

基于多源遥感数据的乌鲁木齐河源 1 号冰川平衡线高度研究

崔督督¹, 张彦丽^{1*}, 李忠勤², 陈茵鸿¹ (1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃兰州 730000; 2. 中国科学院西北生态环境与资源研究所, 天山冰川站冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃兰州 730000)

摘要 以我国天山乌鲁木齐河源 1 号冰川(以下简称 1 号冰川)为例, 基于 Landsat TM/ETM/OLI 和 Sentinel-2A MSI 数据, 利用归一化差异积雪指数(NDSI)和阈值法提取该冰川 2002—2015 年的平衡线高度, 并利用站点实测的冰川 ELA 数据和气象数据对提取的平衡线高度进行了验证。结果表明, 2002—2015 年遥感获取的平衡线高度呈总体上升的趋势, 与实测的平衡线具有高度相关性($r=0.9$); ELA 与年物质平衡序列高度相关, 物质平衡波动的平均解释率可高达 69%; 与气象要素(温度和降水)年际变化的相关性也很高, 约有 59% 的冰川 ELA 变化可以用夏季气温和降水来解释。因此, 利用遥感数据可以提取高精度的冰川平衡线高度数据, 对无站点数据冰川的平衡线高度以及物质平衡研究具有一定的借鉴意义。

关键词 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川; 平衡线高度; 多源遥感数据; 归一化积雪指数

中图分类号 P 237 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2020)03-0061-08

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.03.019

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study on the Equilibrium Line Altitude Based on Multi-source Remote-Sensing Data of Urumqi Glacier No. 1 in Tianshan

CUI Du-du¹, ZHANG Yan-li¹, LI Zhong-qin² et al (1. College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730000; 2. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources/Tianshan Glaciological Station, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000)

Abstract Taking the Urumqi Glacier No. 1 in Tianshan in China as an example, based on Landsat and Sentinel-2A MSI images, the glacier equilibrium line altitude was derived from the Normalized Difference Snow Index (NDSI) method and threshold setting degree. ELA was verified by using the measured glacier ELA data and meteorological data. The results showed that during 2002–2015, the overall trend of ELA derived from remote-sensing data was generally increasing, which was highly correlated with the ELA obtained from ground measurements ($r=0.9$). ELA had a high correlation with the annual mass balance sequence, and the average interpretation rate of the mass balance fluctuation could be as high as 69%; correlation with the inter-annual variability of meteorological elements (temperature and precipitation) was also high, and about 59% of glacial ELA changes could be explained by summer temperature. Therefore, remote sensing data can be used to extract the glacier equilibrium line altitude, and then used to estimate the equilibrium line altitude and mass balance of glaciers where no ground measurements exist, it has certain reference significance.

Key words Urumqi Glacier No. 1 in Tianshan; Equilibrium line altitude; Multi-source remote sensing data; Normalized difference snow index

冰川是世界水文循环的重要组成部分,是了解区域和全球气候变化的关键^[1-6]。在小冰期(LIA)结束时,由于全球变暖,温度波动的增加导致冰川消融增加和平衡线上升,以致于山地冰川大量退缩,尤其是在 20 世纪 80 年代。冰川平衡线是冰川积累区和消融区之间的边界,在平衡线上积累和消融达到平衡,气候变化直接影响平衡线的波动。冰川物质平衡线高度(ELA)是冰川的年物质收入和支出完全相等的高度^[7-9]。ELA 是冰川的重要参数,通常用作冰川物质平衡的代表,因为它与物质平衡具有极好的相关性。众多学者研究表明,消融期结束时的雪线高度(SLA)可以代替冰川年度 ELA,由于在消融季节结束时光学影像中可以很容易地识别出雪线位置^[10-21]。

传统的雪线分布数据是通过对比冰川区域和积雪分布区域的实地考察,结合地形等资料确定并记录下来的。最初获取雪线高程和平衡线高度多采用人工手段,如 Dong 等^[22]利用测得的冰川资料对乌鲁木齐河源 1 号冰川平衡线的趋势进行了特征分析,但这种方法周期长、成本高、获取样本数量有限;随后利用赫斯法^[23]实现了雪线高度间接

测量,如邓育武等^[24]、聂宁等^[25]利用此方法获得的数据对青藏高原区域的雪线进行了研究,此方法虽然弥补了直接测量的一些弊端,但所计算的雪线高度仅限于较大冰川。随着遥感技术的发展,冰雪信息提取从定性发展到定量化,为冰川动态研究提供了大量的基础数据^[26-37]。该研究旨在利用 Landsat TM/ETM+/OLI 影像和哨兵卫星 Sentinel-2A MSI 数据,验证归一化积雪指数法反演冰川雪线的可行性,以此来推导平衡线高度,研究 1 号冰川的平衡线高度在 2002—2015 年的变化;同时,结合气温和降水量数据,探索该地区平衡线高度变化对气候变暖的响应及其对气候变化的敏感性,一方面,为之后利用平衡线高度估算冰川物质平衡提供数据参考,另一方面可以为缺乏实测资料的冰川研究提供方法借鉴。

1 资料与方法

1.1 研究区概况 1 号冰川(地理坐标 43°06'N、86°49'E)是我国天山中部天格尔山北坡的乌鲁木齐河源,距新疆自治区首府乌鲁木齐市 120 km(图 1)。该冰川长 2.41 km,面积 1.73 km²,海拔最高为 4 486 m,由东西两支组成(1993 年分离,图 2),为双冰斗山谷冰川。冰舌东支 3 740 m,西支 3 830 m,多年平均 ELA 约为 4 055 m,冰川垂直高差约 750 m。该冰川距亚洲地理中心仅有 100 km 左右,是我国监测时间最长、监测资料最为系统的冰川。但是,作为在天山乃至我国西北部地区有典型代表性的冰川,1 号冰川自 1959

基金项目 国家自然科学基金项目(41561080,41871277);中国博士后科学基金项目(2016M602893)。

作者简介 崔督督(1995—),男,陕西西安人,硕士研究生,研究方向:定量遥感及其应用。*通信作者,副教授,博士后,硕士生导师,从事定量遥感及其应用研究。

收稿日期 2019-10-16;修回日期 2019-11-04

年开始观测以来一直处于退缩的状态,这一退缩在 20 世纪 80 年代,尤其是 90 年代中期以后出现了明显的加速趋势^[38-41]。因此,对 1 号冰川的研究具有现实意义。

