

张若楠, 张人禾, 左志燕. 2015. 中国冬季积雪变异及其与北极涛动的联系 [J]. 大气科学, 39 (3): 634–642, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1405.14170.
Zhang Ruonan, Zhang Renhe, Zuo Zhiyan. 2015. Winter snow cover variability over China and its relation to Arctic Oscillation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (3): 634–642.

中国冬季积雪变异及其与北极涛动的联系

张若楠^{1,3} 张人禾² 左志燕²

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 中国气象科学研究院, 北京 100081

3 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 本文利用 1979~2010 年 NCEP/NCAR 再分析资料、中国台站观测雪深、气温和降雪资料, 分析了我国冬季积雪时空分布特征, 结果表明: 雪深经验正交分解第一模态有显著的南、北反位相特征, 当新疆北部、东北地区积雪偏多(少)时, 对应黄河以南和青藏高原地区积雪偏少(多)。近 30 年来中国冬季积雪变异与北极涛动(AO)有非常紧密的联系, 雪深的南、北反位相分布型与北极涛动有明显的反相关关系。AO 负位相时, 500 hPa 等压面上 40°N 以北存在着中心在贝加尔湖附近的气旋环流, 而在其南存在着中心在中国西南的反气旋性环流, 中国北方和南方地区分别受气旋和反气旋的控制。在我国北方地区, 与 AO 相联系的气旋环流异常导致降雪增多、地表温度偏低, 使得积雪增加; 而在南方地区, 与 AO 相联系的反气旋性环流异常导致的降雪减少和气温偏高, 导致了积雪减少。本文的研究说明了北极涛动通过影响中国降雪和气温, 进而对中国冬季积雪产生可能的影响。

关键词 雪深 降雪 气温 北极涛动

文章编号 1006-9895(2015)03-0634-09

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1405.14170

Winter Snow Cover Variability over China and Its Relation to Arctic Oscillation

ZHANG Ruonan^{1,3}, ZHANG Renhe², and ZUO Zhiyan²

1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract Using datasets from the NCEP/NCAR Reanalysis, we study conventional observational datasets of snow depth, surface air temperature, and snowfall, and the spatio-temporal characteristics of wintertime snow depth over China. We found that snow depth is out of phase between Sinkiang, Northeast China and the area south of the Yellow River with respect to the leading mode of empirical orthogonal functions. Namely, the positive (negative) anomalies in snow depth over northern Sinkiang and Northeast China are associated with negative (positive) anomalies over the area south of the Yellow River valley. Spatial distributions of snow cover in the leading mode are inversely correlated with Arctic Oscillation (AO) in the past thirty years. During the negative AO phase, a cyclonic circulation with its center located at Lake Baikal is observed on the 500-hPa isobaric surface north of 40°N. Meanwhile, an anticyclonic circulation with its center located in Northwest China is also observed south of 40°N. As a result, North China and South China are

收稿日期 2014-04-17; 网络预出版日期 2014-05-28

资助项目 国家自然科学基金项目 41221064、41205059, 公益性行业(气象)科研专项 GYHY20120617

作者简介 张若楠, 女, 1986 年出生, 博士研究生, 主要从事冰雪与气候研究, E-mail: zhangrn2010@126.com

controlled by cyclonic and anticyclonic circulation, respectively. In North China, anomalous cyclonic circulation associated with AO can result in excessive snowfall, lower temperatures, and ultimately increased snow depth. Meanwhile, in South China, anticyclonic circulation associated with AO may result in less snowfall, higher temperatures, and decreased snow depth. Our studies show that AO may influence wintertime snow depth over China significantly by affecting snowfall and surface air temperature.

Keywords Snow depth, Snowfall, Surface air temperature, Arctic Oscillation

1 引言

作为气候系统冰冻圈重要组成部分之一，北半球中高纬度积雪变化与大气环流系统变化有密切关系。积雪一方面受到前期和同期大气环流的显著影响，另一方面对后期气候也有明显的反馈作用。研究表明，积雪可以通过改变地表反照率、土壤湿度和水循环、隔绝陆气热交换、影响大气环流来反馈后期气候。目前，利用各种类型的积雪资料及不同的大气环流模式来研究欧亚大陆和青藏高原积雪的变化特征（韦志刚等，2002；Ueda et al., 2003）及其对东亚气候的反馈（Gong et al., 2003a, 2004；张人禾等，2008；Wu et al., 2009；穆松宁和周广庆，2010, 2012；左志燕和张人禾，2012；Zuo et al., 2012），是关于积雪与气候关系研究的热点。

北半球热带外 20°N 以北海平面气压场第一个模态是北极涛动（AO, Arctic Oscillation），其纬向对称特征明显，从近地面到平流层低层接近正压结构（Thompson and Wallace, 1998）。行星尺度的 AO 变化对近地面气候有着显著的影响，它不仅与欧亚大陆中高纬度地区的温度和降水有相关关系，而且与一些区域性的大气环流系统如阿留申低压、西伯利亚高压、东亚季风等系统有密切联系（Wu and Wang, 2002；龚道溢和王绍武，2003；陈文和康丽华，2006）。以往的研究表明，当 AO 偏强时，东亚中高纬度为反气旋性环流，东亚大槽偏弱，高空西风急流减弱，贝加尔湖脊在极涡影响下有一定减弱，在对流层高低层作用下，西伯利亚高压和东亚冬季风都有一定的减弱，中国北方和东部地区气温偏高，不利于降水的发生（据建华等，2004；杨辉和李崇银，2008；张书萍和祝从文，2011；陈文等，2013）。就 AO 和积雪的关系方面，大多数研究主要关注了前期和同期积雪对 AO 的影响，指出积雪的异常热强迫能够激发出行星波，从而产生大气遥相关型异常（陈海山等，2003；陈海山和孙照渤，2003；Gong et al., 2003b；Saito and Cohen, 2003）。

