

DOI: 10.5846/stxb202011072851

彭加加,徐丽萍,曹翠.1991—2017 年叶尔羌河流域冰川景观格局时空演变.生态学报,2022,42(20):8265-8275.

Peng J J, Xu L P, Cao C. Spatio-temporal evolution of glacier landscape pattern in the Yarkant River Basin from 1991 to 2017. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(20):8265-8275.

1991—2017 年叶尔羌河流域冰川景观格局时空演变

彭加加,徐丽萍*,曹翠

石河子大学理学院,石河子 832000

摘要:冰川景观变化是全球环境和气候变化的共同“指示器”。随着全球气候变化加剧,干旱和半干旱地区的冰川景观将进一步变化。科学评估冰川景观格局时空演变特征,为应对冰川景观变化及其影响提供科学参考。基于 1991—2017 年 Landsat TM/ETM+/OLI 遥感影像,采用监督分类方法获取叶尔羌河流域冰川景观时空格局及变化数据,利用景观格局指数、质心迁移模型、分形维数等方法分析近 26 年叶尔羌河流域冰川景观格局时空演变特征。结果表明:(1) 1991—2017 年叶尔羌河流域冰川斑块面积呈消减趋势,但有所减缓,共减少 799.50 km²(-13.09%)。冰川斑块面积消减主要集中在海拔 5400—5800 m 之间,相较之下,海拔 4400 m 以下的区域冰川斑块面积消减率最高,达 63.68%;不同坡度冰川景观消减率存在差异,陡坡冰川斑块面积消减率最高(15.98%),急陡坡消减率最低(2.87%);阴阳两坡冰川景观均呈消减趋势,阳坡冰川斑块面积消减速率显著高于阴坡。(2) 近 26 年来,叶尔羌河流域冰川斑块数量、最大斑块指数均减小,而平均形状指数、平均周长面积比、分裂指数均增加,表明冰川景观不断消减,破碎化程度增加。(3) 研究期间,叶尔羌河流域冰川景观质心发生迁移,整体呈现东北偏移趋势。(4) 通过分形理论对叶尔羌河流域冰川景观空间结构特征进行分析表明,该流域冰川景观消减率略微降低,但仍然处于持续消融状态。

关键词:冰川景观变化;冰川斑块面积;景观格局指数;叶尔羌河流域

Spatio-temporal evolution of glacier landscape pattern in the Yarkant River Basin from 1991 to 2017

PENG Jiajia, XU Liping*, CAO Cui

School of Science, Shihezi University, Shihezi 832000, China

Abstract: Glacier landscape change is a common sensitivity indicator of global environmental and climate change. In arid and semiarid climate areas, the glacier landscape will change further due to the intensification of global climate change. To scientifically evaluate the temporal and spatial evolution characteristics of glacier landscape pattern, which can provide scientific reference for coping with glacier landscape change and its impact. Based on Landsat TM/ETM+/OLI remote sensing images from 1991 to 2017, the temporal and spatial pattern and change data of glacier landscape in the Yarkant River Basin were obtained by using the supervised classification method. In addition, the temporal and spatial evolution characteristics of glacier landscape pattern in the Yarkant River Basin in 1991—2017 were analyzed by means of landscape pattern index, mass center migration and fractal dimension. The results showed that: (1) From 1991 to 2017, the glacier patch area in the Yarkant River Basin showed a decreasing trend, but the melting rate slowed down, with a total reduction of 799.50 km²(-13.09%). The decrease of glacier patch area was mainly concentrated at elevations of 5400—5800 m a.s.l. By contrast, the area below the altitude of 4400 m had the highest retreat rate of glacier patch area, which reached 63.68%. There were differences in glacier landscape reduction rates among different slopes. The retreat rate of glacier landscape on

基金项目:国家自然科学基金项目(31760151)

收稿日期:2020-11-07; 网络出版日期:2022-06-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xlpalw@163.com

steep slope was the highest (15.98%) and that on sharp steep slope was the lowest (2.87%). Glacier landscape on both shady slope and sunny slope showed a trend of retreat, and the reduction rate of glacier patch area on the sunny slope was significantly higher than that on the shady slope. (2) The number of patches and the largest patch index of the glacier in the Yarkant River Basin have decreased, while the mean shape index, the mean perimeter area ratio and the splitting index have increased. As a result, the glacier landscape has been melting and the degree of fragmentation has increased. (3) During the study period, the centroid of the glacier landscape in the Yarkant River Basin migrated, and the overall trend of northeast migration occurred, indicating that the large patch glaciers were mainly distributed in the northeast and the glacier landscape was decreasing. (4) Based on the fractal theory, we analyzed the spatial structure characteristics of the glacier landscape in the Yarkant River Basin, the results showed that the glacier landscape decline rate decreased slightly, but it was still in a continuous melting state.

Key Words: glacier landscape change; glacier patch area; landscape pattern index; the Yarkant River Basin

冰川作为冰冻圈的重要组成部分之一^[1],根据其规模和形态特征,主要分为冰盖和山地冰川^[2]。其中,山地冰川既是存储淡水资源的“固体水库”,也是气候变化的重要“指示器”^[3-4]。随着全球气温的不断升高,近半个世纪以来,全球冰川普遍处于持续消融状态^[5],平均每年减少 2260 亿 t^[6]。中国冰川主要分布在青新荒漠绿洲区。在内陆干旱地区,冰川作为一种特殊的自然景观,常常被看作是干旱区的“生命线”^[7]。气候变暖背景下,冰川变化对于干旱区的自然生态环境演变、农业生产和社会经济可持续发展有着重要影响^[8-11]。如何应对冰川变化产生的一系列影响,已成为当下亟待面对的重要现实问题。而冰川景观格局演变研究,可提高对冰川景观结构及组成变化的认识与理解,为应对冰川变化及其影响提供科学指导与决策支持。

