

文章编号: 2096-1618(2021)04-0460-07

近45年青藏高原及周边地区冬半年积雪时空演变特征

张祥健, 李金建

(成都信息工程大学大气科学学院高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225)

摘要:为更好揭示近年来青藏高原及周边地区不同区域冬半年积雪的时空变化特征,利用115个青藏高原气象站日积雪观测数据,采用经验正交函数法(EOF)、旋转经验正交函数法(EOF)、小波分析等方法,得到青藏高原地区积雪深度的时空分布特征及各区的周期振荡和突变特征。主要结果有:青藏高原地区积雪的空间分布不均,东西部存在显著差异;高海拔地区的积雪深度和年际变化率普遍大于相对低海拔地区。EOF第一模态呈现东北-西南反位相分布,第二模态自北向南呈现“少-多-少-多-少”多极子态分布。将青藏高原地区分为8个积雪气候区,各个气候区存在比较明显的周期及突变特征差异,其中青海东北部区和柴达木盆地地区具有较为一致的积雪周期变化特征;而高原东部区在1987年发生了由少到多、1998年发生了由多到少的显著突变,其他区域的突变现象并不显著。

关键词:气候学;青藏高原气候学;冬半年积雪;时空特征;周期变化;气候突变

中图分类号:P468.0⁺25

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcui.2021.04.016

0 引言

积雪是冰雪圈的重要组成,其低热传导率、高反射率、高相变潜热等特性,对全球的能量收支平衡起着十分重要的作用。青藏高原地处北半球中低纬度,平均海拔4000 m。部分地区积雪日数较多甚至常年积雪,是除南北极外的冰雪圈所在,因此常被称为世界“第三极”。青藏高原对气候变化十分敏感,任何时间尺度和空间尺度的气候变化都会对积雪产生不同程度的波动影响。有关研究表明^[1-3],青藏高原地区相比中国其他地区而言,气候变化具有超前性,是天气和气候变化的“启动区”。

近年来,不少学者利用地面气象观测资料对青藏高原及周边地区积雪的时空变化特征进行了研究。就青藏高原地区积雪的年际-年代际变化特征而言,不同时期青藏高原积雪变化趋势存在一定的差异。韦志刚等^[4]、胡豪然等^[5]、刘华强等^[6]、张薇等^[7]研究都发现青藏高原积雪存在“少-多-少”的年代际变化特征。20世纪80-90年代高原积雪整体呈现增多的趋势^[4-5,8-9],而20世纪90年代末以来,积雪又呈现出比较显著的减少趋势^[5,10-11]。但在不同季节、不同地区又存在一定的差异:除多等^[11]研究表明,高原春季和夏季平均最大积雪深度在近30年呈显著的下降趋势,而秋季和冬季平均最大积雪深度的减少趋势不明显,并且存在较大的空间差异。姜琪等^[12]分析青藏高原积雪深度和积雪日数时,发现冬季、春季以及年积雪深度具有相似的年际变化特征。此外,对于积雪的空间分布,郭建平^[13]和保

云涛等^[10]指出青藏高原地区积雪与地形存在直接联系,海拔越高的地区积雪越多且年际变率越大,坡度越陡峭抬升作用越强,降雪积雪越多。对于积雪的突变及周期,柯长青等^[14]研究表明,高原东部积雪变化主导整个高原的积雪变化并且积雪存在3年左右的准周期变化。胡豪然等^[5]发现青藏高原东部积雪在20世纪80年代末和20世纪末发生了突变现象;除多等^[11]则认为过去30年青藏高原积雪深度在1997年出现了由大到小的突变现象。但由于区域站点选取、研究时段等的不同,对于积雪偏多偏少的年份认定、区域或季节变化趋势等存在一定的差异。

尽管过往众多研究揭示了高原积雪的主要空间特征,都认为高原积雪具有显著的空间差异,但是对于年代际变化特征、突变特征以及周期特征等,多数研究还是采用了整个研究区平均或简单划分为高原东、中、西部区域平均进行了研究。高原积雪具有怎样的空间模态特征?如何对高原积雪进行气候分区?不同气候分区间积雪的突变、周期变化特征是否一致?对于这些问题,目前还需要进一步讨论。基于此,本文选取青藏高原地区地面站积雪资料,通过EOF、EOF对广大的高原地区进行分区,并探求各个区域上积雪变化的振荡周期和突变情况。

1 数据与方法

1.1 数据来源及资料处理

本文采用国家气象信息中心提供的逐日积雪深度资料。在综合考虑站点分布和建站过晚或缺测年份过多站点后,选取了68°E~105°E,26°N~39°N的115

收稿日期:2020-08-05

基金项目:第二次青藏高原综合科学考察研究国家专项资助项目(2019QZKK0103)

个站点,1972–2016 年的日积雪深度数据。对于积雪深度记录为微量的,统一视为 0 cm。规定,若某月内缺测日数大于 15 天,则将该月定义为缺测,否则直接进行算术平均计算,这样就可得到月平均积雪深度数据。对于月平均积雪深度存在的少量缺测值,利用计算线性趋势法进行插补。

