

卢楚翰, 管兆勇, 李震坤, 等. 2014. 春季欧亚大陆积雪对春夏季南北半球大气质量交换的可能影响 [J]. 大气科学, 38 (6): 1185–1197, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1405.13289. Lu Chuhan, Guan Zhaoyong, Li Zhenkun, et al. 2014. Effects on inter-hemispheric air mass exchange between the Southern and Northern Hemisphere by Eurasian spring snow [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (6): 1185–1197.

春季欧亚大陆积雪对春夏季南北半球 大气质量交换的可能影响

卢楚翰¹ 管兆勇¹ 李震坤² 金大超¹ 秦育婧¹

¹ 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

² 上海市气候中心, 上海 200030

摘 要 本文基于春季欧亚雪盖资料与大气再分析资料的奇异值分解 (SVD) 分析结果, 结合数值试验, 研究了春季欧亚大陆积雪变化与春、夏季南北半球大气质量交换的联系。研究表明, 当春季欧亚积雪异常偏多时, 同期欧亚大陆中高纬大范围地区的地面气温异常偏低, 这种冷却效应可能持续至夏季, 同时, 冷空气的堆积造成了欧亚大陆地表气压 (气柱大气质量) 的增加, 并且对应了夏季北半球大气总质量的异常上升, 而南半球大气质量却明显下降。分析发现, 春季欧亚积雪异常与夏季南北半球际大气质量涛动存在显著的滞后相关, 而且前者还与同期及后期包括索马里急流和对流层上部 80°E~120°E 区域高空急流在内的多处越赤道气流变化联系密切。从数值模拟结果分析发现, 以改变春季初始积雪状况作为驱动, 欧亚大陆中高纬地区的低层大气环流出现了显著响应, 即当积雪增加时, 同期及其后夏季地面气温显著降低, 并且冷异常区域对应着气柱质量的异常升高。

关键词 欧亚大陆积雪 南北半球大气相互作用 大气质量 越赤道气流

文章编号 1006-9895(2014)06-1185-13

中图分类号 P461.6

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1405.13289

Effects on Inter-hemispheric Air Mass Exchange between the Southern and Northern Hemisphere by Eurasian Spring Snow

LU Chuhan¹, GUAN Zhaoyong¹, LI Zhenkun², JIN Dachao¹, and QIN Yujing¹

¹ Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

² Shanghai Climate Center, Shanghai 200030

Abstract The relationship between Eurasian spring snow and the simultaneous and subsequent summer bi-hemispheric air mass exchange are examined using both Singular Value Decomposition (SVD) analysis for springtime snow cover and atmospheric data reanalysis along with general circulation model (GFDL AM2) ensemble simulations. The results can be summarized as follows. Remarkable negative (positive) correlations are revealed between Eurasian spring snow frequency and surface air temperature (columnar air mass) in the Eurasian continent. Following positive anomalous springtime snow, there are statistically significant negative spring surface air temperature (SAT) anomalies over Eurasian mid- and high-latitudes. This cooling effect can be sustained into the subsequent summer, bringing about increasing

收稿日期 2013-10-19, 2014-05-16 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 41005046、41175062, 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2010CB428602, 江苏省自然科学基金项目 BK2012465, 江苏高校优势学科建设工程项目

作者简介 卢楚翰, 男, 1981 年出生, 副教授, 主要从事气候变率及大气环流异常方面研究。E-mail: luchuhan@nuist.edu.cn

通讯作者 管兆勇, E-mail: guanzy@nuist.edu.cn

surface pressure (columnar air mass). Interestingly, with the rising of anomalous hemispherical air mass, such continental-scale cold air piling increases in the Northern Hemisphere but decreases in the Southern Hemisphere. Furthermore, both Eurasian spring snow cover index and time series of the first SVD mode of snow frequency display significant positive correlation with inter-hemispheric air mass oscillations (IHO). The correlation coefficients are 0.391 and 0.393, respectively. This associated bi-hemispheric imbalanced air mass is statistically correlated to cross-equator fluxes in the Eastern Hemisphere in both spring and summer, including the Somali Jet and the upper level jet stream from 80°E to 120°E. Our ensemble GCM simulations show that the notable response of surface general circulation displays over Eurasian mid-high latitudes forced by different initial snow mass conditions in spring. When snow mass increases in Eurasia, continental negative SATs are observed in spring and summer, thereby giving rise to increases in large-scale air masses.

Keywords Eurasian snow, Bi-hemispheric air interaction, Air mass, Cross-equator flux

1 引言

陆面积雪作为冰冻圈的主要组成部分,是引起全球气候系统变化的重要因素之一(Namias, 1985)。1884年,Blanford(1884)首次提出了喜马拉雅山地区积雪异常可能会影响印度季风。此后学者们开展了一系列围绕亚欧大陆地区积雪异常与亚洲季风的天气、气候异常联系的研究工作,揭示了前期冬、春季欧亚雪盖与印度夏季风之间的联系(Bamzai and Shukla, 1999; Kripalani and Kulkarni, 1999; Dash et al., 2006),然而对于欧亚积雪与印度夏季风的联系程度尚存在一定争议(Liu and Yanai, 2001; Robock et al., 2003; Fasullo, 2004)。

相对而言,我国学者更多关注欧亚积雪变化与东亚夏季风异常的影响。研究显示,欧亚大陆积雪尤其是青藏高原积雪与东亚夏季风、环流异常以及气候变化的关系紧密(陈乾金等, 2000; Wu and Qian, 2003; Zhao et al., 2007; Wu et al., 2009; Souma and Wang, 2010; Yim et al., 2010)。许多研究表明,冬、春季节欧亚积雪通过影响东亚夏季风,从而与我国夏季气候异常分别存在“隔季”或滞后相关的联系。杨秋明(1997)分析了欧亚雪盖准两年振荡(QBO)对中国降水影响的循环过程,指出中国降水低频场存在两种不同的伴随相关型,其主要响应区域在西部和长江以南地区。陈兴芳和宋文玲(2000)通过高原积雪和欧亚积雪与我国夏季降水的关系分析,发现冬、春季雪盖变化对我国夏季旱涝有重要的影响。Wu et al. (2009)进一步指出,欧亚大陆春季雪水当量异常激发出的中、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。由于春季积雪自身异常综合了自前期秋季至当季的积雪异常信息(穆松宁,

2008),积雪变化量对大气环流和我国气候异常的影响也不容忽视。最近,穆松宁和周广庆(2010)以冬季欧亚大陆北部新增雪盖面积定义指数,指出冬季该指数的异常变化与我国夏季气候异常存在明显关联,这种显著关联独立于厄尔尼诺/南方涛动(ENSO)事件并且在近40年来较为稳定。许立言和武炳义(2012a)分析了春季融雪量异常与东亚夏季风的关系,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引起正异常的位势高度场,相应异常中心的移动可能造成了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。

数值模拟研究也表明,冬、春季节欧亚积雪与我国夏季气候异常有着密切的联系。卢咸池和罗勇(1994)利用中国科学院大气物理研究所两层大气环流格点模式(IAP2L AGCM)进行了青藏高原冬、春季雪盖异常对东亚夏季大气环流、加热场和降水影响的数值试验,发现当高原雪盖异常时,我国区域500 hPa位势高度异常呈明显的波列特征。李震坤等(2009)通过数值试验分析发现,春季欧亚大陆积雪异常通过改变气候夏季的土壤湿度和温度分布,改变对流层厚度场并激发一个从欧洲西部到东亚的500 hPa高度场异常波列,造成我国降水呈南北相异的异常态势。许立言和武炳义(2012b)分别针对欧亚大陆积雪的反照率效应和水文效应,对2010年5~6月华南降水的影响进行数值试验,他们指出积雪的两种物理效应都会对后期华南降水产生影响,其中积雪水文效应比反照率效应引起的变化幅度大,两种效应共同作用造成的变化幅度最大。