近年来,景观格局分析方法已被广泛应用于众多领域,尤其是不同土地类型(草地、荒漠、湿地等)景观格局变化分析^[12-14]。冰川作为一种特殊的土地利用类型,其变化带来的影响也不容小觑,已引起了国内外学者的广泛关注^[15-17]。冰川消融过程也是一种景观变化过程,冰川景观结构及其组成的变化可以借助景观指数来描述。将景观生态学理论应用于冰川变化的研究已有初步的尝试,姜亮亮、刘俊岭等^[18-19]运用景观格局指数对冰川和永久积雪景观要素进行分析发现,冰川覆被稳定性低,最大斑块指数以及聚集度下降。李虹蓉^[20]为探究祁连山吐尔根达坂地区冰川结构变化特征,引入景观格局指数,分析发现冰川破碎度呈现先减小后增大趋势,冰川斑块大量消失。随着 RS、GIS 技术越来越广泛应用于冰川景观变化的研究中,它们与景观生态学理论相结合,可以更加直观的显示冰川景观未来的变化趋势。

叶尔羌河作为塔里木盆地西部最大的河流,其径流大小主要取决于冰雪融水量。叶尔羌河不仅是保障新疆塔里木河生态系统健康运行的重要源流之一,还对维护流域乃至整个新疆生态环境安全、促进新疆经济发展具有重要的作用^[21-23]。对于整个叶尔羌河流域来说,冰川退缩大大削弱了冰川融水对河川径流的调节作用,进而对整个流域的生态环境安全构成威胁,同时也对中下游地区居民的生活方式、经济发展以及特色绿洲农业发展等产生不利影响。鉴于此,本文基于 1991—2017 年 Landsat 遥感影像数据,通过分析冰川斑块面积随海拔、坡度、坡向的变化以及冰川质心迁移状况来揭示冰川景观时空变化趋势;尝试应用能够高度浓缩景观空间格局信息的景观格局指数并结合分形维数来揭示叶尔羌河流域冰川景观结构变化特征以及评估冰川景观稳定性。

1 研究区概况

叶尔羌河流域位于新疆西南部,塔里木盆地西缘(图 1)。流域范围介于 74°28'—80°55' E, 35°27'—40°42' N 之间,叶尔羌河流域总面积达 9.89×10⁴ km²,全长约为 1097 km,多年平均径流量约为 66.3×10⁸ m³,主要由冰雪融水和降水补给^[24]。大西洋和印度洋暖、湿气流受南天山、帕米尔高原和喀喇昆仑山的阻挡而无法入境,致使叶尔羌河流域常年干旱少雨,多年平均降水量仅 30—60 mm^[25],形成典型干旱大陆性气候。流域

内太阳辐射丰富,潜在蒸发量大,多年平均气温达 9.38°C ,其中多年平均最低气温为 $-3.29\text{—}5.89^{\circ}\text{C}$,多年平均最高气温达 $11.03\text{—}19.73^{\circ}\text{C}$ [26]。叶尔羌河流域地形由东北向西南急剧升高,由 $960\text{—}1500\text{ m}$ 的平原区升至极高山区的 $6000\text{—}8400\text{ m}$,使西南部高大山区为冰川积累提供有利条件。

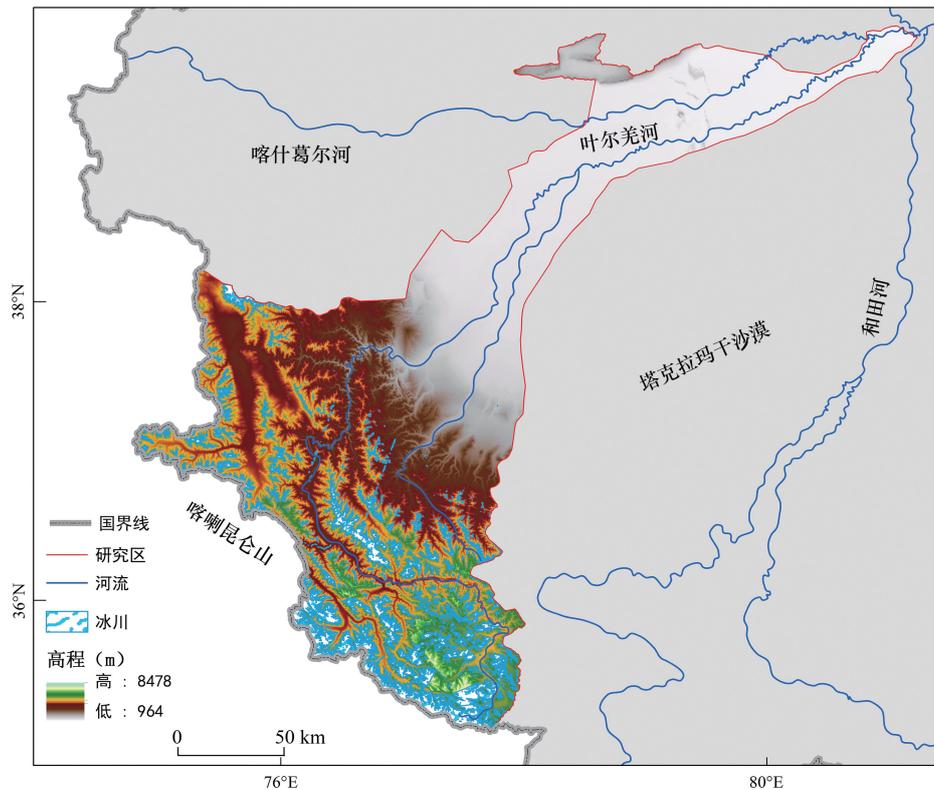


图1 研究区域位置

Fig.1 The study area

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

2.1.1 数据来源

本文选用了由 Landsat 系列卫星所搭载的 TM、ETM+ 和 OLI 传感器获得的遥感影像数据,均来源于地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn/>)。为减少云雪对冰川斑块提取的影响,1991—2017 年所选影像成像时间为 7—9 月且云量低于 20%,最终选定了 1991、1996、2001、2008、2013、2017 年 6 个时期的 24 景影像 (表 1)。本研究所选取的 DEM 数据为 30 m 分辨率的 SRTM1 数据集产品,来源于地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn/>)。