由于积雪对气候具有重要的反馈作用，认识积

雪的变化规律及其成因是至关重要的。如上所述，AO 可以影响东亚大气环流，并且积雪作为外强迫也可以对 AO 产生反馈，但 AO 对积雪的影响目前并不清楚。本文将利用站点观测资料，研究中国冬季积雪的变化特征及其与 AO 的联系，认识 AO 对中国冬季积雪的可能影响。

2 资料和方法

本文使用资料是 1950~2012 年 NCEP/NCAR V1 月平均北半球位势高度场、风场、地表温度场（Kalnay et al., 1996），1951~2011 年国家气象信息中心提供的逐日中国 756 站积雪、降水、天气现象、气温资料（<http://cdc.cma.gov.cn/home.do> [2013-04-20]）。

早期关于积雪的研究主要以地面台站资料为主，积雪参数以雪深、雪密度为主（李培基和米德生，1983；李培基，1988）。但受技术原因限制，站点较少时段较短。自从卫星反演和雷达探测资料得以使用以来，积雪资料及有关积雪的研究有了极大丰富，但资料在高原和较薄积雪地区存在较大的误差（郭艳君等，2004；Armstrong et al., 2007）。目前中国常规观测的 756 站地面台站资料对平原地区误差较小，虽然区域局限性比较强，总体来说还是客观准确的（王澄海等，2009；马丽娟和秦大河，2012）。站点降雪资料由站点降水和天气现象资料进行分离。鉴于以上原因，本文主要利用中国站点逐日雪深（SD, Snow Depth）和降雪资料。由于观测站建站或开始观测时间不同，所以各台站资料起始时间不同，在某些年份存在缺测，文章中取 1979~2010 年冬季共 629 站资料进行研究。

文中所用方法包括经验正交分解（EOF）、相关分析、一元线性回归和合成分析等常用诊断分析方法。为了得到包含更多数量信息的特征向量，在 EOF 分析中分别对每个模态空间场和时间系数乘和除以其特征值的平方根，结果为更有意义空间分布型和标准化的时间序列，如果用距平场作 EOF 分析，得到有单位的空间场（吴洪宝和吴蕾，2005）。

文中分析均用冬季平均值，即当年 12 月和次年 1 月、2 月的平均。文中用 Student *t* 检验对置信度进行检验。

3 冬季积雪的时空分布特征

图 1a、b 分别为冬季雪深距平的 EOF1 空间型和相应的时间系数，方差贡献为 35.2%，第二模态的方差贡献为 10.3%。根据 North 检验 (North et al., 1982)，第一模态与第二模态可以显著的分。从图 1a 可以看出，总体来说中国积雪呈南、北反相变化。在大约 110°E 以西和以东，南、北反相变化的界限分别在 40°N 和黄河流域南部。新疆北部和中国东部黄河以北地区为同位相变化，青藏高原东部和南方地区为同位相变化。北方积雪距平远大于南方，新疆和东北北部地区有大范围雪深超过 2.0 cm 的雪深正距平区域，新疆北部最大距平可达 11.0 cm；青藏高原和南方地区雪深负距平普遍在

-0.2 cm 以下，在高原东部和长江中下游地区出现较小范围小于 -0.2 cm 的雪深负距平中心，最小距平 (-3.0 cm) 出现在高原东南麓。

从相应的时间系数的演变 (图 1b) 可以看到，第一主分量的时间系数除了具有明显的年际变化外，也呈现出年代际变化，并在 1996 年左右发生气候转变，在此之前基本以负值为主，而在此之后基本上以正值为主。这意味着新疆北部和东北地区雪深在 1996 年之前为负距平，之后为正距平；而青藏高原和南方地区雪深在 1996 年之前为正距平，之后为负距平。我们计算了时间系数的线性趋势，其值为 0.04/a，超过了 95% 的置信度检验。为了说明线性趋势的影响，我们计算了去趋势与未去趋势时间系数的相关系数，其值高达 0.89，这种高相关性说明虽然时间系数具有显著的线性趋势，但与去趋势后的 EOF1 时间系数的变化在年际时间尺度上具有较好的一致性。

