

基于第二次冰川编目数据的中国冰川高度结构特征分析

张鲜鹤¹, 王 欣^{1,2}, 刘时银², 郭万钦², 魏俊锋¹

(1. 湖南科技大学资源环境与安全工程学院, 湘潭 411201;

2. 中国科学院西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 主要基于第二次中国冰川编目数据, 计算和分析中国西部各个山脉冰川面积随高度分布特征、冰川平衡线高度场的分布规律和积累区比率的分布特征。结果表明: ① 各个山脉冰川面积随高度分布呈近似正态分布, 冰川最大面积所占总面积的百分比与冰川分布高度差的比值可以作为描述冰川面积随高度分布的形状参数; ② 平衡线高度的分布特征受气候和地形影响, 由南向北逐渐降低, 由东向西逐渐升高; 西北和南部高大山脉边缘比较密集, 青藏高原内部比较稀疏。③ 冰川积累区比率的分布特征与水汽、地形和物理冰川属性有关。各大山脉外侧和海洋型冰川区积累区比率较小 (< 0.5), 山脉内侧及高原内陆地区和极大陆型冰川区的积累区比率较大 (> 0.7)。

关键词: 第二次冰川编目; 面积随高度分布; 平衡线高度; 积累区比率; 中国西部

DOI: 10.11821/dlxb201703003

1 引言

冰川高度结构是指特定地域内冰川的高度特征值及其随海拔高度的分布模式^[1]。冰川高度结构特征指标主要包括冰川面积随海拔高度分布 (Distribution of Glacier at Different Altitudes, DGDA)、冰川平衡线高度 (Equilibrium Line Altitude, ELA)、冰川积累区比率 (Accumulation Area Ratio, AAR)。各个高度带冰川分布特征、冰川规模大小、冰川发育特征、冰川水文特征是周围生存环境特征的综合反映^[1]。ELA 综合反映了一个地区气候、地形诸因素对冰川发育的影响, 是冰川的气候—地貌指标, 被称作冰川发育的枢纽^[2-4]; ELA 在空间上的分布情况, 即为冰川平衡线高度场, 平衡线高度场可以直观地反映出平衡线的空间分布特征。AAR 一般与气候 (物质平衡水平) 和冰川类型 (冰川形态) 关系密切, 是冰川物理属性的重要参考指标之一。由于不同海拔的气候和地形等冰川的生存环境因素差异很大, 造就了冰川面积随海拔分布的多样性。总之, 位于不同海拔高度的冰川的结构特征, 因其与局地环境长时间的耦合作用, 成为不同海拔复杂环境状态及其变化的最为直接的表征参数。因此, 研究冰川高度结构特征的各个指标为冰川变化的研究提供了重要的科学依据, 具有重要的意义。

基于第一次中国冰川编目数据对冰川高度结构的研究已有很多成果。冰川学者提出

收稿日期: 2016-11-17; 修订日期: 2017-01-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271091, 41271095, 41501070) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41271091, No.41271095, No.41501070]

作者简介: 张鲜鹤(1989-), 河南郑州人, 研究方向为冰川水文与灾害。E-mail: xhzhang_hn@163.com

通讯作者: 王欣(1973-), 男, 湖南耒阳人, 博士, 教授, 主要从事地理环境遥感、冰川水文与灾害等研究。

E-mail: xinwang_hn@163.com

了不同的经验公式来描述 DGDA^[1], 并已先后成功应用于整个天山和西藏南部地区^[1, 5], 得到了近似正态分布的 DGDA 形态。近年来, 研究者基于概率理论提出的统计学方法, 其计算结果与实测值的总的差异程度较小^[6-7]。目前已有的平衡线的确定方法大致分为直接测量法和间接估算法两类。直接测量法, 又可分为传统方法和遥感法, 如国内外学者利用航片、Landsat TM/ETM+和MODIS 卫星等光学遥感影像和SAR 影像提取出了冰川雪线的位置^[8-15]。间接估算的方法应用比较广泛的就是赫斯法(Hess)和中值高度法。冰川学者根据中值高度和平衡线高度之间存在的线性关系^[16], 计算出了每条小冰川的平衡线值, 进而确定了冰川系统平衡线高度平均值^[1, 16-17]。也有学者认为冰川中值面积高度可以代替 ELA^[18-21]。第一次中国冰川编目根据 Hess 法量测了大约 10% 较大规模冰川的 AAR 值, 对 AAR 值的研究发现年净物质平衡和 AAR 值之间存在良好的线性关系, 冰川面积和 AAR 呈对数方程关系等^[22-28]。总之, 当前基于第一次冰川编目数据在 DGDA、ELA 和 AAR 的研究取得进展, 而基于第二次冰川编目数据的中国冰川高度结构特征尚没有全面的认识。

中国西部自北向南依次发育有阿尔泰山、天山、喀喇昆仑山、昆仑山、念青唐古拉山、喜马拉雅山和横断山等 14 座山系, 为冰川形成提供了广阔的积累空间和水热条件, 成为中国西部冰川的集中分布区域。研究者基于第二次冰川编目数据, 从山脉、流域、省份等角度分析 21 世纪初期中国冰川面积的分布现状^[29-30], 但是对于中国西部高度结构特征尚未进行全面描述。本文主要基于 DGDA、ELA 和 AAR 等指标, 分析中国西部不同山脉冰川的高度结构特征, 以求从海拔角度认识中国冰川分布状态。