2.1.2 冰川斑块提取

本文选取的遥感影像数据为 Level 1T 级,不需要进行几何校正。由于研究区横跨 4 景遥感影像,所以在辐射定标和大气校正后需对 4 景影像进行图像拼接和裁剪,以便完全覆盖到研究区的冰川。与其他地物类型相比,冰川在可见光波段反射能力较强,在遥感影像上能够与其他地物形成较为明显的反差 [27]。故目前常用监督与非监督分类法 [28]、雪盖指数法 (NDSI) [29]、比值阈值法 [30]、面向对象分类法 [31] 等对冰川进行解译。本文借助 ENVI 5.3 软件对 TM 和 ETM+ 采用 6、2、3 波段进行假彩色合成,OLI 采用 7、2、3 波段进行假彩色合成,并选取训练样本。采用最大似然监督分类法对 6 期遥感影像数据进行冰川斑块提取,然后对分类结果进行目

视解译修改,以提高精度。最后对分类后结果进行精度验证,6期分类结果精度均大于90%,Kappa系数均大于0.90,符合分类标准。

表1 遥感数据信息列表

Table 1 Landsat images used in the study

影像编号 Image number	获取日期 Date	云量 Cloud cover/%	影像编号 Image number	获取日期 Date	云量 Cloud cover/%
LT51470351991240ISP00	1991-08-28	1.07	LT51470352008271KHC01	2008-09-27	14.87
LT51480341991231ISP00	1991-08-19	3.51	LT51480342008214BJC001	2008-08-01	2.25
LT51480351991231ISP00	1991-08-19	18.87	LT51480352008201KHC01	2008-07-18	5.46
LT51490341991231ISP00	1991-07-25	5.12	LT51490342008269KHC01	2008-09-25	8.27
LT51470351996254ISP00	1996-09-10	0.86	LC81470352013268LGN00	2013-09-25	9.50
LT51480341996213ISP00	1996-07-31	10.21	LC81480342013259LGN01	2013-09-16	18.93
LT51480351996245ISP00	1996-09-01	17.06	LC81480352013195LGN00	2013-07-14	10.36
LT51490341996236ISP00	1996-08-23	4.63	LC81490342013186LGN01	2013-07-05	13.83
LE71470352001275SGS00	2001-09-23	9.00	LC81470352017263LGN00	2017-09-20	11.53
LE71480342001202SGS00	2001-07-21	10.00	LC81480342017222LGN00	2017-08-11	4.80
LE71480352001202SGS00	2001-07-21	6.00	LC81480352017270LGN00	2017-09-27	18.80
LE71490342001273EDC01	2001-09-30	1.00	LC81490342017213LGN00	2017-08-01	4.67

2.2 研究方法

2.2.1 景观格局指数

景观格局指数能够高度浓缩景观空间格局信息,反映其结构组成特征^[32]。本文根据景观格局指数选取原则,尝试从景观水平选择5个景观格局指数来分析叶尔羌河流域冰川景观的变化,包括:斑块数(NP)、最大斑块指数(LPI)、平均形状指数($SHAPE-MN$)、平均周长面积比($PARA-MN$)和分离度指数($SPLIT$)。应用于冰川景观的含义:

①斑块数(NP):研究区斑块数量,无量纲,值域范围 ≥ 1 ,斑块数量变化既反映研究区冰川景观消融状况,又能揭示冰川景观破碎度变化趋势(NP 值越大,表明冰川景观破碎度越高)。

②最大斑块指数(LPI):反映冰川斑块中最大斑块占整个冰川斑块的比,其变化可以表征大面积冰川的变化状况。表达式为:

$$LPI = \frac{\max(a_i)}{A} \times 100 \quad (1)$$

式中, a_i 表示第*i*个冰川斑块的面积, A 表示冰川斑块总面积。

③平均形状指数($SHAPE-MN$):通过以正方形的标准进行对照,其值越大,反映出冰川因不断消融,冰川斑块形状越来越不规则。表达式为:

$$SHAPE-MN = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{0.25 p_i}{\sqrt{a_i}}}{n} \quad (2)$$

式中, a_i 表示第*i*个冰川斑块的面积, p_i 表示第*i*个冰川斑块的周长, n 表示冰川斑块个数。

④平均周长面积比($PARA-MN$):反映冰川景观在空间形状上的凹凸情况或破碎化程度,其值越大,表明冰川景观破碎化越严重。表达式为:

$$PARA-MN = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{p_i}{a_i}}{n} \quad (3)$$

式中, a_i 表示第*i*个冰川斑块的面积, p_i 表示第*i*个冰川斑块的周长, n 表示冰川斑块个数。

⑤分离度指数(SPLIT):数值的增加,可以反映出冰川斑块面积的减小和冰川斑块大小的变薄^[33]。表达式为:

$$\text{SPLIT} = \frac{A^2}{\sum_{i=1}^n a_i^2} \quad (4)$$

式中, a_i 表示第*i*个冰川斑块的面积, A 表示冰川斑块总面积, n 表示冰川斑块个数。

2.2.2 冰川景观质心迁移

质心是描述地理现象空间分布的一个重要指标,质心可用于对地理分布变化的跟踪。冰川景观质心迁移变化能够很好地从空间上描述冰川景观的时空演变特征,通过了解各研究时段冰川景观的质心分布,可以发现冰川景观空间的变化趋势,揭示冰川景观消融或堆积的面积分布。因此,本文将景观质心分析用于冰川景观的研究,探讨冰川景观格局的演变特征。

$$X_t = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{ii} \times X_i)}{\sum_{i=1}^n C_{ii}} \quad (5)$$

$$Y_t = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{ii} \times Y_i)}{\sum_{i=1}^n C_{ii}} \quad (6)$$

式中, X_t 、 Y_t 分别表示第*t*时期冰川景观分布的质心经度和纬度坐标; C_{ii} 表示冰川景观第*t*时期第*i*斑块的面积; X_i 、 Y_i 分别表示第*i*个斑块的质心经纬度坐标^[14]。

