

# 北半球雪水当量季节和年际尺度时空主模态变化特征\*

陈月亮, 黄菲\*\*, 王宏, 房永生

(中国海洋大学物理海洋实验室 山东省高校海洋-大气相互作用与气候重点实验室, 山东 青岛 266100)

**摘要:** 利用美国冰雪中心提供的29年(1979—2007)月平均卫星遥感雪水当量(SWE)资料,研究了北半球雪水当量季节和年际变化的时空特征。在季节尺度上,欧亚大陆中西伯利亚高原及以东高纬度和北美大陆高纬度区域都有相比其它区域积雪早、融雪晚的特点;北半球平均的雪水当量在春、秋季节一般都有2个月的持续性,但晚冬到春季则存在春季障碍;季节变化的时空主模态以冬夏年周期振荡的半球一致型为主,方差贡献达93%。在年际尺度上,整个时间段各季节的SWE没有显著的线性减少趋势;SWE的时空分布主要存在两个主模态,分别占总方差贡献的13.1%和8.3%。第一模态主要反映了欧亚大陆中西部SWE的变化特征,第二模态则主要反映了北美中高纬度地区SWE的变化特征。

**关键词:** 北半球; 雪水当量; 时空变化; 经验正交系数(EOF)

中图分类号: P426.63

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2015)07-011-07

DOI: 10.16441/j.cnki.hdxh.20140119

冰雪圈是气候系统中的一个重要成员,能够影响局地甚至全球的气候。积雪作为冰雪圈的主要组成部分,其是下垫面的一个重要特征,一方面它反射能力强,热传导性差;另一方面在融化成水的过程中,通过感热、潜热等方式改变陆地表面的辐射平衡和大气热状况,进而引起大气环流变化<sup>[1]</sup>。

早期的研究已经分析了一些北半球积雪的时空变化特征,Ye等<sup>[2]</sup>利用前苏联冬季的雪深观测数据进行了系统的分析发现,欧亚大陆不同区域的积雪深度变化会有不同的趋势:除俄罗斯偏北地区,欧亚高纬度大部分地区积雪深度增加;而俄罗斯南部除西伯利亚西部区域积雪深度增加,其它大部分地区减少。综合不同区域的变化,整个俄罗斯积雪的增加要大于减少。Brown<sup>[3]</sup>分析了1915—1985年整个北美和欧亚大陆春季积雪的变化特征,发现在1980年代前北美地区的积雪覆盖面积大体呈增加的趋势,特别是在12~2月平均每十年有3.9%的显著增长,其结果同俄罗斯观测到的冬季积雪深度的增加相一致<sup>[2]</sup>。Mote<sup>[4]</sup>利用美国和加拿大西部地区站点的观测资料发现,北美西北部地区春季积雪呈减少趋势,进一步证实了该地区春季的升温,这同站点观测的降雨量和温度相一致。Gutzler和Rosen<sup>[5]</sup>将北半球大陆按经度划分几部分进行积雪研究,发现北美和欧亚大陆有着很高的相关性,这表明了北半球积雪存在着洲际间的联系。

但以上这些研究结果在时间上较早,未能揭示近

期北半球积雪的变化特征。而近几十年全球变暖加剧,高文良等<sup>[6]</sup>曾指出,积雪的分布同半球气温有很强的负相关关系。自1990年代中后期以来,全球变暖又出现了停滞现象<sup>[7]</sup>,北极海冰作为冰雪圈的另一组成部分出现了年代际变化的转型<sup>[8]</sup>,在这种情形下北半球积雪会不会发生新的变化?本文将以此为出发点,研究近二十多年来整个北半球尺度积雪的时空变化特征。

## 1 资料方法

本文主要采用美国冰雪中心提供的全球月平均卫星遥感雪水当量(Snow Water Equivalent, SWE)格点数据,格点数为,水平分辨率25 km,时间从1979—2007年。雪水当量分别由多波段扫描微波辐射仪和微波辐射成像仪反演得到,北半球的数据增加了积雪频率的校正,适合于整个大陆尺度的积雪研究。

