

陈海山, 齐铎, 许蓓. 2013. 欧亚大陆中高纬积雪消融异常对东北夏季低温的影响 [J]. 大气科学, 37 (6): 1337–1347, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12194. Chen Haishan, Qi Duo, Xu Bei. 2013. Influence of snow melt anomaly over the mid-high latitudes of the Eurasian continent on summer low temperatures in northeastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (6): 1337–1347.

欧亚大陆中高纬积雪消融异常 对东北夏季低温的影响

陈海山^{1,2} 齐铎^{1,2} 许蓓^{1,2}

¹ 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044

² 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

摘 要 利用美国冰雪资料中心提供的 1979~2007 年月平均积雪水当量资料、NCEP/NCAR 的逐月再分析资料以及中国 743 站的逐日气温资料, 讨论了欧亚中高纬春季融雪异常分布与中国东北夏季温度的联系及其可能的影响机理。结果表明: 欧亚大陆中高纬西部春季融雪偏多、东部春季融雪偏少时, 我国东北夏季易出现低温。春季东部融雪量少, 导致夏季剩余积雪偏多; 夏季积雪融化吸热增多, 加上后期的土壤湿度增加会导致该地区夏季温度异常偏低, 高度场下降, 500 hPa 上欧亚中高纬东部的长波槽加深, 槽后偏北气流加强; 来自极地的冷空气容易入侵东亚中高纬地区, 引起我国东北夏季低温。

关键词 欧亚大陆中高纬 融雪异常 大气环流 东北夏季低温

文章编号 1006-9895(2013)06-1337-11

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12194

Influence of Snow Melt Anomaly over the Mid-High Latitudes of the Eurasian Continent on Summer Low Temperatures in Northeastern China

CHEN Haishan^{1,2}, QI Duo^{1,2}, and XU Bei^{1,2}

¹ Key Laboratory of Meteorological Disaster (NUIST), Ministry of Education, Nanjing 210044

² School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract The possible linkage of the spring snowmelt anomalies over the Eurasian continent and the summer temperature in northeastern China and its related physical mechanism were investigated on the basis of monthly snow water equivalent data during the period of 1979–2007 provided by the National Snow and Ice Data Center and the National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) reanalysis data as well as the daily temperature observations over 743 stations in China. Results show that cold summers tend to occur when snowmelt in the Eurasian continent is greater in the west than that in the east. The decreases of the spring snowmelt amount in the eastern region will lead to more surplus snow in the following summer. More snowmelt accompanied with more absorption heat and increased soil moisture in summer result in lower temperatures as well as decreased geopotential height, which strengthens the long wave rough at 500 hPa and the northern wind behind the trough over eastern Eurasia. As a result, cold air flow from the polar region easily invades the mid-high latitudes of East Asia, eventually leading to low temperatures in summer over northeastern China.

收稿日期 2012-11-06, 2013-02-05 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 41075082、41230422, 科技部公益性行业(气象)科研专项 GYHY201206017, 江苏省“333 高层次人才培养工程”、“青蓝工程”和江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)资助

作者简介 陈海山, 男, 1973 年出生, 博士、教授, 主要从事陆面过程与气候数值模拟研究。E-mail: haishan@nuist.edu.cn

Keywords Mid-high latitudes of Eurasian continent, Snowmelt anomaly, Atmospheric general circulation, Summer low temperature in northeastern China

1 引言

冰雪圈是地球的五大圈层之一, 冰雪与气候之间存在着强烈的相互作用。大气环流等气候要素的异常会导致积雪的异常分布, 而积雪异常会改变下垫面的物理属性, 影响地表与大气之间的能量和水分的交换, 从而影响局地乃至全球的天气气候。早在 1884 年 Blanford (1884) 就发现喜马拉雅山脉的冬季积雪与印度夏季风降水之间存在一种明显的反相关。自此以后, 人们开始意识到积雪对于气候的影响不容忽视, 陆续开展了一些关于积雪和同期、后期气候之间关系的研究。在积雪与同期气候方面: 陈海山和孙照渤 (2003)、陈海山等 (2003) 发现欧亚大陆积雪深度的异常分布与欧亚—太平洋遥相关型之间具有很好的对应关系, 会对东亚冬季风活动和东亚地区的冬季气候造成影响。许蓓 (2011) 从冬季雪深增量的角度讨论了冬季积雪对大气环流异常的响应。近来, 左志燕等 (2011, 2012) 利用欧亚大陆的积雪水当量资料分析了春季积雪与我国春季降水年代际变化之间的关系, 发现欧亚大陆春季积雪的年代际变化所伴随的大气环流变化是造成我国春季降水, 特别是长江以南地区的降水发生年代际转型的一个重要原因。另外, 还有一些研究侧重于分析北美雪盖与同期环流、温度及其降水之间的相互作用, 从不同的角度证明积雪与同期气候之间存在密切的联系 (Leathers et al., 1995; Ge and Gong, 2009; Jin et al., 2006)。由于东亚和南亚两大季风区都位于欧亚大陆, 欧亚的陆面异常对季风区的气候有重要的影响, 而且欧亚积雪相对北美积雪来说年际变化更大 (符淙斌, 1980), 分布范围更广。因此, 较北美积雪而言, 欧亚积雪对后期气候的影响获得了更多的关注。南亚印度季风降水是影响印度夏季气候的重要因子, Kripalani and Kulkarni (1999)、Fasullo (2004)、Ye and Bao (2005)、Dash et al. (2005) 都曾利用不同的资料对欧亚大陆积雪和印度季风之间的关系进行详细的讨论。我国地处东亚, 积雪对于东亚气候的影响一直都是我国学者关注的重点, 孙照渤等 (2000)、陈兴芳和宋文玲 (2000a, 2000b)、Ye and Bao (2005)、张天宇等 (2007)、李震坤等 (2009)、

