

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2024.170

引用格式: 张浔浔, 赵阳刚, 杨斌, 等. 青藏高原格拉丹东冰川动态监测及其变化成因分析[J]. 中国地质调查, 2024, 11(6): 121–133. (Zhang X X, Zhao Y G, Yang B, et al. Dynamic monitoring and change causes analysis of Geladandong glacier in Tibet Plateau[J]. Geological Survey of China, 2024, 11(6): 121–133.)

青藏高原格拉丹东冰川动态监测及其变化成因分析

张浔浔^{1,2}, 赵阳刚^{1,2*}, 杨斌^{1,2}, 吴淑莹^{3,4}, 段阳海^{1,2}, 刘玉⁵

(1. 中国地质调查局军民融合地质调查中心, 雅鲁藏布江中游自然资源西藏自治区野外科学观测研究站, 四川 成都 610036; 2. 自然资源要素耦合过程与效应重点实验室, 北京 100055; 3. 四川省华地建设工程有限公司, 四川 成都 610081; 4. 四川省地质矿产勘查开发局成都水文地质工程地质中心, 四川 成都 610081; 5. 中国科学院空天信息创新研究院, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100094)

摘要: 格拉丹东冰川群是长江正源沱沱河的发源地, 位于青藏高原腹地的唐古拉山脉, 探讨其冰川面积变化过程及变化成因对长江源头生态水资源的可持续利用和水循环过程等具有重要意义。研究采用随机森林法开展冰川遥感影像解译, 同时结合地形和气候数据探讨冰川面积变化的成因。结果表明: ①通过对比常用的7种计算机自动分类方法并经过精度评价, 最终确定随机森林法在开展大量连续的遥感影像自动解译过程中具有明显优势; ②1999—2022年, 研究区冰川面积呈波浪式递减趋势, 共减少64.25 km², 减少比例为10.22%, 减少趋势为2.94 km²/a; ③研究区内悬冰川的冰川末端形状较为平滑规则、对称、单峰明显, 冰川舌的末端形状较为不规则, 且边缘形状变化大, 外表形态受地形控制明显; ④海拔、坡向对冰川面积变化的影响显著, 在气候因素中, 气温是冰川变化的主要因素, 和冰川面积呈负相关关系。研究成果对明确长江源地区近年来的冰川变化特征及生态水资源的可持续利用提供了科学依据和数据支撑。

关键词: 格拉丹东冰川; 冰川变化; 遥感监测; 随机森林法; 气候变化

中图分类号: P343.6

文献标志码: A

文章编号: 2095–8706(2024)06–0121–13

0 引言

青藏高原及其周边地区是全球除南北两极外冰川分布数量最多、范围最广的地区, 冰川类型主要以山岳冰川为主^[1–5]。作为气候变化的指示器之一^[6], 山岳冰川对气候变化非常敏感, 因此关于山岳冰川变化对全球变暖响应的研究愈发受到重视^[7]。格拉丹东冰川位于青藏高原中部, 长江源最高峰唐古拉山的主峰, 由520条规模不等的冰川组成^[8–9]。作为我国最

长河流长江的发源地, 其冰川面积的变化敏锐指示着长江源地区气候及径流量的变化, 精确获取冰川的动态监测信息, 对于长江源头生态水资源的可持续利用和水循环过程具有重要意义。目前对冰川变化的研究大多是根据少数年份、少量数据, 对典型地区和典型冰川采用传统实地考察的方式来开展, 缺少大面积监测, 不利于对地处偏远、人员无法到达的山岳冰川进行研究^[10]。随着遥感、航空摄影和GIS技术的不断发展, 遥感数据的空间分辨率、时间分辨率和光谱分辨率等得到了极大提高, 卫星遥感成为快速、高效、半自动监

收稿日期: 2024–03–22; 修订日期: 2024–09–13。

基金项目: 西藏自治区科技计划项目“雅鲁藏布江中游水资源与生态效应监测体系构建及研究(编号: XZ202401JD0024)”、中国地质调查局“青藏高原高寒区资源与环境调查监测与评价(编号: DD20220881)”和“青藏高原沱沱河源区多年冻土对气候变化的响应(编号: 2022KFKTC007)”联合资助。

第一作者简介: 张浔浔(1995—), 男, 工程师, 主要从事自然资源调查、遥感调查和地球化学方面的研究工作。Email: zhangxunxun9511@163.com。

通信作者简介: 赵阳刚(1988—), 男, 高级工程师, 主要从事自然资源调查和矿产资源勘查方面的研究工作。Email: ygzhaoc028@163.com。

测大面积冰川变化的主要手段^[11-13]。遥感监测冰川目前主要有基于人工的目视解译和计算机自动分类两种方法^[14],主要过程是通过计算机自动分类方法进行数据解译,然后再结合目视解译来修改分类结果中的错分、漏分现象,这样既提高了效率,又保证了精度。计算机自动分类方法分为非监督分类法和监督分类法两大类^[15],这两类方法具有速度快、效率高的特点,但在精度方面受遥感图像质量、冰川干净程度、有无冰川湖泊等的影响,实际效果各有优劣^[16]。

本文基于计算机自动分类方法,以人工目视解译为标准,选择面向对象的随机森林法作为研究手段,开展研究区冰川数据的自动分类解译工作,同时结合地形和气候数据探讨冰川面积变化的影响因素。旨在明确研究区冰川面积变化的过程、趋势及其变化成因,为长江源头生态水资源的可持续利用、水循环过程、经济可持续发展等提供科学依据。

1 研究区概况

格拉丹东冰川位于青藏高原中部腹地的唐古拉山脉北坡(图 1),属内陆高寒山区,海拔 5 200 ~ 6 621 m^[17]。研究区受季风影响较小,具有海拔高、气温低和降水少等特点^[18],多源气候数据显示该地常年平均气温在 0℃ 以下,多年平均降水量约 250 mm,每年的最高气温和集中降水出现在 6—9 月。此外,格拉丹东冰川是长江的发源地,其冰川融水是长江源头的重要补给来源。

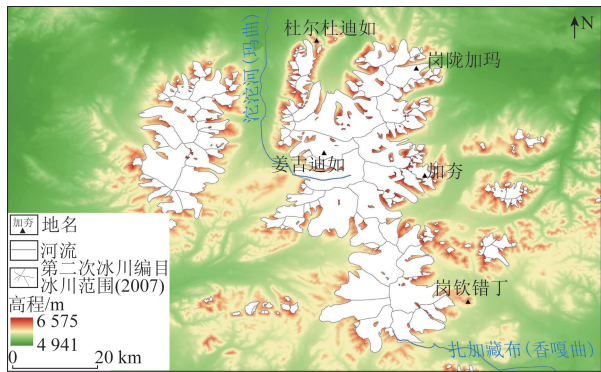


图 1 研究区冰川分布

Fig.1 Distribution of the glaciers in the study area

2 技术方法

2.1 数据来源

本次工作运用了研究区遥感卫星、地形、气象

数据等。其中,遥感数据采用了 Landsat7、Landsat8、资源 3 号和高分卫星数据(表 1),数据来自马里兰大学遥感数据下载中心(<http://glcfapp.glcf.umd.edu>)和美国地质调查局地球遥感数据下载中心。由于受夏季气温升高影响,冰川消融较快,导致冰川消融情况受季节性干扰,因此本文在影像选择上避开了夏季,剔除了 6—9 月影像,选取了 1—5 月和 10—12 月时段的影像。数字高程模型(digital elevation model, DEM)矢量地形数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所(http://www.igsnrr.ac.cn/tjpt/kjpt_zc/kjptzc_sjfw/),气象数据采用收集的格拉丹东冰川附近的安多和沱沱河气象站点数据。

表 1 多源数据信息

Tab.1 Multi-source data information

数据源	数据类型	时段	数据量/景	空间分辨率/m
遥感	LANDSAT	1999—2022 年逐年	133	15 ~ 30
	资源 3 号	2013—2017 年	8	2.1
	高分 1 号、高分 2 号	2013—2022 年	38	2 ~ 8
辅助数据	DEM 矢量地形数据	无	研究区范围	30 (ASTER - GDEM) 12 (ALOS) 10 (Google earth)
气象	日气象数据(降水量、温度、气压、湿度、风速)	1957—2022 年	气象站点	无

