

# 1984—2013年阿尔卑斯山中段瑞士地区冰川变化遥感监测

王凯, 杨太保, 邵婉婉, 何毅

(兰州大学 资源环境学院, 兰州 730000)

**摘要:**利用1984年、1990年、2003年、2013年的TM, ETM+, OLI/TIRS遥感影像资料作为数据源, 通过目视解译, 应用GIS技术, 分析了阿尔卑斯山中段瑞士地区近30年的冰川变化, 同时对研究区内及周边的气温和降水的格点气象数据进行趋势分析, 研究其与冰川变化的响应关系。结果表明: (1) 1984—2013年, 冰川面积减少了364.33 km<sup>2</sup>, 退缩比例达到30.69%, 年退缩速率为12.56 km<sup>2</sup>/a。1990—2003年的退缩速率最大, 近10年冰川退缩速率有所减慢; (2) 冰川规模等级和面积减少百分比呈负相关关系, 即规模越小, 退缩越快; (3) 冰川消融主要发生在海拔4 000 m以下, 冰川面积退缩随着海拔的升高而减少; (4) 冰川主要分布在坡度5°~40°的7个等级上, 坡度越缓, 面积减少量越大; 1984—2013年, 不同坡度的冰川面积都在减少; (5) 各个坡向的冰川都在退缩。1984—2013年, 东南坡、东北坡和西坡冰川面积减少量较大, 而西南、西北和东坡相对较小; (6) 研究区气温升高明显, 降水量变化幅度不大, 气温上升是冰川退缩的主导因素。未来10年研究区冰川将会减慢退缩。

**关键词:**冰川变化; 气候响应; 遥感监测; 阿尔卑斯山; 瑞士地区

**中图分类号:** P343.6; TP79

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2015)05-0300-06

## Remote Sensing Monitoring on Glacier Change in the Middle of the Alps in Switzerland from 1984 to 2013

WANG Kai, YANG Taibao, SHAO Wanwan, HE Yi

(College of Earth and Environmental Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Using TM, ETM+ and OLI/TIRS remote sensing images of 1984, 1990, 2003 and 2013, respectively, we analyzed the glacier change in nearly 30 years in the middle of the Alps in Switzerland through visual interpretation and GIS technology. We also carried out trend analysis of temperature and precipitation in the study area and surrounding area to examine the response relationship between glacier change and meteorological data. The results indicated that: (1) during the period from 1984 to 2013, glacier area decreased by 364.33 km<sup>2</sup>, shrinking ratio reached to 30.69% with the shrinking rate of 12.56 km<sup>2</sup>/a. From 1990 to 2003, shrinking rate was the biggest, however, in recent 10 years, shrinking rate was becoming low; (2) the glacier scale and glacier area reduction proportion presented the inverse correlation, which meant that the smaller the glacier scale was, the bigger the shrinking rate was; (3) glacial ablation mainly occurred at an altitude of less than 4 000 m, what's more, the shrinking rate was reducing with the increase of altitude; (4) glaciers mainly distributed at slopes with steepness ranging from 5° to 40°, and the gentler the slope was, the bigger the glacier area reduction was. From 1984 to 2013, glacier area was decreasing on slopes with different steepness; (5) glacier areas were shrinking on all aspects. From 1984 to 2013, glacier area reduction was bigger on southeast, northeast and west aspects, while the glacier area reduction was relatively small on southwest, northwest and east aspects; (6) temperature rose significantly in the study area, while precipitation change was not obvious. Temperature increase is the dominant factor of glacial retreat. We predicted that the shrinking rate of glaciers in study area will decrease in the next decade.

