-气耦合过程(WCRP/WCRP,2018)。

青藏高原高原雪盖面积变化大且不稳定,大气对青藏高原高原雪盖变化响应迅速,数值模式中青藏高原高原雪盖的预报误差将降低次季节预报技巧。而改进数值模式对青藏高原雪盖的模拟和预报能力,则有可能提高次季节至季节预报水平。但想要充分认识青藏高原高原季节内变化,进而改进次季节至季节预报水平,仍存在较大挑战:1)亟需更可靠的积雪观测数据。由于自然环境状况,青藏高原相对缺乏对积雪的现场观测,台站观测积雪的代表性也有限。逐日卫星遥感雪盖产品受云影响较大,依赖准确的去云化算法。观测资料的不确定性给预报模式中积雪的初始化造成一定影响。2)数值模式在青藏高原地区不确定性较大。当前大气环流模式(GCM)往往强烈高估青藏高原的降水(Su et al., 2013; Chen and Frauenfeld, 2014; Zhang and Li, 2016; Zhang et al., 2019)。当前次季节至季节预报业务模式对青藏高原地区降水也强烈高估,并进一步引起了青藏高原雪盖偏差。而青藏高原雪盖偏差又会反过来影响模式对大气的预报(Li et al., 2020b)。改进数值模式在青藏高原地区的预报或模拟能力的挑战非常大,不仅要降低大气模式的在该区域的偏差,也要改进陆面模式在该区域的性能。

WCRP/WCRP 于 2019 年启动了国际次季节至季节预测计划第二阶段,陆面初始化和配置是该阶段的重要子项目,致力于解决三个问题:1)观测系统对陆面初始化和次季节至季节预测有什么影响? 2)次季节至季节预测模式中的陆-气耦合过程表现如何? 3)陆面状态异常如何导致极端天气气候事件? 由于青藏高原热力状况在陆-气系统中重要地位,进一步研究青藏高原雪盖季节内变化的影响因子、青藏高原雪盖季节内变化对大气的影响,研究数值模式中青藏高原雪盖季节内变化的预报误差来源和影响,以至改进数值模式对青藏高原雪盖的初始化和预报方案,是解决这三个问题的关键方向之一。

致谢:图 1 和图 2 使用 NCAR Command Language 6.6.2 版绘制(https://doi.org/10.5065/D6WD3XH5)。IMS 雪盖资料获取自 https://nsidc.org/data/G02156。Terra/MODIS 真彩色遥感图像获取自 https://worldview.earthdata.nasa.gov。

参考文献(References)

Blanford H F,1884.On the connexion of the Himalaya snowfall with dry winds and seasons of drought in India[J].Proc Royal Soc Lond,37(232/234):3-22.

车涛,郝晓华,戴礼云,等,2019.青藏高原积雪变化及其影响[J].中国科学院院刊,34(11):1247-1253. Che T,Hao X H,Dai L Y,et al.,2019.Snow cover variation and its impacts over the Qinghai-Tibet Plateau[J].Bull Chin Acad Sci,34(11):1247-1253.doi:10.16418/j.issn.1000-3045.2019.11.007.(in Chinese).

陈海山,孙照渤,闵锦忠,1999.欧亚大陆冬季积雪异常与东亚冬季风及中国冬季气温的关系[J].南京气象学院学报,22(4):609-615. Chen H S,Sun Z B,Min J Z,1999.The relationships between Eurasian winter snow cover anomaly and EAWM,China winter air temperature[J].J Nanjing Inst Meteor,22(4):609-615.doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.1999.04.007.(in Chinese).

陈红,2017.欧亚大陆积雪对我国春季气候可预报性的影响[J].大气科学,41(4):727-738. Chen H,2017.Impacts of Eurasian snow condition on spring climate predictability over China by a global climate model[J].Chin J Atmos Sci,41(4):727-738.doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1702.16231.(in Chinese).

Chen L,Frauenfeld O W,2014.A comprehensive evaluation of precipitation simulations over China based on CMIP5 multimodel ensemble projections[J].J Geophys Res:Atmos,119(10):5767-5786.doi:10.1002/2013JD021190.