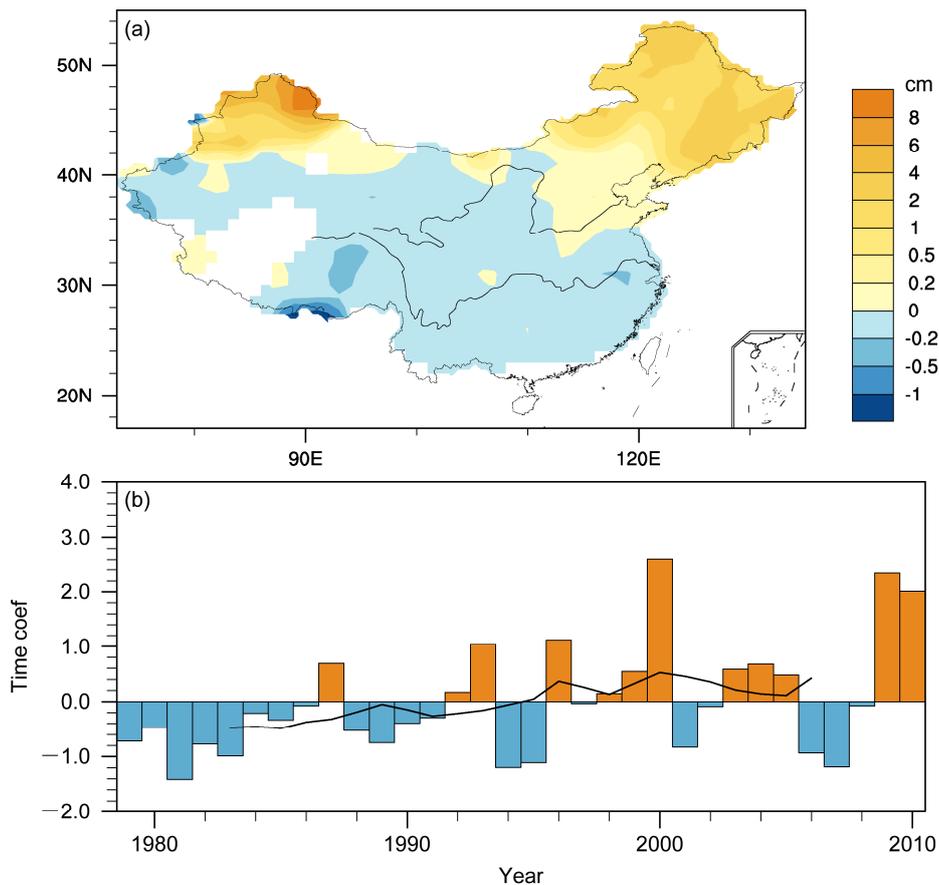


图 1 1979~2010 年冬季 (12 月至次年 2 月) 平均雪深距平的 (a) EOF1 空间分布 (单位: cm) 及 (b) 相应的标准化时间序列 (直方图为标准化时间序列, 曲线为时间序列的 9 年滑动平均)

Fig. 1 (a) Spatial distribution of leading empirical orthogonal function (EOF1) of anomalous SD field (units: cm) and (b) their corresponding normalized time series (bars) in winter for 1979-2010. The contour in (b) is the 9-year running mean of normalized time series

4 冬季积雪与 AO 的关系

根据 AO 的定义方法，将 200 hPa 位势高度场 (Z200)、500 hPa 位势高度场 (Z500) 与海平面气压场 (SLP) 的 EOF1 时间序列定义为 AO 指数，分别命名为 Z200_AOI, Z500_AOI, SLP_AOI。在全年中，冬季的 AO 模态最为显著，变率也最强，本段主要探讨冬季中国雪深与冬季 AO 之间的关系。

为了研究积雪空间分布与冬季大气环流的联系，用雪深 PC1 时间序列 (SD_PC1) 分别与 Z200、Z500、SLP 场作回归分析，结果如图 2 所示。从图中可以发现，雪深回归的大气环流与 AO 型异常非常相似。高度场和气压场在极地地区有异常高中心，大西洋和欧亚大陆中高纬度地区有异常低中心，这种相关系数型恰好类似 AO 负位相；在垂直方向上，Z200 场上的 AO 最强，SD_PC1 与

Z200_AOI 的时间序列的相关系数最高为 -0.50，通过了 99.8% 的置信度检验。以上结果说明 AO 与中国冬季雪深第一模态具有密切的联系，且 AO 与雪深第一模态为反相关。

为了进一步说明 AO 与积雪的联系，图 3 给出了 AO 指数与 SD_PC1 的时间演变，从图中可以看出垂直方向三个层次的 AO 指数具有基本一致的变化，三者之间的相关系数都达到 0.93 之上，并且它们都与雪深有明显的反相变化特征。计算三层 AO 指数 SLP_AOI, Z500_AOI, Z200_AOI 与 SD_PC1 的相关，发现相关系数分别为 -0.46、-0.48 和 -0.50，均为置信度超过 95% 的显著负相关，这与图 2 给出的雪深 PC1 时间序列与环流场之间的反相关型是一致的。另外，考虑到 SD_PC1 的线性趋势，我们进一步计算了三层 AO 指数与去趋势后的 SD_PC1 的相关，相关系数有所减小，分别为 -0.45、

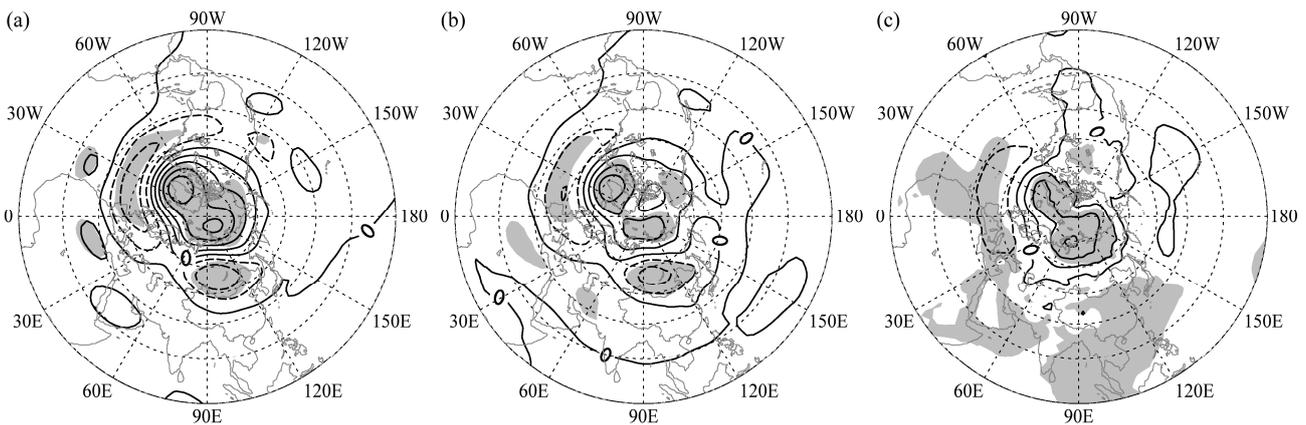


图 2 冬季雪深 PC1 时间序列回归的 (a) 200 hPa 位势高度场 (Z200)、(b) 500 hPa 位势高度场 (Z500)、(c) 海平面气压场 (SLP)。(a) 和 (b) 等值线间隔为 10 gpm，(c) 间隔为 0.5 hPa；阴影表示回归场通过 95% 置信度检验