**Keywords:** glacier change; climate response; remote sensing monitoring; Alps; Swiss region.

冰川是气候的产物,其产生、发育和变化主要受到气候条件的制约,而山岳冰川较之大陆冰川对气候变化具有更大的敏感性<sup>[1]</sup>。由于气候变化,全球大多数冰川在过去 100 多年里处于退缩状态,尤其是最近的几十年呈加速态势<sup>[2]</sup>。冰川退缩不仅会影响到水资源供应,旅游业的发展,同时也能诱发滑坡、泥石流、洪水等灾害<sup>[3]</sup>,从而影响数以百万计人口的生产和生活。运用遥感技术监测冰川的年际变化,可以发现冰川变化特征和本身的波动规律,从而从根本上认识冰川波动与气候变化的相互关系<sup>[4-9]</sup>。进而研究和掌握冰川变化状态对相关地区的长期规划、资源管理与灾害预防的影响。

阿尔卑斯山脉是欧洲最高大的山脉,提供欧洲饮水,灌溉与水力发电<sup>[10]</sup>。此山脉的面积虽然仅占欧洲的 11%,但提供欧洲 90% 以上的水源,尤其是干旱地区与夏季。瑞士阿尔卑斯山系,占瑞士 2/3 的国土面积,根据最新研究阿尔卑斯山系冰川总体上呈退缩态势<sup>[11]</sup>,这将会对本区水资源供应产生深远的影响,并由此引发冰川洪水、淡水资源短缺以及沿岸生态环境变化等一系列自然、社会和经济问题。

目前国内外学者在瑞士阿尔卑斯山地区已开展了一系列的冰川变化特征的研究<sup>[12-15]</sup>,但因研究目的和侧重点不同,大多是对冰川的物质平衡变化以及对典型冰川的变化等进行了分析研究,缺少基于高精度 DEM 和遥感影像的现代冰川变化研究。本研究基于高分辨率的 DEM 和遥感影像数据对瑞士阿尔卑斯山地区 1984—2013 年冰川变化特征以及气象特征进行分析研究,旨在揭示该地区近期的冰川变化特征及影响因素。

## 1 研究区概况

阿尔卑斯山系中段瑞士地区,地理位置为北纬 45°52′—46°54′,东经 7°03′—8°38′,被以莱茵河水系为主的西南—东北走向的构造峡谷分为南北两系。瑞士地区的气候具有多样性:阿尔卑斯山区南部属地中海气候,夏季干旱、冬季温暖湿润;阿尔卑斯山以北地区气候具有明显的过渡性,自西向东,由温和湿润的温带海洋性气候向冬寒夏热的温带大陆性气候过渡,局部高海拔地区属于高原山地气候。阿尔卑斯山脉横贯瑞士中南部,占全国面积的 60%,在较高的谷地存在冰川,总计瑞士境内的冰川面积达 1 063 km<sup>2</sup>,冰川分布在莱茵河、因河、提契诺河、罗纳河等主要大河的源头。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

本文所需的数据主要包括:(1) 遥感数据。来源于美国地质调查局(<http://glovis.usgs.gov/>) Landsat 系列的影像数据,为了减少积雪和云量的干扰,基本选取夏季获取的少云或者无云的影像,本文选取了 1984 年、1990 年、2003 年、2013 年的 4 期影像(表 1);(2) 气象数据。本文选用特拉华大学(UDel)地理系气候研究中心 1970—2010 年的气温和降水的月值格点(0.5×0.5)数据,考虑研究区范围以及数据地域有效性等因素,对研究区所选的 8 个格点的气象数据采用加权平均法进行处理。

表 1 影像数据列表

轨道号		成像日期	传感器	平均 云量/%	分辨 率/m
Path	Row				
195	28	1984-07-23	TM	10	30
195	28	1985-08-11	TM	30	30
195	28	1990-07-16	TM	0	30
195	28	1992-05-18	TM	10	30
195	28	2003-07-12	TM	10	30
195	28	2003-08-13	TM	0	30
195	28	2003-09-14	TM	0	30
195	28	2013-07-31	ETM+	1	30
195	28	2013-08-16	ETM+	26	30
195	28	2013-09-09	OLI/TIRS	16	30