陈隆勋,段庭扬,李维亮,1985.1979 年夏季青藏高原上空大气热源的变化及大气能量收支特性[J].气象学报,43(1):1-12. Chen L X,Duan T Y,Li W L,1985.The variation of the atmospheric heat source and the budget of atmospheric energy on the Qinghai-Xizang Plateau during summer 1979[J].Acta Meteorol Sin,43(1):1-12.(in Chinese).

陈悦,李文铠,郭维栋,2019.青藏高原季风的季节内振荡特征[J].高原气象,38(6):1158-1171. Chen Y,Li W K,Guo W D,2019.Characteristics of the intraseasonal oscillation of Qinghai-Tibetan Plateau monsoon[J].Plateau Meteor,38(6):1158-1171.doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00001.(in Chinese).

Clark M P,Serreze M C,2000.Effects of variations in east Asian snow cover on modulating atmospheric circulation over the North Pacific Ocean[J].J Climate,13(20):3700-3710.doi:10.1175/1520-0442(2000)013<3700:eoviea>2.0.co;2.

丁一汇,张莉,2008.青藏高原与中国其他地区气候突变时间的比较[J].大气科学,32(4):794-805. Ding Y H,Zhang L,2008.Intercomparison of the time for climate abrupt change between the Tibetan Plateau and other regions in China[J].Chin J Atmos Sci,32(4):794-805.(in Chinese).

Dirmeyer P A,Gentine P,Ek M B,et al.,2019.Land surface processes relevant to sub-seasonal to seasonal(S2S) prediction[M]//Sub-Seasonal to Seasonal Prediction.Amsterdam:Elsevier:165-181.doi:10.1016/b978-0-12-811714-9.00008-5.

Diro G T,Lin H,2020.Subseasonal forecast skill of snow water equivalent and its link with temperature in selected SubX models[J].Wea Forecasting,35(1):273-284.doi:10.1175/waf-d-19-0074.1.

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,2009.Weakening trend in the atmospheric heat source over the Tibetan Plateau during recent decades.part II:connection with climate warming[J].J Climate,22(15):4197-4212.doi:10.1175/2009jcli2699.1.

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 A M,Liu Y M,Wu G X,2003.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,33(10):997-1004.doi:10.3969/j.issn.1674-7240.2003.10.011.(in Chinese).

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,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.doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17247.(in Chinese).

范广洲,罗四维,吕世华,1997.青藏高原冬季积雪异常对东、南亚夏季风影响的初步数值模拟研究[J].高原气象,16(2):29-41. Fan G Z,Luo S W,Lü S H,1997.The preliminary numerical experiments of effect of anomalous snow cover over plateau in winter on East and South Asian summer monsoon[J].Plateau Meteor,16(2):29-41.(in Chinese).

Fayad A,Gascoin S,Faour G,et al.,2017.Snow hydrology in Mediterranean mountain regions:a review[J].J Hydrol,551:374-396.doi:10.1016/j.jhydrol.2017.05.063.

巩远发,段廷扬,张菡,2007.夏季亚洲大气热源汇的变化特征及其与江淮流域旱涝的关系[J].大气科学,31(1):89-98. Gong Y F,Duan T Y,Zhang H,2007.Characteristics of the atmospheric heating source/sink over Asia and its relationship with drought/flood in the Yangtze River-Huaihe River Valley[J].Chin J Atmos Sci,31(1):89-98.(in Chinese).

顾震潮,1951.西藏高原对东亚环流的动力影响和它的重要性[J].中国科学,(3):283-303. Gu Z C,1951.The dynamic influence of the Tibetan Plateau on the circulation of East Asia and its importance[J].Sci China Ser A,(3):283-303.(in Chinese).

韩世茹,郑志海,周须文,等,2019.青藏高原积雪深度对延伸期预报技巧的影响[J].大气科学,43(1):142-154. Han S R,Zheng Z H,Zhou X

W,et al.,2019.Influence of the Tibetan Plateau snow depth on the extended-range prediction skill[J].Chin J Atmos Sci,43(1):142-154.doi:10. 3878/j.issn.1006-9895. 1803. 17252.(in Chinese).

Han S Z,Sun J Q,2018.Impacts of autumnal Eurasian snow cover on predominant modes of boreal winter surface air temperature over Eurasia[J].J Geophys Res:Atmos,123(18):10076-10091.doi:10. 1029/2018JD028443.