同时,根据青藏高原及周边地区的季节划分,定义上年 11 月至当年 4 月为冬半年,例如 1985 年 11 月至 1986 年 4 月为 1986 年的冬半年,由此得到了 1972–2016 年青藏高原冬半年积雪深度序列。

1.2 方法

在分离气候趋势时,采用线性倾向估计的方法建立一元线性回归方程:

$$\hat{x}_i = a + bt_i, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

式中, x_i 为样本量为 n 的某气候变量,在文中为冬半年平均积雪深度, t_i 为 x_i 的对应时间, a 为回归常数, b 为回归系数又称倾向值。 a 和 b 可用最小二乘法计算得出。判断变化趋势是否显著,需要对相关系数 r 进行显著性检验,通过检验的站点的倾向值具有一定的统计意义。

EOF 分析(经验正交函数分解)能在规定区域内对不规则分布的站点进行分解,分离出该区域的典型分布结构^[15]。为更清晰地表示不同地理区域的特征,在 EOF 的基础上进行旋转,即 REOF^[16](旋转经验正交分解),从而对规定区域进行空间分型,再根据旋转后载荷值的分布情况进行气候分区。

通过 Morlet 小波变换,对青藏高原地区不同区域冬半年平均积雪深度的周期性变化特征进行分析,可得出各区域积雪深度变化的尺度以及发生变化的时间位置,其基本原理见文献^[17–18]。

对于气候突变的检验,本文采用滑动 t 检验(MTT)和信噪比检验(Yamamoto)两种方法^[15,19],对青藏高原地区不同区域冬半年平均积雪深度序列进行突变检验,从而判断各区域是否存在突变以及突变发生的时间。

2 结果与分析

2.1 长期变化

图 1 为 1972–2016 年 45 年青藏高原及周边地区冬半年平均积雪深度分布,可以看出,高原各地积雪深度东西部差异较为明显,以阿克塔格–札琼鄂玛–康马一线为界,呈现西高东低的态势。线以西,积雪深度大范围内高于 0.5 cm,积雪最多地区深度达 8 cm 以上,位于希夏邦马峰(海拔 8027 m)附近。线以东即高原东部,存在以巴颜喀拉山西南地区(代表站玛多,海拔

4273 m)、念青唐古拉山地区(代表站嘉黎,海拔 4489 m)、喜马拉雅山脉东段地区(代表站错那,海拔 4281 m)为中心的积雪区域,中心积雪深度达到 1 cm 以上。除这 3 个中心区域外,高原东部其他地区海拔相对较低,积雪深度也普遍低于 0.5 cm。由此可知,海拔高度和积雪深度存在直接的联系,海拔高度较高的地区积雪深度较深,反之积雪较少,此结论与保云涛等^[10]得到的结论相似。

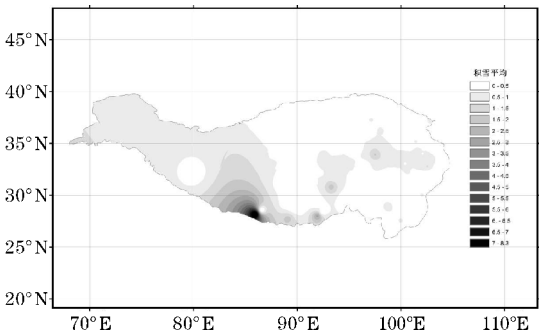


图 1 青藏高原及周边地区冬半年平均积雪深度分布图

图 2 为 1972–2016 年 45 年青藏高原及周边地区冬半年平均积雪深度变化趋势的空间分布。大多数台站显示,积雪年际变化趋势较弱。冬半年积雪深度呈下降趋势的台站占总站点的 85%,其中通过显著性检验的占总站点的 9%,聂拉木、错那、嘉黎等积雪较深代表站均出现了较大的年际变化率。而积雪深度呈增加趋势的台站占总站点的 15%,其中通过显著性检验的占总站点的 0%。可见青藏高原地区积雪深度从长期来看以减少为主。积雪深度下降较为明显的主要区域集中于高原东北部、高原中部唐古拉山脉、念青唐古拉山脉两侧以及巴颜喀拉山脉南侧。雪深增加的区域较少且较为分散,较为明显的区域为阿尼玛卿山脉南侧以及帕里周边地区。

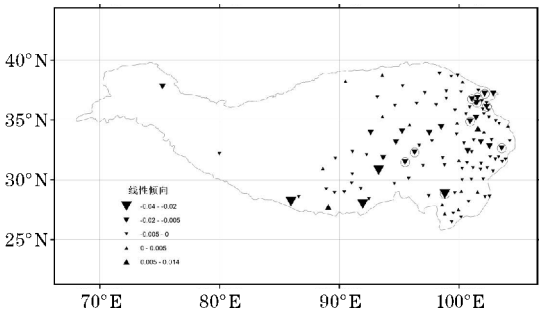


图 2 青藏高原及周边地区冬半年平均积雪深度变化趋势的空间分布图(圆圈标记处为通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验的站点)