2.2 研究方法

2.2.1 冰川面积遥感数据解译

为选取计算机自动提取冰川的最优方法,对常用的 7 种计算机自动分类方法进行了比较,因涉及分类方法较多,以非监督分类法中的 K - Means 法与监督分类法中的随机森林法为例,对两种计算机分类的结果进行分析。K - Means 法使用聚类分析方法,随机地查找聚类簇的聚类相似度相近,利用各聚类中对象的均值获得一个“中心对象”来进行计算,然后对其进行迭代并重新配置,完成分类过程^[2]。随机森林法是非线性、有监督的分类模型,当一个样本输入时,随机森林中的每一棵决策树都进行判断,最终哪一类得到的结果最多,则输入的预测值就是最终决策值^[10]。由图 2 可见, K - Means 法受污雪和冰碛物的干扰影响很大,识别出的冰川边缘精度较低(图 2(a)),而随机森林法识别精度较高(图 2(b)),冰川边缘清晰准确,且在分类过程中效率较高。

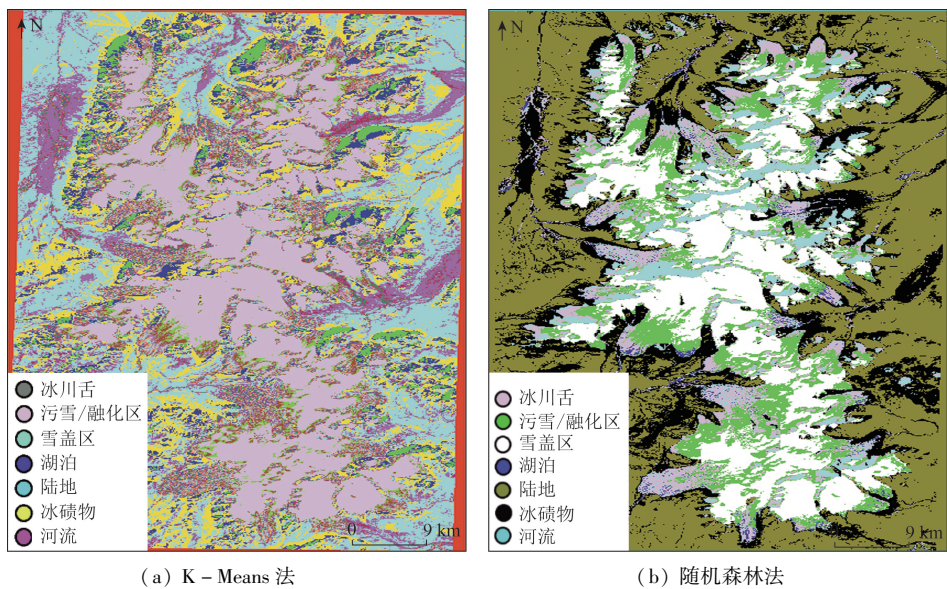


图2 K - Means 法和随机森林法分类结果对比

Fig.2 Comparison between K - Means method and random forest method classification results

为进一步量化不同解译方法之间的精度差异，本文以人工目视解译为标准，针对7种计算机自动分类方法进行了生产精度、用户精度、Hellden 精

度、Short 精度，总体精度及 Kappa 系数共6种精度定量评价^[19]，最终获得的7种计算机自动分类方法精度评价结果见表2。

表2 不同计算机自动分类方法精度对比

Tab.2 Accuracy comparison among different automatic computeried classification methods

精度类型	区域类型	非监督分类法		监督分类法				
		ISODATA 法	K - Means 法	基于像素		面向对象		
				最大似然法	最小距离法	最邻近法	随机森林法	SVM 法
生产精度	雪盖区	0.977 1	0.988 7	0.988 6	0.956 1	1.000 0	0.986 9	0.208 0
	污雪/融化区	0.071 9	0.061 8	0.823 0	0.135 4	1.000 0	0.938 5	0.523 0
	冰川舌	0.400 2	0.472 5	0.950 0	0.691 5	1.000 0	0.996 2	0.996 2
	陆地	0.942 5	0.845 3	0.976 6	0.909 2	0.996 0	0.981 0	1.000 0
	冰碛物	0.234 6	0.518 3	0.993 7	0.993 7	1.000 0	0.956 5	1.000 0
	湖泊	0.124 1	0.090 6	0.916 1	0.912 8	1.000 0	1.000 0	0.875 0
	河流	0.421 0	0.176 1	0.949 4	0.562 2	1.000 0	0.965 5	0.569 0
用户精度	雪盖区	0.694 5	0.700 4	0.907 5	0.722 9	1.000 0	0.967 1	0.775 0
	污雪/融化区	0.200 3	0.302 6	0.856 1	0.192 5	1.000 0	0.976 0	0.369 6
	冰川舌	0.938 4	0.941 8	0.987 6	0.949 2	1.000 0	0.988 8	0.810 4
	陆地	0.911 6	0.937 4	0.999 6	0.999 4	1.000 0	0.996 1	1.000 0
	冰碛物	0.124 5	0.185 9	0.717 6	0.397 7	1.000 0	0.916 7	0.730 2
	湖泊	0.011 5	0.011 5	1.000 0	0.079 0	1.000 0	0.666 7	0.875 0
	河流	0.135 4	0.038 1	0.671 6	0.309 0	1.000 0	1.000 0	0.942 9
Hellden 精度	雪盖区	—	—	—	—	1.000 0	0.976 7	0.328 0
	污雪/融化区	—	—	—	—	1.000 0	0.956 9	0.433 1
	冰川舌	—	—	—	—	1.000 0	0.992 5	0.893 8
	陆地	—	—	—	—	0.998 0	0.988 5	1.000 0
	冰碛物	—	—	—	—	1.000 0	0.936 2	0.844 0
	湖泊	—	—	—	—	1.000 0	0.800 0	0.875 0
	河流	—	—	—	—	1.000 0	0.982 5	0.709 7

续表

精度类型	区域类型	非监督分类法		监督分类法				
		ISODATA 法	K - Means 法	基于像素		面向对象		
				最大似然法	最小距离法	最邻近法	随机森林法	SVM 法
Short 精度	雪盖区	—	—	—	—	1.000 0	0.954 5	0.196 2
	污雪/融化区	—	—	—	—	1.000 0	0.917 3	0.276 4
	冰川舌	—	—	—	—	1.000 0	0.985 1	0.808 0
	陆地	—	—	—	—	0.996 0	0.977 2	1.000 0
	冰碛物	—	—	—	—	1.000 0	0.880 0	0.730 2
	湖泊	—	—	—	—	1.000 0	0.666 7	0.777 8
	河流	—	—	—	—	1.000 0	0.965 5	0.550 0
总体精度		0.692 5	0.705 8	0.961 0	0.803 7	0.998 7	0.978 2	0.774 8
kappa 系数		0.558 4	0.562 8	0.937 9	0.705 0	0.998 4	0.972 2	0.709 2

注：Kappa 系数利用整个误差矩阵的信息来反映整体的分类精度,Kappa 系数 <0.00 为很差,[0.00,0.20) 为差,[0.20,0.40) 为一般,[0.40,0.60) 为良好,[0.60,0.80) 为很好,[0.80,1.00) 为极好;“—”为无数据。

2.2.2 随机森林法解译处理流程

精度评价结果表明面向对象的监督分类法解译精度优于非监督分类法和基于像素的监督分类法,其中最邻近法和随机森林法都能提取出精度 98% 以上的冰川,效果较好。SVM 法相对较差,正确率仅有 70%(表 2)。通过方法对比,最终采取精度高、计算效率更好的随机森林法进行研究区冰川解译,具体流程如下(图 3):①数据准备,准备遥感影像和研究区的 DEM 数据和坡向信息;②创建分类样本,在 ENVI 中创建分类样本,选取地物之间可分离性大于 1.8 的类

别及可分离性较好的样本数据,作为随机森林法分类的样本;③影像分割,基于多尺度分割方法进行影像分割;④样本转化,在易康软件的 Process Tree 中,建立新进程“矢量转化为样本”;⑤随机森林分类解译,基于分割对象的均值和标准偏差特征,利用 Classifier Type 功能,进行随机森林分类解译,设置随机树的树木最大数为 40,森林精度为 0.01;⑥手动修改,虽然随机森林法精度较高,但仍存在少数错分、漏分现象,本文结合高精度(1.0~3.5 m)遥感影像,在后期进行手动修改,对有误分的水体、云层、阴影区进行校正。