Helfrich S R,McNamara D,Ramsay B H,et al.,2007.Enhancements to,and forthcoming developments in the interactive multisensor snow and ice mapping system(IMS)[J].Hydrol Process,21(12):1576-1586.doi:10. 1002/hyp.6720.

Hu J,Duan A M,2015.Relative contributions of the Tibetan Plateau thermal forcing and the Indian Ocean Sea surface temperature basin mode to the interannual variability of the East Asian summer monsoon[J].Climate Dyn,45(9/10):2697-2711.doi:10. 1007/s00382-015-2503-7.

Hu W T,Duan A M,Li Y,et al.,2016.The intraseasonal oscillation of eastern Tibetan Plateau precipitation in response to the summer Eurasian wave train[J].J Climate,29(20):7215-7230.doi:10. 1175/jcli-d-15-0620. 1.

Immerzeel W W,Droogers P,Jong S M D,et al.,2009.Large-scale monitoring of snow cover and runoff simulation in Himalayan River Basins using remote sensing[J].Remote Sens Environ,113(1):40-49.doi:10. 1016/j.rse.2008. 08. 010.

Jeelani G,Feddema J J,van der Veen C J,et al.,2012.Role of snow and glacier melt in controlling river hydrology in Liddar watershed(western Himalaya) under current and future climate[J].Water Resour Res,48(12):W12508.doi:10. 1029/2011WR011590.

Jeong J H,Linderholm H W,Woo S H,et al.,2013.Impacts of snow initialization on subseasonal forecasts of surface air temperature for the cold season[J].J Climate,26(6):1956-1972.doi:10. 1175/jcli-d-12-00159. 1.

Jia X J,Cao D R,Ge J W,et al.,2018.Interdecadal change of the impact of Eurasian snow on spring precipitation over southern China[J].J Geophys Res:Atmos,123(18):10092-10108.doi:10. 1029/2018JD028612.

Jia X J,Zhang C,Wu R G,et al.,2021.Influence of Tibetan Plateau autumn snow cover on interannual variations in spring precipitation over southern China[J].Clim Dyn,56(3/4):767-782.doi:10. 1007/s00382-020-05497-8.

金蕊,余晖,吴志伟,等,2020.次季节-季节尺度热带气旋活动研究和预测技术进展[J].大气科学学报,43(1):238-254. Jin R,Yu H,Wu Z W,et al.,2020.Sub-seasonal to seasonal prediction of tropical cyclone activity in the western North Pacific:a review[J].Trans Atmos Sci,43(1):238-254.doi:10. 13878/j.cnki.dqkxxb.20191025006.(in Chinese).

李崇银,2004.大气季节内振荡研究的新进展[J].自然科学进展,14(7):734-741. Li C Y,2004.New progress in the study of atmospheric intraseasonal oscillation[J].Prog Nat Sci,14(7):734-741.(in Chinese).

Li F,Wang H J,2014.Autumn Eurasian snow depth,autumn Arctic sea ice cover and East Asian winter monsoon[J].Int J Climatol,34(13):3616-3625.doi:10. 1002/joc.3936.

Li F,Orsolini Y J,Keenlyside N,et al.,2019.Impact of snow initialization in subseasonal-to-seasonal winter forecasts with the Norwegian climate prediction model[J].J Geophys Res:Atmos,124(17/18):10033-10048.doi:10. 1029/2019JD030903.

李菲,郜永祺,万欣,等,2021.全球变暖与地球“三极”气候变化[J].大气科学学报,44(1):1-11. Li F,Gao Y Q,Wan X,et al.,2021.Earth's “three-poles” climate change under global warming[J].Trans Atmos Sci,44(1):1-11.doi:10. 13878/j.cnki.dqkxxb.20201031003.(in Chinese).

Li G P,Lu J H,Jin B L,et al.,2001.The effects of anomalous snow cover of the Tibetan Plateau on the surface heating[J].Adv Atmos Sci,18(6):1207-1214.doi:10. 1007/s00376-001-0034-0.

Li J Y,Mao J Y,2018.The impact of interactions between tropical and midlatitude intraseasonal oscillations around the Tibetan Plateau on the 1998 Yangtze floods[J].Quart J Roy Meteor Soc,144(713):1123-1139.doi:10. 1002/qj.3279.