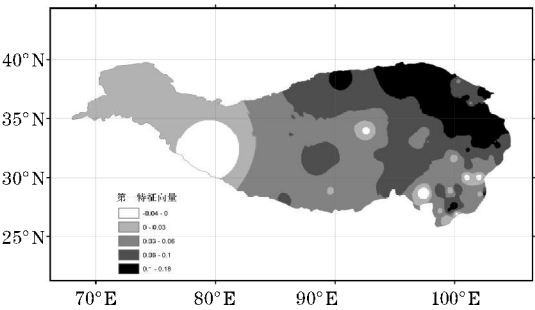
2.2 空间模态及分区

对青藏高原及周边地区气象台站近 45 年冬半年平均积雪深度进行经验正交函数分析(EOF),其前 10 个特征模态的累计方差贡献率为 59.602%,详见表 1。

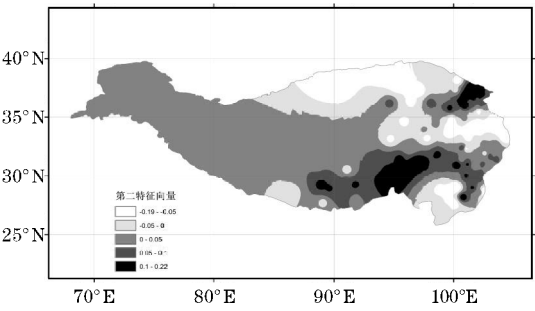
表1 EOF和REOF前10个模态方差贡献率 单位:%

序号	EOF		REOF	
	方差贡献	累计方差贡献	方差贡献	累计方差贡献
1	14.041	14.041	8.496	8.496
2	7.550	21.591	7.542	16.037
3	6.640	28.231	6.697	22.734
4	5.720	33.951	6.535	29.270
5	5.360	39.311	5.759	35.029
6	4.726	44.037	5.450	40.479
7	4.287	48.324	5.430	45.909
8	3.903	52.227	4.942	50.851
9	3.722	55.949	4.448	55.299
10	3.653	59.602	4.303	59.602

图3给出第1、2模态的特征向量场,这两个模态反映了青藏高原地区冬半年积雪深度最主要的两种空间模态。图3(a)为第1模态特征向量空间分布,该模态的方差贡献为14.0%。青藏高原地区除沱沱河、察隅、雅江、狮泉河等零星区域为负外,绝大部分地区为正,说明青藏高原地区大范围内,积雪变化是一致的。具体表现为某一时期,青藏高原地区积雪深度普遍偏多或普遍偏少。特征值高值区呈现带状,向西南、东北逐渐减小,总体表现为东北-西南向的格局特点。特征值高值区的地理位置主要位于青藏高原东北部的柴达木盆地与阿尼玛卿山脉一线,说明该区域为积雪深度变化具有较大的代表性。图3(b)为第2模态特征向量空间分布,该模态的方差贡献为7.5%,其自北向南呈现“少-多-少-多-少”多极子态分布,正值中心位于念青唐古拉山脉东部的南北两侧区域以及青海湖东部地区,而负值中心则位于柴达木盆地西北角、若尔盖以及横断山地区。



(a)第一特征向量荷载场



(b)第二特征向量荷载场

图3 青藏高原冬半年积雪的 EOF 分解的空间荷载向量

为更精确地描述不同地理区域的特征,对 EOF 分解得出的前 10 个主分量,做旋转经验正交函数分析 (REOF),见表 1。旋转后载荷的方差贡献要比旋转前分布均匀,显示出更加细微的地理区分。图 4 为青藏高原及周边地区积雪的前 10 个模态,表征了高原 10 种不同的积雪区域类别,具有一定的代表性。以前 10 个载荷量绝对值>0.35 为界,利用 10 个模态的高载荷值分布情况,同时参考相关研究,将青藏高原及周边地区积雪分划分为 8 个气候区,如图 5 所示。