雪水当量是指整层积雪完全融化后所得到的水形成的水层深度,本文中的雪水当量数据是由卫星反演得到,单位为mm。

本文所使用的统计分析方法主要有经验正交函数(EOF)分析、相关分析、回归分析、合成分析等方法。

## 2 北半球SWE的季节变化特征

### 2.1 SWE范围的季节演变

Robinson等<sup>[9]</sup>利用美国气象研究中心提供的每周

\* 基金项目: 全球变化研究国家重大科学研究计划项目(2010CB951403)资助

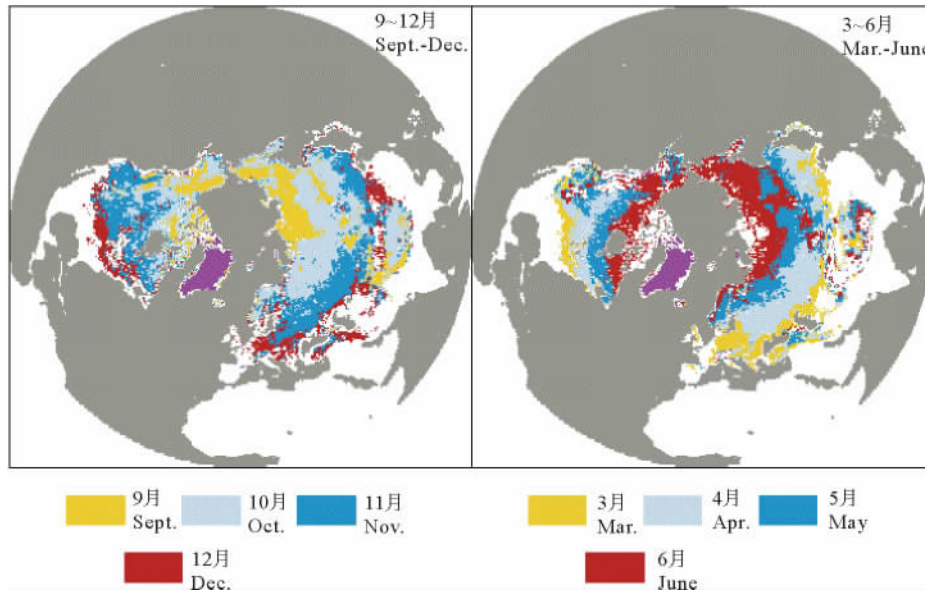
收稿日期: 2014-04-03; 修订日期: 2014-05-12

作者简介: 陈月亮(1988-),男,硕士生,主要从事气候变化研究。E-mail:chenyueliang110@126.com

\*\* 通讯作者: E-mail:huangf@ouc.edu.cn

积雪记录,指出北半球的积雪覆盖范围在1月份最大,其次是2月,8月份最小。本文根据多年月平均的SWE演变过程发现,北半球SWE主要集中在11~4(次年)月,其中2月份最大,其次是3月份,自高纬度至低纬度大致呈递减趋势。由于洋流等影响使同纬度的西欧地区温度要明显高于亚洲东部,故SWE在欧亚大陆的中心是在偏向西伯利亚东北部,在北美大陆上由于东西方向的经度不均,中心在中部偏西的较高纬度地区。

在气候平均态下,分别选取9~12月和3~6月为SWE的累积和消融时段,画出每个月的SWE范围(见图1)。结果表明,9月份SWE主要集中在北美洲偏北高纬度地区和欧亚偏东北高纬度地区,随着时间推移,欧亚地区SWE向西向南逐步扩张,欧洲西部地区降雪较晚。到了融雪季节,欧亚、北美大致都是从低纬度开始慢慢融化,但欧亚地区西部融化较快,欧亚中东地区较慢。



(紫色区域为格陵兰岛。The purple area stand for Greenland.)

图1 气候平均的北半球9~12月(左)和3~6月(右)SWE范围的演变过程

Fig.1 The evolution of climatological snow cover extent on the Northern Hemisphere from September to December (left) and March to June (right)

### 2.2 SWE的季节持续性特征

受寒潮冷空气活动、下垫面温度等的影响,SWE在不同的季节可能具有不同的变化特征<sup>[10]</sup>。对整个北半球区域平均的SWE进行季节持续性分析,选取整个北半球的雪水当量各月平均值的逐年指数序列,从前一年秋季10月份至当年夏季9月份进行两两月份之间的超前滞后相关性分析,结果如表1。

从表1中可以发现,半球尺度的SWE在春、秋季一般都有2个月的持续性,前后2个月的相关系数都超过95%信度的显著性检验。但有2个时段比较特殊,11月与滞后2个月的相关系数都很高,而2、3月和滞后2个月的4、5月的相关系数都很低,这表明初冬季节雪水当量的积累过程中如果降雪较多,则该年冬季(12~2月)各月份降水均较多,但SWE的这种季节持续性存在春季障碍,4~5月融雪季节雪水当量的变化与前冬SWE的变化没有关系。另外,冬季12月SWE的变化与次年春季和初夏(4~6月)有显著的负相关关系,表明冬季12月份SWE偏多(少)时春季和初夏融