Fig. 2 Regressed (a) 200-hPa geopotential height (Z200), (b) 500-hPa geopotential height (Z500), and (c) Sea level pressure (SLP) by SD_PC1 in winter. The intervals are 10 gpm in (a) and (b), and 0.5 hPa in (c). The shadings denote the regressed field exceeding the 95% confidence level

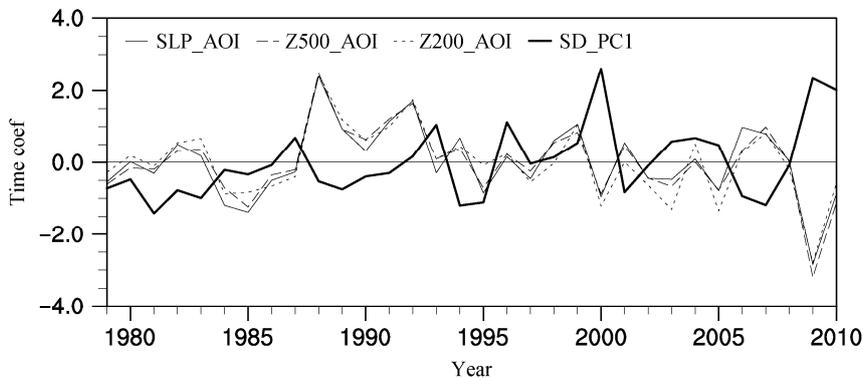


图 3 冬季 AO 指数和雪深 PC1 时间序列随时间的演变
Fig. 3 The evolution of wintertime AO indices and SD_PC1

-0.43 和 -0.41, 但都超过 95% 的置信度检验。事实上, 由于 AO 指数并没有明显的趋势变化, 因此冬季积雪与 AO 的显著相关性说明了它们之间在年际尺度上的显著联系。

图 4 给出了 SLP_AOI 与雪深的相关系数分布图。从图中可以看出, 相关系数的分布与冬季雪深距平的 EOF1 空间型 (图 1a) 类似, 呈南、北反相变化, 在大约 110°E 以西和以东, 南、北反相变化的界限也基本上出现在 40°N 和黄河流域, AO 与雪深在此界限以南地区正相关, 以北地区负相关。显著正相关区位于黄河上游和长江中游周围, 相关系数最大为 0.55; 显著负相关区位于新疆北部和沿渤海地区, 相关系数最小为 -0.58。由于图 1a 给出的是 EOF1 的空间分布型, 这些显著相关区域在 EOF1 的空间分布型中没有体现出来, 但 AO 与雪深的南、北反位相相关型与雪深 EOF1 空间分布的相像性以及 AO 指数与 SD_PC1 的显著相关性, 说明了 AO 与中国冬季雪深 EOF1 的空间分布具有密切的联系。

5 AO 对冬季积雪的可能影响

上一节的分析表明中国冬季雪深的分布型与 AO 具有密切的联系, 为了说明 AO 在中国冬季积雪形成中的作用, 我们将从影响积雪的两个因子降雪和气温探讨 AO 对中国冬季积雪的可能影响。

由于积雪变化与 AO 大气环流型紧密相关 (图 2), 为了探究 AO 对中国冬季积雪的可能影响, 利用 SLP_AOI 指数, 我们分别选取了标准差大于 0.5 的年份为高指数年 (1982, 1988, 1989, 1991, 1992,

1994, 1998, 1999, 2001, 2006, 2007 年), 标准差小于 -0.5 的年份为低指数年 (1979, 1984, 1985, 1986, 1995, 2000, 2005, 2009, 2010 年)。考虑到雪深 EOF1 与 AO 的反位相关关系, 图 5 给出了 SLP_AOI 低指数年与高指数年 500 hPa 高度场和风场的合成差。从图 5a 可以看出, AO 指数合成的 Z500 场与冬季 AO 型的负位相十分类似, 这是 AO 模态的表现, 在北半球高纬度和极地为异常高值中心, 在中纬度的太平洋和大西洋地区为异常低值中心, 中国北方地区处于异常低压控制下。与图 2 的冬季雪深回归的 Z500 场相比较, 发现 AO 指数合成场与回归场非常相像, 这说明 AO 对中国雪深的 EOF1 模态具有显著的联系。在 500 hPa 风场上 (图 5b), 在 40°N 以北存在着气旋环流, 其中心在贝加尔湖附近; 而在其南存在着反气旋性环流, 中心在中国西南。很明显, 中国北方和南方地区分别受气旋和反气旋环流异常的控制。

为了说明与 AO 相联系的环流场对积雪的可能影响, 我们在图 6 中给出了 SLP_AOI 低指数年与高指数年中国冬季表面温度 (图 6a) 和降雪 (图 6b) 的分布。由图 6a 可看出, 南方反气旋环流导致的下沉增温使得青藏高原东部和西南地区温度明显偏高, 而偏低的温度与北方气旋性环流相对应。虽然在中国东部黄河以南基本上为温度负异常, 但显著降温区出现在黄河南部以北的区域。从降雪分布 (图 6b) 可看出, 在 AO 负位相时, 在北方气旋性环流控制下, 中国北方除了东北以北很小区域外, 降雪普遍增多; 而在南方反气旋控制下, 除了长江下游以南的小范围区域, 降雪普遍减少。