穆松宁和周广庆 (2010, 2012) 都先后利用不同的方法深入分析了欧亚大陆积雪对东亚后期气候的影响及其机理。

夏季气候状况较冬、春积雪异常滞后数月, 要了解积雪对夏季气候影响的机理就必须对积雪的物理性质及其与环流之间相互作用的特点有一定的认识。大量研究表明, 积雪主要通过改变地表反照率 (陈丽娟等, 1996)、影响地表水分平衡 (Barnett et al., 1989)、通过引起局地气候异常来激发大气环流的遥响应等方面影响局地乃至全球的天气气候 (张顺利和陶诗言, 2001; 王叶堂等, 2008; 陈海山和孙照渤, 2003; 陈海山等, 2003)。积雪的反照率效应和水分效应哪一个才是影响气候的主要原因? 这个问题一直是争论的焦点。Peings and Douville (2010)、Barnett et al. (1989) 分别利用观测分析和数值模拟的方法研究了积雪的气候效应, 结果表明积雪的水分效应才是积雪影响气候的主要原因。Robock et al. (2003) 则认为积雪的水文效应只能持续一个月左右, 而反照率影响的时间更长。因此, 反照率因素在积雪影响后期气候异常的过程中占有主导地位。而 Yasunari et al. (1991) 认为对于欧亚积雪而言, 春季积雪的反照率是影响局地气候的主要因素, 而到了夏季情况刚好相反。许立言和武炳义 (2012) 通过分别考虑积雪关键区的水分效应、反照率效应及共同作用等三组试验模拟了积雪的两种物理效应对于后期降水的影响, 发现同时考虑二者的作用时的模拟结果与实际情况最接近, 此外单独考虑水文效应要比单独考虑反照率效应所得到的模拟效果更好。积雪深度、积雪面积和积雪水当量是表征积雪的三个主要特征量, 以往的研究多从雪盖面积的角度考虑积雪的气候影响, 主要讨论的是反照率方面的作用, 而且这种将积雪作为一个整体来分析的方法忽略了不同分布情况的作用。积雪水当量和雪深都能很好的反应积雪的异常分布, 其中积雪水当量更为直观的体现了积雪水分效应方面的信息。到了春季以后, 积雪的季节变化主要就是融雪, 而融雪又是积雪水分效应的主要方面, 所以融雪量比平均量而言更能反映积雪水分效应的特点。因此, 本文采用融雪量来考虑积雪的水分效应对于后期夏季气候的影响。

东北夏季低温作为一种重要的气候异常事件,与全球气候异常有着十分密切的联系(章名立等,1983)。20 世纪 70 年代才开始有一些关于东北夏季低温的气候特点和影响因子等方面的讨论(章名立等,1980;王敬方和吴国雄,1997;陈莉和朱锦红,2004;郭家林等,2004;汪秀清等,2006;王绍武等,2009),但是以往关于影响因子的研究中多关注环流和海温的影响,对于陆面过程影响的分析很少。我国东北地处欧亚,欧亚大陆的积雪等陆面状况的异常必然会对其夏季温度产生影响。张茜和李栋梁(2012)已经从积雪面积的角度证实,欧亚春季积雪与东北夏季低温的产生关系密切。说明欧亚大陆春季积雪的反照率效应对东北夏季温度确实存在一定的影响。但是欧亚积雪的水分效应对东北低温的影响如何,与反照率的影响是否一致还有待于进一步加以讨论。另外,欧亚积雪主要包括两个部分:中、高纬积雪和青藏高原积雪。陈兴芳等(2000a, 2000b)在研究欧亚积雪和高原积雪对我国夏季影响的过程中发现:欧亚中高纬积雪和青藏高原积雪对中国夏季气候的影响不同,要单独考虑二者的作用。Wu et al.(2009)认为欧亚大陆高纬地区的春季积雪异常会在其上空大气中激发一个向下游传播的波列,此波列可以影响到东亚的夏季气候。而我国东北地区地处东亚,刚好也位于欧亚大陆中高纬积雪的下游,该地的积雪异常引发的遥相关波列对我国东北夏季低温的影响肯定要更为直接,所以本文主要考虑欧亚中高纬积雪的作用并进一步定义了融雪量这一概念来分析融雪对于我国东北夏季温度的影响和可能的原因,进而加深对积雪水分效应的气候影响方面的认识,并期望能够从积雪影响角度对我国东北夏季低温的预测提供一些参考。

2 资料与方法

本文使用的积雪资料来自美国冰雪资料中心提供的全球月平均的积雪水当量资料(Global monthly EASE-Grid snow water equivalent climatology)(Armstrong et al., 2005),分辨率 25 km,时间从 1979 年到 2007 年。在使用中将其插值到 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的均匀网格上。

气温资料来源于中国 743 站的逐日气温,选取的时段为 1979~2007 年。考虑缺测和台站迁移的影响,对其中位于我国 115°E 以东, 35°N 以北范围

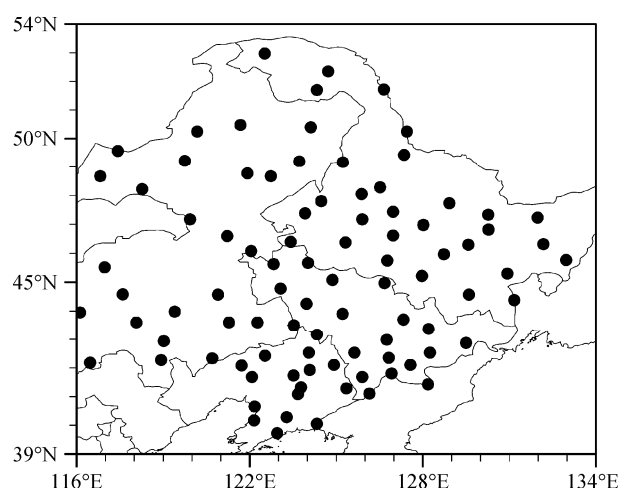


图 1 我国东北地区 91 个测站空间分布

Fig. 1 The geographic distribution of 91 stations in northeastern China

内 133 个测站的夏季平均温度距平进行 EOF 分析。挑选在前两个模态的空间分布(图略)中位于一致变化中心的 91 个东北地区的测站作为东北地区的代表站(见图 1)。此外,文中参照以往关于东北低温的研究(周立宏等,2001),选取东北地区作物生长季(5~9 月)的平均温度距平作为描述东北夏季温度变化的指标。

1979~2007 年的环流场来源于 NCEP/NCAR 全球逐月的再分析资料,分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。

为了考察欧亚大陆中高纬(40°N 以北, 20°E ~ 160°E)春季积雪的变化,定义用该地区各格点上冬末(2 月)的积雪水当量减去春末(5 月)的积雪水当量的值来描述欧亚大陆中高纬春季积雪的变化情况,又因为春季积雪变化主要就是春季融雪,所以为了方便起见在以下的分析中将这个积雪变化量称为春季融雪量。

3 欧亚大陆中高纬春季融雪量的时空分布特征

研究表明季节平均积雪和季节性积雪变化之间既相互联系,又相互区别(陈海山和许蓓,2012)。过去对欧亚大陆春季积雪的研究多集中于春季平均积雪方面(杨琨,2008),对欧亚大陆春季积雪变化特点的研究还相对较少。春季融雪量描述的是春季积雪变化的情况,对其进行时空分布特征方面的研究有助于我们了解春季融雪的异常分布特点,为进一步了解欧亚大陆中高纬春季积雪水分效应的气候影响提供一定的参考。

