

## 1987—2015年祁连山冰川退缩及未来变化趋势研究

李虹蓉, 杨太保\*, 田洪阵, 冀琴, 任建平 (兰州大学资源环境学院, 甘肃兰州 730000)

**摘要** 利用1987和2015年Landsat遥感影像解译分析祁连山地区冰川变化, 研究冰川变化的影响因素。结果表明, 祁连山冰川退缩较为严重, 面积从1987年的2 072.7 km<sup>2</sup>减少到2015年的1 506.3 km<sup>2</sup>, 28年来总退缩率为27.3%, 年均退缩率为0.98%; 冰川存在一定地形/温度分布差异, 海拔在4 900~5 100 m, 坡度为10°~20°, 坡向以北和东北方向为主, 夏季气温为3~5℃时, 是冰川发育的聚集区; 冰川退缩也存在一定地形/温度分布差异, 海拔4 200~4 300 m, 坡度10°~20°, 坡向南和东南方向, 夏季气温小于2℃, 是冰川退缩最快的区间。以温度为主导的模拟研究表明, 研究区冰川未来15和30年退缩严重, 退缩率分别达到10.9%和33.5%。

**关键词** 祁连山; 冰川; 遥感; 地理加权回归

中图分类号 P343.6 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2017)30-0059-05

## Study on Glacier Retreat and Future Changes Trends in the Qilian Mountains during 1987 - 2015

LI Hong-rong, YANG Tai-bao\*, TIAN Hong-zhen et al (College of Earth and Environmental Science, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000)

**Abstract** Glacier in the Qilian Mountains during the past 28 years were interpreted based on Landsat TM(1987) and OLI(2015) data. The coupling relationship between glacier retreat and influence factors were discussed. The results showed that the glaciers decreased in this area by 27.3% between 1987(2 072.7 km<sup>2</sup>) and 2015(1 506.3 km<sup>2</sup>), and the annual percentage of area changes for the glacier was 0.98%. The best condition of altitude for glacier ranged from 4 900 to 5 100 m, slope being 10°-20°, north and northeast slope and summer temperature 3-5℃. The glacier retreat occurred mainly at altitude ranged from 4 200 to 4 300 m, slope being 10°-20°, south and southeast slope and summer temperature less than 2℃. The results of the simulation study showed that the glaciers decreased in this area next 15 or 30 years was up to 10.9% and 33.5% respectively.

**Key words** Qilian Mountains; Glacier; Remote sensing; Geographical weighted regression

冰川是气候系统的产物, 在诸多环境系统中, 受气候变化影响最直接, 对全球变暖指示性最敏感, 被认为是气候系统多圈层相互作用的关键纽带<sup>[1]</sup>。冰川变化可以通过野外站点观测, 由于中低纬度冰川都在高海拔、复杂地形区域, 恶劣环境制约着实地观测, 长期定点观测的冰川并不多。受制于较少的实地观测点, 监测数据不足以反映整个区域尺度变化, 以点代面的研究忽视了各种变量空间异质性。以遥感和地理信息系统为手段的研究能够满足山地冰川变化监测要求。

随全球变暖, 冰川普遍出现退缩, 表现为末端后退、平衡线升高、面积变小, 这在全球或较大尺度上得以广泛认同<sup>[2-3]</sup>, 但受区域地形和气候的影响, 不同地区的冰川变化有较大差异。冰川变化受气候系统内部及其他系统相互影响、相互反馈, 通过冰川时空分布与地形、气候因子的数值模拟研究, 可以掌握冰川变化特征及规律, 为应对环境变化提供依据<sup>[4]</sup>。祁连山周边绿洲有规模人类居住, 在全球变暖背景下, 冰川退缩影响着中下游绿洲盆地的水资源, 对农业生态环境和社会经济的可持续发展产生负面影响。笔者以祁连山冰川为探讨对象, 使用1987和2015年两期遥感影像, 研究冰川面积的变化, 初步分析冰川变化与地形、气温的关系, 以气温变化为切入点对未来冰川变化趋势做出直观预测。

