

1990—2015年喜马拉雅山冰川变化的遥感监测

冀琴^{1,2}, 刘睿^{1,3}, 杨太保²

(1. 重庆师范大学地理与旅游学院, GIS应用研究重庆市高校重点实验室, 重庆 401331; 2. 兰州大学资源环境学院, 冰川与生态地理研究所, 兰州 730000; 3. 重庆市综合经济研究院, 重庆 401147)

摘要: 基于Landsat系列遥感数据, 运用比值阈值法(B3/B5)和目视解译, 研究1990—2015年喜马拉雅山冰川面积的分布与变化特征。结果表明: 25年间研究区冰川面积共减少2553.10 km², 年均退缩率为0.44%/a, 研究时段冰川加速退缩。研究区冰川主要分布在西段地区, 中段次之, 东段最少, 近25年来西段、东段和中段地区冰川均表现为退缩趋势, 其中东段地区退缩最快, 中段最慢。从地形分布和变化特征看, 5°~25°范围内冰川的分布面积较多, 近25年来各坡度等级冰川均在退缩, 其中25°~30°之间冰川面积退缩较快, 在极平缓/极陡峭地区退缩较慢。尽管8个坡向上冰川均表现为退缩趋势, 但退缩幅度有所差异, 北坡与西北坡冰川退缩较慢, 其他坡向退缩较快。研究时段表碛物覆盖型与非表碛物覆盖型冰川均在退缩, 但后者的退缩幅度较大, 表明研究区表碛物在一定程度上抑制了冰川消融。

关键词: 喜马拉雅山; 冰川变化; 遥感技术

DOI: 10.11821/dljy020190283

1 引言

冰川作为冰冻圈的重要组成部分, 在气候系统中发挥着重要作用, 是监测早期全球气候变化的敏感指示器^[1]。据《Randolph冰川目录》统计, 全球冰川(不包含南极和格陵兰冰盖)总面积约 7.1×10^5 km², 其中45.5%分布在北极, 其次为南极周边的岛屿^[2]。在中、低纬度山区, 冰雪融水是河流补给的重要来源^[3], 尤其在干旱半干旱地区, 冰川融水是稳定而可靠的水源。通过研究冰川的分布与进退变化, 进而评估冰川变化对河流径流量的影响, 具有重要的科学和现实意义^[4,5]。

喜马拉雅山位于青藏高原西南部边缘, 该区冰川分布较为密集, 且大部分属于海洋型冰川, 对气候变化较为敏感^[6]。随着气候逐步变暖, 喜马拉雅山的冰川呈现出退缩的态势, 一定时期内冰川的快速消融有利于缓解水资源稀缺的巨大压力, 然而大范围冰川的不断退缩, 不只使自然灾害加重, 同时还能够引起海平面上升, 因此对该区冰川变化的研究具有重要的现实意义和科学价值。本文拟选择整个喜马拉雅山为研究对象, 以Landsat TM/ETM+/OLI影像为数据源, 在RS和GIS技术的支持下, 分析近25年来喜马拉雅山冰川面积的分布与进退变化状况。

收稿日期: 2019-04-17; 修订日期: 2020-09-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41801063); 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN201800541); 教育部人文社会科学基金项目(16YJCZH061); 重庆市教委人文社科重点项目(17SKG028)

作者简介: 冀琴(1987-), 女, 山西大同人, 博士, 讲师, 研究方向3S技术应用。E-mail: yunngy@126.com

通讯作者: 杨太保(1962-), 男, 山西运城人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向自然地理环境变化研。

E-mail: yangtb@lzu.edu.cn

2 研究区概要

喜马拉雅山脉西起南迦帕尔巴特峰，东至南迦巴瓦峰（图1），全长约2400 km，南北宽200~350 km^[7]。在印度洋季风和西风的影响下，喜马拉雅山南北坡气候表现出明显的差异，南坡面临夏季向北推进的印度洋季风，降水充沛，最大降水带在海拔2000 m左右。与南坡相比，北坡属于高原山地气候，终年积雪，日照时间短，气候寒冷干燥。

3 数据来源与研究方法

3.1 数据来源

遥感数据源于美国地质调查局。2003年5月31日Landsat 7 ETM+传感器发生故障，导致影像出现条带现象，因此，2003年后解译数据我们尽可能采用TM/OLI数据。Landsat 8卫星于2013年2月成功发射，其上携带OLI/TIRS两个传感器，在空间分辨率和光谱特性等方面与Landsat 1~7基本保持一致。为了有效剔除云和季节性积雪的影响^[8]，在影像选取过程中，着重选取消融期末以及含云量较少的数据（表1）。数字高程模型数据为30m分辨率的ASTER GDEM数据，源于地理空间数据云，用于提取冰川特征以及辅助识别冰川边界。

3.2 研究方法

采用比值阈值法提取冰川边界需要选取合适的阈值。经多次试验表明，针对OLI及TM/ETM+等影像，所选用的阈值分别是1.80与1.00，可将冰川的边界较好地提取出来。虽然比值阈值法被认为是行之有效且较为完善的方式，然而目视解译依然不可或缺^[9]。为提高冰川边界的解译精度，我们对逐条冰川进行目视解译，在此过程中，提取面积大于0.05 km²冰川（其余小规模很可能是积雪）。此外对于部分面积大于0.05 km²冰川，由于