对欧亚大陆中高纬春季融雪量进行 EOF 分析,

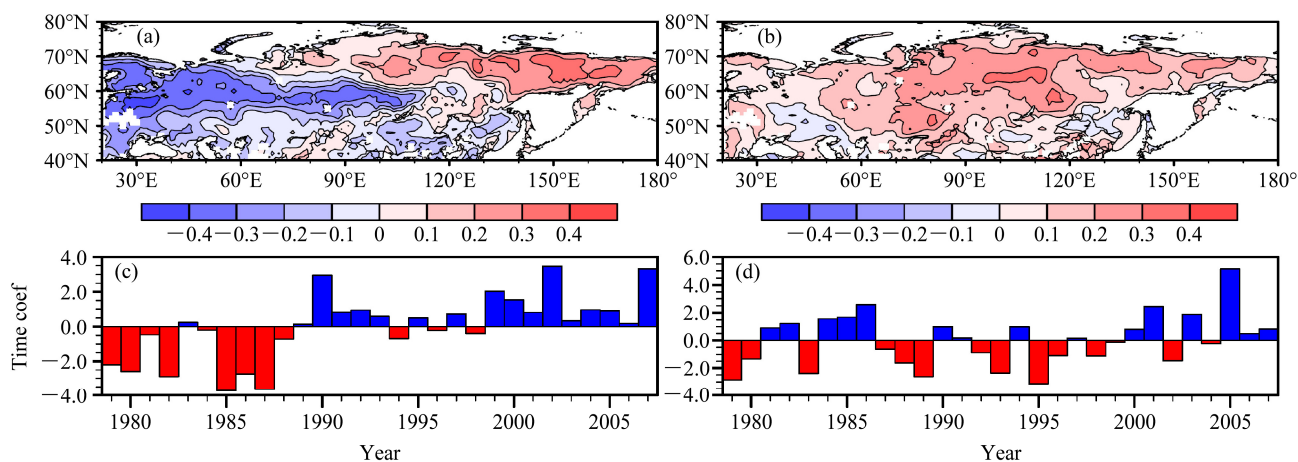


图2 欧亚大陆春季融雪量 EOF 第一模态 (a、c) 和第二模态 (b、d) 的空间分布和时间系数

Fig. 2 Spatial patterns and time series of the (a, c) first and (b, d) second EOF modes of spring snowmelt over the mid-high latitudes of Eurasian continent

得到前两个模态的方差贡献分别为 15.51% 和 9.26%。图 2a 为第一模态的空间分布, 主要表现为欧亚大陆东北部和西部反向分布的特征。正异常的变化中心位于中西伯利亚以东、鄂霍茨克海以北的大范围地区; 负异常的变化中心位于西西伯利亚及其以西的广大陆地上。图 2c 为第一模态对应的时间系数, 表现为明显的年代际变化的特征。20 世纪 80 年代末期以前, 时间系数以负值为主, 中西伯利亚以东的春季积雪融化量为负异常, 而此时西西伯利亚及东欧平原以西的大范围地区融雪量则表现为正异常; 20 世纪 80 年代末期以后, 时间系数上升明显, 基本上以正值为主, 在此时段内中西伯利亚及其以东的地区春季融雪量相对较多, 西西伯利亚以西的广大地区融雪量相对的较少。第一模态的时间系数表现为显著上升的趋势, 即欧亚大陆东北部的春季融雪显著增多, 倾向值为 0.04, 能通过 0.01 的显著性检验。

图 2b 为春季融雪量 EOF 分析第二模态的空间分布。从图中可以看出, 第二模态的空间分布主要表现为中高纬地区一致的变化特点, 变化中心位于乌拉尔山以东、贝加尔湖以北的西伯利亚地区。图 2d 为对应的时间系数的年际变化曲线, 没有明显的年代际变化特征。EOF 分析的第二模态主要代表了春季融雪量的年际变化特点。

4 欧亚大陆中高纬春季融雪量和东北夏季温度的关系

本文中选择的东北地区的 91 个测站, 在 EOF 分析中位于一致变化的中心, 具有一致变化特点。

用这 91 站的夏季气温距平的区域平均值作为刻画东北夏季温度变化的指数 (简称 I_{st})。用该指数与欧亚大陆各格点处春季融雪量求相关, 得到的相关分布图 (图略) 上的分布特点与欧亚大陆春季融雪量 EOF 第一模态的空间分布非常类似, 特别是在欧亚东北部表现为大范围的显著正相关, 西西伯利亚、东欧平原以西的小块地区表现为显著的负相关。因此, 文中选择第一模态的时间系数作为代表欧亚大陆中高纬春季融雪量变化的指数 (I_{swe}), 来研究欧亚大陆中高纬春季积雪变化对东北夏季低温的影响。

为定量刻画二者之间的关系, 图 3 给出了 1979~2007 年间 I_{st} 和 I_{swe} 的变化情况。从图中可以看出: 二者具有基本一致的变化趋势。在 20 世纪 80 年代末以前, 春季融雪量指数偏小, 对应着东北夏季温度偏低; 20 世纪 80 年代末以后, 春季融雪量指数以正值为主, 而此时温度指数也以正值居多, 东北夏季温度偏高。为了更直观的认识二者之间的关系, 计算了两者之间的相关系数: I_{st} 和 I_{swe} 之间的相关系数为 0.49, 能通过 0.05 的显著性检验, 二者表现为显著的正相关关系。即欧亚大陆中高纬春季融雪量指数低, 对应的东北夏季偏冷; 反之, 东北夏季偏暖。

为更进一步了解欧亚大陆春季融雪量指数变化对应的东北地区夏季温度在各个站点的变化情况, 用 I_{swe} 和东北地区 91 个代表站的夏季温度进行相关, 得到的相关分布如图 4 所示。 I_{swe} 与东北全区的夏季温度都表现为正相关, 其中有 2/3 以上测站的相关系数能通过 0.10 显著性水平以上的信度

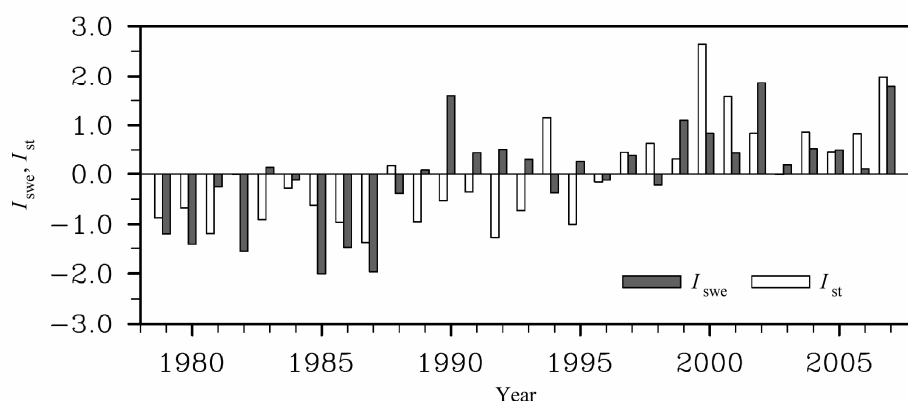


图3 1979~2007 经过标准化处理的欧亚大陆中高纬春季融雪量指数 I_{swe} 和东北夏季温度指数 I_{st} 的时间序列

Fig. 3 Time series of standardized anomaly of spring snowmelt index over the mid-high latitudes of Eurasian continent and summer temperature index over northeastern China during 1979–2007

