

许立言, 武炳义. 2012. 欧亚大陆春季融雪量与东亚夏季风的可能联系 [J]. 大气科学, 36 (6): 1180–1190, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12001. Xu Liyan, Wu Bingyi. 2012. Linkage between spring Eurasian snowmelt and East Asian summer monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (6): 1180–1190.

欧亚大陆春季融雪量与东亚夏季风的可能联系

许立言^{1,2} 武炳义²

1 南京信息工程大学, 南京 210044

2 中国气象科学研究院, 北京 100081

摘 要 通过对观测资料的分析, 本文研究了春季欧亚大陆融雪量与东亚夏季风的关系, 并初步讨论了其可能联系机制。研究表明, 春季融雪量 EOF (Empirical Orthogonal Function) 第一模态表现出年代际变化特征, 这与东亚夏季风和中国夏季降水的年代际转型具有非常好的一致性。而 EOF 第二模态与东亚夏季风在年际尺度上具有同位相变化关系, 当春季融雪量在东西伯利亚和巴尔喀什湖附近异常偏多时, 后期在东亚地区容易出现由高纬至低纬的“负—正—负”经向波列结构。融雪量异常偏少时, 情况则相反。文中初步分析了春季融雪量异常与后期夏季东亚地区大气环流出现经向波列结构的可能联系机制, 指出东西伯利亚以及巴尔喀什湖附近异常偏多的春季融雪量能够在该地区促使位势高度场表现为正异常, 随着时间的演变, 巴尔喀什湖附近地区的高压向东移动发展, 东西伯利亚地区的高压一部分向低纬移动, 可能造成夏季东亚地区的经向波列结构, 进而对东亚的天气和气候产生影响。

关键词 欧亚大陆融雪量 东亚夏季风 中国夏季降水 物理机制

文章编号 1006-9895(2012)06-1180-11

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12001

Linkage between Spring Eurasian Snowmelt and East Asian Summer Monsoon

XU Liyan^{1,2} and WU Bingyi²

1 *Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044*

2 *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*

Abstract The effects of spring Eurasian snowmelt on the East Asian summer monsoon (EASM) and summer precipitation in China, in addition to a possibly related physical mechanism, were investigated by using observation data. The leading mode of spring Eurasian snowmelt showed decadal variation, which has good agreement with the EASM interdecadal transition and Chinese summer rainfall. In addition, the second mode of the snowmelt variability correlates positively to EASM variability. When the snowmelt in East Siberia near Balkhash Lake increases in the spring, the EASM tends to appear in a negative–positive–negative meridional wave train structure from high to low latitudes in the summer. When snowmelt decreases, opposite conditions appear. The link mechanism of the spring snowmelt and summer atmospheric circulation in East Asia may be attributed to positive feedback between abnormal snow and atmospheric thickness anomalies in the same regions during the same period, which promotes two high-pressure systems.

收稿日期 2011-12-31, 2012-05-07 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 40921003、40875052, 国家公益性行业(气象)专项项目 GYHY200906017, 国家重点基础研究发展规划项目 2007CB411505

作者简介 许立言, 1982 年出生, 博士研究生, 主要研究欧亚积雪对东亚季风的影响。E-mail: xuliyan_008@163.com

通讯作者 武炳义, E-mail: wby@cma.gov.cn

Subsequently, the Balkhash Lake high-pressure system develops eastward, and part of the East Siberian high pressure system moves to lower latitudes. As a result, atmospheric circulations in East Asia may form the meridional wave train structure in the summer, which may lead to an anomalous change in the East Asian summer weather and climate.

Key words Eurasian snowmelt, East Asian summer monsoon, Chinese summer rainfall, physical mechanism

1 引言

自从 1884 年 Blanford (1884) 首次提出喜马拉雅山地区积雪异常可能会影响印度季风的观点以来,大量的研究表明欧亚大陆地区积雪异常与亚洲季风区的天气、气候异常存在密切联系。国际上的研究大多关注欧亚大陆积雪异常与印度夏季风的关系 (Kripalani et al., 2003; Robock et al., 2003; Fasullo, 2004; Dash et al., 2005; Singh and Oh, 2005), 而我国学者则重点对青藏高原积雪异常与东亚夏季风的联系进行了研究 (陈丽娟等, 1996; 范广洲等, 1997; 陈烈庭, 1998; Chen and Wu, 2000; 陈乾金等, 2000; 郑益群等, 2000; 张顺利和陶诗言, 2001; Qian et al., 2003; Wu and Qian, 2003; Zhang et al., 2004; Zhao et al., 2007), 关于欧亚大陆积雪异常影响东亚夏季风的工作则相对偏少。近些年的研究发现: 前期冬、春季欧亚大陆积雪异常对后期东亚地区天气、气候的变化有显著影响 (赵溱, 1984; Yang and Xun, 1994; Sankar et al., 1996; Dong and Valdes, 1998; 杨秋明, 1998; 陈兴芳和宋文玲, 2000a, 2000b; Wu and Kirtman, 2007; Wu et al., 2009; 穆松宁和周广庆, 2010; Matsumura et al., 2010; 许立言和武炳义, 2012a, 2012b)。但是在这些研究中由于不同的作者所用资料和研究方法不同, 研究结果存在较大的差别, 缺乏一致性。

研究欧亚大陆积雪异常与季风异常之间的联系机制, 对于理解东亚季风变化的产生原因, 预测东亚地区天气、气候的变化规律具有重要的科学意义。但是由于欧亚大陆积雪分布广阔、持续作用时间较长、时空分布特征比较复杂, 早期的研究结果大多只是定性说明积雪异常通过反照率效应和积雪水文效应改变海陆热力差异, 进而影响季风强度的变化 (Hahn and Shukla, 1976; Yeh et al., 1983; Yamazaki, 1989; Yasunari et al., 1991; Zwiers, 1993; Meehl, 1994)。但是冬、春季积雪异常与夏季风异常之间相隔数月, 积雪影响季风的机理还应该考虑到积雪异常与大气环流之间的相互作用。Kripalani and Kulkarni (1999) 发现冬季欧亚大陆西部积雪少

而东部多的情况下, 对应亚洲大陆会出现一个异常的反气旋环流, 在欧亚大陆西部会有异常南风使得积雪减少, 而东部则会有异常北风使得积雪增加。这种环流形势导致印度夏季风增强。Ueda et al. (2003) 研究表明, 春季欧亚大陆西部积雪消融比东部要快, 对应着欧亚大陆西部有异常南风, 正是这种春季大气环流异常引发了随后的印度夏季风的异常。

