

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, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13063. 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.

中国冬季多种积雪参数的时空特征及差异性

张若楠^{1,2} 张人禾³ 左志燕³

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 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国气象科学研究院, 北京 100081

摘 要 利用 1979~2006 年冬季中国站点最大雪深和站点雪日、卫星遥感雪深、积雪覆盖率和雪水当量 5 种积雪资料, 从多角度深入细致地分析了我国冬季积雪的时空变化特征。结果表明: 5 种积雪资料的经验正交分解第一模态都表现为中国南、北方反位相的特征, 即当新疆和东北三省—内蒙古地区积雪偏多(少)时, 青藏高原和南方地区积雪偏少(多)。新疆和东北三省—内蒙古地区的雪深、积雪覆盖率和雪日随时间有逐渐增多的趋势, 而其中边缘山区的雪水当量表现出减少的趋势, 青藏高原地区的积雪表现出与其完全相反的特征。南方地区站点最大雪深和雪日表现出随时间减少的趋势, 卫星遥感难以监测到该区积雪。相比较而言, 卫星遥感资料比较适合高原和山区缺少气象站的地区及北半球更大区域积雪的研究, 而站点资料更适用于中国中东部和平原地区积雪的区域研究。雪深、雪日、积雪覆盖率和雪水当量这些多样性积雪参数存在一定的差异性, 因此 5 种积雪资料结合使用才能得到更准确的结论。

关键词 中国冬季 最大雪深 积雪覆盖率 雪日 雪水当量

文章编号 1006-9585 (2014) 05-0572-15

中图分类号 P468

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13063

Characteristics and Differences of Multi-Snow Data in Winter over China

ZHANG Ruonan^{1,2}, ZHANG Renhe³, and ZUO Zhiyan³

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 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract By using conventional observations of snow depth, snow day, satellite remote of sensing snow depth, snow cover fraction, and snow water equivalent data in winter over China for 1979–2006, comparisons on their spatial and time variations were conducted. It is determined that the variations in the five types of snow datasets are out of phase between Xinjiang Uygur Zizhiqu, Northeast–Inner Mongolia, and the Tibetan Plateau, South China, in the leading mode of empirical orthogonal functions. Namely, the positive (negative) anomalies in snow over Xinjiang Uygur Zizhiqu and Northeast–Inner Mongolia are associated with negative (positive) anomalies over the Tibetan Plateau and South of the Yangtze River valley. Over North China, snow depths, snow cover fractions, and snow days increase with time whereas snow water equivalents reduce with time. The variations in snow cover fraction and snow day over the Tibetan Plateau

收稿日期 2013-04-14 收到, 2013-06-19 收到修定稿

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, 主要从事冰雪气候效应研究。E-mail: zhangrn2010@126.com

are opposite those in North China. Over South China, decreases in snow depths and snow days were observed. In general, satellite remote of sensing snow data are suitable for plateaus and mountains where fewer observations are available and for large-scale snow research over the Northern Hemisphere; observation snow data are suitable for Central–West China or the plain areas.

Keywords China winter, Snow depth, Snow cover fraction, Snow day, Snow water equivalent

1 引言

积雪作为气候系统中冰冻圈的一部分，由于其高反射率和隔绝热量交换特性以及其消融引起的水文效应，可通过改变地表能量平衡、水循环和大气环流对全球气候和水循环系统产生重要的影响，在天气气候的变化中占据重要地位。中国地区积雪资源极其丰富，我国绝大部分地区的积雪在 5 cm 以下，以 3 cm 覆盖的积雪面积最大，其中稳定积雪区主要位于青藏高原、东北三省一内蒙古和新疆北部一天山地区，而不稳定积雪区的南界位于 24°N~25°N 一带（李培基和米德生，1983）。稳定积雪区是我国季节积雪水资源的主要蕴藏区，但我国稳定积雪区绝大部分属于间断性积雪分布，积雪时空变化剧烈（秦大河和丁一汇，2002）。在三大积雪区中，新疆地区的积雪空间稳定性最好，其次为东北三省一内蒙古，青藏高原最差（刘俊峰等，2012）。东北和北疆地区积雪融水形成的春汛，对农业灌溉有着非常重要的意义（李培基，1987，1988）；青藏高原积雪与长江流域降水有密切联系（陈烈庭和阎志新，1978；韦志刚等，1998；吴统文和钱正安，2000；Wu and Qian，2003）。

迄今为止，积雪监测的手段主要有地面常规观测、卫星可见光遥感和微波遥感 3 类，关于这 3 类积雪资料的特性、不足，以及资料的对比验证已经取得很多成果。

第一，在卫星应用于积雪监测之前，地面台站观测资料是获取积雪空间分布、积雪水资源量的唯一途径，台站测雪的主要变量包括雪深、雪日和雪压等积雪参数。但其空间分布的不连续、不规则和不均匀；积雪广泛分布的山区观测点稀少甚至无台站分布，致使实测的积雪深度及日数很难代表区域积雪的空间分布特征。另外，气象台站资料有观测人员的主观性和技术性误差的存在，单独使用难以反映山区积雪地面实况和真实的年际变化（李培

基，1999，2001）。柯长青和李培基（1998）、Qin et al.（2006）、王澄海等（2009）、马丽娟和秦大河（2012）和李小兰等（2012）重点分析了台站积雪的变化特征，并对比了雪盖和遥感雪深等资料，结果表明几种资料的积雪变化较为相似，即都在东北地区、新疆北部和高原东部地区多雪，且都有明显的年际变化特征；随着全球增温，中国积雪的趋势变化基本上为南、北反位相，青藏高原和长江中下游地区的积雪有增长趋势，而东北平原中部和西部地区的积雪有减少趋势（李培基，1988；1990）。

第二，采用可见光遥感技术的 NOAA 信息服务局和气候预测中心（NESDIS 和 CPC）北半球逐周积雪资料，是达到气象业务化和规范化的卫星积雪资料。然而，可见光遥感技术可测量的积雪变量仅限于积雪面积，观测分辨率较低，并受到云的干扰；在高山地区、薄雪地区缺测、漏测现象时有发生，对青藏高原东部多雪区的监测也较差；不能区分斑块状积雪，容易造成积雪面积结果偏大。曹梅盛（1995）指出计算积雪覆盖率时，必须包含 75 个以上 2°（纬度）×1°（经度）的网格，才能合乎世界气候研究组织（World Climate Research Programme, WCRP）关于监测精度的要求。由此，它更适合半球和大陆尺度积雪研究，不适合单独用于小区域积雪监测，在使用中应该与台站资料进行对比（李培基，1999，2001）。徐国昌等（1994）、郭艳君等（2004）用青藏高原台站积雪日数验证了卫星雪盖资料，认为二者在秋、冬、春季相关性较强，但全年平均相关不显著，因此，高原地区的卫星雪盖资料在一定程度上是可信的，尤其是在反映高原积雪年际变化上（柯长青和李培基，1998）。

第三，鉴于可见光测雪的局限性，微波遥感受到越来越多的关注，文中涉及的微波遥感资料为卫星遥感雪深和卫星遥感雪水当量（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，周期一般在 3~5 d，能够测量雪深，其中专业微波辐射成

像仪 (Special Sensor Microwave/Imager, SSM/I) 和多波段扫描微波辐射仪 (Scanning Microwave Multiband Radiometer, SMMR) 获取积雪空间分布信息的遥感数据。但微波遥感的积雪深度和积雪日数在积雪较薄、积雪含水量偏大或冻土区, 如我国青藏高原地区, 存在偏大的缺陷 (Chang et al., 1987)。由此, 曹梅盛等 (1993) 对中国西部的遥感雪深资料按照不同的地形区分别进行了评估; Qin et al. (2006) 利用台站雪深对 1978~1987 年不同地形中的 SMMR 雪深资料重新进行了校正; 车涛和李新 (2004)、Che et al. (2008) 对遥感雪深资料进行了反演和修正, 并且分析了其变化特征, 结果表明 1987~2006 年遥感雪深年际变化非常显著, 但趋势变化不是很明显, 其中东北地区雪深有弱的增长趋势, 西北和青藏高原雪深有弱的下降趋势。Wu and Kirtman (2007) 分析了雪水当量、雪盖和前苏联站点雪深, 结果表明, 冬季雪水当量在东北地区最大, 青藏高原和新疆地区次之。另外, 雪深在冬、春季节的持续性要好于雪盖; 马丽娟和秦大河 (2012) 利用台站雪深和雪密度资料计算了雪水当量, 发现中国冬季雪水当量空间分布型与雪深类似, 并且除东北部分地区外, 全国大部分地区的雪水当量在近几十年有波动增加的趋势。

其他常用的卫星遥感积雪资料还有 MODIS (Moderate Resolution Image Spectroradiometer) 积雪产品, 它是 Terra 和 Aqua 卫星所携带的 MODIS 传感器提供的逐日 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ 的高分辨率影像, 全球范围误差大约为 8%, 青藏高原约为 10%, 其误差来源主要是积雪较薄或持续时间太短造成积雪漏测, 或因云干扰造成不能确定地面是否有积雪覆盖 (Hall and Riggs, 2007); 交互式多传感器冰雪制图系统 (Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System, IMS) 是 NESDIS 的卫星遥感逐日积雪覆盖产品, 空间分辨率为 24 km (1024×1024 格点), 目前在中国已经实现业务化运行 (Armstrong and Brodzik, 2002), 这两种资料空间分辨率都非常高, 也是研究短时间段积雪特性的重要数据, 但因其时段太短, 本文其他资料时间尺度都为年代际尺度, 因此未对其进行综合对比。