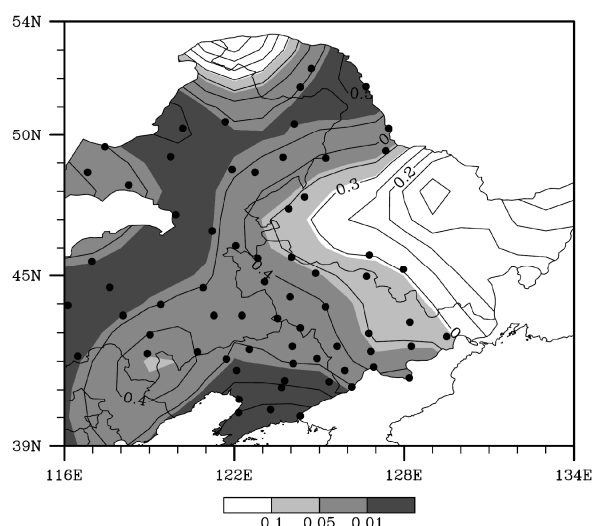


图4 欧亚大陆中高纬春季融雪量指数 I_{swe} 和东北夏季温度的相关分布。等值线间隔 0.1, 阴影部分代表相关通过 0.10 信度区域, 实心圆点代表相关显著性水平通过 0.10 信度的测站位置 (占全部测站的 67/91)

Fig. 4 Spatial distribution of correlation coefficient between spring snowmelt index over the mid-high latitudes of Eurasian continent and summer temperature over northeastern China. Contour interval is 0.1, and shaded areas and filled symbols represent the significant areas and stations above the 0.10 level, respectively. Significant stations account for 67/91 of the total

检验。当欧亚大陆东北部春季融雪量偏少, 融雪量指数偏低, 对应的我国东北地区夏季温度普遍偏低, 易发生低温冷害; 反之, 我国东北地区夏季温度普遍偏高。

5 欧亚大陆春季融雪量异常分布影响东北夏季温度的可能原因

上面的分析结果表明春季融雪量的异常分布

与我国东北夏季温度的变化对应的很好, 但是这种融雪异常是否真的就是影响我国东北夏季温度变化的原因? 又是通过什么对夏季温度产生影响的?

根据春季融雪量的异常分布可知, 融雪量指数偏低对应的欧亚大陆东北部春季融雪偏少, 而在春季平均积雪水当量的相关研究中发现积雪异常主要表现为全区一致分布的特点 (杨琨, 2008)。那么东部地区高纬春季融雪偏少是否会造成对应的夏季剩余积雪偏多? 为此, 我们分析了 I_{swe} 与欧亚夏季融雪量的相关情况 (如图 5 所示)。因为到了八月份季节性的融雪已经基本全部消失, 所以用春末 (五月) 的积雪水当量减去夏末 (八月) 的平均积雪水当量来代表夏季的融雪量。从相关分布图中可以看出, 夏季的融雪量与春季融雪量指数之间的相关十分明显, 特别是在欧亚东北部, 二者之间的相关系数基本都在 0.05 的显著性水平以上。也就是说在春季欧亚大陆东北部积雪融化少的年份所对应的这一地区剩余到夏季融雪化的积雪量就偏多。这个结论与穆松宁和周广庆 (2012) 的研究结果基本一致。

因为积雪的异常分布区在我国东北地区北部, 积雪的异常要想对温度产生影响必须通过大气环流的遥响应来实现。为了进一步分析的需要, 对欧亚大陆春季积雪融雪量指数 (I_{swe}) 进行标准化处理, 选择标准化距平大于 1 或小于 1 的年份作为春季融雪量低值年或高值年。其中欧亚大陆东北部春季融雪量异常偏少的年份有 1979、1980、1982、1985、1986、1987 年共 6 年, 异常偏多的年份有 1990、1999、2002、2007 年共 4 年。

在东北地区所在的经度范围 ($115^{\circ}\text{E}\sim 130^{\circ}\text{E}$) 内作平均, 得到春季融雪异常年对应的夏季温度距平的纬度—高度剖面图如图 6 所示。欧亚大陆东北部春季融雪偏少的年份里 (图 6a), 温度距平场上表现为一个自 30°N 以北从地面到对流层高层的大范围负距平区。负距平的低值中心位于靠近地面的低层、东北地区所在的纬度范围内, 中心值在

-0.7°C 。而对应的春季欧亚东北部融雪偏多的年份里, 30°N 以北表现为深厚的正距平, 东北地区上空以暖空气势力所主导。再结合欧亚大陆东北部春季融雪异常与夏季融雪的关系来看, 春季欧亚东北部融雪量偏小的年份所对应的该地区剩余到夏季融化的积雪量就偏多, 异常偏多的融雪会导致局地温度降低, 温度图 (图 6a) 上在中高纬表现为深厚的

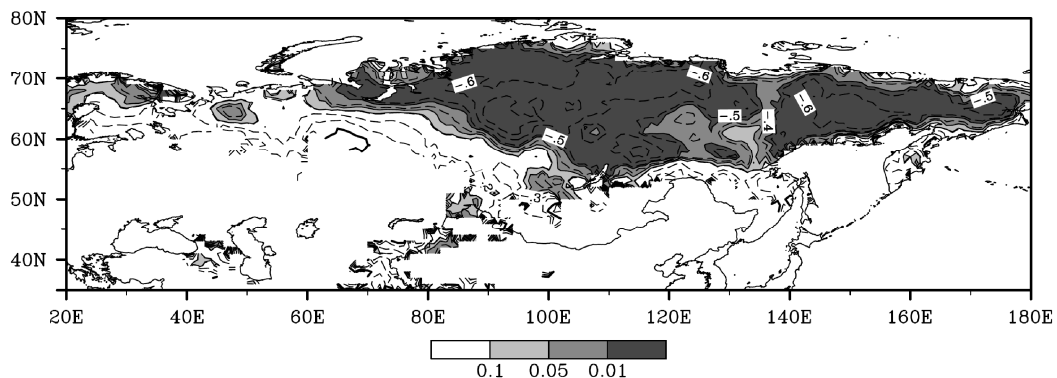


图 5 欧亚大陆中高纬春季积雪水当量增量指数 I_{swe} 与欧亚夏季融雪量的相关分布。等值线间隔 0.2, 阴影部分代表相关系数的信度水平在 0.1 以上的区域