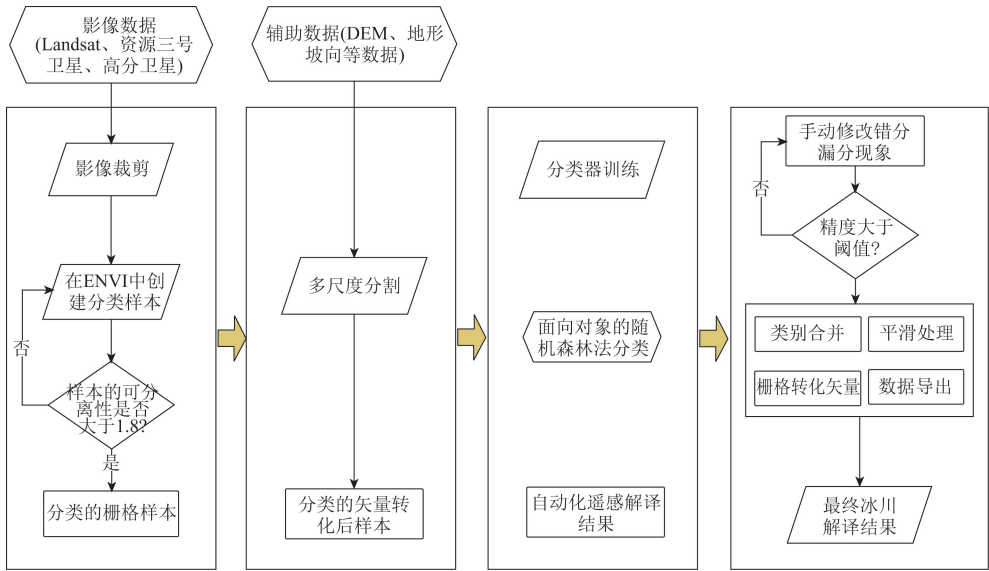


图 3 随机森林法解译处理流程

Fig. 3 Interpretation process by random forest method

3 结果与分析

3.1 冰川面积验证

为了验证本次研究结果的准确性,同时提高与

其他冰川研究的可对比性,本文比较了提取的 2007 年格拉丹东冰川面积与第二次冰川编目冰川面积(2007 年)^[20]之间的差异,为了与第二次冰川编目更好地进行比较,本文对研究区进行冰川分割(图 4(a)),并进一步根据人工目视解译进行手动修正,

特别是在冰舌末端的冰碛物和陆地光谱相似区,以及缺乏有效光谱信息的阴影区。最终将目视解译与随机森林法相结合的解译结果与第二次冰川编目冰川面积(2007 年)进行对比(图 4(b))。由图 4 可见,本研究大部分区域吻合较好,线条几乎重叠,证明了本研究提取的冰川面积的可信度。从数据上来看,第二次冰川编目研究区冰川提取面积为

616.17 km²,本文提取的冰川面积为 623.73 km²。从局部放大的曲线(图 4(c))可以看出,第二次冰川编目的冰川边缘过于光滑,而本文的解译图像展现了更多冰川边缘的细节部分,因此相对更为粗糙。导致此现象的原因是本研究采用的数据空间分辨率更高,方法也更为先进。结合实地调查和高分辨率遥感影像,本文提取的冰川边缘更为符合实际情况。

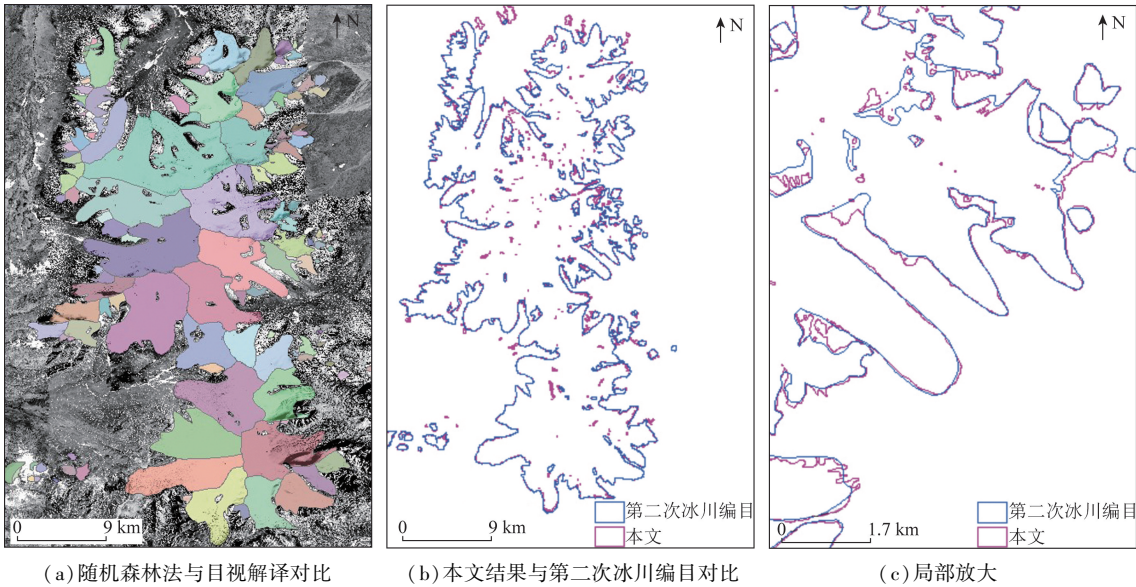


图 4 本文提取与第二次冰川编目 2007 年冰川面积对比

Fig.4 Glacier area contrast of 2007 between those extracted in this paper and those extracted in the second glacier inventory

3.2 冰川面积年际变化及变化趋势

格拉丹东冰川逐年的面积变化过程如图 5 所示,1999—2022 年的逐年冰川面积变化见表 3。对数据进一步分析得出:格拉丹东冰川主冰川平均面积为 617.57 km²,1999—2022 年冰川面积持续缩减,共减少 64.25 km²,减少比例为 10.22%,以 1999 年为参考,冰川平均每年减少 2.68 km²,减少比例约 0.42%。

为进一步定量分析冰川变化趋势,本文对冰川面积进行了滑动平均,并利用线性回归拟合了冰川面积随年份的变化(图 6)。从滑动平均曲线可以看出,格拉丹东冰川面积呈现波浪式逐年递减的趋势。从线性回归拟合可以看出,回归方程所能解释的因年份变异性的百分比为 59.42%,线性回归的表达式为

$$S_{Area} = 654.34 - 2.94a \quad (1)$$

式中: S_{Area} 为冰川面积,km²; a 为年份数, a 。计算得到面积倾向率为 2.94 km²/a,即每年减少 2.94 km²。

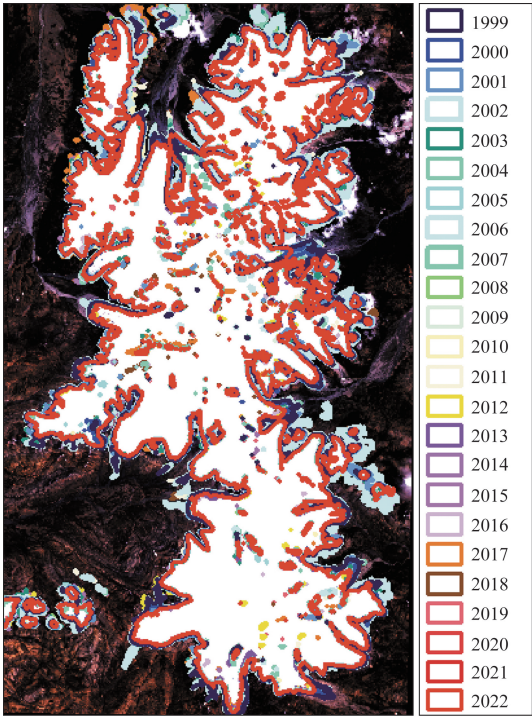


图 5 格拉丹东冰川逐年面积变化

Fig.5 Geladandong glacier area change by years

表 3 1999—2022 年格拉丹东冰川面积
Tab.3 Geladandong glacier area from 1999 to 2022

年份	冰川面积/km ²	距平/km ²	累计距平/km ²	比前一年增加的面积/km ²	比前一年增加的面积百分比/%
1999	628.60	7.06	7.06	—	—
2000	624.61	3.06	10.12	-3.99	-0.63
2001	643.45	21.90	32.02	18.84	3.02
2002	690.59	69.04	101.06	47.14	7.33
2003	651.66	30.11	131.17	-38.93	-5.64
2004	621.48	-0.07	131.10	-30.18	-4.63
2005	624.25	2.70	133.81	2.77	0.45
2006	627.35	5.80	139.61	3.10	0.50
2007	623.74	2.19	141.80	-3.61	-0.58
2008	644.42	22.87	164.67	20.68	3.32
2009	612.33	-9.22	155.45	-32.08	-4.98
2010	627.30	5.75	161.20	14.96	2.44
2011	625.42	3.87	165.07	-1.88	-0.30
2012	613.33	-8.22	156.85	-12.09	-1.93
2013	600.16	-21.38	135.47	-13.16	-2.15
2014	603.70	-17.85	117.62	3.54	0.59
2015	640.11	18.56	136.18	36.40	6.03
2016	588.08	-33.47	102.71	-52.03	-8.13
2017	605.70	-15.85	86.87	17.62	3.00
2018	608.83	-12.72	74.15	3.13	0.52
2019	586.02	-35.53	38.62	-22.81	-3.75
2020	582.93	-38.62	0.00	-3.09	-0.53
2021	583.17	-38.38	-38.38	0.24	0.04
2022	564.35	-57.20	-95.58	-18.82	-3.23
总和	—	—	—	-64.25	-10.22
平均	617.57	—	—	-2.68	-0.42