雪也可能偏多(少)。这些SWE的季节持续性特征可能对积雪的气候预测有一定的指示意义。

### 2.3 季节尺度上SWE的时空主模态特征

本文对气候平均的12个月SWE的时空场进行EOF分析,提取出北半球气候平均态雪水当量的时空分布特征。图2为前几个模态的方差贡献及误差限分布图,从图中可以看出前3个模态的方差贡献接近99%,第一模态为最显著模态,方差贡献接近总方差的93%,第二、三模态方差贡献虽然较小,但根据North等人提出的关于正交函数的误差限检验准则<sup>[11]</sup>,发现前3个模态均是显著的且模态之间相对独立。另外从物理模态验证(见图3)分析中也发现前3个模态是具有物理意义的模态,模态验证中的合成差值场(见图3)与EOF模态的空间分布(见图4)较为一致,因此本文主要讨论前3个主要模态的时空分布特征。

从图4中可以看出,第一模态表征了SWE的绝大部分季节变化,其方差贡献达到93.24%。时间序列呈现出冬、夏季反位相的年周期变化特征,12~4月为北

半球 SWE 的正位相时期,为北半球冬季降雪的主要时期,而 5~11 月整个北半球 SWE 处于负异常时期,对应降雪减少的夏季时期。结合空间分布可以发现,冬季 SWE 最多出现在 2 月的欧亚大陆中纬度中东部,最少也出现在该地区的 6~9 月,其中 4~5 月和 11~12 月为融雪和 SWE 的过渡季节。模态主要对应北半球气候交替一致性,但整个北半球 SWE 的季节演化要比

太阳辐射的季节变化滞后 2~3 个月。对第一模态进行物理模态的检验(见图 3),选取 EOF 时间序列中大于+0.5 和小于-0.5 的正(1~4 月)、负(6~10 月)值月份的平均做差值场,可以发现差值场与 EOF 第一模态空间分布基本一致,表明第一模态表征了冬(1~4 月)夏(6~10 月)半年之间 SWE 的差异。

表 1 北半球平均各月雪水当量序列的相关系数  
Table 1 The correlation coefficient of Northern Hemisphere SWE index on each month

月份 Month	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8
10	0.50											
11	-0.18	0.64*										
12	-0.003	0.51*	0.73*									
1	0.08	0.31	0.50*	0.52*								
2	-0.15	0.16	0.48*	0.58*	0.74*							
3	0.06	0.31	0.27	0.12	0.49*	0.57*						
4	0.28	0.05	-0.27	-0.33*	0.01	0.01	0.37*					
5	-0.05	-0.12	-0.20	-0.46*	-0.06	-0.14	-0.03	0.59*				
6	0.08	-0.04	-0.26	-0.37*	0.21	0.04	0.15	0.46*	0.74*			
7	-0.04	-0.002	-0.21	-0.28	0.01	-0.10	0.01	0.15	0.58*	0.74*		
8	0.14	0.06	-0.21	-0.42*	-0.18	-0.29	-0.13	0.14	0.56*	0.40*	0.58*	
9	-0.04	0.04	0.15	0.26	0.08	0.13	0.01	-0.32*	0.05	-0.09	0.12	0.11

注:星号代表相关系数超过 95% 信度的显著性检验。Asterisk stand for correlation exceeding 95% confidence level by a student t-test.

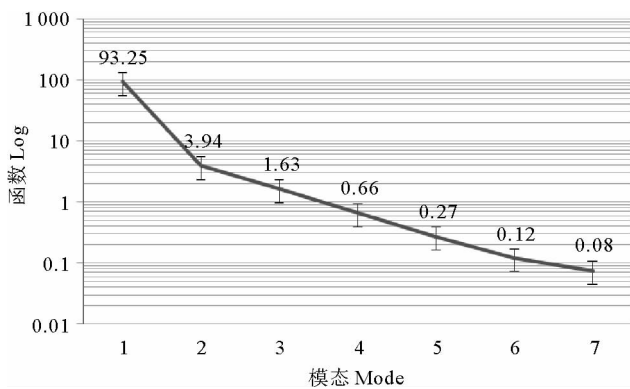


图 2 北半球气候平均雪水当量 EOF 的前 5 个模态的方差贡献及误差限分布图

Fig. 2 The Variance contributions and error bars of the top five EOF modes of the climatologically mean SWE over the Northern Hemisphere

第二模态方差贡献只占 3.95%,不到总方差的 4%,但该模态依然是显著的且与第一、三模态能显著区分开,是个独立的模态。同时,通过物理模态的检验(见图 3)可以发现,该模态主要表征了半年周期中春(4~

5 月)秋(11~12 月)季节和冬(2~3 月)夏(7~9 月)季节之间 SWE 的差异,空间上反映了欧亚大陆中东部地区中、高纬度和北美东、西部之间跷跷板式的反位相变化,与 EOF 的第二模态空间分布较为一致。其时间序列则主要表现为半年周期的变化特征,在 4 和 11 月为极大值,2 和 8 月出现极小值,且在 4、5 月份振幅最大。该模态表明,在北半球 4~5 月的融雪季节里,除欧亚大陆中东部北冰洋沿岸和北美西部地区外,其它地区 SWE 快速减少,而在 11~12 月 SWE 的过渡时期,这些地区又是 SWE 最早增加的主要区域。结合前面 SWE 的持续性分析可以发现,第二模态正是反映了欧亚大陆东北部和北美西北部高纬度地区 SWE 较中纬度地区积累早、融化慢的特点。