欧亚大陆积雪异常是如何持续几个月时间影响到东亚夏季风? 在这个过程中大气环流是如何变化的? Wu et al. (2009) 的诊断结果显示, 欧亚大陆春季雪水当量激发出的中、高纬度遥相关波列从春季一直持续到了夏季, 使得中国夏季雨带偏南, 南方降水增多。说明了欧亚大陆春季平均积雪影响夏季中国东部气候年代际转型的物理过程。穆松宁和周广庆 (2009) 定义了一个新的指数——欧亚北部冬季新增雪盖面积指数, 并发现冬季欧亚北部新增雪盖面积与我国夏季气候异常存在明显关联 (穆松宁和周广庆, 2010)。随后对两者的可能物理途径进行了初步研究 (穆松宁和周广庆, 2012), 结果表明, 春、夏季陆面季节演变异常是“隔季相关”的重要纽带。武炳义和张人禾 (2011) 的研究涉及了不同的东亚夏季风模态与前期春季中、高纬度外强迫异常的联系, 揭示出东亚夏季风变率模态与春季欧亚大陆积雪变化存在联系。但只是定性地说明外强迫积雪异常与东亚夏季风变率的可能联系, 清楚解释确切的影响机理还需要深入研究。而且春季欧亚大陆积雪具有明显的年际和年代际变化, 这些变化在东亚季风模态变化中的作用尚不清楚。

另一方面, 传统的研究工作多关注积雪季节平均状况所起的作用。从各个季节的积雪特征来看, 冬季三个月 (12、1、2 月份) 欧亚大陆积雪的变化不大, 而其他季节各月之间差异显著。就春季 3、4、5 三个月来说, 积雪状况呈现显著的消融特征, 在欧洲南部地区最早开始消融, 随后从西南向东北积雪逐渐减小, 至 5 月份积雪已经大量消失, 研究春季欧亚大陆积雪用季节平均状况可能会抹杀其间

的差异(杨琨, 2008; 穆松宁和周广庆, 2009, 2010)。Dey and Kumar (1982) 就曾发现, 欧亚大陆春季雪盖大则印度夏季风发展缓慢, 但是欧亚大陆春季融雪面积与印度夏季风的关系则正好相反, 融雪面积大印度夏季风发展迅速。可见春季欧亚大陆积雪与融雪虽然都会与季风变化有密切联系, 但是两者的联系可能是截然不同的。

基于以上这些考虑, 本文在前人研究结果的基础之上, 试图从春季欧亚大陆积雪水当量的消融量出发, 来研究春季融雪异常的优势模态与后期东亚夏季风的联系, 并通过分析大气环流从春季至夏季的变化过程, 对融雪量与夏季风联系的可能物理机制进行探讨。

2 资料与方法

本文所用资料包括: (1) 美国冰雪中心卫星观测 1979~2007 年欧亚大陆积雪水当量月平均资料 (Armstrong et al., 2005), 该数据已被插值到分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的均匀网格点上。(2) 中国 598 站月平均降水资料, 研究所用时间长度为 1979~2007 年。

(3) 美国国家环境预报中心/大气研究中心 (NCEP/NCAR) 月平均再分析资料, 1979~2007 年的风场、温度场、位势高度场以及地面 2 米温度, 水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。(4) 文中的融雪量是利用欧亚大陆 3 月份雪水当量值减去 5 月份雪水当量值, 定义差值为正的部分是欧亚大陆春季融雪量。

东亚夏季风指数的计算: 因为东亚夏季风异常与经向风和纬向风都存在密切联系, 仅靠单一风向的变化并不能完全解释东亚夏季风的变化, 而传统研究广泛采用经验正交分析方法, 无法揭示风场矢量包括经向风和纬向风变率的优势模态, 但是通过复矢量经验正交分析, 可以得到风场变率的优势模态, 每个模态均由实部和虚部构成, 实部与虚部紧密相关, 很难用回归区分, 但是又存在差别, 体现在与对流等的关系中 (Wu et al., 2008), 因此本文采用了复矢量经验正交分析方法计算得出的季风指数。

本文所用到的东亚夏季风指数是利用 1979~2007 年 6~8 月美国月平均再分析资料, 选取 ($100^\circ \sim 150^\circ \text{E}$, $10^\circ \sim 50^\circ \text{N}$) 的 850 hPa 风场进行复矢量经验正交分析, 格点数为: 21×17 , 所得的东亚夏季风变率第一模态中复主成分的虚部对应的标准化时间序列即为本文所用的东亚夏季风指数 (图 1), 为

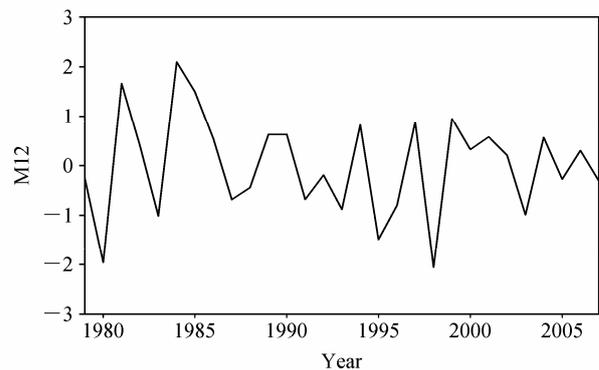


图 1 东亚夏季风指数 M12

Fig. 1 East Asian summer monsoon index (M12)

了方便叙述, 本文将该东亚夏季风指数命名为 M12。

关于复矢量经验正交方法的具体算法和物理意义以及与传统方法的区别详见文献 Wu et al. (2008) 中的论述。本文中所用东亚夏季风指数正位相时具有的环流特征分别参考文献 Wu et al. (2008) 中图 1b (850 hPa 风场) 和图 7b (700 hPa 高度场) 以及图 9b (中国夏季降水)。这里需要指出的是, 由于本文研究时段选取为 1979~2007 年, 这与文献 Wu et al. (2008) 中的 M12 时间尺度略有不同, 但是所具有的环流特征基本一样。

本文应用经验正交分析 (EOF) 方法来揭示欧亚大陆春季融雪量典型的时空变化特征, 利用奇异值分解 (SVD, Singular Value Decomposition) 方法研究欧亚大陆春季融雪量与中国夏季降水的时滞耦合关系, 机理分析部分主要用到线性回归方法。

3 结果分析

3.1 欧亚大陆春季融雪量 EOF 第一模态

对欧亚大陆春季融雪量进行 EOF 分析, 其中第一模态解释方差贡献的 20%, 时空分布特征如图 2 所示, 空间上反映了春季融雪量一致性减少的趋势, 除了在东北部的边沿区域为负异常外, 欧亚大陆主体部分的融雪量具有一致性正异常 (图 2a)。对应的时间序列表现出明显的年代际变化特征, 在 1980 年代末, 融雪量从高值期转向低值期 (图 2b)。