对于冬、春季节欧亚积雪影响我国夏季气候异常的持续机制,讨论较多的是雪盖自身的持续异常

所造成的雪盖反照率反馈机制 (Yasunari et al., 1991), 以及积雪融化的水文效应机制 (Yeh et al., 1983; Yasunari et al., 1991)。其中, 水文效应造成的土壤湿度持续异常是其影响的主要物理途径 (Zhao et al., 2007; Wu et al., 2009; Matsumura et al., 2010)。积雪的冷却效应能够改变海陆间温度差异, 从而影响亚洲季风环流 (Sankar-Rao et al., 1996; Bamzai and Shukla, 1999)。穆松宁和周广庆 (2012) 指出欧亚北部冬季新增雪盖面积通过影响春夏季积雪融化进程、土壤温度, 进而对东亚大气环流产生影响, 并与我国江南夏季降水异常产生关联。积雪引起的陆面过程异常可通过大气内部动力过程, 引起大气环流异常。例如, 欧亚大陆积雪异常可以引起大气 EP 通量的异常, 进而引起行星波异常, 造成了大气环流异常并影响东亚气候 (Wang et al., 2009; Zuo et al., 2012)。以往研究对于揭示欧亚积雪异常影响大气环流气候变化的物理机制方面已经取得了很多的成果。然而, 统计诊断与数值模拟结果之间仍存在较大差异, 不具可比性; 此外, 许多模拟试验往往通过改变初始场中积雪异常强迫, 但由于积雪要素自身为预报量, 大气环流对积雪异常的持续响应以及积雪异常自身的持续效应没有得到充分考虑。

由于冷季欧亚大陆覆盖着广阔的积雪, 通过与大气的耦合联系, 大范围的积雪异常增加可以导致大陆上冷空气的异常堆积, 从而改变大陆的地表气压。大气环流异常的响应是否可持续至夏季, 由此改变夏季海陆气压梯度变化并影响夏季亚洲季风异常? 另外, 为保持全球干空气质量守恒, 大陆尺度的冷空气异常堆积, 必须通过其他区域的空气异常输出以达到平衡, 例如 Barnett (1985) 利用亚洲雪盖的异常变化揭示了全球尺度的海平面气压遥相关信号, 此后相应结果得到了进一步验证 (Yasunari, 1987)。Guan and Yamagata (2001) 发现南北半球间地表气压在年际尺度以上存在此消彼长的现象 (南北涛动, IHO), 并利用两半球地表气压差构造了 IHO 指数。那么, 大陆尺度的冷空气异常堆积是否可以引起北半球甚至南半球区域大气质量或 IHO 的异常变化, 由此造成的半球际大气质量不平衡是否可以通过加强两半球大气相互作用并影响夏季亚洲区域气候变化?

基于上述问题, 本文将对由春季欧亚大陆雪盖异常变化造成的大气环流异常特征以及其后夏季

大气的持续响应进行统计诊断分析, 并进一步探讨雪盖异常与之后南北两半球大气质量交换和两半球大气相互作用的可能联系。此外, 还将利用大气环流模式, 检验大气环流和大气质量分布对不同欧亚大陆春季持续积雪异常状况的响应。

2 资料与模式介绍

2.1 资料

本文所用北半球逐月雪盖资料和逐月欧亚积雪面积指数取自美国国家海洋大气局的冰雪数据中心 (NSIDC) (Armstrong and Brodzik, 2005), 该数据经处理后插值为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 度均匀网格。由于春季 (4、5 月份平均) 欧亚大陆雪盖面积在 1967~1981 年期间平均值明显高于 1982~2010 年, 尤其是 1979~1981 年面积明显增大 (图 1), 为减小气候均值变化对分析结果的影响, 且考虑到本文所用的大气再分析资料 (ERA-Interim) 起始于 1979 年, 因此将研究时段取为 1982 年 4 月至 2010 年 8 月。需要指出的是, 逐月雪盖要素实际为雪盖的月累积频 (天) 数, 即当月某一天该格点积雪覆盖面积大于 50% 时, 当月频数增加一次, 因此本文简称为积雪天数。大气资料采用欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 的 Interim 月平均再分析资料集 (Simmons et al., 2007), 水平分辨率为 $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$, 并将 4、5 (6~8) 月平均作为春 (夏) 季资料。

2.2 大气环流模式

为进一步认识欧亚大陆积雪异常对大气环流

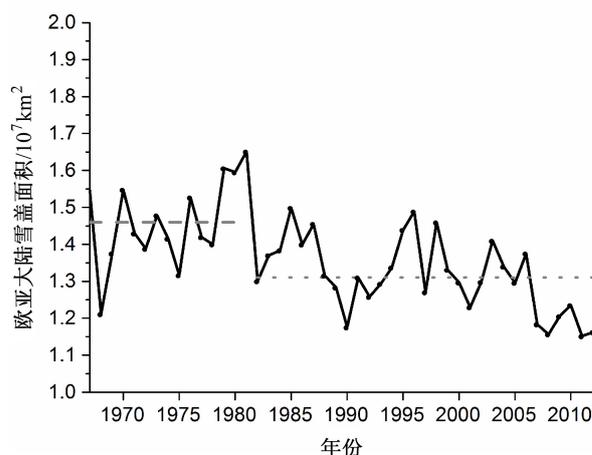


图 1 春季 (4、5 月份平均) 欧亚大陆雪盖面积。其中虚线为 1967~1981 年平均值, 点线为 1982~2010 年平均值

Fig. 1 The spring Eurasian snow cover (April-May mean). Dashed (dotted) line denotes the mean value of snow cover during 1967-1981 (1982-2010)

异常的影响, 本文使用美国国家海洋和大气管理局地球流体动力学实验室的第二版大气环流/陆面耦合模式 (GFDL-AM2/LM2) 进行敏感性试验。该模式大气部分 (AM2) 水平面上采用 Arakawa-B 网格, 水平分辨率为 2.5° (经度) $\times 2^\circ$ (纬度), 垂直方向采用非等间距混合垂直坐标, 模式顶约在平流层 3 hPa, 总共 24 层, 具体模式介绍见 GAMDT (2004)。

3 结果

3.1 积雪与气温的耦合关系

为分析春季欧亚积雪异常与气温的耦合关系, 首先对春季欧亚大陆积雪天数异常与同期地面气温进行了奇异值分解 (SVD, Singular Value Decomposition) 分析。图 2 给出了 SVD 分析的第一模态 (SVD1), 其对总方差的贡献率达 23%, 后面主要讨论第一模态 SVD1。由图 2a 可以看出, 正的积雪高相关区主要集中在西伯利亚、蒙古及我国新疆地区, 相关系数最大值达 0.6, 即当积雪 SVD1 增强时, 这些区域的积雪将会明显增加。另外我国东北地区及青藏高原西部出现负相关, 体现出这些地区积雪局地变化特性。总体上, 积雪 SVD1 与欧亚积雪变化以正相关联系为主。气温 SVD1 与欧亚

积雪变化的异类相关分布 (图 2b) 与积雪 SVD1 对应的同类相关分布 (图 2a) 基本一致, 体现了气温 SVD1 与积雪 SVD1 之间具有较好的共变联系 (两者的相关系数达到 0.83)。相对而言, 积雪异类相关的显著区域在大陆中部较图 2a 明显偏大, 虽然大值区相关系数有所降低。

由图 2c 和 d 可以看出, 气温 SVD1 的同类以及异类相关在欧亚西南部以及西亚大部分地区均出现显著正相关, 相关系数大部分达 -0.4 以上, 欧亚大陆其他区域的地面气温也基本为负相关。这说明春季欧亚积雪天数与地面气温变化存在较强的耦合联系, 当积雪覆盖持续时间偏长时, 欧亚大陆地表气温明显偏低, 这应该与积雪异常导致的辐射冷却和融雪过程消耗热量的共同冷却作用有关。

由图 2a 还可发现积雪 SVD 第一模态中的欧亚春季积雪总体上具有一致性变化特征, 这与 Yim et al. (2010) 揭示的大陆尺度变化是春季欧亚雪盖主导模态相一致。而且积雪 (气温) 场 SVD1 与春季欧亚大陆雪盖面积的相关系数为 0.50 (0.40), 均通过了显著性水平为 0.05 的 t 检验, 即积雪与气温的主导共变模态的时间变化较好地体现了欧亚大陆雪盖面积的变化特征。进一步分析春季欧亚积雪天