## 1 资料与方法

**1.1 研究区概况** 祁连山是位于青藏高原东北边缘的高大山系(图1), 地理坐标为95°8′~102°24′ E、37°1′~39°59′ N, 东西横跨642 km, 南北纵贯294 km。山系由西北—东南走向

的平行褶皱山脉组成, 海拔多在3 000 m以上, 地势由东北向西南升高。西段主要受西风环流影响, 降水稀少; 东段处于东亚季风作用区<sup>[5-6]</sup>, 降水相对丰富。祁连山山体高大, 水热条件具有明显垂直地带性。总体而言, 山前低山属荒漠气候, 中山下部属半干旱草原气候, 中山上部为半湿润森林草原气候, 亚高山和高山属寒冷湿润气候<sup>[7]</sup>, 山顶现代冰川较为集中发育。区域年均降水量普遍在500 mm以下, 属资源性缺水地区, 冰川融水是当地水资源的重要补给。北坡冰川融水汇入玉门、酒泉、张掖、民乐、金昌、武威、民勤等绿洲, 南坡汇入柴达木盆地、哈拉湖、青海湖、黄河水系等。北大河、黑河、大通河、布哈河等发源于此处涵养林, 维系着下游绿洲的生存和发展。

**1.2 数据与方法** Landsat卫星系列自1972年以来就有持续观测数据, 1984年发射的Landsat5及后续卫星搭载的传感器多光谱波段空间分辨率均为30 m, 大部分光谱波段重合, 可确保区域尺度冰川提取基础数据一致性。结合研究目的和数据可获取性, 考虑云量覆盖、影像质量等因素, 在中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)选取以1987和2015为基准年, 时间跨度为28年左右的两期影像数据。尽量选择基准年影像, 在云量、质量难以满足要求的情况下选择就近年数据, 具体影像见表1。数据为Level1T级产品, 经过了系统辐射校正和几何纠正, 成像时间大多为夏季, 可尽量减少季节性积雪造成的分类误差。在ENVI环境中对每景影像进行FLAASH大气纠正, 根据冰川可见光波段强反射和短波红外波段强吸收特性, 利用反射率比值阈值法确定冰川区域。Landsat5系列使用波段4/波段5, Landsat8系列使用波段5/波段6, 经分类后处理、镶嵌, 形成研究区两期的冰川面积和分布数据。