2.2.3 冰川景观稳定性评估

分形理论是通过建立面积-周长的关系来反映地物空间结构的理论^[34]。冰川具有复杂的空间结构特性,仅从单一指数分析冰川变化具有片面性。因此,本文应用分形理论获取叶尔羌河流域冰川分维系数来量化冰川空间结构稳定性及变化趋势。表达式如下:

$$A = k P^{\frac{2}{D}} \quad (7)$$

式中, A 表示某一冰川面积; P 表示该冰川的周长; D 表示分维系数; k 表示待定系数。将式(7)取对数得到:

$$\lg A = \frac{2}{D} \lg P + C \quad (8)$$

式中, C 为常数。由式(8)可建立冰川周长-面积关系。 D 值越大,表明冰川空间结构越复杂。当 D 值越接近1.50,表明冰川空间结构越不稳定。冰川空间结构稳定性指数 SK 计算表达式为:

$$SK = |1.5 - D| \quad (9)$$

式中, SK 值越大,表明冰川空间结构相对稳定;相反,则越不稳定。

3 结果分析

3.1 叶尔羌河流域冰川景观时空变化特征

3.1.1 冰川斑块面积变化

1991—2017年,叶尔羌河流域冰川斑块面积由6108.62 km²减少到5309.12 km²,共减少799.50 km²(-13.09%)。叶尔羌河流域冰川景观整体上呈现持续退缩状态,在不同时段冰川斑块面积消减速率存在差异(图2)。其中,1996—2001年时间段冰川斑块面积消减速率最快,达0.7%/a;其次依次为1991—1996年、2001—2008年、2013—2017年时间段,消减速率分别为0.69%/a、0.47%/a、0.45%/a;2008—2013年时间段冰川斑块面积消减速率最慢,仅为0.30%/a。上述各时段冰川斑块面积消减速率表明叶尔羌河流域冰川景观萎缩呈现减缓趋势。

3.1.2 冰川景观海拔、坡度、坡向变化

海拔作为冰川景观变化主要地形影响因子之一^[35]。由于不同海拔梯度上太阳辐射量、温度、降水等存在一定差异,导致冰川景观在不同海拔梯度消减率存在差异。本文利用DEM数据,应用ArcGIS软件提取了叶

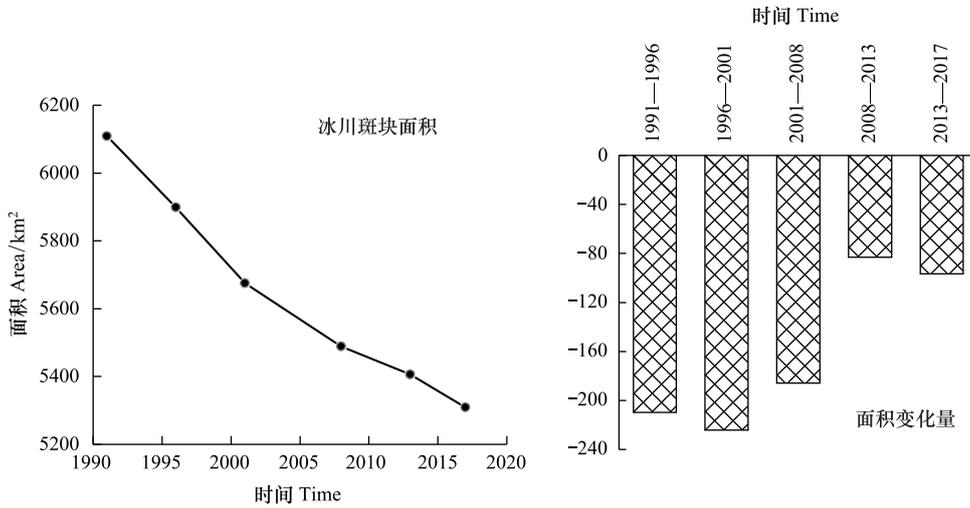


图 2 1991—2017 年叶尔羌河流域冰川斑块面积变化

Fig.2 The area change of glacier patch in the Yarkant River Basin from 1991 to 2017

尔羌河流域冰川景观分布区的海拔因子,并以 200 m 为间距,将冰川景观分布的海拔梯度范围划分为 9 个梯度,得到叶尔羌河流域冰川景观变化的垂直分布特征。叶尔羌河流域冰川景观分布在海拔 4100—5900 m 之间,主要集中发育在海拔 5000—5800 m,占总面积的 75.44% (图 3)。从海拔梯度变化来看,所有海拔梯度冰川斑块面积均减少,且随着海拔梯度的上升,冰川斑块面积变化率逐渐减小。其中,海拔为 5400—5800 m 的海拔高度带冰川斑块面积消减最多,为 448.52 km²,占该流域冰川景观总消减面积的 56.10%,是最大的冰川景观消减面积贡献海拔高度带;消减率最为剧烈的 3 个海拔梯度带为 <4400、4400—4600、4800—5000 m,其消减率分别高达 63.68%、53.88%、53.87%。这也印证了海拔越低的地区温度越高,冰川景观退缩率越大,低海拔地区为冰川景观主要退缩区^[36]。从时间上分析,1991—2017 年叶尔羌河流域冰川斑块面积在同一海拔梯度上总体呈现消减趋势,且在相同时间间隔变化率呈波动减小状态(表 2)。

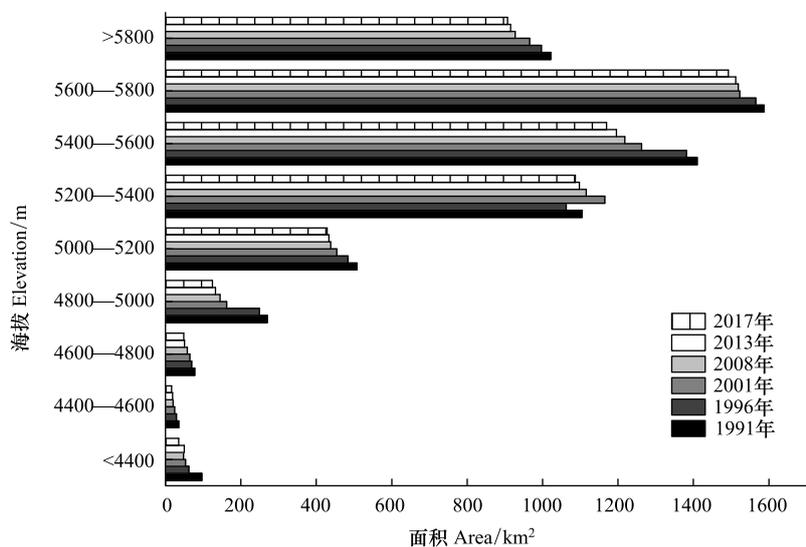


图 3 叶尔羌河流域不同海拔高度带冰川斑块面积变化

Fig.3 Area change of glacier patch with different attitudes in the Yarkant River Basin