第三模态的方差贡献虽然只有 1.62%,但它表征了北半球雪水当量的另一种年周期季节变化模态,模态验证依然显著(见图 3),是个具有一定物理意义的模态。该模态时间序列在 4 月达到最大值,12 月为最小值,比第一模态的季节变化推迟了约一个季节。合成的结果与模态的空间分布比较一致,空间上表现为欧亚大

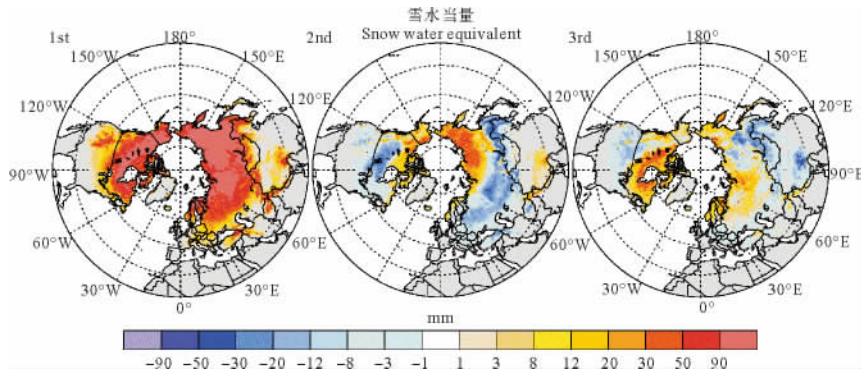


图3 北半球气候平均雪水当量 EOF 的前3个模态合成的分布图  
 Fig. 3 The composite results of the top three EOF modes of the climatologically mean SWE over the Northern Hemisphere

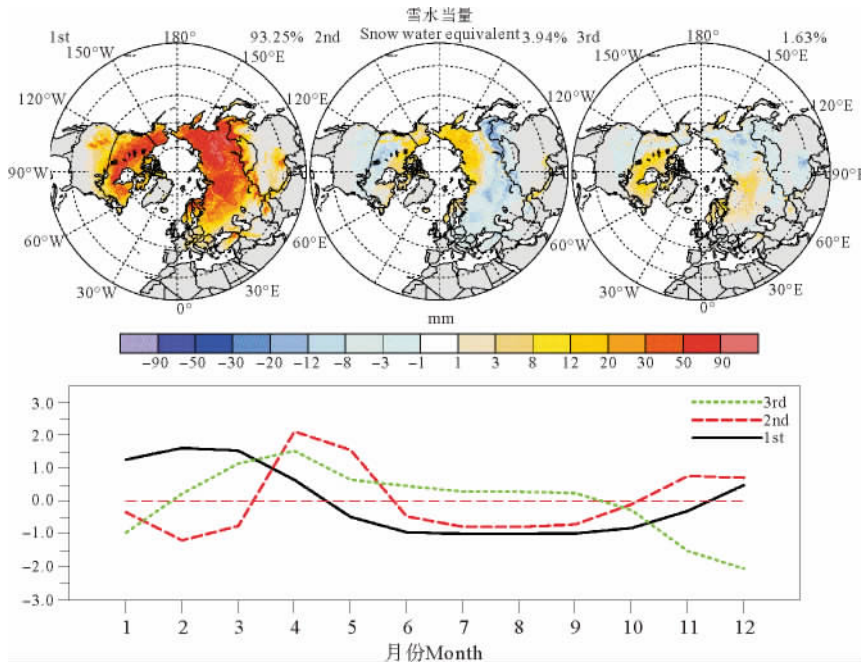


图4 气候平均 1~12 月北半球雪水当量 EOF 分析前 3 个模态的空间型及时间系数  
 Fig. 4 Spatial patterns and corresponding time series of the top three EOF modes of the climatologically mean SWE over the Northern Hemisphere

陆东西向和北美大陆南北向的反位相振荡特征,该模态可能反映了一些发生“倒春寒”<sup>[12]</sup>年份的 SWE 特征。

### 3 北半球 SWE 的年际变化特征

#### 3.1 不同月份北半球平均 SWE 的年际变化特征

考虑整个北半球 SWE 总的变化特征,对每个月北半球平均的雪水当量指数序列进行标准化处理(见图 5),可以发现,在 1979—2006 年间各个月的 SWE 均没有因为全球增暖而呈现出显著的线性减少趋势,均以强的年际振荡为主;但在 1987—2003 年间不同季节存在不同程度的较弱的线性趋势,通过显著性检验发现,春季的 5、6 月份和夏季 7、8、9 月的 SWE 有显著减少趋势,秋季 10、12 月份却有增加趋势,都通过了 90% 的置信度检验,也就是说在 1980 年代中后期至 21 世纪初

