

许蓓, 陈海山, 高楚杰. 2015. 冬季雪深再分析资料在欧亚中高纬地区的适用性评价 [J]. 气候与环境研究, 20 (3): 296–306, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.14164. Xu Bei, Chen Haishan, Gao Chujie. 2015. Evaluation of the applicability of snow depth reanalysis datasets over the middle-high latitudes of Eurasia in winter [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (3): 296–306.

冬季雪深再分析资料在欧亚中高纬地区的 适用性评价

许蓓^{1,2} 陈海山^{1,2} 高楚杰^{1,2}

¹ 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 气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 欧亚中高纬地区的积雪是影响气候的重要因子, 但是观测台站稀疏且记录只到 1996 年, 导致积雪观测资料严重缺乏。基于目前国际上应用较为广泛的 3 套再分析资料: 美国国家大气海洋局 (NOAA) 的 20 世纪再分析资料 (NCAR-20th century reanalysis)、欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 的再分析资料 (ERA-Interim) 及日本气象厅 (JMA) 的全球大气再分析资料 (JRA-55), 利用前苏联站点观测的雪深资料评估雪深再分析资料在欧亚大陆区域的适用性。结果表明: 3 套再分析资料对积雪的时空变化均具有一定的描述能力; 其中, 尤以 JRA-55 再分析资料与观测事实最为接近, 能较好揭示欧亚中高纬雪深变化的空间分布特征, 反映雪深的长期变化趋势。JRA-55 再分析资料揭示的欧亚雪深与 169 站观测有 90% 吻合, 20 世纪再分析资料有 76% 一致, 而 ERA-Interim 再分析资料只有一半。区域尺度上, JRA-55 再分析资料揭示的欧洲、西伯利亚南部雪深在 1961~1990 年的变化与观测是正相关, 相关系数达到 0.91、0.87, 而 20 世纪再分析资料仅有 0.77、0.32。长时间序列的雪深资料 (JRA-55) 表明欧亚大陆积雪存在年代际的变化特征: 1960 年代积雪偏少; 1970 年代偏多; 从 1980 年代开始呈现减少趋势, 持续至 20 世纪末, 并且积雪的减少是高纬度积雪变化造成的。

关键词 欧亚中高纬 再分析资料 雪深变化 适用性评估 年代际变化

文章编号 1006-9585 (2015) 03-0296-11

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.14164

Evaluation of the Applicability of Snow Depth Reanalysis Datasets over the Middle-High Latitudes of Eurasia in Winter

XU Bei^{1,2}, CHEN Haishan^{1,2}, and GAO Chujie^{1,2}

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

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

Abstract Snow over the middle-high latitudes of Eurasia has been shown as an important forcing mechanism of climate variability, but observation stations in this region are sparsely distributed and recorded only until 1996. Based on three current widely used reanalysis datasets—the twentieth century reanalysis of the National Center for Atmospheric Research (NCAR-20th century reanalysis), supplied by the U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration, the

收稿日期 2014-08-12; 网络预出版日期 2014-12-07

资助项目 国家自然科学基金项目 41230422, 科技部公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201206017, 江苏省自然科学基金——杰出青年基金项目 BK20130047, “新世纪优秀人才支持计划”和江苏省普通高校研究生科研创新计划项目 CXLX13_476

作者简介 许蓓, 女, 1986 年出生, 博士研究生, 主要从事陆气相互作用与短期气候预测。E-mail: xubei1986@hotmail.com

通讯作者 陈海山, E-mail: haishan@nuist.edu.cn

interim reanalysis of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ERA-Interim), and the Japanese 55-year reanalysis (JRA-55), supplied by the Japan Meteorological Agency—we evaluate the applicability of these three reanalysis datasets using historical soviet daily snow depth. Results show that the three reanalysis datasets can describe the spatiotemporal features of winter snow depth in the middle-high latitudes of Eurasia, especially the JRA-55 dataset, which shows the best consistency with station observations. There is 90% consistency between JRA-55 and station observations (174 stations), while the NCAR-20th century reanalysis shows 76% and ERA-Interim only 50%. Even on regional scales JRA-55 exhibits good consistency with stations in Europe and southern Siberia during 1961–1990; their positive correlation coefficients are 0.91 and 0.87, while for the NCAR-20th century reanalysis they are 0.77 and 0.32. JRA-55 exhibits interdecadal variation of snow depth over the middle-high latitudes of Eurasia: Snow depth is less in the 1960s but more in the 1970s; from the 1980s, it shows a decreasing trend that continues until the 20th century, and this decrease in snow depth is caused by changes in the high latitudes.

Keywords Middle-high latitudes of Eurasia, Reanalysis data, Snow depth variation, Applicability evaluation, Interdecadal variation

1 引言

积雪作为一个重要的陆面强迫因子, 其异常变化对气候具有十分重要的影响 (Cohen and Rind, 1991; Bamzai and Shukla, 1999; Fasullo, 2004; Gong et al., 2007)。早在 1884 年, Blanford (1884) 利用有限的积雪观测资料研究发现喜马拉雅地区的冬春积雪和夏季印度季风降水存在一定的联系, 并把积雪作为气候预测的因子; 但由于资料的缺乏, 使得 1920 年后的预报经常失败。1966 年后, 随着卫星遥感资料 and 新的积雪资料的出现, 积雪与季风关系等方面的研究工作取得了新的进展; 例如, Hahn and Shukla (1976)、Dey and Kumar (1982, 1983)、Dickson (1984) 发现积雪和印度季风存在反相关关系, 验证了 Blanford (1884) 的假说。因此, 可靠的积雪资料对研究积雪变化及其与气候系统其他分量的关系至关重要。

目前, 使用最广泛的积雪资料为美国冰雪资料中心 (NSIDC) 整理的前苏联站点积雪资料, 时段为 1881~1996 年。但该资料存在一系列的问题: 缺测值较多; 站点多分布在前苏联地区 (欧亚大陆中高纬), 而北方极地寒冷地区观测资料极少, 尤其在西伯利亚地区, 站与站的间隔甚至可达 1000 km 以上 (Running et al., 1999)。因此, 卫星监测积雪成为获取积雪资料的一个可行手段。美国国家大气海洋局 (NOAA) 采用可见光遥感技术提供了北半球逐周积雪资料, 然而变量仅限于积雪面积, 且分辨率较低, 其反演精度容易受到云的干扰。鉴于可见光测量积雪的局限性, 微波遥感资料逐渐受到关注, 如卫星遥感雪水当量 (Snow Water