目前, 大量的工作研究了欧亚中高纬度地区积雪的时空变化特征及其与东亚大气环流的影响 (陈海山和孙照渤, 2003; 陈海山等, 2003; 张人禾等, 2008; Zuo et al., 2011a, 2011b; 左志燕和

张人禾, 2012), 对中国地区多种积雪资料的研究比较少。另外, 尽管对积雪资料的研究目前已经取得了一定的成果, 但由于资料类型、计算方法、研究时段以及资料局限性的不同, 所得结果差异性很大, 且这些结果往往只比较了两类资料中的某一项参数, 并没有对积雪的多种参数进行综合对比, 不能有效地分析积雪多种参数之间的关系。另外, 不同的积雪参数的气候效应往往也存在一定的差异。为了更深入了解积雪多种参数的时空变化特征及其共性和差异性, 进行资料的对比分析是不可避免的。鉴于此, 本文利用积雪的观测和卫星遥感资料, 综合比较了雪深、雪日、积雪覆盖率和雪水当量这 4 类积雪参数的 5 种资料, 分析了它们在冬季中国和各个分区的分布、变化特性以及相互之间的关系。

2 资料方法

文中所用的积雪资料包括: 1) 中国地面气候资料月值积雪数据集 (1951~2013 年): 取自国家气象信息中心的 756 个全国台站资料, 积雪变量为月最大积雪深度和月积雪日数。本文选取缺测值较少的 1979~2006 年 629 站 (图 1)。2) 1978~2010 年中国雪深长时间序列数据集: 逐日的中国范围的积雪厚度分布数据, 取自中国西部环境与生态科学数据中心, 反演自美国冰雪中心 (NSIDC) 处理的 SMMR (1978~1987 年), SSM/I (1987~2008 年) 和 AMSR-E (2002~2010 年) 逐日被动微波亮温数据, 空间分辨率为 0.25° (纬度) $\times 0.25^\circ$ (经度) (Che et al., 2008)。文中简称为遥感雪深, 选取 1979~2006 年数据, 常规观测的站点雪深资料为月最大雪深, 而遥感雪深为逐日资料, 因此为了方便比较, 把遥感日雪深资料处理成月最大雪深资料。3) NOAA/NESDIS 和 CPC 卫星观测北半球逐周雪盖资料 (1973~2010 年): 来源于 CPC 网站 (ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/wd52dg/snow/wkly_89x89/ [2013-06-01]), 原始资料网格点数为北半球 89×89 , 网格面积从高纬度的 29643 km^2 到低纬度的 42394 km^2 不等, 该资料精度随时间有所改进和订正 (Robinson et al., 1991)。网格点上数值为 1 表示有雪覆盖, 为 0 则代表无雪的状况, 在使用中将该资料插值为 2° (纬度) $\times 2^\circ$ (经度) 网格点上, 并转化为逐月积雪覆盖率资料。转化方法为先将某一周的每一天都

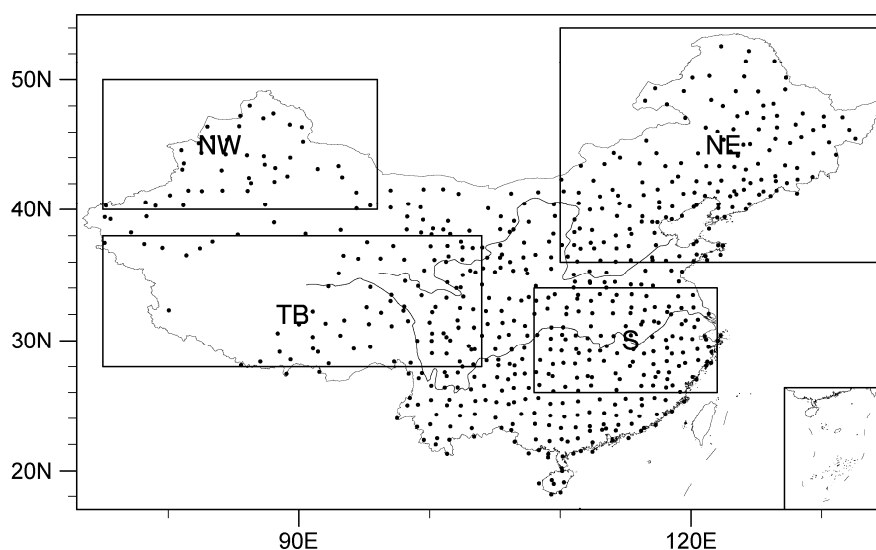


图1 629个观测站点的空间分布（积雪分区：NW为西北地区，NE为东北—内蒙古地区，TB为青藏高原地区，S为南方地区）

Fig. 1 Distribution of 629 observation stations in China (snow zones: NW denotes Northwest China, NE denotes Northeast China and Inner Mongolia, TB denotes Tibet Plateau, and S denotes South China)

赋值为该周的数值，然后用本月有积雪的日数除以本月的日数，即为这个格点的积雪覆盖率。由于在1972年以前影像图质量较差，因此选取1979~2006年数据进行分析。4) 全球等面积格点月平均积雪水当量资料（1978~2007年）：取自美国雪冰中心等面积格点数据，水平分辨率为25 km，其中1978~1987年资料来自SMMR，1987~2007年数据来自SSM/I (Armstrong et al., 2007)。

另外，文中所用方法包括选择经验正交分解 (Empirical Orthogonal Function, EOF)、水平插值、相关系数、合成分析和一元线性回归等，其中EOF采用吴洪宝和吴蕾(2005)的方法。文中冬季指的是12月、次年1月、2月的平均值。文中用 t 检验进行信度检验。

3 结果分析

文中首先将站点雪深资料与遥感雪深资料做了对比，然后将CPC积雪覆盖率、常规观测站点雪日资料和NSIDC雪水当量与站点雪深资料进行了对比，分析了中国冬季积雪的分布和时空变化特征，以及各种资料的可信度和它们之间的差异性。

3.1 常规观测站点雪深和遥感雪深资料的对比

图2给出了冬季站点和遥感雪深的气候平均值、标准差及变化趋势。从气候平均值看，站点资料积雪主要分布于新疆、东北两个稳定积雪区，雪

深在青藏高原西部缺测，高原东部和中国东部地区有小于5 cm的低值分布；而遥感资料积雪主要分布于新疆、东北和青藏高原这三大稳定积雪区，其中新疆和东北地区的最大雪深要大于青藏高原地区，雪深在青藏高原地区有西部低值、东部高值分布，中国东部地区无积雪分布，可见遥感资料能够监测到青藏高原地区积雪变化。从标准差看，分布型与气候平均值相似，站点雪深在新疆地区变率最大，东北地区次之，青藏高原和中国东部地区较小，而遥感雪深则是青藏高原变率最大，新疆和东北地区次之。站点资料气候平均值和标准差极值均大于遥感资料，二者气候平均值最大雪深分别为35 cm和32 cm，标准差则分别为15 cm和12 cm左右。从最大雪深变化趋势来看，站点雪深在新疆和东北地区有显著增大的趋势，长江和黄河流域地区有显著减小的趋势，青藏高原地区趋势不明显；遥感雪深在新疆、东北平原和青藏高原北部有显著增长趋势，东北大小兴安岭和青藏高原东部有显著减少的趋势，其它地区趋势并不明显。这些结果与Qin et al (2006)、李小兰等(2012)、马丽娟和秦大河(2012)的高中心位置较为一致，由此可见，遥感资料可以很好地监测到高原地区和山地积雪，对研究高原积雪的气候效应提供了资料依据，但由于监测值有偏大的误差，且南方地区监测不到积雪，因此在研究区域气候效应时，应当与站点资料结合使用。

