

文章编号: 1007-4619(2007)04-0511-10

近 30 年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

叶庆华^{1,2}, 陈 锋¹, 姚檀栋^{1,3}, 王景华¹, 刘 强², 张雪芹⁴, 康世昌^{1,3}

(1. 中国科学院 青藏高原研究所, 北京 100085 2. 中国科学院 遥感应用研究所, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;

3. 中国科学院 冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 4. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘 要: 本文从 1976、1990、1999 的 Landsat 及 2003 年 ASIER 系列数字遥感影像上提取了喜马拉雅山脉西段纳木那尼峰地区的 4 期冰川空间分布数据, 在 Arc/Info 中综合各期数据, 建立研究区 1976—2003 年冰川变化图谱, 定量分析了纳木那尼峰地区冰川的空间变化。图谱这种数据集成的方法明显优于直接将各期影像分类结果进行比较的传统研究方法。研究结果表明, 纳木那尼峰地区的冰川以广泛退缩为主, 但北部也有少量前进冰川存在。自 1976 年到 2003 年, 冰川面积从 84.41 km² 减少到 77.29 km², 各时段分别以平均 0.17 km²/a、0.19 km²/a 和 0.77 km²/a 的速度在退缩, 冰川退缩明显加速。冰川退缩面积占研究区总面积的 8.4%, 明显比高亚洲冰川平均退缩比例 (7%) 大, 表明西喜马拉雅山脉的冰川退缩比较严重。

关键词: 冰川变化; GIS; RS; 图谱; 基本单元; 纳木那尼峰

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A

Tupu of Glacier Variations in the Mt. Namona Nyi Region, Western Himalayas, in the Last Three Decades

YE Qing-hua², CHEN Feng¹, YAO Tan-dong³, WANG Jing-hua¹,
LU Qiang², ZHANG Xue-qin⁴, KANG Shi-chang³

(1. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences (CAS), Beijing 100085, China

2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications,
CAS and Beijing Normal University, Beijing 100101, China

3. Joint Key Laboratory of Cryosphere and Environment, CAS Gansu Lanzhou 730000, China

4. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS Beijing 100101, China)

Abstract: This paper provides an alternative method of comprehensive research on glacier variation using multi-source and multi-temporal data. This work quantifies glacier variations of the Mt. Namona Nyi area by integrating glacier spatial data from ASIER and the Landsat series of satellite imagery at four different times: 1976, 1990, 1999, and 2003. Comparison of the results from individual images with those from the Tupu method indicates that the Tupu approach provides a better result in the research. Glacier variations were mapped and analyzed; discrepancies between images could be detected and removed from the integrated Grid data using map tables in Arc/Info GRID module both graphically and numerically. Our results show that

收稿日期: 2006-05-22 修订日期: 2006-11-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号: 40601056, 40121101, 40401042, 40201005), 国家重点基础研究发展计划项目 (编号: 2005CB422004), 中国科学院“百人计划”, 中国科学院创新项目 (编号: KZCX3-SW-339) 和中国科学院地理科学与资源研究所知识创新工程自然科学基金延伸支持领域前沿项目 (编号: CXJG-A04-03)。

作者简介: 叶庆华 (1972—), 女, 副研究员, 研究生导师, 2001 年获得中国科学院地理科学与资源研究所博士学位, 主要从事资源环境遥感及其应用方面研究, 已发表论文 20 余篇。E-mail: yeqh@ircas.ac.cn

glaciers in the region both retreated and advanced during the last 28 years; however, retreat dominates and increases with time. The variation of glaciers in the western Himalayan region is dramatic compared with other regions in high Asia. From 1976 to 2003, glacier area decreased from 84.41 km² to 77.29 km². By the sequential images, it shows that glacier areas shrank by 0.17 km² a⁻¹, 0.19 km² a⁻¹, and 0.77 km² a⁻¹, on average, during the periods 1976–1990, 1990–1999, and 1999–2003, respectively, suggesting that glacier retreat has accelerated. The retreat was most likely due to the negative glacial mass balance and was affected by rising temperature and decreasing precipitation in the region over the Tibetan Plateau.

Key words: glacier variation; GIS (Geographical Information System); RS (Remote Sensing); the integrated unit; Mt. Namona NVI

表 1 研究区域的数字卫星影像

Table 1 Digital satellite images used in the study area

传感器	成像日期	轨道号
Landsat MSS	1976年 12月 6日	155/39
Landsat TM	1990年 10月 23日	144/39
Landsat TM	1999年 11月 9日	144/39
ASIER	2003年 10月 3日	

1 引 言

山地冰川,尤其是那些地处温带的冰川,被认为是气候变化的最佳天然指示器之一^[1]。由于 20 世纪以来山地冰川普遍处于退缩状态^[2],大量小冰川在人们还没有注意到它们之前就有可能消融殆尽,所以人类需要迅速地对冰川变化进行全球性详细监测^[3-5]。青藏高原上的冰川在全球气候系统中起着重要的作用^[6,7]。近几十年来,专家们将目光转向高亚洲地区的山地冰川变化^[8,9],众多研究^[10-15]表明,冰川退缩在青藏高原上普遍存在,而且,高原边缘地带的冰川退缩速率比高原内部快^[5]。