Equivalent, SWE)。与可见光相比, 其突出优点是不受云和天空亮度的干扰, 时间分辨率高, 专业微波辐射成像仪和多波段扫描微波辐射仪可以获取积雪空间分布信息的遥感数据。但是在反演积雪深度时, 雪粒子的变化也会对微波发射频率有响应 (Tsang et al., 2000), 所以积雪覆盖区域的温度梯度在很大程度上会影响反演结果 (Sturm and Benson, 1997)。欧亚高纬度的温度年际变率是最显著地区, 静态算法就不适用于该区域 (Josberger and Mognard, 2002), 而陆面西伯利亚的永久冻土、植被、土壤温度的变化等都是使得反演产生误差的因素 (车涛和李新, 2004; Grippa et al., 2004; Derksen et al., 2008)。

随着资料同化技术和数值预报模式的不断发展, 再分析资料已被广泛应用于现代气候研究, 例如模式验证、气候变率及长期变化趋势分析。因此, 数值模式结果也是研究人员获得积雪资料的一个备选。近年, NOAA 利用最先进的同化资料并结合观测资料, 提供了一套从地面到高空的 20 世纪大气再分析资料 (20th century reanalysis version2), 该套资料不但时间跨度长 (1871~2010 年), 且避免了观测系统变更和资料内部不协调所带来的虚假趋势 (Compo et al., 2011)。欧洲天气预报中心 (ECMWF) 基于四维变分 (4D-Var) 同化技术建立了 ERA-Interim 再分析资料, 且数据空间分辨率较高。另外, 日本气象厅 (JMA) 实施了 55 年 (1979~2004 年) 全球大气再分析资料 (JRA-55, Japanese 55-year reanalysis) 计划, 采用三维变分 (3D-Var) 同化了大气常规观测资料、风场、亮温、可降水量及 SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager) 雪盖和中国雪深资料 (Onogi et al., 2007), 获得了第一

套亚洲地区长时间、质量较高的再分析数据。

目前,众多学者基于不同积雪资料研究了欧亚中高纬度地区积雪的时空变化特征及其对东亚大气环流的影响(陈海山和孙照渤,2003;张人禾等,2008;穆松宁和周广庆,2010;陈海山和许蓓,2012;左志燕和张人禾,2012),并取得了大量的成果,但由于积雪资料的类型、研究方法和研究时段及资料本身的局限性,使得研究结果存在较大的差异。因此,综合评价各类积雪资料的适用性是开展积雪相关研究的必要前提。正是基于以上考虑,本文基于3套再分析资料,对比分析了欧亚大陆雪深再分析资料与观测数据的异同点,在此基础上评估了不同再分析资料在欧亚中高纬地区的适用性,选择一套可以更好反应该地区积雪变化特征的再分析资料,并揭示近几十年来冬季欧亚大陆雪深的变化特征。

2 资料和方法

研究所用的积雪资料包括:(1)美国冰雪资料中心提供的1881~1995年HSDSD(Historical Soviet Daily Snow Depth version2)逐日积雪深度,站点数为284个,且均为世界气象组织(WMO)标准测站,范围是(35°N~75°N,20°E~180°)。文中研究时段取为1961~1990年,以12月至次年2月雪深平均值作为冬季雪深。根据资料的缺测情况,最终选取169站(如图1)。(2)NOAA提供的20世纪再分析资料积雪深度(1871~2010年),格点采用高斯格点(Gaussian Gridded)192(纬向)×94(经向),来自:http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.20thC_ReanV2.monolevel.mm.html [2014-05-01]。(3)ECMWF提供的ERA-Interim再分析资料积雪深度,分辨率为1°(纬度)×1°(经度),来自:<http://apps.ecmwf.int/datasets/> [2014-03-01]。(4)JMA提供的全球再分析积雪深度数据JRA-55(1958~2012年),分辨率为1.25°(纬度)×1.25°(经度)。

另外,研究中主要采用了联合经验正交展开、双线性插值、相关分析等统计方法,显著性均采用Student *t* 检验方法进行检验。其中联合经验正交展开(EEOF)可以研究某气象要素的时空演变特征,将不同的冬季雪深资料排列成矩阵,将此矩阵进行EEOF,得到的特征向量反映了不同雪深资料的空

间分布结构变化。

3 不同积雪资料的比较分析

3.1 气候均值及趋势的比较

图2a给出了站点观测的欧亚大陆冬季雪深气候态的空间分布,总体而言,雪深由南至北逐渐增加,大值区主要位于欧亚大陆高纬度的中西伯利亚及北欧地区;雪深最大值可达到70 cm以上,与Wu et al.(2009)的结果类似,但可能由于研究时段的差异,其数值略有差异。图2b、2c、2d分别为20世纪再分析资料、ERA-interim再分析资料、JRA-55再分析资料冬季雪深气候态的空间分布。不难发现,不同资料反应的变化幅度存在一定的差异,但均能体现出雪深由南至北递增的气候态特征,且高纬度均存在大值中心。其中20世纪再分析雪深与同纬度的站点观测资料相比,量级明显偏高,最大相差约30 cm;JRA-55再分析资料反映的雪深数值总体与观测相当,而亚马尔半岛至泰梅尔半岛区域与观测存在差异,雪深明显高于观测;ECMWF提供的雪深资料,其数据量级等同于雪水当量,与观测雪深差异较大,但其大值中心位置与观测较为一致。

图3是不同资料1961~1990年雪深变化趋势,由图可知,站点雪深(图3a)在中高纬度显著增加,而中纬度西欧和贝加尔湖一带呈现减少趋势。JRA-55雪深(图3c)的气候趋势空间分布与观测最为接近,但是亚马尔半岛至泰梅尔半岛区域的积雪变化与观测不一致,同时贝加尔湖以南地区与观测略有差异。20世纪再分析雪深变化趋势(图3b)基本能够反映雪深的变化趋势空间特征,但是中高纬度地区积雪的增加趋势并不显著;ERA-interim(图3d)的趋势变化与观测差别最大,整体呈现减少趋势,尤其是高纬度地区和东西伯利亚地区。

3.2 不同雪深资料间的相关性分析

为了进一步对比各再分析资料适用性,将再分析资料插值到站点坐标值,进行逐点相关。图4为站点和再分析资料雪深的相关系数分布。就20世纪再分析资料(图4a)而言,有76%的站点雪深变化与同观测一致,共128站通过95%的信度检验,未通过检验或者呈负相关的站点主要位于东西伯利亚地区,说明20世纪再分析资料基本能够较好的再现观测雪深,但东西伯利亚地区其刻画能力相