表 2 叶尔羌河流域不同时期冰川斑块面积变化及海拔梯度统计

Table 2 Statistics of glacier patch area change and elevation gradient in different periods of Yarkant River Basin

海拔 Elevation/m	1991—1996 年		1996—2001 年		2001—2008 年		2008—2013 年		2013—2017 年	
	面积变化 Area change/ km ²	比例变化 Proportional change/%								
<4400	-34.81	-36.09	-8.22	-13.33	-5.40	-10.10	1.91	3.98	-14.91	-29.85
4400—4600	-6.09	-17.37	-4.79	-16.55	-3.83	-15.86	-1.77	-8.70	-2.40	-12.92
4600—4800	-8.04	-10.37	-4.93	-7.09	-6.65	-10.29	-7.15	-12.34	-2.21	-4.35
4800—5000	-20.68	-7.66	-86.73	-34.81	-18.05	-11.11	-11.65	-8.07	-8.25	-6.22
5000—5200	-23.64	-4.66	-29.35	-6.07	-16.19	-3.56	-4.74	-1.08	-4.83	-1.11
5200—5400	-41.44	-3.75	102.00	9.60	-49.20	-4.22	-18.14	-1.63	-10.83	-0.99
5400—5600	-27.97	-1.98	-119.04	-8.62	-44.36	-3.51	-22.24	-1.83	-26.17	-2.19
5600—5800	-21.99	-1.39	-42.22	-2.70	-3.76	-0.25	-6.96	-0.46	-19.40	-1.28
>5800	-25.02	-2.45	-30.92	-3.10	-38.48	-3.98	-12.33	-1.33	-7.67	-0.84

根据坡度分类标准^[37],将叶尔羌河流域冰川区坡度划分为 6 个等级:平坡($<5^\circ$)、缓坡($5^\circ\text{—}15^\circ$)、斜坡($15^\circ\text{—}25^\circ$)、陡坡($25^\circ\text{—}35^\circ$)、急陡坡($35^\circ\text{—}40^\circ$)、急坡($>40^\circ$),本研究以这 6 个等级来分析该流域不同坡度冰川景观的分布状况以及变化特征(图 4)。叶尔羌河流域冰川景观主要集中在坡度 $>35^\circ$ 的地形上,占总面积的 95.67%,表明叶尔羌河流域冰川以山地冰川为主。1991—2017 年不同坡度区间的冰川斑块面积呈现出相似的波动减少趋势。冰川斑块面积变化大小按坡度排序为:陡坡 $>$ 缓坡 $>$ 急坡 $>$ 斜坡 $>$ 急陡坡,减少值分别为 15.98%、15.60%、14.18%、10.94%和 2.87%。随着坡度的增加,冰川斑块面积消减率呈现减少的趋势,表明坡度的大小影响着冰川景观的消减速度,坡度较为缓和的区域冰川景观消减较快。

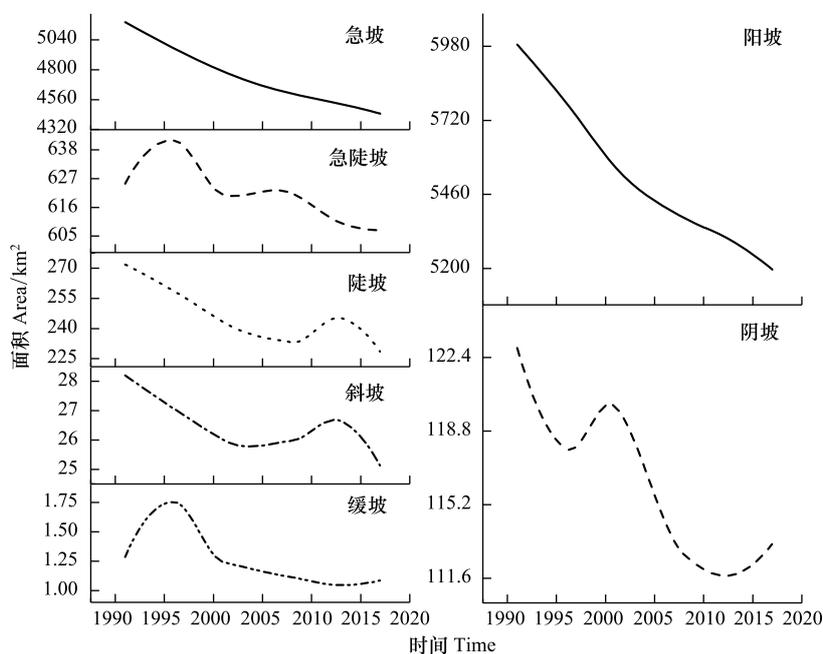


图 4 叶尔羌河流域不同坡度、坡向冰川斑块面积变化

Fig.4 Glacier patch area change of different slopes and different aspects in the Yarkant River Basin

由于阴阳坡向太阳辐射度的不同,对冰川景观消减速度影响存在差异。因此,本文为探究叶尔羌河流域冰川景观在不同坡向的变化特征,将冰川分布区坡向划分为:阴坡($0^\circ\text{—}90^\circ$ 和 $270^\circ\text{—}360^\circ$)、阳坡(90°—

270°) (图 4)。1991—2017 年,叶尔羌河流域阳坡和阴坡冰川景观变化特征相似,面积均呈下降趋势,并存在一定波动。在阴坡上,冰川斑块面积从 122.86 km² 减少到 103.29 km²,减少了 19.58 km² (占 1991 年阴坡冰川景观的 7.79%),冰川景观消减速率为 0.30%/a。同期,在阳坡上,冰川斑块面积从 5985.76 km² 减少到 5205.83 km²,减少了 779.93 km² (占 1991 年阳坡冰川景观面积的 13.20%),冰川景观消减速率为 0.51%/a。阳坡冰川斑块面积的消减速率明显高于阴坡,这与气候变化和气象条件有关。由于气候变暖,阳坡和阴坡的冰川景观都在消减,但阳坡上的光照和太阳辐射相对较强,因此阳坡冰川景观的消减速率相对较高。