由于大部分山地冰川地处偏远,并且数量众多,所以,卫星遥感技术(包括微波及光学遥感数据)被广泛应用于大尺度的冰川变化研究中。陆地资源卫星(包括 MSS、TM及 EIM+)已经成为冰川学研究的主要数据源之一^[16],因为它能够连续提供自 1972 年以来偏远区域的冰川分布信息^[17]。此外,ASIER (the Advanced Space-borne Thermal Emission and Reflection Radiometer)数据近年来也被广泛应用于山地冰川变化的动态监测中^[18]。

纳木那尼峰地区位于青藏高原的西南部,坐落在 81°E–81°47'E, 30°04'N–31°16'N 范围内,海拔 7694 m,是喜马拉雅山脉的最高峰。最近几十年,许多研究者非常关注西喜马拉雅的山地冰川变化^[18],但对于纳木那尼峰地区的冰川变化却知之甚少。本文利用多期数字遥感影像(表 1,图 1)和 1974 年航片测绘生成的 1:50000 地形图研究纳木那尼峰地区的冰川变化。

2 研究方法

目前,国内外冰川识别的常规方法,是基于每一

期多光谱数字遥感影像的近红外与可见光波段数据,采用各种方法提取冰川信息(如人工目视解译专题数据矢量化,多波段的代数运算,监督分类,非监督分类以及人一机交互式分类数据的检验与修正等),然后分别计算并比较各期遥感数据识别出来的冰川面积与空间分布情况,再将各期数据叠合显示成图^[19,20]。

在遥感数据的获取、处理、分析和转换等一系列步骤中,都会有不同类型和不同程度的不确定性引入,并在进一步分析中传播。由于每一期多光谱遥感影像上冰川信息提取的不确定性,常规的多光谱方法忽略了各期影像数据分类结果之间的“变化噪声”问题。在基于不同时期遥感影像上提取的冰川数据进行比较、分析过程中,会发现各期数据之间不可避免地存在一定的“噪声”,即某些像元发生了“反复无常”的变化,如,短期内从“冰川→基岩→冰川→基岩”连续发生变化,根据专家知识判断,出现了不可能发生的冰川变化情况。这些噪声可能是由多源、多时相、多分辨率影像在获取地面信息或数据处理方法等方面的差异而产生的(如角度不同、数据的成像时间不同等),要检测并屏蔽这些“噪声”,更准确地可视化定量表达冰川分布的空间变化,光靠单期多光谱数字影像难以实现。因此,本文采用地学信息图谱方法^[21-24]和传统方法对 1976–2003 年期间纳木那尼地区的冰川变化进行了研究,并比较了两种方法得出的计算结果。