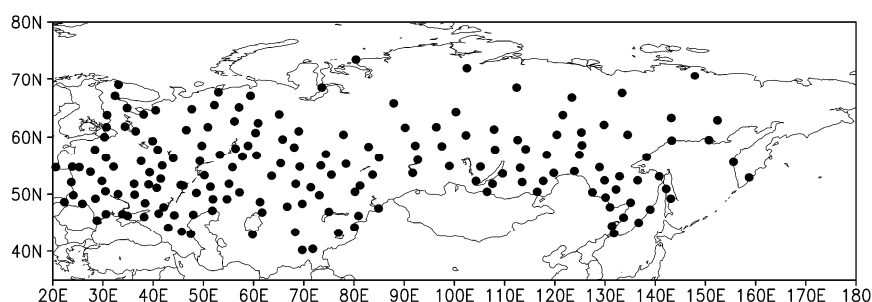


图1 欧亚大陆中高纬 169 站点分布

Fig. 1 The geographic distribution of 169 stations over the middle-high latitudes of continental Eurasia

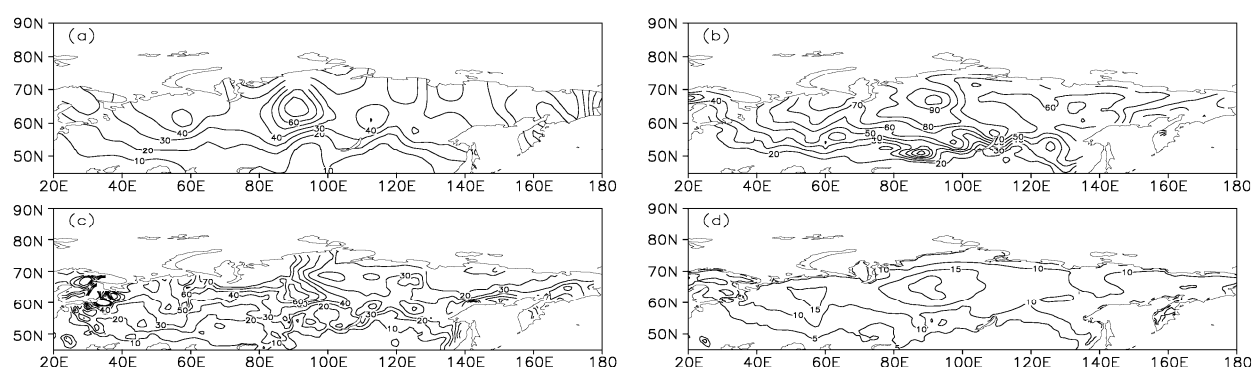


图2 冬季雪深气候平均值(单位: cm)的空间分布: (a) 前苏联站点观测; (b) 20 世纪再分析; (c) JRA-55; (d) ERA-interim

Fig. 2 Distributions of the climatological snow depth (cm) field in winter during 1961–1990: (a) HSDSD (Historical Soviet Daily Snow Depth) observations; (b) 20th century reanalysis; (c) JRA-55 (Japanese 55-year reanalysis); (d) ERA-interim (interim reanalysis of the European Center for Medium-Range Weather Forecasts)

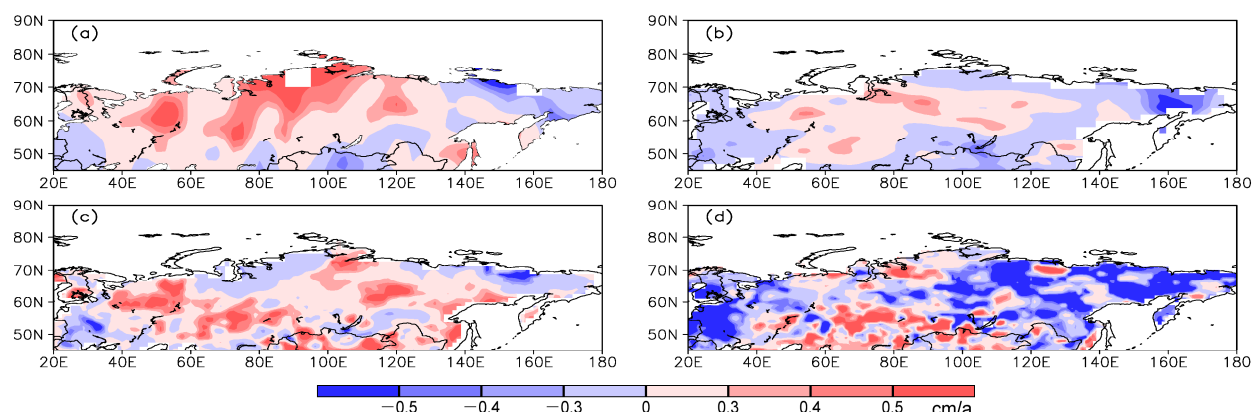


图3 1961~1990 年 (a) 前苏联站点、(b) 20 世纪再分析、(c) JRA-55、(d) ERA-interim 雪深的线性趋势 (0.36 为通过 95%信度检验)

Fig. 3 Distributions of the linear trend of the snow depth field in winter during 1961–1990 (0.36 denotes the linear trend exceeding the 95% confidence level): (a) HSDSD observations; (b) 20th century reanalysis; (c) JRA-55; (d) ERA-Interim

对较弱。JRA-55 再分析资料(图 4b)表明有 90% 的站点(152 站)通过 95%的信度检验,只有沿海的站点不能很好的刻画观测值,其余站点均与观测相似,具有较高的重现欧亚中高纬度雪深能力。而 ERA-interim 雪深(图 4c)与观测相关分布只有 50%

的站点呈正相关,共 87 站通过 95%的信度检验,但是多分布于欧洲地区,表明 ERA-interim 再分析资料在欧洲地区有较好适用性。综上所述,结合积雪变量的气候均值、线性趋势及相关分析的结果来看,各再分析资料对欧洲地区雪深重现的可信度都

较高;但是,JRA-55 再分析资料是最能反映欧亚中高纬雪深变化的再分析资料,20 世纪再分析资料次之。

3.3 年际变化的时空分布比较

均方差可以反映变量的离散程度,本文利用去除线性趋势后的均方差代表变量的年际变率。图 5 给出了站点观测及不同再分析资料的雪深均方差

空间分布。站点观测(图 5a)表明欧亚雪深年际变率的空间分布极不均匀,高纬度的北欧地区以及中西伯利亚高原雪深变率最大。20 世纪再分析资料(图 5b)反映的积雪变率大值区主要位于欧洲西部及西西伯利亚平原,与观测的最大差异在于东西伯利亚的积雪变化情况;JRA-55 再分析资料(图 5c)