2 数据与方法

本文数据主要有第一次中国冰川编目数据、第二次中国冰川编目数据和数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)等。第一次冰川编目数据主要是用冰川平衡线高度值和中值面积高度值来分析平衡线高度和中值面积高度间的关系。在第一次冰川编目数据中, 共有 5340 条冰川数据有实测平衡线高度值, 约占全国冰川条数的 10%。第二次冰川编目数据(<http://westdc.westgis.ac.cn>)和数字高程模型(SRTMDEM, <http://srtm.csi.cgiar.org>, V4, 分辨率 3 arcsec), 主要用来计算 DGDA、ELA 和 AAR。本文涉及的主要方法包括 DGDA、ELA 和 AAR 的计算等。

2.1 冰川面积随高度分布的计算

本文利用软件 ArcGIS 10.0 计算获取 DGDA。首先用第二次冰川编目数据建立冰川边界缓冲区, 裁剪 SRTM; 然后进行重采样分级, 将重采样后的栅格数据转化为矢量数据, 与冰川边界进行相交运算; 最后进行投影转换, 计算属性分带出来的面积(图 1)。

2.2 冰川平衡线高度的计算

假定冰川处于稳定状态时, 冰川学者发现冰川平衡线高度和中值面积高度之间存在良好的线性关系^[16, 18-19]。为了获得每条冰川的平衡线高度值, 本文也尝试用中值面积高度来计算平衡线高度。即以四级流域为基础, 将全国冰川划分为 91 个研究区, 共拟合出 91 个冰川平衡线高度与中值面积高度(冰川面积占总面积 50% 所在的高度)

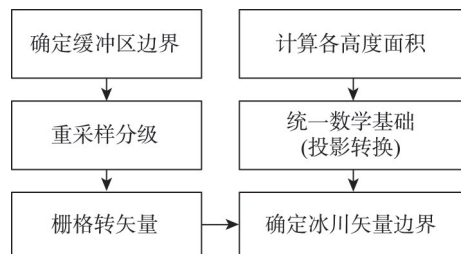


图 1 不同高度带内冰川面积计算流程
Fig.1 Flowchart of calculation process of glacier area in different altitude zones

线性方程。各流域冰川平衡线高度与其中值面积高度间的线性方程显著性水平都小于0.1, 绝大多数(98%)小于0.01, 说明冰川平衡线高度与其中值面积高度呈现显著的线性关系。另一方面, 对于同一条冰川, 可假定同一条冰川的冰川平衡线高度与中值面积高度是按照不变的线性关系变化。也就是说, 基于20世纪60年代以来完成的第一次冰川编目数据建立的不同流域冰川平衡线高度和中值面积高度的线性关系, 仍然可适用于当前冰川。基于此, 将第二次冰川编目中每一条冰川的中值面积高度值代入对应流域的线性方程中, 计算当前每一条冰川的平衡线高度值。

参照空间分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 的中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集(<http://westdc.westgis.ac.cn/>)将中国西部冰川区按照 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 窗口进行网格化, 其中有冰川分布的网格共4581个。按照面积加权方法计算每一个网格冰川平衡线高度的平均值, 运用克里金(Kriging)空间插值方法获取中国西部冰川平衡线高度分布场(图2)。

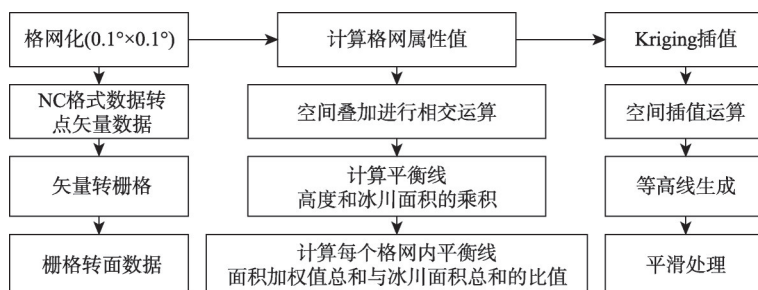


图2 冰川平衡线高度场的绘制流程图

Fig.2 Flowchart of drawing glacier equilibrium line altitude field

2.2 冰川积累区比率的计算

积累区比率是假定冰川处于稳定状态时, 冰川积累区的面积占据整个冰川面积的某个固定比例^[1]。即:

$$AAR = \frac{S_c}{S} \quad (1)$$

式中: S_c 为冰川积累区面积; S 为冰川总面积。

依据AAR的定义, 用每一条冰川平衡线高度、最高海拔高度和每50 m高度所对应的冰川面积数据, 计算出积累区面积, 与冰川的总面积的比值, 即为该冰川AAR值。最后基于中国西部冰川区建立的 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 格网, 按照冰川面积加权方法计算每一个网格冰川积累区比率的平均值。

3 结果

3.1 面积随高度分布

中国西部14座山脉的DGDA均呈近似的正态分布, 但不同山脉表现出不同的形态。各个山脉DGDA的形态特征, 可用形状参数来表示。形状参数定义为最大面积高度的冰川面积所占山脉总冰川面积的百分比与对应山脉冰川分布的高度差的比值。即:

$$S_p = 1000 \times \frac{P}{\Delta H} \quad (2)$$

式中: S_p 为形状参数; P 为最大面积高度的冰川面积所占山脉总冰川面积的百分比; ΔH 为对应山脉冰川分布的高度差, 1000为高度差单位换算系数。由表1和图3可见, 形状参数大(>0.05)的冰川, 面积随高度分布呈现瘦高型, 主要分布在冈底斯山、祁连山和