由图3可见，两种资料在新疆、东北东部、青

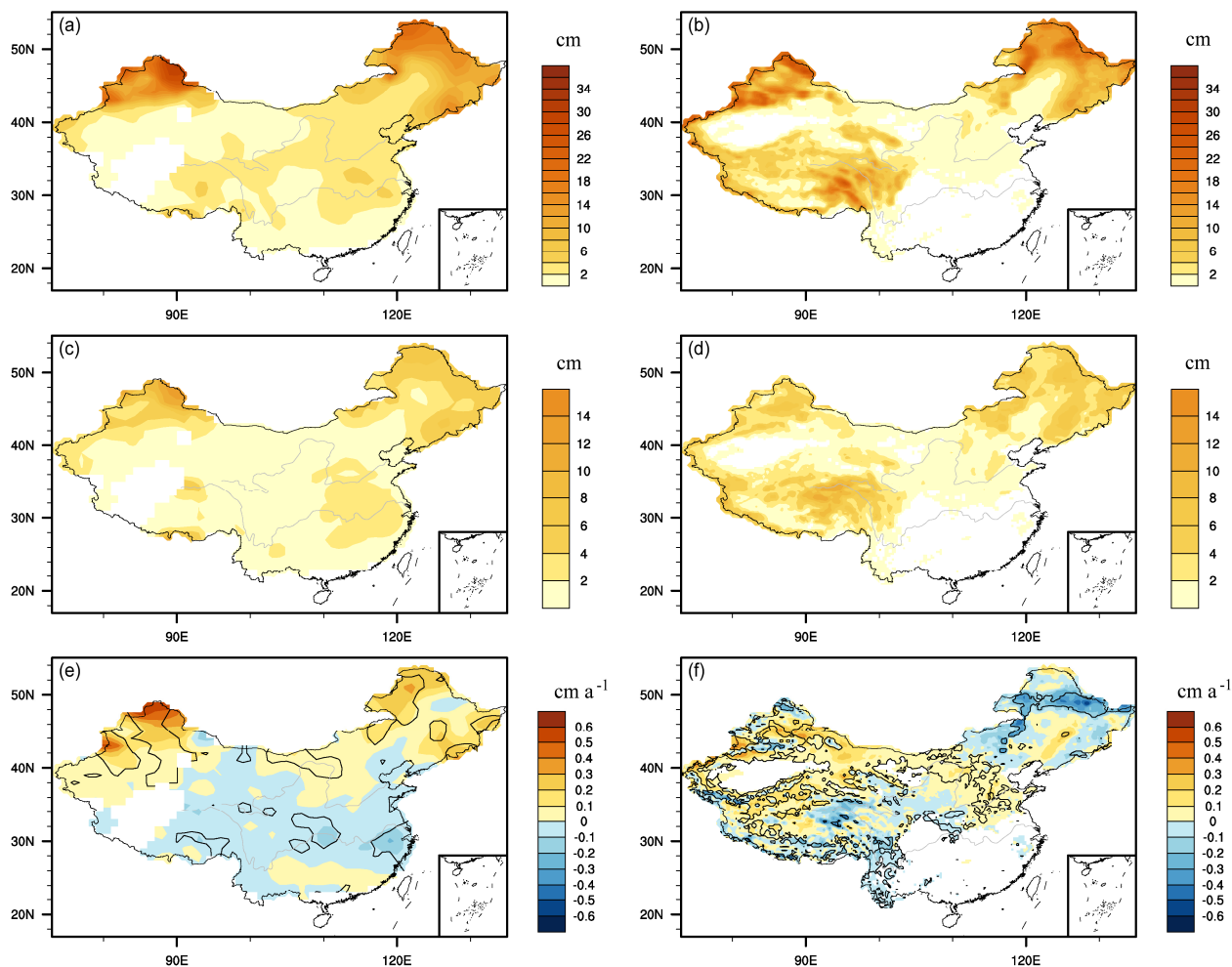


图2 站点(左列)和遥感(右列)雪深在1979~2006年冬季的(a、b)气候平均值、(c、d)标准差和(e、f)线性趋势(实线为通过90%信度)
Fig. 2 Distributions of the (a, b) climatology means, (c, d) variances, and (e, f) linear trends of snow depths from observations (left panel) and satellite remote sensing (right panel) in winter for 1979–2006 (contours exceeding the 90% confidence level)

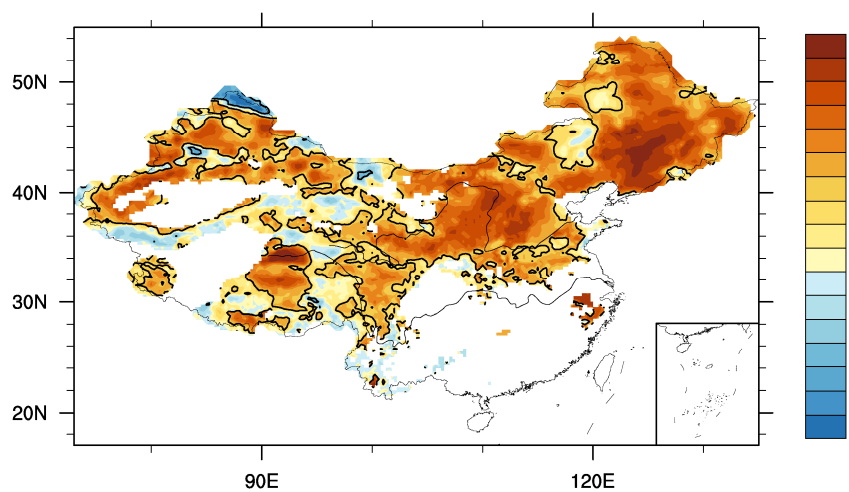


图3 站点和遥感得到的1979~2006年的冬季雪深的相关系数(实线为通过90%信度)
Fig. 3 Correlation coefficients of snow depths between observations and satellite remote sensing in winter for 1979–2006 (contours denote the correlation coefficients exceeding the 90% confidence level)

藏高原东部至黄河流域地区相关系数很高, 说明遥感资料在这些地区能较好地再现观测资料的变化。两种资料在 3 个积雪稳定区相关性很强, 这是由于冬季积雪在这些区域较多且较为稳定; 值得注意的是黄河流域相关系数较高, 该区属于积雪不稳定区, 气候平均的站点雪深为 4 cm 左右, 遥感雪深为 2 cm 左右, 虽然与稳定区雪深相比数值较小, 但它比周围区域雪深要大一些和稳定一些, 因此遥感雪深在黄河流域也能够较好地再现观测雪深的变化。而由于站点资料监测不到西部高原的积雪, 遥感资料探测不到中国东部黄河以南大部分地区积雪, 因此在塔里木盆地附近、青藏高原西部、内蒙古中部以及黄河以南地区, 站点和遥感雪深的相关关系为 0。

由于中国不同地区的积雪分布和变化差异性很大, 受大气环流影响以及对后期气候影响也不同, 为了更细致地研究中国积雪的变化特征, 有必要对积雪进行分区研究。从上文看出, 中国积雪年际和年代际变化最大的区域为西北、东北—内蒙古、青藏高原和南方地区, 因此对这几个区域(如图 1 所示)进行划分: 全国(CN)、西北地区(NW, $40^{\circ}\text{N}\sim 50^{\circ}\text{N}$, $75^{\circ}\text{E}\sim 96^{\circ}\text{E}$)、东北—内蒙古地区(NE, $36^{\circ}\text{N}\sim 54^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E}\sim 135^{\circ}\text{E}$)、青藏高原(TB, $28^{\circ}\text{N}\sim 38^{\circ}\text{N}$, $75^{\circ}\text{E}\sim 104^{\circ}\text{E}$)和南方地区(S, $26^{\circ}\text{N}\sim 34^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E}\sim 122^{\circ}\text{E}$)。对冬季雪深进行区域平均, 得到各区的积雪深度。由图 4a 可以看出站点资料中 2000 年为指数最高年, 比较 5 个区域的气候平均指数可以发现西北指数最高为 10.9 cm, 其次分别是东北指数 9.4 cm、全国指数 3.7 cm 和南方指数 2.7 cm, 高原指数最低 2.2 cm。与最高的分区指数相比, 西北和东北指数差异在 10% 左右, 而这两个指数与其他分区指数的差异显著都在 50% 以上, 可见站点雪深在南、北方有明显不同的分布特征, 即北方较深、南方较浅。从雪深的时间演变还可以发现与上文研究结果一样, 西北和东北指数有上升趋势, 南方指数有下降趋势, 而青藏高原指数趋势不明显。由图 4b 可以看出, 遥感资料在 1983 年为指数最高年, 比较 5 种指数的气候平均值可以发现东北指数最高为 13 cm, 其次是西北指数为 12.7 cm、全国指数为 11 cm、青藏高原为 7.2 cm, 南方地区指数最低为 1.9 cm, 西北、东北和全国指数差异在 10% 左右, 而这 3 个指数与其他分区指数的差异显著都在 29% 以上, 可见遥感积雪在各分区的差异要

比站点资料小一些。从遥感雪深的时间演变发现西北、东北和青藏高原指数有下降趋势 [与 Che et al. (2008) 一致], 南方指数趋势变化不明显。因此, 在大部分年份, 各分区的遥感雪深要大于站点雪深, 但趋势变化则要稍小于站点雪深。由于积雪资料时间段和分区范围的不同, 与李小兰等 (2012) 的结果相比, 本文计算的各分区站点积雪指数要稍微小一些。

为了比较两种雪深资料在 4 个分区的差异, 先对两种资料求气候平均值, 然后将遥感雪深资料插值到站点雪深资料各区的站点上, 作各区站点分布的散点图(如图 5), 并作斜率为 1 的参考直线以比较两种资料的差异, 如果散点分布在直线上代表遥感数据较大, 分布在直线下方则代表站点数据较大。先对 4 个分区两种雪深作相关分析, 可以发现两种资料在西北和东北地区相关较好, 相关系数分别为 0.80 和 0.82, 青藏高原地区为 0.39, 而南方地区最小, 相关系数为 0.21。在西北地区, 大部分站点的遥感雪深要大于站点雪深; 在东北地区二者则相当, 所以相关系数在 4 个分区中也最高; 在青藏高原地区, 几乎所有站点的遥感雪深都大于站点雪深, 这也证明了遥感雪深资料在该区有偏大的误差; 在南方地区, 站点雪深值要大于遥感雪深, 二者无显著相关关系, 反应了卫星遥感在浅薄积雪区较差的监测能力。

图 6a 和 6b 分别给出了冬季站点雪深距平的 EOF 第一模态(EOF1)及其相应的时间系数, 方差贡献为 24%。由图 6a 可以看出, EOF1 的雪深空间型分布, 新疆和淮河以北的东部地区为同位相变化, 新疆和东北地区雪深异常偏大(最高可达 10 cm); 青藏高原地区雪深异常不明显; 在中国东部大约以淮河为界为南、北反位相变化, 南方地区雪深最小距平为 -4 cm。从相应时间序列可以看出, 中国东部雪深的南、北反位相特征具有明显的趋势变化, 并在 1990 年代初期左右发生转变, 这意味着新疆和东北地区雪深在 1990 年代之前较浅, 在 1990 年代之后逐渐变深, 有明显的增长趋势, 青藏高原地区趋势变化不明显, 南方地区雪深在 1990 年代之前较深, 在 1990 年代之后逐渐变浅, 有明显的减少趋势。与其他结果比较可以发现, 这与上文研究的积雪趋势变化是一致的, 与 Qin et al. (2006) 与马丽娟和秦大河 (2012) 的结论也是一致的。