**作者简介** 李虹蓉(1987—), 女, 北京人, 讲师, 硕士, 从事环境变化研究。\*通讯作者, 教授, 从事自然地理环境变化研究。

**收稿日期** 2017-08-24

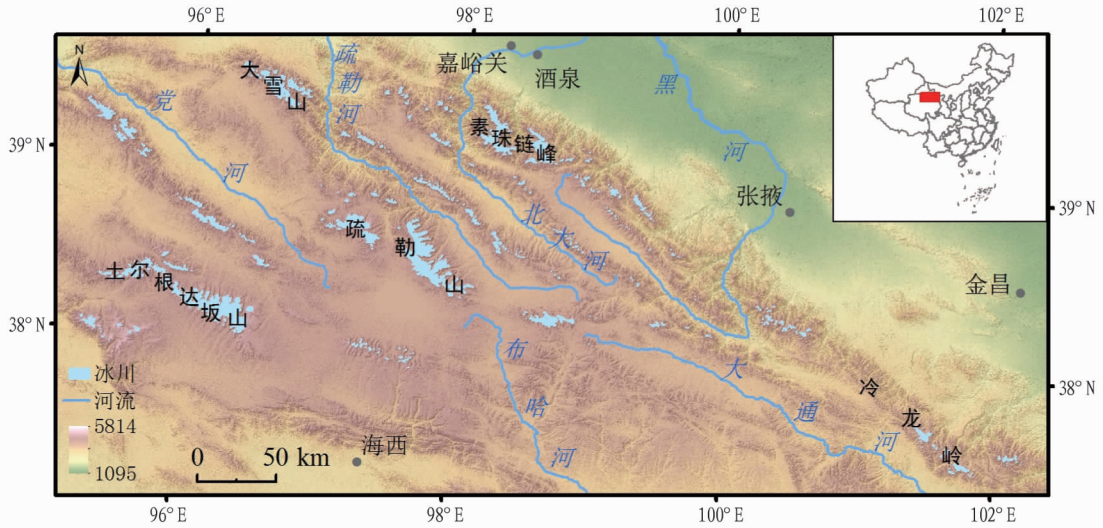


图1 研究区地理区位

Fig.1 Location of the study area

表1 影像数据

Table 1 Image data

条带号/行编号 Path/Row	1987 年			2015 年		
	标识 ID	日期 Date	云量 Cloud cover	标识 ID	日期 Date	云量 Cloud cover
136/033	LT51360331987280BJC00	1987-10-07	5.52	LC81360332015229LGN00	2015-08-17	0.44
136/034	LT51360341987184BJC00	1987-07-03	3.26	LC81360342015277LGN00	2015-10-04	2.22
135/033	LT51350331986206BJC00	1986-07-25	0.04	LC81350332013200LGN00	2013-07-19	0.91
135/034	LT51350341986206BJC00	1986-07-25	0.03	LC81350342013280LGN00	2013-10-07	0.40
134/033	LT51340331990242BJC01	1990-08-30	0.08	LC81340332015263LGN00	2015-09-20	3.68
133/033	LT51330331987227BJC00	1987-08-15	0.25	LC81330332015256LGN00	2015-09-13	0.79
132/034	LT51320341987252BJC00	1987-09-09	9.82	LC81320342015233LGN00	2013-08-21	2.93

地形数据使用 ASTER GDEM, 空间分辨率 30 m, 高程精度 20 m, 数据同样来源于地理空间数据云平台。在 ArcGIS 环境中进行坡度分析和坡向分析, 派生出坡度数据和坡向数据。

温度数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn>), 利用祁连山及周边地区 27 个气象站 (分别为敦煌、安西、玉门镇、鼎新、金塔、酒泉、高台、阿拉善右旗、冷湖、托勒、野牛沟、张掖、祁连、山丹、永昌、武威、民勤、小灶火、德令哈、刚察、门源、乌鞘岭、格尔木、诺木洪、乌兰、茶卡、西宁) 1987—2015 年温度日值序列, 求出夏季 (6—8 月) 均温和年均温后, 以温度为因变量, 海拔为自变量, 建立地理加权回归, 模型如下:

$$T = \beta_0 + \beta_1 \times \text{DEM} + \varepsilon$$

式中,  $T$  为温度; DEM 为海拔;  $\beta$  为回归参数;  $\varepsilon$  为随机误差。

计算得到该区域研究时间段夏季均温和年均温分布, 以此反映祁连山地区 28 年来气温分布及变化。相比较全局模型, 地理加权回归会体现变量关系之间的空间非平稳性, 变量之间局部特性得以体现。

上述数据来源多样, 格式和投影各不相同, 为后续研究的展开, 处理后的栅格数据统一保存为 Image 格式, 空间分辨率为 30 m, 投影为 Albers。

## 2 结果与分析

### 2.1 地形因素对冰川变化的影响

**2.1.1 海拔对冰川变化的影响。**通过遥感解译得到 1987 年冰川面积 2 072.7 km<sup>2</sup>, 2015 年冰川面积 1 506.3 km<sup>2</sup>, 28 年总退缩率为 27.3%, 年均退缩率为 0.98%, 变化率远大于青藏高原其他地区冰川, 表明祁连山冰川退缩更为严重。

结合 DEM 数据和遥感提取的冰川信息得到不同时期冰川海拔分布情况 (图 2)。从图 2 可见, 祁连山冰川分布在海拔 4 200 ~ 5 600 m, 总体上, 冰川面积随海拔的升高先增大后减小, 1987 年这一期冰川面积在海拔 4 900 ~ 5 000 m 处达到峰值, 2015 年峰值则在海拔 5 000 ~ 5 100 m 处, 在此高度以上冰川面积随着海拔的增加而减少。冰川的这种分布随着海拔的升高, 可供冰川发育的空间面积逐渐减少。