### 2.2 数据处理

利用影像提取冰川边界,前人已经试验了多种方法,本文运用比值阈值法结合目视解译的方法。Landsat TM 和 Landsat ETM+ 影像包含 7 个波段,可以利用比值阈值法,比值阈值法相对于人工解译,是一种稳定和省时的方法,能够区分积雪和阴影中的冰,并且 TM3/TM5 在处理阴影和阴影处的残骸覆盖物比 TM4/TM5 更具有优越性<sup>[16]</sup>。具体流程:(1) 计算机自动分类。先使用 ENVI 软件把同一景数据不同波段的数据合成一个文件,然后用合成的影像计算 TM3/TM5。得出比值影像后,再利用决策树进行分类。通过多次试验,阈值设为 2.0 提取冰川的边界最好,得到初步结果;(2) 在计算机自动分类的基础上,将冰川数据转换成 shape 格式,再在 ArcGIS 中将其转换成 Albers 等积投影,结合目视解译得到冰川边界;(3) 结合 Google Earth,绘出研究区的山脊线,利用拓扑裁剪工具对冰川区多边形进行裁切,再利用量算工具进行多边形面积的计算。

### 2.3 精度评价

在冰川遥感工作中,误差主要来源于影像分辨率

的限制、校正误差、冰川边界提取的误差。对于前两类误差,可以利用遥感影像不确定性评价公式对其误差进行评估。根据不同学者<sup>[17-19]</sup>的研究,对于多期数据而言,其线性不确定性可以表示为:

$$U_L = \sqrt{\sum \lambda^2} + \sqrt{\sum \epsilon^2}$$

(1)

式中: $U_L$ ——线性不确定性; $\lambda$ ——各景遥感影像像元大小(分辨率); $\epsilon$ ——各景遥感影像的几何校正误差。相应的可以推导出多期数据间面积不确定性关系,可表示为:

$$U_A = \sum \lambda^2 + \frac{2U_L}{\sqrt{\sum \lambda^2}} + \sqrt{\sum \epsilon^2}$$

(2)

式中: $U_A$ ——面积不确定性。

表 2 阿尔卑斯山中段瑞士地区 1984—2013 年冰川面积变化

年份	面积/km <sup>2</sup>	时段	退缩量/ km <sup>2</sup>	面积 变化率/%	年均退 缩率/%	年均退缩速率/ (km <sup>2</sup> ·a <sup>-1</sup> )
1984	1187.24±0.003	—	—	—	—	—
1990	1106.69±0.005	1984—1990 年	80.55	6.78	1.13	13.425
2003	909.74±0.003	1990—2003 年	196.95	17.8	1.37	15.15
2013	822.91±0.003	2003—2013 年	86.83	9.54	0.95	8.683
—	—	1984—2013 年	364.33	30.69	1.06	12.56

3.2 冰川变化和冰川规模的关系

根据研究区的冰川面积分布特征将其分为 8 个等级,分析不同规模的冰川变化,发现小规模冰川数量较大(表 3)。分析 1984 年的冰川,面积小于 1 km<sup>2</sup> 的冰川多达 929 条,占总数的 86.66%,占冰川总面积的 29.69%;面积大于 10 km<sup>2</sup> 的仅 8 条,占总数的

3 冰川变化分析

3.1 冰川总体变化

1984—2013 年,瑞士地区的冰川总面积在不断减少,由 1 187.24 km<sup>2</sup> 减少到 822.91 km<sup>2</sup>,冰川从 1 072 条增加到 1 154 条,冰川面积共减少了 364.33 km<sup>2</sup>,退缩比例达到了 30.69%,年退缩速率为 12.56 km<sup>2</sup>/a(表 2)。冰川在不同的时段表现出不同的退缩速率。其中,1990—2003 年的退缩速率比 1984—1990 年、2003—2013 年两个时段都要快,说明 1990—2003 年冰川加速退缩,而 2003—2013 年冰川退缩最慢,表明近 10 年冰川退缩速率有所减慢。

0.75%,占总面积的 18.31%。统计各等级的冰川面积变化发现,冰川面积退缩率随冰川规模的增大而减小并逐渐趋于稳定,同时也显示出小规模冰川退缩快慢不一致,原因可能是有一部分小冰川受地形的影响,处在阴坡或者被其他物体遮挡,导致退缩较慢。总体来说,小规模冰川退缩速率最快,对气候响应更为敏感。