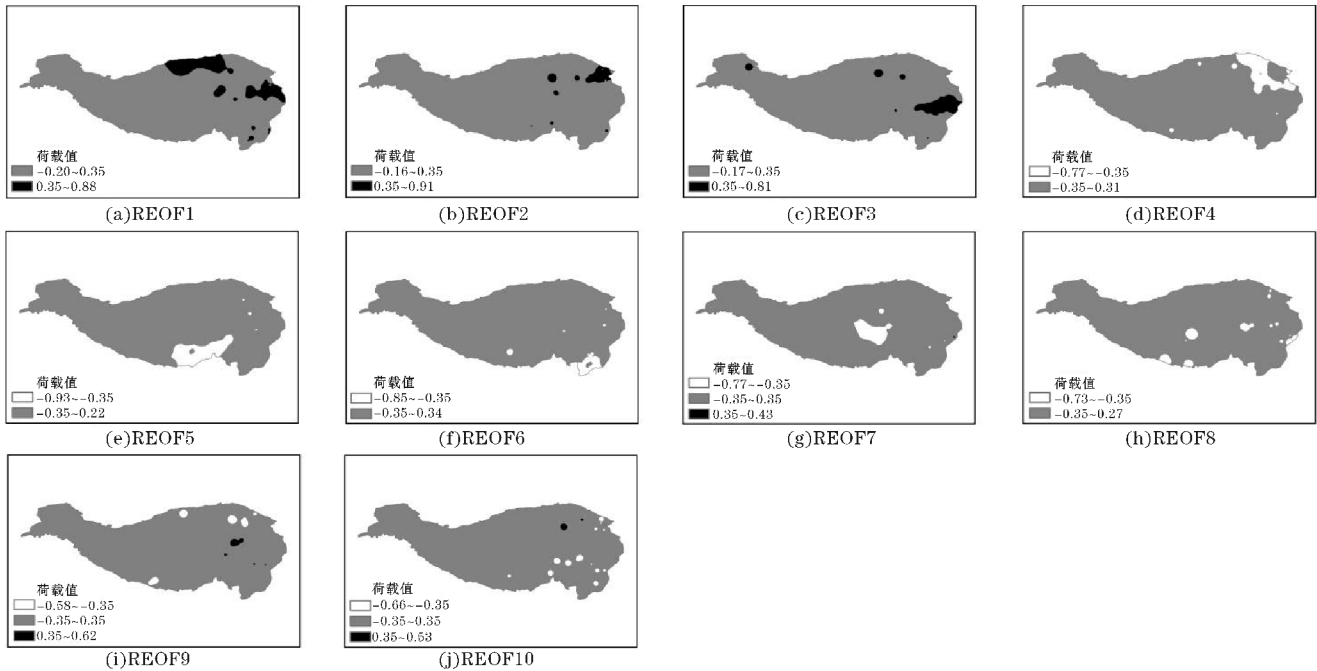


图4 前10个特征向量旋转后的荷载场

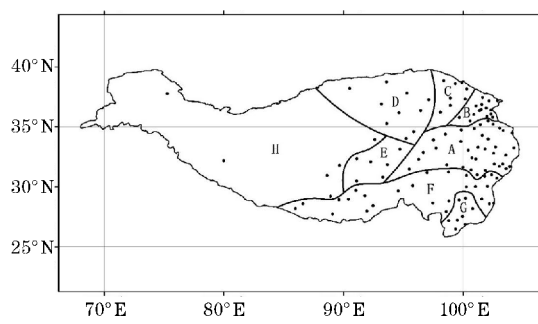


图 5 青藏高原及周边地区积雪变化空间分区

8 个高原积雪气候区的主要分布范围分别为 A 高原东部区:该区主要位于川西北部及青海东南部,主要包括玉树、玛多、清水河、石渠、丁青、囊谦、久治、若尔盖、德格、甘孜、班玛、色达、炉霍、壤塘、道孚、金川、阿坝、马尔康、红原、茂县、松潘、汶川、理县、黑水、同德、泽库、夏河、果洛、达日、玛曲、合作、临潭、岷县和南坪等地。旋转后载荷最大值位于岷县(0.88)。B 青海东北部区:该区以拉脊山为中心,位于青海湖东南部,主要包括乌鞘岭、湟源、恰卜恰、大通、互助、西宁、贵德、湟中、乐都、化隆、兴海、贵南、尖扎和循化等地。旋转后载荷最大值位于湟源(0.91)。C 祁连山区:该区位于祁连山以南的广大地区,主要包括托勒、肃南、野牛沟、祁连、天峻、刚察、都兰和茶卡等地。旋转后载荷最大值位于托勒(0.77)。D 柴达木盆地区:该区主要位于柴达木盆地及昆仑山脉东段两侧的广大区域,主要

包括茫崖、冷湖、德令哈和大柴旦、小灶火、格尔木、诺木洪、伍道梁、治多和曲麻莱等地。旋转后载荷最大值位于冷湖(0.80)。E 高原中部区:该区主要位于唐古拉山脉和念青唐古拉山脉之间,主要包括安多、那曲、当雄、杂多、索县和嘉黎等地。旋转后载荷最大值位于索县(0.77)。F 高原南部区:该区位于喜马拉雅山脉东段及其以北、西藏东部和四川西部的广大区域,内含雅鲁藏布江,主要包括拉萨、泽当、聂拉木、定日、江孜、浪卡子、错那、隆子、帕里、昌都、波密、林芝、白玉、小金、新龙、理塘、丹巴、雅江、宝兴、康定、察隅、德钦、九龙、冕宁、越西和贡山等地。旋转后载荷最大值位于隆子(0.93)。G 高原东南部:该区主要位于云南西北部 and 川西南部,主要包括稻城、乡城、木里、中甸、维西、福贡、兰坪和丽江等地。旋转后载荷最大值位于福贡(0.85)。H 高原西部区:该区位于高原西部及西北部,主要包括塔什库尔干、狮泉河、班戈、申扎、日喀则和沱沱河等地。旋转后载荷最大值位于班戈(0.73)。