李文铠,2017.青藏高原地表热力状况的气候效应及其对热带大气强迫的响应[D].南京:南京大学. Li W K,2017.Climate effects and response to tropical atmospheric forcing of the surface thermal condition over the Tibetan Plateau.Nanjing:Nanjing University.(in Chinese).

Li W K,Guo W D,Hsu P C,et al.,2016.Influence of the Madden-Julian oscillation on Tibetan Plateau snow cover at the intraseasonal time-scale[J].Sci Rep,6(1):1-9.doi:10. 1038/srep30456.

Li W K,Guo W D,Qiu B,et al.,2018.Influence of Tibetan Plateau snow cover on East Asian atmospheric circulation at medium-range time scales[J].Nat Commun,9(1):1-9.doi:10. 1038/s41467-018-06762-5.

Li W K,Qiu B,Guo W D,et al.,2020a.Intraseasonal variability of Tibetan Plateau snow cover[J].Int J Climatol,40(7):3451-3466.doi:10. 1002/joc.6407.

Li W K,Hu S Z,Hsu P C,et al.,2020b.Systematic bias of Tibetan Plateau snow cover in subseasonal-to-seasonal models[J].Cryosphere,14(10):3565-3579.doi:10. 5194/tc-14-3565-2020.

Li W K,Qiu B,Guo W D,et al.,2021.Rapid response of the East Asian trough to Tibetan Plateau snow cover[J].Int J Climatol,41(1):251-261.doi:10. 1002/joc.6618.

Lin P R,2018.Towards actionable climate and flood prediction:understanding and advancing land surface modeling with enriched geospatial information[D].Austin:The University of Texas.

Lin P R,Wei J F,Yang Z L,et al.,2016.Snow data assimilation-constrained land initialization improves seasonal temperature prediction[J].Geophys Res Lett,43(21):11423-11432.doi:10. 1002/2016GL070966.

Lin P R,Yang Z L,Wei J F,et al.,2020.Assimilating multi-satellite snow data in ungauged Eurasia improves the simulation accuracy of Asian monsoon seasonal anomalies[J].Environ Res Lett,15(6):064033.doi:10. 1088/1748-9326/ab80ef.

Liu S Z,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.doi:10.1175/jcli-d-17-0117.1.

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 X D,Yanai M,2002.Influence of Eurasian spring snow cover on Asian summer rainfall[J].Int J Climatol,22(9):1075-1089.doi:10.1002/joc.784.

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.

刘屹岷,王子谦,卓海峰,等,2017.夏季亚洲大地形双加热及近对流层顶位涡强迫的激发Ⅱ:伊朗高原-青藏高原感热加热[J].中国科学(地球科学),47(3):354-366. 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].Sci Sin Terrae,47(3):354-366.doi:10.1360/N072016-00080.(in Chinese).

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).

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).

Mariotti A,Ruti P M,Rixen M,2018.Progress in subseasonal to seasonal prediction through a joint weather and climate community effort[J].Npj Clim Atmos Sci,1:4.doi:10.1038/s41612-018-0014-z.

彭玉萍,何金海,陈隆勋,等,2012.1981—2000年夏季青藏高原大气热源低频振荡特征及其影响[J].热带气象学报,28(3):330-338. Peng Y P,He J H,Chen L X,et al.,2012.A study on the characteristics and effect of the low-frequency oscillation of the atmospheric heat source over the eastern Tibetan Plateau from 1981 to 2000[J].J Trop Meteor,28(3):330-338.doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2012.03.005.(in Chinese).

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 Q F,Jia X J,Wu R G,2020.On the interdecadal change in the interannual variation in autumn snow cover over the central eastern Tibetan Plateau in the mid-1990s[J].J Geophys Res:Atmos,125(16):e2020JD032685.doi:10.1029/2020JD032685.

Qin D H,Liu S Y,Li P J,2006.Snow cover distribution,variability,and response to climate change in western China[J].J Climate,19(9):1820-1833.doi:10.1175/jcli3694.1.

Robertson A W,Kumar A,Peña M,et al.,2015.Improving and promoting subseasonal to seasonal prediction[J].Bull Amer Meteor Soc,96(3):ES49-ES53.doi:10.1175/bams-d-14-00139.1.

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].Climate Dyn,47(9/10):2709-2725.doi:10.1007/s00382-016-2993-y.