表 3 不同规模冰川变化

规模	1984 年		1990 年		2003 年		2013 年	
	面积/km <sup>2</sup>	数量/条	面积/km <sup>2</sup>	数量/条	面积/km <sup>2</sup>	数量/条	面积/km <sup>2</sup>	数量/条
<0.02	3.41	102	3.6	151	3.69	194	3.77	221
0.02~0.05	12.37	141	11.36	151	10.08	155	11.51	176
0.05~0.1	20.64	142	18.24	138	21.03	136	21.43	141
0.1~0.5	208.56	416	191.73	412	155.26	391	139.63	385
0.5~1	107.57	126	102.35	119	79.4	114	74.16	109
1~5	423.87	121	412.19	118	355.74	115	314.18	106
5~10	193.46	16	179.53	13	139.33	12	119.07	11
>10	217.36	8	187.69	8	145.21	6	139.16	5
	1187.24	1072	1106.69	1110	909.74	1123	822.91	1154

3.3 冰川变化和高程的关系

根据研究区 1:50 000 DEM,2 000 m 以上以 500 m 为间距将该区冰川分布的范围按高程分为 7 个梯度,并对这些梯度上的面积进行统计,结果表明该地区冰川主要分布在海拔 2 500~4 000 m。分析 1984 年冰川,分布在海拔 2 500~4 000 m 的冰川面积占冰川总面积的 91.86%。统计 1984—2013 年前述 7 个海拔梯度上的冰川面积减少百分比(图 1)可知,冰川退缩主要在海拔 4 000 m 以下,且冰川面积退缩百分比

随着海拔的升高而减少。冰川的这种分布反映了降水和地势对冰川发育的综合作用,即随着地势的升高,液态降水逐步转化成固态降水,积累变大,物质平衡变大,因此冰川在山腰处至山脊处发育<sup>[20]</sup>。

3.4 冰川变化和坡度的关系

根据研究区 DEM 以 5°为单位,将研究区的坡度分为 10 个等级。发现冰川主要分布在 5°~40°的 7 个等级上,占到总面积的 88.26%;>45°,<5°的冰川分布较少。可以看出在平缓地带和陡峭地形冰川分布较少。

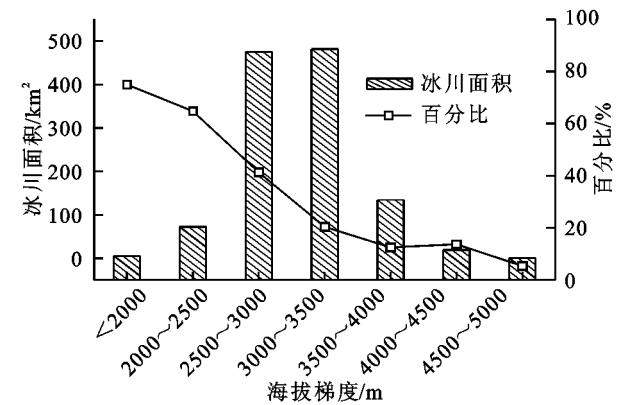
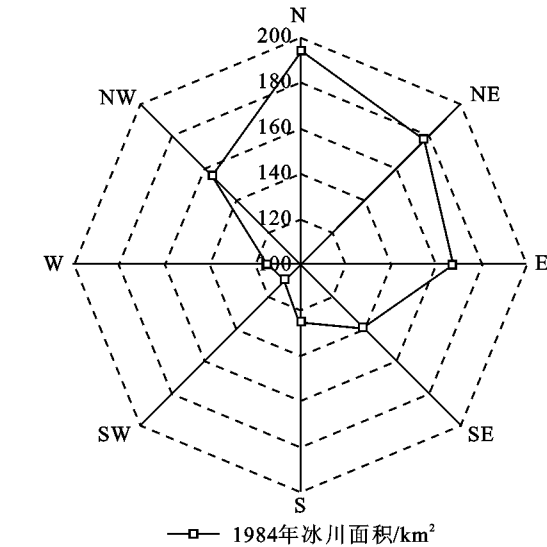