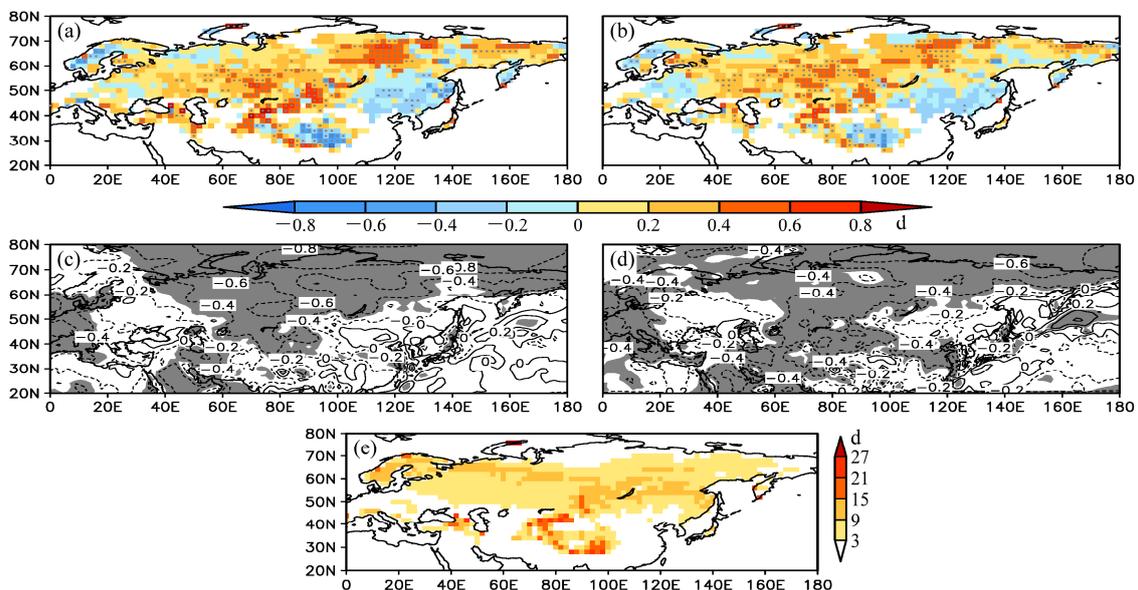


图 2 春季欧亚大陆积雪天数异常与同期地面 2 m 气温异常的 SVD 主导模态结果。(a) 第一模态左 (积雪天数) 同类相关系数; (b) 第一模态左异类相关系数; (c) 第一模态右 (气温) 同类相关系数; (d) 第一模态右异类相关系数; (e) 春季欧亚大陆积雪天数标准差。其中, (a, b) 图中带点格点和 (c, d) 图中灰色阴影均表示通过显著性水平为 0.1 的 t 检验。(a, b, e) 单位为 d, (c, d) 单位为 $^{\circ}\text{C}$

Fig. 2 The leading coupled mode between Eurasian spring anomalous days of snow cover and simultaneous anomalous SAT (surface air temperature). (a) Homogeneous correlation coef of the first left SVD leading mode (SVD1) of days of snow cover; (b) inhomogeneous correlation coef of the left SVD1; (c) homogeneous correlation coef of the right SVD1; (d) inhomogeneous correlation coef of the right SVD1; (e) standard deviation of Eurasian days of snow cover. The dotted grids in (a, b) and shaded areas in (c, d) denote the values pass t test at significance level of 0.1. Units: d in (a, b, e) and $^{\circ}\text{C}$ in (c, d)

数的标准差可发现 (图 2e), 在欧亚大陆中高纬度地区均有着较明显的年际变率, 说明可以通过积雪 SVD1 (即积雪第一模态对应的时间序列, 以下简称 PC1) 从整体上分析春季欧亚雪盖变化。

为进一步分析春季欧亚积雪与同期及其后夏季地面气温的联系程度, 图 3 分别给出了春季及夏季地面气温异常对标准化 PC1 的回归结果。从图 3a 看出, 欧亚大陆大部分地区出现冷异常, 其中大陆北部地区降温最明显, 当 PC1 达到一个标准差时, 将会引起这些地区 1°C 以上的冷却降温。另外在欧洲南部、亚洲中西部以及我国江淮地区也出现了明显降温。因此, 欧亚积雪的增加对欧亚大陆大部分地区起到冷却作用, 这与前面相关分析结果相吻合。值得注意的是, 欧亚积雪与夏季亚欧大陆大部分区域地表气温存在显著负相关 (图 3b), 与春季不同的是, 欧亚北部的显著联系区有所收缩, 而在中亚地区的显著区域则向东南扩大至我国西部及东北地区, 且其联系程度有所增强, 此外欧洲大部分区域也出现显著降温。因此, 春季欧亚大陆积雪与春、夏季大陆地表气温耦合联系明显。

比较图 3a 和 b 发现, 积雪与气温的联系存在季节性差异。尤其在我国北方以及蒙古地区, 积雪与夏季气温的滞后联系明显强于同期。为讨论其差异原因, 进一步绘制了 PC1 与春、夏季土壤湿度的相关系数 (图 3c、d)。可以看到, PC1 与春季大陆土壤湿度的显著相关区主要集中在欧洲西部、我国北方以及蒙古地区, 大陆中纬度区域以正相关为主, 说明雪盖面积偏大一定程度上有利于土壤的湿度增加。而从 PC1 与夏季大陆土壤湿度的滞后相关

看出, 积雪与我国北方及蒙古地区土壤湿度联系最为显著, 而且相对于春季, 该显著区域明显向我国东北以及华北地区扩展, 这与 PC1 与夏季气温在此区域的联系增强是对应的。由文中图 2e 看到春季这些区域存在积雪, 可以推测进入夏季后区域性的积雪消融吸收热量引起了以上区域地面气温的显著下降, 并使得土壤湿度相应增加。

为突出春季欧亚积雪与春、夏季区域气温异常的耦合联系, 图 4 (见文末彩图) 进一步给出了春季欧亚大陆北部区域 ($60^{\circ}\text{N}\sim 80^{\circ}\text{N}$, $60^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{E}$, 区域 1) 平均气温异常和夏季蒙古及我国内蒙古地区 ($40^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $90^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$, 区域 2) 平均气温异常与 PC1 的变化关系。从图 4 上部可以看到, 春季欧亚积雪与以上两个区域的负相关十分明显, 相关系数分别为 -0.70 和 -0.80 , 均通过了显著性水平为 0.01 的 t 检验。这表明春季欧亚积雪变化与以上区域地面气温存在紧密的联系。值得注意的是, PC1 以及以上区域气温存在明显的年代际变化, 其中 PC1 在 1990 年代中期发生年代际转型, 其整体下降趋势明显, 说明春季欧亚雪盖面积出现显著缩减的年代际变化, 这与欧亚大陆积雪显著下降趋势是一致的 (Zuo et al., 2012), 但是本文年代际转折点晚于之前研究, 可能与本文所取的时段以及积雪要素不同有关。与之相反, 春季区域 1 和夏季区域 2 的气温在 1990 年代中期发生由正转负的年代际变化, 对应着气温的显著升高。事实上, 春、夏季欧亚大陆热带外地区整体平均气温均出现 $0.4^{\circ}\text{C} (10\text{a})^{-1}$ 以上的显著增温趋势, 并且在 1990 年代中期出现了一致的显著年代际转折, 由此说明欧