图 6c 和 6d 给出了冬季遥感雪深距平的 EOF1

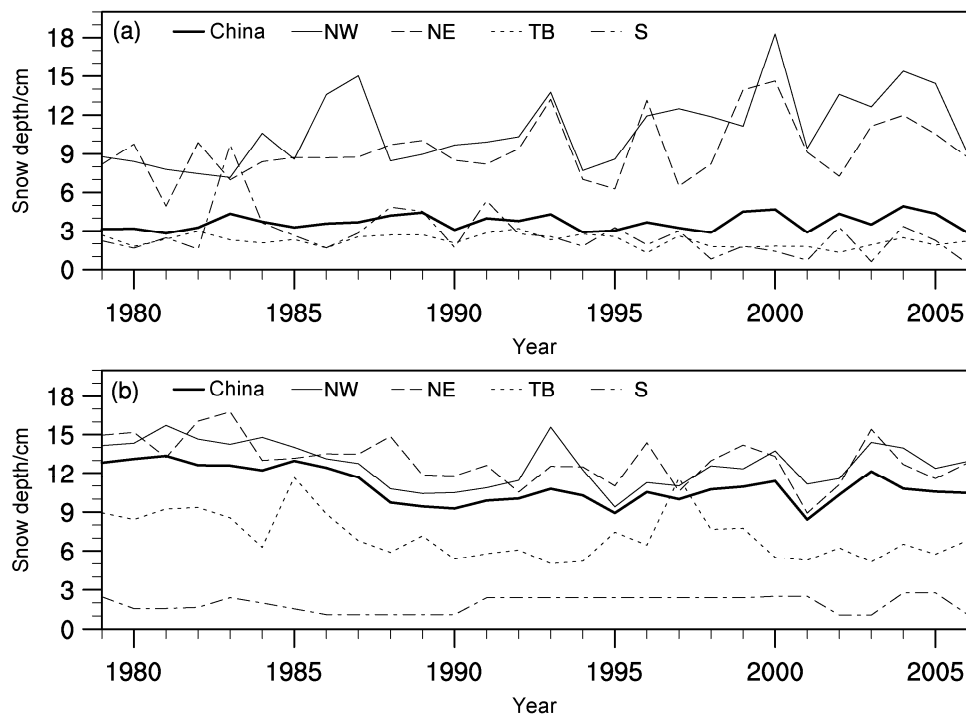


图4 (a) 站点资料和 (b) 遥感资料得到的 5 个积雪区域冬季平均的积雪深度序列

Fig. 4 Indices of snow depths averaged in five snow areas in winter from (a) observations and (b) satellite remote sensing data

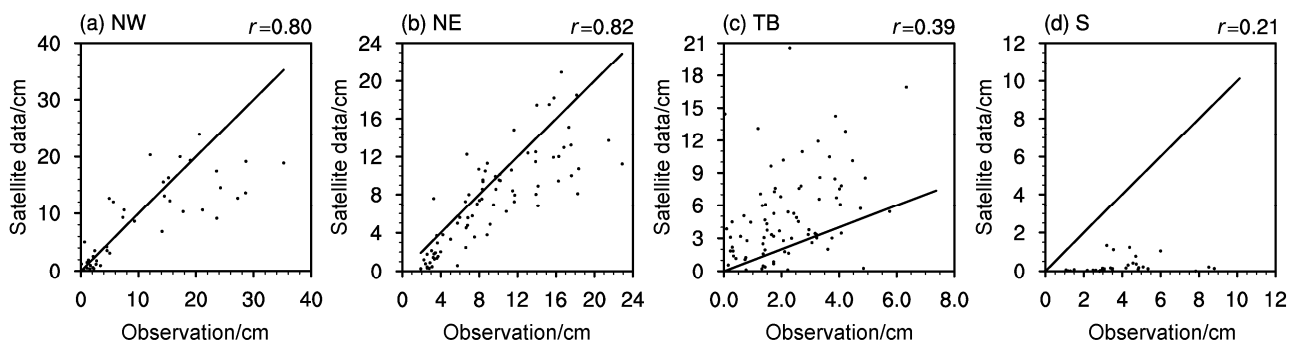


图5 站点和遥感冬季气候平均雪深在 4 个积雪分区的散点图 (参考直线斜率为 1)

Fig. 5 Scatter diagrams of climatology snow depths from observations and satellite remote sensing data in four snow areas in winter (slopes of the reference lines are 1)

及其相应的时间系数, 方差贡献为 11.6%。从 EOF1 空间场上可以看出, 它反映了中国北方地区和青藏高原雪深的南、北反位相变化, 新疆和东北东部地区雪深偏大, 青藏高原和东北大兴安岭地区雪深异常偏小 (与站点资料不同), 南方地区则变化不明显。从相应的时间序列可以看出, 遥感雪深时间系数有明显的年代际变化特征, 年代际变化发生在 1990 年代初期, 即存在新疆和东北东部地区雪深由浅向深、青藏高原和东北大小兴安岭地区雪深由深向浅的趋势变化, 与观测资料较为相近。但值得注意的是, 1997~1999 年遥感雪深的时间系数又变得

异常偏小。站点和遥感雪深 EOF1 时间序列都有明显的趋势变化, 虽然存在一定差异, 但如果用 Mann-Kendall 检验可以发现两种资料的突变年都在 1991 年左右, 因此认为 1979~1990 年为雪深偏少年, 1991~2006 年为雪深偏多年, 对雪深异常偏多和偏少年进行合成分析。如图 7 所示, 在 EOF1 时间序列为正的时段, 即 1991~2006 年, 站点雪深在新疆地区和东北地区为正异常, 青藏高原东部和南方地区为负异常, 遥感雪深在新疆地区和东北东部地区为正异常, 东北北部和青藏高原地区为负异常; 在 EOF1 时间序列为负的年份, 即 1979~1990

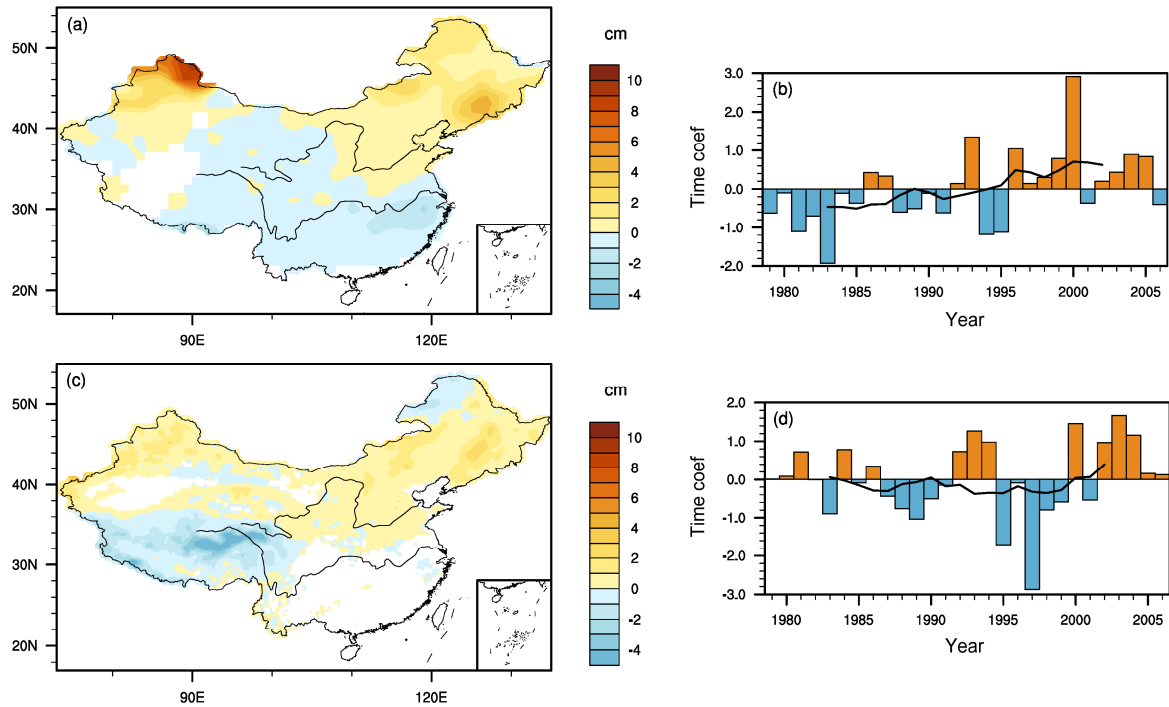


图6 (a、b) 站点资料和 (c、d) 遥感资料得到的 1979~2006 年冬季 (12 月至次年 2 月) 雪深距平的 EOF 第一模态空间分布 (左列) 及相应的标准化时间序列 (右列, 黑实线为经过 9 年平滑后的值)

Fig. 6 Spatial distributions of anomalous snow depths of the first EOF and their corresponding normalized time series from (a, b) observations and (c, d) satellite remote sensing data in winter for 1979~2006 (bars are original values and contours are 9-year smoothed values)