图 1 不同海拔冰川分布和面积减少比例

1984—2013 年,不同坡度的冰川面积都在减少。坡度在  $5^{\circ}\sim 40^{\circ}$  的 7 个等级的冰川面积共减少  $267.19\text{ km}^2$ , 占冰川面积减少总量的  $73.3\%$ , 可见,坡度越缓,面积减少量越大。面积减少百分比随坡度的变化呈正态分布的趋势(图 2)。相关研究表明<sup>[21-22]</sup>,冰川规模和坡度之间存在非线性关系,坡度越缓,则规模越小,对气候的响应越敏感,本研究存在这种趋势。

3.5 冰川变化和坡向的关系

对 DEM 进行重分类,将 1984 年冰川矢量数据转换为栅格,与 DEM 叠加,以  $45^{\circ}$  角为分类单位将研



3.6 与北半球地区冰川变化的对比

为了进一步研究阿尔卑斯山瑞士地区冰川变化特征,将研究区与北半球部分山地冰川变化进行对比研究(表 4)。因为这些研究的起止年份不一致,为了便于对比,统一将研究成果换算成年均退缩率进行比较。

结果表明,在全球变暖的大环境下,阿尔卑斯山瑞士地区冰川变化趋势与北半球其他地区冰川所表现出的冰川面积变小、冰储量下降的大趋势相吻合。但是,阿尔卑斯山瑞士地区退缩速率相对于其他地区

究区的冰川分为 8 类。统计分析 1984 年冰川面积分布规律和 1984—2013 年的冰川面积在各个朝向的变化,从图 3 可知,北向的冰川在面积上占明显优势。由于山脉北坡受太阳辐射较弱,有利于冰川积累、发育;从东坡和西坡来看,东向的冰川多于西向的,这可能是东面紧挨的黑海一定程度上为局部冰川提供了水汽来源所致;南坡冰川分布较少。从 1984—2013 年冰川面积退缩百分比来看,阿尔卑斯山瑞士地区现代冰川各坡向都在退缩。并且退缩的程度在各个坡向大致相同,其中东南坡冰川面积退缩最快,退缩率达到  $34.14\%$ ,东北坡和西坡次之;面积退缩较慢的是西南、西北和东坡。

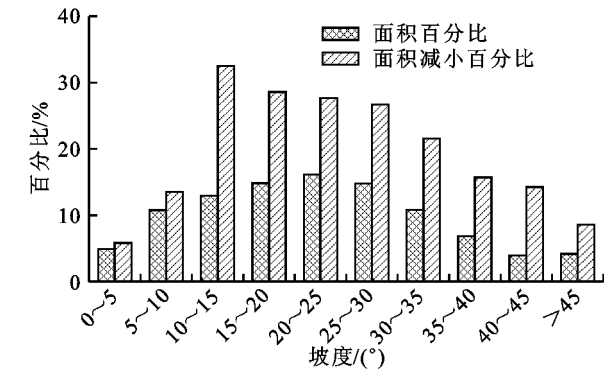


图 2 不同坡度冰川分布和面积减少比例

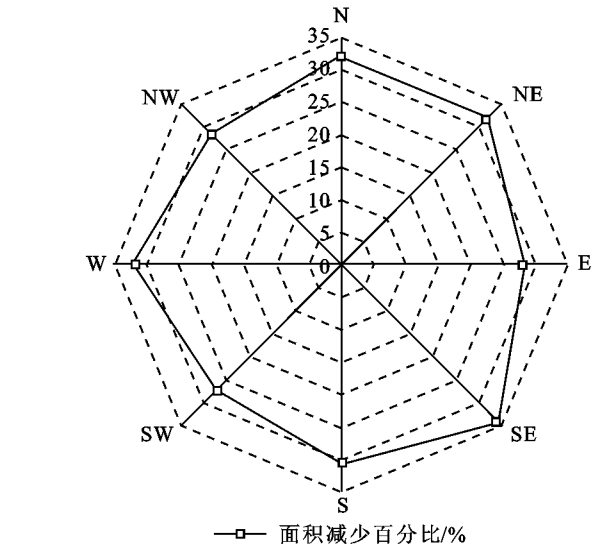


图 3 各个坡向冰川分布和退缩比例

较快,可能的原因是小规模冰川较多,小冰川对气候变化更敏感,更易发生消融。

4 讨论与结论

4.1 讨论

水(降水)热(气温)及其组合是影响冰川发育的主要气候因子。降水决定冰川积累,气温决定消融,它们的组合共同决定着冰川的性质发育和演化<sup>[28]</sup>。本文对选用的格点数据进行了加权平均法分析,由此得到研究区 1970—2010 年均温和年降水的变化情况,并分