Fig. 5 Spatial distribution of correlation coefficient between the indices of spring and summer snowmelt over the mid-high latitudes of Eurasian continent. Contour interval is 0.2, and the areas exceeding the 90% confidence level are shaded

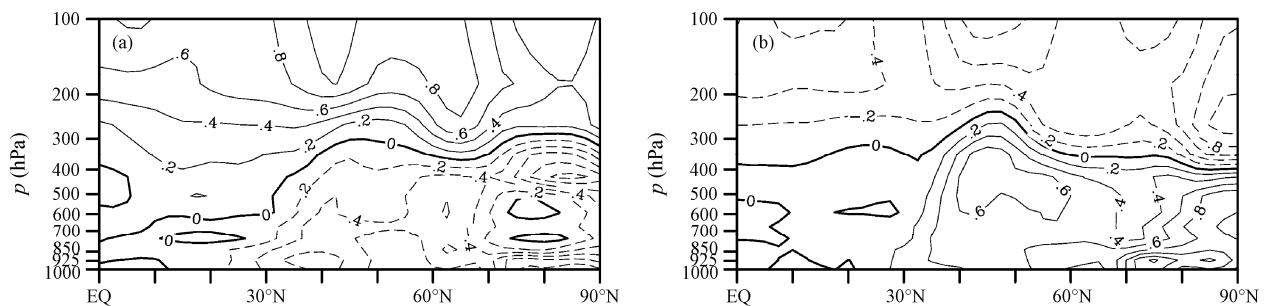


图 6 春季融雪量指数异常低值年 (a)、高值年 (b) 对应的 $115^{\circ}\text{E}\sim 130^{\circ}\text{E}$ 范围内平均夏季温度距平场的纬度—高度剖面 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 6 Longitude-height sections for summer temperature anomalies in the (a) low and (b) high index years of spring snowmelt averaged between 115°E and 130°E (units: $^{\circ}\text{C}$)

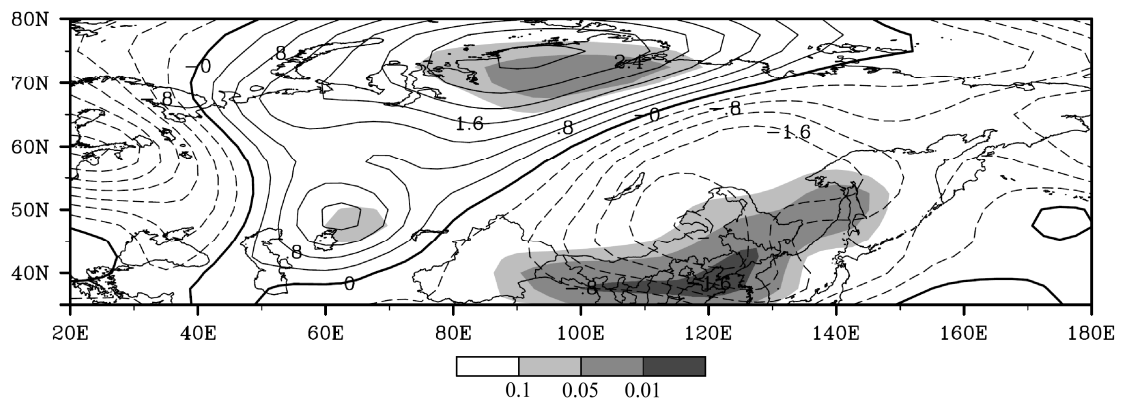


图 7 春季融雪量指数低值年与高值年对应夏季 500 hPa 高度场的差值。等值线间隔 0.4 dagpm, 阴影部分代表 t 检验的信度水平在 90% 以上的区域

Fig. 7 Spatial distribution of 500-hPa height difference between low and high index years of spring snowmelt. Contour interval is 0.4 dagpm, and shaded areas have passed t -test at the confidence level of 0.1

负温度距平; 相反, 对于春季融雪量指数偏大的年份, 夏季剩余积雪偏少, 融雪量偏小, 局地温度偏高, 温度图(图 6b)上中高纬地区受正距平所控制。

通过以上分析可知融雪发生异常的情况下, 温度场会对其做出响应。那么, 与此同时高度场也必然要做出调整以适应变化了的温度场。因此, 下面对融雪异常年份对应的夏季高度场的情况进行一些讨论。首先, 对融雪指数异常年夏季 500 hPa 高度场进行合成分析, 结果如图 7 所示: 在欧亚中高纬的范围内从西到东表现为一个负—正—负的距平波列结构, 中心都能通过信度在 0.1 以上的显著性检验, 这说明高、低值年之间的环流型差异是显著的, 这种融雪异常年份对应的环流异常分布型的可信度比较高。欧洲西部受大范围的负距平控制, 北西伯利亚及其以北的地区主要被正距平所影响, 而在鄂霍茨克海至我国东部及日本岛附近的上空高度场上都表现为大范围的负距平的作用。这种负—正—负的距平波列结构使融雪指数的低值年相对于正常年份的槽脊形势有所增强, 环流经向度随之增大, 温度南北交换剧烈。值得一提的是: 欧亚大陆中高纬东部的负距平区与图 5 中夏季融雪与欧亚春季融雪指数相关显著的位置对应的较好。从融雪、温度、环流三者的关系角度讲, 当欧亚大陆东部高纬度地区融雪量异常偏少的年份里, 夏季融雪量偏大, 融雪吸热作用增强, 局地温度场下降, 夏季 500 hPa 高度场上该地区高度下降, 表现为大范围的显著负距平系统, 使东亚大槽强度加深, 东北地区刚好位于槽后部的偏北气流所控制; 而对于东部高纬地区春季融雪量偏多的年份, 情况则刚好相反。高度场的异常分布形式与前人关于东北夏季温度异常年份的对应的 500 hPa 典型环流特点十分一致(王绍武等, 2009)。