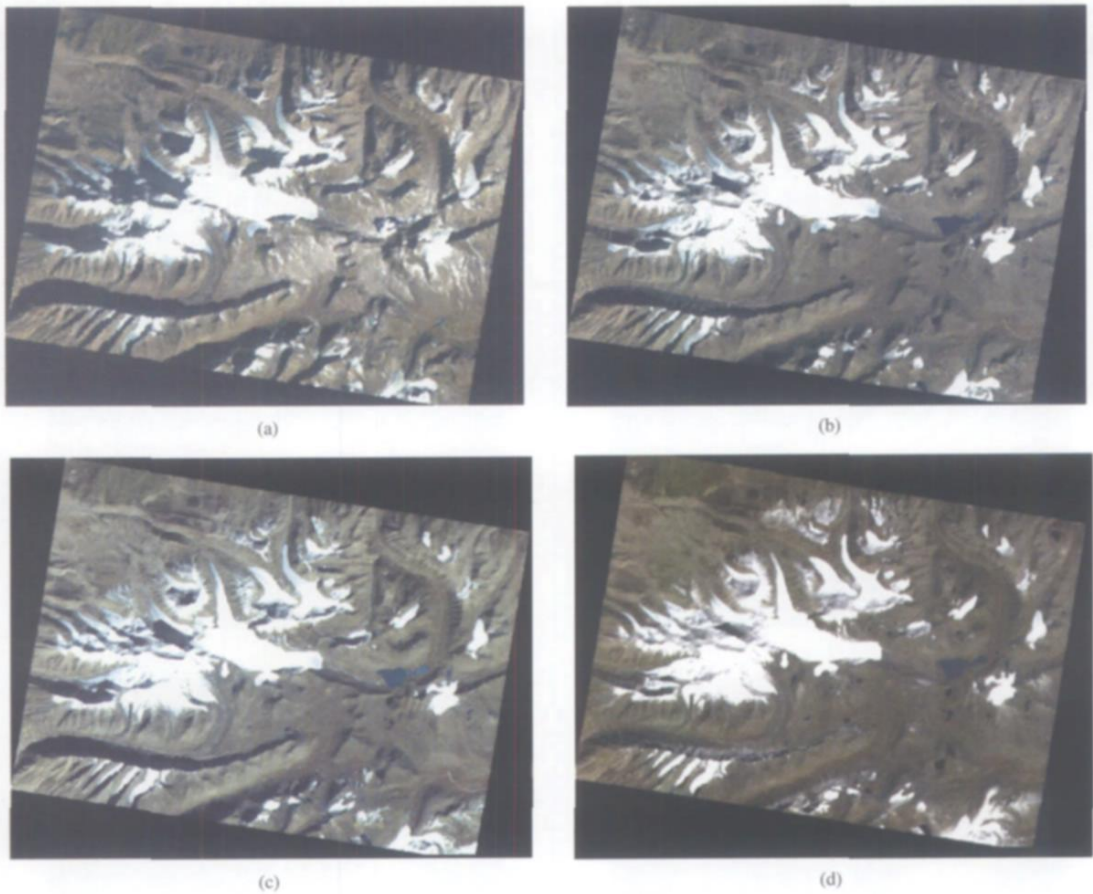


图 1 各期遥感影像数据

(a) 1976 年 Landsat MSS 影像数据 (RGB 4 2 1); (b) 1990 年 Landsat TM 影像数据 (RGB 4 3 2);
 (c) 1999 年 Landsat TM 影像数据 (RGB 4 3 2); (d) 2003 年 ASTER 影像数据 (RGB 3N21)

Fig 1 Digital satellite images used in the Mt. Namona Nvi region

(a) Landsat MSS digital image in 1976 (RGB 4 2 1); (b) Landsat TM digital image in 1990 (RGB 4 3 2);
 (c) Landsat TM digital image in 1999 (RGB 4 3 2); (d) ASTER digital image in 2003 (RGB 3N21)

2.1 基本数据处理过程

对于纳木那尼峰地区来说, 由于地形高低起伏对遥感成像的影响较大, 本文利用高精度 DEM 数据 (比例尺 1:50000 格网尺度 25m) 对各期遥感影像数据逐像元进行正射校正, 以消除地形引起的误差。

正射校正之前, 对 DEM 进行了精度评价。以 1:50000 地形图为准, 从中选取 331 个高程点, 来计算 DEM 上同名点的误差范围。评价结果显示, 平均高程误差是 12.37m, 标准差是 18.52, 均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) ^[25, 26] 是 ±20.93m。DEM 的最大高程差是 -18.09m 和 +27.8m。

然后, 基于 DEM 在 PC 的 1 Geomatica 软件中对各期遥感影像进行了正射校正, 误差控制在一个像元之内 (25m)。所有影像数据统一为横轴墨卡托

投影 (Transverse Mercator), 采用 Krasovskiy 1940 椭球体。全部正射影像的配准都基于 1:50000 地形图, 配准误差也在一个像元之内 (25m), 最大验证点误差是 44m (表 2)。

表 2 各期影像对于 1:50000 地形图配准的均方根误差 (单位: m)

Table 2 RMSE of verification points in each co-registered image compared with the 1:50000 topographic map

日期	控制点			验证点		
	X	Y	总计	X	Y	总计
1976	17.9	12.8	22.1	35.1	25.4	43.4
1990	9.8	5.9	11.4	10.5	10.0	14.6
1999	6.4	6.7	9.2	12.0	8.2	14.6
2003	2.9	2.6	3.9	7.6	7.3	10.58

遥感影像分类方案为“冰川”与“非冰川”两类。这个地区的冰川基本没有冰碛物覆盖,因而没有考虑这方面的分类。由于在近红外和中红外波段,冰雪具有很低的反射率,所以利用这两个波段 DN 值特征进行波段相减运算,然后采用非监督分类方法,提取冰川信息。Landsat TM 影像采用第四波段与第五波段相减 ($TM_4 - TM_5$), ASIERS 影像采用第三波

段 ($3N$) 与第四波段相减 ($3N - 4$) 实现。这种方法进行冰川分类提取是一种相对简单而且较为准确的方法^[19]。Landsat MSS 影像,则采用 4 2 1 波段 RGB 顺序合成假彩色影像直接进行非监督分类。所有分类结果都经过人工判读——检验,被积雪覆盖的小面积非冰川区,利用滤波及目视人一机交互方法进行修正,所得结果如图 2 所示。