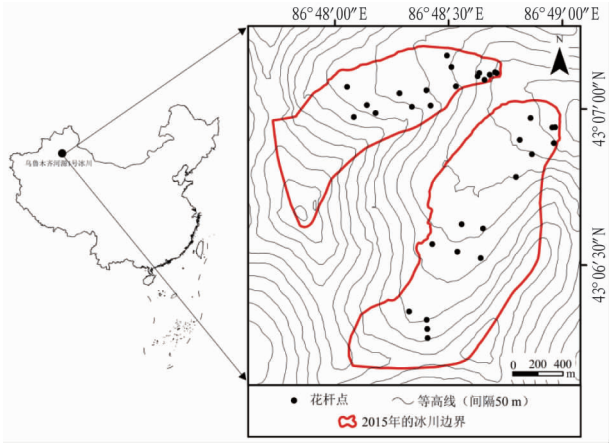


图 1 天山乌鲁木齐 1 号冰川位置
Fig. 1 Location of Urumqi Glacier No. 1, Tianshan



图 2 乌鲁木齐天山 1 号冰川
Fig. 2 Urumqi Glacier No. 1, Tianshan

表 1 Landsat 数据和 Sentinel-2 数据
Table 1 Landsat data and Sentinel-2 data

轨道号 Track number	获取日期 Get date	传感器 Sensor	太阳方位角 Solar azimuth/°	太阳高度角 Solar elevation angle/°
143/030	2002-08-14	TM5	133.24	53.20
	2003-08-17	TM5	135.08	52.91
	2004-07-17	TM5	126.76	61.33
	2005-08-14	ETM+	138.41	54.97
	2006-08-01	ETM+	134.39	57.98
	2010-08-20	TM5	140.90	53.67
	2011-08-07	TM5	135.98	56.71
	2012-08-25	ETM+	147.49	50.40
	2014-08-15	OLI	142.94	56.07
	2015-08-26	ETM+	146.47	53.13
T45TVH	2016-07-28	MSI	140.52	65.76
	2018-08-27	MSI	150.82	58.58

1.3 原理和方法

1.3.1 雪线提取原理。与一般的地物相比,冰川积雪在可

1.2 数据来源 Landsat 影像来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)和 USGS(美国地质调查局,<http://www.usgs.gov>)数据共享平台;Sentinel-2A 影像来自欧洲航天局(EESA)(<https://scihub.copernicus.eu/>);DEM 来自 TanDEM-X(<https://tandemx-science.dlr.de/>)。1 号冰川实测数据摘自天山冰川年报和冰川物质平衡公报(<http://www.wgms.cn>);同期的气象资料来自大西沟气象站(3 539 m,43°06'N、86°50'E),该气象站距离 1 号冰川 2.5 km。

依据整个冰川区域无云以及冰川消融结束时的遥感图像(图像中没有季节性积雪),研究共选取了 12 幅影像对冰川变化进行监测。但是受云的遮蔽卫星影像上无法识别地表真实情况或是夏末发生降雪完全覆盖冰川等客观因素的限制,同一颗卫星的遥感影像数据不能满足研究的需要,该研究选用多源遥感数据对 1 号冰川 ELA 进行研究。研究所用的数据集主要来源于以下卫星:Landsat TM/ETM+/OLI 和 Sentinel-2A MSI,空间分辨率范围为 10~30 m,具体如表 1 所示。

见光波段/近红外(0.4~1.1 μm)具有较高的反射率。在 0.5~0.7 μm 的可见光范围内,冰的反射率在 30%~60%,雪的反射率高达 80%;在 0.7~1.1 μm 的近红外范围内,冰雪的反射率显著低于可见光的反射率^[19-21]。由于可见光和短波红外波段已成功应用于冰川测绘,因此可以在此使用可见光和短波红外波段的组合来识别遥感数据上的冰雪,物理基础^[31,42]如下:①雪在可见光波段具有较高的反射率,在短波红外波段具有较强的吸收特性;②大多数云在可见光范围内也具有较高的反射率,在短波红外范围内具有较高的反射率,具体提取流程如图 3 所示。表 2 列出了 Landsat 3 个传感器 TM/ETM+/OLI 的光谱范围和空间分辨率以及 Sentinel-2A MSI 的等效频段。空间分辨率(以 m 为单位)采用颜色编码:10(绿色)、15(蓝色)、20(红色)和 30(黑色)。

1.3.2 数据预处理。首先,通过 ENVI 5.4 软件对 Landsat TM/ETM+/OLI 图像进行辐射校准和大气校正,使用 DEM 数据执行地形校正;其次,通过 VNIR 波段的灰度值(DN)除以 SWIR 的灰度值(DN)最大限度地减少由于地形造成的照明

效果,并且让冰川在深色背景下突出。Sentinel-2 L1C 是经过几何精校正的大气表观反射率产品和正射影像,因此只需要进行辐射定标和大气校正。

表 2 用于冰川测绘的光学传感器的光谱带范围
Table 2 Spectral band range of optical sensors for glacier mapping

波段 Waveband	波段号 Waveband number				Landsat 的光谱带 Landsat's spectral band//μm			Sentinel-2A MSI 的光谱带 Spectral band of Sentinel-2A MSI//μm
	TM	ETM+	OLI	MSI	TM	ETM+	OLI	
Blue	1	1	2	2	0.45~0.52	0.45~0.52	0.45~0.51	0.46~0.52(10 m)
Green	2	2	3	3	0.52~0.60	0.53~0.61	0.53~0.60	0.54~0.58(10 m)
Red	3	3	4	4	0.63~0.69	0.63~0.69	0.63~0.68	0.65~0.68(10 m)
NIR	4	4	5	8	0.76~0.90	0.76~0.90	0.85~0.89	0.78~0.90(10 m)
SWIR	5	5	6	11	1.55~1.75	1.55~1.75	1.56~1.66	1.57~1.66(20 m)
SWIR	7	7	7	12	2.08~2.35	2.09~2.35	2.10~2.30	2.10~2.28(20 m)
Pan	—	8	8	—	—	0.52~0.90(15 m)	0.50~0.68(15 m)	—

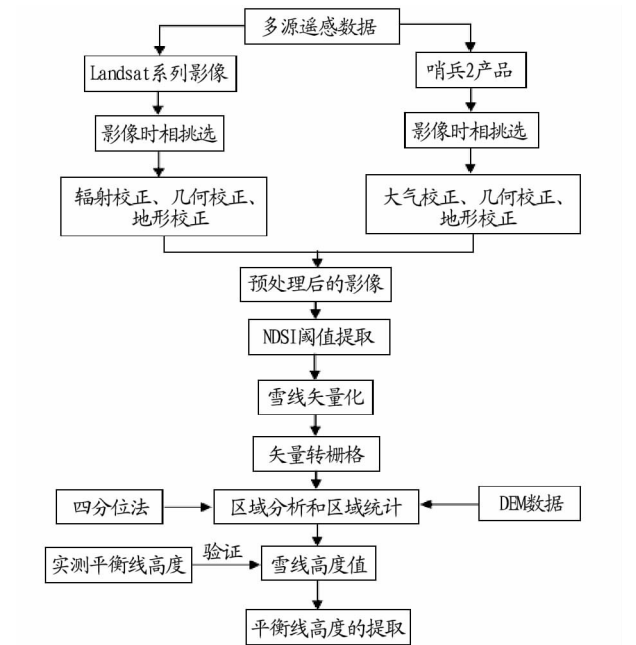


图 3 平衡线高度提取流程

Fig. 3 Flow of balance line height extraction

1.3.3 雪线遥感提取方法。归一化差异积雪指数(NDSI)使用可见光和短波红外的组合来突出显示图像中雪的覆盖范围。ENVI 5.4 中 NDSI 算法的初衷是基于 MODIS 的频带 4 (0.555 μm)和频带 6(1.640 μm)的频带组合。然而,该算法也适用于具有绿波段(0.5~0.6 μm)和短波红外波段(1.50~1.75 μm)的多光谱传感器的任何传感器。依此,NDSI 阈值提取方法可用于识别雪。具体算法公式如下:

$$NDSI = \frac{CH_n - CH_m}{CH_n + CH_m} = \frac{\rho_n - \rho_m}{\rho_n + \rho_m}$$