注：以 1999 年为参考，总冰川面积增加比例为 $100 \times (2022 \text{ 年冰川面积} - 1999 \text{ 年冰川面积}) / 1999 \text{ 年冰川面积} = -10.22\%$ ；平均每年增加的冰种面积比例为面积增加比例 / 24 a = -0.42% ；“—”为无数据。

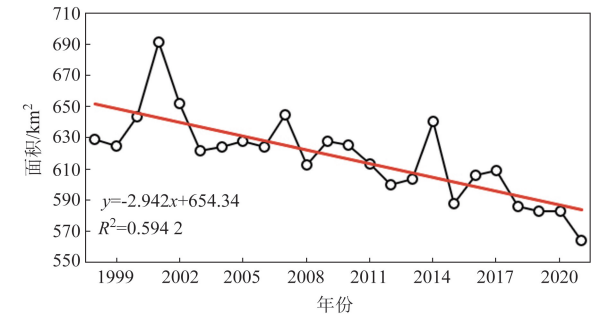


图 6 格拉丹东冰川面积和线性拟合

Fig.6 Geladandong glacier area and linear fitting

研究区冰川面积随着年份呈波浪起伏变化,为进一步反映冰川面积距离多年平均值的变化,本文对各年冰川面积进行距平累加,形成累计距平序列(图 7)。从图 7 可以看出,相对于 21 a 长期平均值,前 10 a 冰川面积均大于平均值,2010 年开始冰川面积持续下降,低于平均值,表明格拉丹东主冰

川在 2010 年后冰川面积持续减少,且消融速度呈现增加趋势。

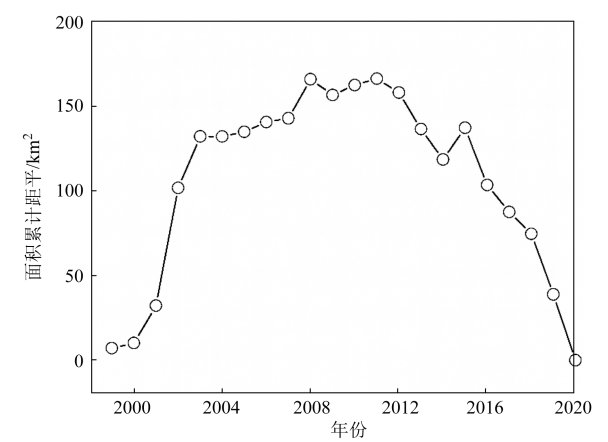


图 7 格拉丹东冰川面积累计距平序列

Fig.7 Cumulative deviation sequence of Geladandong glacier area

3.3 冰川边缘变化

3.3.1 1999—2022 年冰川边缘的前进后退
以 1999 年为参考,截至 2022 年格拉丹东冰川前进后退的分布见图 8。可以看出,研究区冰川总体面积呈明显退缩趋势,减少面积为 64.25 km²。然而,冰川面积在整体减少退缩的背景下既有前进也有后退,其中冰川后退的面积为 78.41 km²,冰川前进的面积为 14.16 km²,前进和后退的冰川规模差异较大。

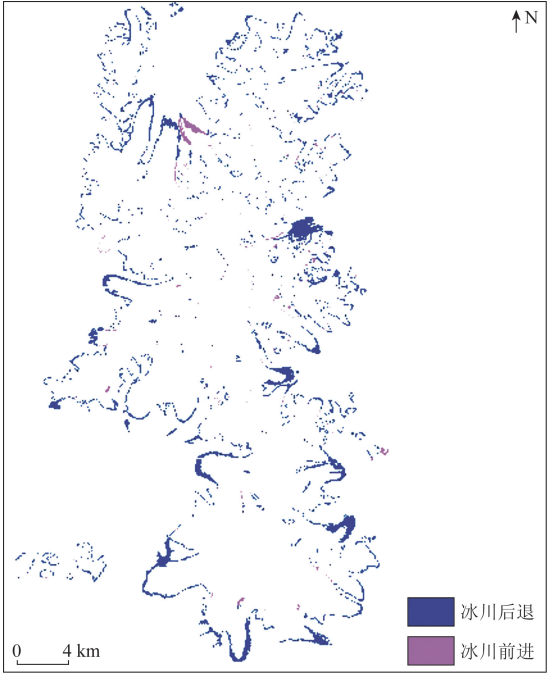


图 8 1999—2022 年格拉丹东冰川的前进后退

Fig.8 Geladandong glacier advance and retreat from 1999 to 2022

3.3.2 不同类型冰川的边缘变化

为了系统分析冰川边缘变化特征,本文将研究区分为等面积的 15 个子区域(图 9(a))。以 R1 区为例(图 9(b)),对所有子区域的立体分布特征及典型冰川的中流线与冰川边缘变化进行了细节研究,全面覆盖了格拉丹东冰川不同形状、规模和组合特征的冰川舌、悬冰川等地貌类型。总结各地貌图像特征后得出:①冰川舌的末端形状较为不规

则,且边缘形状变化大,外表形态受地形控制明显,地形平坦区域的冰川边缘较为破碎,冰川消融后变薄前伸,时常在空间上呈现局部扩张,地形陡峭区域的冰川边缘相对完整,呈单峰弧形(图 9(c));②悬冰川的冰川末端形状较为平滑规则、对称、单峰明显,不同年份的冰川边缘相对平行,前进后退规模相对较小(图 9(d));③由于冰川消融,冰川边缘后退,冰缘湖泊面积增大。