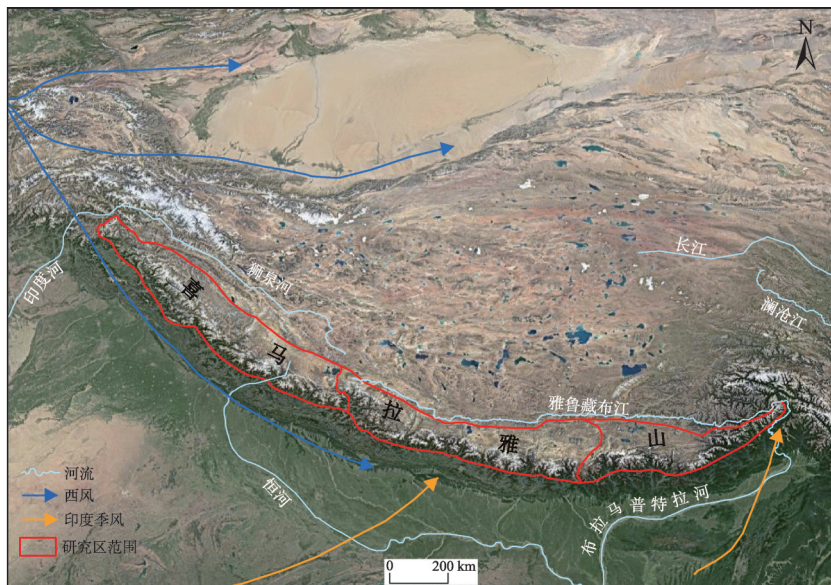


图1 研究区概况图

Fig. 1 Location of the study area (Himalayas)

注：影像来源于Google Earth。

表1 遥感影像列表

Tab. 1 Utilized image data

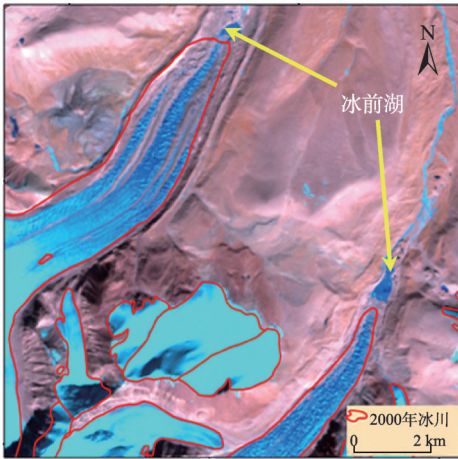
获取日期	传感器	云量(%)	获取日期	传感器	云量(%)	获取日期	传感器	云量(%)	获取日期	传感器	云量(%)
149/36	TM	44	2001/08/29	ETM+	17	2008/07/31	ETM+	15	2016/10/01	OLI	1
148/36	TM	53	2000/08/27	TM	10	2008/08/25	ETM+	12	2016/10/02	ETM+	1
148/37	TM	34	2000/09/04	ETM+	23	2008/08/25	ETM+	23	2015/09/14	ETM+	29
147/37	TM	64	2000/08/28	ETM+	24	2008/08/25	ETM+	51	2016/10/03	OLI	1
147/38	TM	25	2001/09/24	TM	1	2011/09/28	ETM+	25	2015/09/15	OLI	7
146/38	TM	1	2001/09/09	ETM+	2	2008/07/28	ETM+	18	2015/09/16	ETM+	2
146/39	TM	8	2000/08/05	ETM+	13	2011/12/26	ETM+	0	2016/11/13	OLI	10
145/38	TM	3	2000/11/02	ETM+	2	2009/07/30	TM	21	2015/09/17	OLI	3
145/39	TM	1	2001/08/01	ETM+	26	2011/09/22	TM	30	2016/12/08	OLI	1
144/39	TM	42	1999/12/03	TM	17	2011/10/09	ETM+	2	2015/09/10	OLI	3
143/39	TM	3	2000/10/03	ETM+	1	2011/10/18	ETM+	2	2015/09/03	OLI	3
143/40	TM	13	2001/12/09	ETM+	16	2011/12/05	ETM+	37	2015/09/27	ETM+	32
142/40	TM	0	2000/12/15	ETM+	2	2009/09/27	TM	23	2015/10/06	ETM+	1
141/40	TM	2	2000/11/22	ETM+	1	2010/12/12	TM	24	2015/10/07	OLI	3
140/40	TM	1	2000/11/15	TM	0	2009/11/08	ETM+	1	2015/09/30	OLI	3
140/41	TM	1	1999/04/27	TM	27	2012/12/02	ETM+	1	2015/10/08	ETM+	1
139/40	TM	0	2001/12/29	ETM+	1	2010/04/18	TM	8	2015/10/09	OLI	1
139/41	TM	42	2000/12/26	ETM+	1	2012/10/08	ETM+	18	2015/10/09	OLI/TIRS	17
138/40	TM	1	2000/12/19	ETM+	1	2009/01/04	TM	1	2015/09/08	ETM+SLC-off	11
138/41	TM	24	1999/09/20	TM	32	2008/01/16	TM	13	2015/09/08	ETM+SLC-off	55
137/40	TM	24	1999/05/08	TM	0	2009/11/11	TM	0	2015/09/09	OLI	2
137/41	TM	16	2000/12/28	ETM+	0	2011/09/30	TM	8	2016/09/09	OLI	36
136/40	TM	24	1998/12/08	TM	11	2009/11/04	TM	14	2015/11/21	OLI	1
136/41	TM	24	2001/01/30	TM	21	2009/11/04	TM	5	2015/11/21	OLI	1

受不同时段遥感影像质量影响（某一期或几期质量不理想），为提高解译精度同时增加对比性，同样未进行统计。在实际统计过程中发现，这类冰川分布面积较少，对于整个喜马拉雅山而言影响较小。研究区表碛物覆盖型冰川较多，因此对于冰川边界的目视解译工作，主要包括：（1）依据冰川的形态特征，结合第二次中国冰川目录，有效地剔除季节性积雪影响^[10]。（2）依据以下原则，剔除表碛物：① 冰川末端有冰前湖或小溪，采取溪流或者冰前湖的位置有效地识别冰川边界（图 2a 与图 2b）；② 将相同区域的不同时相的影像进行比较，假如之后的若干期信息数据中涵盖诸多小湖泊，则认为这些区域为表碛物覆盖的冰川区（图 2c 和图 2d）；③ 基于 Google Earth，将冰川末端和周围地表的颜色进行对比，假如其地表色彩比周围深，则该区域是表碛物所覆盖的冰川区域^[11,12]。