(1)

其中,ρ_n和ρ_m分别表示遥感影像第n、m波段的反射率或灰度值(DN值)。TM/ETM+可以选择2波段和5波段;OLI可以选择3波段和6波段;Sentinel-2A 搭载的 MSI 可以选择3波段和11波段。有学者认为全球 NDSI 阈值应该是确定性的并且将阈值设置为0.4,当NDSI>0.4时,像素被定义为雪^[42-43]。然而,区域尺度上的 NDSI 阈值尚不确定,区域积雪覆盖图中仍需要进行 NDSI 阈值选择的试验。因此,

对于不同传感器的遥感数据由于采集系统、大气条件、地形和波段的差异,结果不尽相同。在该研究领域的试验和之前的研究中^[44],NDSI 阈值为0.57~0.72。由于可见光和短波红外波段中的雪和水的反射特性相似,该阈值识别出的积雪中有水体存在。为了进一步识别积雪,近红外波段水的强吸收和积雪的吸收弱于水体,增加了雪识别的另一个判别因素:b₄≥0.11。其中b₄是近红外波段,TM/ETM+可选择4波段;OLI可以选择5波段;Sentinel-2A MSI 可以选择8波段。因此,当满足0.57≤NDSI≤0.72且b₄≥0.11时,该像素被识别为雪。分类后,手动将冰雪分界线数字化。雪线通常不与高程线平行,通过目视解释进行校正,以确定最终雪线的位置。

1.3.4 平衡线高度估算。在 ArcGIS 10.3 中,将遥感影像中的雪线进行矢量化,在矢量化的过程中将雪线矢量在冰雪覆盖度高并且是几乎连续的最高海拔处,利用要素转栅格工具,将矢量格式的雪线转换为栅格格式并与 DEM 数据进行叠加,然后利用 Spatial Analyst 工具下的区域分析、分区统计工具来统计最终确定的雪线与研究区冰川 DEM 相交的所有像元的高程值,最后,利用四分位数学统计方法平滑雪线高程数据的误差,具体公式如下:

$$IQR = Q_3 - Q_1$$

(2)

$$P_+ = Q_2 + a \times IQR$$

(3)

$$P_- = Q_2 - a \times IQR$$

(4)

IQR 常与中位数一起描述资料的分布特征。其中,IQR 为四分位差,Q₁为上1/4分位点,Q₃为下1/4分位点。在统计方法中,Q₂通常用作预测数据。P₊和P₋分别为预测数据的上限和下限。其中,a是一个常数,可以根据不同的需要来取值(通常采用1.5)^[45],作为判断异常值的标准范围。在给定一组数据之后,可以用此方法来推测下一个数据的可能值和变化范围。

2 结果与分析

2.1 精度评估

2.1.1 平衡线高度精度验证。从图4可看出,在该研究中,根据遥感影像获得的東西支 ELA 和实地测量的 ELA 非常接近,研究时段反演的平衡线高度与实地测量平衡线高度的变

化规律基本一致,相关性较好($R^2_{东}=0.65, R^2_{西}=0.83$)。但是在绝对数值上,二者存在的差异表明即使在天山的2个相邻冰川上,遥感反演 ELA 的适用性也不同^[46-49]。周围复杂的地形可能是造成差异的原因之一。虽然无法确定差异的确切原因,但鉴于当前数据的局限性和冰川融化的复杂性,它仍然存在。ELA 在不同冰川上存在空间变异性,该研究的范

围是整个冰川的年平均 ELA,因此在许多细节中都没有解决这个错误。图5显示了遥感影像反演的 ELA 与实地测量 ELA 之间的比较,两者具有较强的正相关,在这14年期间(2002—2015年)表现出良好的一致性($R^2=0.82, P<0.01$),这也进一步验证了使用遥感影像提取的雪线可以很好地用来指示平衡线^[11,50]。

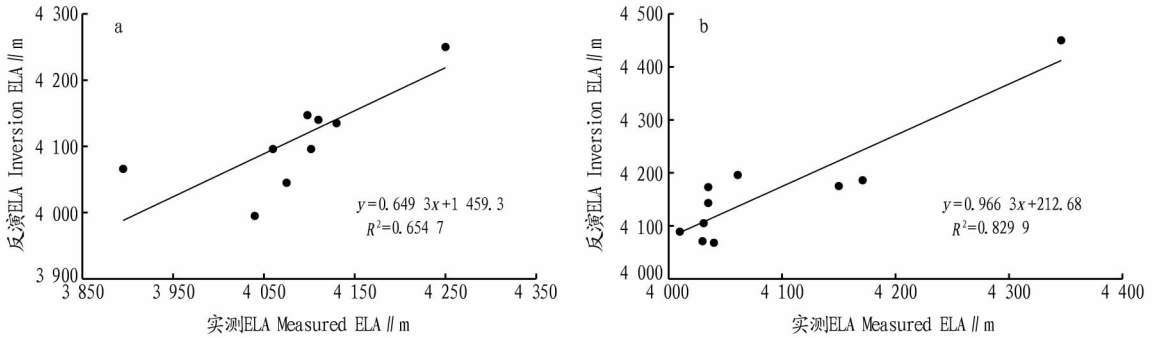


图4 冰川1号东支(a)和西支(b)遥感估算 ELA 与实地测量结果对比

Fig. 4 Comparison of ELA and field measurements by remote sensing estimation of the eastern branch (a) and west branch of Glacier No. 1