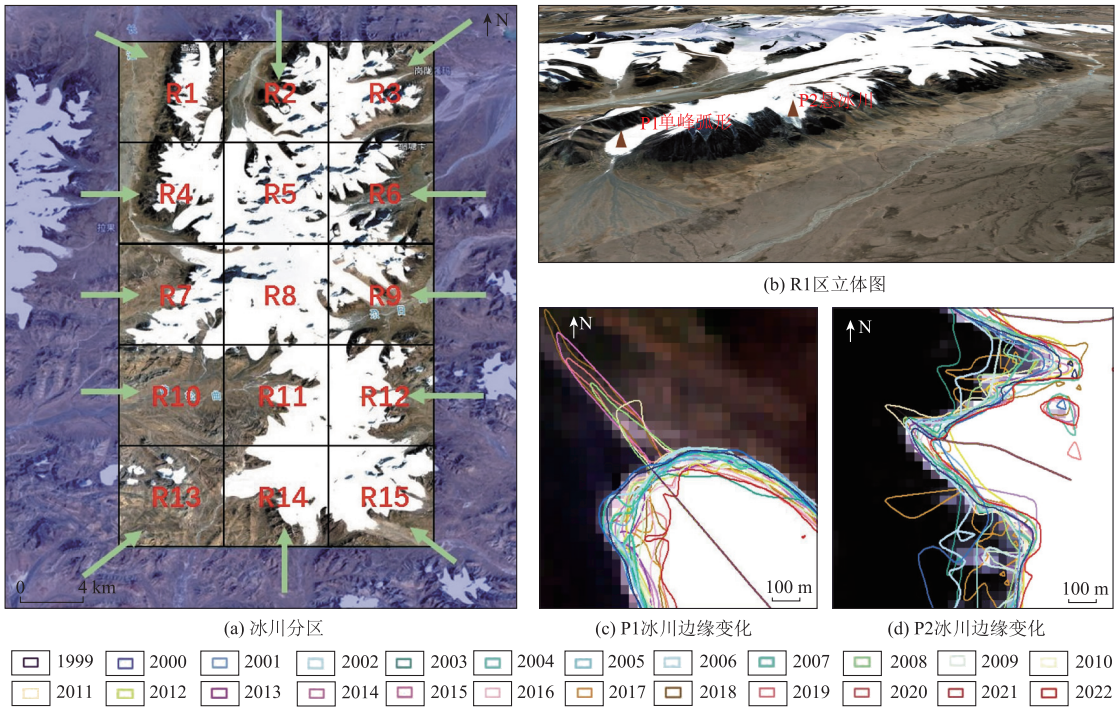


图 9 格拉丹东冰川分区及典型冰川的边缘变化

Fig. 9 Geladandong glacier zoning and the edge changes of typical glaciers

3.4 冰川变化成因分析

冰川是在严寒气候环境下形成的产物,其变化过程对气候十分敏感,其中气温和降水是影响冰川变化的两个重要因素^[21]。气温主要影响冰川的消融,降水主要影响冰川的积累,两者作用强度的不同使冰川呈现后退和前进的不同发育形态。此外,冰川变化的空间差异还是区域地形(海拔、坡向等)、冰川规模等因素综合作用的结果^[22]。为探究格拉丹东主冰川面积减少的原因,本文选取与冰川变化密切相关的地形因素和气候因素。其中,地形因素包括海拔和坡向,气候因素包括降水、气温、日照及气压。

3.4.1 地形因素

冰川海拔即冰川所在山脉的垂直高度,1999—2022 年格拉丹东前进和后退的冰川海拔分布见表 4 和图 10(a)。可以看出,冰川总体退缩明显,后退

面积为 59.33 km²,占总面积的 10.18%,部分冰川在前进,前进面积 7.69 km²(10(b))。冰川前进区域的海拔大多位于 5 848 ~ 6 211 m,冰川后退区域的海拔大多位于 5 486 ~ 6 393 m,占比 98%,尤其是 6 030 ~ 6 211 m 的冰川后退了 20.28 km²,占后退总面积的 34.46%(10(c))。进一步分析显示,研究区冰川从 5 122 m 开始融化后退,后退面积随海拔的增大而增加,直至海拔上升到 6 211 m 后,冰川后退开始减缓,后退面积随海拔的增大而减少。

冰川坡向即冰川所在山坡的朝向^[23],1999—2022 年格拉丹东冰川前进和后退的坡向分布见表 5 和图 11(a)。可以看出,前进冰川的坡向主要为 22.5° ~ 192.5°(东北、东、东南、南方向)(图 11(b)),后退冰川的方向主要为 102.5° ~ 337.5°(东南、南、西南、西、西北),其中正南方向冰川后退比

例最为明显,虽然后退面积不大,但冰川消融退缩最为强烈,变化比例为23.58% (图 11(c))。进一步分析表明格拉丹东冰川地处北纬正南方向,南坡

为朝阳向,该坡向冰川受到的太阳辐射最强,表明除了温度变化,太阳辐射的差异也使研究区偏南向的冰川相对活跃,偏北向的较为稳定。

表 4 1999—2022 年格拉丹东冰川前进和后退的冰川海拔分布

Tab. 4 Elevation distribution of the advancing and retreating glaciers in Geladandong from 1999 to 2022						
海拔/m	冰川前进			冰川后退		
	面积/km ²	占总前进面积的比例	变化比例/%	面积/km ²	占总后退面积的比例	变化比例/%
4 941 ~ 5 122	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.02	-2.71
5 122 ~ 5 304	0.05	0.70	0.65	-0.15	0.25	-4.71
5 304 ~ 5 486	0.12	1.53	1.04	-0.84	1.43	-4.31
5 486 ~ 5 667	1.72	22.54	0.85	-7.09	12.05	-5.59
5 667 ~ 5 848	1.78	23.44	1.21	-11.77	19.99	-8.50
5 848 ~ 6 030	1.93	24.27	2.63	-12.96	22.02	-29.34
6 030 ~ 6 211	1.82	23.88	3.57	-20.28	34.46	-74.98
6 211 ~ 6 393	0.27	3.58	0.00	-5.71	9.70	-100.00
6 393 ~ 6 575	0.00	0.00	0.00	-0.05	0.09	-0.00

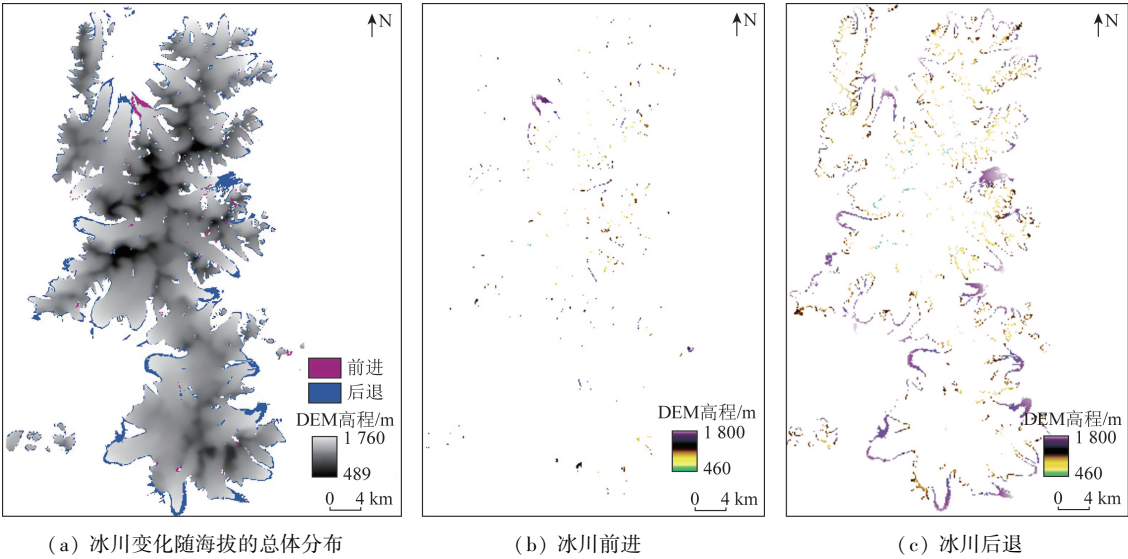


图 10 格拉丹东冰川前进后退的海拔分布

Fig. 10 Altitude distribution of the advancing and retreating glaciers Geladandong

表 5 1999—2022 年格拉丹东前进和后退的冰川坡向分布

Tab. 5 Slope distribution of the advancing and retreating glaciers in Geladandong from 1999 to 2022							
坡向		冰川前进			冰川后退		
方向	角度/(°)	变化面积/km ²	占总前进面积的比例/%	变化比例/%	变化面积/km ²	占总后退面积的比例/%	变化比例/%
平坦	0°	+0.07	0.91	+5.53	0.00	0.00	0
北	0° ~ 22.5°	+0.08	1.05	+0.22	-11.99	20.21	-9.98
东北	22.5° ~ 67.5°	+1.15	14.92	+1.54	-15.95	26.88	-8.65
东	67.5° ~ 102.5°	+1.02	13.25	+1.34	-10.78	18.17	-7.75
东南	102.5° ~ 147.5°	+1.48	19.25	+1.61	-8.76	14.76	-9.49
南	147.5° ~ 192.5°	+1.05	13.60	+0.96	-5.31	9.21	-23.58
西南	192.5° ~ 237.5°	+0.76	9.90	+0.86	-3.39	5.71	-9.78
西	237.5° ~ 282.5°	+0.47	6.07	+0.59	-1.70	2.86	-12.90
西北	282.5° ~ 337.5°	+0.91	11.79	+1.01	-0.97	1.64	-9.91
北	337.5° ~ 360°	+0.71	9.27	+1.53	-0.33	0.56	-7.96