Shen S S P,Yao R Z,Ngo J,et al.,2015.Characteristics of the Tibetan Plateau snow cover variations based on daily data during 1997—2011[J].Theor Appl Climatol,120(3/4):445-453.doi:10.1007/s00704-014-1185-0.

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.doi:10.1175/jcli-d-12-00587.1.

Song L,Wu R G,2019.Intraseasonal snow cover variations over western Siberia and associated atmospheric processes[J].J Geophys Res:Atmos,124(16):8994-9010.doi:10.1029/2019JD030479.

Song L,Wu R G,An L,2019a.Different sources of 10-to 30-day intraseasonal variations of autumn snow over western and eastern Tibetan Plateau[J].Geophys Res Lett,46(15):9118-9125.doi:10.1029/2019GL083852.

Song L,Wu R G,Zhu J L,2019b.Processes of intraseasonal snow cover variations over the eastern China during boreal winter[J].Atmos Sci Lett,20(5):e901.doi:10.1002/asl.901.

Su F G,Duan X L,Chen D L,et al.,2013.Evaluation of the global climate models in the CMIP5 over the Tibetan Plateau[J].J Climate,26(10):3187-3208.doi:10.1175/jcli-d-12-00321.1.

Suriano Z J,Leathers D J,2018.Great lakes basin snow-cover ablation and synoptic-scale circulation[J].J Appl Meteorol Climatol,57(7):1497-1510.doi:10.1175/jamc-d-17-0297.1.

Vitart F,Ardilouze C,Bonet A,et al.,2017.The subseasonal to seasonal(S2S) prediction project database[J].Bull Amer Meteor Soc,98(1):163-173.doi:10.1175/bams-d-16-0017.1.

Wan B C,Gao Z Q,Chen F,et al.,2017.Impact of Tibetan Plateau surface heating on persistent extreme precipitation events in southeastern China[J].Mon Wea Rev,145(9):3485-3505.doi:10.1175/mwr-d-17-0061.1.

Wang B,Bao Q,Hoskins B,et al.,2008.Tibetan Plateau warming and precipitation changes in East Asia[J].Geophys Res Lett,35(14):L14702.doi:10.1029/2008gl034330.

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(3):885-903.doi:10.1175/jcli-d-16-0041.1.

Wang M R,Duan A M,2015.Quasi-biweekly oscillation over the Tibetan Plateau and its link with the Asian summer monsoon[J].J Climate,28(12):4921-4940.doi:10. 1175/jcli-d-14-00658. 1.

王美蓉,周顺武,段安民,2012.近 30 年青藏高原中东部大气热源变化趋势:观测与再分析资料对比[J].科学通报,57(2):178-188. Wang M R,Zhou S W,Duan A M,2012.Trend in the atmospheric heat source over the central and eastern Tibetan Plateau during recent decades:comparison of observations and reanalysis data[J].Chin Sci Bull,57(2):178-188.doi:10. 1007/s11434-011-4838-8.(in Chinese).

Wang T,Peng S S,Ottlé C,et al.,2015.Spring snow cover deficit controlled by intraseasonal variability of the surface energy fluxes[J].Environ Res Lett,10(2):024018.doi:10. 1088/1748-9326/10/2/024018.

王跃男,陈隆勋,何金海,等,2009.夏季青藏高原热源低频振荡对我国东部降水的影响[J].应用气象学报,20(4):419-427. Wang Y N,Chen L X,He J H,et al.,2009.Effect of summer heat source low-frequency oscillation over the Tibetan Plateau on precipitation in eastern China[J].J Appl Meteorol Sci,20(4):419-427.doi:10. 3969/j.issn.1001-7313. 2009. 04. 005.(in Chinese).

Wang Z B,Wu R G,Chen S F,et al.,2018a.Influence of western Tibetan Plateau summer snow cover on East Asian summer rainfall[J].J Geophys Res:Atmos,123(5):2371-2386.doi:10. 1002/2017JD028016.

Wang Z B,Wu R G,Huang G,2018b.Low-frequency snow changes over the Tibetan Plateau[J].Int J Climatol,38(2):949-963.doi:10. 1002/joc.5221.

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.