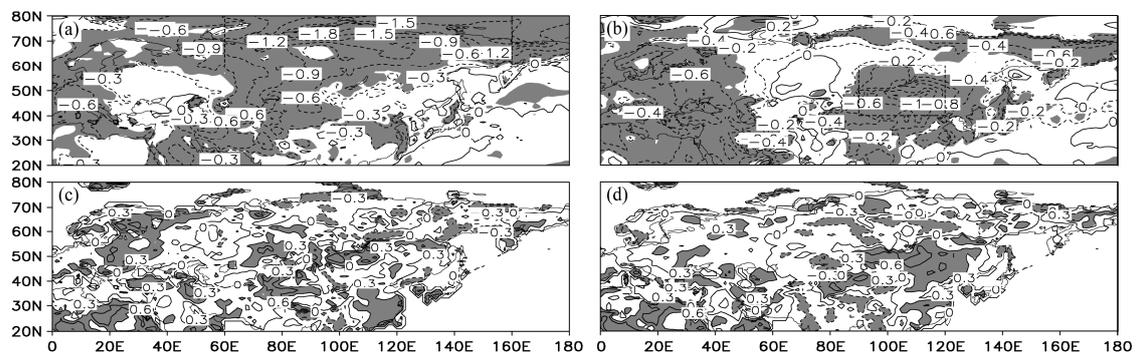


图 3 (a) 春季及 (b) 夏季地面气温异常对 PC1 的回归系数 (单位: $^{\circ}\text{C}$); (c) 春季及 (d) 夏季上层土壤湿度与 PC1 的相关系数。灰色阴影表示通过显著性水平为 0.05 的 (a、b) F 检验以及 (c、d) t 检验; 虚线框表示图 4 中受积雪显著影响的区域

Fig. 3 (a, b) Anomalous SAT regressed on time series of the first SVD mode of snow frequency in Fig. 2 (PC1) (units: $^{\circ}\text{C}$) and (c, d) correlation coefficient between first-level soil humidity and PC1: (a, c) Spring; (b, d) summer. The shaded areas denote values below the 0.05 significance level based on F test in (a, b) and t test in (c, d); the dashed rectangles represent significantly impacted regions by snow condition in Fig. 4

亚雪盖的年代际缩减与欧亚大陆热带外地区气温升高相互联系密切。另一方面,图4下部还给出了去除线性趋势后的各时间序列,它们体现了各自的年际变化特征。可以看出,PC1的年际变化与区域1和2的气温变化仍存在明显的反相关联系,其中它们去趋势后的相关系数分别为 -0.55 、 -0.41 ,均通过了显著性水平为 0.05 的 t 检验,特别是在PC1的极端年份,区域1和2平均气温的位相基本与PC1相反。因此,欧亚大陆积雪整体变化与区域1和2气温变化的反相关联系,既体现了它们相反的年代际变化,也蕴含了它们的反相年际异常特征。

3.2 积雪与大尺度大气质量重新分布的联系

3.2.1 积雪与欧亚大陆地表气压

图5给出了由原始和去趋势PC1指数高、低值年份(分别为大于1和小于-1的年份)合成所得的 20°N 以北亚欧大陆地表气压差值。可以看出,欧亚大陆积雪增多与春、夏季大陆总体地表气压增加相联系,自5月份起,亚欧大陆地表气压基本保持正异常,并在6月份达到最大,偏冷的大气在该区域堆积。其中,原始和去趋势PC1对应的大陆异常地表气压月际变化基本一致。相应地,自5月份以来,欧亚大陆大部分地区的地表气压为正异常,其中夏季地表气压正异常主要维持于欧亚大陆西南以及东北部,正异常的面积在6月达到最大,之后7月欧洲西部、中国以及蒙古地区出现负异常区,这些负异常区在8月份进一步扩大至大陆中部(图略)。因此,与前面积雪与地表气温耦合关系相一致,当春季亚欧大陆积雪增加时,亚欧大陆热带外大范围地区低层偏冷,可能有利于冷空气的堆积以及气柱质量增加,从而使得这些地区地表气压持续正异常。

进一步利用SVD方法分析了春季欧亚大陆积雪与夏季地表气压异常之间的联系[图6(见文后彩图)]。其中积雪SVD1的同类和异类相关系数分布与图1相似,仍以春季欧亚大陆积雪的一致性变化为主(图6a、b),它是与其后夏季地表气压变化联系的主导模态。另外,图6a的积雪同类相关总体强于图2a,尤其在亚欧大陆的西北部显著正相关区域明显扩大,表明相对于PC1,春季欧亚积雪与夏季地表气压SVD分析得到的主导积雪模态更好地反映了欧亚大陆大范围积雪的低频变化。夏季地表气压SVD1的同类及异类相关系数在亚欧大陆大部分地区出现相似的显著相关(图6c、d)。其分布形

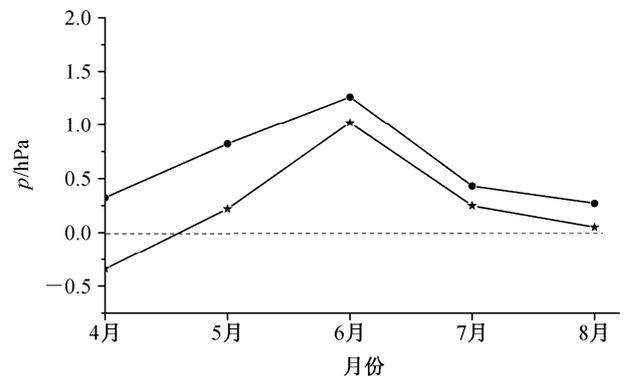


图5 原始(星实线)以及去趋势(点实线)PC1高、低指数年 20°N 以北亚欧大陆平均地表气压合成差值。单位: hPa

Fig. 5 Composite differences of land surface pressure averaged over Eurasia to the north of 20°N between high and low years of the original (star solid line) and detrended (dot solid line) standardized PC1. Units: hPa

势以正相关为主,显著区域包括亚欧大陆高纬度区域的东北部、地中海、西亚地区及北非地区,体现了积雪异常与其后冷空气堆积的时滞联系。此外,在西欧以及我国华北和内蒙古西部地区出现显著负相关系数分布,后面分析发现这些地区与一定程度的局地温度正异常有关(图7b)。

由图7中的夏季气温与地表气压SVD分析结果看出,夏季欧亚大陆高纬度区域的地表气压异常与同期地面气温异常存在显著的反相关耦合联系,当地面气温异常降低时,地表气压相应增加,对应冷空气异常堆积。与夏季大陆降温相联系的正异常地表气压还出现在亚欧大陆西南部区域,亚欧大陆总体以地表气压正异常为主。此外,负异常地表气压出现在欧洲西部以及蒙古地区,与这些地区降温不明显有一定联系。根据上述分析,春季欧亚大陆积雪的异常增加,导致大陆地区气温普遍降低,并且与其后夏季的欧亚大陆气温负异常相联系。通过气温与地表气压的耦合联系,使得春季欧亚大陆积雪异常与夏季欧亚大陆大部分地区的冷空气堆积以及地表气压异常增加产生较好的时滞联系。

3.2.2 积雪与南北半球际大气质量不平衡分布

由于年际以上尺度全球大气质量保持守恒(Guan et al., 2010),大陆尺度的地表气压上升(大气质量增加),意味着需要其他区域的空气异常输出以达到守恒。为分析欧亚积雪与全球大气质量再分布之间的联系,图8分别给出了原始以及去趋势的PC1对全球夏季异常地表气压场的回归系数。由

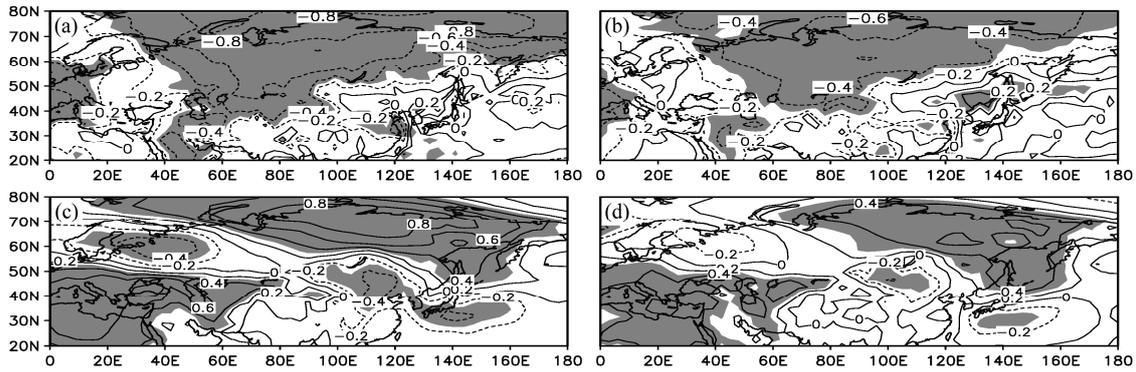


图 7 同图 2a-d, 但为夏季欧亚大陆地表气温异常与同期地表气压异常的 SVD 分析结果。上部为夏季地面气温, 下部为夏季地表气压。(a、b) 单位为 °C, (c、d) 单位为 hPa