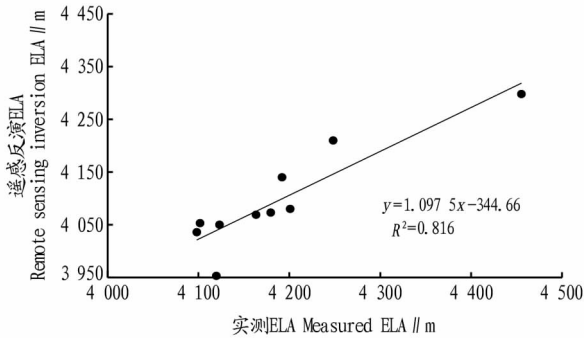


图5 遥感影像获取的 ELA 与从野外测量获得的 ELA 比较

Fig. 5 Comparison between ELA derived from remote-sensing data and ELA derived from field measurements

为了进一步检验遥感解译和分析精度的结果,除了与地面测量的直接比较方法,还可以通过计算提取雪线高程和“真值”的平均绝对误差(MAE)、标准偏差(SD)和均方根误差(RMSE),统计分析平衡线高度的精度。结果表明,从遥感影像获得的 ELA 的 RMSE 为 73 m, MAE 为 54.6 m, SD 为 118 m。

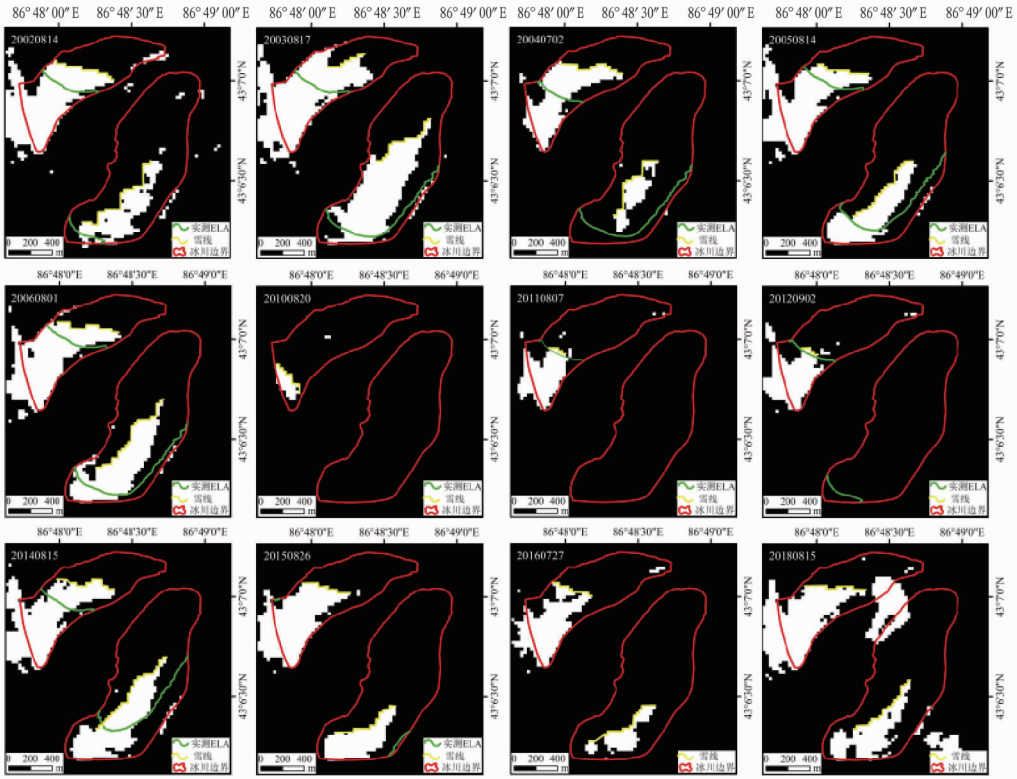
2.1.2 遥感提取平衡线高度与实测值空间分布对比分析。图6显示了遥感影像和地面测量中获得的 ELA 在遥感图中的良好对应关系,清楚地显示了它们之间的相似性。然而,在2003年,遥感影像得到的 ELA 与实地测量的 ELA 存在差异。一方面是因为冰川被薄薄的新雪层覆盖时发生不一致;另一方面可能与小云及其阴影有关。

2.2 1号冰川 ELA 的时空变化特征 基于上述验证,对1号冰川2002—2018年的平衡线高度(图7a)进行了提取。研究时段内该冰川平衡线高度变化呈波动变化趋势,2002—2004,2005—2012年都呈上升趋势,上升速率分别为6、37 m/a;2014—2018年呈下降趋势,下降速率为36 m/a。研究时段内粒雪线平均海拔为4 096 m,最高值出现在2010年,海拔为4 298 m,最低值出现在2003年,海拔为3 953 m。即

使时间序列太短而无法进行很准确的趋势分析,也可以推断出 ELA 在2002—2018年总体呈略有增长的趋势。1号冰川冰川平衡线高度变化趋势与其同期观测冰川近22年(1994—2015年)平衡线高度(图7b)的变化趋势基本一致。

2.3 平衡线高度与物质平衡、积累区比率以及消融量的关系 ELA 随时间的变化反映了不同平衡年份冰川总积累与总融化量之间的巨大差异。物质平衡越小,冰川融化越强,ELA 越高;反之,物质平衡越大,冰川的积累越多,ELA 越低^[41,50-52]。ELA 的年际变化与从实地测量获得的物质平衡基本一致。ELA 可用来计算冰川物质平衡,高(低)ELA 意味着负(正)或更少正(负)物质平衡。图8说明了从遥感数据得到的 ELA 与实地测量得到的物质平衡之间的关系,显示了2002—2015年的良好一致性($R^2=0.69$)。因此,在后期的研究中,遥感影像得到的 ELA 可以很好地被用来指示物质平衡。

积累区比率(AAR)是指冰川积累区面积与其总面积的比值,其大小反映了冰川补给条件的优缺点^[9],它可以作为衡量 ELA 变化的重要指标。在研究期间,1号冰川的 AAR 显示出显著的下降趋势(图9a)。统计分析表明,冰川 AAR 为0~51.3%,AAR 平均为28.4%。通常认为,当 AAR 约为60%时,冰川处于稳定状态。然而,2002—2015年1号冰川的平均 AAR 为28.4%,表明冰川目前正在退缩。从遥感数据估算的 ELA 与现场测量得到的 AAR 之间的关系(图9b)可以看出,它们之间是负相关($R^2=0.81$);ELA 越高(越低),AAR 越低(越高);消融越强烈,ELA 上升越明显;相反,冰川积累越多,相应的 ELA 就会下降。冰川消融量的变化直接影响 ELA 的变化^[8-9]。分析 ELA 与消融之间的差异和相关性(图10)发现,ELA 的年度变化与消融之间有强烈的相关性($R^2=0.61$),并且在整个研究期间呈增加上升趋势,表明 ELA 对消融的变化非常敏感;ELA 越高(越低),消融越高(越低)。



注:2010 年平衡线高度超过最高峰,2010、2011、2012 年东支模拟的雪线超过最高峰,2016、2018 年缺失实测值
Note:In 2010,the height of the balance line exceeded the highest peak. In 2010,2011 and 2012,the snow line of the east branch simulation exceeded the highest peak. In 2016 and 2018,the measured value was missing