Wu B Y,Yang K,Zhang R H,2009.Eurasian snow cover variability and its association with summer rainfall in China[J].Adv Atmos Sci,26(1):31-44.doi:10. 1007/s00376-009-0031-2.

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 G X,Liu Y M,Zhang Q,et al.,2007.The influence of mechanical and thermal forcing by the Tibetan Plateau on Asian climate[J].J Hydrometeorol,8(4):770-789.doi:10. 1175/jhm609. 1.

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.doi:10. 1175/2011jcli4236. 1.

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.doi:10. 1175/jcli4068. 1.

吴绍洪,尹云鹤,郑度,等,2005.青藏高原近 30 年气候变化趋势[J].地理学报,60(1):3-11. Wu S H,Yin Y H,Zheng D,et al.,2005.Climate changes in the Tibetan Plateau during the last three decades[J].Acta Geogr Sin,60(1):3-11.doi:10. 3321/j.issn:0375-5444. 2005. 01. 001.(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.doi:10. 1175/1520-0442(2003)016<2038:trbttw>2. 0.co;2.

Wu Z W,Jiang Z H,Li J P,et al.,2012.Possible association of the western Tibetan Plateau snow cover with the decadal to interdecadal variations of Northern China heatwave frequency[J].Climate Dyn,39(9/10):2393-2402.doi:10. 1007/s00382-012-1439-4.

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.doi:10. 1007/s00382-015-2775-y.

WWRP/WCRP,2018.Sub-seasonal to seasonal prediction project(S2S) phase II proposal[R].WWRP 2018-4 WCRP Report No.11/2018.

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.

徐邦琪,臧钰歆,朱志伟,等,2020.时空投影模型(STPM)的次季节至季节(S2S)预测应用进展[J].大气科学学报,43(1):212-224. Hsu P C,Zang Y X,Zhu Z W,et al.,2020.Subseasonal-to-seasonal(S2S) prediction using the spatial-temporal projection model(STPM)[J].Trans Atmos Sci,43(1):212-224.(in Chinese).

徐国强,朱乾根,2000. 1998 年青藏高原大气低频振荡的结构特征分析[J].南京气象学院学报,23(4):505-513. Xu G Q,Zhu Q G,2000. Analysis of features of atmospheric LFO structures over the Tibetan Plateau in 1998[J].J Nanjing Inst Meteor,23(4):505-513.doi:10. 13878/j.cnki.dqkxxb.2000. 04. 006.(in Chinese).

Xu L,Dirmeyer P,2013.Snow-atmosphere coupling strength.part II:albedo effect versus hydrological effect[J].J Hydrometeorol,14(2):404-418.doi:10. 1175/jhm-d-11-0103. 1.

Xu W F,Ma L J,Ma M N,et al.,2017.Spatial-temporal variability of snow cover and depth in the Qinghai-Tibetan Plateau[J].J Climate,30(4):1521-1533.doi:10. 1175/jcli-d-15-0732. 1.

徐祥德,陶诗言,王继志,等,2002.青藏高原-季风水汽输送“大三角扇型”影响域特征与中国区域旱涝异常的关系[J].气象学报,60(3):257-266. Xu X D,Tao S Y,Wang J Z,et al.,2002.The relationship between water vapor transport features of Tibetan Plateau-monsoon “large triangle” affecting region and drought-flood abnormality of China[J].Acta Meteorol Sin,60(3):257-266.(in Chinese).

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.

Yang J,Bao Q,Wang B,et al.,2017.Characterizing two types of transient intraseasonal oscillations in the eastern Tibetan Plateau summer rainfall[J].

Climate Dyn,48(5/6):1749-1768.doi:10. 1007/s00382-016-3170-z.

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,40(7):923-932.　Yang K,Guo X F,Wu B Y,2010.Recent trends in surface sensible heat flux on the Tibetan Plateau[J].Sci China,40(7):923-932.(in Chinese).

杨秋明,1998.冬半年欧亚雪盖变化对东亚环流的影响[J].气象学报,56(5):116-123.　Yang Q M,1998.The influence of the variations of snow cover in Eurasia for half years winter on the circulations over the East Asia[J].Acta Meteorol Sin,56(5):116-123.(in Chinese).

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.doi:10. 1002/joc.3370140704.