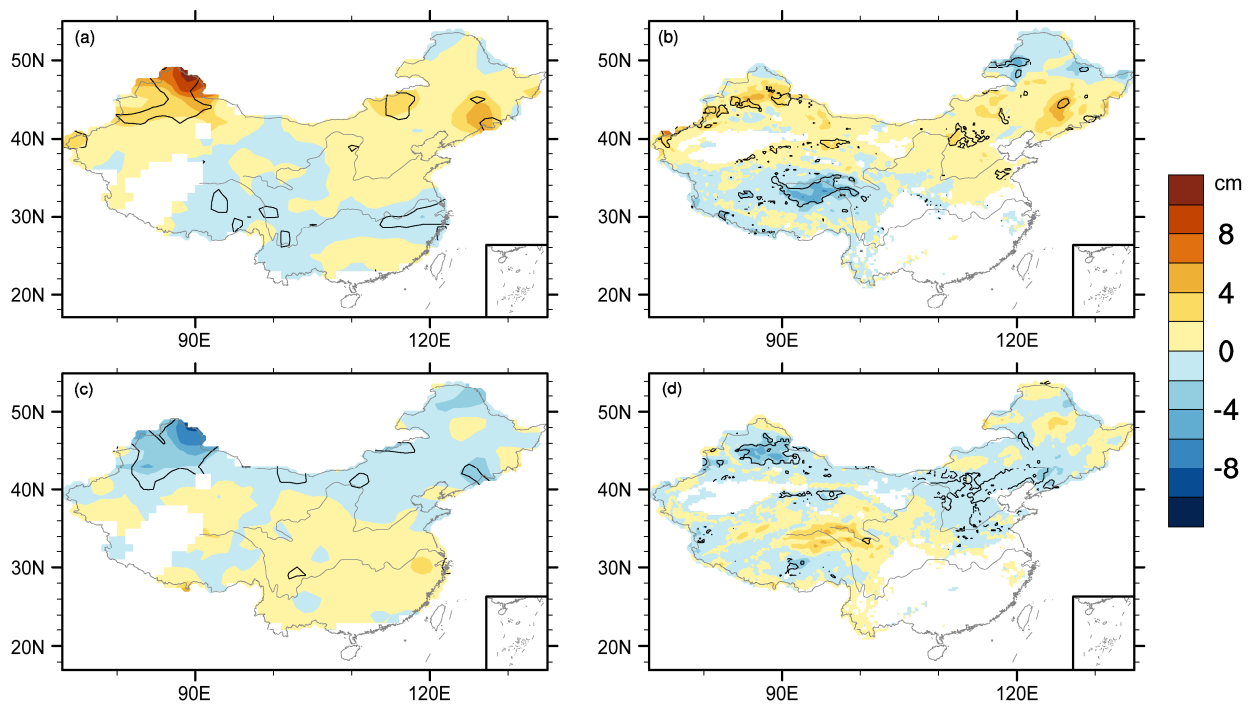


图7 站点 (左列) 和遥感资料 (右列) 得到的冬季 (a、b) 1991~2006 年以及 (c、d) 1979~1990 年的平均雪深异常 (实线为通过 90% 信度)

Fig. 7 Anomalous snow depths from observations (left panel) and satellite remote sensing data (right panel) in winter for (a, b) 1991~2006 and (c, d) 1979~1990 (contours exceeding the 90% confidence level)

年雪深异常分布则反之。这种分布型与图 6 的 EOF1 空间场一致, 这反映了新疆和东北东部地区最大雪深在 80 年代末、90 年代初由偏小向偏大演变, 青藏高原和南方地区则反之。

3.2 CPC 积雪覆盖率、NSIDC 雪水当量、站点雪日资料的对比

除了雪深可以表征积雪气候环境和水资源以外, 还有如积雪覆盖率、雪水当量和积雪日数等重要积雪参数也能反映积雪变化特征和气候效应。积雪覆盖率可以反映积雪辐射特性, 雪水当量可以反映积雪面积和厚度的综合变化, 积雪日数可以反映积雪的持续性特征, 来体现积雪的气候和水文效应。

图 8 给出了冬季 CPC 积雪覆盖率、站点雪日和 NSIDC 雪水当量 3 种资料的气候平均值、标准差及趋势变化。可见这 3 种资料在 1979~2006 年冬季的气候平均值和标准差空间分布型较为一致, CPC 积雪覆盖率和 NSIDC 雪水当量的高值中心在新疆、东北和青藏高原地区, 南方地区无积雪分布; 站点雪日的高值中心在新疆、东北和青藏高原东部地区, 在南方地区有较低值分布, 而另外两种资料没有南方的低值, 发现站点雪日的气候平均值与王澄

海等 (2009) 的高中心位置较为一致。从趋势分析可以看出, 新疆和东北—内蒙古地区的积雪在 CPC 积雪覆盖率和站点雪日有增多的趋势, 而东北北部地区的雪水当量相反有减少的趋势, 马丽娟和秦大河 (2012) 在东北部分地区得到类似结果; 青藏高原东部趋势变化在 3 种资料中不一致; 长江流域的积雪在站点雪日中有减少趋势。

对这 3 种积雪资料与站点雪深做相关分析, 从图 9 可看出, 站点雪日与站点雪深相关最为显著, 除新疆北部、东北北部和青藏高原部分地区外, 其他区域的相关系数大部分在 0.9 以上。两种资料在北方稳定积雪区的高相关性容易理解, 但长江以南积雪较少区域的高相关性值得注意, 这些区域在大部分年都没有积雪分布, 只在较少的几年雪深和雪日同时存在, 正是这几年雪深和雪日的同位相变化造成了该区相关系数较高, 因此这是一种虚假相关, 由样本数量过少所造成。CPC 积雪覆盖率和 NSIDC 雪水当量与站点雪深的相关显著区在新疆南部、东北—内蒙古和青藏高原地区, 但在长江中下游及其以南地区相关不显著。从上文得知, NSIDC 雪水当量在东北北部地区有显著的减少趋势, 而站点雪深在东北西部地区有显著增多趋势,

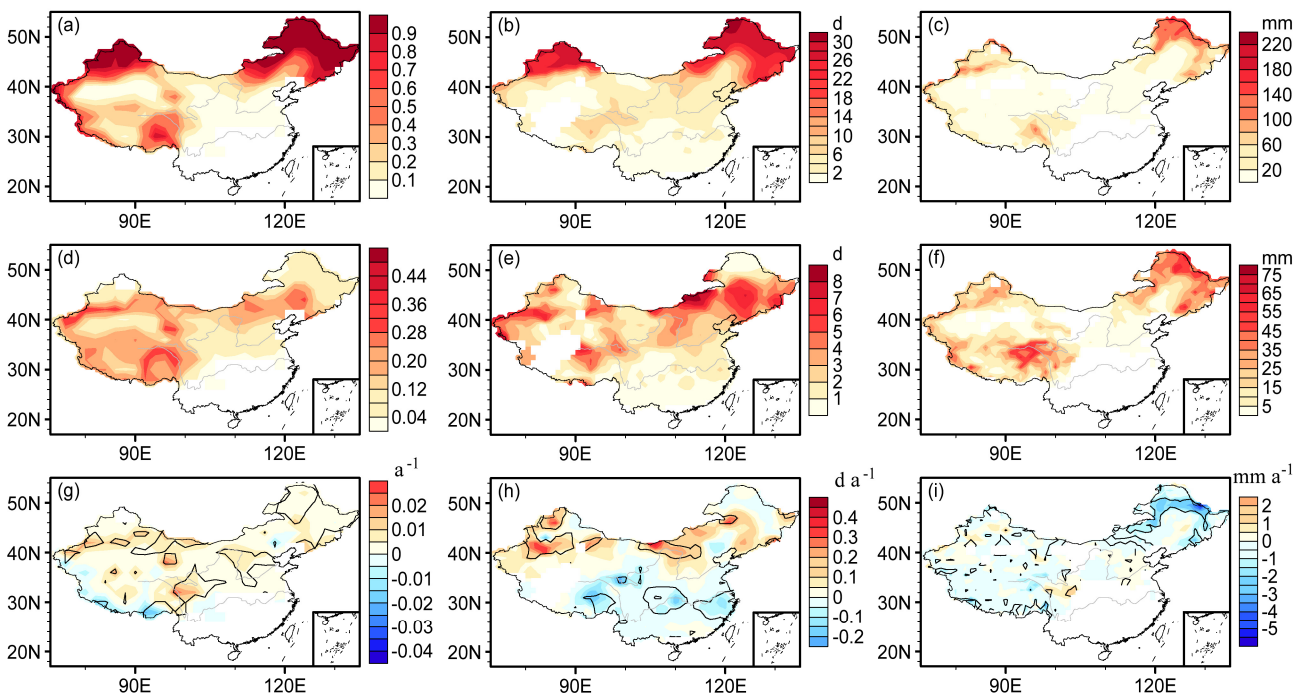


图 8 1979~2006 年冬季 CPC 积雪覆盖率 (左列)、站点雪日 (中列) 和 NSIDC 雪水当量 (右列) 的 (a-c) 气候平均值、(d-f) 标准差和 (g-i) 线性趋势 (实线为通过 90% 信度)

Fig. 8 Distributions of the (a-c) climatology means, (d-f) variances, and (g-i) linear trends of CPC snow cover fractions (left panel), observation snow days (middle panel), and NSIDC snow water equivalent (SWE, right panel) in winter for 1979-2006 (contours exceeding the 90% confidence level)

既然两种积雪参数变化趋势相反，为何二者在中国大部分地区为正相关呢？仔细分析可以发现，两种资料变化趋势相反的区域并不是重合的，相反，二者在高原东部、华北、东北东部地区为同位相变化，分别为减少、弱增多、增多的变化趋势，所以在这 3 个区域两种积雪参数为显著正相关。由此可见，站点雪日资料与站点雪深资料时空变化是大概相似的；CPC 积雪覆盖率资料除长江中下游及其以南地区外，与站点雪深资料时空变化大体一致；NSIDC 雪水当量资料与站点雪深资料空间分布较