为了进一步分析融雪异常年夏季高度场的特

点, 下面给出了春季融雪异常年份对应的夏季高度距平场的纬度—高度剖面图(图 8)。从图中可以看出当融雪指数偏低时, 春季欧亚大陆东部高纬地区融雪偏少, 到了夏季, 局地高度距平场从低层到对流层顶都表现为一致的负距平(图 8a)。这个负距平形式接近正压结构, 对应该地区上空有超长波槽稳定维持, 造成持续影响。而春季欧亚东部高纬地区融雪偏少的年份里, 该地区上空受深厚的正距平所控制, 即有超长波脊的持续作用(图 8b)。结合温度距平剖面图(图 6)来看: 春季欧亚大陆东北部融雪较少, 夏季融雪偏多, 欧亚东部中高纬上空受深厚的异常冷低压控制, 系统稳定少动持续对我国东北夏季温度造成影响; 反之, 受一个几乎正压的异常暖高所控制, 冷空气被限制在极区, 强度偏弱。这与前面 500 hPa 高度场的合成分析结果比较一致。

春季融雪量指数偏低的年份, 融雪异常的分布表现为东慢西快的特点。因此, 东部剩余到夏季的融雪量偏多, 造成温度场和高度场从低层到中层局地的调整。为了解相应的风场特征, 本文分析了东北地区所在的经度范围(115°E~130°E)内平均经向风随高度的变化(图 9)及欧亚中高纬东部 850 hPa 上的风场情况(图 10)。从图中可以看出, 春季欧亚大陆东北部融雪偏少的年份对应的夏季欧亚大陆东部中低层主要受气旋后部的异常偏北风所控制, 这支异常的偏北气流可以从极区一直延伸到中纬度地区(图 9a、10a), 使来自极地的冷空气源源不断的向较低的纬度地区输送。而对于融雪指数偏高、融雪异常分布相反的年份(图 9b), 欧亚大陆东部中低层异常偏南风可以从低纬度地区一直延伸到 35°N 附近, 同时 50°N 以北盛行异常的偏南气流, 冷空气不易向南侵袭, 而 850 hPa 的水平风场上来看(图 10b), 我国东北地区刚好处于一个

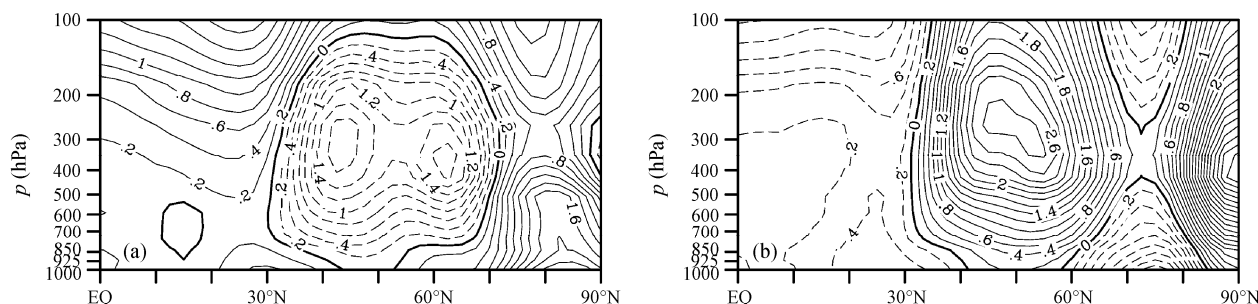


图 8 春季融雪指数异常低值(a)、高值(b)年对应的 115°E~130°E 范围内平均夏季高度距平场的纬度—高度剖面(单位: dgpm)

Fig. 8 Longitude-height sections for summer height anomalies in the (a) low and (b) high index years of spring snowmelt averaged between 115°E and 130°E (units: dgpm)

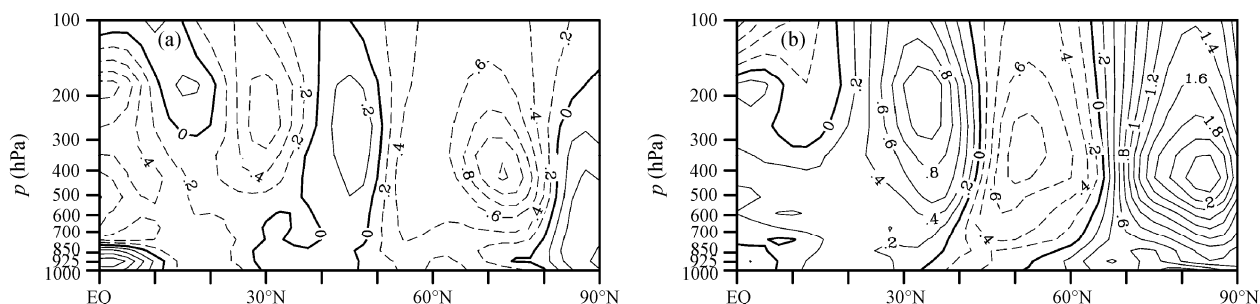


图9 春季融雪指数异常低值(a)、高值(b)年对应的115°E~130°E范围内平均夏季经向风距平的纬度—高度剖面(单位: m/s)

Fig. 9 Longitude-height sections for summer v -wind anomalies in the (a) low and (b) high index years of spring snowmelt averaged between 115°E and 130°E (units: m/s)

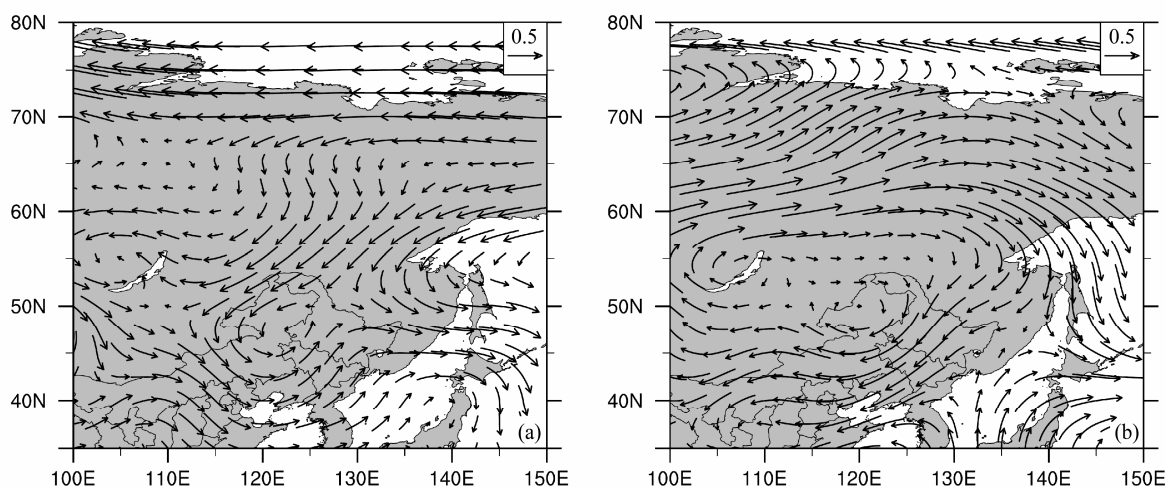


图10 春季融雪量指数异常低值年(a)、高值年(b)对应的夏季850 hPa风场距平(单位: m/s)