冰川退缩主要发生在海拔 4 200 ~ 5 300 m (图 3), 4 200 ~ 4 300 m 处冰川退缩最为严重, 退缩率最高达 78.7%; 随着海拔的升高, 冰川退缩率以 4 700 ~ 4 800 m 处为谷底, 4 900 ~ 5 000 m 为峰值, 呈先减小后增大再减小的波动变化; 大于 5 300 m 海拔冰川面积变化与低海拔趋势相反, 冰川面积反而有所增加。

**2.1.2 坡度对冰川变化的影响。**冰川主要分布在坡度 0° ~ 45°, 不同时期冰川坡度分布具有较好一致性: 随坡度增加,

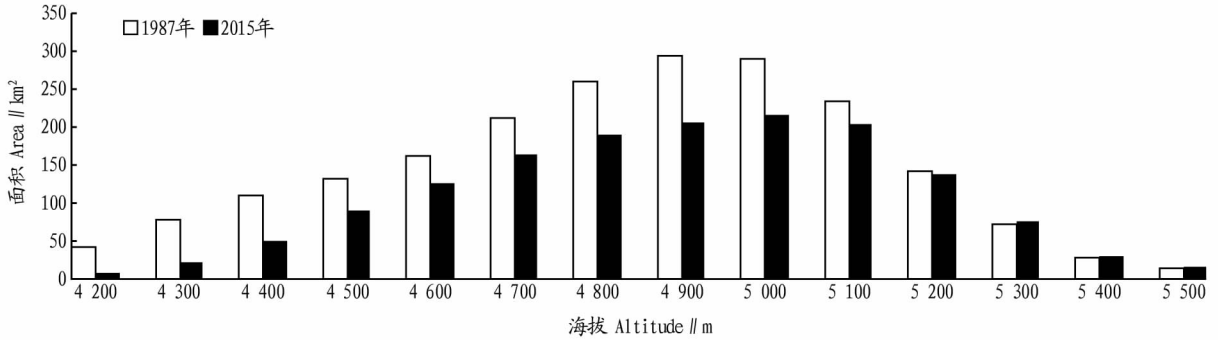


图 2 海拔对冰川面积的影响

Fig.2 The influence of altitude on glacier area

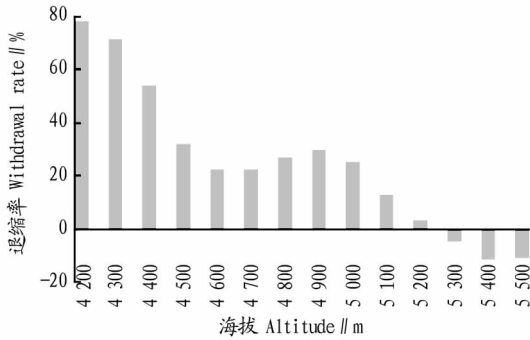


图 3 海拔对冰川退缩率的影响

Fig.3 The influence of altitude on withdrawal rate

冰川面积急剧变化,并在 10° ~ 20° 达到峰值;随后冰川面积缓慢减小,在 30° ~ 45° 降低幅度明显增加,大于 45° 以后冰川分布极少(图 4)。10° ~ 20° 冰川分布较多是由于该坡度区间面积较大,此外,坡度过大不利于冰川物质的积累。由图 5 可见,冰川退缩率随坡度增大而持续降低。