Fig. 7 Same as Fig. 2 a-d but for the leading coupled mode between summer anomalous surface temperature and summer anomalous surface pressure. The upper panels are for surface temperature and the bottom ones for surface pressure. Units: °C in (a, b) and hPa in (c, d)

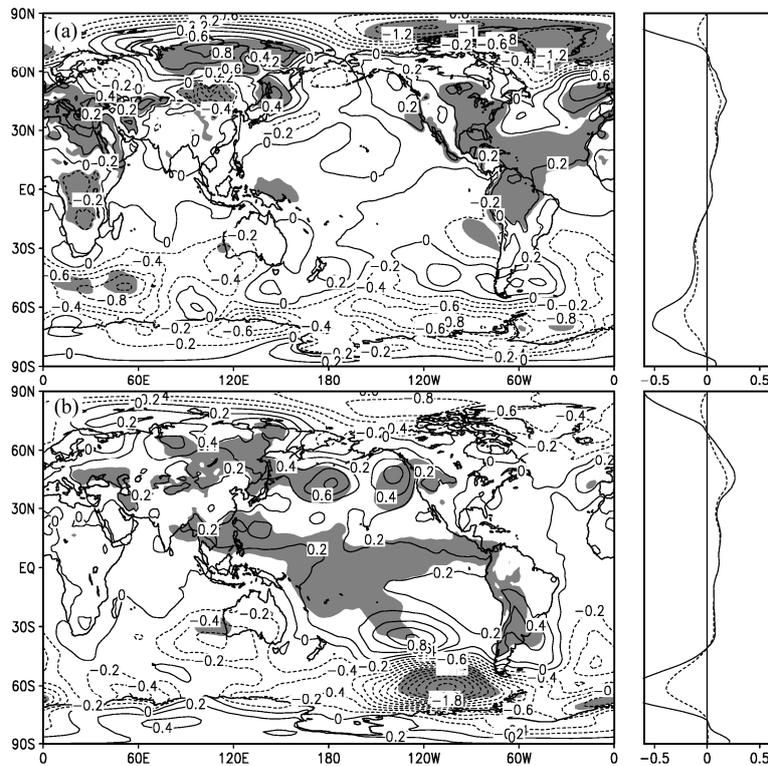


图 8 夏季异常地表气压对 (a) 原始 PC1 以及 (b) 去趋势 PC1 的回归系数。灰色阴影表示通过显著性水平为 0.05 的 F 检验。右侧曲线图中的实线表示左侧地表气压异常回归系数的纬向平均, 虚线表示纬向平均值乘以相应各纬度的余弦值 (面积权重系数)。单位: hPa

Fig. 8 Anomalous surface pressure regressed on (a) original and (b) detrended standardized PC1. The shaded areas denote values below the 0.05 significance level based on F test. Solid lines in the right panels denote the zonal mean regression coefficients of surface pressure anomalies corresponding to the left ones, and the dashed lines denote the zonal means multiplied by cosine of latitude (area weight factor). Units: hPa

图 8a 可以看到, 与欧亚积雪变化相联系的地表气压异常表现为北半球大部分地区的正值异常, 其中以欧亚大陆最为显著, 另外在格陵兰岛以及青藏高原区域出现显著负异常气压分布, 而南半球中高纬度地区基本为负异常地表气压。去趋势的异常地表

气压回归系数分布与原始 PC1 回归结果总体一致 (图 8b), 但显著区域以及中心值分布有一定差异。从相应的纬向平均值分布可以看到, 无论是原始还是去趋势的地表气压回归场, 北半球特别是 30°N~60°N 纬带主要为大气的质量堆积, 其中欧亚大陆是

质量堆积的主要贡献区域, 而南半球尤其是中高纬度地区则是以空气质量的输出为主, 这在一定程度上体现了全球大气质量的守恒特性。

为进一步分析春季欧亚积雪与区域大气质量再分布的联系, 计算了春季欧亚积雪与夏季区域地表气压的相关系数(表 1)。可以看到, 原始 PC1 与欧亚大陆以及北半球的地表气压均为正相关, 而且去趋势的 PC1 与它们的正相关均通过了显著性水平为 0.05 的 t 检验, 而原始以及去趋势的 PC1 与南半球的地表气压则是显著的负相关联系。这与前面的回归分析结果是一致的, 即春季欧亚大陆积雪增加对应了夏季欧亚大陆和北半球大气的质量堆积以及南半球大气的质量输出, 因此其与全球尺度的大气质量重新分布存在联系。

表 1 春季欧亚积雪与夏季区域地表气压的相关系数(黑体表示通过 0.05 显著性水平 t 检验)

Table 1 Correlation coefficients between spring Eurasian snow cover and regional summer surface pressure (bold numbers pass t test at 0.05 significance level)

PC1	区域平均气压			IHO 指数
	欧亚大陆	北半球	南半球	
原始	0.24	0.24	-0.50	0.39
去趋势	0.41	0.45	-0.36	0.41

值得关注的是, 图 8a、b 中地表气压异常的水平分布呈北正南负的南北半球际反相态势, 这与卢楚翰等(2010)揭示的夏季南北半球际大气质量涛动(IHO)形态类似。由于两半球大气质量不平衡会导致半球际气压梯度力的产生, 因此两半球大气质量的差异在一定程度上反映了两半球大气质量交换和相互作用的活跃度, 而且夏季 IHO 与东半球主要季风活动均存在显著相关(卢楚翰等, 2010)。为此, 计算得到原始以及去趋势的 PC1 分别与夏季 IHO 指数的相关系数分别为 0.39 和 0.41, 均通过显著性水平为 0.05 的 t 检验。表明当春季欧亚积雪异常增加时, 有利于北半球中高纬度大陆地区的冷空气堆积, 伴随着大气自南向北的半球际交换, 从而可能与夏季两半球大气的相互作用相联系。

3.3 与东半球越赤道气流的可能联系

赤道垂直面是南北半球大气的唯一交换面, 其中东半球较西半球的越赤道气流和质量交换更为明显(施能等, 2007)。从图 9 回归分析结果可知, 春季欧亚积雪异常变化伴随着东半球赤道面多处经向风场异常的显著变化, 其中包括气候态上最为

明显的索马里低空急流和 $80^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 对流层上部的北风急流区, 另外显著区还包括对流层中部 ($500\sim 700\text{ hPa}$) 的多处区域(图 9c)。积雪异常对应的越赤道风场异常配置在其后夏季也有体现, 且显著联系区域的面积较春季有所扩大。对应的索马里急流区北风异常风速加大, 而 $80^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 区域高空急流区南风异常风速略有降低。春季欧亚积雪变化与以上春、夏季越赤道气流的密切联系可能与两半球大气质量的不平衡以及相互交换异常有关, 与积雪变化对应的越赤道总质量流有待进一步定量估算。此外, 由于夏季索马里急流的年际变化与全球范围内有关环流系统的变化存在关联, 并且与亚洲季风系统以及水汽输送有关(王会军和薛峰, 2003), 因而春季积雪可能通过影响越赤道急流(图 9d)以及亚洲区域低层环流异常, 从而对亚洲区域季风活动以及气候异常产生作用。

3.4 数值模拟

为进一步验证春季欧亚大陆积雪异常与地面气温及大气质量重新分布之间的联系, 通过改变 GFDL AM2 模式中 ($35^{\circ}\text{N}\sim 75^{\circ}\text{N}$, $20^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$) 区域的积雪质量初始场, 分别设计了春季积雪偏多试验(HS)和积雪偏少试验(LS)。具体地, 首先将模式积分五年作为控制试验, 然后取第六年 3 月 1 日的大气及陆面要素作为模式的原始初始场。在保持其他区域不变的情况下, 分别取控制试验第六年中的冬季和夏季相同区域积雪质量作为 HS 和 LS 试验的初始积雪情况。其中 HS 和 LS 的初始积雪质量差异如图 10a 所示, 在欧亚大陆中高纬度大部分积雪区域内出现 100 kg m^{-2} 以上的偏多积雪。利用以上初始场驱动模式继续运行 6 个月作为敏感试验, 并通过扰动初始场, 分别得到了 HS 试验和 LS 试验各 11 个集合成员结果。