Yang S Y,Li T,2017.Causes of intraseasonal diabatic heating variability over and near the Tibetan Plateau in boreal summer[J].Clim Dyn,49(7/8):2385-2406.doi:10. 1007/s00382-016-3463-2.

杨修群,黄士松,1992.欧亚雪盖的气候效应及其在冬季风形成中的作用[J].南京大学学报(自然科学版),28(2):326-335.　Yang X Q,Huang S S,1992.Climatic effects of Eurasian snow cover and their impact on the formation of winter monsoon circulation[J].J Nanjing Univ Nat Sci,28(2):326-335.(in Chinese).

姚秀萍,张硕,闫丽朱,2019.青藏高原大气热源及其影响的研究进展[J].大气科学学报,42(5):641-651.　Yao X P,Zhang S,Yan L Z,2019.Research progress on the atmospheric heat source over the Tibetan Plateau and its influence[J].Trans Atmos Sci,42(5):641-651.doi:10. 13878/j.cnki.dqkxxb.20181227001.(in Chinese).

叶笃正,高由禧,1979.青藏高原气象学[M].北京:科学出版社.　Ye D Z,Gao Y X,1979.Meteorology of the Tibetan Plateau Plateau[M].Beijing:Science Press.(in Chinese).

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 D Z,Luo S W,Zhu B Z,1957.The wind structure and heat balance in the lower troposphere over Tibetan Plateau and its surrounding[J].Acta Meteorol Sinica,28(2):108-121.(in Chinese).

Yeh T C,1950.The circulation of the high troposphere over China in the winter of 1945—1946[J].Tellus,2(3):173-183.doi:10. 3402/tellusa.v2i3. 8548.

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].Clim Res,46(2):171-183.doi:10. 3354/cr00985.

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.

You Q L,Wu T,Shen L C,et al.,2020.Review of snow cover variation over the Tibetan Plateau and its influence on the broad climate system[J].Earth Sci Rev,201:103043.doi:10. 1016/j.earscirev.2019. 103043.

Zhang F,Ren H,Miao L J,et al.,2019.Simulation of daily precipitation from CMIP5 in the Qinghai-Tibet plateau[J].SOLA,15:68-74.doi:10. 2151/sola.2019-014.

Zhang G Q,Xie H J,Yao T D,et al.,2012.Snow cover dynamics of four lake basins over Tibetan Plateau using time series MODIS data(2001—2010)[J].Water Resour Res,48(10):2012WR011971.doi:10. 1029/2012wr011971.

Zhang L L,Su F G,Yang D Q,et al.,2013.Discharge regime and simulation for the upstream of major rivers over Tibetan Plateau[J].J Geophys Res Atmos,118(15):8500-8518.doi:10. 1002/jgrd.50665.

Zhang P F,Li G P,Fu X,et al.,2014.Clustering of Tibetan Plateau vortices by 10—30 day intraseasonal oscillation[J].Mon Wea Rev,142(1):290-300.doi:10. 1175/mwr-d-13-00137. 1.

Zhang R N,Zhang R H,Zuo Z Y,2017.Impact of Eurasian spring snow decrement on East Asian summer precipitation[J].J Climate,30(9):3421-3437.doi:10. 1175/jcli-d-16-0214. 1.

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.The influences of snow cover over the Tibetan Plateau on Asian summer monsoon[J].Chin J Atmos Sci,25(3):372-390.(in Chinese).

Zhang T J,2005.Influence of the seasonal snow cover on the ground thermal regime:an overview[J].Rev Geophys,43(4):RG4002.doi:10. 1029/2004RG000157.

张廷军,钟歆玥,2014.欧亚大陆积雪分布及其类型划分[J].冰川冻土,36(3):481-490.　Zhang T J,Zhong X Y,2014.Classification and regionalization of the seasonal snow cover across the Eurasian Continent[J].J Glaciol Geocryol,36(3):481-490.doi:10. 7522/j. issn. 1000-0240. 2014. 0058.(in Chinese).

Zhang Y,Li J,2016.Impact of moisture divergence on systematic errors in precipitation around the Tibetan Plateau in a general circulation model[J].Clim Dyn,47(9/10):2923-2934.doi:10. 1007/s00382-016-3005-y.

Zhang Y S,Li T,Wang B,2004.Decadal change of the spring snow depth over the Tibetan Plateau:the associated circulation and influence on the East Asian summer monsoon[J].J Climate,17(14):2780-2793.doi:10. 1175/1520-0442(2004)017<2780:dcotss>2. 0.co;2.