图 6 遥感影像提取的雪线高度和实测 ELA 对比

Fig. 6 Comparison of snow line height and measured ELA extracted from remote-sensing data

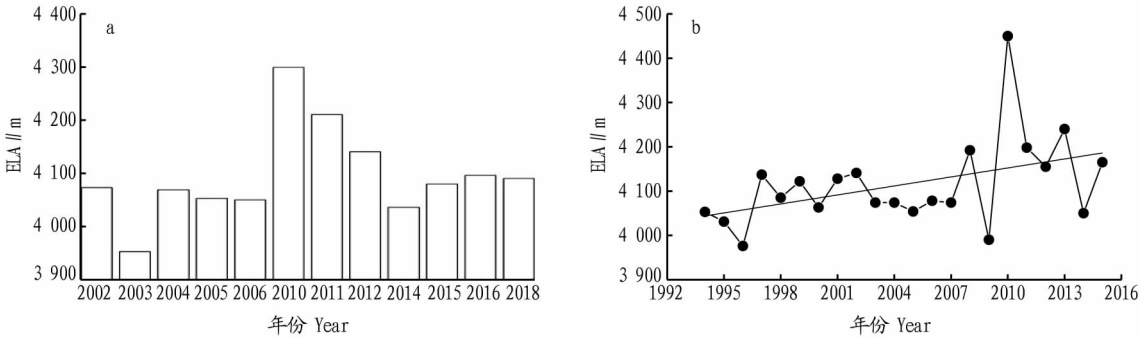


图 7 遥感提取的 2002—2018 年 (a) 和站点实测的 1994—2015 年 (b) 冰川 1 号 ELA 的变化特征

Fig. 7 The variation characteristics of Glacier No. 1 of ELA in remote sensing extracted from 2002–2018 (a) and stations measured in 1994–2015 (b)

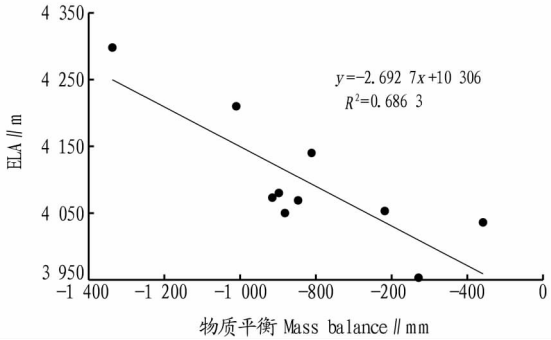


图 8 ELA 和物质平衡的关系

Fig. 8 The relationship between ELA and mass balance

2.4 平衡线高度对气候变化的敏感性 冰川的积累和消融受到当地气候的影响,降水决定了冰川的积累,总辐射决定了冰川的融化。通常,局部温度可以更好地代表总辐射^[1,3,6,53–55]。为了研究气候对 ELA 的影响,分析 ELA 与气候变量(温度和降水)之间的差异和相关性。从图 11 可以看出,ELA 的年变化与温度之间有强烈的相似性。温度越高,ELA 越高。此外,夏季温度比年平均温度对 ELA 变化的影响更显著,表明 ELA 对年均温的响应可能主要是由于夏季温度的变化,这反映了 ELA 变化对夏季温度变化的敏感性。除了温度,ELA 还受到冰川区降水量的影响^[51]。当降水增加时,ELA 可能会向下移动,并且它们呈负相关^[53]。图 12

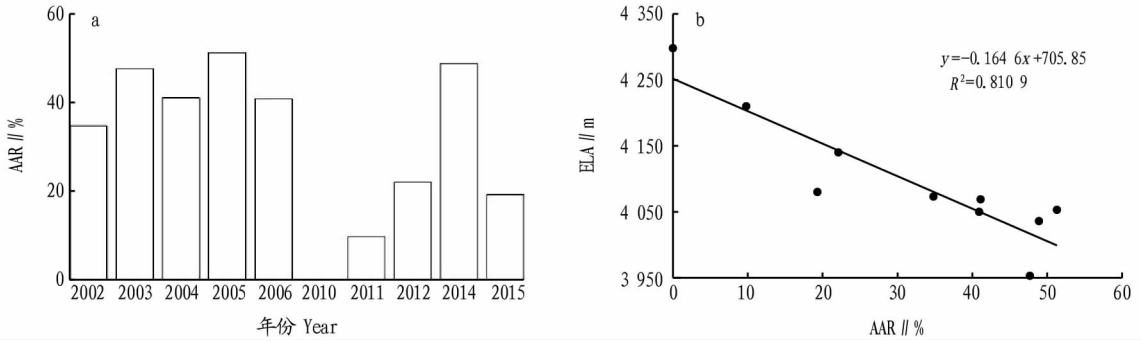


图9 冰川1号 AAR变化趋势(a)以及 ELA 与 AAR 的关系(b)

Fig. 9 Trend of AAR(a) and the relationship between ELA and AAR(b) of Glacier No. 1

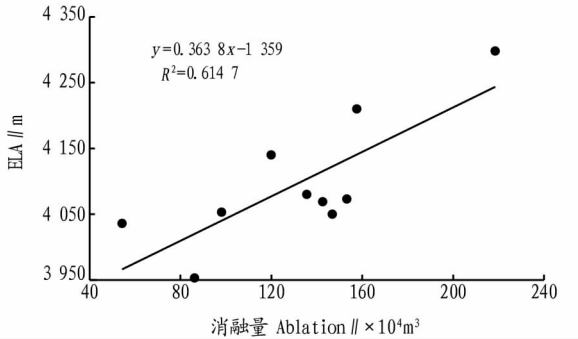


图10 ELA 和消融量的关系

Fig. 10 The relationship between ELA and ablation

显示了降水变化与 ELA 变化之间的关系,这些关系在统计上非常弱,然而,超过 95% 的降水发生在 4—10 月,7 和 8 月出现最大降水量。

为了便于分析气候敏感性和 ELA 的变化,使用 Linest 函数对 ELA、夏季温度和降水量进行多元线性回归。该函数使用最小二乘法将已知数据拟合到最佳直线中,然后返回到描述直线的数组。据此,获得了 2002—2015 年 ELA 与夏季温度 (T_s) 和年降水量 (P) 之间的关系: $ELA = 3960 + 62.2T_s - 0.173P$ 。回归方程的方差检验表明,相关系数 $r = 0.752$, $P < 0.01$ 。根据上述 ELA 与温度和降水量的关系模型,研究了冰川 ELA 的气候敏感性。如果年降水量恒定,夏季温度上升(或下降) 1°C ,则 ELA 将上升(或下降)约 62 m;如果夏季温度恒定,年降水量增加(或减少) 100 mm,那么 ELA 将下降(上升)约 17 m。与夏季温度相比,ELA 对降水量的敏感性较弱。从 ELA 的敏感性到夏季温度和年降水量可以看出,夏季温度是影响 ELA 变化的主要气候因素。与前人研究^[46]的结果相比,该结果显著较低。