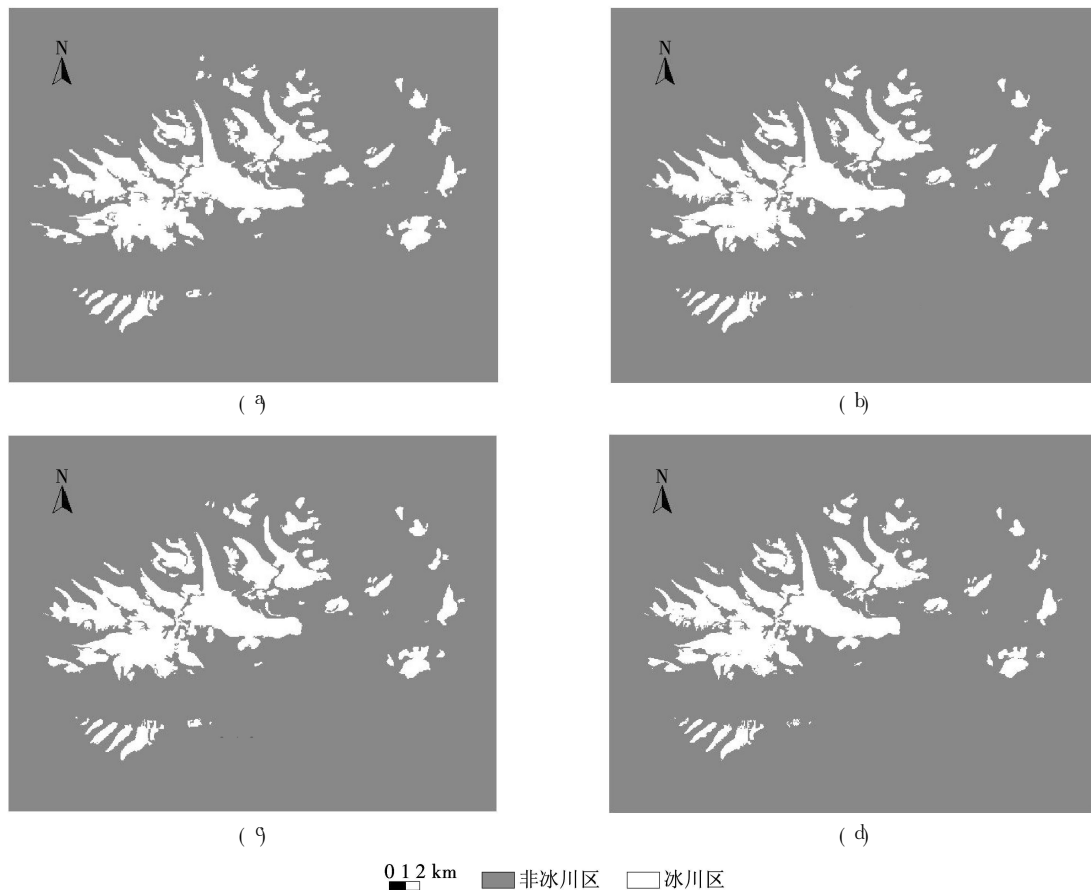


图 2 各期遥感影像的冰川分类结果

(a) 1976 (b) 1990 (c) 1999 (d) 2003

Fig 2 Classification results from individual digital satellite imagery

(a) 1976 (b) 1990 (c) 1999 (d) 2003

常规的多光谱遥感冰川研究,数据处理的下一步,就是分别计算并比较由各期遥感数据识别出来的冰川面积,再将各期遥感数据的冰川分类结果进行矢量—矢量(如文献[19, 26])或者矢量—栅格数据叠合成图(如文献[20, 27]),显示冰川空间分布的变化情况。

本文在以上工作基础上,基于地学信息图谱的理论和方^[21-24],结合 GIS (Geographical Information System) 的空间分析技术,利用 Arc/Info Grid 中的地图代数语言将以上各期冰川专题数据进行合成,建立 1976—2003 年冰川变化图谱,根据

合成 Grid 数据的属性值,可视化冰川变化特征(图 3),并人一机交互式监测各期数据之间可能存在的变化“噪声”,利用 Arc/Info Grid 中的重映射表 (Remap Table) 屏蔽或剔除这些“噪声”,从而得到较准确的冰川变化数据结果。

2.2 分类数据赋值与格式转换

将各期遥感影像的冰川区与非冰川区分类结果分别赋予一个惟一的个位数属性值(非冰川区像元赋值为 5,冰川区像元赋值为 7),然后在 Arc/Info 中,用“ImageGrid”命令将以上各期冰川分

类结果都转换为 Grid 数据格式,并统一采用 30m 的格网单元进行重采样。这样,便于对各期数据之间进行计算。

2.3 各期数据合成冰川变化图谱

在 Arc/Info Grid 中,将以上处理好的各期数据以时间先后为序(即 1976、1990、1999 和 2003),基于格网(Grid)单元进行地图代数运算,由个位数属性值(即 5~7)的 Grid 数据合成属性值为四位数的 Grid 数据,其运算公式如下:

$$Glacier_NY_i = NY_i^{1976} \times 1000 + NY_i^{1990} \times 100 + NY_i^{1999} \times 10 + NY_i^{2003} \quad (1)$$