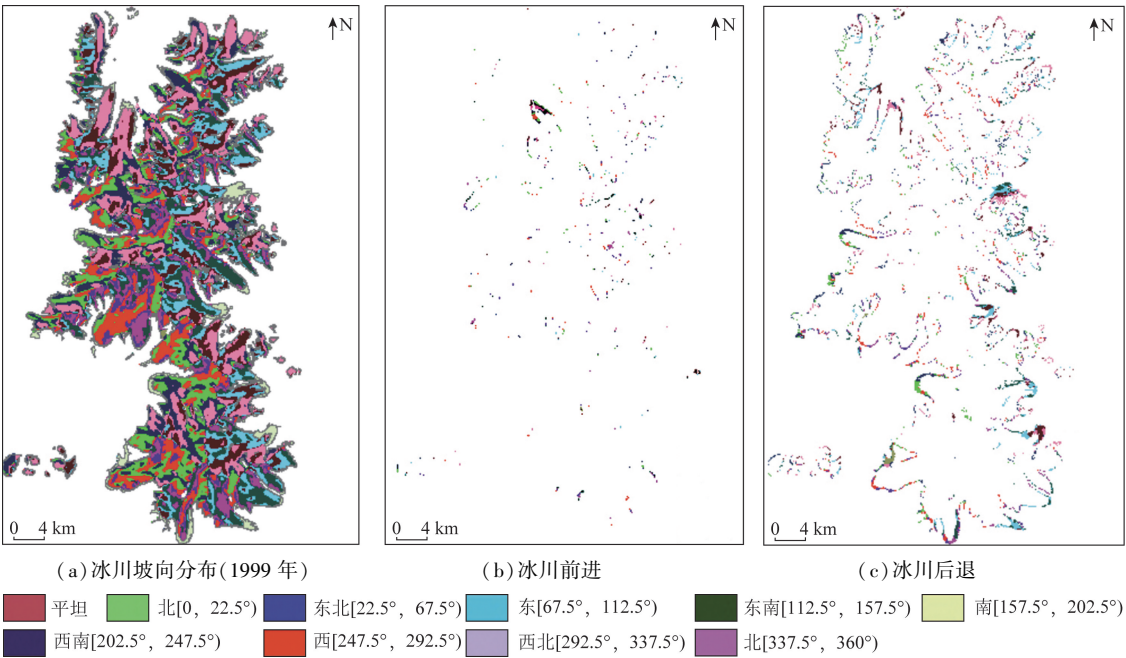


图 11 格拉丹东主冰川前进后退的坡向分布
Fig. 11 Slope distribution of the advancing and retreating main glaciers in Geladandong

3.4.2 气候因素

为全面分析气候影响,探究影响冰川变化的气候因素,本文以研究区沱沱河气象站点 1956—2020 年逐日资料为基础,对研究区的长期多气候要素

(降水、气温、日照、气压)进行了系统分析,研究其气候变化特征及影响。格拉丹东地区气候要素逐年变化见图 12,累年月平均变化见图 13,各气候因素影响如下。

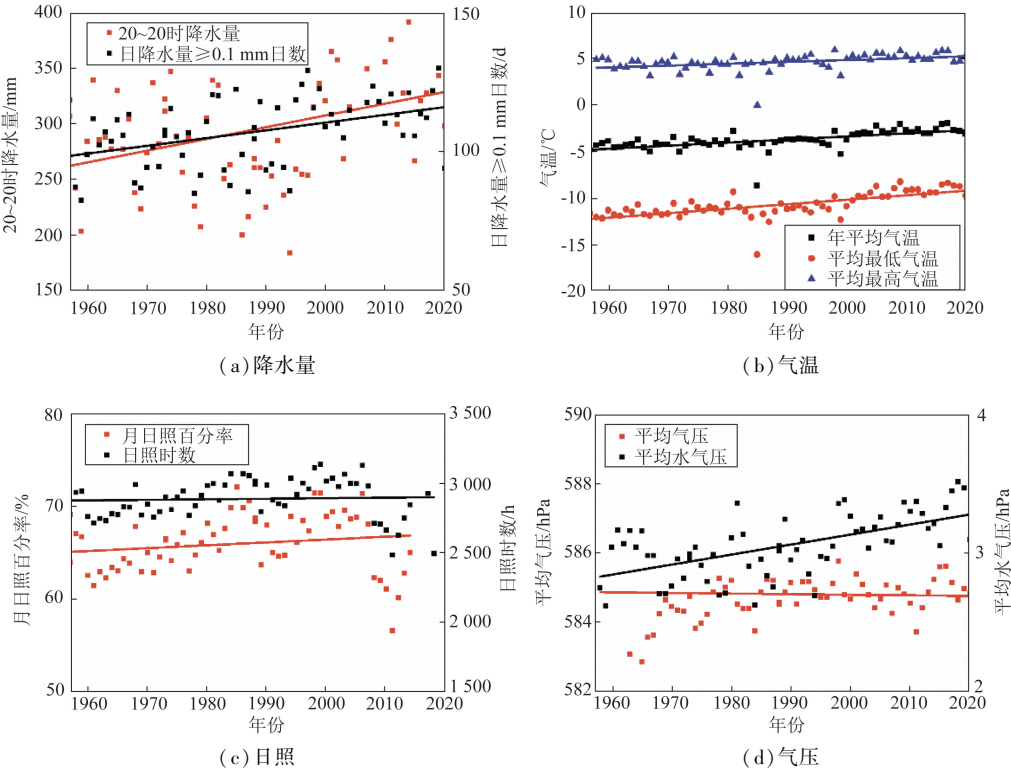


图 12 格拉丹东地区气候要素逐年变化
Fig. 12 Annual changes of the climate factors in Geladandong area

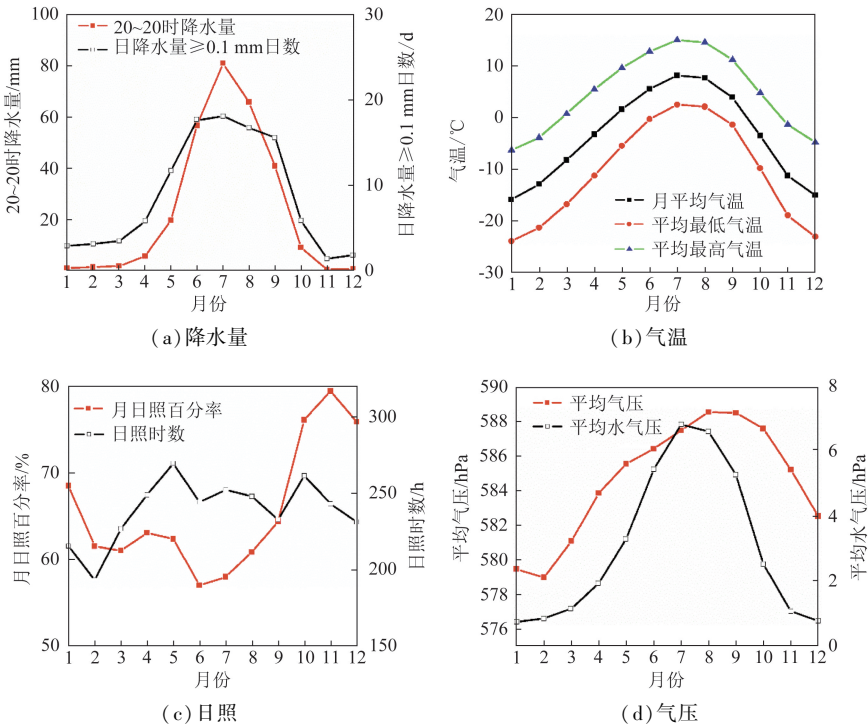


图 13 格拉丹东地区气候要素累月平均变化

Fig. 13 Monthly average changes of the climate factors in Geladandong area

1960—2022 年,格拉丹东地区年降水量呈现持续波动上升的趋势(图 12(a)),在 1956—1997 年的少降水阶段后,约在 1998 年进入多雨阶段。从季节来看,研究区夏秋两季降水偏多、春冬两季降水偏少,雨量集中在 6—9 月(图 13(a))。夏季作为冰川的主要积累期,降水量的增加有利于保证冰川平衡线的稳定,沱沱河冬季降水的增加有利于冰川积累。结合对冰川面积的遥感调查,在降水增加的情况下,格拉丹东地区的冰川面积不减反降,冰川边缘线持续上升,说明降水量不是冰川面积变化的主要原因。

研究区年平均气温、平均最高气温、平均最低气温均呈现持续波动上升的趋势(图 12(b)),在 1956—2000 年逐渐变冷的阶段后,2000 年进入快速增温阶段(图 12(b))。目前格拉丹东地区处于温度偏高时期,2011—2022 年的平均气温为 3.352℃,相比 1961—1970 年的 10 a 平均值 2.917℃来说,平均升温 0.356℃,且比全国平均升温 0.2℃要高一倍,属于青藏高原升温幅度较大的地区。研究区夏季平均气温略高于 0℃,且夏季最低气温在 7 月和 8 月都高于 0℃(图 13(b)),因此格拉丹东冰川融化对夏季温度较为敏感,结合冰川面积的遥感调查,在持续升温的情况下,格拉丹东区域冰川面积持续减少,说明气温是冰川面积变化的主要原因。