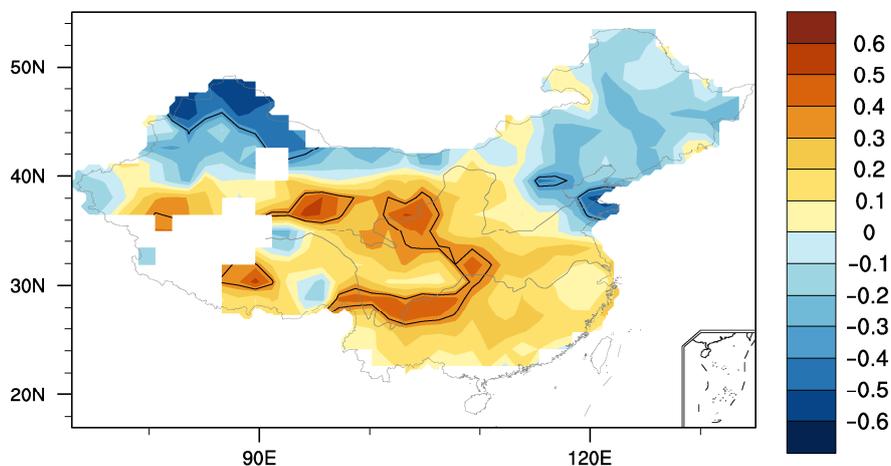


图 4 雪深与 SLP_AOI 的相关系数分布。实线表示相关系数通过 95% 置信度检验

Fig. 4 Correlation coefficients between SD and AO index on SLP (SLP_AOI). The contours denote the correlation coefficients exceeding the 95% confidence level

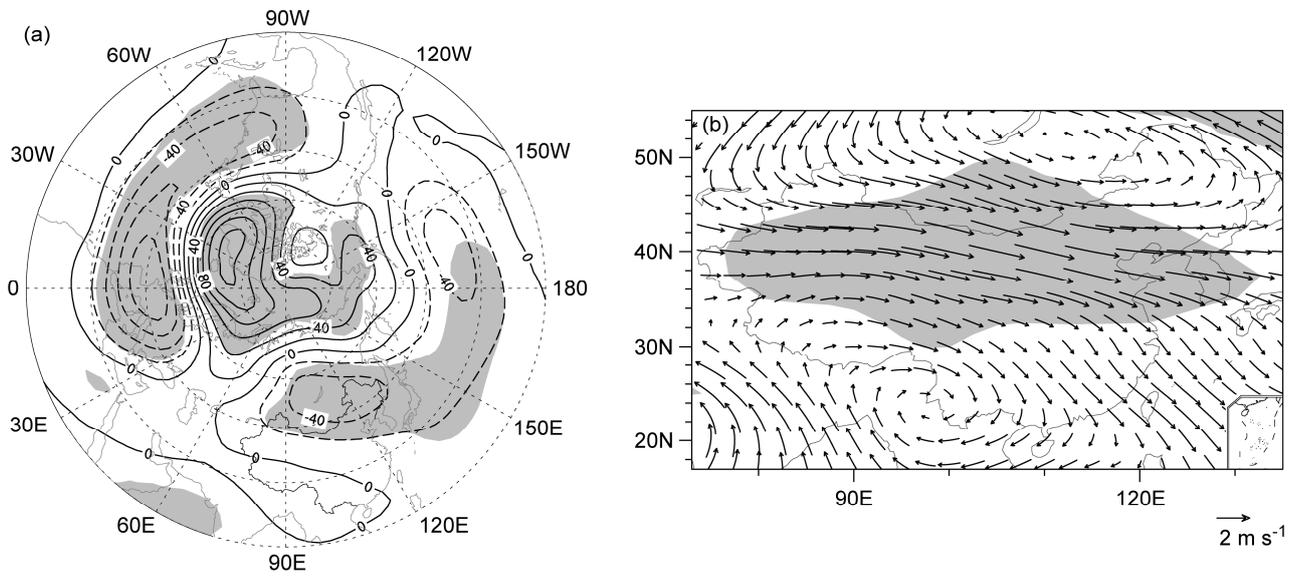


图 5 SLP_AOI 低指数年与高指数年 (a) Z500 场 (单位: gpm) 和 (b) 500 hPa 风场 (单位: $m s^{-1}$) 的合成差。阴影表示合成差值通过 95% 置信度检验
Fig. 5 Composite differences of (a) Z500 (units: gpm) and (b) 500-hPa wind vectors (units: $m s^{-1}$) between low and high SLP_AOI years. The shadings denote the composite difference exceeding the 95% confidence level

因此, 在 AO 负位相时, 北方较多的降雪以及偏低的表面温度有利于积雪增多, 而南方较少的降雪和较高的温度使得积雪偏少。在此可看出, AO 可以通过影响中国上空的大气环流场对中国冬季表面温度和降雪产生影响, 进而对中国冬季积雪产生可能影响。

前面的分析说明了与 AO 相联系的环流场以及表面温度和降雪在中国积雪 EOF1 分布型中的作用, 为了进一步分析与我国冬季积雪 EOF1 相联系环流场和表面温度场, 我们用雪深 PC1 时间序列分别与 500 hPa 风场和地表温度场作回归分析, 结果如图 7 所示。从图中可以发现, 雪深回归的风场和地表温度场与其合成差 (图 5b、图 6a) 具有较一致的分布型。在 500 hPa 风场上 (图 7a), 40°N 以北和以南分别受气旋和反气旋的控制, 但南方的反气旋强度明显弱于北方气旋的强度, 这正好说明了北方的积雪正异常明显大于南方的积雪负异常 (图 1a)。在表面温度场上 (图 7b), 中国北方温度为负异常, 而南方为正异常, 并且温度正异常区域在中国东部向南扩展, 但与图 6a 相比, 温度负异常的区域明显偏北, 这与图 1a 所示的积雪分布有较好的一致性。因此, 在北方低压型异常和气旋控制下, 使得中国北方降雪增多, 导致积雪增多; 而在南方较弱的高压型异常和反气旋控制下, 虽然减弱了中国南方降雪, 但减弱的程度较弱, 导致南方积雪有