为一致，但是趋势变化在北方某些地区显著不同，甚至相反。

依照站点雪深全国分区的方法对 CPC 积雪覆盖率、站点雪日和 NSIDC 雪水当量分别进行分区，图 10 为 3 类积雪指数随时间的变化，可以看出 CPC 积雪覆盖率指数中 2002 年为指数最高年，5 个分区的气候平均指数中西北分区和东北分区最高分别为 0.74 和 0.73，其次分别是全国指数为 0.46 和青藏高原指数为 0.29，南方指数最低不足 0.1，可见西北和东北差异不明显只有 1%，而这两个分区与

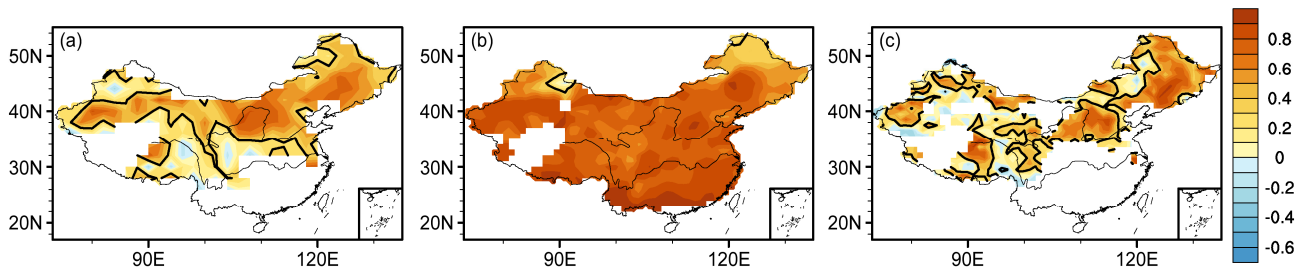


图 9 (a) CPC 积雪覆盖率、(b) 站点雪日、(c) NSIDC 雪水当量和站点雪深在冬季的相关系数空间分布（实线为通过 90%信度）

Fig. 9 Correlation coefficients between (a) CPC snow cover fractions, (b) observation snow days, (c) NSIDC SWE and observed snow depths in winter (contours exceeding the 90% confidence level)

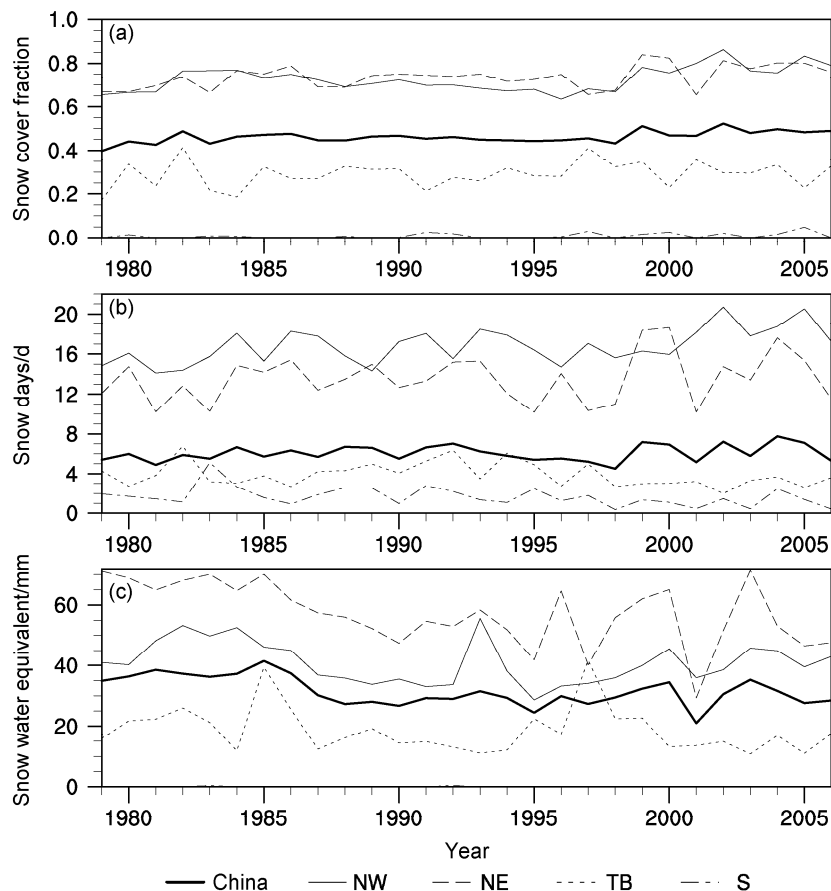


图 10 5 个积雪分区冬季平均的 (a) CPC 积雪覆盖率、(b) 站点雪日和 (c) NSIDC 雪水当量

Fig. 10 (a) CPC snow cover fractions, (b) observation snow days, and (c) NSIDC SWE averaged in five snow areas in winter

其他分区的差异显著都在 28% 以上; 从变化趋势来看, 西北和东北指数有缓慢的上升趋势, 青藏高原和南方指数变化趋势不明显。站点雪日指数与 CPC 积雪覆盖率指数结果类似, 文中不再赘述, 值得注意的是站点雪日的南方指数在 0~5 d 左右变化, 并有缓慢减少的趋势。雪水当量指数则明显不同, 1985 年为指数偏高年, 5 个分区的气候平均指数中东北指数最高为 57 mm, 其次是西北指数 40.8 mm、全国指数 31.6 mm、青藏高原指数 18.6 mm, 南方指数为 0.04 mm, 可见各区指数差异显著都在 20% 以上, 且这 5 个分区指数都有减少的趋势。对积雪资料在 5 个分区的积雪指数作标准化, 定义大(小)于 0.5 个标准差的年份为高(低)指数年, 发现在全国积雪区的高指数年为 1984 年、2000 年、2004 年, 低指数年为 1994 年、1997 年、1998 年、2001 年、2006 年; 西北区高指数年为 1986 年、2003 年、2004 年, 低指数年为 1988 年、1989 年、1992 年、

1995 年; 东北—内蒙古区高指数年为 1996 年、1999 年、2000 年, 低指数年为 1994 年、1995 年、1997 年、1998 年、2001 年; 青藏高原区高指数年为 1982 年、1989 年、1997 年, 低指数年为 1984 年、1996 年、2000 年、2005 年; 南方区高指数年为 1992 年, 低指数年为 1981 年、1982 年、1985 年、1986 年、1994 年、1996 年、1998 年、2003 年。几个分区的高低指数年基本上无重合, 从这可以看出中国各个积雪区的变化特征是不尽相同的, 因此对全国积雪进行分区是很有必要的。

图 11 为这 3 类积雪参数资料与站点雪深资料在 4 个分区站点对比的散点图, 方法与上文一样, 不同的是坐标横轴为站点雪深, 纵轴分别为积雪覆盖率、站点雪日和雪水当量, 由于横纵坐标单位不同, 因此分别用站点雪深回归这 3 类积雪参数, 并作一元线性回归线。可以发现站点雪日与站点雪深在 4 个积雪分区的相关系数都很高, 达到 0.8 以上;