由于积雪质量是模式的预报量, 本文试验方案是以改变积雪质量初始场方式来实现对积雪异常的强迫驱动, 首先需要检验其异常信号的持续性。因此, 计算了 HS 与 LS 试验的春季(3~5 月平均)积雪质量集合平均差值(图 10b), 可看到 HS 试验与 LS 试验对于春季欧亚积雪的表现有着显著差异, 除青藏高原地区外, 它们的差值场分布形势与两类试验的初始场差值分布相一致(图 10a), 只是异常的数值较初始场差值普遍偏小, 这可能是由于积雪本身随季节消融所致。由此说明本文试验方案中对于积雪异常信号的持续性有着较

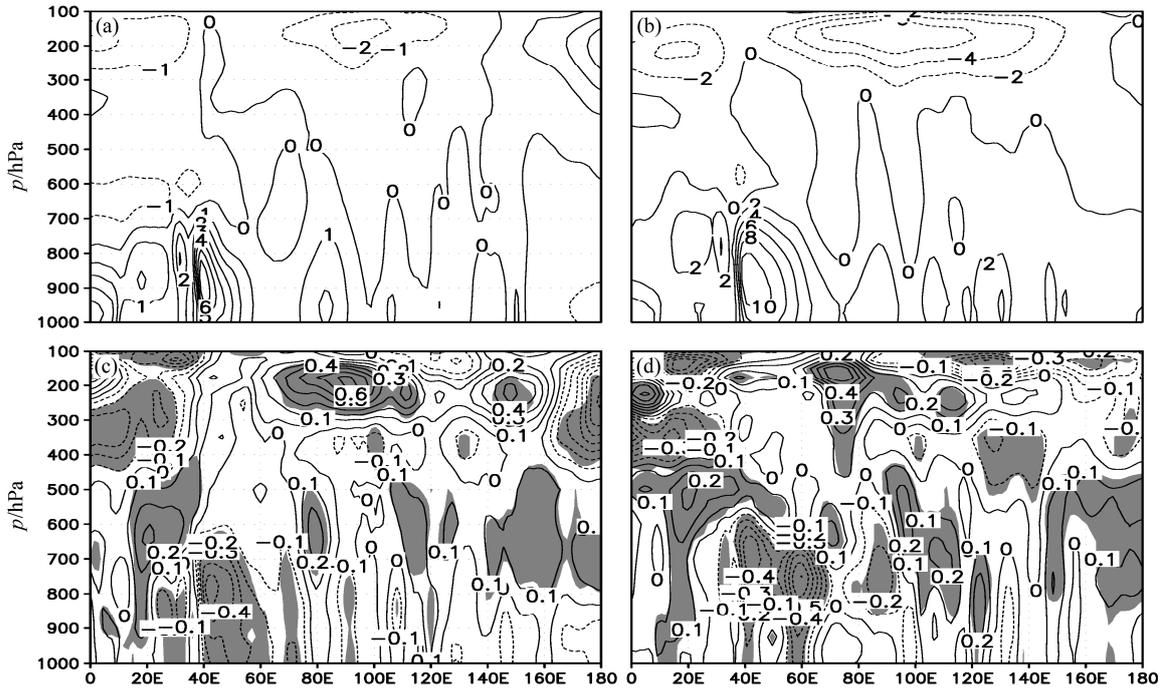


图9 东半球 (a、b) 春季及夏季赤道 (4.5°S~4.5°N 平均) 经向风气候场以及 (c、d) 春季和夏季赤道经向风场异常对 PC1 的回归系数。(c、d) 灰色阴影表示通过显著性水平为 0.1 的 F 检验。单位: m s^{-1}

Fig. 9 Vertical cross sections of (a, b) climatology of seasonal cross-equatorial (4.5°S–4.5°N mean) meridional wind in the Eastern Hemisphere and (c, d) the anomalous meridional wind regressed upon PC1. The left panels are for spring, and the right ones are for summer. The shaded areas in (c, d) denote values below the 0.1 significance level based on F test. Units: m s^{-1}

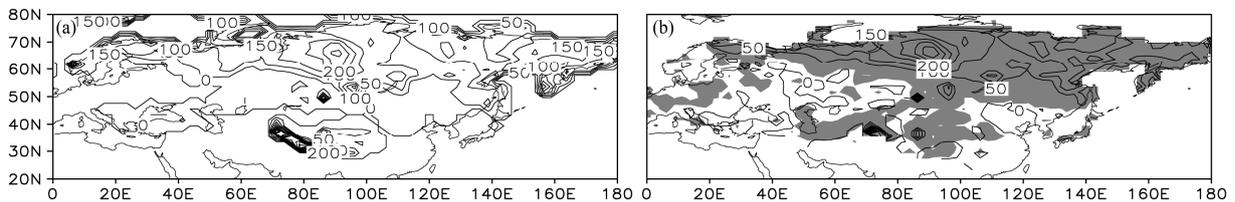


图10 (a) HS 与 LS 数值试验的模式初始积雪质量集合平均差值; (b) HS 与 LS 试验中的春季 (3~5 月平均) 积雪质量集合平均差值, 阴影表示通过显著性水平为 0.1 的 t 检验。单位: kg m^{-2}

Fig. 10 Composite differences of (a) initial snow mass and (b) MAM (Mar–Apr–May)-mean snow mass between expts HS and LS ensemble simulations. The shaded areas in (b) denote values below the 0.1 significance level based on t test. Units: kg m^{-2}

好表现。

从 HS 与 LS 试验春季地面气温的温度集合差值场可以看出 (图 11a), 春季欧亚大陆积雪偏多对应着地面的显著冷却, 其分布形势与统计分析结果大体一致。欧亚大陆热带外地区温度基本为负异常值, 其中大陆的东北部降温最为明显, 局部地区降幅可达 7°C , 这与图 10b 中积雪异常增加的区域分布基本对应, 说明两者的同期耦合联系明显。进入夏季后 (图 11b), 尽管降温幅度明显降低, 除远东地区外的大陆地区仍然维持负异常状态, 显著降温区位置与统计分析结果有所差别, 主要出现于俄罗

斯中部, 异常数值可达 -1.5°C 。综合图 11a–b 可知, 模式试验可以再现整体异常增加的春季欧亚大陆积雪对同期以及其后夏季大陆尺度异常的冷却效应, 积雪强迫效果明显。

由图 11c 可以看到, HS 与 LS 试验中对应的春季地表气压差值在欧亚大陆北部以及东北部出现自西向东, 自南向北递增的正值异常, 这与同期异常降温的大值带分布是吻合的, 体现了低层冷空气的堆积对气柱质量增加的作用。进入夏季后, 地表气压正值区转移至亚欧大陆中东部地区, 且在蒙古以及我国新疆地区较为显著 (图 11d), 这与诊断分