同时对欧亚大陆春季融雪量与中国夏季降水进行 SVD 分析, 第一模态解释 24% 的协方差, 融雪量时空分布 (图 3a、c) 与 EOF 第一模态都非常相似。表明当春季欧亚大陆大部分地区融雪量一致性偏多 (少) 时, 中国华南和东南地区夏季降水将

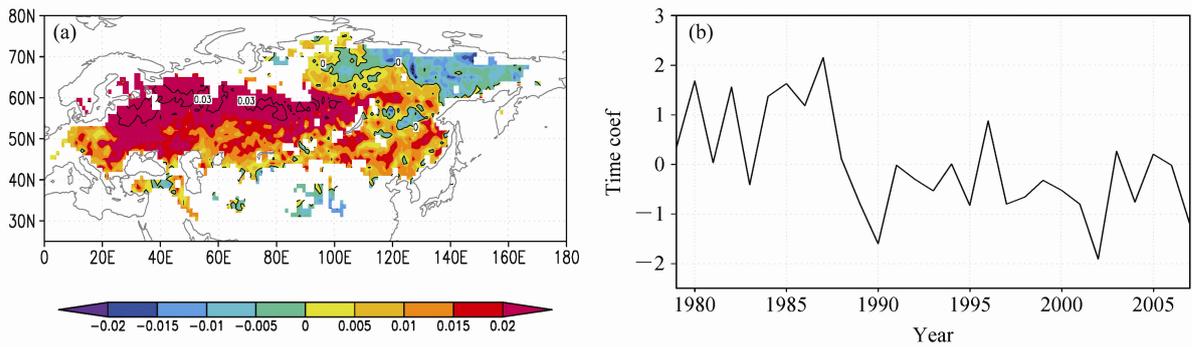


图2 欧亚大陆春季融雪量 EOF 第一模态的 (a) 空间分布和 (b) 时间序列
Fig. 2 (a) Spatial distributions and (b) time series of the leading EOF mode of spring Eurasian snowmelt

偏少(多),而在长江和黄河流域以及东北地区将偏多(少)。SVD 第一模态的标准化时间序列如图 3c 所示,无论是融雪量还是降水均表现为一致的年代际变化特征,两者相关系数 (R) 达到 0.84,均在 1980 年代末从高值期转向低值期。

EOF 第一模态与 SVD 第一模态两者的融雪量时间序列相关高达 0.95,均表现出一致的年代际变化特征,在 1980 年代末出现转型。Wu et al. (2009) 利用 EOF、SVD 方法分析了欧亚大陆春季平均雪水当量与中国夏季降水之间的关系,由文献 Wu et al. (2009) 中图 1 和图 9 给出的 SVD、EOF 第一模态分布对照本文图 2、图 3 可看出,第一模态中无论是 EOF/SVD 的空间特征场还是标准化时间序列,两文中的分析结果均极为相近,两者的夏季中国降水异常也具有相同的分布特征,这可能是由于积雪的春季平均量异常偏多(少)时,积雪的春季消融量在该地区也异常偏多(少),总之,第一模态中春季积雪融雪量与平均量的统计分析结果是非常一致的。

张人禾等(2008)指出,东亚夏季风在 20 世纪 80 年代末出现了一次明显的年代际气候转型,这与本文融雪量第一模态所表现出的年代际变化具有非常好的一致性,同时还指出,伴随着这次年代际转型,中国东部夏季 1980 年代后期出现南方多雨的年代际转型与欧亚大陆春季积雪存在密切联系,并且详细论述了欧亚大陆春季积雪影响夏季中国东部气候年代际转型的物理过程,指出:欧亚大陆春季积雪能够在 500 hPa 激发出大气中的遥相关波列,所激发出的波列可以从春季一直持续到夏季,造成中国北方为高压控制,南方为微弱低压控制,使得降水出现在中国南方(张人禾等, 2008; Wu et al., 2009)。由此可得,春季欧亚大陆融雪量

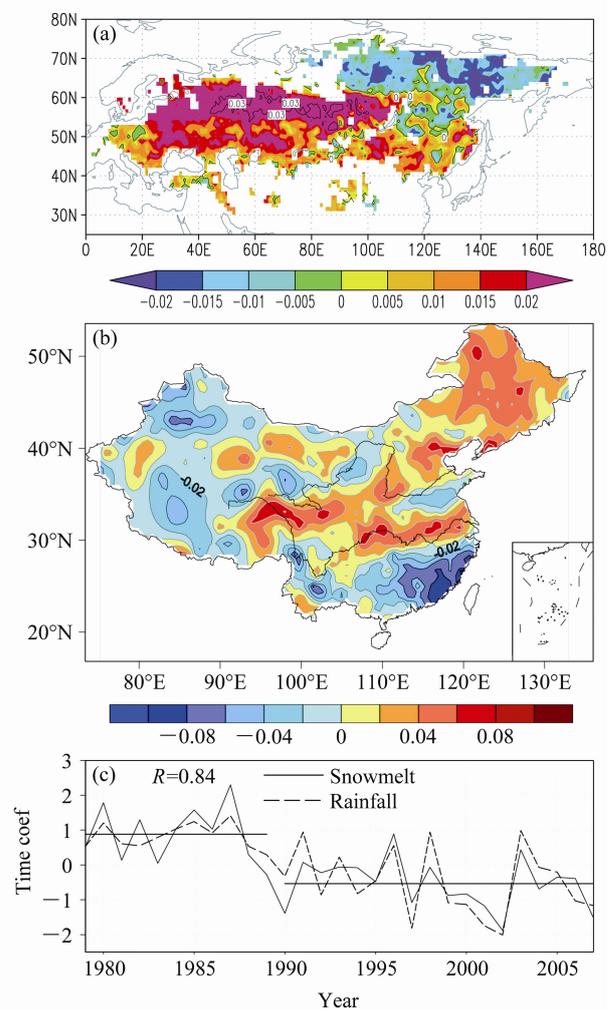


图3 (a) 欧亚大陆春季融雪量和 (b) 中国夏季降水场 SVD 第一模态对应的空间分布型及 (c) 时间序列(无量纲)
Fig.3 Spatial distributions of the leading SVD modes for (a) spring Eurasian snowmelt and (b) summer rainfall in China, and (c) the corresponding time series (R is their correlation coef)