表 1 各山脉冰川高度特征值统计

Tab.1 The statistics of glacier altitudes in different mountain ranges

山脉	面积(km ²)	平衡线高度(m)	最低海拔(m)	最高海拔(m)	最大面积比值	冰川作用差(m)	形状参数
阿尔泰山	187.75	2978	2363	4309	0.08	1946	0.04
天山	7179.77	4085	2640	7083	0.05	4443	0.01
冈底斯山	1296.33	5837	4901	7027	0.13	2126	0.06
横断山	1395.06	5132	2979	7143	0.07	4164	0.02
喀喇昆仑山	5988.67	5598	3973	8532	0.06	4559	0.01
昆仑山	11819.2	5582	3955	7130	0.04	3175	0.01
念青唐古拉山	9559.2	5004	2459	7092	0.04	4633	0.01
帕米尔	2159.62	4895	2818	7575	0.04	4757	0.01
祁连山	1597.81	4820	4018	5765	0.08	1747	0.05
羌塘高原	1917.74	5799	5134	6748	0.10	1614	0.06
唐古拉山	1843.91	5574	4190	6572	0.09	2382	0.04
喜马拉雅山	6820.98	5527	2945	8798	0.04	5853	0.01

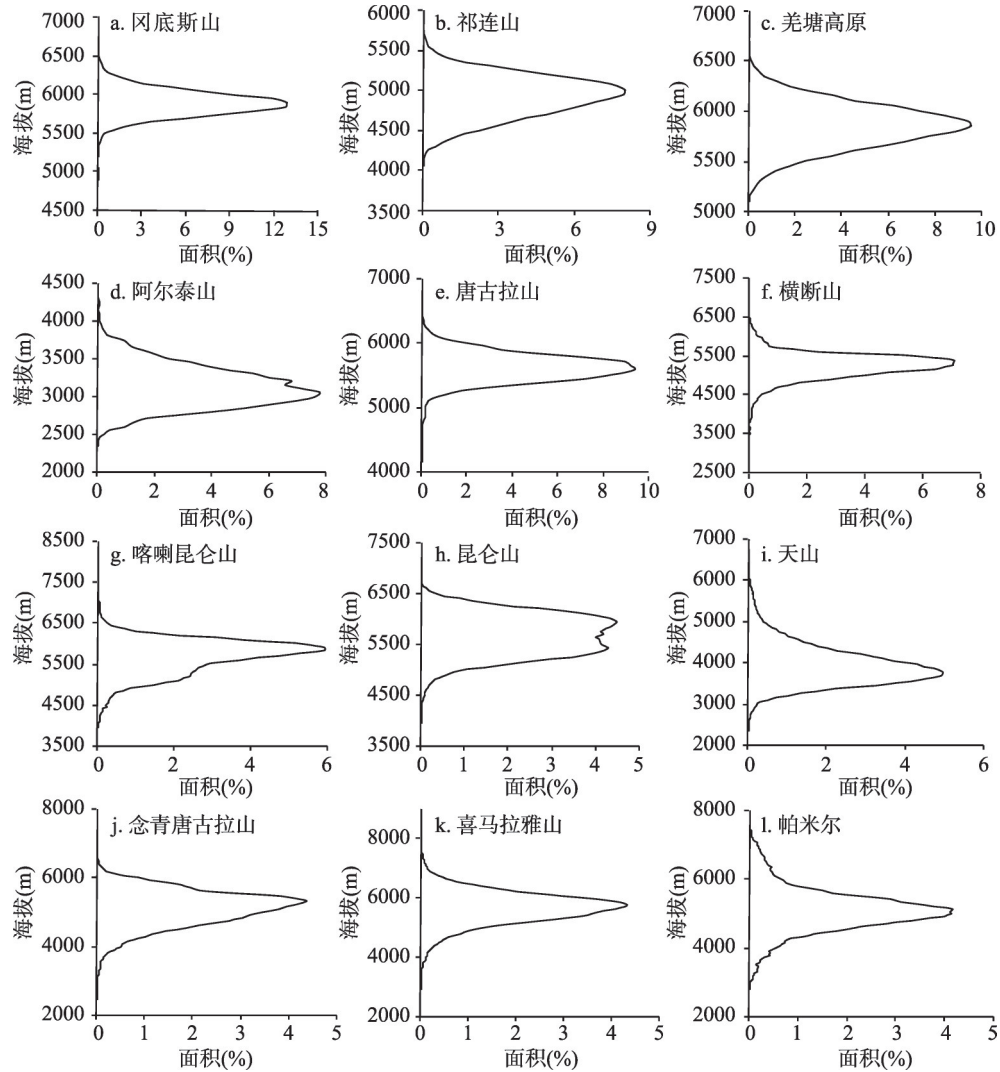


图 3 中国西部主要山脉不同海拔高度的冰川面积分布

Fig. 3 Area distribution of glacier at different altitudes in main mountains in western China