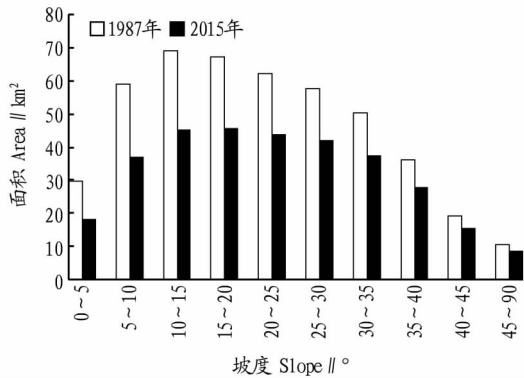


图 4 坡度对冰川面积的影响

Fig.4 The influence of slope on glacier area

**2.1.3 坡向与冰川变化。**祁连山冰川面积以北和东北方向分布为主(图 6),1987 和 2015 年北坡向冰川面积分别占 24.4%、24.5%,东北坡向分别为 22.9%、21.7%;南和西南方向分布最少,南坡向分别为 5.7%、5.1%,西南坡向分别为 5.6%、5.2%。可见,北和东北方向是祁连山冰川发育最有利的朝向,这是地形、温度与水汽等条件共同作用的结果。祁连山脉以西北—东南走向为主,北和东北方向坡面宽广,为冰川发育提供了有利空间,东南和西北方向坡面狭窄,限制了冰川的积累。研究区东部海拔较低,不容易达到冰川发

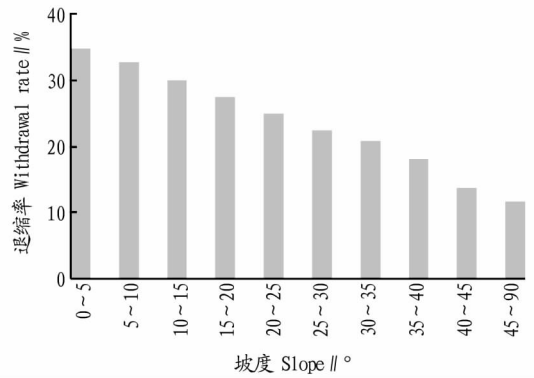


图 5 坡度对冰川退缩率的影响

Fig.5 The influence of slope on withdrawal rate

育的温度条件,东南方向暖湿气流经河谷向西北方向深入,在西部形成向上的水汽,冰川在西部、西北部的分布优势与此有关(图 1)。同时,北朝向坡面受太阳辐射较弱,温度相对较低,有利于冰川积累发育。南朝向坡面受较多太阳辐射,温度较高,青藏高原内部高大山脉阻挡了东南方向祁连山南坡的水汽输送,因此南和西南坡向冰川分布极少。从图 7 可见,各坡向冰川都在退缩,南和东南方向退缩最快,退缩率分别为 35.8% 和 35.3%,西北方向退缩最慢,为 6.9%。