式中, Glacier_NY 为 1976—2003 年期间纳木那尼峰地区冰川变化的“空间·属性·过程”一体化的图谱数据; NY_i^{1976} 、 NY_i^{1990} 、 NY_i^{1999} 与 NY_i^{2003} 分别是 1976、1990、1999 和 2003 年遥感影像上提取的冰川分类数据。

2.4 冰川变化及其“噪声”检测

以上合成的图谱数据,使本文能够同时从空间分布(即冰川变化图,图 3)和数量变化(即属性表,表 3)两个方面确定每一类 Grid 单元上冰川的动态变化情况。冰川变化是基于格网单元值的变化方向

表 3 1976—2003 年纳木那尼峰地区冰川变化图谱的属性表
Table 3 Info table of integrated Tupu during 1976—2003 by value of grid cells

图谱单元编码	格网单元数	面积 / km ²
5555	714479	643.03
5557	120	0.11
5575	1188	1.07
5577	230	0.21
5755	1494	1.34
5757	266	0.24
5775	824	0.74
5777	2035	1.83
7555	4659	4.19
7557	205	0.18
7575	1371	1.23
7577	706	0.64
7755	2091	1.88
7757	648	0.58
7775	3540	3.19
7777	81837	73.93

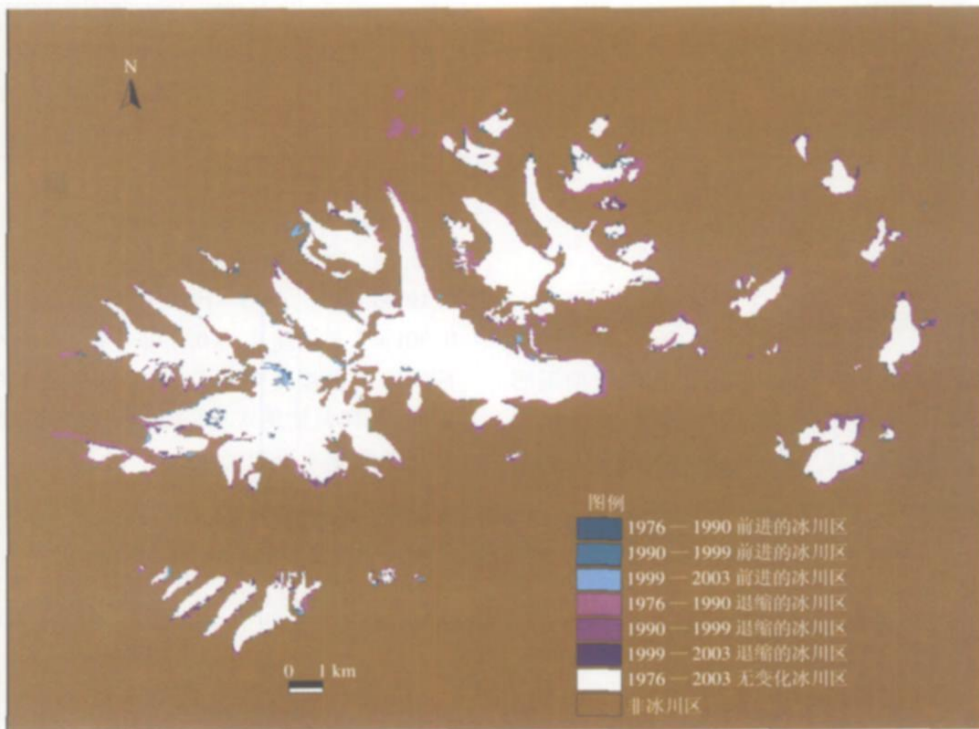


图 3 纳木那尼峰地区 1976—2003 年期间的冰川变化图谱

Fig. 3 Glacier area variations in the Mt. Namona NYi region during 1976—2003

来确定的。通常情况下,原来的非冰川像元在后期的数据上成为冰川像元的,就将其归为“前进的冰川区”(如属性值为 5777, 5577, 5557 的格网单元);原来的冰川像元在后期的数据上成为非冰川像元的,将其归为“退缩的冰川区”(如属性值为 7555, 7755, 7775 的格网单元)。

如果部分格网单元值表现出的冰川变化信息在现实中不可能发生(如 5757, 7575 等值,其中 5757 代表了在 1976—2003 年期间,该单元经历了“非冰川、冰川、非冰川、冰川”4 个阶段的反复变化),则将其归为变化“噪声”。在格网单元属性值的四位编码中,如果有三位编码相同(如 7757, 7577, 或者 5575, 5755),本文应用“从众”原则,认为该像元没有发生变化,其状态应归并为“稳定的冰川区”(编码为 7777)或者“非冰川区”(编码为 5555),这样就