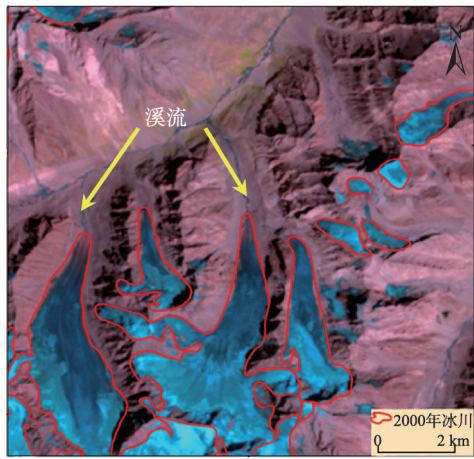
3.3 冰川边界验证

实地考察和使用更高分辨率的影像作为参考是验证遥感数据解译结果的两种常用途

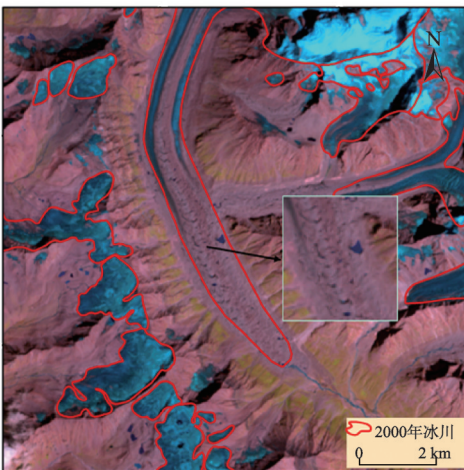
a. 末端存在冰湖(2000/11/22 ETM+)



b. 末端存在溪流(2000/8/28 ETM+)



c. 2000年ETM+影像



d. 2015年OLI影像

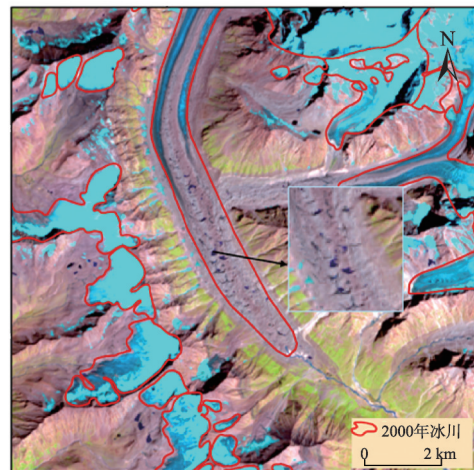


图2 表碛物覆盖型冰川提取

Fig. 2 The extraction of debris-covered glaciers

注：影像来源于美国地质调查局（United States Geological Survey, USGS）。

径^[13]。除上述途径外,国内外学者还利用传感器与图像之间存在的潜在误差以及冰川边界缓冲区原理等方法分析冰川边界提取精度^[11,14]。相比而言,前两种途径精度更高。为了验证研究区冰川边界的精度,我们利用手持GPS对喜马拉雅山仲尼冰川末端进行了测量,同时对比实测数据与提取结果(图3),并计算两者的平均距离与标准差,结果表明:平均距离和标准差分别为19.6 m和8.9 m,说明我们提取的冰川边界结果较为准确,能够满足研究需要。此外,为了更详细了解冰川面积变化特征,采用缓冲区方法(15 m)^[11]分别计算研究区冰川面积变化精度。

4 结果分析

4.1 冰川总面积变化

喜马拉雅山的冰川呈现出退缩的态势(表2),在不同时段内,退缩幅度存在差异。其中1990—2000年,冰川的面积缩减 891.02 ± 15.45 km²; 2000—2010年,面积退缩 900.11 ± 22.22 km²; 2010—2015年,面积缩减 761.97 ± 15.33 km²,上述数据表明喜马拉雅山冰川正在加速退缩(图4)。与青藏高原大部分地区冰川变化的趋势一致^[15-17]。

4.2 东段、中段和西段冰川面积变化

由表3可知,研究区冰川主要分布在西段,2015年西段地区冰川的分布面积为 10242.10 ± 518.95 km²,约占该时期冰川总面积的 $49.54 \pm 2.51\%$,其次为中段地区,而东段冰川分布面积最小,仅为 $13.17 \pm 0.54\%$ 。

由图5可知,近25年来东段、中段和西段地区冰川均表现为退缩趋势,但退缩幅度不同。①喜马拉雅山东段地区冰川面积的年均退缩率约为0.48%/a,3个时段年均退缩率分别约为0.45%/a、0.47%/a和0.64%/a,表明东段地区冰川正在加速退缩;②中段冰川面积的年均退缩率约为0.41%/a,对应3个时段冰川的年均退缩率分别为0.37%/a与0.38%/a以及0.61%/a,退缩趋势与东段类似;③1990—2015年西段冰川面积的年均退缩率约为0.45%/a,不同时段年均退缩率也表现为逐渐增大的趋势。近25年来西段地区冰川也呈加速退缩的态势,同时2010—2015年退缩的速率极其显著。总体而言,1990—2015年间喜马拉雅山东段地区冰川的年均退缩率最大,其次为西段地区,中段最小。

表2 1990—2015年研究区冰川面积变化情况

Tab. 2 Glacier area variations in 1990-2015

年份	面积(km ²)	减少量(km ²)	退缩率(%)	年均变化率(%/a)
1990	23229.27±997.28	-	-	-
2000	22338.25±981.83	891.02±15.45	3.84±0.07	-0.38±0.007
2010	21438.14±959.61	900.11±22.22	4.03±0.10	-0.40±0.010
2015	20676.17±944.28	761.97±15.33	3.55±0.07	-0.71±0.007
总计/平均值	-	2553.10±53.00	10.99±0.23	-0.44±0.014