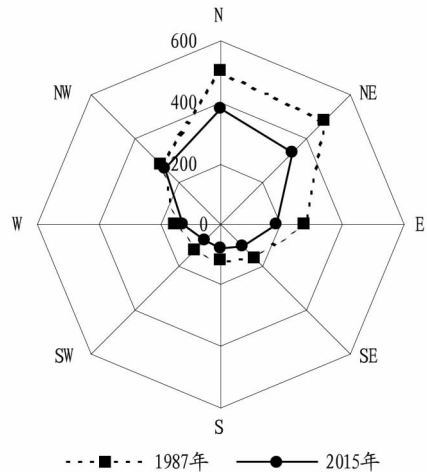


图 6 1987 和 2015 年冰川面积区域随坡向分布情况

Fig.6 Glaciers distribution with aspect in 1987 and 2015

2.2 气温因素对冰川变化的影响

2.2.1 夏季温度对冰川变化的影响。结合地理加权回归得

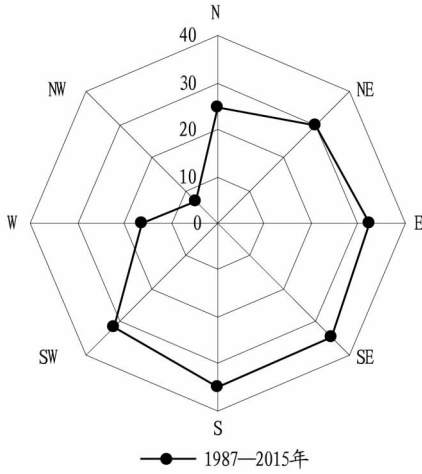


图7 1987—2015年冰川退缩率随坡向分布

Fig.7 Glaciers withdrawal rate distribution with aspect during 1987 - 2015

到的夏季温度数据与遥感解译得到的冰川分布数据进行对比分析,结果见图8。从图8可见,1987年冰川分布与气温分布关系看,夏季平均气温-2~6℃的区域均有冰川分布,夏季均温4~5℃的区域冰川分布面积最多。2015年冰川分布面积最多的区域与夏季均温3~4℃的分布区域重合。以3~5℃为中心,温度增加或减少时,冰川面积都是减少的。从冰川退缩率与夏季气温空间分布来看(图9),在夏季平均温度的地区6℃以下,冰川都是退缩的,且小于2℃的区域冰川退缩率较高。

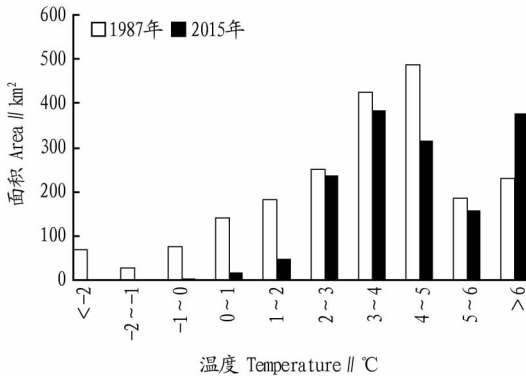


图8 不同温度区间冰川面积分布

Fig.8 Distribution of glacier area in different temperature ranges

**2.2.2 冰川边界气温。**冰川时空演变过程,对研究区几个冰川较集中的区域进行重点研究。分别是:①大雪山,该区域是一个完整山地,孕育有大量山谷冰川,代表是老虎沟冰川;②素珠链峰,祁连山主峰在该区域,发育有较大面积的冰帽型冰川、山岳冰川,包括有八一冰川、素珠链冰川、北余年冰川、石羊河5号冰川等;③土尔根达坂山,是祁连山系冰川面积分布较大的山脉,敦德冰帽是祁连山最大的平顶型冰川;④疏勒山,是祁连山最高大的山地,高大山体和较多降水孕育了大量的山岳冰川和山谷冰川,代表是岗纳楼冰川。

利用冰川分布数据和夏季气温空间分布数据,可以获取2015年冰川边界气温。对4个研究区冰川边界气温进行统

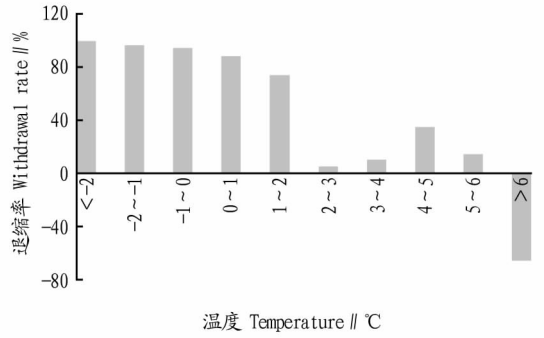


图9 不同温度区间冰川退缩率分布

Fig.9 Glacier retreat rate distribution in different temperature ranges

计,结果见表2,均值可视作为对应研究区冰川区域气温最高值。由表2可知,各地区冰川边界气温最高值各不相同,差异较大。

表2 冰川边界气温

Table 2 Temperature of glacier border °C

参数 Parameter	大雪山 Daxue Mountain	素珠链峰 Suzulian Peak	土尔根达坂山 Tergun Daba Mountain	疏勒山 Sule Mountain	研究区 Study area
均值 Mean	6.40	5.90	7.18	6.08	6.29
标准差 Stand- ard deviation	0.97	1.10	0.69	0.96	0.91