较弱的减少。同时, 北方地表温度降低维持了北方地区雪深偏大; 南方地区地表温度升高加速积雪融化, 因此南方地区雪深异常偏小。

前面的结果表明, AO 通过影响中国区域的降雪和表面温度对中国冬季积雪产生可能影响。为了分析雪深与降雪和表面气温的关系, 图 8 给出了雪深与降雪和气温之间的相关系数分布。如图 8a 所示, 雪深和降雪之间在中国区域内具有显著的正相关关系, 相关系数在黄河—长江流域有高值分布, 最高可达 0.9 以上, 说明冬季雪深的增加 (减少) 与冬季降雪的增加 (减少) 有密切联系。AO 负位相时北方降雪的增加和南方降雪的减少是导致积雪北多南少分布的一个重要原因。由图 8b 可看出, 雪深与气温在中国区域基本上都呈现出负相关分布, 最大低值区域位于东北南部和长江流域, 相关系数可达 -0.7, 说明气温越高 (低) 时积雪越少 (多)。AO 负位相时气温距平 (图 7b) 是导致积雪距平的另一重要原因。可见, 冬季雪深与降雪和气温有很好的对应关系, 二者的共同作用对雪深分布产生可能影响。

6 结论和讨论

北半球中高纬度冬季积雪变化与大气环流系统变化有密切关系, 行星尺度的 AO 变化不仅与欧亚大陆中高纬度地区的大气环流系统有密切联系,

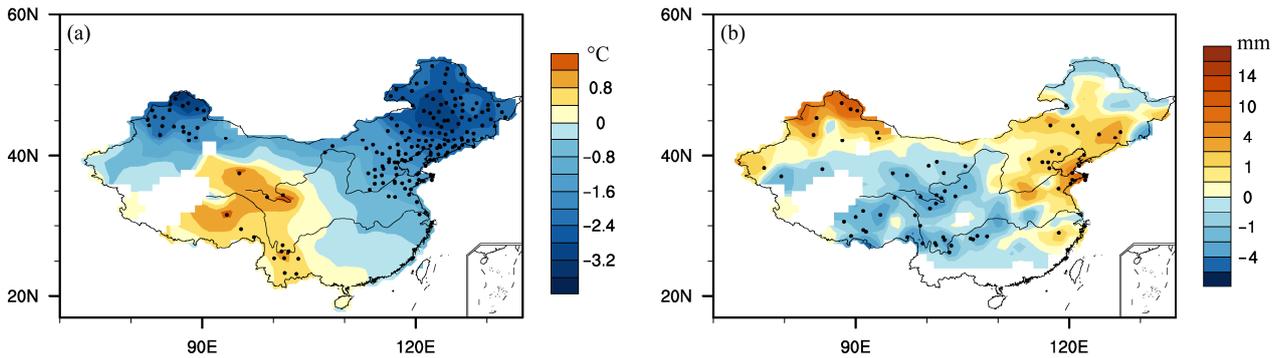


图 6 SLP_AOI 低指数年和高指数年 (a) 地表温度场 (单位: $^{\circ}\text{C}$) 和 (b) 降雪场 (单位: mm) 的合成差。实心点表示合成差值通过 95% 置信度检验的台站

Fig. 6 Composite differences of (a) surface air temperature (units: $^{\circ}\text{C}$) and (b) snowfall (units: mm) between low and high SLP_AOI years. The dots denote the stations where composite differences exceeded the 95% confidence level

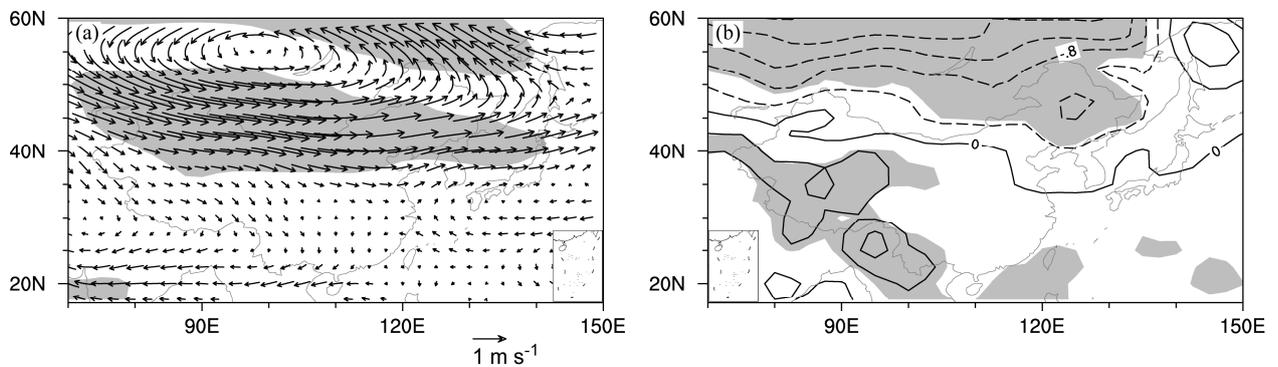


图 7 冬季雪深 PC1 时间序列回归的 (a) 500 hPa 风场 (单位: m s^{-1})、(b) 地表温度场 (单位: $^{\circ}\text{C}$)。阴影表示回归场通过 95% 置信度检验

Fig. 7 Regressed (a) 500-hPa wind vectors (units: m s^{-1}) and (b) surface air temperature (units: $^{\circ}\text{C}$) by SD_PC1 in winter. The shadings denote the regressed field exceeding the 95% confidence level