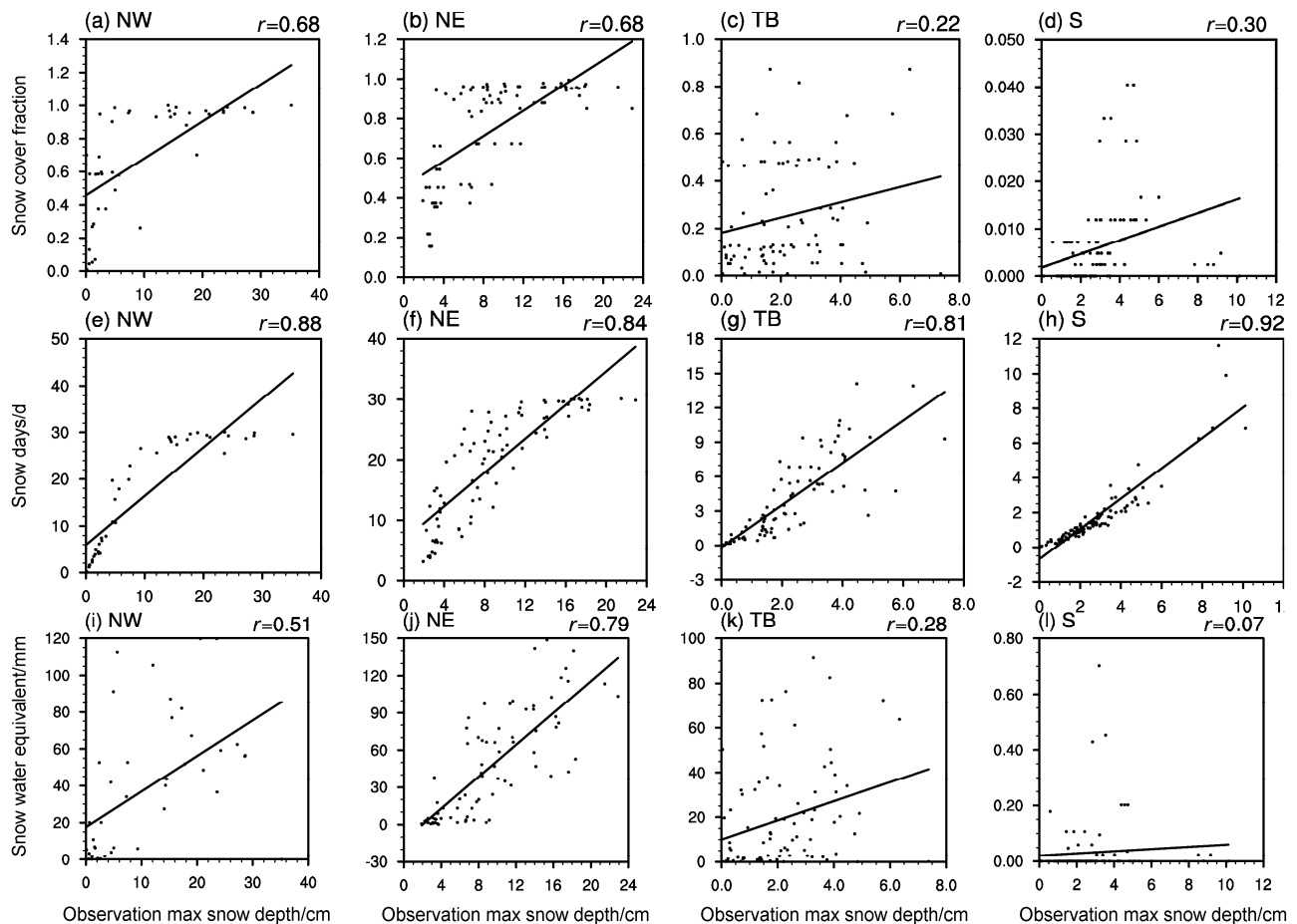


图 11 (a-d) CPC 积雪覆盖率、(e-h) 站点雪日、(i-l) NSIDC 雪水当量的冬季气候平均值与站点雪深的关系 (参考直线为各积雪参数对站点雪深的一元线性回归)

Fig. 11 Relationships between (a-d) CPC snow cover fractions, (e-h) observation snow days, and (i-l) NSIDC SWE and observation snow depths in winter (reference lines are regressions)

CPC 积雪覆盖率和雪水当量在东北和西北地区与站点雪深相关较为显著, 在 0.5~0.8 之间, 在青藏高原和南方地区则相关较差不足 0.3, 造成这个结果的主要原因依然与站点资料在青藏高原以及卫星资料在平原薄雪地区的监测能力有关。

图 12a 和 12b 分别给出了 CPC 积雪覆盖率距平的 EOF1 空间模态和与之相对应的时间系数, 方差贡献为 16.6%。从图中可以看出, 它反映了积雪覆盖率在青藏高原和黄河以北地区的反位相变化, 新疆和东北—内蒙古地区积雪覆盖率异常偏少, 变率中心位于新疆地区 (最大可达 24%), 青藏高原主体有积雪覆盖率异常偏多, 变率中心位于高原南侧 (最多可达 28%), 而南方地区异常不明显。从

EOF1 相应的时间序列可以看出, 中国积雪覆盖率的这种反位相型也具有明显的趋势变化, 气候转变发生在 1998 年左右 (这与站点雪深的 1991 年不同); 新疆和东北—内蒙古地区积雪覆盖率在 1998 年之前异常偏少, 之后异常偏多, 而青藏高原地区积雪覆盖率在 1998 年之前异常偏多, 之后异常偏少; 这意味着新疆和东北—内蒙古地区积雪覆盖率有明显的增长趋势, 而青藏高原地区积雪覆盖率有明显的减少趋势。这个结果与图 8 的趋势变化是一致的, 可见 CPC 积雪覆盖率资料除了南方地区以外, 与站点雪深资料变化大体一致。

图 12c 和 12d 分别给出了站点雪日距平的 EOF1 空间模态和与之相对应的时间系数, 方差贡

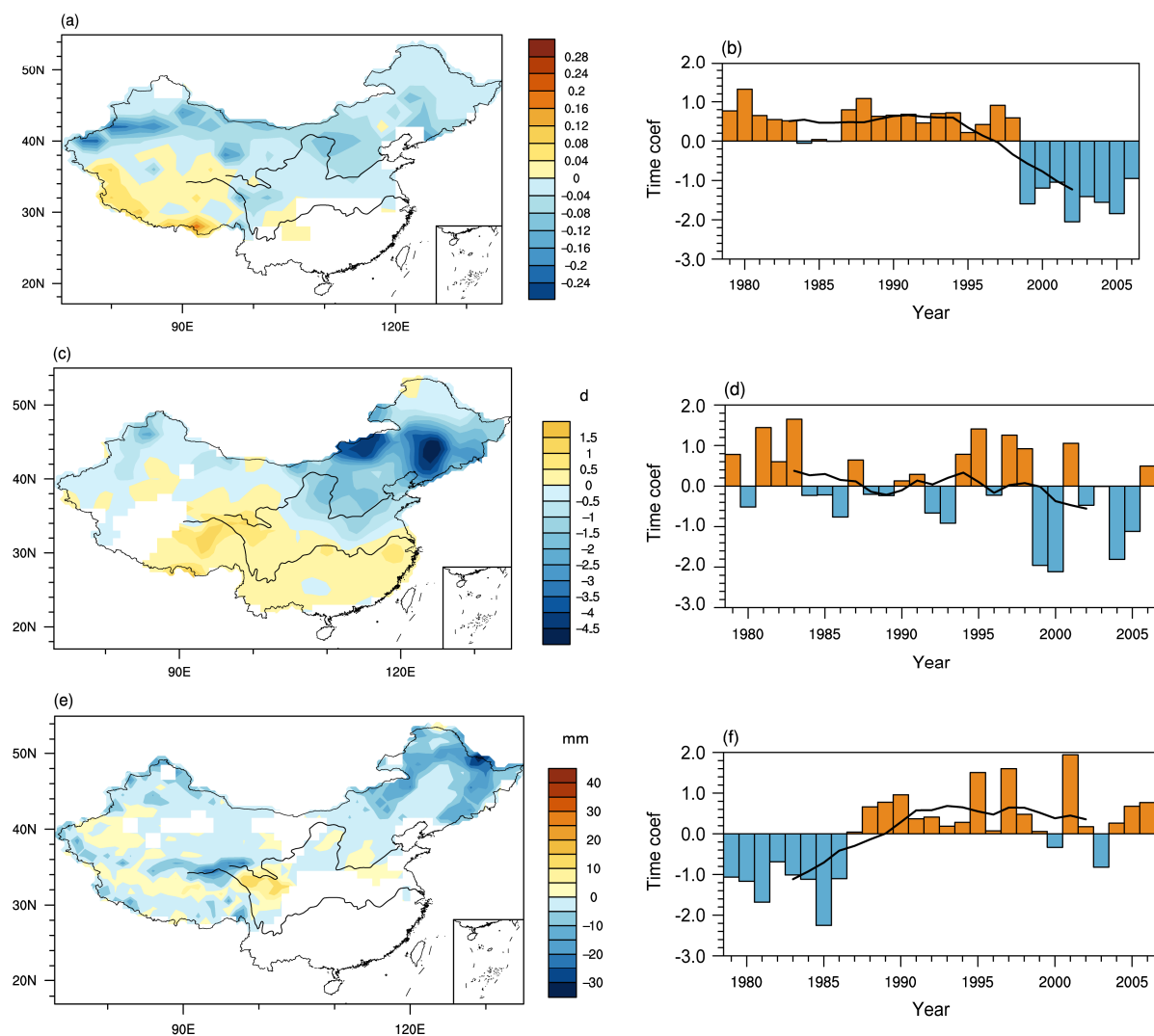


图 12 1979~2006 年冬季 (12 月至次年 2 月) (a、b) CPC 积雪覆盖率、(c、d) 站点雪日、(e、f) NSIDC 雪水当量距平的 EOF 第一模态空间分布 (左列) 及相应的标准化时间序列 (右列, 直方图为时间序列原值, 实线为 9 年平滑值)

Fig. 12 Spatial distributions of the first EOF (left panel) and their corresponding normalized time series (right panel, bars are original values and contours are 9-year smoothed values) of (a, b) CPC snow cover fractions, (c, d) observation snow days, (e, f) snow water equivalent in winter for 1979–2006

献为 20%。从图中可以看出,它反映了雪日同样的南、北反位相变化,但低中心的位置与其他 4 种积雪资料稍有差别,东北—内蒙古地区雪日异常偏少(最多可达 5 d),青藏高原东部和南方地区雪日异常偏多(最多可达 2 d)。从相应时间序列可以看出,中国雪日的南、北反位相型有明显的年际变化,并且这种年际变化是叠加在减少的趋势上的;这意味着东北—内蒙古地区雪日由少变多,有明显的增多趋势,青藏高原东部和南方地区雪日由多变少,有明显的减少趋势,可见这个结果与站点雪深的时空变化特征是大概相似的,差别在于站点雪深在青藏高原趋势变化更小一些。

图 12e 和 12f 给出了 NSIDC 雪水当量距平的 EOF1 空间模态和与之相对应的时间系数,方差贡献为 16.5%。从图中可以看出,它反映了北方地区雪水当量的同位相变化,新疆和东北—内蒙古和青藏高原北部地区雪水当量异常偏少(最多可达 30 mm),青藏高原东部部分地区雪水当量异常偏多(最多可达 7.5 mm)。从相应的时间序列可以看出,中国雪水当量的北方型特征有明显趋势变化,气候转变发生在 1987 年左右;新疆、东北—内蒙古、青藏高原北部的雪水当量在 1987 年之前异常偏多,之后异常偏少,而青藏高原东部的雪水当量则恰恰相反;这意味着新疆、东北—内蒙古、青藏高原北部的雪水当量有明显的减少趋势;青藏高原东部的雪水当量有明显的增多趋势,发现这个结果与其他资料在某些地区是截然相反的。注意到,雪水当量在东北地区的敏感变化区位于边缘的较高山脉上,而其他几种积雪参数在东北地区的敏感变化区位于东北平原,虽然总体上说雪水当量与其他积雪参数趋势变化是相反的,但它们显著变化区域并不相同;另外,虽然东北边缘山脉上积雪深度和覆盖率随着时间在增加,但由于该区积雪密度的显著减小(图略),造成了雪水当量的减少。可见,雪水当量资料与站点雪深资料的时空变化是显著不同的,在个别地区甚至相反。