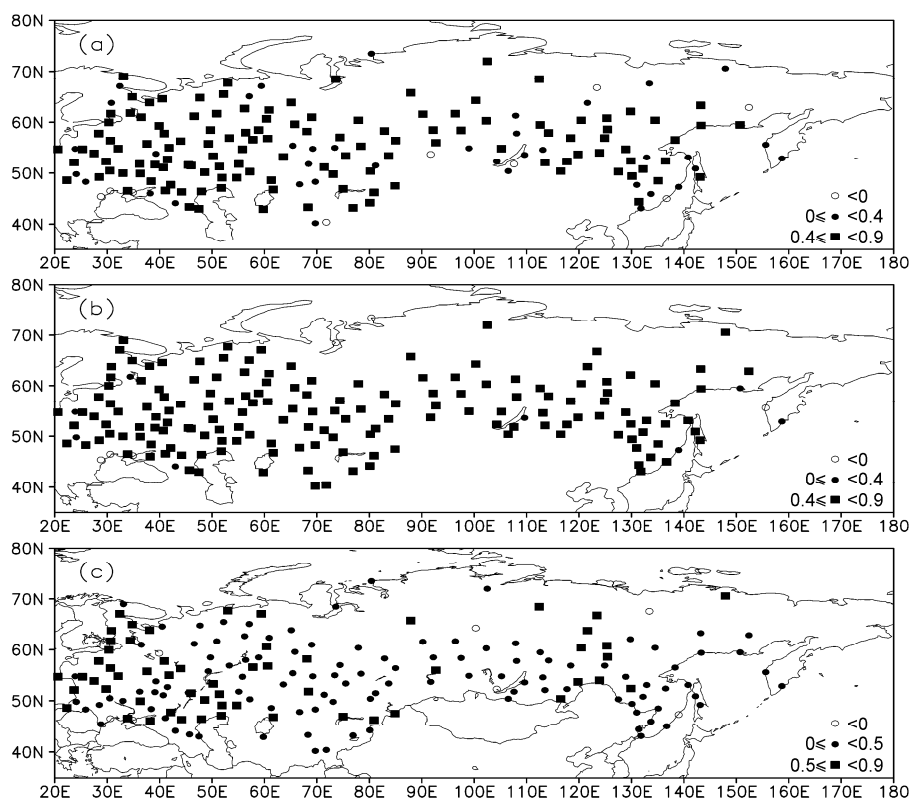


图 4 前苏联站点观测雪深与 (a) 20 世纪再分析、(b) JRA-55、(c) ERA-interim 雪深的相关分布 (方点表示通过 95% 信度检验)

Fig. 4 Correlation coefficients between observations and the (a) 20th century reanalysis, (b) JRA-55, and (c) ERA-Interim snow depth fields in winter during 1961–1990 (square dots denote the correlation coefficients exceeding the 95% confidence level)

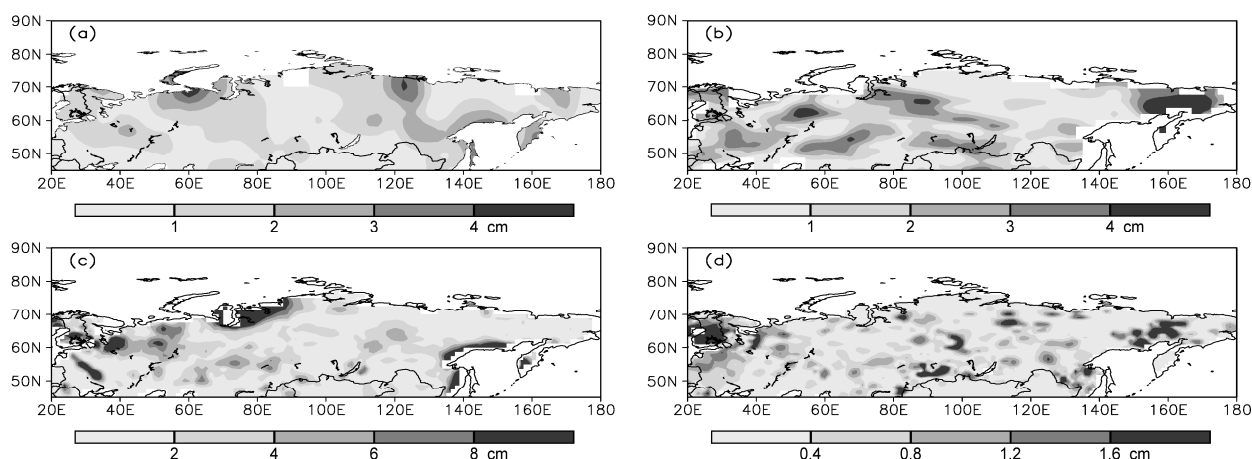


图 5 1961~1990 年 (a) 前苏联站点观测、(b) 20 世纪再分析、(c) JRA-55、(d) ERA-interim 雪深均方差

Fig. 5 Distributions of the standard deviation of the snow depth field in winter during 1961–1990: (a) HSDSD observations; (b) 20th century reanalysis; (c) JRA-55; (d) ERA-Interim

给出的积雪年际变率空间分布基本与站点观测总体较为一致,但其变化幅度明显高于站点观测;相比之下,ERA-interim 雪深(图 5d)的变率明显小于站点观测,且信息较为零散,并没有体现出北欧大值中心这一基本特征。

为了深入探讨不同雪深资料反应的积雪异常变化的时空分布特征,这里采用扩展经验正交分解(EEOF)进行分析来比较不同资料间的空间分布差异,因为时间年份的限制,ERA-intrim 再分析资料采用 1978~1990 年进行经验正交分解(EOF)分析。前两个模态方差贡献之和为 57%,可以代表欧亚中高纬雪深的主要分布特征。图 6 为各套资料的第一模态空间分布,其方差贡献占 44%。对于站点雪深,第一模态的空间分布型的总体特征为欧亚高纬度与中高纬度南北反相分布,欧亚大陆中部、欧洲均为正值中心,而中高纬度以及东西伯利亚为负值中心;在 1970 年代末期出现年代际转折,积雪明显增加,这与图 3a 中线性趋势的结果是相似的,因此图 7 给出了 1972 年前后前苏联雪深的变化趋势,如图可知,1961~1972 年欧亚雪深变化整体呈现减少趋势,但是中高纬度(50°N~60°N)是增加