2.3 周期变化分析

将青藏高原及周边地区分为 8 个气候区后,以 1972–2016 年各区冬半年平均积雪深度为对象,进行 Morlet 小波变换,得到小波实部(图 6)和小波方差(图略)。可以发现不同区域的显著周期及其年代变化存在较大差异。

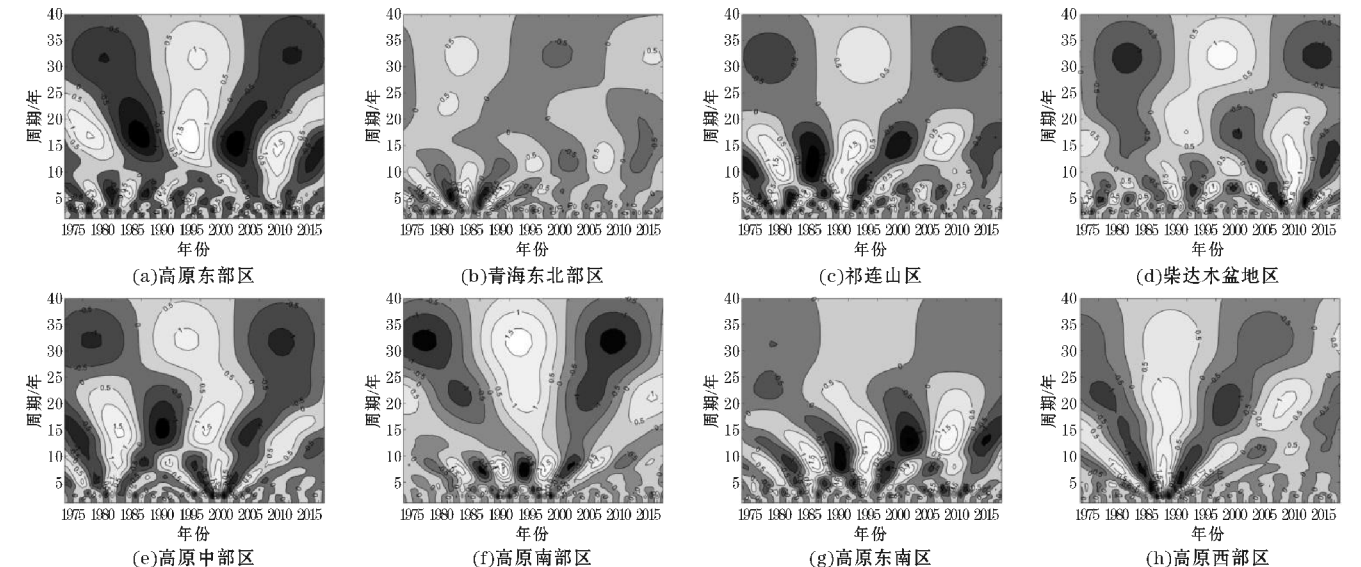


图 6 8 个气候区小波变换实部图

高原东部区(A 区)冬半年积雪(图 6a)主要存在 4 个时间尺度的振荡周期,分别为 29~37 年、14~24 年、5~9 年和 1~4 年。其中 29~37 年、14~24 年和 1~4 年周期在整个时域(1972–2016 年)均显著存在;5~9 年周期的中心值在 20 世纪 90 年代初发生一次突变,在 20 世纪 90 年代之前,其中心周期为 6 年,其后

中心周期分化为 5 年和 8 年。结合小波方差可以发现,以 17 年为中心的 14~24 年周期变化最为显著,是 A 区冬半年积雪变化最主要的周期,在这个时间尺度上可以发现,A 区积雪在 1972–1981 年、1989–1997 年及 2005–2011 年偏少,在 1982–1988 年和 1998–2004 年偏少,从这个周期变化角度来看,今后一段时间内该

区冬季积雪仍将总体维持偏多态势。

青海东北部区(B区)冬半年积雪(图6b)主要存在4个时间尺度的振荡周期,分别为28~35年、10~15年、4~8年和2~3年。其中28~35年和10~15年周期在整个时域(1972~2016年)均显著存在;4~8年的周期在整个时域也比较显著,但其强度在20世纪90年代末以后明显减弱;2~3年周期在整个时域也比较显著,但其强度在20世纪80年代中期以后明显减弱。结合小波方差可以发现,以6年为中心的4~8年周期变化最为显著,是B区冬半年积雪变化最主要的周期,在这个时间尺度上可以发现,B区积雪在1997~1998年、1982~1983年、1987~1990年及1995~1997年偏多,在1972~1976年、1979~1981年、1984~1986年及1991~1994年偏少。