屏蔽了其中一期冰川分类结果出现的“不兼容”信息(表 4 图 3)。这些现象主要是各期数据分类结果的差异造成的,由于数据源不同或积雪覆盖区的季节变化造成了各期数据分类结果的不同。这些不匹配或不合理变化带来的“噪声”,在 GIS 软件中经过人一机互动查询、判断、确认后,可以通过 Arc/Info Grid 模块中的重映射表 (Remap Table) 与 Reclass 函数进行重新分类和重新编码来屏蔽,即进行“图谱重建”^[28, 29],生成相对准确的 1976—2003 年纳木那尼地区的冰川变化“图谱”(表 3 图 3)。在地学信息图谱理论上,将记录变化过程的基本格网单元称为“图谱单元”^[23, 24]。图谱单元的编码是用来分析冰川变化特征的主要依据。因此利用冰川变化图谱,既能确定冰川前进或退缩发生的空间位置,又能定量确定其面积变化大小(图 3 表 4)。

表 4 冰川变化过程图谱单元重建的重映射表

Table 4 Remap table of reclassification for reconstructing grid units of glacier variation process

图谱单元编码	新代码	面积 / km ²	变化类别
5557	1	0 108	1999—2003 年期间前进的冰川区
5577	2	0 207	1990—1999 年期间前进的冰川区
5777	3	1 832	1976—1990 年期间前进的冰川区
7555	4	4 193	1976—1990 年期间退缩的冰川区
7755	5	1 882	1990—1999 年期间退缩的冰川区
7775	6	3 186	1999—2003 年期间退缩的冰川区
7777, 7757, 7577	7	75 146	1976—2003 期间没有发生变化的冰川区
5555, 5575, 5755, 5757, 5775, 7557, 7575	9	647 844	非冰川区以及被屏蔽的“噪声”

3 结 论

3.1 区域冰川变化特征

采用常规的冰川变化研究方法,比较各期遥感影像的冰川分类结果,可知 1976 年冰川面积为 87.04 km²,到 2003 年减少到 79.39 km²,退缩面积总

计 7.66 km², 占总面积的 8.8% (表 5)。1976—1990 年期间,冰川退缩面积为 2.59 km²,平均速率 0.19 km² a⁻¹。1990—1999 年期间,冰川退缩面积为 0.80 km²,平均速率为 0.09 km² a⁻¹。1999—2003 年期间冰川退缩 4.27 km²,平均速率是 1.07 km² a⁻¹。因此,不同时期纳木那尼峰地区冰川面积明显减少,冰川退缩速率不断变化。

表 5 1976—2003 期间各期遥感影像冰川分类结果面积变化表

Table 5 Glacier area change during 1976—2003 by individual image classification results

年代	面积 / km ²	变化面积 / km ²	面积变化比例 / %	变化速率 / (km ² a ⁻¹)
1976	87 04			
1990	84 46	-2 59	-2 97	-0 19
1999	83 66	-0 80	-0 95	-0 09
2003	79 39	-4 27	-5 10	-1 07
总计		-7 66	-8 80	-0 28

本文采用图谱方法,基于 30m 格网单元,将 4 期遥感影像提取的冰川数据合成冰川变化图谱,并根据格网单元值判断冰川的变化状态,检测其中各期数据之间的不兼容信息,进行图谱重建后,重新计算各期冰川面积(表 6),可知,纳木那尼峰地区 1976 年的冰川总面积是 84.41 km^2 ,2003 年减少到 77.29 km^2 (表 6),共计减少了 7.12 km^2 ,占总面积的 8.4% 。1976—1990 年期间,冰川退缩面积为 2.37 km^2 ,年平均速率为 $0.17\text{ km}^2\text{ a}^{-1}$ 。1990—1999

年期间冰川退缩面积为 1.67 km^2 ,平均速率为 $0.19\text{ km}^2\text{ a}^{-1}$ 。1999—2003 年期间冰川退缩面积是 3.08 km^2 ,平均速率为 $0.77\text{ km}^2\text{ a}^{-1}$ 。很明显,在 1976—2003 年期间,纳木那尼峰地区冰川退缩在加速。可见,采用图谱方法研究山地冰川的动态变化,有利于检测并屏蔽多时相、长时间序列各期多光谱遥感影像之间对冰川分类的差异而带来的冰川变化的不确定性^[30],提高数据结果的准确性,从而使人们更易于发现冰川的变化规律。

表 6 1976—2003 年期间冰川变化图谱重构后冰川面积列表

Table 6 Glacier area change during 1976—2003 after integration and reconstruction of basic units by rem ap table

年代	面积 / km^2	变化面积 / km^2	面积变化比例 / %	变化速率 / ($\text{km}^2\text{ a}^{-1}$)	编码
1976	84.41				7777, 7757, 7577, 7555, 7755, 7775
1990	82.04	-2.37	-2.81	-0.17	7777, 7757, 7577, 7755, 7775, 5777
1999	80.37	-1.67	-2.04	-0.19	7777, 7757, 7577, 7775, 5577, 5777
2003	77.29	-3.08	-3.83	-0.77	7777, 7757, 7577, 5557, 5577, 5777
总计		-7.12	-8.44	-0.26	