3.2 叶尔羌河流域冰川景观格局动态变化

为探索 1991—2017 年叶尔羌河流域各时期冰川景观空间结构变化特征,本文选择了能够高度浓缩景观空间结构信息的景观格局指数(图 5)。其中,1991—2017 年叶尔羌河流域冰川斑块数量(NP)整体呈现减少趋势,冰川斑块减少总数达 476 个。同时,冰川最大斑块指数(LPI)呈下降趋势,最大斑块指数由 9.33 降至 3.81,表明叶尔羌河流域冰川景观整体呈现消减趋势,且表现为小面积冰川斑块融化消失,冰川斑块数量减少;大面积冰川斑块不断消融,进而导致大斑块冰川的面积占比降低。1991—2017 年叶尔羌河流域冰川平均形状指数(SHAPE-MN)、平均周长面积比(PARA-MN)以及分裂指数(SPLIT)变化趋势相同,表现为波动上升趋势。其中,冰川平均形状指数(SHAPE-MN)呈先增后减,再缓慢增加趋势,表明叶尔羌河流域冰川斑块因不断消融,其形状越来越不规则;冰川平均周长面积比(PARA-MN)呈波动上升趋势,且 2001—2017 年间平均周长面积比(PARA-MN)明显大于 1991—2001 年,表明叶尔羌河流域冰川不断消融,导致冰川斑块分裂,致使冰川斑块破碎化程度变大;1991—2017 年,冰川景观分裂指数(SPLIT)由 39.87 不断增加到 93.79,表明叶尔羌河流域冰川景观呈现持续消减状态,且冰川厚度变薄,冰储量在不断减少。表明 26 年来,叶尔羌河流域冰川景观呈现不断消减状态,且冰川景观破碎化程度明显增加。

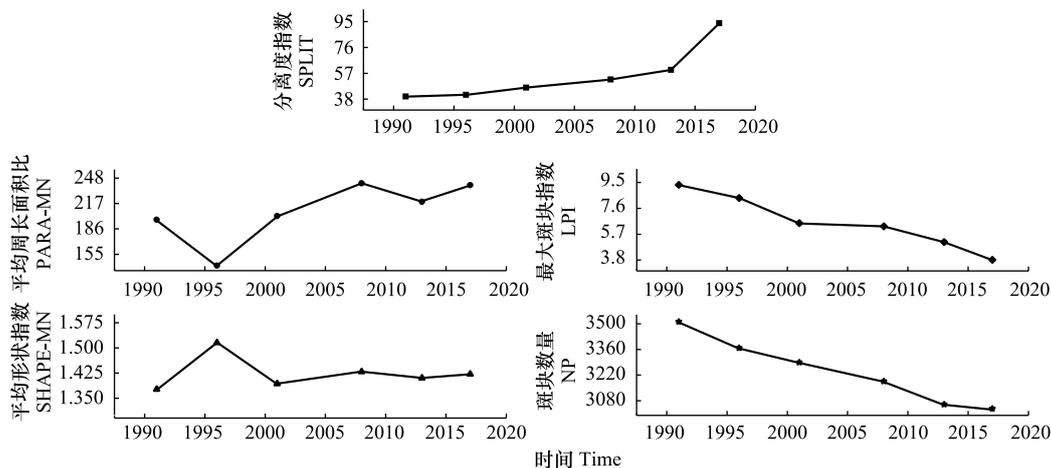


图 5 叶尔羌河流域冰川景观指数变化

Fig.5 Changes of landscape pattern index of glacier in the Yarkant River Basin

3.3 叶尔羌河流域冰川景观格局质心迁移分析

冰川景观质心的变化可以揭示冰川景观消融或堆积的面积分布。根据质心的算法,计算出叶尔羌河流域 1991、1996、2001、2008、2013 以及 2017 年 6 个时期冰川景观的质心坐标,结果如图 6 所示。从经度方向分析叶尔羌河流域冰川景观质心变化特征得出,冰川景观的质心先快速向东偏移,然后折向西偏移;接着 2008—2017 年间重复以上运动趋势。从纬度方向分析叶尔羌河流域冰川景观质心变化特征得出,冰川景观的质心整体上呈现向北偏移的趋势,这也表明由于北部大量大面积冰川斑块的存在,而大面积斑块冰川消融速度小于小面积斑块冰川,致使冰川景观的质心呈现不断向北偏移的趋势。从整体分析叶尔羌河流域冰川景观的质心变化特征得出,1991—2017 年冰川景观的质心迁移的轨迹总体上呈“W”字型,整体呈现东北偏移趋势,表

明该流域冰川在不断消融,且大面积斑块冰川主要分布在东北方向。

3.4 叶尔羌河流域冰川景观稳定性分析

通过分形理论,建立叶尔羌河流域冰川景观的周长-面积关系式,通过线性回归分析得到分维数以及空间结构稳定性指数(表 3)。分析可知,1991—2017 年间叶尔羌河流域冰川景观分维系数(D)下降率为 4.07%,而该时间段冰川景观稳定性指数(SK)呈波动增加趋势,冰川景观稳定性增强率为 18.52%。叶尔羌河流域冰川景观结构复杂度的微弱降低,以及冰川景观结构稳定性的增强,表明该流域冰川景观消减率略微降低,但仍然处于持续消融状态。

4 讨论与结论

4.1 讨论

气温是冰川景观融化的主要影响因素,降水是冰川景观积累的主要影响因素,二者的结合,共同决定着冰川景观的演化趋势^[38]。研究期间,叶尔羌河流域气候呈暖湿化趋势^[39]。气候变暖,导致该流域冰川斑块面积、数量的减少。冰川景观作为全球生态系统中特殊而重要的组成部分,一方面对维持区域生态稳定和调节河流径流具有重要意义^[16];另一方面,冰川景观的消融易引发冰川洪水、冰湖溃决等灾害,威胁下游地区的社会经济发展及人民生命财产安全^[40]。然而,叶尔羌河流域的冰川景观在不断缩减,所以对冰川景观进行适当的保护,减缓冰川景观消融的速度,对于改善干旱区绿洲的整体生态环境具有重要意义。