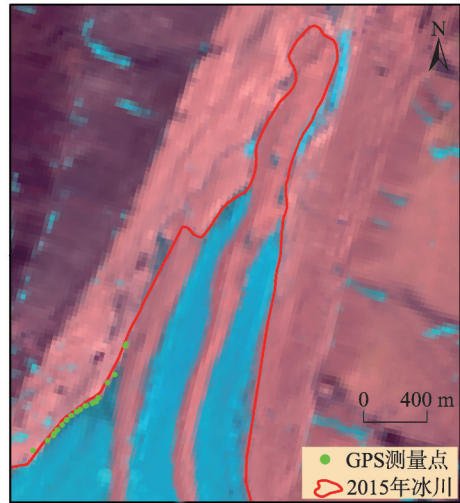


图3 仲尼冰川边界和GPS测量点

Fig. 3 Glacier boundary and GPS measuring points of Zhongni Glacier

注:影像来源于美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)。

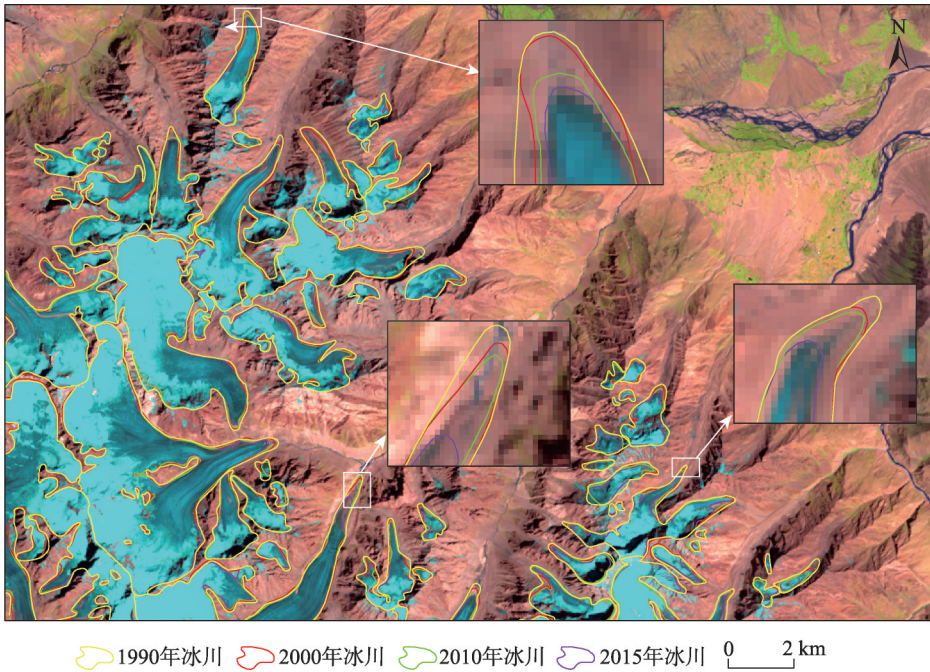


图4 1990—2015年喜马拉雅山部分冰川变化图

Fig. 4 Glacier changes of the Himalayas in 1990-2015 (background is Landsat ETM+ image)

注：底图为2015/08/30 Landsat ETM+影像，来源于美国地质调查局（United States Geological Survey, USGS）。

表3 1990—2015年喜马拉雅山东段、中段和西段冰川的分布特征

Tab. 3 Distribution characteristics of glaciers in the eastern, central and western parts in the Himalayas from 1990 to 2015

(单位: km²)

年份	1990	2000	2010	2015
西段	11551.69±546.82	11117.70±541.50	10671.78±529.02	10242.10±518.95
中段	8584.75±332.91	8267.95±324.35	7953.78±316.43	7711.22±313.46
东段	3092.83±117.55	2952.60±115.98	2812.58±114.16	2722.85±111.87
总计	23229.27±997.28	22338.25±981.83	21438.14±959.61	20676.17±944.28

4.3 南、北坡冰川的变化

1990年、2000年、2010年和2015年南坡冰川分布面积如表4所示。近25年来，南坡冰川面积表现为减小的趋势，由1990年的 $14451.25 \pm 583.40 \text{ km}^2$ 减小到2015年 $13082.14 \pm 555.72 \text{ km}^2$ ，共减小了 $1369.11 \pm 27.68 \text{ km}^2$ ，对应3个时段，冰川面积分别减少了 $477.42 \pm 11.40 \text{ km}^2$ 与 $431.79 \pm 9.74 \text{ km}^2$ 以及 $459.90 \pm 6.54 \text{ km}^2$ ，且第三时段冰川的年均退缩率为 $0.68\%/a$ ，远大于前两个时段（ $0.33\%/a$ 与 $0.31\%/a$ ）。由此可知，近25年来南坡冰川面积的年均退缩率呈先减小后增大的趋势。

由表5可知，1990—2015年喜马拉雅山北坡冰川面积不断减小，不同时段冰川退缩特征表现为：第一时段与第二时段冰川面积分别缩减了 $413.60 \pm 4.05 \text{ km}^2$ 和 $468.32 \pm 12.48 \text{ km}^2$ ，后者冰川退缩加快；第三时段冰川面积减少量为 $302.07 \pm 8.79 \text{ km}^2$ ，与前两个时段相比，该时段年均退缩率与南坡类似。综上所述，1990—2015年喜马拉雅山北坡冰川加速退缩。

对比喜马拉雅山南、北坡冰川分布情况和变化特征可知,冰川主要分布在南坡,以2015年为例,南坡地区冰川的分布面积为 $13082.14 \pm 555.72 \text{ km}^2$,占对应时段冰川总面积的62.68%;北坡分布面积所占比例为37.32%,前者约为后者的两倍。尽管南坡的分布面积大于北坡,但冰川的年均退缩率($0.38\%/a$)小于北坡地区($0.54\%/a$)。

4.4 不同坡向冰川的变化

由图6可知冰川主要分布在东坡、北坡、东北坡和西北坡向。2015年东坡、北坡、东北坡和西北坡向冰川分布面积分别占2015年冰川总面积的12.97%、16.47%、14.91%和14.42%,南坡和西南坡向冰川分布面积较少,分别为9.72%和9.46%。统计不同时段研究区各坡向冰川变化发现(图6b),1990—2015年各时段各坡向冰川均表现为加速退缩态势,尤其是近5年来,加速退缩趋势更为显著。3个时段东、东南和南坡冰川面积退缩均较快,西、西南、东北坡居中,北和西北坡冰川退缩较慢。