总之,纳木那尼峰地区在 1976—2003 年期间,冰川大都处于退缩状态,但也存在少量前进的冰川。冰川的前进区越来越小,退缩区面积则越来越大;退缩的冰川面积远远大于前进面积(表 4)。纳木那尼峰地区 1976—2003 年 8.4% 的冰川退缩比例(表 6),明显高于 20 世纪 60 年代以来高亚洲地区的平均退缩比例 7% ^[5]。可见,西喜马拉雅山脉地区的冰川退缩强烈,并且在加速退缩。

3.2 冰川变化与气候变化的关系

纳木那尼峰地区的冰川变化与当地过去 40 年中气候的变化有着密不可分的联系。根据位于研究区最近的普兰县气象站 ($30^{\circ}17'N$, $81^{\circ}15'E$, 海拔 3900m) 1973—2004 年期间记录的气象数据,分别计

算了该站夏季(4—10月,即月均温在 0°C 以上的月份)均温、夏季最高月均温、夏季最低月均温、7 月最高均温、1 月最低均温与多年平均降水量值(表 7),并将夏季均温和年降水量值及其 5 年 FFT (Fast Fourier Transform) 滑动平均的变化绘制成图(图 4)。自 1984 年以来,夏季月均温明显升高(图 4),它与整个青藏高原上过去几十年中普遍的升温现象相一致^[31,32]。从表 7 中可知,在 1973—2004 年期间,在 20 世纪 90 年代和 2000 年后这两个阶段内,纳木那尼峰地区夏季月均温分别增长了 0.4°C 和 0.7°C ;夏季最高月均温、夏季最低月均温、7 月最高均温、1 月最低均温都出现了明显的升高趋势(表 7),而多年平均降水量的线性趋势线则呈下降状态(图 4)。例如,在 1973—1975 年期间,气温升高导致夏季更强

表 7 1973—2004 年普兰县气象站夏季(4—10 月)均温、夏季最高月均温、夏季最低月均温、7 月最高均温、1 月最低均温与多年平均降水量值列表

Table 7 Climatic characteristics of average summer temperature, month average maximum temperature in summer, month average minimum temperature in summer, maximum average temperature in July, minimum average temperature in January, and average annual precipitation from Burang Station during 1973—2004

时间段	夏季均温 / $^{\circ}\text{C}$	夏季最高月均温 / $^{\circ}\text{C}$	夏季最低月均温 / $^{\circ}\text{C}$	7 月最高均温 / $^{\circ}\text{C}$	1 月最低均温 / $^{\circ}\text{C}$	多年平均降水量 / mm
1973—1990	9.0	16.3	3.0	20.8	-15.2	141.1
1991—1999	9.4	16.8	3.1	21.7	-14.6	109.4
2000—2004	9.7	17.0	3.6	21.3	-14.0	117.1