表 3 1991—2017 年叶尔羌河流域冰川景观分维数、空间结构稳定性指数变化

Table 3 The changing of fractal Dimension index and spatial Structure Stability Index of glacier Landscape in the Yarkant River Basin from 1991 to 2017

年份 Years	1991	1996	2001	2008	2013	2017
分维数 Fractal dimension	1.23	1.31	1.21	1.2	1.21	1.18
空间结构稳定性指数 Spatial structure stability index	0.27	0.19	0.29	0.3	0.29	0.32

在过去的研究中,多数学者主要从冰川面积、长度、体积等方面来研究冰川景观时空演变,但这不能直接反映斑块内部及不同斑块之间冰川覆被分布的复杂程度。本文从景观生态学的角度出发,借助景观格局指数来分析冰川景观结构的演变特征。研究结果较好的反映了研究区冰川景观结构的变化趋势,这可提高对冰川景观结构变化的认识与理解,为应对冰川景观变化及其影响提供参考依据。冰川景观结构复杂多样,形态各异,本文仅从冰川单一结构出发,探究了其演变特征。在今后的研究中还需要根据冰川斑块的大小进行细化,分类分等级讨论不同冰川斑块的结构变化,以便更清晰的认识冰川景观结构的演变过程。

4.2 结论

在 RS 和 GIS 技术支持下,以叶尔羌河流域为研究区,运用遥感影像对叶尔羌河流域 26 年来冰川景观时空变化特征进行了提取与分析,主要得到以下结论:

(1) 1991—2017 年,叶尔羌河流域冰川斑块面积共减少 799.50 km²(-13.09%);冰川斑块面积消减主要集中在海拔 5400—5800 m 之间,相较之下,海拔 4400 m 以下的区域冰川斑块面积消减率最高,达 63.68%;该流域冰川景观主要集中分布在坡度>35°的地形上,陡坡冰川斑块面积消减率最高(15.98%),急陡坡消减率最低(2.87%);阴阳两坡冰川景观均呈退缩趋势,阳坡冰川斑块面积的消减速率明显高于阴坡,分别为 0.51%/a 和 0.30%/a。

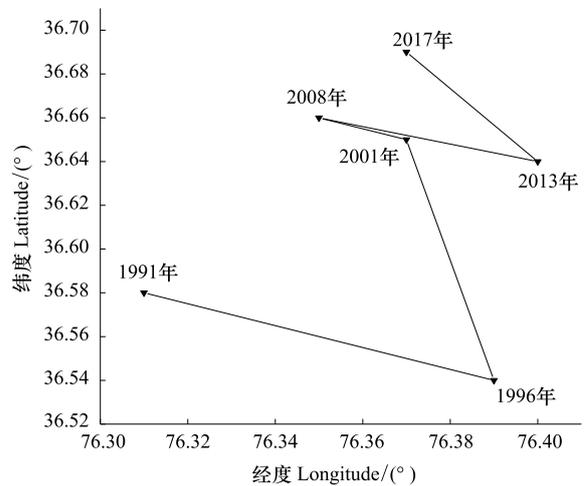


图 6 叶尔羌河流域冰川景观的质心迁移

Fig. 6 Centroids shifting of glacier landscape in the Yarkant River Basin

(2) 从景观水平对研究区冰川景观格局变化进行了分析,利用不同指数从不同角度描述了冰川斑块的变化特征。结果表明:1991—2017 年叶尔羌河流域冰川斑块减少总数达 476 个;冰川景观最大斑块指数由 1991 年的 9.33 降低至 2017 年的 3.81;冰川景观平均形状指数、平均周长面积比、分裂指数总体均呈现上升趋势,冰川景观因消融形状越发不规则、破碎度增加、厚度变薄。表明 26 年来,叶尔羌河流域冰川景观呈现不断消减状态,且冰川景观破碎程度显著增加。

(3) 通过质心迁移模型分析了研究区冰川景观的空间迁移变化特征。结果表明:1991—2017 年间叶尔羌河流域冰川景观无论在经度还是纬度均发生了迁移,变化轨迹呈“W”字型,整体呈现东北偏移趋势,表明该流域大面积斑块冰川主要分布在东北方向,且冰川景观在不断消减。

(4) 1991—2017 年间,冰川景观结构复杂度的微弱降低,冰川结构稳定性的增强,表明该流域冰川景观消减率略微降低,但仍然处于持续消融状态。

参考文献 (References):