羌塘高原等山脉; 形状参数小 (<0.01) 的冰川, 面积随高度分布呈现扁平型, 主要分布在喀喇昆仑山、昆仑山、天山、念青唐古拉山、喜马拉雅山和帕米尔等山脉; 形状参数在 $0.02\sim0.04$ 之间的冰川, 面积随高度分布形态介于瘦高和扁平之间, 主要分布在阿尔泰山、唐古拉山和横断山等山脉。

3.2 平衡线高度场

中国冰川平衡线高度分布场如图4所示, 中国西部ELA分布的总趋势是南高北低, 西高东低。北部的阿尔泰山平衡线高度值较小, 高度值介于 $2600\sim3400$ m 之间, 平均在 2800 m 左右, 向南逐渐增大, 至喜马拉雅山北坡平衡线高度值增大到 5800 m 左右; 西北部的喀喇昆仑山等山脉平衡线高度值较高, 在 5500 m 左右, 向东逐渐减小, 祁连山减小到 4400 m 左右。羌塘高原是中国ELA分布的高值区, 最高可达 6000 m 以上, 在东南方向, 由高原向藏东南减少到 4400 m; 在西北方向, 由高原向帕米尔、天山减少到 4000 m 左右; 在东北方向, 由高原向祁连山减少到 4200 m 左右; 在西南方向, 由高原向喜马拉雅山减少到 5000 m 左右。

3.3 积累区比率

由基于计算的全国所有冰川的AAR值绘制的中国冰川AAR值分布图(图5)可见, 中国西部绝大部分冰川区的格网的AAR值都在 0.5 以上, 占总数的 91% , 其中AAR值 >0.7 的格网占 70% ; $0.5\sim0.7$ 的占 30% , 而AAR值 <0.5 的格网

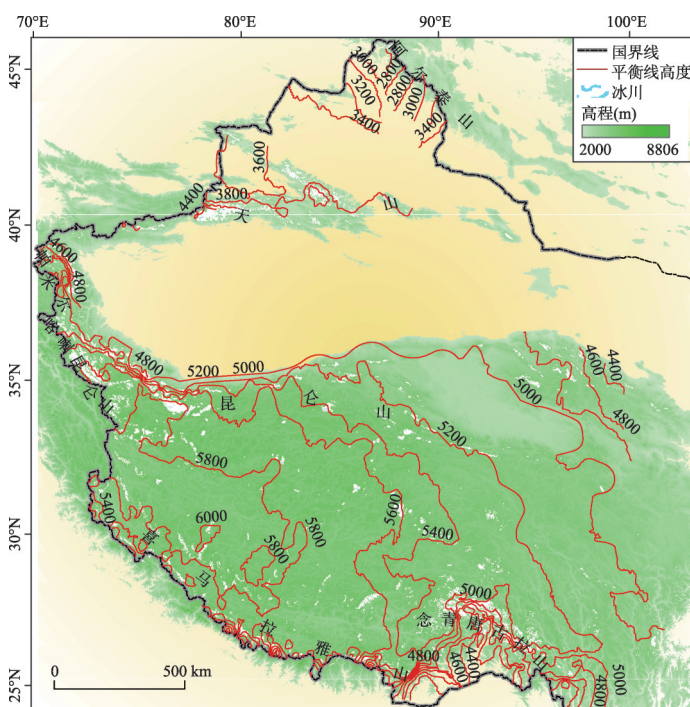


图4 中国西部冰川平衡线高度分布场

Fig.4 Glacier equilibrium line altitude field in western China

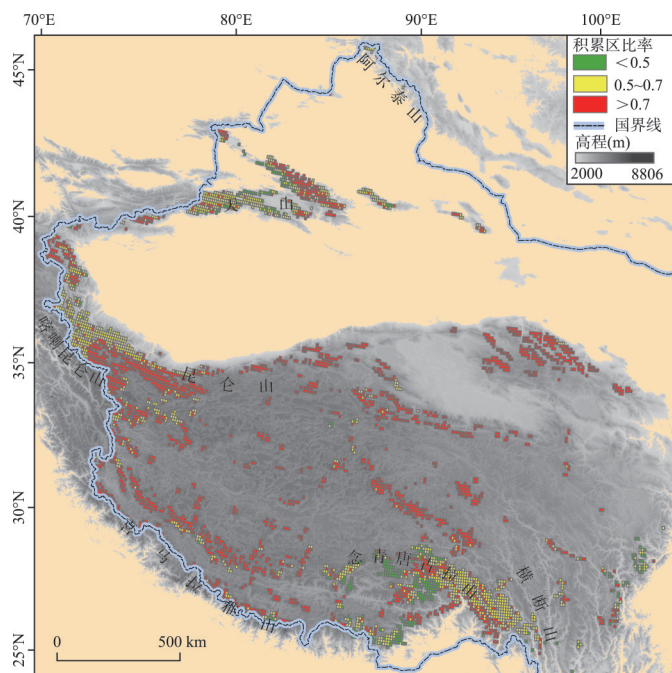


图5 中国西部冰川积累区比率值分布图

Fig.5 The distribution of the accumulation area ratio in western China

仅占总数的9%。从AAR的空间分布上来看,最大的青藏高原内陆地区,AAR值都在0.7以上;其次是阿尔泰山、西天山、喀喇昆仑山和昆仑山西段,以及横断山西部和念青唐古拉山东段等山脉,AAR值在0.5~0.7之间;最小的是天山伊犁河谷地区、喜马拉雅山东段、念青唐古拉山西段和横断山东部等山脉,AAR值都在0.5以下。