Fig. 10 Spatial distribution of 850-hPa summer wind anomalies in the (a) low and (b) high index years of spring snowmelt (units: m/s)

暖性反气旋的中心位置,来自极地的冷空气不易影响到我国东北地区,造成东北夏季温度偏高。

以上的观测结果表明春季欧亚大陆东部融雪偏少的同时夏季融雪表现为异常偏多的情况,此时我国东北夏季低温具有十分显著的大气环流背景,说明春、夏融雪异常与造成我国东北夏季低温的环流型之间有着显著的关联。当欧亚大陆中高纬春季融雪量表现为东负西正的异常分布,即东部春季融雪较往年偏慢的时候,到了夏季东部高纬剩余积雪量就会偏多。融雪偏多使得局地温度下降,引起低层到中层温度场的降低。为适应温度场的变化,高度场也随之下落,形成局地深厚的冷性低压系统。在500 hPa高度场上表现为长波槽的稳定维持与发展。槽后的北风增强,引导高纬的冷空气南下,使欧亚东部高纬的局地冷低压加强,范围扩大到中纬度地区,异常偏北风继续向更低的纬度推进。而我国东北刚好处于异常偏北风的控制范围,持续受来自极地冷空气的影响会造成低温冷夏的形成。同

时结合近些年来的春季融雪的变化情况来看,欧亚东北部春季融雪速度有加快的趋势,对应的东北夏季温度增暖明显,这个结论与以往关于东北夏季温度变化特点的研究结果一致(王绍武等,2009)。

6 结论

通过本文的分析可以得到如下结论:

(1) 欧亚大陆中高纬春季融雪异常与我国东北夏季温度之间存在显著的联系:当融雪量指数负异常时,欧亚大陆东北部春季融雪量偏小,对应我国东北夏季温度偏低;反之,东北夏季温度偏高。

(2) 春季融雪异常分布影响我国东北夏季低温的可能机制:欧亚大陆东部春季融雪量的负异常分布会导致欧亚东北部夏季剩余积雪较常年偏多,由于积雪的水分效应导致该地夏季温度回暖较弱,温度异常偏低,等压面下降。同时500 hPa高度场上同一位置的位势高度下降,长波槽持续加强,槽后的偏北气流增大,引导极地的冷空气南下,使得欧

亚东部高纬地区的局地冷低压加强, 范围扩大到中纬度地区, 以致异常偏北风带来的冷空气可以向更低的纬度推进, 从而影响到我国东北地区, 造成我国东北夏季低温。

以往的研究表明(章名立等, 1980, 1983; 王敬方和吴国雄, 1997; 陈莉和朱锦红, 2004; 郭家林等, 2004; 汪秀清等, 2006; 王绍武等, 2009; 张茜和李栋梁, 2012), 影响东北夏季温度的因子很多, 其中包括关键区的海温、典型的环流系统和不同的下垫面状况等很多方面。本文仅从积雪的角度利用观测分析的方法初步证实了欧亚大陆春季融雪异常对东北夏季低温的发生具有比较好的指示作用。但大气内部的动力过程是十分复杂的, 关于融雪异常是如何对夏季环流产生影响, 又是如何通过影响环流来进一步影响我国东北夏季温度等问题, 以上仅给出了基于统计分析的猜测, 并不能解释其中所有的动力过程, 所以关于其中详细的物理机制还有待于依赖气候模式来进行深入的讨论。另外, 本文只考虑了融雪异常分布对后期气候的影响, 关于造成这种融雪异常分布的原因还有待于我们的进一步分析。

参考文献 (References)

- Armstrong R L, Brodzik M J, Knowles K, et al. 2005. Global monthly EASE-Grid snow water equivalent climatology [Z]. Boulder, CO: National Snow and Ice Data Center, Digital Media.
- 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: 3–22.
- Barnett T P, Dumenil L, Schlase U, et al. 1989. The effect of Eurasian snow cover on regional and global climate variations [J]. *J. Atmos. Sci.*, 46: 661–685.
- 陈海山, 孙照渤. 2003. 欧亚积雪异常分布对冬季大气环流的影响 I. 观测研究 [J]. *大气科学*, 27 (3): 304–316. Chen Haishan, Sun Zhaobo. 2003. The effects of Eurasian snow cover anomaly on winter atmospheric general circulation. Part I. Observational studies [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 27 (3): 304–316.
- 陈海山, 孙照渤, 朱伟军. 2003. 欧亚积雪异常分布对冬季大气环流的影响 II. 数值模拟 [J]. *大气科学*, 27 (5): 847–860. Chen Haishan, Sun Zhaobo, Zhu Weijun. 2003. The effects of Eurasian snow cover anomaly on winter atmospheric general circulation. Part II. Model simulation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 27 (5): 847–860.
- 陈海山, 许蓓. 2012. 欧亚大陆冬季雪深的时空演变特征及其影响因子分析 [J]. *地理科学*, 32 (2): 129–135. Chen Haishan, Xu Bei. 2012. Spatial and temporal features of snow depth in winter over Eurasian continent and its impacting factors [J]. *Scientia Geographica Sinica (in Chinese)*, 32 (2): 129–135.
- 陈莉, 朱锦红. 2004. 东北亚冷夏的年代际变化 [J]. *大气科学*, 28 (2): 241–253. Chen Li, Zhu Jinhong. 2004. Inter decadal variability of cool summer of northeastern Asia [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 28 (2): 241–253.
- 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): 122–129. 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): 122–129.
- 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.
- 符宗斌. 1980. 北半球冬春冰雪面积变化与我国东北地区夏季低温的关系 [J]. *气象学报*, 38 (2): 187–192. Fu Congbin. 1980. The relationship between ice and snow over the Northern Hemisphere in winter and spring and summer low temperature in Northeast China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 38 (2): 187–192.
- Fasullo J. 2004. A stratified diagnosis of the Indian monsoon eurasian snow cover relationship [J]. *J. Climate*, 17 (5): 1110–1122.
- Ge Y, Gong G. 2009. North American snow depth and climate teleconnection patterns [J]. *J. Climate*, 22 (2): 217–233.
- 郭家林, 陈莉, 李帅. 2004. 西北太平洋大气海洋对东北亚冷夏形成的影响 [J]. *自然灾害学报*, 13 (2): 51–57. Guo Jialin, Chen Li, Li Shuai. 2004. Effect of atmosphere and sea of northwest Pacific on formation of cool summer in Northeast Asia [J]. *Journal of Natural Disasters (in Chinese)*, 13(2): 51–57.
- Jin J M, Miller N L, Sorooshian S, et al. 2006. Relationship between atmospheric circulation and snowpack in the western USA [J]. *Hydrological Processes*, 20 (4): 753–767.
- 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: 475–489.
- 李震坤, 武炳义, 朱伟军. 2009. 春季欧亚积雪异常影响中国夏季降水的数值试验 [J]. *气候变化研究进展*, 2009, 5 (4): 196–201. Li Zhenkun, Wu Bingyi, Zhu Weijun. 2009. Numerical simulation on effect of spring Eurasian snow cover on summer rainfall in China [J]. *Advances in Climate Change Research (in Chinese)*, 5 (4): 196–201.
- Leathers D J, Elliset A W, Robinson D A. 1995. Characteristics of