EOF 第一模态体现的是一种显著的年代际变化特征,在此时间尺度上融雪量与东亚夏季风以及中国

夏季降水的年代际转型有密切联系。Wu et al. (2009) 在研究中给出了比较详细的讨论, 分析了欧亚大陆春季积雪影响夏季中国降水的物理过程; 张人禾等 (2008) 也详细论述了欧亚大陆春季积雪影响夏季中国东部气候年代际转型的物理过程, 而春季融雪量第一模态统计分析结果与积雪平均量的情况极为相近, 所以本文重点分析欧亚大陆春季融雪量 EOF 第二模态。

3.2 欧亚大陆春季融雪量 EOF 第二模态

欧亚大陆春季融雪量 EOF 第二模态 (EOF2) 解释方差贡献的 11%, 空间分布特征表现为在欧亚大陆东部的东西伯利亚至中亚的哈萨克地区为显著的正值区, 在黑海和里海的北侧出现较强的负值区 (图 4a), 反映的是一种欧亚大陆东、西部相反的变化趋势, 相应的时间序列没有明显的年代际变化特征, 而是呈现明显的年际变化 (图 4b)。对欧亚大陆春季融雪量与中国夏季降水进行 SVD 分析, 第二模态 (SVD2) 中融雪量与降水的特征场以及标准化时间序列 (图略) 均与春季平均积雪量的 SVD2 (Wu et al., 2009 中图 5) 的分布特征存在很大差异, 与春季融雪量 EOF2 (图 4) 的分析结果也

不同, 这显然与第一模态截然不同。

但是本文发现, 用春季融雪量对东亚夏季风第一模态虚部的标准化时间序列 (M12) 进行线性回归, 可以得到与 EOF 第二模态非常类似的空间异常分布 (图 5a), 尤其是在东西伯利亚至我国东北地区有显著的融雪偏多, 东亚夏季风指数与融雪量 EOF 第二模态的相关系数达到 0.56 (图 5b), 超过 99% 的统计显著性检验, 可见 EOF 第二模态与东亚夏季风在年际变化尺度上也存在密切的联系。

首先选取春季融雪量 EOF 第二模态标准化时间序列对夏季 850 hPa 风场与 500 hPa 高度场以及中国夏季降水场进行线性回归, 图 6a 是东亚地区夏季 850 hPa 风场的回归分布, 在外兴安岭至鄂霍次克海地区有气旋性环流异常, 我国东北至西北太平洋为反气旋性环流异常, 我国东南至西太平洋存在气旋性环流异常。图 6b 为夏季 500 hPa 位势高度场的线性回归, 与风场相对应, 在东亚地区由高纬至低纬存在显著的“负—正—负”经向波列结构分布。我国夏季降水的回归分布如图 6c 所示, 在江南、云南以及华北地区有显著正异常, 在长江中下游至广西以及东北地区有显著负异常。降水场异

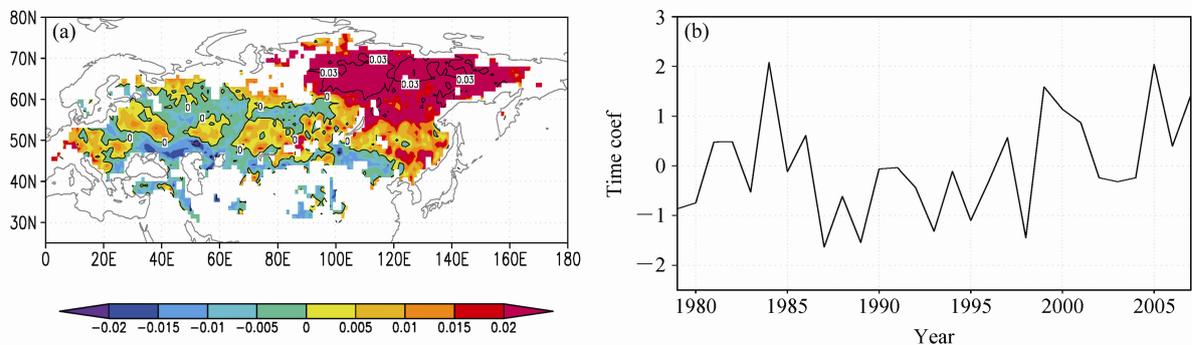


图 4 同图 2, 但为第二模态

Fig. 4 Same as Fig.2, but for the second EOF mode (EOF2)

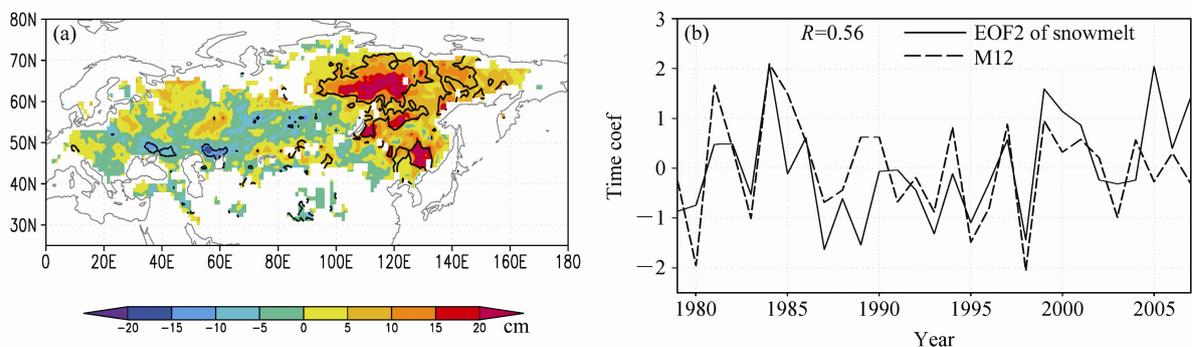


图 5 (a) 欧亚大陆春季融雪量对东亚夏季风指数的线性回归, 单位: cm (黑色等值线表示融雪量异常超过 90% 置信水平) 和 (b) EOF 第二模态与 M12 的标准化时间序列

Fig. 5 (a) Regression of the spring snowmelt on the M12 (the black contours represent snowmelt anomalies exceeding the 90% confidence level) and (b) normalized time series of EOF2 of the spring snowmelt and M12