4 讨论

4.1 面积随高度分布形态差异

正态分布中的参数标准差能够描述数据分布的离散程度。如不同山脉DGDA无限接近于正态分布,则其标准差能够反映冰川在各个高度带的面积分布(大小)情况,即DGDA的形态特征。因此,山脉DGDA的标准差能在多大程度上指示DGDA的形态与该山脉DGDA在多大程度上接近正态分布对应,在没有确定DGDA是否达到统计意义上的正态分布状态时,需要寻找统计量来描述DGDA的形态。分析发现,本文定义的DGDA形状参数统计量 S_p 与DGDA的标准差存在显著相关性,显著性水平小于0.01(图6),这说明DGDA的形状接近正态分布,且对于在不同海拔高度上接近正态分布的冰川,形状参数统计量 S_p 可以定量描述各个山脉间DGDA特征及其差异性。

不同山脉DGDA的特征反映山脉各个高度带的地形和气候特征。换言之,地形和气候共同造就了DGDA的差异性。对比各个山脉,DGDA均呈现近似正态分布的特征,即在某一个高度带出现峰值,说明该高度带的气候或者地形最适合冰川的生存和发育。而各个山脉DGDA差异性又比较明显,峰值出现的高度不同,且冰川延展高度范围也不同,进而表现出不同的形态特征。冈底斯山、羌塘高原等冰川类型都属于极大陆型冰川^[31],降水稀少,冰川赖以生存的物质条件相对缺乏冰川延展范围较小,且冰川只能在较高的海拔范围内生存,所以形状参数最大($S_p = 0.06$),冰川面积分布特征呈现瘦高型,冰川分布相对集中。念青唐古拉山、喜马拉雅山和帕米尔等山脉海拔较高,纬度相对较低,地形复杂(具备为冰川发育提供物质积累的地形基础),冰川类型多样^[31],加之降水相对较多,保障了冰川向较低海拔延伸,因此形状参数最小($S_p = 0.01$),冰川面积分布特征呈现扁平型,冰川分布相对分散。总之,地形条件、水分和热量等共同决定了不同海拔高度冰川发育数量、规模分布格局。

4.2 气候与平衡线高度场

中国西部冰川区主要受西风环流、西南季风、东南季风以及南亚季风等的影响,各个地区降水和温度差异性明显。西风环流影响区域主要有阿尔泰山、天山、帕米尔、喀喇昆仑山以及昆仑山西段;西南季风和东南季风主要影响喜马拉雅山、念青唐古拉山、横断山等南部地区^[32]。这些地区山脉外侧降水丰富,有利于冰川发育。青藏高原地区不仅在高原地区形成了相对独立的气候系统,还对东亚乃至全球的大气环流和气候产生很大影响。冬半年高原位于西风带中,高原上干冷多风;夏半年高原位于副热带高压带

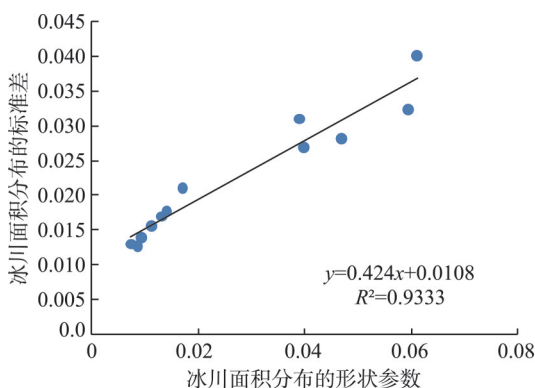


图6 冰川面积随高度分布的形状参数和标准差的线性关系图

Fig.6 The linear relationship between the shape parameter and the standard deviation of the distribution of glacier at different altitudes

中,高原上降水较多^[33]。

由于受气候影响的程度和范围不同,中国西部ELA的分布差异性明显。伊犁河流域、阿尔泰山、帕米尔、喀喇昆仑山喜马拉雅山、念青唐古拉山和横断山等地区受西风 and 季风影响^[32],山脉外侧降水相对较多,ELA较低,又因高大山体的遮挡作用,影响水汽的输出,造成了背风坡降水较少,山脉内侧ELA较高,在青藏高原内部,尤其ELA明显偏高。此外,地形也是影响平衡线分布重要因素。阿尔泰山ELA分布与山脉西北东南走向一致,横断山受南北纵贯高山—峡谷地貌形成“阻隔—通道”作用的影响^[34],ELA表现出明显的沿纬线方向间断式差异和经线方向连续式延伸的分布特征,昆仑山、念青唐古拉山和喜马拉雅山等山脉ELA呈现的以山峰为中心的多个峰值区,以及ELA分布密集程度和变化梯度表现出的空间差异性等,都是地形影响平衡线分布的结果。

综上所述,中国西部冰川ELA分布特征除受地势和山地绝对和相对海拔的影响,还表现出由帕米尔高原—兴都库什山脉—青藏高原高大地势所诱导的南亚季风、东亚季风、西风、西北利亚寒潮等多时空尺度环流的影响,两者共同作用造就了冰川ELA分布特征时空差异性。