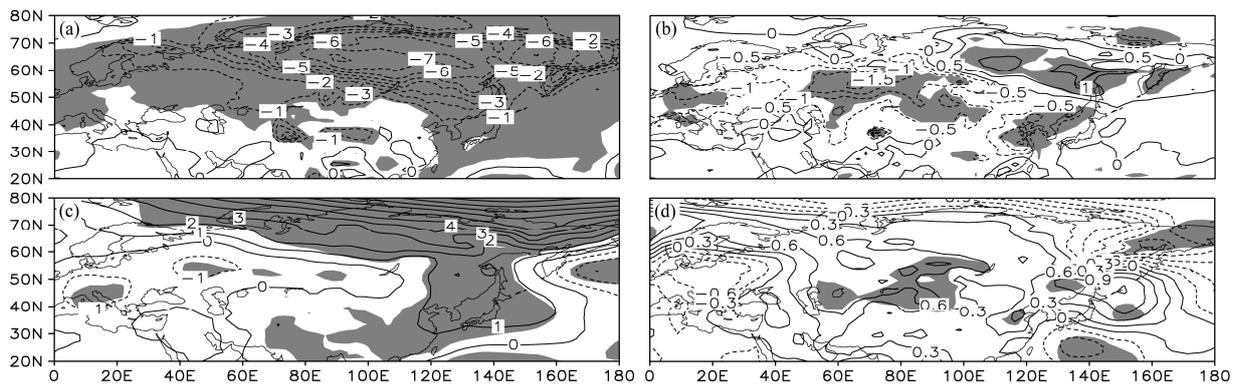


图 11 HS 与 LS 试验中春季(3~5 月平均)及夏季(6~8 月平均)的温度及地表气压集合平均差值。左侧为春季, 右侧为夏季, 上部为温度(单位: $^{\circ}\text{C}$), 下部为地表气压(单位: hPa)。阴影表示通过显著性水平为 0.1 的 t 检验

Fig. 11 Composite differences of (a, b) SAT and (c, d) surface pressure in both (a, c) spring (MAM-mean) and (b, d) summer (Jun-Jul-Aug-mean) between expts HS and LS ensemble simulations. The shaded areas denote values below the 0.1 significance level based on t test. Units: $^{\circ}\text{C}$ in (a, b) and hPa in (c, d)

析中的夏季亚欧大陆异常地表气压大值带的分布有着较大差异, 可能是由于模式试验中的降温区集中在欧亚大陆中部, 导致冷空气在这些地方堆积所造成。

由以上数值模拟结果来看, 春季欧亚大陆积雪异常造成同期大陆尺度的地面气温下降, 且与其后夏季大陆的偏冷气候联系密切, 导致了冷空气的异常堆积, 气柱大气质量增加以及地表气压上升, 这与本文前面诊断部分的分析结果是基本对应的。相对而言, 数值试验更好地体现了气温降低与区域地表气压升高的对应联系。另外, 诊断部分中提及的欧亚大陆尺度的大气质量升高, 引起的南北半球际大气质量的不平衡在数值试验中并没有得到很好的反映, 两半球质量差异并不明显, 大值区也存在较大差异(图略), 其具体原因有待进一步深入分析。

4 结论与讨论

本文结合观测资料分析以及大气环流模式(GFDL AM2)的数值试验, 研究了由春季欧亚大陆积雪异常变化造成的大气环流异常特征以及其后夏季大气的持续响应, 并进一步探讨积雪异常与其后南北两半球大气质量交换和两半球大气相互作用的可能联系。主要结论如下: (1) 当春季欧亚积雪异常偏多时, 同期欧亚大陆中高纬大范围地区的地面气温异常偏低, 并且与其后夏季大陆冷异常相联系, 同时, 冷空气的堆积造成了欧亚大陆相应地区地表气压上升, 并且对应了夏季北半球大气总质量的异常上升, 而南半球大气质量却明显下降。

(2) 春季欧亚积雪变化与夏季南北半球际大气质量涛动(IHO)存在显著滞后相关, 而且与同期及后期包括索马里急流和对流层上部 $80^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 区域高空急流在内的多处越赤道气流的显著变化相联系, 说明春季欧亚大陆积雪变化与夏季两半球大气相互作用是密切联系的。(3) 模式试验可以再现整体异常增加的春季欧亚大陆积雪对同期以及其后夏季大陆尺度异常的冷却效应和大陆大气质量的异常增加, 积雪强迫效果明显。

需要指出的是, 本文分析主要基于春季欧亚大陆积雪的整体变化, 事实上, 欧亚大陆区域性积雪异常变化也具有显著的气候效应(Wu and Kirtman, 2007; Wu et al., 2009), 尤其是青藏高原地区积雪的持续性和变化特征明显不同于高纬度地区(Fasullo, 2004), 其与欧亚北部积雪以及我国夏季旱涝的关系不同(陈兴芳和宋文玲, 2000)。春季欧亚积雪的区域性变化与大范围大气质量再分布的联系, 区域性积雪变化对欧亚积雪整体变化的贡献程度, 需要进一步明确。从本文的统计分析结果看, 与积雪变化联系的低层降温区域并非很好地对应地表气压增加的地区, 这可能说明陆面状况的异常强迫与大气尤其是中高层大气之间的联系是复杂的, 其中涉及大气自身的动力过程变化(例如, Cohen et al., 2007; Wu et al., 2009)。因此, 欧亚积雪与大尺度大气环流异常的联系有待深入研究。此外, 本文数值模拟结果能较好地模拟出积雪与气温以及地表气压的大陆尺度耦合联系, 但却未能再现积雪与南北半球大气质量再分布的联系, 这一问题值得深入研究。

致谢 Interim 资料取自欧洲中期预报中心 (ECMWF), 网址为: http://data-portal.ecmwf.int/data/d/interim_moda/; 文中诸图的绘制使用了绘图软件 GrADS。

参考文献 (References)