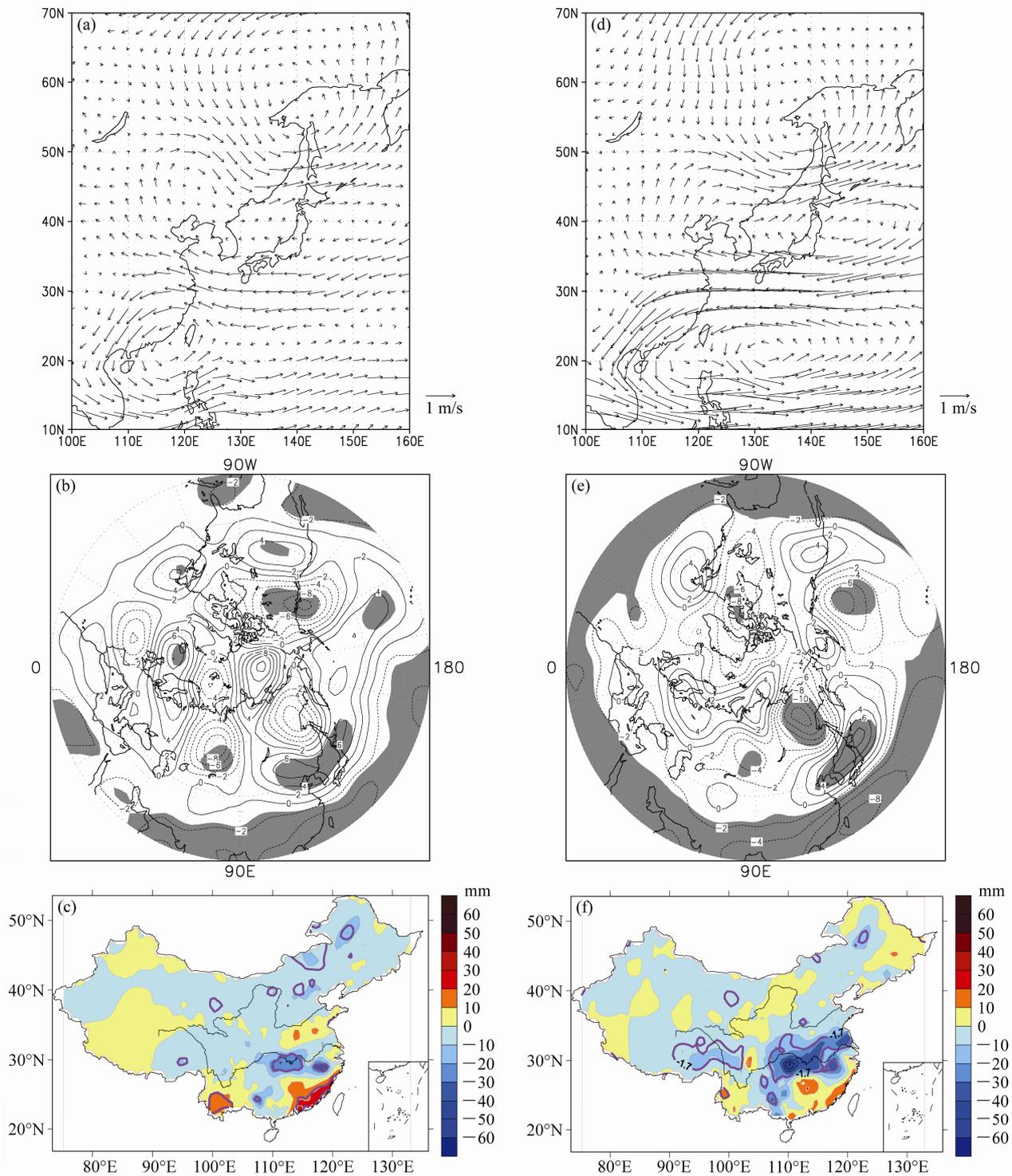


图 6 (a) 夏季平均 850 hPa 风场 (单位: m/s)、(b) 500 hPa 位势高度场 (单位: gpm, 阴影: 超过 90% 信度检验) 和 (c) 中国降水场 (单位: mm, 紫色等值线: 超过 90% 信度检验) 对融雪量 EOF2 标准化时间序列的线性回归; 图 (d)、(e)、(f) 分别与图 (a)、(b)、(c) 相同, 但为对 M12 的线性回归
Fig. 6 Regressions on (a, b, c) the EOF2 time coefficients of snowmelt and (d, e, f) the M12: (a, d) Summer mean 850-hPa winds; (b, e) summer mean 500-hPa heights (gpm), regions over 90% confidence level are shaded; (c, f) China summer rainfall, the purple contours represent the anomalies exceeding 90% confidence level

常空间分布与风场、位势高度场基本动力一致, 在低压、气旋性环流控制区域降水偏多, 在高压、反气旋环流区域降水偏少。

其次, 利用东亚夏季风指数分别对夏季 850 hPa 风场与 500 hPa 高度场以及中国夏季降水场进行线性回归, 分别可以得到与图 6a、b、c 较为类似的空

间异常分布。这表明，春季欧亚大陆东部融雪量的增加有利于后期出现与 M12 正位相时类似的环流特征。比较两者的中国夏季降水图（图 6c 与图 6f）可以发现，在中国南方、西南、长江流域具有几乎一模一样的异常特征，局部的差别是：在华北东部地区图 6c 中为正异常中心，而图 6f 中是微弱的负异常，可见两者对应的 850 hPa 风场和 500 hPa 位势高度场虽然具有非常相似的异常环流型，但是在局部地区产生的降水异常可能有所不同。

综上所述，欧亚春季融雪量异常能够较好的指示后期夏季东亚夏季风的变化，通过东亚地区从高纬至低纬正、负相间的经向遥相关波列结构来实现对后期东亚夏季风产生影响，进而改变中国夏季降水的分布，但是只有统计相关关系还不足以说明问题，需要进一步对这种经向环流特征与春季融雪量的联系机理进行研究，来弄清楚欧亚大陆积雪作为一个外强迫因子在东亚夏季风 M12 模态中所起的作用。

3.3 欧亚大陆春季融雪量 EOF 第二模态与东亚夏季风的可能联系机制

为了分析与春季欧亚大陆融雪量异常相对应的大气环流异常的空间结构，利用融雪量 EOF2 时间系数对春季大气环流场进行线性回归，结果如图 7 所示，春季 500 hPa 位势高度在巴尔喀什湖附近和东西伯利亚地区有两个显著的正异常区，在乌拉尔山北部和日本海附近各有一个异常负值区（图 7a）。春季 1000 hPa 至 500 hPa 大气厚度场（图 7b）与同期高度场异常具有十分相似的结构特征，对应高压地区有显著的正回归中心，在低压区则对应负的回归中心。春季显著的地表温度高值区也出现在东西伯利亚地区和巴尔喀什湖附近，而在日本海附近温度则异常偏低（图 7c），与图 7a、b 的空间分布十分吻合。对比欧亚大陆春季融雪量 EOF 第二模态（图 4a）可以发现，位势高度场与大气厚度场的这种分布特征与同期融雪量的异常分布有很好的对应关系，在东西伯利亚地区、巴尔喀什湖附近地区以及欧洲西南部均是融雪量异常偏多的显著区域，500 hPa 高度场中则对应显著的正异常，大气厚度场与地表温度场在该区域也表现为显著的正异常；而在黑海和里海北侧为融雪量的显著负异常区域，高度场则对应为槽区，厚度场与地表温度场也均为负值区。