析以 10 a 为阶段的年代变化(图 4)。研究区 1970—2010 年温度持续升高,增温率为  $0.34^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ;而年降水量呈微弱减少趋势,减少率为  $5.2\text{ mm}/10\text{ a}$ 。近 30 年瑞士地区冰川的面积明显退缩,同期的气温明显上升而降水在波动中小幅下降,可以推断气温上升对研究区整体冰川的退缩起了主要的作用。

表 4 与北半球其他地区冰川变化比较

位置	时间段	面积退缩百分比/%	年均退缩率/%	资料来源
北天山	1989—2011 年	14.93	0.64	何毅等 <sup>[23]</sup>
南阿尔泰山	1972—2011 年	14.8	0.37	王秀娜等 <sup>[24]</sup>
东帕米尔	1972—2011 年	5.79	0.14	曾磊等 <sup>[25]</sup>
阿尔金山	1973—2010 年	15.58	0.42	祝合勇等 <sup>[26]</sup>
阿拉套地区	1990—2011 年	20.24	0.92	何毅等 <sup>[4]</sup>
祁连山	1990—2010 年	23.5	1.17	Tian <sup>[27]</sup>
阿尔卑斯山中段	1984—2013 年	30.69	1.06	本文

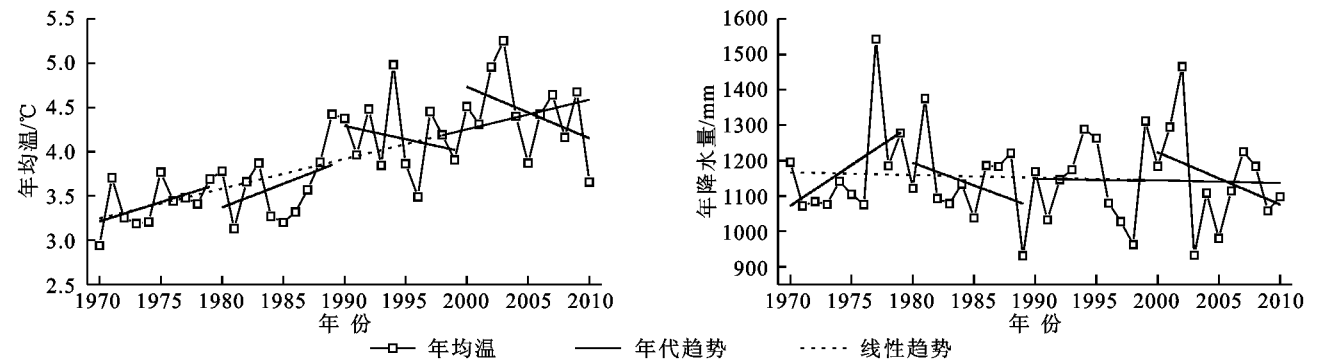


图 4 1970—2010 年年均温和降水量变化

冰川变化是气候变化的反映。在气象要素中,气温和降水与冰川进退变化的关系最为密切,其支配冰川进退变化的气象要素关键是温度。根据统计得到的气温和降水的年代趋势线可以看出(图 4),1970—1980 年气温呈上升趋势,降水也呈上升趋势;1980—1990 年气温呈上升趋势,降水呈下降趋势;1990—2000 年气温呈下降趋势,降水呈微弱下降趋势;2000—2010 年气温呈下降趋势,降水呈下降趋势。若将阿尔卑斯山中段瑞士地区近 30 年来冰川的面积变化(表 2)与上述气温、降水趋势变化相对照,可以看出它们之间并不是同步的,而存在一个滞后期。已有研究表明<sup>[29]</sup>,冰川对气候变化的响应不是立即实现的,而是需要一个滞后的过程。响应的滞后时间长短受多种因素的影响,但主要是受冰川类型和性质的影响。