4.5 不同坡度冰川的变化

本研究所指的坡度为冰面坡度,利用DEM数据,在ArcGIS空间分析功能支持下,分析喜马拉雅山不同坡度冰川的分布特征及其进退情况(图7)。不同时段,冰川在各坡向的分布特征一致,以2015年为例,冰川主要分布在 $5^\circ \sim 25^\circ$ 之间,约占2015年喜马拉雅山冰川总面积的52.00%。其中 $10^\circ \sim 15^\circ$ 范围内冰川分布面积最大,约为14.00%,其次为 $5^\circ \sim 10^\circ$,约13.79%; $>45^\circ$ 范围内冰川分布面积较少。总体而言,随着坡度的增加冰川分布面积呈减小的趋势。

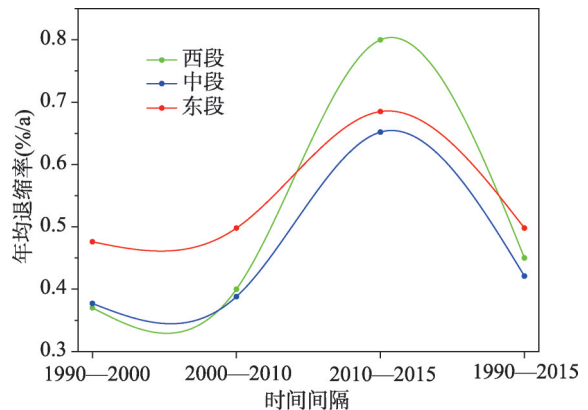


图5 1990—2015年喜马拉雅山东段、中段和西段冰川的年均退缩率

Fig. 5 The annual average retreat rate of glaciers in the eastern, middle and western parts of the Himalayas during 1990-2015

表4 1990—2015年喜马拉雅山南坡冰川面积分布与进退变化

Tab. 4 Ice covered area and variations of the southern Himalayas from 1990 to 2015

年份	面积(km ²)	减少量(km ²)	退缩率(%)	年均变化率(%/a)
1990	14451.25±583.40	-	-	-
2000	13973.83±572.00	477.42±11.40	3.30±0.08	-0.33±0.008
2010	13542.04±562.26	431.79±9.74	3.09±0.07	-0.31±0.007
2015	13082.14±555.72	459.90±6.54	3.40±0.05	-0.68±0.010
总计	-	1369.11±27.68	9.47±0.19	-0.38±0.013

表5 1990—2015年喜马拉雅山北坡冰川面积分布和进退变化

Tab. 5 Ice covered area and variations of the northern Himalayas for 1990-2015

年份	面积(km ²)	减少量(km ²)	退缩率(%)	年均变化率(%)
1990	8778.02±413.88	-	-	-
2000	8364.42±409.83	413.60±4.05	4.71±0.05	-0.47±0.005
2010	7896.10±397.35	468.32±12.48	5.60±0.15	-0.56±0.015
2015	7594.03±388.56	302.07±8.79	3.83±0.11	-0.77±0.022
总计	-	1183.99±25.32	13.49±0.29	-0.54±0.019

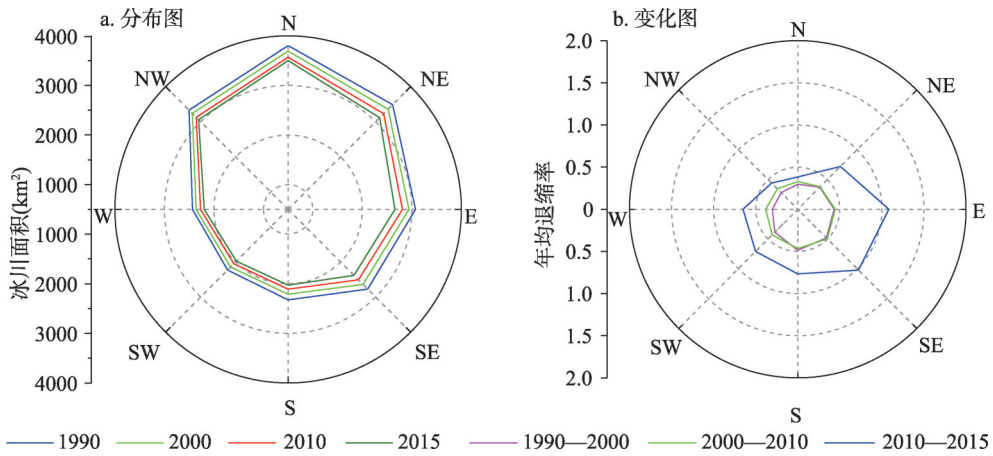


图6 1990—2015年各坡向冰川的分布与退缩状况

Fig. 6 Distribution and retreat of glaciers in different aspects from 1990 to 2015

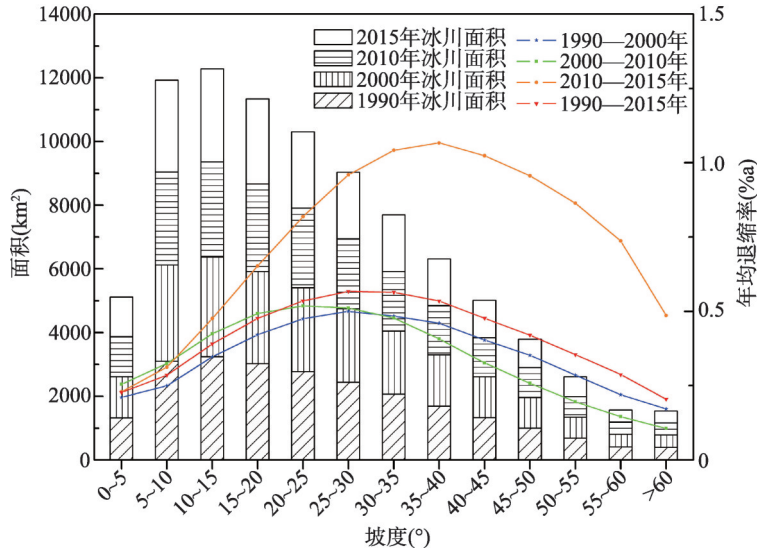


图7 各坡度冰川的分布与退缩状况

Fig. 7 Coverage and retreat of glaciers on different slopes from 1990 to 2015

1990—2015年研究区冰川面积退缩率随坡度的变化呈先增加后减小的趋势，主要分布在20°~40°之间，在25°~30°范围内冰川退缩率最快，其次为30°~35°。坡度>60°范围内冰川退缩最为缓慢。可见，20°~40°范围内的冰川退缩较快，而在平缓或极陡峭的区域，退缩较慢。尽管不同时段各坡度冰川退缩率有所差异，但总体而言，2010—2015年冰川年均退缩率高于其他两个时段。