然而,资料显示2006-2007年祁连山七一冰川平衡线高度观测值为4855 m^[35],而计算值为4659 m,相差196 m,表明计算值和观测值存在误差。这表明尽管理论上根据中值面积高度计算ELA是可行的,但由于ELA的影响因素复杂、第一次冰川编目中值面积高度值和ELA存在误差等原因,使得通过拟合的线性关系计算的ELA和实测结果存在较大误差,进而影响AAR值的可靠性。本文侧重对ELA、AAR的空间分布趋势的研究,单条冰川计算引起的误差影响有限,但今后仍需加强对冰川ELA的观测,优化ELA的计算方法,以提高对冰川高度结构特征描述的准确性。

4.3 冰川类型与积累区比率

中国西部冰川类型多样,根据气候条件和冰川物理属性,可划分为海洋型冰川、亚大陆型和极大陆型冰川3大类^[36]。海洋型冰川主要分布于横断山区、喜马拉雅山东段和念青唐古拉山的中东段等,降水丰沛,冰川区年降水量达1000~3000 mm,ELA较低,对气候变暖极为敏感;亚大陆型冰川主要分布于天山、昆仑山东段以及喀喇昆仑山北坡中国境内等,冰川区年降水500~1000 mm;极大陆型分布于青藏高原的西部,包括西昆仑山、羌塘高原、帕米尔东部、唐古拉山西部、祁连山西部和冈底斯山西段,冰川区年降水量200~500 mm^[31]。

冰川积累区比率的大小与冰川类型及其补给条件密切相关,而中国西部冰川类型多样性和水汽来源复杂性决定了AAR分布的空间差异性。如天山主要受西风环流影响,伊犁河流域地形又呈喇叭状向西敞开,水汽较容易进入,加上托木尔峰等高大山体的拦截作用,在山区形成降水,丰富的降水使得冰川补给作用增强,导致伊犁河谷地区AAR值相对较低(<0.5);喜马拉雅山东段和念青唐古拉山西段临近雅鲁藏布江大峡谷,为南亚季风进入高原内部的最大水汽通道^[37-38],降水相对较多,冰川发育多为海洋型冰川^[31],因此,AAR值偏低(<0.5);横断山东部因纵向领谷区的山脉表现较好的阻隔—通道效应,降水由东向西逐渐减小,水汽由南向北输送,致使AAR值东西差异较大(东部偏低 <0.5 ,西部在 $0.5\sim0.7$ 之间),南北差异小。羌塘高原、冈底斯山、祁连山、昆仑山、帕米尔等属于大陆型冰川^[31],受季风影响不明显,降水较少,AAR值较大(>0.7),其中由于西风水汽翻越喀喇昆仑山和局地环流等因素的影响^[38],在喀喇昆仑山、西昆仑山外缘等地AAR值也在 $0.5\sim0.7$ 之间。总之,冰川发育类型、降水和地形等条件共同决定了AAR值的分布特征。

5 结论

DGDA、ELA 和 AAR 都是从海拔角度指示冰川的分布状态,冰川的 DGDA 和 ELA 分布决定了 AAR 的分布,三者共同构成了冰川的高度结构特征。本文主要基于第二次冰川编目数据,分析中国西部冰川高度结构特征,得出如下主要结论:

(1) 不同山脉 DGDA 呈近似正态分布的特征,用冰川最大面积高度所占总面积的百分比与冰川分布的高度差的比值 S_p 作为冰川的形状参数, S_p 值越大,冰川面积分布曲线越瘦高,冰川分布越集中; S_p 越小,曲线越扁平,冰川分布越分散。冈底斯山和羌塘高原等形状参数最大 ($S_p = 0.06$),面积随高度分布呈现瘦高型;帕米尔、喜马拉雅山和念青唐古拉山等形状参数最小 ($S_p = 0.01$),面积随高度分布呈现扁平型。

(2) 冰川 ELA 的分布特征主要受气候和地形综合作用的影响,表现出明显的时空差异性,呈现南高北低,西高东低的趋势。高大山脉边缘 ELA 分布比较密集,变化较快;青藏高原相对比较稀疏,平衡线高度变化平缓;昆仑山、念青唐古拉山、喜马拉雅山等山脉则呈现以山脉主峰为中心的同心圆状分布,由山脉外缘向内部升高;横断山则地形影响,ELA 表现出明显的沿纬线方向间断式差异和经线方向连续式延伸的分布特征。

(3) 冰川积累区比率的大小与冰川类型及其补给条件密切相关,而中国西部冰川类型多样性和水汽来源复杂性决定了 AAR 分布的空间差异性。各大山脉外侧和海洋型冰川区 AAR 值偏低 (< 0.5),各大山脉内侧和极大陆型冰川区的 AAR 值偏高 (> 0.7)。

致谢:感谢郭万钦副研究员提供数据方面的支持;感谢梁继博士提供技术上的支持。

参考文献(References)