整个北半球春夏季 SWE 明显减少,而秋季 SWE 明显增加,但冬季没有显著变化趋势。

#### 3.2 北半球 SWE 的时空主模态特征

北半球 SWE 季节变化特征表明,雪积累的过程主要发生在冬季(1~3 月)。为此,本文选取整个时间序列中每年 1~3 月 SWE 的平均值进行距平处理,然后进行 EOF 分析(见图 6)。

第一模态解释了总方差贡献的 13.1%,其空间结构表明,在欧亚地区 SWE 表现为中西部中高纬度地区的一致变化与东北亚中高纬地区跷跷板式的反位相变化,在北美同样为东西向的反位相变化特征,且北美西部和亚洲东部沿太平洋扇区为同位相变化。该模态的关键区为欧亚中西部高纬度的大部分地区,北美和亚洲东部地区相应的变化较弱。从时间序列上看没有明



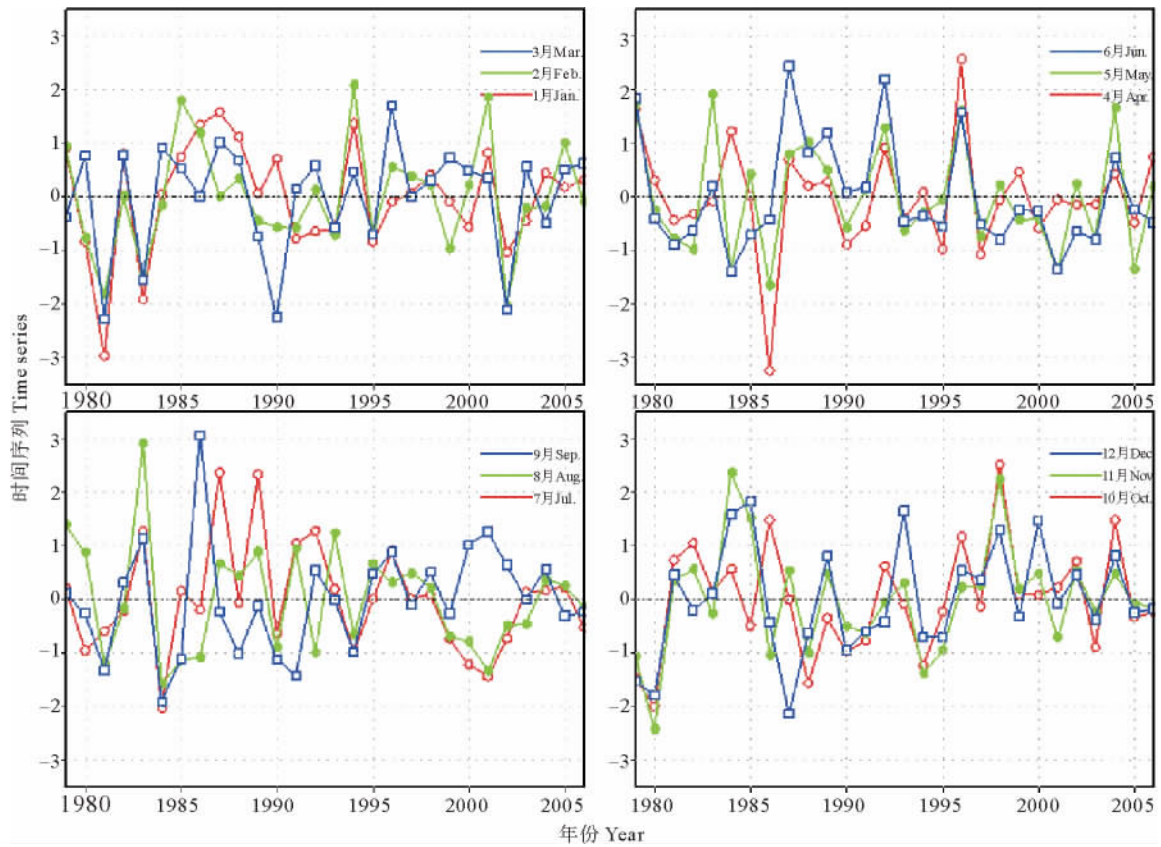
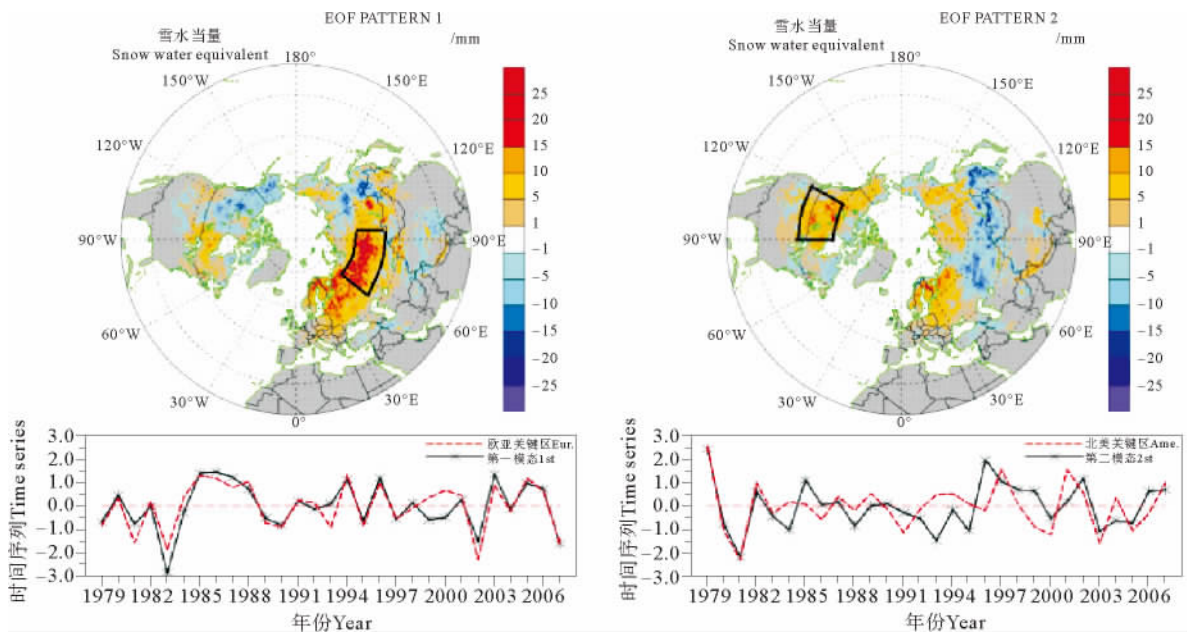