4.6 表碛物覆盖与非表碛覆盖型冰川的变化

表碛物覆盖型冰川的消融速率与表碛层厚度密切相关，即当表碛层厚度>0.1 m时，表碛物在一定程度上能够抑制冰川消融，而当厚度小于0.02 m时，表碛层不仅不能够抑制冰川消融，而且还可以吸收更多的太阳辐射，加速冰川消融^[18]。研究区表碛物较为发育，为了进一步了解喜马拉雅山表碛物的特征和作用，我们将研究区冰川分为表碛物覆盖型和非覆盖型两类（表6）。

表6 1990—2015年研究区不同类型冰川的面积分布与变化

Tab. 6 Area and change of glaciers in situations of Himalayas during the period of 1990-2015

年份	表碛覆盖			非表碛覆盖		
	面积(km ²)	数目	规模(km ²)	面积(km ²)	数目	规模(km ²)
1990	10269.37±303.66	749	13.71±0.41	12959.90±693.62	11462	1.13±0.06
2015	9733.22±298.79	754	12.91±0.40	10942.95±645.49	12004	0.91±0.05

由表6可知喜马拉雅山表碛物覆盖型冰川的数目较少, 1990年共有749条, 占冰川总数量6.13%, 2015年略微增加, 为754条, 占对应时期冰川总数量5.91%。尽管该类型冰川的数目较少, 但分布面积较大, 分别为44.21%和47.07%。通过对比两种类型冰川的平均规模发现, 表碛覆盖型冰川的平均规模远大于非表碛覆盖型冰川, 以1990年为例, 前者平均规模为 $13.71\pm 0.41\text{ km}^2$, 后者仅为 $1.13\pm 0.06\text{ km}^2$ 。

分析近25年来表碛物覆盖型和非表碛物覆盖型冰川的退缩量和退缩率可知, 两种类型冰川的退缩量分别为 $536.15\pm 4.87\text{ km}^2$ 和 $2016.95\pm 48.13\text{ km}^2$, 退缩率分别为5.22%和15.56%, 后者远大于前者, 可见喜马拉雅山地区表碛物在一定程度上能够抑制冰川消融。此外, 小冰川规模冰川对气候反应更为敏感^[19]。因此, 两种类型冰川平均规模的差异也可能是导致表碛覆盖型冰川具有比较小的退缩速度的关键性成因。

为深入掌握喜马拉雅山表碛物的分布特点, 统计1990—2015年研究区表碛覆盖型冰川表碛区面积的变化特征(表7), 结果显示: 研究时段表碛区面积呈退缩趋势。第一时段, 表碛区面积约减少了 80.65 km^2 , 年均退缩率 $0.38\%/a$; 第二时段, 表碛区面积的减少量约为 39.44 km^2 , 年均退缩率($0.19\%/a$)小于第一时段; 第三时段, 面积减少约 37.40 km^2 , 年均退缩率大于第二个时段, 略小于第一时段。

4.7 冰川变化的影响因素

20世纪50年代以来喜马拉雅山地区气温整体呈波动上升趋势, 但不同区域升温时间和幅度略有不同。20世纪70年代中期以来喜马拉雅山的平均气温上升了 1.00°C , 约为同期北半球中纬度地区增温幅度(0.60°C)的两倍^[20]; 1971—2004年间珠峰地区气温呈明显的上升趋势, 变暖时间要早于中国, 且升温幅度($0.23^\circ\text{C}/10a$)高于全球($0.13^\circ\text{C}/10a$)^[21]; 1973—2005年间中国境内喜马拉雅山中段纳木那尼峰地区年均气温显著升高, 该时段普兰站年均气温的增温率为 $0.30^\circ\text{C}/10a$, 高于珠峰地区^[22]。此外, 1960—2002年间喜马拉雅山东段察隅和波密等站点的记录表明, 年均气温呈上升的趋势, 且夏季气温的增温幅度更为显著^[23]。除气温外, Salerno等^[24]分析了1994—2013年间喜马拉雅山珠峰地区年降水量发现, 该区降水量整体呈下降的趋势。除气象站点实测资料外, 冰芯积累量被认为是当地降水量最直接、可靠的指标^[25], 冰芯积累量反演结果同样说明近几十年研究区降水呈降低趋势^[26,27]。可见喜马拉雅山冰川退缩很可能是气温升高、降水量减少共

表7 1990—2015年喜马拉雅山表碛区面积的分布与变化情况

Tab. 7 Debris covered area and changes in the Himalayas during the period of 1990-2015

年份	面积(km ²)	减少量(km ²)	退缩率(%)	年均变化率(%/a)
1990	2116.69±158.95	-	-	-
2000	2036.04±154.10	80.65±4.85	3.81±0.23	-0.38
2010	1996.60±151.04	39.44±3.06	1.94±0.15	-0.19
2015	1959.20±148.27	37.40±2.77	1.87±0.14	-0.37
总计/平均值	-	157.49±10.68	7.44±0.50	-0.30

同导致的。

除气候因素外,人类活动排放的黑炭也会对冰川消融起到加速作用。黑炭烟尘飘落到冰川区并沉降在冰川表面,导致冰面颜色变暗,反照率降低,使得冰面吸收的热量增加,加速了冰川融化。Xu等通过冰芯的相关结论表明,20世纪五、六十年代欧洲所排放出来的黑炭成为青藏西、北部冰川融化速度加快的重要原因之一^[28];Chen等对乌鲁木齐1号冰川的物质平衡进行模拟和测量,确定该区26%的冰川融化由黑碳导致^[29]。Hu等对喜马拉雅山-青藏高原山地冰川进行研究,结果表明黑碳(BC)和矿物粉尘(MD)沉积增加导致该区大规模冰川正经历着明显变薄和后退趋势^[30]。