- [1] Xie Zichu, Liu Chaohai. The Introduction of Glaciology. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2010. [谢自楚, 刘潮海. 冰川学导论. 上海: 上海科学普及出版社, 2010.]
- [2] Liu Chaohai, Shi Yafeng, Wang Zongtai, et al. Glacier resources and their distributive characteristics in China: A review on Chinese Glacier Inventory. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, 22(2): 106-112. [刘潮海, 施雅风, 王宗太, 等. 中国冰川资源及其分布特征: 中国冰川目录编制完成. 冰川冻土, 2000, 22(2): 106-112.]
- [3] Coleman C G, Carr S J, Parker A G. Modelling topoclimatic controls on palaeoglaciology: Implications for inferring palaeoclimate from geomorphic evidence. Quaternary Science Reviews, 2009, 28(3): 249-259.
- [4] Aizen V B, Kuzmichenok V A, Surazakov A B. Glacier changes in the Tien Shan as determined from topographic and remotely sensed data. Global and Planetary Change, 2007, 56(3): 328-340.
- [5] Xie Zichu, Feng Qinghua, Liu Chaohai. Modeling the variation of glacier system: Taking the southern Tibet region as an example. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(1): 16-27. [谢自楚, 冯清华, 刘潮海. 冰川系统变化的模型研究: 以西藏南部外流水系为例. 冰川冻土, 2002, 24(1): 16-27.]
- [6] Wang Xin, Xie Zichu, Lin Jian, et al. Research on the calculation of altitude structure of a glacier system: Taking the Tarim Basin as an example. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(5): 551-556. [王欣, 谢自楚, 林剑, 等. 冰川系统高度结构计算研究: 以塔里木盆地水系冰川为例. 冰川冻土, 2004, 26(5): 551-556.]
- [7] Zhang Yiqing, Luo Yi, Sun Lin, et al. Study of the elevation-dependent glaciated area in China. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(3): 527-536. [张宜清, 罗毅, 孙林, 等. 中国冰川面积随高程分布规律研究. 冰川冻土, 2014, 36(3): 527-536.]
- [8] Huang Lei, Li Zhen, Tian B S, et al. Classification and snow line detection for glacial areas using the polarimetric SAR image. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(7): 1721-1732.
- [9] Shangguan D H, Bolch T, Ding Y J, et al. Mass changes of Southern and Northern Inylchek Glacier, Central Tian Shan, Kyrgyzstan, during ~1975 and 2007 derived from remote sensing data. The Cryosphere, 2015, 9(2): 703-717.
- [10] Spiess M, Maussion F, Möller M, et al. MODIS derived equilibrium line altitude estimates for Purogangri ice cap, Tibetan Plateau, and their relation to climatic predictor (2001- 2012). Geografiska Annaler: Series A, Physical

- Geography, 2015, 97(3): 599-614.
- [11] Pu Janchen, Yao Tandong, Yang Meixue, et al. Rapid decrease of mass balance observed in the Xiao (Lesser) Dongkemadi Glacier, in the central Tibetan Plateau. *Hydrological Processes*, 2008, 22(16): 2953-2958.
- [12] Guo Zhongming, Wang Ninglian, Kehrwald N M, et al. Temporal and spatial changes in Western Himalayan firn line altitudes from 1998 to 2009. *Global and Planetary Change*, 2014, 118: 97-105.
- [13] Butt M J. Exploitation of Landsat data for snow zonation mapping in the Hindukush, Karakoram and Himalaya (HKH) region of Pakistan. *Hydrological Sciences Journal*, 2013, 58(5): 1088-1096.
- [14] Huang Lei, Li Zhen, Tian B, et al. Monitoring glacier zones and snow/firn line changes in the Qinghai-Tibetan Plateau using C-band SAR imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 137: 17-30.
- [15] Spiess M, Huintjes E, Schneider C. Comparison of modelled-and remote sensing-derived daily snow line altitudes at Ulugh Muztagh, northern Tibetan Plateau. *Journal of Mountain Science*, 2016, 13(4): 593-613.
- [16] Xie Zichu, Ding Liangfu, Liu Chaohai, et al. Mass balance at the steady state equilibrium line altitude and its application. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18(1): 1-9. [谢自楚, 丁良福, 刘潮海, 等. 冰川零平衡线处的物质平衡及其应用. *冰川冻土*, 1996, 18(1): 1-9.]
- [17] Wang Xin, Xie Zichu, Feng Qinghua. The calculated ELA and its distribution characteristics of the glacier system in the Tarim River Basin. *Journal of Glaciology Geocryology*, 2003, 25(4): 380-388. [王欣, 谢自楚, 冯清华. 塔里木河流域冰川系统平衡线的计算及其分布特征. *冰川冻土*, 2003, 25(4): 380-388.]
- [18] Braithwaite R J, Raper S C B. Estimating equilibrium-line altitude (ELA) from glacier inventory data. *Annals of Glaciology*, 2010, 50(53): 127-132.
- [19] Braithwaite R J. From Diktors Schneegrenze to our modern glacier equilibrium line altitude (ELA). *The Cryosphere*, 2015, 9(6): 2135-2148.
- [20] Sakai A, Nuimura T, Fujita K, et al. Climate regime of Asian glaciers revealed by GAMDAM glacier inventory. *The Cryosphere*, 2015, 9(3): 865-880.
- [21] Nuimura T, Sakai A, Taniguchi K, et al. The GAMDAM glacier inventory: A quality-controlled inventory of Asian glaciers. *The Cryosphere*, 2015, 9(3): 849-864.
- [22] Du Jiankuo, He Yuanqing, Li Shuang. Mass balance of a typical monsoonal temperate glacier in Hengduan Mountains Region. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(9): 1415-1422. [杜建括, 何元庆, 李双. 横断山区典型海洋型冰川物质平衡研究. *地理学报*, 2015, 70(9): 1415-1422.]
- [23] Ignéczki Á, Nagy B. Determining steady-state accumulation-area ratios of outlet glaciers for application of outlets in climate reconstructions. *Quaternary International*, 2013, 293: 268-274.
- [24] Aoki T. Evaluation of the accumulation area ratio (AAR) method based on mass balance data for modern glaciers. *Geographical Review of Japan*, 1999, 72: 763-772.
- [25] Kern Z, László P. Size specific steady-state accumulation-area ratio: an improvement for equilibrium-line estimation of small palaeoglaciérs. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(19): 2781-2787.
- [26] Mandal A, Ramanathan A L, Angchuk T, et al. Unsteady state of glaciers (Chhota Shigri and Hamtah) and climate in Lahaul and Spiti region, western Himalayas: A review of recent mass loss. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(17): 1233.
- [27] Pratap B, Dobhal D P, Bhambri R, et al. Four decades of glacier mass balance observations in the Indian Himalaya. *Regional Environmental Change*, 2016, 16(3): 643-658.
- [28] Liu Qiao, Liu Shiyin. Response of glacier mass balance to climate change in the Tianshan Mountains during the second half of the twentieth century. *Climate Dynamics*, 2016, 46(1/2): 303-316.
- [29] Liu Shiyin, Yao Xiaojun, Guo Wanqin, et al. The contemporary glaciers in China based on the Second Chinese Glacier Inventory. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(1): 3-16. [刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状. *地理学报*, 2015, 70(1): 3-16.]
- [30] Guo Wanqin, Liu Shiyin, Xu Junli, et al. The second Chinese glacier inventory: data, methods and results. *Journal of Glaciology*, 2015, 61(226): 357-372.
- [31] Shi Yafeng, Liu Shiyin. Estimation on the response of glaciers in China to the global warming in the 21st century. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(7): 668-672.
- [32] Yang Zhenniang. Glacier water resources in china. *Resources Science*, 2003, 9(1): 46-55. [杨针娘. 中国冰川水资源. *资源科学*, 2003, 9(1): 46-55.]
- [33] Qian Zhengan, Jiao Yanjun. Advances and problems on Qinghai-Xizang Plateau meteorology research. *Advances in*