图 5 北半球平均的雪水当量指数各月逐年的标准化序列

Fig. 5 The Northern Hemisphere average SWE standardization series index of each month year by year



(空间场中, 黑色方框内为欧亚关键区位置(左)和北美关键区位置(右); 时间序列图中, 红线分别为欧亚关键区(左)和北美关键区(右)的指数序列。 The red line are respectively key box of Eurasia(left) and America(right) index series on the PC graphs.)

图 6 1979—2007 年冬季北半球雪水当量 EOF 分解的前 2 个模态空间及时间分布

Fig. 6 Spatial-temporal patterns of the first two modes for SWE during 1979—2007

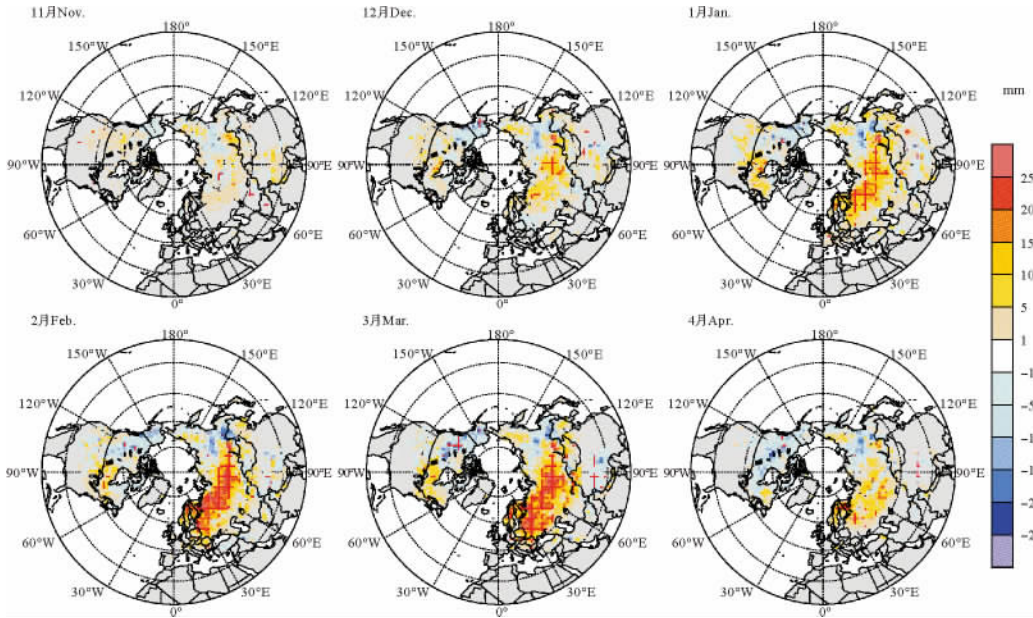
显的趋势变化, 1983 年为异常极大值年, 1987 年以后年际变化振幅减小。对比欧亚中西部关键区 (50°E~95°E, 52°N~62°N) 的区域平均雪水当量序列和第一模态时间序列, 二者之间的相关系数达 0.87, 说明第一