趋势;而 1972~1990 年欧亚雪深的变化与前期是相反的趋势,特别是高纬度地区。这表明第一模态确实反映了雪深的长期变化趋势。与观测相比,20 世纪再分析雪深的第一模态空间分布与观测基本一致,表现南北反相分布特征,但是 20 世纪再分析资料与观测最大的误差在东北亚地区,其负值变化范围明显大于观测;JRA-55 雪深的空间分布型仅在亚马尔半岛与观测相反,其余与观测也较为一致;而 ERA-intrim 再分析资料相差较大,除欧洲与观测变化相同,其余地区与观测的差异显著。第二模态方差贡献为 13%(图 8),表现出的年际变率特征与图 5a 中的空间分布是一致的,总体特征为欧亚中部与东、西部反相分布,欧亚大陆中部为正值中心,而其东、西部均为负值中心,正值主要位于西伯利亚及东北亚,而负值中心位于西欧以及贝加尔湖一带地区。20 世纪再分析雪深的第二模态空间分布型与观测较为类似,但东西伯利亚地区的大值中心分布与观测有所区别;JRA-55 雪深与观测差异最大的区域出现在泰梅尔半岛;ERA-intrim 再分析资料表现出的信息较为零散,并且西伯利亚东部与观测相反。综上,无论空间特征还是变化幅度,再

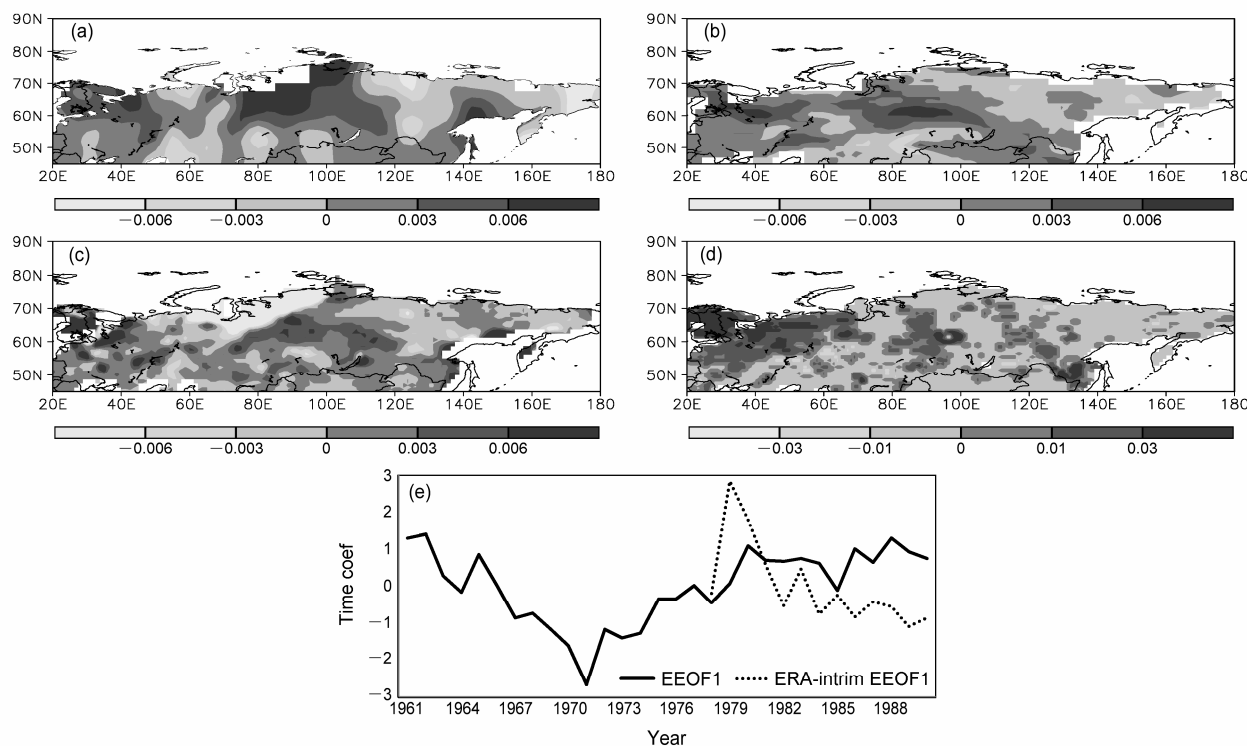


图 6 (a) 前苏联站点观测、(b) NCAR 20 世纪再分析、(c) JRA-55、(d) ERA-intrim 雪深的扩展经验正交函数(EEOF)第一模态空间分布以及(e) 时间序列

Fig. 6 Spatial patterns of (a) HSDSD observations, (b) 20th century reanalysis, (c) JRA-55, (d) ERA-Interim and (e) time series of the first EEOF (Extended Empirical Orthogonal Function) mode (EEOF1) of winter snow depth over the middle-high latitudes of continental Eurasia

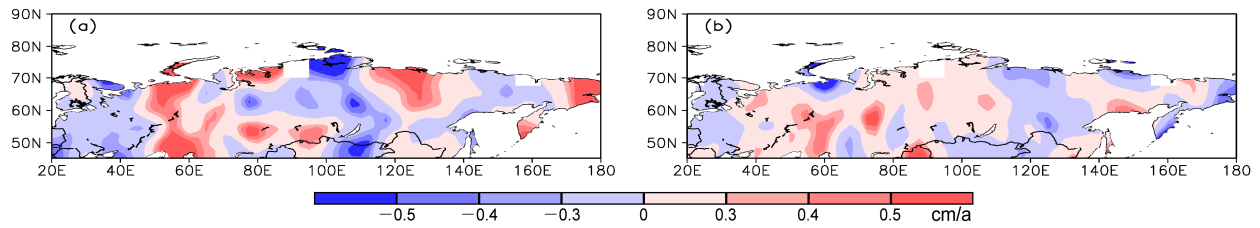


图 7 (a) 1961~1972 年、(b) 1973~1990 年前苏联站点观测雪深的线性趋势

Fig. 7 Distributions of the linear trends from HSDSD observations during (a) 1961–1972 and (b) 1973–1990