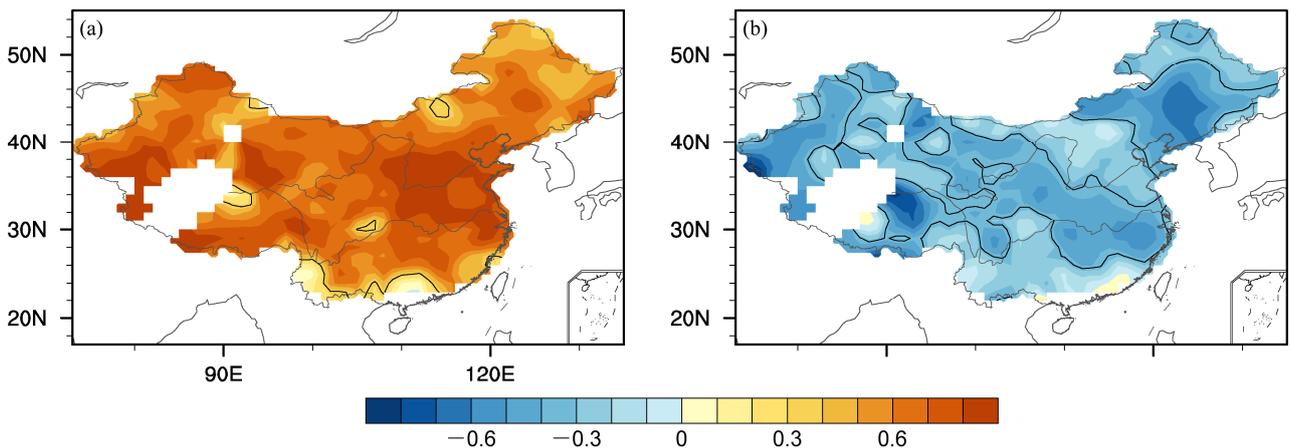


图 8 雪深与 (a) 降雪和 (b) 气温的相关系数分布。实线表示相关系数通过 95% 置信度检验

Fig. 8 Correlation coefficients between SD and (a) snowfall, (b) surface air temperature. The contours denote the correlation coefficients exceeding the 95% confidence level

还与区域性的温度和降水有密切相关。大气环流系统异常引起的中国区域温度和降雪异常可造成中国冬季积雪异常。

文中分析了中国冬季雪深的时空分布特征, 结

果表明, 雪深的经验正交分解第一模态表现为南、北反位相特征, 在大约 110°E 以西和以东, 南、北反相变化的界限分别在 40°N 和黄河流域南部。新疆北部和东北地区的雪深偏大, 黄河以南和青藏高

原地区雪深偏小；分析对应的时间序列后发现，雪深有明显的年际和年代际变化，新疆北部和东北地区雪深在 1996 年之前偏小，之后偏大；而青藏高原和南方地区雪深在 1996 年之前偏大，之后偏小。雪深的变化与降雪和气温变化紧密相关。

中国冬季积雪与 AO 大气遥相关型有紧密联系。对比 AO 合成的 500 hPa 高度场和风场、以及冬季积雪的回归场，发现二者为反位相变化。本文说明了 AO 可以通过大气环流来影响降雪和气温分布，进而对积雪分布产生可能的影响。当 AO 处于负位相时，500 hPa 等压面上 40°N 以北存在着中心在贝加尔湖附近的气旋环流，而在其南存在着中心在中国西南的反气旋性环流，中国北方和南方地区分别受气旋和反气旋的控制。在北方气旋控制下，中国北方出现降雪增多、表面气温降低，使得积雪增多；而在南方反气旋控制下，青藏高原东部和西南地区降雪减少、表面气温增高，导致积雪减少。因此，AO 可以通过影响中国上空的大气环流场，对降雪和表面气温场影响，进而对中国冬季积雪产生可能影响。因此，本文不仅从科学上揭示了我国冬季积雪的变异及其成因，也为积雪的预测提供了可能的理论基础。

应当指出的是，文中我们利用雪深距平进行了 EOF 分析，如果用标准化雪深场做 EOF 分析的话，虽然 EOF1 空间型具有类似的分布，但北方较大的正距平明显变小，而南方较弱的负距平明显增强（图略），即标准化雪深场的 EOF1 空间型减弱了北方积雪的作用，放大了长江及其以南地区积雪的作用，反映不出中国北多南少的实际积雪分布（张若楠等，2014）。因此，利用雪深距平场来做 EOF 分析可以更真实地反映雪深分布状况。另外，文中的结果说明了与 AO 相联系的大气环流场通过影响降雪和气温，进而对积雪产生可能的影响。事实上，从对冬季积雪的影响因子来看，秋末积雪、冬季降雪、积雪蒸发、积雪升华、以及积雪融化等都会对冬季积雪产生影响。要想对积雪的变化给出完整的解释，还有待于今后从影响积雪的所有因子着手，进一步开展深入的研究。我们的工作只是从与 AO 相联系的大气环流场这一个方面说明了与积雪变化的联系，但已有的研究表明中低纬大气系统对我国冬季气候有重要的影响，如与中低纬大气系统相联系的暖湿气流必然会气温和降雪产生影响。因此，中低纬系统及其与高纬系统的相互作用对积

雪形成的影响，也是今后需要开展的重要工作。

参考文献 (References)