模态的物理意义主要反映了欧亚中西部地区中高纬度 SWE 的一致变化。选取第一模态时间序列对 SWE 原始场做逐月的超前、同期回归(见图 7)发现, 欧亚中西部大陆一致模态在前一年的 11 月份欧亚偏西中高纬度

地区出现弱的一致变化,至前一年的12月份在(90°N, 65°E)附近地区加强。1月份欧亚中西部已呈现大范围的一致变化,2月份整体强度进一步加强,3月份范围进一步向较低纬度扩张,4月份北部大部分地区减弱消失。整体上,欧亚大陆一致模态起始于前一年11月,结束当年4月份。先由欧亚中部地区开始向西部扩张增强,然后再向西南延伸,西南中纬度地区变化晚消失也较晚。

第二模态解释方差贡献 8.3%,主要反映北美中高

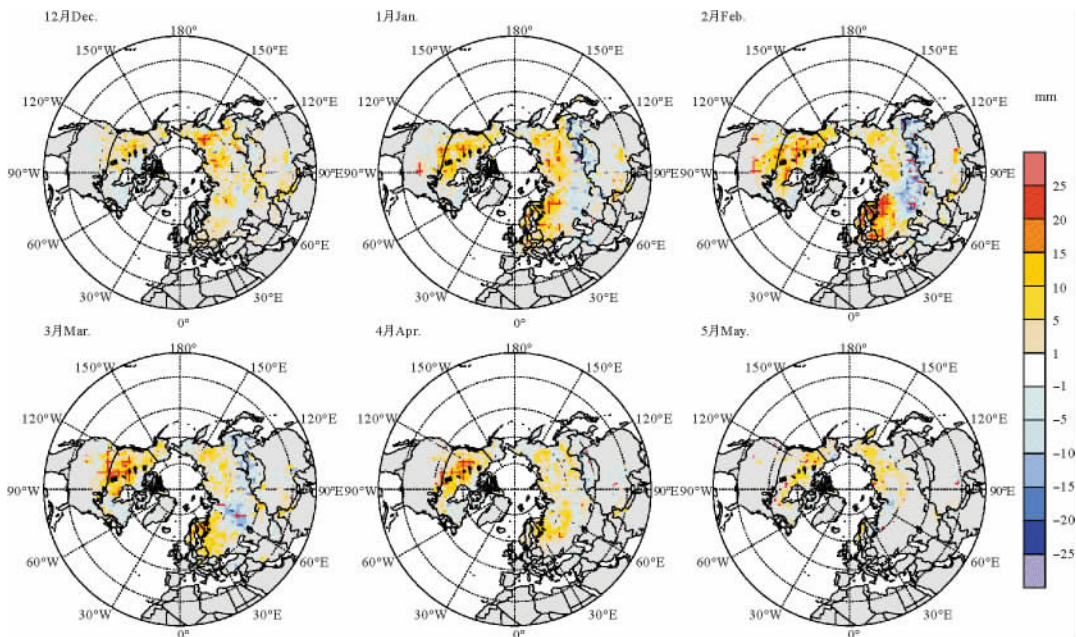
纬度大部分地区和欧亚大陆高纬度北冰洋沿岸地区的一致变化,同时欧亚地区为中纬度地区与北部高纬度地区呈相反的跷跷板式变化。选取北美中高纬度地区(90°W~120°W, 45°N~60°N)做区域平均雪水当量指数序列,发现其指数与第二模态时间序列相关系数达 0.76,说明了第二模态的物理意义主要反映了北美中高纬度 SWE 的一致变化。同样选取第二模态的时间序列对原始场做逐月的超前、同期回归(见图8)发现,



(红线区域为回归过 95% 信度区域。The red line stand for the correlation exceeding 95% confidence level by a student t-test.)

图 7 EOF 第一模态时间序列回归原始场前一年 11~4 月空间分布

Fig. 7 The regression field of SWE from former November to April by the PC1



(红线为回归过 95% 信度区域。The red line stand for the correlation exceeding 95% confidence level.)