**2.2.3 未来冰川变化预估。**为模拟未来15年和未来30年各区域冰川变化,以2015年冰川夏季气温分布为基准,利用站点温度数据经插值和统计分析得到的变化趋势模拟得到15年后和30年后的气温分布,分别以表2冰川边界均值为气温上限,可以得到各区域冰川变化模拟。图10为研究区冰川区域夏季均温和年均温变化,可以看出,夏季均温每隔10年温度升高0.527℃,年均温上升速度更快,每隔10年温度升高0.532℃。图11为4个重点区域冰川在未来的变化情况。

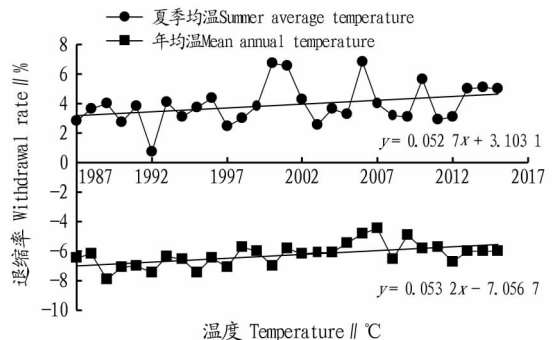
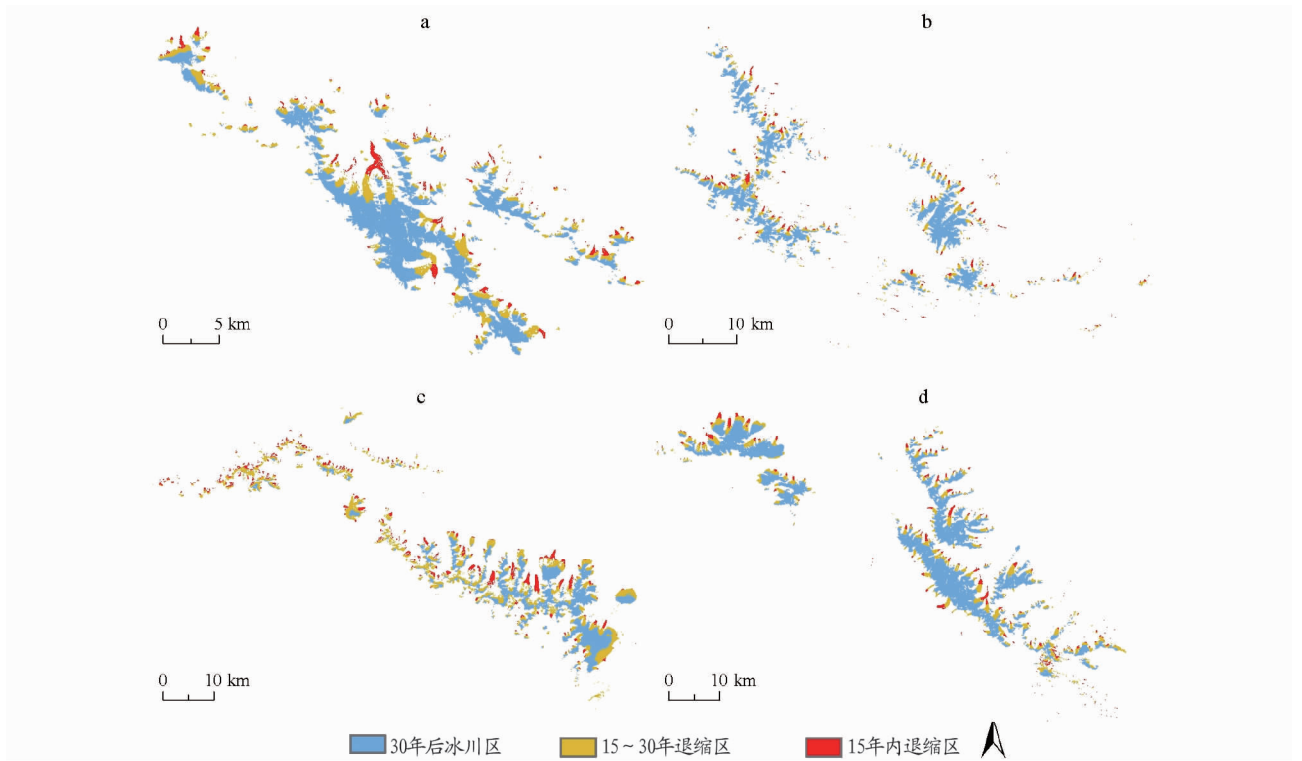