- Armstrong R, Brodzik M. 2005. Northern Hemisphere EASE-Grid weekly snow cover and sea ice extent version 3 [Z]. Boulder, CO, USA: National Snow and Ice Data Center.
- Bamzai A S, Shukla J. 1999. Relation between Eurasian snow cover, snow depth, and the Indian summer monsoon: An observational study [J]. *J. Climate*, 12 (10): 3117–3132.
- Barnett T P. 1985. Variations in near-global sea level pressure [J]. *J. Atmos. Sci.*, 42 (5): 478–501.
- Blanford H F. 1884. On the connexion of the Himalaya snowfall with dry winds and seasons of drought in India [J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 37: 3–22.
- 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. 2000. 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. 2000. 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.
- Cohen J, Barlow M, Kushner P J, et al. 2007. Stratosphere–troposphere coupling and links with Eurasian land surface variability [J]. *J. Climate*, 20: 5335–5343.
- Dash S K, Parth Sarthi P, Panda S K. 2006. A study on the effect of Eurasian snow on the summer monsoon circulation and rainfall using a spectral GCM [J]. *International Journal of Climatology*, 26 (8): 1017–1025.
- Fasullo J. 2004. A stratified diagnosis of the Indian monsoon–Eurasian snow cover relationship [J]. *J. Climate*, 17 (5): 1110–1122.
- GAMDT (The GFDL Global Atmospheric Model Development Team). 2004. The new GFDL global atmosphere and land model AM2-LM2: Evaluation with prescribed SST simulations [J]. *J. Climate*, 17: 4641–4673.
- Guan Z Y, Yamagata T. 2001. Interhemispheric oscillations in the surface air pressure field [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 28 (2): 263–266.
- Guan Z Y, Lu C H, Mei S L, et al. 2010. Seasonality of interannual inter-hemispheric oscillations over the past five decades [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 27 (5): 1043–1050.
- 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.
- 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*, 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.
- Liu X D, Yanai M. 2001. Relationship between the Indian monsoon rainfall and the tropospheric temperature over the Eurasian continent [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 127 (573): 909–937.
- 卢楚翰, 管兆勇, 蔡佳熙. 2010. 夏季南北半球际大气质量涛动及其与季风异常的联系 [J]. *中国科学: 地球科学*, 40 (6): 802–809. Lu Chuhan, Guan Zhaoyong, Cai Jiayi. 2010. Interhemispheric atmospheric mass oscillation and its relation to interannual variations of the Asian monsoon in boreal summer [J]. *Sci. China Earth Sci.*, 53 (9): 1343–1350.
- 卢咸池, 罗勇. 1994. 青藏高原冬春季雪盖对东亚夏季大气环流影响的数值试验 [J]. *应用气象学报*, 5 (4): 385–393. Lu Xianchi, Luo Yong. 1994. Numerical experiments on the effects of Qinghai–Xizang Plateau snow cover in winter and spring on general circulation over East Asia in summer [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 5 (4): 385–393.
- Matsumura S, Yamazaki K, Tokioka T. 2010. Summertime land–atmosphere interactions in response to anomalous springtime snow cover in northern Eurasia [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)*, 115 (D20): D20107, doi:10.1029/2009JD012342.
- 穆松宁. 2008. 冬季欧亚大陆雪盖面积变化与中国夏季气候异常的关系及其机理研究 [D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所博士学位论文. Mu Songning. 2008. Relationship between winter Northern Eurasian snow extent with summer climate anomalies in China and its mechanism research [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences.
- 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.
- Namias J. 1985. Some empirical evidence for the influence of snow cover on temperature and precipitation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 113 (9): 1542–1553.
- Robock A, Mu M Q, Vinnikov K, et al. 2003. Land surface conditions over Eurasia and Indian summer monsoon rainfall [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)*, 108 (D4), doi:10.1029/2002JD002286.
- 施能, 封国林, 顾骏强, 等. 2007. 1948~2004 年全球越赤道气流气候变化 [J]. *热带气象学报*, 23 (4): 326–332. Shi Neng, Feng Guolin, Gu Junqiang, et al. 2007. The climatological variation of global cross-equatorial flow for the period of 1948–2004 [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 23 (4): 326–332.
- 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: 605–616.
- Simmons A, Uppala S, Dee D, et al. 2007. ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards [R]. ECMWF Newsletter, No. 110, 25–35.
- Souma K, Wang Y Q. 2010. A comparison between the effects of snow albedo and infiltration of melting water of Eurasian snow on East Asian summer monsoon rainfall [J]. Journal of Geophysical Research, 115 (D2): D02115, doi:10.1029/2009JD012189.
- 王会军, 薛峰. 2003. 索马里急流的年际变化及其对半球间水汽输送和东亚夏季降水的影响 [J]. 地球物理学报, 46 (1): 18–25. Wang Huijun, Xue Feng. 2003. Interannual variability of Somali jet and its influences on the inter-hemispheric water vapor transport and on the East Asian summer rainfall [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 46 (1): 18–25.
- Wang L, Huang R H, Gu L, et al. 2009. Interdecadal variations of the East Asian winter monsoon and their association with quasi-stationary planetary wave activity [J]. J. Climate, 22: 4860–4872.
- 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.
- 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. Xu Liyan, Wu Bingyi. 2012a. Linkage between spring Eurasian snowmelt and East Asian summer monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (6): 1180–1190.
- 许立言, 武炳义. 2012b. 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. 2012b. 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.
- 杨秋明. 1997. 欧亚雪盖准 2 年振荡对中国降水的影响 [J]. 气候与环境研究, 2 (1): 83–91. Yang Qiuming. 1997. The effect of biennial oscillation of snow cover in Eurasia on the rainfall in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 2 (1): 83–91.
- Yasunari T. 1987. Global structure of the El Niño/Southern Oscillation. Part II. Time evolution [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 65 (1): 81–102.
- Yasunari T, Kitoh A, Tokioka T. 1991. Local and remote responses to excessive snow mass over Eurasia appearing in the northern spring and summer climate—A study with the MRI GCM [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 69 (4): 473–487.
- Yeh T C, Wetherald R T, Manabe S. 1983. A model study of the short-term climatic and hydrologic effects of sudden snow-cover removal [J]. Mon. Wea. Rev., 111 (5): 1013–1024.
- Yim S Y, Jhun J G, Lu R Y, et al. 2010. Two distinct patterns of spring Eurasian snow cover anomaly and their impacts on the East Asian summer monsoon [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012), 115 (D22), doi:10.1029/2010JD013996.
- 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.
- Zuo Z Y, Zhang R H, Wu B Y, et al. 2012. Decadal variability in springtime snow over Eurasia: Relation with circulation and possible influence on springtime rainfall over China [J]. Int. J. Climatol., 32 (9): 1336–1345.

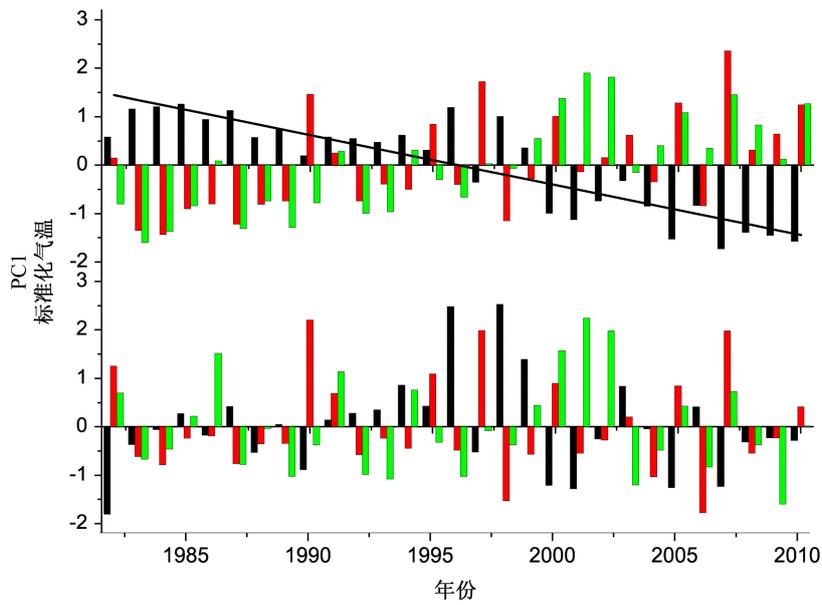


图 4 区域平均气温异常与 PC1 的变化关系。PC1 以黑色直方表示，春季区域 (60°N~80°N, 60°E~160°E) 平均标准化气温为红色直方，夏季区域 (40°N~60°N, 90°E~120°E) 平均标准化气温为绿色直方。上部为原始时间序列，下部为去除线性趋势序列。图中实线为 PC1 的线性趋势

Fig. 4 Standardized time series of PC1 (black bar), regionally mean (60°N~80°N, 60°E~160°E) SAT in spring (red bar), and regionally mean (40°N~60°N, 90°E~120°E) SAT in summer (green bar). The upper panel is for original time series, and the bottom one is for detrended time series. Solid line in the upper panel denotes the linear trend of PC1

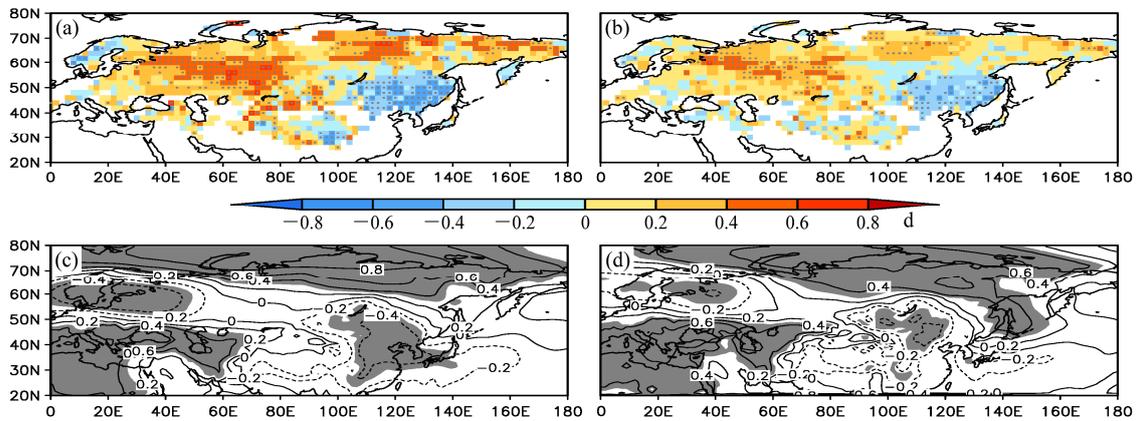


图 6 同图 2a-d，但为春季欧亚大陆积雪天数异常与其后夏季地表气压异常的 SVD 分析结果。上部为春季积雪，下部为夏季地表气压。(a、b) 单位为 d，(c、d) 单位为 hPa

Fig. 6 Same as Fig. 2 a-d but for the leading coupled mode between spring anomalous days of snow cover and summer anomalous surface pressure. The upper panels are for spring days of snow cover, and the bottom ones for summer surface pressure. Units: d in (a, b) and hPa in (c, d)