祁连山区(C区)冬半年积雪(图6c)主要存在3个时间尺度的振荡周期,分别为27~36年、9~17年和2~8年。其中27~36年和9~17年周期在整个时域(1972~2016年)均显著存在;2~8年周期的中心值在20世纪80年代前后发生一次突变,在20世纪80年代之前,其中心周期为4年,其后中心周期分化为4年和6年并在21世纪逐渐减弱消失。结合小波方差可以发现,以15年为中心的9~17年周期变化最为显著,是C区冬半年积雪变化最主要的周期,在这个时间尺度上可以发现,C区积雪在1977~1982年、1988~1994年及2002~2009年偏多,在1972~1976年、1983~1987年、1995~2001年和2010~2016年偏少,从这个周期变化角度来看,今后一段时间内该区冬季积雪将总体转变为偏多态势。

柴达木盆地区(D区)冬半年积雪(图6d)主要存在4个时间尺度的振荡周期,分别为29~36年、14~20年、6~8年和2~5年。其中29~36年和14~20年周期在整个时域(1972~2016年)均显著存在;6~8年周期的中心值和2~5年周期中心值在21世纪初合并为以5年为中心的振荡周期。结合小波方差可以发现,以5年为中心的2~5年周期变化最为显著,是D区冬半年积雪变化最主要的周期,在这个时间尺度上可以发现,D区积雪在1972~1974年、1977~1979年、1982~1984年、1987~1989年、1993~1996年、2000~2003年、2007~2009年及2012~2014年偏少,在1975~1976年、1980~1981年、1985~1986年、1990~1992年、1997~1999年、2004~2006年、2010~2011年和2015~2016年偏多,从这个周期变化角度来看,今后一段时间内该区冬季积雪将总体转化为偏少态势。

高原中部区(E区)冬半年积雪(图6e)主要存在5个时间尺度的振荡周期,分别为27~37年、10~20年、8~10年、4~6年和2~3年。其中27~37年和10~20年周期在整个时域(1972~2016年)均显著存在;

8~10年和4~6年的周期在整个时域也比较显著,但其强度均在21世纪初逐渐减弱;2~3年周期在20世纪80年代初以及20世纪90年代末有较强的信号,其余时段均不显著。结合小波方差可以发现,以15年为中心的10~20年周期变化最为显著,是E区冬半年积雪变化最主要的周期,在这个时间尺度上可以发现,E区积雪在1978~1985年、1993~1999年及2007~2013年偏多,在1972~1977年、1986~1992年、2000~2006年和2014~2016年偏少,从这个周期变化角度来看,今后一段时间内该区冬季积雪将总体转为偏多态势。

高原南部区(F区)冬半年积雪(图6f)主要存在4个时间尺度的振荡周期,分别为29~36年、19~24年、6~10年和2~4年。其中29~36年和19~24年周期在整个时域(1972~2016年)均显著存在;6~10年的周期在20世纪80年代初信号开始逐渐加强并持续显著至21世纪后,信号又逐渐衰弱;2~4年周期只在在20世纪80年代末至90年代末较为显著。结合小波方差可以发现,以31年为中心的29~36年周期变化最为显著,是F区冬半年积雪变化最主要的周期,在这个时间尺度上可以发现,F区积雪在1972~1984年和1999~2015年偏少,在1985~1998年偏多,从这个周期变化角度来看,今后一段时间内该区冬季积雪将总体转为偏多态势。

高原东南区(G区)冬半年积雪(图6g)主要存在3个时间尺度的振荡周期,分别为11~16年、6~10年和2~5年。其中6~10年周期的中心值在20世纪90年代初以后发生一次分化,在20世纪90年代之前,其中心周期为8年,其后中心周期分化为7年和13年;2~5年的周期在整个时域也比较显著。结合小波方差可以发现,以13年为中心的11~16年周期变化最为显著,是G区冬半年积雪变化最主要的周期,在这个时间尺度上可以发现,G区积雪在1979~1984年、1991~1997年及2004~2010年偏多,在1972~1978年、1985~1990年、1998~2003年和2011~2016年偏少,从这个周期变化角度来看,今后一段时间内该区冬季积雪将总体转为偏多态势。

高原西部区(H区)冬半年积雪(图6h)主要存在4个时间尺度的振荡周期,分别为30~36年、19~25年、6~11年和2~5年。其中30~36年、19~25年和6~11年周期在整个时域(1972~2016年)均显著存在;2~5年的周期在整个时域也比较显著,但其强度在20世纪90年代中期以后明显减弱。结合小波方差可以发现,以21年为中心的17~23年周期变化最为显著,是H区冬半年积雪变化最主要的周期,在这个时间尺度上可以发现,H区积雪在1980~1993年及2003~2011年偏多,在1972~1979年、1994~2002年和2012~2016年偏少,从这个周期变化角度来看,今后一段时间内该区冬季积雪仍将总体维持偏少态势。