4.8 与喜马拉雅山其他冰川数据的对比分析

为了更为细致地了解喜马拉雅山冰川分布特征,我们选取了2014年发布的中国第二次冰川编目数据(国内冰川)和2017年发布的第6版Randolph冰川编目资料(国内外冰川)与本研究的结果进行对比。由于第二次中国冰川编目喜马拉雅山地区影像数据包含了2004—2011年左右的Landsat TM/ETM+,为了保持影像时段一致性,选取了第二次中国冰川编目2010年左右的冰川边界与本研究进行对比,前者包含的冰川面积为4190.34 km²,相同时段对应区域本研究提取的冰川分布面积为4135.73 km²,二者相差1.3%;Randolph冰川编目中包含了喜马拉雅山南坡冰川数据,但采用1998—2013年遥感影像解译冰川边界,为了具有可比性,同样提取了2010年左右的Randolph冰川编目数据(3084.19 km²)与本研究结果(3031.68 km²)进行对比,二者相差1.7%,可见本研究提取的冰川边界数据可以满足研究需要。

5 结论

(1) 1990—2015年间喜马拉雅山冰川加速退缩,尤其是近5年来,加速退缩趋势尤为显著。

(2) 喜马拉雅山冰川主要分布在坡度5°~25°范围内。近25年来各坡度等级冰川均在退缩,25°~30°范围内冰川退缩较明显,极其陡峭或者平缓地区冰川的退缩速率较慢。

(3) 冰川在各个坡向呈不均匀分布,东、东北、北、西北坡向冰川分布面积较大。各个坡向的冰川均呈现出退缩的态势,东、东南、南、西南坡向的冰川退缩较快,北、西北坡较慢。

(4) 喜马拉雅山表碛覆盖型冰川的数目较少,但分布面积较大,近25年来表碛物覆盖型与非覆盖型冰川均在退缩,但后者的退缩幅度较大,表明研究区表碛物在一定程度上能够抑制冰川消融。

致谢:感谢审稿专家对文章提出的宝贵意见,同时对国家地球系统科学数据中心和USGS提供的数据、寒区旱区科学数据中心共享的中国第二次冰川编目数据以及美国国家雪冰数据中心提供Randolph一并表示感谢。

参考文献(References)

- [1] 秦大河, 效存德, 丁永建, 等. 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. [Qin Dahe, Xiao Cunde, Ding Yongjian, et al. Progress on cryospheric studies by international and chinese communities and perspectives. Journal of Applied Meteorological Science, 2006, 17(6): 649-656.]
- [2] 牟建新, 李忠勤, 张慧, 等. 全球冰川面积现状及近期变化: 基于2017年发布的第6版Randolph冰川编目. 冰川冻土,

- 2018, 40(2): 238-248. [Mu Jianxin, Li Zhongqin, Zhang Hui, et al. The global glacierized area: current situation and recent change, based on the Randolph Glacier Inventory (RGI 6.0) published in 2017. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(2): 238-248.]
- [3] 姚檀栋, 刘时银, 蒲健辰, 等. 高亚洲冰川的近期退缩及其对西北水资源的影响. *中国科学*, 2004, 36(6): 535-543. [Yao Tandong, Liu Shiyin, Pu Jianchen, et al. Recent glacial retreat in High Asia in China and its impact on water resource in northwest China. *Science in China*, 2004, 36(6): 535-543.]
- [4] Polash B, Mrinal K G, Ratika P. Identification of essential descriptors in spatial socioeconomic impact assessment modeling: A case study of highway broadening in Sikkim Himalaya. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*, 2019, 3: 1-18.
- [5] Richter K, Marzeion B, Riva R. The effect of spatial averaging and glacier melt on detecting a forced signal in regional sea level. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(3): 034004.
- [6] 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.
- [7] 李吉均, 郑本兴, 杨锡金, 等. 西藏冰川. 北京: 科学出版社, 1986. [Li Jijun, Zheng Benxing, Yang Xijin, et al. *Glaciers in Tibet*. Beijing: Science Press, 1986.]
- [8] Bhambri R, Bolch T, Chaujar R K, et al. Glacier changes in the Garhwal Himalaya, India, from 1968 to 2006 based on remote sensing. *Journal of Glaciology*, 2011, 57(203): 543-556.
- [9] Paul F. Changes in glacier area in Tyrol, Austria, between 1969 and 1992 derived from Landsat 5 Thematic Mapper and Austrian Glacier Inventory data. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(4): 787-799.
- [10] 冀琴. 1990—2015年喜马拉雅山冰川变化及其对气候波动的响应. 兰州: 兰州大学博士学位论文, 2018. [Ji Qin. *Glacier variations in response to climate change in the Himalaya during 1990-2015*. Lanzhou: Doctoral Dissertation of Lanzhou University, 2018.]
- [11] 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. *The Cryosphere*, 2010, 4(3): 419-433.
- [12] Vincent C, Wagnon P, Shea J M. Reduced melt on debris-covered glaciers: Investigations from Changri Nup Glacier, Nepal. *The Cryosphere*, 2016, 10: 1845-1858.
- [13] 上官冬辉. 基于3S的塔里木河流域冰川变化应用研究. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所博士学位论文, 2007. [Shangguan Donghui. *Application research of glacier changes in tarim river basin based on 3S*. Lanzhou: Doctoral Dissertation of Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute, 2007.]
- [14] Silverio W, Jaquet J. Glacial cover mapping (1987-1996) of the Cordillera Blanca (Peru) using satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 95(3): 342-350.
- [15] Ji Q, Yang T B, Dong J, et al. Glacier variations in response to climate change in the eastern Nyainqentanglha Range, Tibetan Plateau from 1999 to 2015. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2018, 50(1): e1435844.
- [16] Ye Q H, Zong J B, Tian L D, et al. Glacier changes on the Tibetan Plateau derived from Landsat imagery: Mid-1970s-2000-13. *Journal of Glaciology*, 2017, 63(238): 273-287.
- [17] Wang X, Siegert F, Zhou A, et al. Glacier and glacial lake changes and their relationship in the context of climate change, Central Tibetan Plateau 1972-2010. *Global and Planetary Change*, 2013, 111: 246-257.
- [18] 苏珍, 张文敬, 丁良福. 托木尔峰地区的现代冰川. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1985. [Su Zhen, Zhang Wenjing, Ding Liangfu. *Modern Glacier in the Tomur Region*. Urumqi: Xinjiang People's Press, 1985.]
- [19] 田洪阵, 杨太保, 刘沁萍. 1976—2010年祁连山中段岗格爾肖合力雪山冰川退缩和气候变化的关系研究. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(7): 41-46. [Tian Hongzhen, Yang Taibao, Liu Qinpings. Climate change and glacier retreat in Ganggexiaoheli, middle Qilian Mountains using remote sensing data, 1976-2010. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26(7): 41-46.]
- [20] Hasnain S I. Status of the glacier research in the HKH region. *International Journal of Computer Applications*, 2000, 68 (23): 24-30.
- [21] 杨续超, 张懿铿, 张玮, 等. 珠穆朗玛峰地区近34年来气候变化. *地理学报*, 2006, 61(7): 687-696. [Yang Xuchao, Zhang Yili, Zhang Wei, et al. Climate change in Mt. Qomolangma Region in China during the last 34 years. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(7): 687-696.]
- [22] 程维明, 赵尚民, 叶庆华, 等. 青藏高原高寒地貌格局与变化. 北京: 科学出版社, 2017. [Chen Weiming, Zhao Shangmin, Ye Qinghua, et al. *Pattern and change of Alpine landform in Tibetan Plateau*. Beijing: Science Press, 2017.]
- [23] 施雅风, 刘时银, 上官冬辉, 等. 近30a青藏高原气候与冰川变化中的两种特殊现象. *气候变化研究进展*, 2006, 2(4): 154-160. [Shi Yafeng, Liu Shiyin, Shangguan Donghui, et al. Two peculiar phenomena of climatic and glacial variations in the Tibetan Plateau. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2(4): 154-160.]