- [1] 秦大河, 效存德, 丁永建, 姚檀栋, 卞林根, 任贾文, 王宁练, 刘时银, 赵林. 国际冰冻圈研究动态和我国冰冻圈研究的现状与展望. 应用气象学报, 2006, 17(6): 649-656.
- [2] 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.
- [3] 施雅风, 刘时银. 中国冰川对 21 世纪全球变暖响应的预估. 科学通报, 2000, 45(4): 434-438.
- [4] Bhattacharya A, Bolch T, Mukherjee K, King O, Menounos B, Kapitsa V, Neckel N, Yao T D. High Mountain Asian glacier response to climate revealed by multi-temporal satellite observations since the 1960s. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 4133-4133.
- [5] Zemp M, Huss M, Thibert E, Eckert N, McNabb R, Huber J, Barandun M, Machguth H, Nussbaumer S U, Gärtner-Roer I, Thomson L, Paul F, Maussion F, Kutuzov S, Cogley J G. Author Correction: Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016. *Nature*, 2020, 577(7792): E9.
- [6] 吴丹丹. 青藏高原地区冰川动态变化遥感研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- [7] 王宗太, 苏宏超. 世界和中国的冰川分布及其水资源意义. 冰川冻土, 2003, 25(5): 498-503.
- [8] Immerzeel W W, van Beek L P H, Bierkens M F P. Climate change will affect the Asian water towers. *Science*, 2010, 328(5984): 1382-1385.
- [9] Kaser G, Grosshauser M, Marzeion B. Contribution potential of glaciers to water availability in different climate regimes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(47): 20223-20227.
- [10] Radić V, Hock R. Glaciers in the earth's hydrological cycle; assessments of glacier mass and runoff changes on global and regional scales. *Surveys in Geophysics*, 2014, 35(3): 813-837.
- [11] Huss M. Present and future contribution of glacier storage change to runoff from macroscale drainage basins in Europe. *Water Resources Research*, 2011, 47(7): W07511.
- [12] 高艺宁, 赵萌萌, 熊梅, 赵天启. 农牧交错带草地景观格局特征及其影响因素分析. 中国农业大学学报, 2018, 23(10): 103-111.
- [13] 段翰晨, 王涛, 薛娴, 郭坚, 文星. 科尔沁沙地沙漠化时空演变及其景观格局——以内蒙古自治区奈曼旗为例. 地理学报, 2012, 67(7): 917-928.
- [14] 张猛, 曾永年. 长株潭城市群湿地景观时空动态变化及驱动力分析. 农业工程学报, 2018, 34(1): 241-249.
- [15] 效存德, 苏勃, 王晓明, 秦大河. 冰冻圈功能及其服务衰退的级联风险. 科学通报, 2019, 64(19): 1975-1984.
- [16] 蔡兴冉, 李忠勤, 张慧, 徐春海. 中国天山冰川变化脆弱性研究. 地理学报, 2021, 76(9): 2253-2268.
- [17] Rankl M, Vijay S, Kienholz C, Braun M. Glacier changes in the Karakoram region mapped by multi-mission satellite imagery. *The Cryosphere Discussions*, 2013, 7(4): 4065-4099.
- [18] 姜亮亮, 刘海隆, 包安明, 任艳群, 安小艳. 玛纳斯河流域景观格局演变特征与驱动机制分析. 水土保持研究, 2014, 21(4): 256-262.
- [19] 刘俊岭, 赵荣, 王亮, 梁勇. 青藏高原景观空间格局的特征研究. 测绘科学, 2014, 39(1): 87-92.
- [20] 李虹蓉. 祁连山吐尔根达坂地区近 30 年来的冰川变化[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [21] 张贤芳, 舒强, 李恩. 叶尔羌河近 48 年来径流演变规律研究. 干旱区资源与环境, 2012, 26(1): 93-97.
- [22] 杜清, 徐海量, 张广朋, 白玉锋, 张沛, 凌红波, 赵新风. 叶尔羌河流域 1990—2010 年生态环境变化特征. 干旱地区农业研究, 2016, 34(1): 252-256, 263.
- [23] 冯加远. 叶尔羌河流域水土环境演变影响因素分析及其防控对策研究[D]. 西安: 西北大学, 2016.
- [24] 王建平, 阿依努尔·买买提, 马元旭. 1978—2018 年叶尔羌河流域土地利用及其生态服务价值变化数据研究. 全球变化数据学报: 中英文, 2020, 4(1): 75-85, 75.

- [25] 李华林, 白林燕, 冯建中, 高华端, 冉启云, 于涛, 高旺旺. 新疆叶尔羌河流域胡杨林时空格局特征. 生态学报, 2019, 39(14): 5080-5094.
- [26] 张雪琪, 满苏尔·沙比提, 刘海涛, 马国飞. 1957—2015 年叶尔羌河流域气候变化特征及其径流响应. 干旱区研究, 2019, 36(1): 58-66.
- [27] 屈冉, 申文明, 王昌佐, 刘晓龙, 柏延臣, 高彦华. 基于波段运算最优方法的冰川遥感信息提取及其变化监测. 地域研究与开发, 2013, 32(6): 154-158.
- [28] 冀琴, 董军, 刘睿, 肖作林, 杨太保. 1990—2015 年喜马拉雅山冰川变化的遥感监测及动因分析. 地理科学, 2020, 40(3): 486-496.
- [29] 周远刚, 赵锐锋, 张丽华, 赵敏. 博格达峰地区冰川和积雪变化遥感监测及影响因素分析. 干旱区地理, 2019, 42(6): 1395-1403.
- [30] 何毅, 杨太保, 陈杰, 冀琴. 1972—2013 年东天山博格达峰地区冰川变化遥感监测. 地理科学, 2015, 35(7): 925-932.
- [31] 张继平, 刘林山, 张懿铨, 聂勇, 张学儒, 张琴琴. 面向对象的极高海拔区水体及冰川信息提取——以珠穆朗玛峰国家级自然保护区核心区为例. 地球信息科学学报, 2010, 12(4): 517-523.
- [32] 张敏, 宫兆宁, 赵文吉, 阿多. 近 30 年来白洋淀湿地景观格局变化及其驱动机制. 生态学报, 2016, 36(15): 4780-4791.
- [33] Li D S, Cui B L, Wang Y, Xiao B, Jiang B F. Glacier extent changes and possible causes in the Hala Lake Basin of Qinghai-Tibet Plateau. Journal of Mountain Science, 2019, 16(7): 1571-1583.
- [34] 朱晓华, 蔡运龙. 中国土地利用空间分形结构及其机制. 地理科学, 2005, 25(6): 6671-6677.
- [35] 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. 冰川冻土, 2019, 41(5): 1026-1035.
- [36] 别强, 强文丽, 王超, 何磊, 赵传燕. 1960—2010 年黑河流域冰川变化的遥感监测. 冰川冻土, 2013, 35(3): 574-582.
- [37] 张珊珊, 周忠发, 孙小涛, 冯倩, 陈全. 基于坡度等级的喀斯特山区石漠化与水土流失相关性研究——以贵州省盘县为例. 水土保持学报, 2017, 31(2): 79-86.
- [38] 李龙, 姚晓军, 刘时银, 卜亚平, 宫鹏, 李晓锋. 近 50 年丝绸之路经济带中国境内冰川变化. 自然资源学报, 2019, 34(7): 1506-1520.
- [39] 王翠, 李生宇, 雷加强, 杨兴华, 杨帆. 叶尔羌河流域气候变化特征及趋势分析. 干旱区资源与环境, 2018, 32(1): 155-160.
- [40] 李开明, 李忠勤, 高闻宇, 王林. 近期新疆东天山冰川退缩及其对水资源影响. 科学通报, 2011, 56(32): 2708-2716.