事实上，融雪量异常与大气厚度异常是同时出

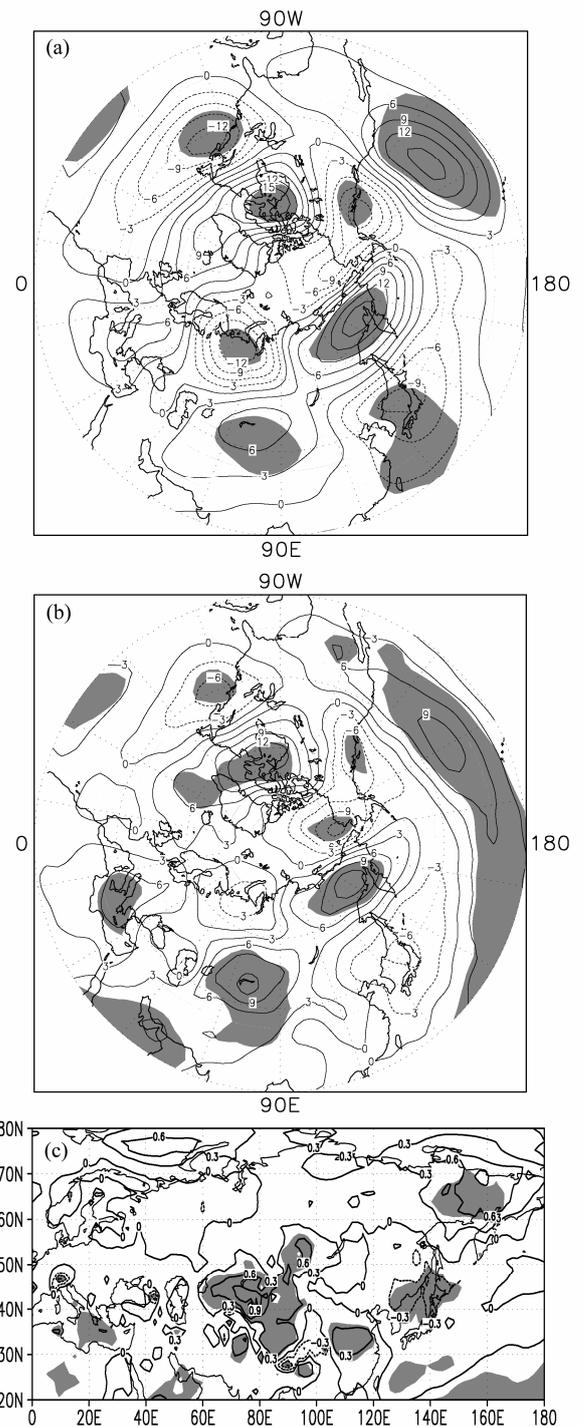


图 7 (a) 春季平均 500 hPa 位势高度场 (单位: gpm)、(b) 大气厚度场 (单位: gpm) 和 (c) 地表温度 (单位: K) 对融雪量 EOF2 时间系数的线性回归分布。阴影: 超过 90% 信度检验
Fig. 7 Regressions of (a) spring mean 500-hPa heights (gpm) and (b) atmospheric thickness field (gpm), and (c) surface temperature (K) on the EOF2 time coefficients of snowmelt. Regions over 90% confidence level are shaded

现的，当春季大气厚度场表现为显著正异常时，说明该地区对流层低层厚度增加，为异常增暖区，高

度场升高，大气温度的增暖使得该地区积雪融化量增加。另一方面，融雪量的异常增加反过来又可影响到局地大气的变化，由于积雪反照率效应，地表吸收的太阳辐射增多，反馈给大气的热量也增多，促使该地区进一步增暖，大气厚度场也进一步的增厚，两者相互作用呈现一种正反馈机制，造成高度场进一步升高。

积雪场与高度场的配置关系表明欧亚大陆融雪异常可以引起大气环流异常，为了清楚地分析季节转换过程中大气环流的移动特征，本文给出了 500 hPa 位势高度线性回归场沿 45°N 的经度—时间剖面图以及沿 130°E 的时间—纬度剖面图，如图 8 所示，沿 45°N 的位势高度正异常首先在 3 月份出现在 80°E 附近即巴尔喀什湖附近地区，随后高压区域逐渐向东移动发展，在 7、8 月份移至 110°E~170°E 一带，对应日本海附近的高压异常（图 8a）。沿 130°E 的高度正异常在 3 月份位于 60°N 以北至极区，4、5 月份稳定在 60°N 附近，之后开始分为两部分向北、向南发展，到了 7、8 月份，在 80°N 和 40°N 附近地区各有一个高压存在，其中 40°N 附近的正异常区域与日本海附近的高压异常相对应（图 8b）。

因此，春季欧亚大陆融雪量异常可能通过如下两种途径影响东亚夏季风及降水的变化，一个是巴尔喀什湖附近地区的高压区域逐渐向东移动发展，并于夏季稳定在我国东北至日本海一带。另一个是东西伯利亚地区的高压分别向南、向北移动，其中南移的高压在夏季也正好位于日本海一带。两个不同源区的异常高压叠加作用导致日本海地区高压异常，致使东亚夏季出现 M12 正位

相时具有的模式特征（图 6b），在东西伯利亚至日本海再到我国江南地区有“负—正—负”的经向波列结构。

穆松宁和周广庆（2010，2012）的研究结果表明，东亚中、高纬夏季陆面异常是东亚夏季大气环流异常乃至我国夏季气候异常的重要原因，并给出了可能的物理途径：冬季欧亚北部新增雪盖面积偏大有利于欧亚北部大范围积雪—冻土融化进程的减慢，这导致夏季东亚中高纬积雪偏多、土壤温度偏低，这种陆面异常可能通过其自身的冷却作用、通过影响东亚中高纬异常北风而影响东亚中高纬夏季冷暖，进而与西太平洋副热带高压，乃至与我国江南夏季降水异常产生关联；冬季欧亚北部新增雪盖面积偏小时相反。由此可见，造成本文中大气环流本身维持高压异常并从春季持续至夏季的可能原因是：当融雪量异常偏多时，有利于积雪—冻土融化进程的加快，从而导致后期夏季积雪偏少、土壤温度偏高，当然，这只是借鉴前人的研究结果，今后还需要利用大量的资料进行进一步的分析。

4 结论与讨论

本文利用欧亚大陆地区积雪水当量资料、中国台站降水资料以及大气环流再分析资料研究了欧亚大陆春季融雪量与东亚夏季风的联系，并进一步探讨了两者可能的联系机制，主要结论如下：