表 2 8 个气候区振荡周期汇总表

区域	A	B	C	D	E	F	G	H
	29 ~ 37	28 ~ 35	27 ~ 36	29 ~ 36	27 ~ 37	29 ~ 36	11 ~ 16	30 ~ 36
主要振	14 ~ 24	10 ~ 15	9 ~ 17	14 ~ 20	10 ~ 20	19 ~ 24	6 ~ 10	19 ~ 25
荡周期	5 ~ 9	4 ~ 8	2 ~ 8	6 ~ 8	8 ~ 10	6 ~ 10	2 ~ 5	6 ~ 11
	1 ~ 4	2 ~ 3		2 ~ 5	4 ~ 6	2 ~ 4		2 ~ 5
显著中心周期	17	6	15	5	15	31	13	21

对 8 个气候区的主要振荡周期以及显著周期中心进行汇总(见表 2)。8 个区中有 5 个区存在 4 个主要振荡周期,1 个区存在 5 个主要振荡周期,2 个区存在 3 个主要振荡周期。通过对比可以发现,A、C、F 3 区、B、D 两区的显著中心周期趋于一致;A、B、D 3 区、F、H 2 区的主要振荡周期较为相近。其中 B 区与 D 区的主要振荡周期和显著变化周期中心均十分相近,因此这两个区域具有较为一致的周期变化特征。

2.4 突变特征

对 1972–2016 年青藏高原 8 个分区的冬半年平均积雪深度进行滑动 t 检验(MTT)和信噪比检验(Yamamoto),将窗口值分别设置为 3、5、7、9 和 10。通过检验发现,A 区在各子序列长度上基本都存在突变

点(见表 3),说明该区域的雪深突变信号较强。而其他 7 个区域在部分时间尺度上检测出突变点,但突变信号相对较弱,在此不再予以呈现。

A 区 1987 年突变点,通过了 MTT 检验($n_1 = n_2 = 7、10$)的 0.05 信度检验以及 MTT 检验($n_1 = n_2 = 3、5、9$)的 0.01 信度检验;通过了 Yamamoto 检验(5)的 0.05 信度检验以及 Yamamoto 检验($n_1 = n_2 = 3$)的 0.01 信度检验。A 区 1998 年突变点,通过了 MTT 检验($n_1 = n_2 = 10$)的 0.05 信度检验以及 MTT 检验($n_1 = n_2 = 5、7、9$)的 0.01 信度检验;通过了 Yamamoto 检验($n_1 = n_2 = 5、7、9$)的 0.05 信度检验以及 Yamamoto 检验($n_1 = n_2 = 3$)的 0.01 信度检验。综上,通过这两种方法的验证,A 区的两个突变点具有一定可信度,如表 3 所示。

表 3 突变点的信度检验

突变 点年	MTT					Yamamoto				
	$n=3$	$n=5$	$n=7$	$n=9$	$n=10$	$n=3$	$n=5$	$n=7$	$n=9$	$n=10$
1987	5.19 **	3.05 **	2.75 *	3.57 **	2.62 *	2.80 **	1.08 *	0.80	0.90	0.63
1998	1.63	3.70 **	4.55 **	4.63 **	2.67 *	2.71 *	1.32 *	1.31 *	1.16 *	0.65

注: * 表示通过 $\alpha=0.05$ 的信度检验; ** 表示通过 $\alpha=0.01$ 的信度检验

大量研究指出^[20–23],20 世纪气候存在多次明显的突变现象,20 世纪初、20 世纪 20 年代、60 年代、90 年代是出现气候突变的主要时段,但由于地域性差异,不同区域的突变点也并非完全一致^[24]。检测出的 A 区 1987 年突变点和 A 区 1998 年突变点与 90 年代大范围的气候突变有较好的一致性。

3 结论

通过对青藏高原及周边地区 1972 ~ 2016 年 45 年冬半年积雪时空变化特征的分析,得到如下结论:

(1)青藏高原地区积雪的空间分布不均,东西部存在显著差异。高海拔地区的积雪深度和年际变化率普遍大于相对低海拔地区,积雪深度与海拔高度存在正相关关系。

(2)EOF 分解得前 10 个载荷向量累计方差贡献约 60%。第一模态方差贡献为 14.0%,呈现东北–西南向分布;第二模态方差贡献为 7.5%,自北向南呈现“少–多–少–多–少”多极子态分布。通过 REOF 分解

可分析出高原不同区域的积雪变化特征,积雪空间异常可分为 8 个气候区(异常类型),分别为高原东部区、青海东北部区、祁连山区、柴达木盆地区、高原中部区、高原南部区、高原东南区、高原西部区。

(3)对 8 个气候区的冬半年平均积雪深度进行 Morlet 小波变换。8 个区普遍为 4 个主要振荡周期。其中,青海东北部区和柴达木盆地区的积雪变化主要振荡周期和显著变化周期中心十分接近,这两个区域具有较为一致的周期变化特征。

(4)通过滑动 t 检验和 Yamatmoto 检验发现,高原东部区在 1987 年发生了由少到多、1998 年发生了由多到少的显著突变,而其他 9 个区域的突变现象并不显著。

参考文献:

[1] 冯松,汤懋苍,王冬梅. 青藏高原是我国气候变化启动区的新证据[J]. 科学通报,1998(6):633–636.
[2] 刘晓东. 青藏高原隆升对亚洲季风形成和全球气候与环境变化的影响[J]. 高原气象,1999(3):321–332.