对山岳冰川来说,一般海洋型冰川比大陆型冰川对气候变化响应要灵敏,同等规模冰川的滞后时间要短;中小型冰川比大型冰川对气候变化响应要灵敏,而且滞后时间也短<sup>[30]</sup>。根据潘保田<sup>[31]</sup>、丁永建<sup>[32]</sup>等的研究结果以及本文的分析,可以推测本研究区冰川变化与气候的响应可能存在 10 a 左右的滞后期。若我们将研究区冰川面积变化和气候响应往前推进 10 a,可以发现冰川面积变化与气候之间存在着很好的对应关系,即研究区 1970—1980 年气温、降水均呈上升趋势,1980—1990 年气温呈上升趋势,降水呈下降趋势,而研究区冰川 1984—1990 年较 1990—2003 年的退缩速率慢,可能是降水量弥补了一部分由气温引起的冰川消

融。1990—2000 年气温呈下降趋势,降水基本不变,同时 2003—2013 年冰川退缩速率也减慢,表明此时段气温起到了主要作用。这样推断的话,2000—2010 年气温、降水均呈下降趋势,未来阿尔卑斯山中段瑞士地区冰川退缩速率会减慢。

4.2 结论

(1) 1984—2013 年,瑞士地区的冰川总面积由  $1\,187.24\text{ km}^2$  减少到  $822.91\text{ km}^2$ ,冰川面积总共减少了  $364.33\text{ km}^2$ ,退缩比例达到了 30.69%,年退缩速率为  $12.56\text{ km}^2/\text{a}$ 。1990—2003 年的退缩速率最大,未来 10 a 冰川退缩速率将会有所减慢。

(2) 冰川规模等级和面积减少百分比呈反相关关系,即规模越小,退缩越快,这表明小规模冰川对气候响应更敏感。

(3) 研究区的冰川消融主要发生在海拔 4 000 m 以下,冰川面积退缩随着海拔的升高而减少;1984—2013 年,不同坡度的冰川面积都在减少。坡度越缓,面积减少量越大;各个坡向的冰川均在退缩,其退缩速率基本相一致。

(4) 1970—2010 年,研究区气温升高明显,降水量变化幅度不大,气温上升是研究区冰川退缩的主要因素。分时段分析,未来该区冰川将会减慢退缩。

参考文献:

[1] Qian K Z, Wan L, Wang X S, et al. Periodical characteristics of base flow in the source region of the Yangtze