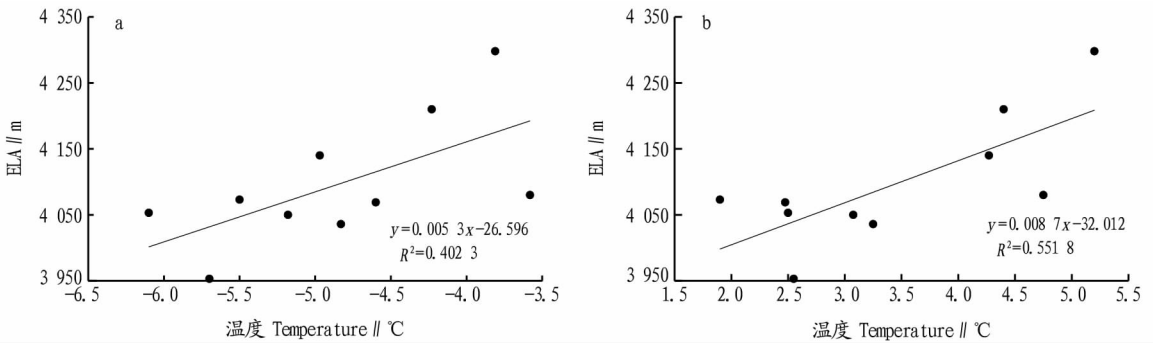


图11 ELA 与年平均温度(a)和夏季温度(b)的关系

Fig. 11 The relationship between ELA and annual mean temperature(a) and summer temperature(b)

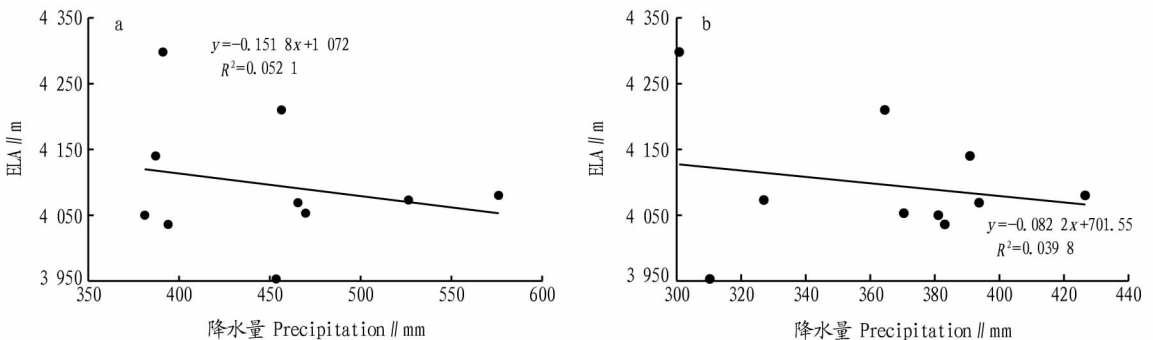


图12 ELA 与年降水量(a)和夏季降水量(b)的关系

Fig. 12 The relationship between ELA and annual precipitation(a) and summer precipitation(b)

2.5 冰川平衡线高度估算不确定性分析 综上所述,冰川平衡线高度估算的误差来源主要有以下几点^[13,32,51]:①云量的影响。薄的云可以通过较高的 SWIR 反射率在冰和雪上检测到,而光学上较厚的云顶可能是通过其较低的热红外辐射检测到的。但是,对于云层的光学薄边界,与冰和雪上的差异可能很小,云层部分可能仍留在冰川上,并被分类为雪。因而计算得出的平衡线高度因为云量的影响并不总是可靠的。②图像的像素大小以及影像选取的日期,取决于传感器,像素范围在 10~30 m,1 号冰川使用了 1985 年以来免费获得的 Landsat 数据和 Sentinel-2 数据(自 2015 年起)。遥感反演 SLA 时,Landsat 数据的主要缺点是 16 d 的重新访问时间。在整个研究期间,仅仅获得 12 幅 Landsat 影像,因而导致与实地测量值差异较大。③冰川的坡度为 $0.5^{\circ}\sim 77.3^{\circ}$,具体取决于冰川和任何一年中 SLA 所在的区域。④TanDEM 的垂直精度,约为 10 m。在平坦和光滑的地形上,DEM 的垂直精度通常比在崎不平的地形上要高得多。由于冰川表面相对平坦,因此可以假设误差未超过 DEM 的垂直精度(± 10 m)。其余的差异可能是由于雷达穿透或局部伪影所致^[32]。

3 结论

以我国天山乌鲁木齐河源 1 号冰川为例,利用归一化差异积雪指数(NDSI)和阈值法提取该冰川平衡线高度,并使用实测的冰川数据和气象数据对从遥感影像获得的平衡线高度的可信度进行分析。结果表明,2002—2015 年通过遥感数据得到的平衡线高度呈总体上升的趋势,这与实测的平衡线数值高度相关($r=0.9$)。ELA 与年物质平衡序列高度相关,物质平衡波动的平均解释率可高达 69%;与气象要素(温度和降水量)年际变化的相关性也很高,约有 59% 的冰川 ELA 变化可以用夏季气温和季节降水量来解释。因此,遥感数据可以很好地用来提取冰川平衡线高度,进而用来估算无观测地区冰川的平衡线高度以及物质平衡。

该研究表明,遥感可被视为重建 ELA 的适当工具。鉴于冰川实地测量数据的稀缺性,建模和遥感方法可用于交叉检查、验证和巩固结果,并改进气候-冰川相互作用的解释。在整个期间,使用光学遥感影像计算的 ELA 结果令人满意。虽然从遥感数据和野外测量中获得的 ELA 仍然有一点差别,但在中等山地尺度上提供了一种重建平衡线序的有效方法,首先遥感影像覆盖范围广,其次是方法比较简单。该研究提出的基于遥感反演的方法是研究 ELA 年系列的有力工具,有助于高山盆地的水文模拟。为了改善未来研究的结果,所提出的方法将使用具有更高时间分辨率的遥感数据,例如哨兵数据。因此监测 ELA 变化是一个长期的动态过程,利用长期序列的遥感数据和地面测量来监测冰川的变化并分析其与气候因素的关系将是未来研究的重点。