Zhang Y,Zou T,Xue Y K,2019.An arctic-Tibetan connection on subseasonal to seasonal time scale[J].Geophys Res Lett,46(5):2790-2799.doi:10. 1029/2018gl081476.

赵平,陈隆勋,2001. 35 年来青藏高原大气热源气候特征及其与中国降水的关系[J].中国科学 D 辑,31(4):327-332.　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,31(4):327-332.doi:10. 3969/j.issn.1674-7240. 2001. 04. 009.(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.doi:10. 1175/jcli4205. 1.

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,24(6):761-774.(in Chinese).

周兵,何金海,徐海明,2000.青藏高原气象要素场低频特征及其与夏季区域降水的关系[J].南京气象学院学报,23(1):93-100. Zhou B,He J H,Xu H M,2000.LFO characteristics of meteorological elements over Tibetan Plateau and the relations with regional summer rainfall[J].J Nanjing Inst Meteor,23(1):93-100.doi:10. 13878/j.cnki.dqkxxb.2000. 01. 015.(in Chinese).

周秀骥,赵平,陈军明,等,2009.青藏高原热力作用对北半球气候影响的研究[J].中国科学(地球科学),39(11):1473-1486. Zhou X J,Zhao P,Chen J M,et al.,2009.Impacts of thermodynamic processes over the Plateau on the Northern Hemispheric climate[J].Sci Sin Terrae,39(11):1473-1486.doi:10. 1007/s11430-009-0194-9.(in Chinese).

朱跃建,2020.基于最新全球集合预报系统的可预报性评估[J].大气科学学报,43(1):193-200. Zhu Y J,2020.An assessment of predictability through state-of-the-art global ensemble forecast system[J].Trans Atmos Sci,43(1):193-200.doi:10. 13878/j.cnki.dqkxxb.20191101013.(in Chinese).

左志燕,张人禾,武炳义,2011. 1979—2004 年中国大陆南方地区春季降水的年代际变化特征及其与欧亚大陆积雪的联系[J].中国科学(地球科学),41(11):1688-1696. Zuo Z Y,Zhang R H,Wu B Y,2011.Inter-decadal variations of springtime rainfall over Southern China mainland for 1979—2004 and its relationshio with Eurasian snow[J].Sci Sin Terrae,41(11):1688-1696.doi:10. 1007/s11430-011-4337-4.(in Chinese).

Intraseasonal variability of Tibetan Plateau snow cover and its influence

LI Wenkai[1],GUO Weidong[2]

[1] *Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters(CIC-FEMD)/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change(ILCEC)/Key Laboratory of Meteorological Disaster,Ministry of Education(KLME),Nanjing University of Information Science and Technology,Nanjing* 210044,*China*;

[2] *School of Atmospheric Sciences,Nanjing University,Nanjing* 210023,*China*

This paper reviews recent progresses in the study on intraseasonal variability of Tibetan Plateau snow cover (TPSC) and its influence.TPSC is unstable and frequently in short duration.Such unique characteristics may lead to fast variation in TPSC within a seasonal period.Surface air temperature (SAT) and precipitation are factors governing TPSC variation on the intraseasonal time scale.The direct relationships of TPSC with SAT and precipitation are the result of intraseasonal variation in regional atmospheric circulation.The intraseasonal variation of TPSC is also related to the large-scale atmospheric circulation.The Madden-Julian Oscillation,the Arctic Oscillation and the North Atlantic Oscillation can explain some of the intraseasonal variability of TPSC.The atmospheric response to intraseasonal variability of TPSC is rapidly through snow-albedo effect.The intraseasonal variability of TPSC influences regional and downstream atmospheres,which leads to changes in East Asian trough and westerly jet.Such variations of atmosphere result from anomalous thermal advection from the Tibetan Plateau forced by TPSC.Due to the significant influence of intraseasonal variability of TPSC,better TPSC initialization and forecast can improve subseasonal forecast.

land-atmosphere interaction; Tibetan Plateau; snow cover; intraseasonal variation of atmosphere; subseasonal forecast

doi:10. 13878/j.cnki.dqkxxb.20210417009

(责任编辑:张福颖)