- [3] Xiaodong Liu, Baode Chen. Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades[J]. *International Journal of Climatology*, 2000, 20(14).
- [4] 韦志刚, 黄荣辉, 陈文, 等. 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*, 2002(4): 496-508.
- [5] 胡豪然, 梁玲. 近50年青藏高原东部冬季积雪的时空变化特征[J]. *地理学报*, 2013, 68(11): 1493-1503.
- [6] 刘华强, 孙照渤, 朱伟军. 青藏高原积雪与亚洲季风环流年代际变化的关系[J]. *南京气象学院学报*, 2003(6): 733-739.
- [7] 张薇, 宋燕, 王式功, 等. 青藏高原冬春积雪特征及其对我国夏季降水的影响[J]. *气象科技*, 2019, 47(6): 941-951.
- [8] Qin D H, Liu S Y, Li P J. Snow cover distribution, variability, and response to climate change in western China[J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(9): 1820-1833.
- [9] 李培基. 亚洲季风模拟试验中青藏高原积雪强迫问题的讨论[J]. *高原气象*, 1996, 15(3): 350-355.
- [10] 保云涛, 游庆龙, 谢欣汝. 青藏高原积雪时空变化特征及年际异常成因[J]. *高原气象*, 2018, 37(4): 899-910.
- [11] 除多, 洛桑曲珍, 林志强, 等. 近30年青藏高原雪深时空变化特征分析[J]. *气象*, 2018, 44(2): 233-243.
- [12] 姜琪, 罗斯琼, 文小航, 等. 1961-2014年青藏高原积雪时空特征及其影响因子[J]. *高原气象*, 2020, 39(1): 24-36.
- [13] 郭建平, 刘欢, 安林昌, 等. 2001-2012年青藏高原积雪覆盖率变化及地形影响[J]. *高原气象*, 2016, 35(1): 24-33.
- [14] 柯长青, 李培基. 青藏高原积雪分布与变化特征[J]. *地理学报*, 1998(3): 19-25.
- [15] 魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999.
- [16] 吴洪宝, 吴蕾. 气候变率诊断和预测方法[M]. 北京: 气象出版社, 2005.
- [17] 林振山, 邓自旺. 子波气候诊断技术的研究[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 1-38.
- [18] 胡增, 臻石伟. 子波变换在大气科学中的应用研究[J]. *大气科学*, 1997(1): 59-73.
- [19] 符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. *大气科学*, 1992(4): 482-493.
- [20] 符淙斌. 气候突变现象的研究[J]. *大气科学*, 1994(3): 373-384.
- [21] 丁一汇, 张莉. 青藏高原与中国其他地区气候突变时间的比较[J]. *大气科学*, 2008(4): 794-805.
- [22] 孙秀忠, 罗勇, 张霞, 等. 近46年来我国降雪变化特征分析[J]. *高原气象*, 2010, 29(6): 1594-1601.
- [23] 杜军. 西藏高原近40年的气温变化[J]. *地理学报*, 2001(6): 682-690.
- [24] 马振锋, 彭骏, 高文良, 等. 近40年西南地区的气候变化事实[J]. *高原气象*, 2006, 25(4): 633-642.

Spatial and Temporal Variations of Winter Accumulation of Snow over Tibet Plateau and its Surrounding Areas in the Last 45 Years

ZHANG Xiangjian, LI Jinjian

(College of Atmospheric Sciences, Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: Based on daily snow depth observation data derived from 115 meteorological stations in the Qinghai-Tibet Plateau (QTP) and its surrounding areas in recent years, the spatial and temporal distribution characteristics of snow cover depth in the QTP, as well as the periodic oscillation and mutation of each of regions, were analyzed by empirical orthogonal function (EOF), rotational empirical orthogonal function (REOF), wavelet analysis and mutation test. The results showed that spatial distribution of snow cover in the TPQ is uneven and there were significant differences between the east and the west, and the snow depth and annual change rate in high altitude areas were generally higher than those in low altitude areas. Secondly, the first mode of EOF presents a northeast-southwest distribution, while the second mode presents a "less-more-less-more-less" multipole distribution from north to south. Thirdly, the QTP could be divided into 8 subregions of the climate of snow accumulation, and each of regions have different characteristics of snow cover change. The Morlet wavelet analysis manifested that the characteristics of snow cover periodic variation of average winter half-year snow cover depth in the northeastern Qinghai is relatively consistent with that in Qaidam Basin. Mutation test indicated that significant mutations occurred in 1987 and 1998 in the eastern plateau region, according to change in snow cover depth from less to more and from more to less respectively, while the mutation phenomena were not significant in the other regions.

Keywords: climatology; tibetan Plateau climatology; winter snow; temporal and spatial features; periodic variation; abrupt change