(1) 春季融雪量 EOF 第一模态表现出明显的年代际变化特征，这与东亚夏季风以及中国夏季降水的年代际转型具有非常好的一致性。而 EOF 第二模态与东亚夏季风年际变率有密切联系，与夏季风模

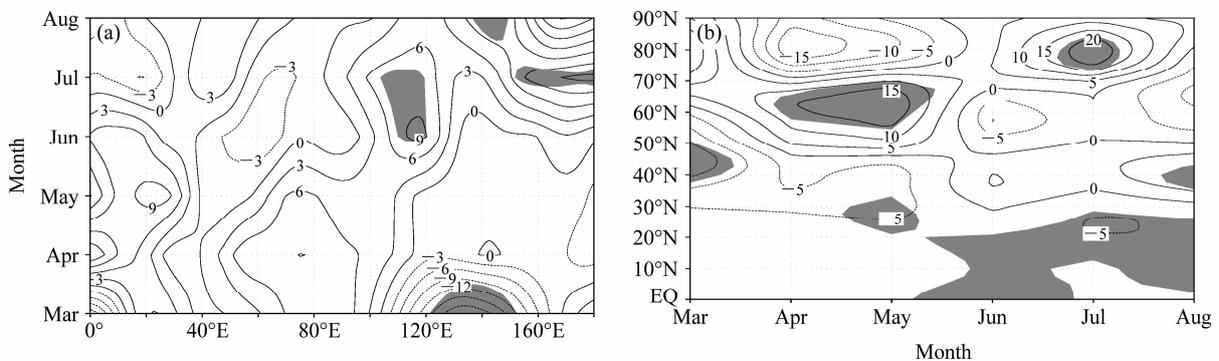


图 8 500 hPa 高度场对融雪量 EOF2 时间系数的线性回归分布（单位：gpm）：(a) 沿 45°N 的经度—时间剖面；(b) 沿 130°E 的时间—纬度剖面。阴影：超过 90% 信度检验

Fig. 8 Regression of 500-hPa heights on the EOF2 time coefficients of snowmelt (units: gpm): (a) Longitude-time section along 45°N; time-latitude section along 130°E. Regions over 90% confidence level are shaded

态 M12 的相关系数达到 0.56。当前期春季东西伯利亚和巴尔喀什湖附近地区融雪量偏多时, 后期夏季东亚地区易出现由北至南的“负—正—负”波列结构, 这种环流背景易导致江南、西南地区降水偏多, 而不利长江流域降水的发生。春季融雪量异常偏少时, 情况则相反。

(2) 春季, 在欧亚融雪量显著偏多的巴尔喀什湖附近和东西伯利亚地区, 对应两个显著的高压异常。随后, 巴尔喀什湖附近的高压区域逐渐向东移动发展, 东西伯利亚地区的高压向南、向北分裂。这样有利于日本海一带在夏季表现为显著的高压异常, 可能促使东亚地区出现正负相间的经向波列结构, 进而影响东亚地区的天气和气候。

需要指出的是, 融雪量 EOF2 模态回归的环流型虽然与东亚夏季风模态 M12 正位相的环流型十分相似, 但是两者的夏季降水异常在局部地区存在差异。可见, 相同的大气环流场可能对应不同的降水场。研究欧亚大陆春季积雪消融量与东亚夏季风模态的联系机制对于探索季风变化的机理、预测东亚气候变化将有重要的参考价值。本文的研究结果表明, 欧亚大陆春季融雪量异常基本上能够指示年际尺度上的东亚夏季风异常以及我国南部地区夏季降水异常, 但是研究两者的联系机制仅仅分析大气内部动力过程是不够的, 还需要对外源强迫加强分析研究。本文所有结果均是建立在统计分析的基础上, 大气内部动力学过程是一个非常复杂的问题, 本文给出的物理途径可能无法全面地揭示其中所有的具体动力过程, 还有待于今后做更多的诊断分析和采用先进的气候模式做深入研究。

致谢 审稿专家为本文提出了大量重要且细致的修改意见, 在此表示深深的感谢! 衷心感谢编辑老师们的辛勤劳动!

参考文献 (References)

- Armstrong R L, Brodzik M J, Knowles K, et al. 2005. Global monthly EASE-Grid snow water equivalent climatology. Boulder, CO: National Snow and Ice Data Center, Digital Media.
- Blanford H F. 1884. On the connection of the Himalaya snowfall with dry winds and seasons of drought in India [J]. *Proc. Roy. Soc. London*, 37: 3–22.
- 陈丽娟, 吕世华, 罗四维. 1996. 青藏高原春季积雪异常对亚洲季风降水影响的数值试验 [J]. *高原气象*, 15 (1): 122–130. Chen Lijuan, Lü Shihua, Luo Siwei. 1996. The numerical experiment of influence of anomalous snow cover over Qinghai-Xizang Plateau in spring on summer monsoon rainfall in Asia [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 15 (1): 122–130.
- 陈烈庭. 1998. 青藏高原冬春季异常雪盖与江南前汛期降水关系的检验和应用 [J]. *应用气象学报*, 9 (增刊): 1–8. Chen Lieting. 1998. Test and application of the relationship between anomalous snow cover in winter-spring over Qinghai-Xizang Plateau and the first summer rainfall in southern China [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 9 (Suppl.): 1–8.
- 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]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 17 (1): 18–30.
- 陈乾金, 高波, 张强. 2000. 青藏高原冬季雪盖异常与冬夏季风变异及其相互联系的物理诊断研究 [J]. *大气科学*, 24 (4): 477–492. Chen Qianjin, Gao Bo, Zhang Qiang. 2000. Studies on relation of snow cover over the Tibetan Plateau in winter to the winter-summer monsoon change [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 24 (4): 477–492.
- 陈兴芳, 宋文玲. 2000a. 欧亚和青藏高原冬春季积雪与我国夏季降水关系的分析和预测应用 [J]. *高原气象*, 19 (2): 214–223. Chen Xingfang, Song Wenling. 2000a. Analysis of relationship between snow cover on Eurasia and Qinghai-Xizang Plateau in winter and summer rainfall in China and application to prediction [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 19 (2): 214–223.
- 陈兴芳, 宋文玲. 2000b. 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 Xingfang, Song Wenling. 2000b. Circulation analysis of different influence of snow cover over the Tibetan Plateau and Eurasia in winter on summertime droughts and floods of China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 24 (5): 585–592.
- 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]. *Climate Dyn.*, 24 (1): 1–10.
- Dey B, Kumar O S R U B. 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.
- Dong B W, Valdes P J. 1998. Modelling the Asian summer monsoon rainfall and Eurasian winter/spring snow mass [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 124 (552): 2567–2596.
- 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): 140–151. Fan Guangzhou, Luo Siwei, Lü Shihua. 1997. The preliminary numerical experiments of effect of anomalous snow cover over plateau in winter on East and South Asian summer monsoon [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 16 (2): 140–151.
- Fasullo J. 2004. A stratified diagnosis of the Indian monsoon-Eurasian snow cover relationship [J]. *J. Climate*, 17 (5): 1110–1122.
- 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.
- Kripalani R H, Kulkarni A. 1999. Climatology and variability of historical Soviet snow depth data: Some new perspectives in snow-Indian monsoon