- [24] Salerno F, Guyennon N, Thakuri S, et al. Weak precipitation, warm winters and springs impact glaciers of south slopes of Mt. Everest (central Himalaya) in the last 2 decades (1994-2013). *The Cryosphere*, 2015, 9(3): 1229-1247.
- [25] 姚檀栋, 段克勤, 田立德, 等. 达索普冰芯积累量记录和过去 400a 来印度夏季风降水变化. *中国科学: D 辑*, 2000, 30(6): 619-627. [Yao Tandong, Duan Keqin, Tian Lide, et al. Accumulation record of Dasop Ice Core and Indian Summer monsoon precipitation variation in the Past 400 Years. *Science in China: Series D*, 2000, 30(6): 619-627.]
- [26] Kaspari S, Hooke R L, Mayewski P A, et al. Snow accumulation rate on Qomolangma (Mount Everest), Himalaya: Synchronicity with sites across the Tibetan Plateau on 50-100 year timescales. *Journal of Glaciology*, 2008, 54(185): 343-352.
- [27] 段克勤, 姚檀栋, 蒲健辰, 等. 喜马拉雅山地区冰川积累量记录的季风降水对气候变暖的响应. *科学通报*, 2002, 46(19): 1508-1511. [Duan Keqin, Yao Tandong, Pu Jianchen, et al. Response of monsoon precipitation recorded by glacier accumulation in the Himalaya to climate warming. *Science Bulletin*, 2002, 46(19): 1508-1511.]
- [28] Xu B Q, Cao J J, Hansen J, et al. Black soot and the survival of Tibetan glaciers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(52): 22114-22118.
- [29] Chen J Z, Qin X, Kang S C, et al. Potential effect of black carbon on glacier mass balance during the past 55 years of Laohugou Glacier No. 12 Western Qilian Mountains. *Journal of Earth Science*, 2020, 31: 410-418.
- [30] Hu Z F, Kang S C, Li X F, et al. Relative contribution of mineral dust versus black carbon to Thifd Pole glacier melting. *Atmospheric Environment*, 2020, Doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117288>.

Glacier variations in the Himalayas during 1990–2015

JI Qin^{1,2}, LIU Rui^{1,3}, YANG Taibao²

(1. School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Key Laboratory of GIS Application, Chongqing Municipal Education Commission, Chongqing 401331, China; 2. Institute of Glaciology and Ecogeography, College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 3. Chongqing Comprehensive Economic Research Institute, Chongqing 401147, China)

Abstract: Based on the Landsat remote sensing information, visual interpretation and ratio threshold method are adopted to analyze the specific characteristics of the glacier area and changes in the Himalayas from the beginning of 1990 to 2015. The results demonstrated that the glacier area in the study area decreased by 2,553.10 km² for the past 25 years, with an average annual retreat rate of 0.44%/a. During the study period, the rate of glacier retreat accelerated; some of its glaciers were distributed in the western section, followed by the middle section; the least is the eastern section; the eastern, central, and western sections of the glaciers showed a trend of retreat. The eastern section had the fastest retreat speed, while the central section had the slowest. In terms of the distribution of terrain and the characteristics of changes, most of the glaciers are distributed in the range of 5° to 25°. In recent 25 years, glaciers of all slope grades had shrunk, and the glacier area retreated faster between 25° and 30°, and more slowly in extremely gentle/steep regions. Although all the 8 slopes showed a retreat trend, the extents of retreat were different. The glaciers on the north and northwest slopes retreated relatively slowly, while in the other slope directions, the glaciers shrank relatively quickly. In recent 25 years, both debris-covered and non-covered glaciers retreated, but the latter had retreated greatly, suggesting that the surface debris inhibited the glacier melting in the study area.

Keywords: Himalayas; glacier variation; remote sensing