参考文献

[1] 姚檀栾. 冰川物质平衡、零平线及气候间的关系:以天山乌鲁木齐河源 1 号冰川为例[J]. 冰川冻土,1987,9(4):289-300.
[2] KUHN M. The response of the equilibrium line altitude to climate fluctuations:Theory and observations[M]//OERLEMANS J. Glacier fluctuations

and climatic change. Dordrecht;Kluwer,1989.
[3] OHMURA A,KASSER P,FUNK M. Climate at the equilibrium line of glaciers[J]. Journal of glaciology,1992,38(130):397-411.
[4] HOCK R,HOLMGREN B. Some aspects of energy balance and ablation of Storgläciaren,northern Sweden[J]. Geografiska annaler;Series A,physical geography,1996,78(2/3):121-131.
[5] WANG N L,HE J Q,PU J C,et al. Variations in equilibrium line altitude of the Qiyi Glacier,Qilian Mountains,over the past 50 years[J]. Chinese science bulletin,2010,55(33):3810-3817.
[6] OHMURA A,BOETTCHER M. Climate on the equilibrium line altitudes of glaciers:Theoretical background behind Ahlmann's P/T diagram[J]. Journal of glaciology,2018,64(245):489-505.
[7] 黄茂桓. 雪线、平衡线[J]. 冰川冻土,1992,14(3):285-286.
[8] 史建桥,白淑英,高吉喜,等. 近 10a 西藏高原雪线时空变化及其与气象因素关系分析[J]. 沙漠与绿洲气象,2015,9(3):7-13.
[9] 谢自楚,刘潮海. 冰川学导论[M]. 上海:上海科学普及出版社,2010:1-490.
[10] KULKARNI A V. Mass balance of Himalayan glaciers using AAR and ELA methods[J]. Journal of glaciology,1992,38(128):101-104.
[11] RABATEL A,DEDIEU J P,THIBERT E,et al. 25 years (1981-2005) of equilibrium-line altitude and mass-balance reconstruction on Glacier Blanc,French Alps,using remote-sensing methods and meteorological data[J]. Journal of glaciology,2008,54(185):307-314.
[12] RABATEL A,DEDIEU J P,VINCENT C. Using remote-sensing data to determine equilibrium-line altitude and mass-balance time series:Validation on three French glaciers,1994-2002[J]. Journal of glaciology,2009,51(175):539-546.
[13] RABATEL A,BERMEJO A,LOARTE E,et al. Can the snowline be used as an indicator of the equilibrium line and mass balance for glaciers in the outer tropics? [J]. Journal of glaciology,2012,58(212):1027-1036.
[14] RABATEL A,LETREUILLY A,DEDIEU J P,et al. Changes in glacier equilibrium-line altitude in the western Alps from 1984 to 2010:Evaluation by remote sensing and modeling of the morpho-topographic and climate controls[J]. The cryosphere,2013,7(5):1455-1471.
[15] 鲍伟佳,刘时银,吴坤鹏,等. 一种基于 MODIS 积雪产品的雪线高度提取方法[J]. 冰川冻土,2017,39(2):259-272.
[16] SAGREDO E A,LOWELL T V,KELLY M A,et al. Equilibrium line altitudes along the Andes during the Last millennium:Paleoclimatic implications[J]. The holocene,2017,27(7):1019-1033.
[17] SAHA S,OWEN L A,ORR E N,et al. Timing and nature of Holocene glacier advances at the northwestern end of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. Quaternary science reviews,2018,187(8):177-202.
[18] CHANDRASEKHARAN A,RAMANKARAN R A J,PANDIT A,et al. Quantification of annual glacier surface mass balance for the Chhota Shigri Glacier,Western Himalayas,India using an Equilibrium-Line Altitude (ELA) based approach[J]. International journal of remote sensing,2018,39(23):9092-9112.
[19] FALK U,LÓPEZ D A,SILVA-BUSSO A. Multi-year analysis of distributed glacier mass balance modelling and equilibrium line altitude on King George Island,Antarctic Peninsula[J]. The cryosphere discussions,2018,12(4):1211-1232.
[20] JIANG D B,LIU Y Y,LANG X M. A multi-model analysis of glacier equilibrium line altitudes in western China during the last glacial maximum[J]. Science China:Earth sciences,2019,62(8):1241-1255.
[21] RASTNER P,PRINZ R,NOTARNICOLA C,et al. On the automated mapping of snow cover on glaciers and calculation of snow line altitudes from multi-temporal landsat data[J]. Remote sensing,2019,11(12):1410.
[22] DONG Z W,QIN D H,REN J W,et al. Variations in the equilibrium line altitude of Urumqi Glacier No. 1,Tianshan Mountains,over the past 50 years[J]. Chin Sci Bull,2012,57(36):4776-4783.
[23] HESS H. Die Gletscher[M]. Braunschweig Verlag von F. Vieweg U. S.,1904:426.
[24] 邓育武,谢自楚,秦建新,等. 恒河-雅鲁藏布江流域雪线场的建立及其环境意义[J]. 冰川冻土,2006,28(6):865-872.
[25] 聂宁,张智杰,张万昌,等. 近 30a 来雅鲁藏布江流域冰川系统特征遥感研究及典型冰川变化分析[J]. 冰川冻土,2013,35(3):541-552.
[26] 蒋忠信. 雪线地带性的定量分析[J]. 冰川冻土,1984,6(2):27-35.
[27] LEONARD K C,FOUNTAIN A G. Map-based methods for estimating glacier equilibrium-line altitudes[J]. Journal of glaciology,2003,49(166):329-336.
[28] KIDDER S Q,WU H T. A multispectral study of the St. Louis area under