- Armstrong R L, Brodzik M J, Knowles K, et al. 2007. Global Monthly EASE-Grid Snow Water Equivalent Climatology [DB/OL]. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center.
- 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): 848–860. 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): 848–860.
- 陈文, 康丽华. 2006. 北极涛动与东亚冬季气候在年际尺度上的联系: 准定常行星波的作用 [J]. 大气科学, 30 (5): 863–870. Chen Wen, Kang Lihua. 2006. Linkage between the Arctic Oscillation and winter climate over East Asia on the interannual timescale: Roles of quasi-stationary planetary waves [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (5): 863–870.
- 陈文, 兰晓青, 王林, 等. 2013. ENSO 和北极涛动对东亚冬季气候异常的综合影响 [J]. 科学通报, 58 (8): 634–641. Chen Wen, Lan Xiaoqing, Wang Lin, et al. 2013. The combined effects of the ENSO and the Arctic Oscillation on the winter climate anomalies in East Asia [J]. Chinese Sci. Bull., 58 (12): 1355–1362.
- 龚道溢, 王绍武. 2003. 近百年北极涛动对中国冬季气候的影响 [J]. 地理学报, 58 (4): 559–568. Gong Daoyi, Wang Shaowu. 2003. Influence of Arctic Oscillation on winter climate over China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 58 (4): 559–568.
- Gong G, Entekhabi D, Cohen J. 2003a. Modeled Northern Hemisphere winter climate response to realistic Siberian snow anomalies [J]. J. Climate, 16 (23): 3917–3931.
- Gong G, Entekhabi D, Cohen J. 2003b. Relative impacts of Siberian and North American snow anomalies on the winter Arctic Oscillation [J]. Geophys. Res. Lett., 30 (16): 1848, doi:10.1029/2003GL017749.
- Gong G, Entekhabi D, Cohen J, et al. 2004. Sensitivity of atmospheric response to modeled snow anomalous characteristics [J]. J. Geophys. Res., 109 (D6), doi:10.1029/2003JD004160.
- 郭艳君, 翟盘茂, 李威. 2004. NOAA 卫星遥感与常规观测中国积雪的对比研究 [J]. 冰川冻土, 26 (6): 755–760. Guo Yanjun, Zhai Panmao, Li Wei. 2004. Snow cover in China: Derived from NOAA satellite remote sensing and conventional observation [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 26 (6): 755–766.
- 据建华, 任菊章, 吕俊梅. 2004. 北极涛动年代际变化对东亚北部冬季气温增暖的影响 [J]. 高原气象, 23 (4): 429–434. Ju Jianhua, Ren Jūzhang, Lǚ Junmei. 2004. Effect of interdecadal variation of Arctic Oscillation on temperature increasing in north of East Asian winter [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23 (4): 429–434.

- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77 (3): 437–471.
- 李培基. 1988. 中国季节积雪资源的初步评价 [J]. *地理学报*, 43 (2): 108–119. Li Peiji. 1988. Preliminary evaluation of seasonal snow resources in China [J]. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 43 (2): 108–119.
- 李培基, 米德生. 1983. 中国积雪的分布 [J]. *冰川冻土*, 5 (4): 9–18. Li Peiji, Mi Desheng. 1983. Distribution of snow cover in China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 5 (4): 9–18.
- 马丽娟, 秦大河. 2012. 1957~2009 年中国台站观测的关键积雪参数时空变化特征 [J]. *冰川冻土*, 34 (1): 1–11. Ma Lijuan, Qin Dahe. 2012. Spatial-temporal characteristics of observed key parameters for snow cover in China during 1957–2009 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 34 (1): 1–11.
- 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.
- North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. 1982. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 110 (7): 699–706.
- Saito K, Cohen J. 2003. The potential role of snow cover in forcing interannual variability of the major Northern Hemisphere mode [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30 (6), doi:10.1029/2002GL016341.
- Thompson D W J, Wallace J M. 1998. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 25 (9): 1297–1300.
- 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.
- 王澄海, 王芝兰, 崔洋. 2009. 40 余年来中国地区季节性积雪的空间分布及年际变化特征 [J]. *冰川冻土*, 31 (2): 301–310. Wang Chenghai, Wang Zhilan, Cui Yang. 2009. Snow cover of China during the last 40 years: Spatial distribution and interannual variation [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 31 (2): 301–310.
- 韦志刚, 黄荣辉, 陈文, 等. 2002. 青藏高原地面站积雪的空间分布和年代际变化特征 [J]. *大气科学*, 26 (4): 496–508. Wei Zhigang, Huang Ronghui, Chen Wen, et al. 2002. Spatial distributions and interdecadal variations of the snow at the Tibetan Plateau weather stations [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 26 (4): 496–508.
- Wu B Y, Wang J. 2002. Winter arctic oscillation, Siberian High and East Asian winter monsoon [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29 (19): 3-1–3-4, doi:10.1029/2002GL015373.
- 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.
- 吴洪宝, 吴蕾. 2005. 气候变率诊断和预测方法 [M]. 北京: 气象出版社, 27–28. Wu Hongbao, Wu Lei. 2005. *Methods for Diagnosing and Forecasting Climate Variability* (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 27–28.
- 杨辉, 李崇银. 2008. 冬季北极涛动的影响分析 [J]. *气候与环境研究*, 13 (4): 395–404. Yang Hui, Li Chongyin. 2008. Influence of Arctic Oscillation on temperature and precipitation in winter [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 13 (4): 395–404.
- 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 Meteor. Sinica* (in Chinese), 66 (5): 697–706.
- 张若楠, 张人禾, 左志燕. 2014. 中国冬季多种积雪参数的时空特征及差异性 [J]. *气候与环境研究*, 19 (5): 572–586. Zhang Ruonan, Zhang Renhe, Zuo Zhiyan. 2014. Characteristics and differences of multi-snow data in winter over China [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 19 (5): 572–586.
- 张书萍, 祝从文. 2011. 2009 年冬季新疆北部持续性暴雪的环流特征及其成因分析 [J]. *大气科学*, 35 (5): 833–846. Zhang Shuping, Zhu Congwen. 2011. Possible causes of circulation anomalies associated with subsequent snowstorms over the north of Xinjiang during winter 2009 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 35 (5): 833–846.
- 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.
- Zuo Z Y, Zhang R H, Wu B Y. 2012. 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: 271–278.