4 结论和探讨

本文利用 1979~2006 年冬季中国站点最大雪深、卫星遥感雪深、CPC 卫星遥感积雪覆盖率、站点雪日和 NSIDC 卫星遥感雪水当量 5 种资料,从不同角度深入细致地分析了我国冬季积雪的时空

变化特征以及各类资料之间的差异。结论如下:

从气候平均值看,站点资料积雪主要分布于新疆、东北两个稳定积雪区,雪深在青藏高原西部缺测,高原东部有 4~8 cm 的高值,遥感资料积雪主要分布于新疆、东北和青藏高原这 3 大稳定积雪区,中国东部大部分地区无值。从标准差看,其分布型与气候平均值相似,站点资料积雪在新疆地区变率最大,东北地区次之,青藏高原和中国东部地区较小,而遥感资料积雪则是青藏高原变率最大,新疆和东北地区次之。5 种积雪资料的经验正交函数分解第一模态都表现为中国南、北方反位相的特征,即当新疆和东北—内蒙古地区积雪偏多(少)时,青藏高原和南方地区积雪偏少(多)。从趋势分析来看,新疆和东北—内蒙古地区的雪深、积雪覆盖和雪日随时间有逐渐增多的趋势,雪水当量在东北部分地区表现出减少的趋势。青藏高原地区的积雪表现出与其完全相反的特征。南方地区站点最大雪深和雪日表现出随时间减少的趋势,卫星遥感难以监测到该区积雪。通过比较我们发现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,站点资料更适用于中国中东部和平原地区积雪的研究。

上述各类资料结果的不同与资料的时段选取、探测方法、反演方法、技术问题和计算方法都有关系。比较不同积雪资料和参数有很重要的意义,一方面,这从不同的角度深入认识了中国积雪的变化特征;另一方面,融雪可以直接转化为土壤湿度和径流,为土壤湿度和水文学的研究提供了基础,为后期我国气候变异研究也提供了新的较好的预示因子。因此,结合使用多类积雪资料和参数会使计算结果更加科学严谨。鉴于以上各自资料对比分析,寻找更多、时段更长、误差更小、精度更高的积雪资料,以及经过大气订正的积雪资料是非常有必要的。另外,本文只对 4 类积雪参数的 5 种积雪资料进行了综合对比,而积雪的气候效应以及影响机制是今后需要进一步研究的问题。

参考文献 (References)

- Armstrong R L, Brodzik M J. 2002. Northern Hemisphere EASE-Grid Weekly Snow Cover and Sea Ice Extent Version2 [DB/OL]. Boulder, CO: National Snow and Ice Data Center.
- 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.
- 曹梅盛, 李培基, Robinson D A, 等. 1993. 中国西部积雪 SMMR 微波遥感的评价与初步应用 [J]. 环境遥感, 8 (3): 260–269. Cao Meisheng, Li Peiji, Robinson D A, et al. 1993. Evaluation and primary application of microwave remote sensing SMMR derived snow cover in western China [J]. Journal of Remote Sensing (in Chinese), 8 (3): 260–269.
- 曹梅盛. 1995. 青藏高原 NOAA/NESIDS 数字化积雪监测的评价 [J]. 冰川冻土, 17 (4): 299–302. Cao Meisheng. 1995. The evaluation of NOAA/NESDIS digitized snow cover monitoring in the Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 17 (4): 299–302.
- Chang A, Foster J L, Hall D K. 1987. Nimbus-7 SMMR-derived global snow cover parameters [J]. Annals of Glaciology, 9: 39–44.
- 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.
- Che T, Li X, Jin R, et al. 2008. Snow depth derived from passive microwave remote-sensing data in China [J]. Annals of Glaciology, 49 (1): 145–154.
- 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): 848–860.
- 陈烈庭, 阎志新. 1978. 青藏高原冬春季积雪对大气环流和我国南方汛期降水的影响 [C]// 水文气象预报讨论会文集 (第一集). 北京: 水利电力出版社, 185–194. Chen Lieting, Yan Zhixin. 1978. The effects of snow depth in winter-spring over Qinghai-Xizang Plateau on precipitation of Yangzte River [C]// Proceeding of Medium and Long Term Hydrological and Meteorological Forecast (in Chinese). Beijing: Water-Power Press, 185–194.
- 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.
- Hall D K, Riggs G A. 2007. Accuracy assessment of the MODIS snow products [J]. Hydrological Processes, 21 (12): 1534–1547.
- 柯长青, 李培基. 1998. 青藏高原积雪分布与变化特征 [J]. 地理学报, 53 (3): 209–215. Ke Changqing, Li Peiji. 1998. Spatial and temporal characteristics of snow cover over the Qinhai-Xizang Plateau [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 53 (3): 209–215.
- 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 covers in China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 5 (4): 9–18.
- 李培基. 1987. 中国季节积雪资源及其波动 [J]. 科学通报, 32 (17): 1329–1329. Li Peiji. 1987. Seasonal snow cover resource over China and its variation [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 32 (17): 1329–1329.
- 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. 1990. 近 30 年来我国雪量变化的初步探讨 [J]. 气象学报, 48 (4): 433–437. Li Peiji. 1990. A preliminary study of snow mass variations over past 30 years in China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 48 (4): 433–437.
- 李培基. 1999. 1951~1997 年中国西北地区积雪水资源的变化 [J]. 中国科学 (D 辑), 29 (增刊 1): 63–69. Li Peiji. 1999. The variation of snow cover resource over Northwest China during 1951–1997 [J]. Scientia Sinica Terrae (in Chinese), 29 (Suppl. 1): 63–69.
- 李培基. 2001. 新疆积雪对气候变暖的响应 [J]. 气象学报, 59 (4): 491–501. Li Peiji. 2001. Response of Xinjiang snow cover to climate change [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 59 (4): 491–501.
- 李小兰, 张飞民, 王澄海. 2012. 中国地区地面观测积雪深度和遥感雪深资料的对比分析 [J]. 冰川冻土, 34 (4): 755–764. Li Xiaolan, Zhang Feimin, Wang Chenghai. 2012. Comparison and analysis of snow depth over China, observed and derived from remote sensing [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 34 (4): 755–766.
- 刘俊峰, 陈仁升, 宋耀选. 2012. 中国积雪时空变化分析 [J]. 气候变化研究进展, 8(5): 364–371. Liu Junfeng, Chen Rensheng, Song Yaoyuan. 2012. Distribution and variation of snow cover in China [J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis (in Chinese), 8 (5): 364–371.
- 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.
- 秦大河, 丁一汇. 2002. 中国西部环境演变评估第二卷: 中国西部环境变化的预测 [M]. 北京: 科学出版社, 189pp. Qin Dahe, Ding Yihui. 2002. Assessment for Environment Evolvement in Western China, Second Volume: The Prediction of Environment Variation in Western China (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 189pp.
- Qin D H, Liu S Y, Li P J. 2006. Snow cover distribution: Variability and response to climate change in western China [J]. J. Climate, 19: 1820–1833.
- Robinson D A, Keimig F T, Dewey K F. 1991. Recent variations in Northern Hemisphere snow cover [C]// Proc. 15th Annual Climate Diagnostics Workshop, 219–224.
- 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, 罗四维, 董文杰, 等. 1998. 青藏高原积雪资料分析及其与我国夏季降水的关系 [J]. 应用气象学报, (9): 39–46. Wei Zhigang, Luo Siwei, Dong Wenjie, et al. 1998. Snow cover data on Qinghai-Xizang

- Plateau and its correlation with summer rainfall in China [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), (9): 39–46.
- 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.
- 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: 1285–1304.
- 吴统文, 钱正安. 2000. 青藏高原冬春积雪异常与中国东部地区夏季降水关系的进一步分析 [J]. 气象学报, 58 (5): 570–581. Wu Tongwen, Qian Zheng'an. 2000. Further analyses of the linkage between winter and spring snow depth anomaly over Qinghai-Xizang Plateau and summer rainfall of eastern China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 58 (5): 570–581.
- Wu T W, Qian Z G. 2003. The relation between the Tibetan winter snow and the Asian summer monsoon and rainfall: An observational investigation [J]. J. Climate, 16: 2038–2051.
- 徐国昌, 李珊, 洪波. 1994. 青藏高原雪盖异常对我国环流和降水的影响 [J]. 应用气象学报, 5 (1): 62–67. Xu Guochang, Li Shan, Hong Bo. 1994. The influence of the abnormal snow cover over the Qinghai-Tibet Plateau on precipitation [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 5 (1): 62–67.
- 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 cause [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66 (5): 697–706.
- Zuo Z Y, Yang S, Wang W Q, et al. 2011a. Relationship between anomalies of Eurasian snow and southern China rainfall in winter [J]. Environmental Research Letters, 6 (4), 045402, doi: 10.1088/1748-9326/6/4/045402.
- Zuo Z Y, Zhang R H, Wu B Y, et al. 2011b. Decadal variability in springtime snow over Eurasia: Relation with circulation and possible influence on springtime rainfall over China [J]. International Journal of Climatology, 32 (9): 1336–1345, doi: 10.1002/joc.2355.
- 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.