- Earth Science, 1997, 12(3): 207-216. [钱正安, 焦彦军. 青藏高原气象学的研究进展和问题. 地球科学进展, 1997, 12(3): 207-216.]
- [34] Wu Shaohong, Pan Tao, Cao Jie, et al. Barrier-corridor effect of longitudinal range-gorge terrain on monsoons in Southwest China. *Geographical Research*, 2012, 31(1): 1-13. [吴绍洪, 潘韬, 曹杰, 等. 西南纵向岭谷地形对季风的“通道—阻隔”作用. 地理研究, 2012, 31(1): 1-13.]
- [35] Wang Ninglian, He Jianqiao, Pu Jianchen, et al. Variations in equilibrium line altitude of the Qiyi Glacier, Qilian Mountains, over the past 50 years. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(33): 3810-3817.
- [36] Shi Yafeng, Xie Zichu. The basic characteristics of modern glaciers in China. *Acta Geographica Sinica*, 1964, 30(3): 183-213. [施雅风, 谢自楚. 中国现代冰川的基本特征. 地理学报, 1964, 30(3): 183-213.]
- [37] Wang Xiurong, Xu Xiangde, Wang Weiguo. Characteristic of spatial transportation of water vapor for Northwest China's rainfall in spring and summer. *Plateau Meteorology*, 2007, 26(4): 749-758. [王秀荣, 徐祥德, 王维国. 西北地区春、夏季降水的水汽输送特征. 高原气象, 2007, 26(4): 749-758.]
- [38] Zhang Zhonglin, He Yuanqing, Pang Hongxi, et al. Accumulation and moisture sources of the glaciers in China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(6): 729-735. [张忠林, 何元庆, 庞洪喜, 等. 中国冰川积累与水汽来源补给分析. 冰川冻土, 2004, 26(6): 729-735.]

Altitude structure characteristics of the glaciers in China based on the Second Chinese Glacier Inventory

ZHANG Xianhe¹, WANG Xin^{1,2}, LIU Shiyin², GUO Wanqin², WEI Junfeng¹

(1. Department of Geography, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China;

2. State Key Laboratory of Cryosphere Sciences, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: According to the Second Chinese Glacier Inventory (SCGI), Distribution of Glacier at Different Altitudes (DGDA), the Equilibrium Line Altitude (ELA) field and the Accumulation Area Ratio (AAR) in different mountains of western China were calculated and discussed systematically. The results show that: (1) The DGDA presents a pattern of normal distribution, the ratio of the percentage that the largest glacier area accounted for the total area to altitude difference of the glacier distribution can be used as the morphological parameters to delineate the character of the DGDA. (2) The ELA, affected by climate and topography, gradually decreases from south to north, and increases from east to west. Additionally, the ELA of the northwest and southern edges of the high mountains is more intensive than that of the Qinghai-Tibet Plateau. (3) The distribution of the AAR is related to the water vapor and topography. The AAR of the mountain exterior side and marine type glacier region is lower than 0.5, while that of the mountain interior side, the Tibetan Plateau inland and maximal continental glacier region is higher than 0.7.

Keywords: Second Glacier Inventory; area altitude distribution; equilibrium line altitude; accumulation area ratio; western China