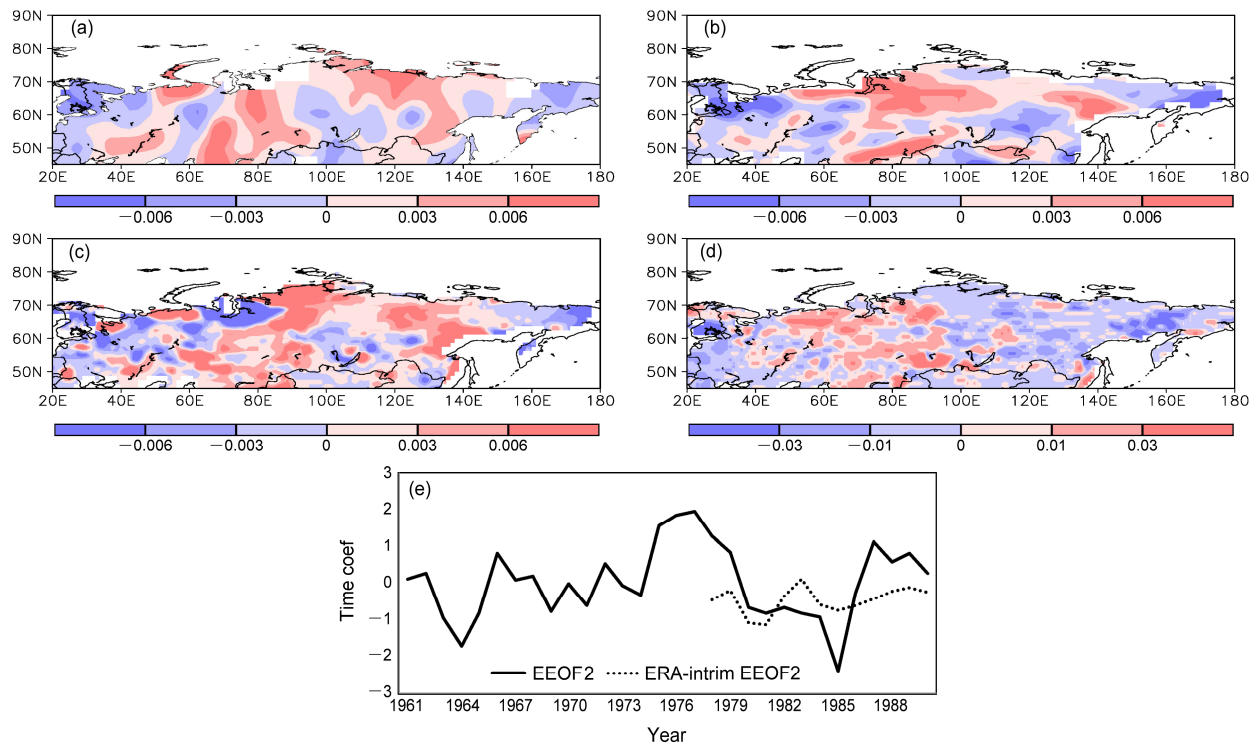


图 8 (a) 前苏联站点观测、(b) NCAR 20 世纪再分析、(c) JRA-55、(d) ERA-intrim 雪深的 EEOF 第二模态空间分布以及 (e) 时间序列

Fig. 8 Spatial patterns of (a) HSDSD observation, (b) 20th century reanalysis, (c) JRA-55, (d) ERA-Interim and (e) time series of the EEOF2 mode of winter snow depth over the middle-high latitudes of continental Eurasia

分析资料与观测相比能够抓住整体的分布特征，但是也存在一定差异，说明单一的再分析资料在反映中高纬积雪变量方面的能力较为有限，这可能是由于雪深变化的复杂性及中高纬度特殊的地形。

欧亚不同再分析雪深资料的空间结果表明，JRA-55 再分析资料和 20 世纪再分析资料能很好的反映欧亚中高纬雪深变化，但是欧亚中高纬站点分布并不均匀，下文则从区域雪深变化的角度评估再分析雪深数据。本文将前苏联雪深观测站点分为两部分：欧洲（45°N~65°N，20°E~60°E）部分和西伯利亚南部（50°N~60°N，60°E~140°E）。图 9 分别给出了 1961~1990 年欧洲和西伯利亚南部的区域雪深距平时间序列，20 世纪再分析资料和 JRA-55

再分析资料可以较好的呈现出欧洲地区积雪的年际变化，二者与站点相关系数分别为 0.77 和 0.91（通过 95%的信度检验）。对西伯利亚南部地区而言，20 世纪再分析资料反映积雪的年际变化较差，无法描述出 1970 年代末期积雪变量的年代际转折，其与站点观测相关系数仅为 0.32（通过 90%的信度检验），而 JRA-55 再分析资料可以相对较好的表现出这种年际变化，其与站点观测显著相关，相关系数为 0.87（通过 95%的信度检验）。其中，ERA-intrim 再分析资料虽然时间年限不同，但是其表现出来的区域雪深变化趋势与观测相差太大，完全不能体现欧亚雪深的变化特征。因此，JRA-55 再分析资料刻画欧亚中高纬雪深变化的能力要优于 20 世纪再分

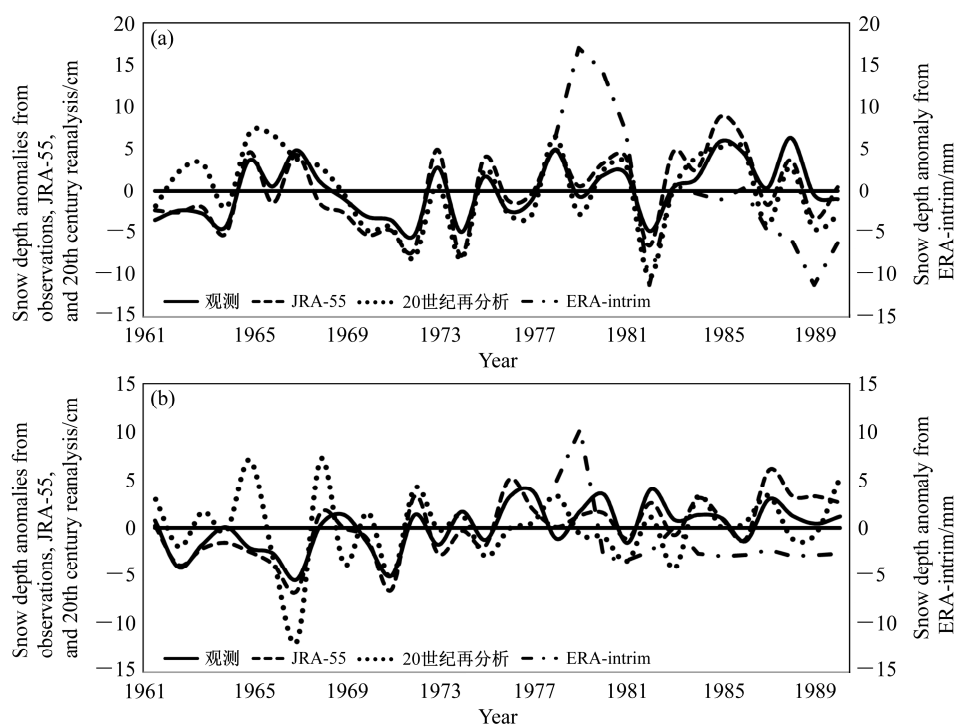


图9 (a) 欧洲、(b) 西伯利亚南部冬季雪深距平序列

Fig. 9 Anomalies of annual mean snow depth averaged in (a) Europe and (b) southern Siberia in winter