图10 冰川区域温度

Fig.10 Temperature in glacial regions

由表3可知,2015—2030年阶段退缩率普遍不高,年均退缩率均小于1987—2015年阶段,在2030—2045年阶段退缩率急剧增加,年均退缩率均相比1987—2015年阶段有较大提升。



注: a. 大雪山; b. 素珠链峰; c. 土尔根达坂山; d. 疏勒山

Note: a. Daxue Mountain; b. Suzulian Peak; c. Tergun Daba Mountain; d. Sule Mountain

图 11 冰川退缩模拟

Fig. 11 Glaciers retreat simulation

表 3 冰川模拟统计

Table 3 Glacier simulation statistics

范围 Range	面积 Area//km <sup>2</sup>			退缩率 Withdrawal rate//%		
	2015 年	2030 年	2045 年	2015—2030 年	2030—2045 年	2015—2045 年
大雪山 Daxue Mountain	121.8	114.1	84.3	6.3	26.1	30.7
素珠链峰 Suzulian Peak	151.2	139.3	110.7	7.9	20.5	26.8
土尔根达坂山 Tergun Daba Mountain	314.1	275.9	144.9	12.2	47.5	53.9
疏勒山 Sule Mountain	402.5	381.5	289.2	5.2	24.2	28.1
研究区 Study area	1 506.3	1 341.6	1 002.3	10.9	25.3	33.5

### 3 结论

该研究利用 1987 年和 2015 年的祁连山冰川遥感解译资料,结合数字高程模型、气象数据,建立了冰川分布与海拔、坡度、坡向、温度之间的统计关系,结果表明:2015 年比 1987 年冰川面积减少 566.4 km<sup>2</sup>,退缩率为 27.30%,平均年均退缩率为 0.98%。冰川退缩与地形、海拔、坡向、坡度、气候条件都具有密切相关。以现有的气候变化趋势和典型冰川变化,简单预估了研究区未来冰川的退缩率,分别为 10.90% (2015—2030 年) 和 33.5% (2015—2045 年),后一时间段的统计与 1987—2015 年相比加快较多。

### 参考文献

- [1] 李巧媛. 不同气候变化情景下青藏高原冰川的变化[D]. 长沙:湖南师范大学,2011.
- [2] 任贾文,秦大河,康世昌,等. 喜马拉雅山中段冰川变化及气候暖干化特征[J]. 科学通报,2003,48(23):2478-2482.
- [3] 董志文,秦大河,任贾文,等. 近 50 年来天山乌鲁木齐河源 1 号冰川平衡线高度对气候变化的响应[J]. 科学通报,2013,58(9):825-832.
- [4] 王圣杰,张明军,李忠勤,等. 近 50 年来祁连山七一冰川面积变化对气候的响应[J]. 地理学报,2011,66(1):38-46.
- [5] 孙美平,刘时银,姚晓军,等. 近 50 年来祁连山冰川变化:基于中国第一、二次冰川编目数据[J]. 地理学报,2015,70(9):1402-1414.
- [6] 王宁练,贺建桥,蒲健辰,等. 近 50 年来祁连山七一冰川平衡线高度变化研究[J]. 科学通报,2010(32):3107-3115.
- [7] 颜东海. 祁连山北大河流域冰川变化遥感监测[D]. 兰州:西北师范大学,2012.

## 科技论文写作规范——题名

以最恰当、最简明的词句反映论文、报告中的最重要的特定内容,题名应避免使用不常见的缩略语、首字母缩写词、字符、代号和公式等。一般字数不超过 20 字。英文与中文应相吻合。英文题名词首字母大写,连词及冠词除外。