- River[J]. *Journal of Arid Land*, 2012, 4(2): 113-122.
- [2] Dyurgerov M B, Meier M F. Twentieth century climate change: Evidence from small glaciers[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2000, 97(4): 1406-1411.
- [3] Bradley R S, Vuille M, Diaz H F, et al. Threats to water supplies in the tropical Andes[J]. *Science*, 2006, 312(5781): 1755-1756.
- [4] 何毅, 杨太保, 杜鹃, 等. 基于 GIS 和 RS 的中亚阿拉套山脉近 22 a 来冰川变化[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(6): 130-134.
- [5] 叶庆华, 陈锋, 姚檀栋, 等. 近 30 a 来喜马拉雅山脉西段纳木那尼峰地区冰川变化的遥感监测研究[J]. *遥感学报*, 2007, 11(4): 511-520.
- [6] 聂勇, 张德铨, 刘林山, 等. 近 30 年珠穆朗玛峰国家自然保护区冰川变化的遥感监测[J]. *地理学报*, 2010, 65(1): 13-28.
- [7] 李治国, 姚檀栋, 叶庆华, 等. 1980—2007 年喜马拉雅东段洛扎地区冰川变化遥感监测[J]. *地理研究*, 2011, 30(5): 939-952.
- [8] 颜东海, 李忠勤, 高闻宇, 等. 祁连山北大河流域冰川变化遥感监测[J]. *干旱区研究*, 2012, 29(2): 245-250.
- [9] 冀琴, 杨太保, 李霞. 念唐唐古拉山东段八盖乡地区近 40 a 冰川与气候变化研究[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(2): 306-310.
- [10] Mailer M. Sustainable mobility and living in Alpine Metropolitan Regions[J]. *Transportation Research Procedia*, 2014, 4: 140-153.
- [11] Paul F, Haeberli W. Spatial variability of glacier elevation changes in the Swiss Alps obtained from two digital elevation models [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(21): 189-203.
- [12] Paul F, Kääb A, Haeberli W. Recent glacier changes in the Alps observed by satellite: Consequences for future monitoring strategies[J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 56(1): 111-122.
- [13] Haeberli W, Beniston M. Climate change and its impacts on glaciers and permafrost in the Alps[J]. *Ambio*, 1998, 27(4): 258-265.
- [14] Pellicciotti F, Carenzo M, Bordoy R, et al. Changes in glaciers in the Swiss Alps and impact on basin hydrology: Current state of the art and future research[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 493: 1152-1170.
- [15] 周尚哲. 阿尔卑斯山地区第四纪冰川最新研究[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(5): 1127-1133.
- [16] 李霞, 孙文新, 曾群柱. 综合 RS 和 GIS 方法提取青藏高原冰川变化信息: 以布塔格峰为例[J]. *地理学报*, 1999, 54(3): 73-78.
- [17] Williams R S, Hall D K, Sigurdsson O, et al. Comparison of satellite-derived with ground-based measurements of the fluctuations of the margins of Vatnajökull, Iceland, 1973—92[J]. *Annals of Glaciology*, 1997, 24: 72-80.
- [18] Hall D K, Bayr K J, Schöner W, et al. Consideration of the errors inherent in mapping historical glacier positions in Austria from the ground and space (1893—2001) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(4): 566-577.
- [19] Ye Q, Kang S, 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.
- [20] 王园香. 青藏高原气候环境对冰川发育影响的数值模拟研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2009.
- [21] Wang N L, Yao T D. Study of the steady state response if a glacier to climate change[J]. *Cryosphere*, 1996, 18(2): 67-74.
- [22] Wang N L, Yao T D, Pu J C. Climate sensitivity of the Xiao Dongkemadi glacier in the Tanggula Pass[J]. *Cryosphere*, 1996, 18(2): 63-66.
- [23] 何毅, 杨太保, 田洪阵, 等. 近 23 a 来北天山冰川面积变化对气候的响应[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(3): 53-60.
- [24] 王秀娜, 杨太保, 田洪振, 等. 近 40 a 来南阿尔泰山区现代冰川变化及其对气候变化的响应[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(2): 77-82.
- [25] 曾磊, 杨太保, 田洪阵. 近 40 a 东帕米尔高原冰川变化及其对气候的响应[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(5): 144-150.
- [26] 祝合勇, 杨太保, 田洪阵. 1973—2010 年阿尔金山冰川变化[J]. *地理研究*, 2013, 32(8): 1430-1438.
- [27] Tian H, Yang T, Liu Q. Climate change and glacier area shrinkage in the Qilian mountains, China, from 1956 to 2010[J]. *Annals of Glaciology*, 2014, 55(66): 187-197.
- [28] 施雅风. 简明中国冰川目录[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2005.
- [29] 王宁练, 张祥松. 近百年来山地冰川波动与气候变化[J]. *冰川冻土*, 1992, 14(3): 242-250.
- [30] 苏珍, 刘宗香, 王文梯, 等. 青藏高原冰川对气候变化的响应及趋势预测[J]. *地球科学进展*, 1999, 14(6): 607-612.
- [31] Pan B, Cao B, Wang J, et al. Glacier variations in response to climate change from 1972 to 2007 in the western Lenglongling mountains, northeastern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology*, 2012, 58(211): 879-888.
- [32] 丁永建. 近 40 a 来全球冰川波动对气候变化的反应[J]. *中国科学: B 辑*, 1995, 25(10): 1093-1098.