总体上,研究区日照总数和气压呈波动性变化,但变化率普遍较小。结合冰川面积的遥感调查,发现日照总数、气压与冰川面积变化之间相关性不显著。

为了进一步研究气候对冰川面积变化的影响,在降水量、气温、日照、气压 4 个气候因素与冰川面积之间进行了相关性研究,得到各气候因子与冰川面积之间的相关系数(图 14)。其中,低于红线为负相关,偏离红线越远代表相关性越强。可以看出,降水与冰川面积呈弱正相关关系,降水量的增加利于冰川面积增加,但增加强度不明显。3 项温度参数与冰川面积均呈负相关,且相关性明显高于降水,说明温度对冰川面积的影响大于降水,而气压、日照与冰川面积呈弱相关,对冰川影响不大。

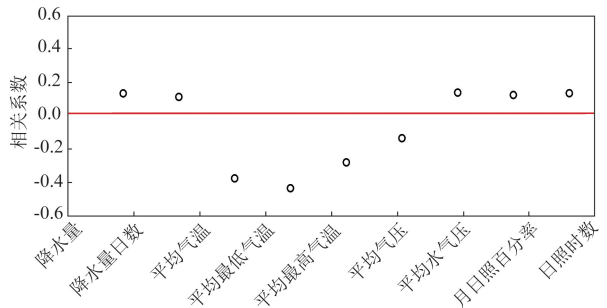


图 14 冰川面积与不同气候因素的相关系数

Fig. 14 Correlation coefficients between glacier area and various climatic factors

4 讨论

本文基于计算机自动分类的遥感解译方法,并以人工目视解译为标准,对几种常用的计算机自动分类方法进行了精度定量评价,最终选择随机森林法作为研究手段开展研究区冰川数据的自动分类解译工作。周文明等^[17]研究格拉丹东地区冰川及冰前湖面积变化时采用了波段比值法,但没有定量评价该方法提取冰川信息的精度,本文也对研究区做了波段比值法提取,结果发现该方法精确度较高,可以有效地区分冰川区与非冰川区,但由于水体和冰雪具有相似的反射光谱特征,因此不能很好地区分水体与冰雪区,并且难以提取被表碛覆盖的冰川。鲁安新等^[18]和 Ye 等^[24]得到的 1969—2002 年格拉丹东冰川面积与本文存在差异,原因是格拉丹东冰川是一个庞大的冰川群,为提高研究区的识别精度,本文截取的是格拉丹东冰川中段的主冰川群,未对其东西两侧的小冰川分支进行详细识别,但并不影响对研究区冰川面积变化及其成因分析的判定^[25]。周远刚等^[26]、Zhao 等^[27]及张威等^[28]在该地区对冰川变化成因的研究中认为气温是冰川变化的主导因素,坡向和海拔等也有着重要影响,这一观点与本文结论一致。

当前,对于冰川物质平衡的相关研究已成为学术前沿,定量研究冰川的物质平衡是直接反映冰川表面物质收支状况,关联起冰川与气候的重要纽带^[29]。目前针对冰川物质平衡的研究方法主要包括花杆观测法、模型模拟法、大地测量法等^[30]。本研究存在的不足是对格拉丹东冰川的物质平衡过程缺少定量计算,增加计算机的模型定量分析是下一步工作的重点方向和目标。

5 结论

(1) 本文对比了常用的 7 种计算机自动分类方法,并对结果进行了精度评价,结果表明在对冰川的计算机自动分类方法中,监督分类法的精度明显优于非监督分类法,而在监督分类中,面向对象的监督分类法又优于基于像素的监督分类法,最终确定采用随机森林法开展解译工作。

(2) 1999—2022 年,研究区冰川面积呈现波

浪式递减趋势,冰川面积共减少 64.25 km²,减少比例为 10.22%,每年减少 2.94 km²。相较于长期冰川面积平均值,研究区在 2010 年之后冰川面积开始持续下降,且冰川消融速度呈现明显增加的趋势。

(3) 研究区内悬冰川的冰川末端形状较为平滑规则、对称、单峰明显;冰川舌的末端形状较为不规则,且边缘形状变化大,外表形态受地形控制明显。地形平坦区域的冰川边缘较为破碎,在空间上呈现局部扩张;地形陡峭区域的冰川边缘相对完整,呈单峰弧形。由于冰川消融,冰川边缘后退,边缘湖泊面积增大。

(4) 研究区冰川总体退缩显著,后退面积为 78.41 km²,占总面积的 10.18%。冰川对地形和气候影响呈现出不同特征。在地形要素中,冰川退缩面积总体随海拔的升高而增大,冰川坡向呈现偏南向的冰川相对活跃,其中正南方向冰川消融退缩最为强烈,退缩比例为 23.58%。在气候要素中,气温是冰川变化的主要因素,两者呈负相关关系,而降水影响较弱。

参考文献 (References):

- [1] 刘焰. 未来百年全球气候变化分析[J]. 中国地质调查, 2021, 8(3): 1-11.
Liu Y. Analysis of global climate change in the next one hundred years[J]. Geological Survey of China, 2021, 8(3): 1-11.
- [2] 黄莉, 刘晓煌, 刘玖芬, 等. 长时间尺度下自然资源动态综合区划理论与实践研究——以青藏高原为例[J]. 中国地质调查, 2021, 8(2): 109-117.
Huang L, Liu X H, Liu J F, et al. Theories and practice of the comprehensive regionalization of natural resources at a long time scale: A case study of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Geological Survey of China, 2021, 8(2): 109-117.
- [3] 何秋乐, 匡星星, 梁四海, 等. 1966—2015 年长江源冰川融水变化及其对径流的影响——以冬克玛底河流域为例[J]. 人民长江, 2020, 51(2): 77-85, 130.
He Q L, Kuang X X, Liang S H, et al. Glacial meltwater variation in Dongkemadi River Basin of Yangtze River source from 1966 to 2015 and its influence on runoff[J]. Yangtze River, 2020, 51(2): 77-85, 130.
- [4] Sorg A, Bolch T, Stoffel M, et al. Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia)[J]. Nature Climate Change, 2012, 2(10): 725-731.
- [5] 杨斌, 袁祺, 谭昌海, 等. 青藏高原东部拉萨河下游地区大气湍流交换特征研究[J]. 高原气象, 2022, 41(1): 204-215.
Yang B, Yuan Q, Tan C H, et al. Study on the characteristics of atmospheric turbulence exchange in the lower reaches of the Lhasa River in the eastern Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Mete-