- snow-covered conditions using NOAA-7 AVHRR data[J]. Remote sensing of environment, 1987, 22(2): 159-172.
- [29] DROZ M, WUNDERLE S. Snow line analyses in the Alps based on NOAA-AVHRR data spatial and temporal patterns for winter and springtime in 1990, 1996 and 1999[J]. Geographica helvetica, 2002, 57(3): 170-183.
 - [30] MCFADDEN E M, RAMAGE J, ROBBELL D T. Landsat TM and ETM+ derived snowline altitudes in the Cordillera Huayhuash and Cordillera Raura, Peru, 1986-2005[J]. The cryosphere, 2011, 5(2): 419-430.
 - [31] 陈安安, 陈伟, 吴红波, 等. 2000-2013 年木孜塔格冰鳞川冰川粒雪线高度变化研究[J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1069-1078.
 - [32] HE J Q, WU Y W, GUO Z M, et al. Limitations in identifying the equilibrium-line altitude from the optical remote-sensing derived snowline in the Tien Shan, China[J]. Journal of glaciology, 2014, 60(224): 1093-1100.
 - [33] 唐志光, 王建, 梁继, 等. 基于 MODIS 的青藏高原雪线高度遥感监测[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(4): 767-774.
 - [34] MARINKA S, CHRISTOPH S, FABIEN M. MODIS-derived interannual variability of the equilibrium-line altitude across the Tibetan Plateau[J]. Annals of glaciology, 2016, 57(71): 140-154.
 - [35] 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 predictors (2001-2012) [J]. Geografiska annaler; Series A, physical geography, 2015, 97(3): 599-614.
 - [36] BRAHMBHATT R M, BAHUGUNA I, RATHORE B P, et al. Variation of snowline and mass balance of glaciers of Warwan and Bhut Basins of Western Himalaya using remote sensing technique[J]. Journal of the Indian society of remote sensing, 2012, 40(4): 629-637.
 - [37] 肖飞, 杜耘, 凌峰, 等. 基于水流路径分析的雪线数字提取[J]. 遥感学报, 2010, 14(1): 55-67.
 - [38] 李忠勤, 韩添丁, 井哲帆, 等. 乌鲁木齐河源区气候变化和 1 号冰川 40a 观测事实[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 117-123.
 - [39] 李忠勤, 沈永平, 王飞腾, 等. 冰川消融对气候变化的响应: 以乌鲁木齐河源 1 号冰川为例[J]. 冰川冻土, 2007, 29(3): 333-342.
 - [40] 蒲红铮, 韩添丁, 李向应, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川物质平衡高度变化特征及其对径流的影响[J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1251-1259.
 - [41] 王卫东, 张国飞, 李忠勤. 近 52a 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川平衡线高度及其与气候变化关系研究[J]. 自然资源学报, 2015, 30(1): 124-132.
 - [42] HALL D K, FOSTER J L, VERBYLA D L, et al. Assessment of snow-cover mapping accuracy in a variety of vegetation-cover densities in central Alaska[J]. Remote sensing of environment, 1998, 66(2): 129-137.
 - [43] XIAO X M, SHEN Z X, QIN X G. Assessing the potential of VEGETATION sensor data for mapping snow and ice cover: A Normalized Difference Snow and Ice Index[J]. International journal of remote sensing, 2001, 22(13): 2479-2487.
 - [44] 曹梅盛, 李新, 陈贤章, 等. 冰冻圈遥感[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 60.
 - [45] 贾俊平, 何晓群, 金勇进, 等. 统计学[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2006.
 - [46] 王宁练, 姚檀栋, 田立德, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川的气候敏感性研究[J]. 干旱区地理, 1998, 21(4): 34-40.
 - [47] HOCK R, HOLMGREN B. Some aspects of energy balance and ablation of storglaciaren, northern Sweden[J]. Geografiska annaler; Series A, physical geography, 1996, 78(2): 121-131.
 - [48] HOCK R, HOLMGREN B. A distributed surface energy-balance model for complex topography and its application to Storglaciären, Sweden[J]. Journal of glaciology, 2005, 51(172): 25-36.
 - [49] HULTH J, ROLSTAD DENBY C, HOCK R. Estimating glacier snow accumulation from backward calculation of melt and snowline tracking[J]. Annals of glaciology, 2013, 54(62): 1-7.
 - [50] BRAITHWAITE R J. Can the mass balance of a glacier be estimated from its equilibrium-line altitude? [J]. Journal of glaciology, 1984, 30(106): 364-368.
 - [51] BAI Z Y, OHATA T, HIGUCHI K. Calculation results of radiational climate in glacierized cirque and glacier-free cirque at the headwater of Urumqi River in Tianshan Mountains[J]. Journal of glaciology & geocryology, 1989, 130(5): 491-500.
 - [52] BENN D I, LEHMKUHL F. Mass balance and equilibrium-line altitude of glaciers in high mountain environments [J]. Quaternary international, 2000, 65(99): 15-29.
 - [53] 王宁练. 冰川平衡线变化的主导气候因子灰色关联分析[J]. 冰川冻土, 1995, 17(1): 8-15.
 - [54] SAGREDO E A, RUPPER S, LOWELL T V. Sensitivities of the equilibrium line altitude to temperature and precipitation changes along the Andes [J]. Quaternary research, 2014, 81(2): 355-366.
 - [55] 史建桥, 白淑英, 高吉喜, 等. 近 10a 西藏高原雪线时空变化及其与气象因素关系分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2015, 9(3): 7-13.

(上接第 45 页)

- [6] 单守明, 杨恕玲, 王振平, 等. 负载量对宁夏设施草莓光合作用和果实品质的影响[J]. 北方园艺, 2011(1): 5-8.
- [7] 冉辛拓, 张新生. 不同负载量对苹果光和速率及干物质生产的影响[J]. 华北农学报, 2003, 18(S1): 131-132.
- [8] 李雄, 孙伯筠, 李福荣, 等. 苹果梨树适宜负载量及树体参数的研究[J]. 华北农学报, 1997, 12(4): 111-115.
- [9] 刘庆莲, 刘庆明, 师法萍, 等. 肥城桃负载量对果实品质及树势的影响[J]. 落叶果树, 2000(5): 42.
- [10] 刘铁铮, 赵习平, 付雅丽, 等. 负载量对金太阳杏果实品质的影响[J]. 河北农业科学, 2010, 14(2): 15-17, 59.
- [11] 陈海江, 徐继忠, 王颀, 等. 负载量对鸭梨果实内挥发性物质和氨基酸含量的影响[J]. 河北农业大学学报, 2004, 27(6): 38-40, 68.
- [12] 黄晶. 不同负载量对巨峰葡萄果实品质及生长的影响[J]. 山西果树, 2007(6): 42.
- [13] 肖凡. 负载量及套袋对木纳格葡萄产量和品质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [14] 吕洪兰, 万贵成, 杨治明, 等. 红地球葡萄负载量对果实品质和产量的影响[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2005(2): 24-25.
- [15] 蔡小东, 李树德, 董新平. 新疆三种主栽酿酒葡萄品种不同负载量对果实品质的影响研究[J]. 新疆农垦科技, 2013(6): 20-21.
- [16] 晁无疾, 陆家云. 脱落酸对葡萄上色和果实品质的影响[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2008(5): 29-30, 34.
- [17] KIEWER W M, WEAVER R J. Effect of crop level and leaf area on growth, composition, and coloration of Tokay grapes[J]. American journal of enology & viticulture, 1971, 22(3): 172-177.
- [18] JACKSON D I. Factors affecting soluble solids, acid, pH, and color in grapes[J]. American journal of enology & viticulture, 1986, 37(3): 179-183.
- [19] 刘传和, 陈杰忠, 朱洪运. 果树疏果研究概况[J]. 北方园艺, 2005(5): 32-33.
- [20] 豆一玲, 董新平, 张建昌. 不同负载量对霞多丽葡萄生长发育及酿酒品质的影响[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2010(1): 28-30.
- [21] 符晓敏, 廖康, 廖新福, 等. 负载量对促成栽培火焰无核葡萄光合作用和果实品质的影响[J]. 山西农业科学, 2014, 42(9): 956-959.
- [22] 周敏, 杨国顺, 毛永亚, 等. 湖南避雨栽培条件下红地球葡萄负载量研究[J]. 湖南农业科学, 2012(11): 107-109.