析资料, 而 ERA-interim 再分析资料刻画雪深的能力有限。

4 近 55 年欧亚大陆雪深的变化特征分析

受高纬度观测环境条件限制, 加之积雪观测的特殊性, 构建长期的欧亚大陆雪深资料一直以来都是一个难以解决的问题。鉴于研究区域内 1996 年后观测资料相对匮乏, 且观测难度较大, 卫星观测和再分析数据便成为了欧亚积雪研究的主要数据来源。综合前文对再分析资料的评估中可知, JRA-55 再分析资料在积雪变量的空间分布及年际变化上可以较好地重现欧亚大陆雪深, 本文拟利用 1961~2010 年 JRA-55 再分析资料探讨近年欧亚大陆中高纬 (40°N 以北) 的冬季积雪变化情况。图 10 为过去 50 年间欧亚大陆 (40°N 以北) 冬季雪深距平, 可以发现欧亚大陆积雪存在年代际变化特征, 1960 年代中后期积雪出现增加的转变, 而 1986 年开始减少并且幅度增大, 20 世纪末又出现增加的趋势。Mognard et al. (2003)、Déry and Brown (2007) 通过卫星观测雪盖面积均证实 1980 年代

中后期开始欧亚雪盖呈逐渐减少的趋势, 这与 JRA-55 再分析资料所反映的情况基本一致, 从侧面说明了 JRA-55 再分析资料的可靠性。下文则探讨欧亚大陆雪深在年代际尺度上的空间分布的变化情况, 这将有助于我们更清楚地理解 20 世纪积雪变化的全景。图 11 是欧亚地区雪深不同年代的距平场, 1960 年代欧亚积雪整体偏少。1970 年代开始, 欧亚积雪偏多, 特别是高纬度地区。但是 1980 年代之后, 欧亚地区雪深变化呈现南北反相分布特征, 高纬度是显著偏少, 而中纬度则是增加趋势。1990 年代, 这种趋势则更加的明显。结合图 7 可知, 欧亚大陆积雪存在年代际的变化特征, 1960 年代积雪偏少; 1970 年代偏多; 从 1980 年代开始呈现减少趋势, 持续至 20 世纪末, 并且积雪的减少是高纬度积雪变化造成的。

5 结论与讨论

欧亚大陆积雪资料有限, 尤其是高质量的积雪资料缺乏是当前研究的一个重要问题。欧亚大陆积雪观测资料的站点少而且分布不均匀, 而卫星遥感资料年代较短, 并且受到云和地表状况等的影响,

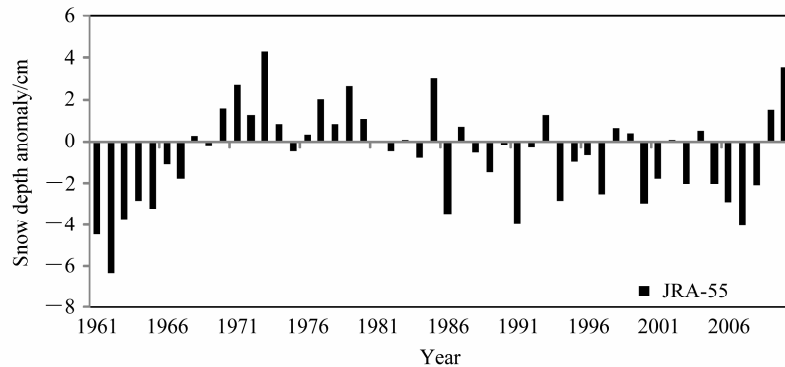


图 10 1961~2010 年欧亚大陆 (40°N 以北) 冬季雪深距平 (平均值取 1971~2000 年气候平均, 资料来自 JAR-55)

Fig. 10 Anomaly of annual mean snow depth averaged over the middle-high latitudes of continental Eurasia in winter during 1961–1990 (the base period is from 1971 to 2000, snow depth dataset is from JAR-55)

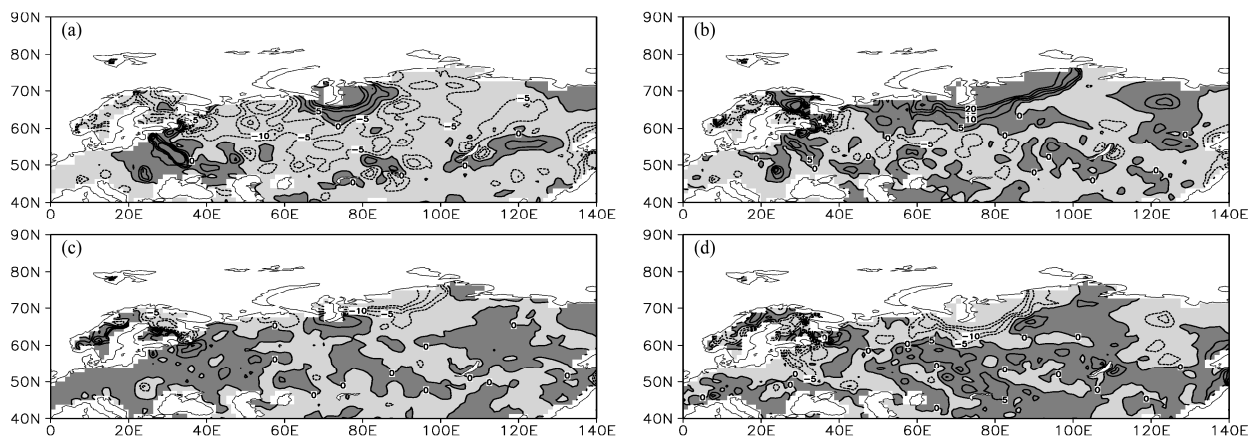


图 11 欧亚年代际雪深距平场空间分布的演变 (平均值取 1971~2000 年气候平均, 单位: cm; 深色阴影为正距平, 浅色阴影为负距平, 资料来自 JAR-55): (a) 1961~1970 年; (b) 1971~1980 年; (c) 1981~1990 年; (d) 1991~2000 年

Fig. 11 Decadal variations of snow depth over the middle-high latitudes of continental Eurasia (the mean is taken as the 1971–2000 climate mean, units: cm, dark shadows denote positive anomalies of snow depth, light shadows denote negative anomalies; snow depth dataset is from JAR-55): (a) 1961–1970; (b) 1971–1980; (c) 1981–1990; (d) 1991–2000

精度不高。鉴于此, 本文基于站点观测的欧亚中高纬度 30 年 (1961~1990 年) 雪深资料, 对比分析了 20 世纪再分析资料、ERA-interim 再分析资料和 JRA-55 再分析资料, 并评估了其在欧亚中高纬度地区的适用性; 最后, 利用 JRA-55 雪深资料, 探讨了 1961~2010 年间欧亚冬季雪深的总体变化特征。结果表明:

(1) 就气候平均态而言, 3 种再分析资料基本可以表征欧亚雪深空间分布特征。其中, JRA-55 再分析资料与观测的量级最为一致, 20 世纪再分析资料偏高近 30 cm。JRA-55 再分析资料的年际变化、气候趋势与观测最接近, 20 世纪再分析资料和 ERA-interim 在西伯利亚东部与观测存在差异。

(2) 空间相关表明再分析资料均能很好的再现欧洲地区雪深变化, 但是对于西伯利亚冬季雪深而言, 只有 JRA-55 再分析资料刻画的最好, 区域分析也验证了 JRA-55 再分析资料在反应欧亚大陆冬季雪深的准确性。进一步的分析表明, JRA-55 再分析资料有 90% 的站点雪深变化是同站点观测一致, 而 20 世纪再分析资料与站点观测一致的比值只有 76%, 尤其是在西伯利亚的刻画能力较差; ERA-interim 再分析资料有近一半资料与站点观测的相关很弱, 基本无法反应西伯利亚地区观测站点雪深的变化信息。

(3) JRA-55 再分析资料揭示了欧亚大陆积雪在 1961~2010 年的总体变化特征。1960 年代欧亚

冬季积雪持续偏少;但是 1970 年代后积雪显著偏多;1980 年代开始呈现减少趋势,直至 20 世纪积雪继续减少且幅度增大,而积雪的减少主要是高纬度积雪变化造成的。

本文以欧亚中高纬站点观测资料为依据,证实 JRA-55 再分析资料相较于其他再分析资料可以更好的描述欧亚大陆地区雪深时空变化特征。值得注意的是,本文选取的站点观测资料存在一定的局限性,特别是在东北亚地区缺少可信的观测资料。本文主要对比了几套再分析雪深资料的气候特征以及时空分布变化,由于雪深变化的复杂性以及欧亚大陆特殊的地形原因,再分析资料反映的雪深与观测存在差异是不可避免的。张若楠等(2014)提出中国多种积雪参数存在一定的差异,并且卫星遥感资料更适用于高原和山区缺少气象站的地区,以及北半球更大区域积雪的研究。本文研究区域更为广泛,经过对比分析可知,JRA-55 再分析资料亦具有一定的可信度,特别是在西伯利亚东部地区,弥补了高纬度地区站点资料的不足。并且 JRA-55 再分析资料能较好揭示欧亚中高纬雪深变化的空间分布特征,反映雪深的长期变化趋势。虽然 JRA-55 再分析资料雪深在亚马尔半岛至泰梅尔半岛的区域与观测有差异,而且资料限制,不能从积雪日数、雪盖覆盖率等各方面全面评估再分析积雪资料,但是这是目前为止,时间尺度较长且能够比较真实反映欧亚中高纬度地区雪深的资料,具有较好的可靠性,可作为观测雪深的代用资料。

参考文献 (References)

- 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.
- Blanford H F. 1884. On the connection of the Himalayan snowfall with dry winds and seasons of drought in India [J]. *Proc. Roy. Soc. London*, 37 (232–234): 3–22.
- 车涛, 李新. 2004. 利用被动微波遥感数据反演我国积雪深度及其精度评价 [J]. *遥感技术与应用*, 19 (5): 301–306. Che Tao, Li Xin. 2004. Retrieval of snow depth in China by passive microwave remote sensing data and its accuracy assessment [J]. *Remote Sensing Technology and Application (in Chinese)*, 19 (5): 301–306.
- 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, 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.
- Cohen J, Rind D. 1991. The effect of snow cover on the climate [J]. *J. Climate*, 4 (7): 689–706.
- Compo G P, Whitaker J S, Sardeshmukh P D, et al. 2011. The twentieth century reanalysis project [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 137 (654): 1–28.
- Déry S J, Brown R D. 2007. Recent Northern Hemisphere snow cover extent trends and implications for the snow-albedo feedback [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34 (22), DOI: 10.1029/2007GL031474.
- Derksen C, Walker A, Toose P. 2008. Estimating snow water equivalent in northern regions from satellite passive microwave data [M]// *Cold Region Atmospheric and Hydrologic Studies. The Mackenzie GEWEX Experience*. Berlin, Heidelberg: Springer, 195–212.
- 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.
- Dey B, Kumar O S R U B. 1983. Himalayan winter snow cover area and summer monsoon rainfall over India [J]. *J. Geophys. Res.*, 88 (C9): 5471–5474.
- Dickson R R. 1984. Eurasian snow cover versus Indian monsoon rainfall—An extension of the Hahn-Shukla results [J]. *J. Climate Appl. Meteor.*, 23 (1): 171–173.
- Fasullo J. 2004. A stratified diagnosis of the Indian monsoon—Eurasian snow cover relationship [J]. *J. Climate*, 17 (5): 1110–1122.
- Gong G, Cohen J, Entekhabi D, et al. 2007. Hemispheric-scale climate response to northern Eurasia land surface characteristics and snow anomalies [J]. *Global and Planetary Change*, 56 (3–4): 359–370.
- Grippa M, Mognard N, Le Toan T, et al. 2004. Siberia snow depth climatology derived from SSM/I data using a combined dynamic and static algorithm [J]. *Remote Sensing of Environment*, 93 (1–2): 30–41.
- 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.
- Josberger E G, Mognard N M. 2002. A passive microwave snow depth algorithm with a proxy for snow metamorphism [J]. *Hydrological Processes*, 16 (8): 1557–1568.
- Mognard N M, Kouraev A V, Josberger E G. 2003. Global snow-cover evolution from twenty years of satellite passive microwave data [C]// *Proceedings of 2003 IEEE International, Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Toulouse, France: IEEE, 4: 2838–2840.
- 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.
- Onogi K, Tsutsui J, Koide H, et al. 2007. The JRA-25 reanalysis [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 85 (3): 369–432.
- Running S W, Way J B, McDonald K C. 1999. Radar remote sensing

- proposed for monitoring freeze-thaw transitions in boreal regions [J]. *Eos, Trans. Amer. Geophys. Union*, 80 (19): 213, 220–221.
- Sturm M, Benson C S. 1997. Vapor transport, grain growth, and depth-hoar development in the subarctic snow [J]. *J. Glaciol.*, 43 (143): 42–59.
- Tsang L, Chen C T, Chang A T C, et al. 2000. Dense media radiative transfer theory based on quasicrystalline approximation with applications to passive microwave remote sensing of snow [J]. *Radio Sci.*, 35 (3): 731–749.
- 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): 31–34.
- 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.
- 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.