- ology, 2022, 41(1): 204–215.
- [6] Oerlemans J. Quantifying global warming from the retreat of glaciers[J]. *Science*, 1994, 264(5156): 243–245.
 - [7] 张建国, 刘玉梅, 吕腾腾, 等. 格拉丹东区域冰川变化研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(12): 184–189.
Zhang J G, Liu Y M, Lv T T, et al. An inventory of glacier changes for the Geladandong Mountain area, China[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(12): 184–189.
 - [8] 吴珊珊, 姚治君, 姜丽光, 等. 现代冰川体积变化研究方法综述[J]. *地球科学进展*, 2015, 30(2): 237–246.
Wu S S, Yao Z J, Jiang L G, et al. Method review of modern glacier volume change[J]. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(2): 237–246.
 - [9] 王宁练, 姚檀栋, 徐柏青, 等. 全球变暖背景下青藏高原及周边地区冰川变化的时空格局与趋势及影响[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(11): 1220–1232.
Wang N L, Yao T D, Xu B Q, et al. Spatiotemporal pattern, trend, and influence of glacier change in Tibetan Plateau and surroundings under global warming[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1220–1232.
 - [10] 曹泊, 王杰, 张忱, 等. 遥感技术在现代冰川变化研究中的应用[J]. *遥感技术与应用*, 2011, 26(1): 52–59.
Cao B, Wang J, Zhang C, et al. The remote sensing in research of modern glacier changes[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2011, 26(1): 52–59.
 - [11] 赵贵宁, 张正勇, 刘琳, 等. 基于多源遥感数据的玛纳斯河流域冰川物质平衡变化[J]. *地理学报*, 2020, 75(1): 98–112.
Zhao G N, Zhang Z Y, Liu L, et al. Changes of glacier mass balance in Manas river basin based on multi-source remote sensing data[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(1): 98–112.
 - [12] Racoviteanu A E, Williams M W, Barry R G. Optical remote sensing of glacier characteristics: A review with focus on the Himalaya[J]. *Sensors*, 2008, 8(5): 3355–3383.
 - [13] Paul F. Changes in glacier area in Tyrol, Austria, between 1969 and 1992 derived from Landsat 5 Thematic Mapper and Austrian Glacier Inventory data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(4): 787–799.
 - [14] Bindschadler R, Dowdeswell J, Hall D, et al. Glaciological applications with Landsat-7 imagery: early assessments[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 78(1/2): 163–179.
 - [15] 周文明, 李志伟, 李佳, 等. 1992—2009 年格拉丹东冰川及冰前湖面积变化的遥感研究[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2014, 45(10): 3505–3512.
Zhou W M, Li Z W, Li J, et al. Variations of glaciers and glacial lake in Geladandong mountain range in 1992—2009 with remote-sensing technology[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, 45(10): 3505–3512.
 - [16] Chen J M. Evaluation of vegetation indices and a Modified Simple Ratio for boreal applications[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1996, 22(3): 229–242.
 - [17] 冀琴. 1990—2015 年喜马拉雅山冰川变化及其对气候波动的响应[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
 - Ji Q. Glacier Variations in Response to Climate Change in the Himalaya During 1990—2015[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.
 - [18] 鲁安新, 姚檀栋, 刘时银, 等. 青藏高原各拉丹冬地区冰川变化的遥感监测[J]. *冰川冻土*, 2002, 24(5): 559–562.
Lu A X, Yao T D, Liu S Y, et al. Glacier change in the Geladandong area of the Tibetan Plateau monitored by remote sensing[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(5): 559–562.
 - [19] 骆剑承, 梁怡, 周成虎. 基于尺度空间的分层聚类方法及其在遥感影像分类中的应用[J]. *测绘学报*, 1999, 28(4): 319–324.
Luo J C, Liang Y, Zhou C H. Scale space based hierarchical clustering method and its application to remotely sensed data classification[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1999, 28(4): 319–324.
 - [20] 刘时银, 郭万钦, 许君利. 中国第二次冰川编目数据集(V1.0)(2006—2011)[EB/OL]. 国家青藏高原数据中心, (2012). <https://doi.org/10.3972/glacier.001.2013.db>.
Liu S Y, Guo W Q, Xu J L. The second glacier inventory dataset of China (version 1.0) (2006—2011)[EB/OL]. National Tibetan Plateau/Third Pole Environment Data Center, (2012). <https://doi.org/10.3972/glacier.001.2013.db>.
 - [21] 李忠勤, 沈永平, 王飞腾, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川消融对气候变化的响应[J]. *气候变化研究进展*, 2007, 3(3): 132–137.
Li Z Q, Shen Y P, Wang F T, et al. Response of melting ice to climate change in the Glacier No. 1 at the headwaters of Ürtmqi River, Tianshan Mountain[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2007, 3(3): 132–137.
 - [22] 王德旺, 何萍, 张馨予, 等. 苏干湖流域冰川、湿地对气候变化的响应研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2023, 37(8): 107–116.
Wang D W, He P, Zhang X Y, et al. Response of glaciers and wetlands to climate change in Sugan Lake Basin[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2023, 37(8): 107–116.
 - [23] 李林凤, 李开明. 石羊河流域冰川变化与地形因子的关系探究[J]. *冰川冻土*, 2019, 41(5): 1026–1035.
Li L F, Li K M. Study on the relationship between glacier change and topographic factors in the Shiyang River basin[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(5): 1026–1035.
 - [24] Ye Q H, Kang S C, Chen F, et al. Monitoring glacier variations on Geladandong mountain, central Tibetan Plateau, from 1969 to 2002 using remote-sensing and GIS technologies[J]. *Journal of Glaciology*, 2006, 52(179): 537–545.
 - [25] Bolch T, Yao T, Kang S, et al. A glacier inventory for the western Nyainqentanglha Range and the Nam Co Basin, Tibet, and glacier changes 1976–2009[J]. *The Cryosphere*, 2010, 4(3): 419–433.
 - [26] 周远刚, 赵锐锋, 张丽华, 等. 博格达峰地区冰川和积雪变化遥感监测及影响因素分析[J]. *干旱区地理*, 2019, 42(6): 1395–1403.
Zhou Y G, Zhao R F, Zhang L H, et al. Remote sensing monitoring

of the change of glacier and snow cover and its influencing factors in Mount Bogda[J]. *Arid Land Geography*, 2019, 42(6): 1395 – 1403.

[27] Zhao J, Shi Y F, Huang Y S, et al. Uncertainties of snow cover extraction caused by the nature of topography and underlying surface[J]. *Journal of Arid Land*, 2015, 7(3): 285 – 295.

[28] 张威, 李亚鹏, 柴乐, 等. 1990—2020 年间念青唐古拉山中段北坡边坝地区冰川变化及气候响应[J]. *地理科学进展*, 2021, 40(12): 2073 – 2085.

Zhang W, Li Y P, Chai L, et al. Glacier change and response to climate in the northern slope of the middle Nyainqêntangla Mountains during 1990—2020[J]. *Progress in Geography*, 2021, 40(12): 2073 – 2085.

[29] 刘焕才, 刘真玲, 秦翔, 等. 1991—2020 年祁连山老虎沟 12 号冰川能量—物质平衡模拟研究[J]. *地理科学*, 2023, 43(12): 2228 – 2239.

Liu H C, Liu Z L, Qin X, et al. Simulation study on the energy – mass balance of Laohugou Glacier No. 12 in the Qilian Mountains from 1991 to 2020 [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2023, 43(12): 2228 – 2239.

[30] 肖乐天, 吴坤鹏, 刘时银, 等. 1980—2019 年藏东南帕隆藏布流域冰川物质平衡模拟[J]. *冰川冻土*, 2023, 45(6): 1829 – 1839.

Xiao L T, Wu K P, Liu S Y, et al. Simulation of mass balance of glaciers in the Parlung Zangbo basin in southeast Tibet from 1980 to 2019 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2023, 45(6): 1829 – 1839.

Dynamic monitoring and change cause analysis of Geladandong glacier in Tibet Plateau

ZHANG Xunxun^{1,2}, ZHAO Yanggang^{1,2}, YANG Bin^{1,2}, WU Shuying^{3,4}, DUAN Yanghai^{1,2}, LIU Yu⁵
(1. *Civil – Military Integration Geological Survey Center, Field Scientific Observation and Research Station of Natural Resources in the Middle Reaches of the Brahmaputra River, Tibet Autonomous Region, Sichuan Chengdu 610036, China*; 2. *Key Laboratory of Coupling Process and Effect of Natural Resources Elements, Ministry of Natural Resources, Beijing 100055, China*; 3. *Sichuan Hua Di Building Engineering Co., Ltd., Sichuan Chengdu 610081, China*; 4. *Chengdu Center of Hydrogeology and Engineering Geology of Sichuan Provincial Geology and Mineral Resources Bureau, Sichuan Chengdu 610081, China*; 5. *Aerospace Information Research Institute Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Remote Sensing Sciences Institute of Remote Sensing Applications, Beijing 100094, China*)

Abstract: Geladandong glacier complex is the source of Tuotuo River, the primary source of Yangtze River. It is located in the Tanggula Mountains, which is in the remote interior of Tibet Plateau. The processes and causes of glacier area change are crucial for the sustainable use of water resources and the functioning of the water cycle in the headwater ecosystem of Yangtze River. The random forest method was employed to carry out the interpretation of glacier remote sensing images, and topographic and climatic data were integrated to investigate the underlying drivers of glacier area change. The results are as follows. ① The random forest method is particularly suitable for the automatic interpretation of a large number of consecutive remote sensing images, after the comparative analysis of 7 most commonly used automatic computerized classification methods and the evaluation of their accuracy. ② From 1999 to 2022, the glacier area in the study area exhibited a wavy decreasing trend, with a total decrease of 64.25 km², representing a 10.22% reduction and a decreasing trend of 2.94 km²/a. ③ The glacier terminus in the study area exhibits a relatively smooth and regular morphology, with a distinct single peak and symmetrical outline. In contrast, the glacier tongue terminus displays a more irregular morphology, with a variable edge and a shape that is evidently influenced by topographic factors. ④ The change of glacier area is significantly influenced by elevation and slope direction. Among climatic factors, temperature is the primary driver of glacier change, exhibiting a negative correlation. This research could provide the scientific basis and data supporting for glacier change characteristics and sustainable use of water resources in the primary source area of Yangtze River.

Keywords: Geladandong glacier; glacial change; remote sensing monitoring; random forest method; climate change

(责任编辑：魏昊明)