图 8 EOF 第二模态时间序列回归原始场前一年 12~5 月空间分布

Fig. 8 The regression field of SWE from former December to May by the PC2

北美一致模态在之前一年的 12 月份出现于北美高纬度和欧亚中偏东高纬度地区, 1 月份北美中高纬度同欧亚大陆西北部地区一致增强, 而欧亚大陆中西部高纬度地区不显著, 2 月份两地继续加强, 但至 3 月份欧亚大陆西北部地区开始减弱, 而北美地区可以维持至 5 月份。

#### 4 结语

雪水当量外缘廓线分析和气候月平均的 EOF 分析都表明, 在季节变化上, 在欧亚大陆中西伯利亚高原及以东高纬度和北美高纬度区域都有相比中纬度其它区域积雪早、融雪晚的特点。季节变化的时空主模态以冬夏年周期振荡的半球一致型为主, 方差贡献达 93%, 第二和第三模态方差贡献虽然较小, 但分别反映了半年周期和年周期中春季的主要变化特征。

年际变化上, 半球尺度雪水当量变化在春、秋季节一般都有 2 个月的持续性, 但晚冬到春季则存在春季障碍。而在 1980 年代中后期至 21 世纪初整个北半球春季积雪明显减少, 而秋季积雪明显增加。

北半球雪水当量的年际变化空间上主要存在 2 个主模态: 欧亚大陆中西部的一致变化和北美中高纬度大部分地区和欧亚大陆高纬度北冰洋沿岸地区的一致变化。2 个模态的时间序列均没有明显的趋势变化, 分别占总方差贡献的 13.1% 和 8.3%, 但欧亚大陆的中西部一致变化与北美地区东西偶极子变化有关, 而北美中高纬度大部分地区和欧亚大陆高纬度北冰洋沿岸地区的一致变化中欧亚大陆高纬度与南部较低纬度存在相反的跷跷板变化。

#### 参考文献:

- [1] Yasunari T, Kitoh A, Tokioka T. Local and remote responses to excessive snow mass over Eurasia appearing in the northern spring and summer climate [J]. *J Meteor Soc*, 1991, 69(4): 473-486.
- [2] Ye H, Cho H, Gustafson P E. The changes in Russian winter snow accumulation during 1936-83 and its spatial Patterns [J]. *J Climate*, 1997, 11: 856-863.
- [3] Brown R D. Northern Hemisphere snow cover variability and change, 1915-1997 [J]. *American Meteorological Society*, 2000, 13: 2339-2355.
- [4] Mote W P. Trends in snow equivalent in the Pacific Northwest and their climatic causes [J]. *Geophys Res Lett*, 2003, 30(12): 1601.
- [5] Gutzler D S, Rosen R D. Interannual variability of wintertime snow cover across the Northern Hemisphere [J]. *J Climate*, 1991, 5: 1441-1447.
- [6] 高文良, 陈忠明, 闵文彬. 青藏高原冬季积雪时空变化特征 EOF 分析 [J]. *四川气象*, 2004, 24(3): 7-10.
- [7] Kosaka Y, Xie S P. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling [J]. *Nature*, 2013, 501: 403-407.
- [8] 黄菲, 狄慧, 胡蓓蓓, 等: 北极海冰的年代际转型及极端低温变化特征 [J]. *气候变化研究快报*, 2014, 3(2): 39-45.
- [9] Robinson D A, Dewey K F, Heim R R. Global snow cover monitoring: An Update [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1993, 74(9): 1689-1696.
- [10] Qian B D, Saunders M A. Summer UK temperature and its links topreceding Eurasian snow cover, North Atlantic SSTs, and the NAO [J]. *J Climate*, 2003, 16: 4108-4120.
- [11] North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions [J]. *Mon Weather Rev*, 1982, 110: 699-706.
- [12] 吴增福, 杨有盛, 朱福顺, 等: 倒春寒的划分和预报服务探讨 [J]. *气象科学*, 1998, 18(3): 289-294.

## Temporal and Spatial Variability of Snow Water Equivalent Major Modes in Northern Hemisphere on Seasonal and Interannual Timescales

CHEN Yue-Liang, HUANG Fei, WANG Hong, FANG Yong-Sheng

(Physical Oceanography Laboratory & Key Laboratory of Ocean-Atmosphere Interaction and Climate in Universities of Shandong, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** Based on the monthly mean satellite remote sensing snow water equivalent (SWE) data during the period 1979—2007 from National Snow and Ice Data Center (NSIDC), the spatial and temporal variabilities of SWE over the Northern Hemisphere are studied. Seasonal evolution of SWE shows that the far east of Eurasia and parts of North America have experienced an earlier snowfall and later melting compared to the other part on the same latitude. The hemispheric SWE usually has two month persistence in spring and fall seasons, especially in November, while “spring barrier” occurs from late winter to spring. The leading mode of SWE on seasonal timescale appears a consistent variability on the whole hemisphere with annual cycle and about 93% variance contribution. On the interannual timescale, there are two major modes of SWE which variance contribution respectively reach 13.1% and 8.3%. The first mode mostly reflect the variability of SWE over the Eurasia Midwest, while the second mode mainly reflect the variability of SWE over most mid-high latitude of the North America.

**Key words:** Northern Hemisphere; snow water equivalent; temporal and spatial variation; EOF

责任编辑 庞 旻