- temperature depressions associated with snow cover across the Northeast United States [J]. *Appl. Meteor.*, 34 (2): 381–390.
- 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.
- Peings Y, Douville H. 2010. Influence of the Eurasian snow cover on the Indian summer monsoon variability in observed climatologies and CMIP3 simulations [J]. *Climate Dyn.*, 34 (5): 643–660.
- Robock A, Mu M Q, Vinnikov K, et al. 2003. Land surface conditions over Eurasia and Indian summer monsoon rainfall [J]. *Geophys Res Lett*, 108 (D4): 4131–4144.
- 孙照渤, 闵锦忠, 陈海山. 2000. 冬季积雪的异常分布型及其与冬、夏大气环流的耦合关系 [J]. *南京气象学院学报*, 23 (4): 463–468. Sun Zhaobo, Min Jinzhong, Chen Haishan. 2000. Patterns of winter snow-depth anomaly with their coupled relation to atmospheric circulation in summer and winter [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 23 (4): 463–468.
- 王敬方, 吴国雄. 1997. 持续性东北冷夏的变化规律及相关特征 [J]. *大气科学*, 21 (5): 523–532. Wang Jingfang, Wu Guoxiong. 1997. Evolution and characteristics of the persistent cold summer in Northeast China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 21 (5): 523–532.
- 王绍武, 马树庆, 陈莉, 等. 2009. 低温冷害 [M]. 北京: 气象出版社, 105–106. Wang Shaowu, Ma Shuqing, Chen Li, et al. 2009. *Chilling Damage (in Chinese) [M]*. Beijing: China Meteorological Press, 105–106.
- 汪秀清, 马树庆, 袁祝香, 等. 2006. 东北区夏季低温冷害的长期预报 [J]. *自然灾害学报*, 15 (3): 42–45. Wang Xiuqing, Ma Shuqing, Xi Zhuxiang, et al. 2006. Long-term forecast of summer's chilling damage in Northeast China [J]. *Journal of Natural Disasters (in Chinese)*, 15 (3): 42–45.
- 王叶堂, 何勇, 侯书贵. 2008. 青藏高原冬春季积雪对亚洲夏季风降水影响的研究 [J]. *冰川冻土*, 30 (3): 452–460. Wang Yetang, He Yong, Hou Shugui. 2008. Recent progress in researches of the impact of winter and spring snow cover on the Asian summer monsoon precipitation in the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese)*, 30 (3): 452–460.
- 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.
- 许蓓. 2011. 欧亚大陆冬季雪深的时空演变特征及其成因分析 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文. Xu Bei. 2011. Spatial/temporal features of winter snow depth anomaly over Eurasian Continent and its impacting factors [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science & Technology.
- 许立言, 武炳义. 2012. 欧亚大陆积雪两种物理效应对 2010 年春夏初华南降水的影响 [J]. *大气科学*, 36 (2): 271–282. Xu Liyan, Wu Bingyi. 2012. Two physical effects of Eurasian snow cover on the late-spring and early-summer rainfall in South China of 2010 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36 (2): 271–282.
- 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.
- 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: 473–487.
- Ye H C, Bao Z H. 2005. Eurasian snow conditions and summer monsoon rainfall over South and Southeast Asia: Assessment and comparison [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 22 (6): 877–888.
- 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 (D 辑)*, 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 relationship with Eurasian snow [J]. *Sci. China (Earth Sci.)*, 55 (2): 271–278.
- 左志燕, 张人禾. 2012. 中国春季降水异常及其与热带太平洋海面温度和欧亚大陆积雪的联系 [J]. *大气科学*, 36 (1): 185–194. Zuo Zhiyan, Zhang Renhe. 2012. The anomalies of spring rainfall in China and its relation with tropical Pacific SST and Eurasian snow [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36 (1): 185–194.
- 章名立, 符宗斌, 曾昭美, 等. 1980. 我国夏季东北地区低温与全球气温的特征 [J]. *科学通报*, (19): 893–895. Zhang Mingli, Fu Congbin, Zeng Zhaomei, et al. 1980. The features of summer low temperature over Northeast China and global air temperature [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, (19): 893–895.
- 章名立, 符宗斌, 王铭如, 等. 1983. 七十年代全球地面气温的初步研究 (三)——我国东北冷、暖夏年全球温度场的分布 [J]. *大气科学*, 7 (1): 23–32. Zhang Mingli, Fu Congbin, Wang Mingru, et al. 1983. Study of global surface temperature field in 70's (3): The global temperature patterns during the cold and warm summers in the Northeast China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 7 (1): 23–32.
- 张茜, 李栋梁. 2012. 欧亚和我国东北冬春季积雪对东北夏季气温的影响 [J]. *冰川冻土*, 34 (2): 284–295. Zhang Qian, Li Dongliang. 2012. Influence of winter and spring snow cover in Eurasia and Northeast China on summer air temperature over Northeast China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese)*, 34 (2): 284–295.
- 张顺利, 陶诗言. 2001. 青藏高原积雪对亚洲夏季风影响的诊断及数值研究 [J]. *大气科学*, 25 (3): 372–390. Zhang Shunli, Tao Shiyuan. 2001. The Influences of snow cover over the Tibetan Plateau on Asian summer monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 25 (3): 372–390.
- 张天宇, 陈海山, 孙照渤. 2007. 欧亚秋季雪盖与北半球冬季大气环流

的联系 [J]. 地理学报, 62 (7): 728–741. Zhang Tianyu, Chen Haishan, Sun Zhaobo. 2007. The relationship between autumn-time Eurasian snow cover and winter-time NH circulation [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 62 (7): 728–741.

周立宏, 刘新安, 周玉慧. 2001. 东北地区低温冷害年的环流特征及预

测 [J]. 沈阳农业大学学报, 32 (1): 22–25. Zhou Lihong, Liu Xin'an, Zhou Yuhui. 2001. Research of general circulation features and forecast of summer low temperature and cold damage in the northeast of China [J]. Journal of Shenyang Agricultural University (in Chinese), 32 (1): 22–25.