- teleconnections [J]. *Climate Dyn.*, 15 (6): 475–489.
- Kripalani R H, Kulkarni A, Sabade S S. 2003. Western Himalayan snow cover and Indian monsoon rainfall: A reexamination with INSAT and NCEP/NCAR data [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 74 (1–2): 1–18.
- Matsumura S, Yamazaki K, Tokioka T. 2010. Summertime land-atmosphere interactions in response to anomalous springtime snow cover in northern Eurasia [J]. *J. Geophys. Res.*, 115: D20107.
- Meehl G A. 1994. Influence of the land surface in the Asian summer monsoon: External conditions versus internal feedbacks [J]. *J. Climate*, 7 (7): 1033–1049.
- 穆松宁, 周广庆. 2009. 欧亚大陆季节增(融)雪盖面积变化特征分析 [J]. *气候与环境研究*, 14 (5): 491–508. Mu Songning, Zhou Guangqing. 2009. Analyses of seasonal fresh snow extent over northern Eurasia [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 14 (5): 491–508.
- 穆松宁, 周广庆. 2010. 冬季欧亚大陆北部新增雪盖面积变化与中国夏季气候异常的关系 [J]. *大气科学*, 34 (1): 213–226. Mu Songning, Zhou Guangqing. 2010. Relationship between winter northern Eurasian fresh snow extent and summer climate anomalies in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (1): 213–226.
- 穆松宁, 周广庆. 2012. 欧亚北部冬季增雪“影响”我国夏季气候异常的机理研究——陆面季节演变异常的“纽带”作用 [J]. *大气科学*, 36 (2): 297–315. Mu Songning, Zhou Guangqing. 2012. Mechanism for the correlation of winter fresh snow extent over northern Eurasia and summer climate anomalies in China: Anomalous seasonal transition of land as a bond [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36 (2): 297–315.
- 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]. *International Journal of Climatology*, 23 (6): 593–613.
- Robock A, Mu M Q, Vinnikov K, et al. 2003. Land surface conditions over Eurasia and Indian summer monsoon rainfall [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D4): 4131.
- Sankar-Rao M, Lau K M, Yang S. 1996. On the relationship between Eurasian snow cover and the Asian summer monsoon [J]. *International Journal of Climatology*, 16 (6): 605–616.
- Singh G P, Oh J H. 2005. Study on snow depth anomaly over Eurasia, Indian rainfall and circulations [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 83 (2): 237–250.
- Ueda H, Shinoda M, Kamahori H. 2003. Spring northward retreat of Eurasian snow cover relevant to seasonal and interannual variations of atmospheric circulation [J]. *International Journal of Climatology*, 23 (6): 615–629.
- Wu B Y, Yang K, Zhang R H. 2009. Eurasian snow cover variability and its association with summer rainfall in China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 26 (1): 31–44.
- 武炳义, 张人禾. 2011. 东亚夏季风年际变率及其与中、高纬度大气环流以及外强迫异常的联系 [J]. *气象学报*, 69 (2): 219–233. Wu Bingyi, Zhang Renhe. 2011. Interannual variability of the East Asian summer monsoon and its association with the anomalous atmospheric circulation over the mid-high latitudes and external forcing [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 69 (2): 219–233.
- Wu B Y, Zhang R H, Ding Y H, et al. 2008. Distinct modes of the East Asian summer monsoon [J]. *J. Climate*, 21: 1122–1138.
- 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.
- 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.
- 许立言, 武炳义. 2012a. 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. 2012a. 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.
- 许立言, 武炳义. 2012b. 欧亚大陆积雪与 2010 年中国春末夏初降水的关系 [J]. *高原气象*, 31 (3): 706–714. Xu Liyan, Wu Bingyi. 2012b. Relationship between Eurasian snow cover variability and late-spring and early-summer rainfall in China of 2010 [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 31 (3): 706–714.
- Yamazaki K. 1989. A study of the impact of soil moisture and surface albedo changes on global climate using the MRI-GCM-I [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 67: 123–146.
- 杨琨. 2008. 欧亚大陆积雪的时空分布特征及其与东亚气候变化的联系 [D]. 中国气象科学研究院硕士学位论文. Yang Kun. 2008. Temporal and spatial distribution characteristics of Eurasia snow and its associations with East Asia climate change [D]. M. S. thesis (in Chinese), Chinese Academy of Meteorological Sciences.
- 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): 627–634. Yang Qiuming. 1998. The influence of the variations of snow cover in Eurasia for half years winter on the circulations over East Asia [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 56 (5): 627–634.
- Yang S, Xu L Z. 1994. Linkage between Eurasian winter snow cover and regional Chinese summer rainfall [J]. *International Journal of Climatology*, 14 (7): 739–750.
- Yasunari T, Kitoh A, Tokioka T. 1991. Local and remote responses to excessive snow cover 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.
- 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.
- 张人禾, 武炳义, 赵平, 等. 2008. 中国东部夏季气候 20 世纪 80 年代后期的年代际转型及其可能成因 [J]. *气象学报*, 66 (5): 697–706. Zhang Renhe, Wu Bingyi, Zhao Ping, et al. 2008. The decadal shift of the summer climate in the late 1980s over East China and its possible causes [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 66 (5): 697–706.
- 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. Influences of snow cover over the Tibetan Plateau on Asian summer monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 25 (3): 372–390.
- 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.

- 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.
- 赵溱. 1984. 欧亚大陆雪盖与东亚夏季风 [J]. *气象*, (7): 27–29. Zhao Zhen. 1984. Eurasia snow cover and the Asian monsoon [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, (7): 27–29.
- 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): 761–773. Zheng Yiqun, Qian Yongfu, Miao Manqian, et al. 2000. Effect of the Tibetan Plateau snow cover on China summer monsoon climate [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 24 (6): 761–773.
- Zwiers F W. 1993. Simulation of the Asian summer monsoon with the CCC GCM-1 [J]. *J. Climate*, 6 (3): 469–486.