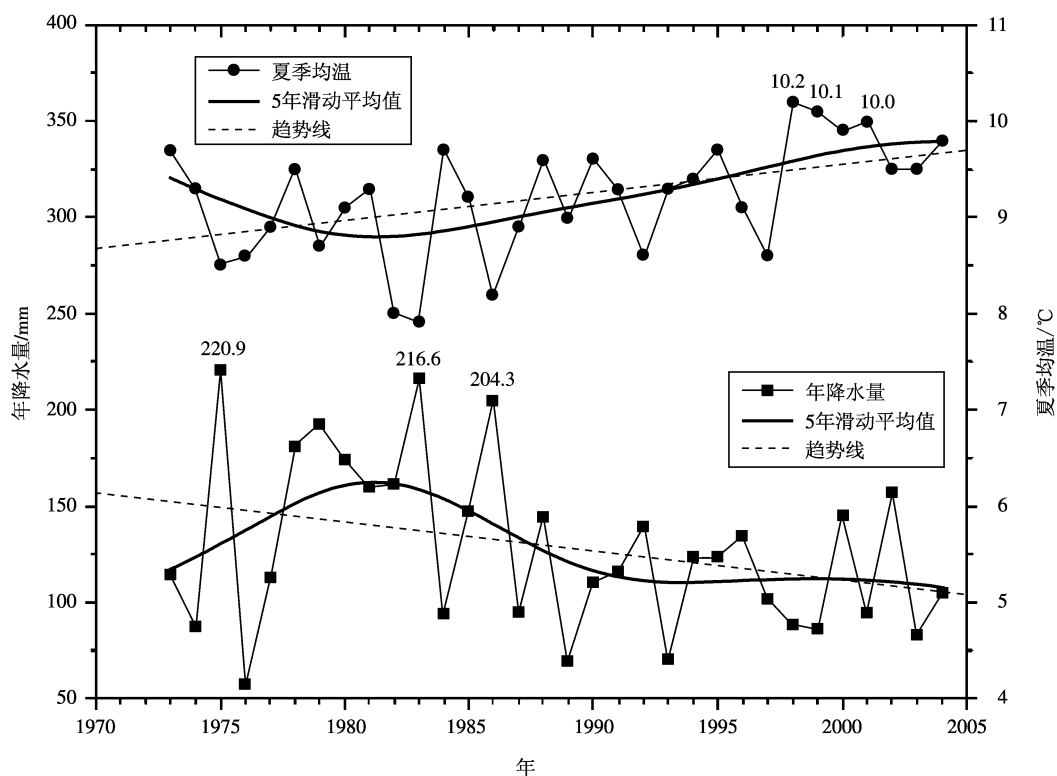


图 4 1973—2004 年青藏高原上普兰县气象站 ($30^{\circ}17'N$ $81^{\circ}15'E$ 海拔 3900m) 夏季 (4—10 月) 均温 ($^{\circ}C$) 与年降水量 (mm) 变化及其 5 年 FFT 滑动平均值变化曲线

Fig. 4 Change and its linear fit and 5 a Fast Fourier Transform (FFT) Smoothing for average summer (April through October) temperature (in $^{\circ}C$) and annual precipitation (in mm) from Burang (1973—2004) Station ($30^{\circ}17'N$ $81^{\circ}15'E$, 3900m a.s.l.), Tibetan Plateau

烈的消融, 降水量减少且多年平均的强蒸发量 (2197.4mm) 使冰川处于负的物质平衡状态^[33]。这样, 就发生了冰川面积的减少和冰川末端的退缩^[5]。因此, 在过去 30 年中, 纳木那尼峰地区的冰川在加速退缩^[30], 主要是由于区域气温显著升高、且降水量相对减少两方面原因造成的。

4 讨论

本文运用图谱方法^[23, 24]研究纳木那尼峰地区 1976—2003 年期间冰川的时空变化特征, 并与目前普遍采用的常规方法得到的结果进行了对比。结果发现, 图谱方法能够有效屏蔽各期影像冰川分类中产生的“不兼容”信息 (即变化噪声), 更有效地反映出冰川的变化趋势 (表 6)。此外, 这种将多期数据合成的方法可以帮助确定各期影像冰川分类过程中可能混分的区域 (如由于后期影像上的雪盖而将高海拔冰川之间的裸岩区域误分为“冰川”, 从而在图谱中表现为冰川的不合理块状前进, 如图 3 山体中

深蓝色斑块所示)。类似这样误判的区域若仅采用传统方法、依靠单一时期影像的光谱特征往往难以判读出来, 而在合成的图谱数据中却能很容易被检测到。当然, 由于后期遥感影像 (如 2003 年 ASISER 影像) 分辨率较前期影像高, 所以冰川的识别较准确, 而在前期影像中有些被误分为“冰川”的区域, 在合成的图谱数据中, 则表现为冰川的“退缩”区, 这会在某种程度上夸大冰川的“退缩”面积, 如图 3 中较大面积的粉红色斑块就属于这种情况。对于这些区域是否曾有冰川, 还需要冰川专家知识和今后野外的实地考察与验证才能确定。不管怎样, 利用图谱方法, 可以确定几个这样需要野外现场实测的典型考察区。而且, 这样确定的冰川消融或前进的空间分布特征, 还可以帮助研究冰芯的学者们选择较理想的冰芯钻孔位置, 为古气候环境特征的重建与研究提供参考依据。

在利用遥感影像提取冰川数据的过程中, 碰到了很多问题, 如“异物同谱”现象 (尤其是冰川边缘的常年积雪) 的广泛存在, 山体阴影中的冰川识别等等, 使

冰川边界往往难以确定^[34],因此,本文从 Landsat 数字影像上提取的冰川数据还存在一定的误差。除了利用多种多光谱遥感数据处理方法以外,将来还可以考虑结合区域地形、地貌特征(如基于 DEM 提取冰川数据)、地面的热辐射特征等,并结合实地考察进行检验与修正来提高冰川数据提取的准确性。

由于局地气象资料及野外考察资料的缺乏,部分冰川前进的原因目前尚不明确。而且,本文仅研究了纳木那尼峰地区的冰川面积变化,尚未包括冰川减薄或运动带来的冰川厚度的变化^[30]以及局部地形地貌特征对冰川变化的影响等。今后,将开展冰川厚度的变化研究,从高精度对地的遥感数据中提取 DEM(如 ASTER、ALOS 数据等),结合微波遥感,监测研究区冰面高程的变化,或与历史地形图上获得的 DEM 进行比较,计算冰储量的变化,并分析其与局部地形地貌特征之间的互动关系;还将开展基于临近像元特征^[35]进行遥感数据冰川分类的新方法研究,并尝试结合高分辨率影像^[36]数据(如 SPOT、KONOS 等)进行多尺度的冰川变化研究,这样便能够对青藏高原的冰川变化与全球环境变化的关系有更为全面的认识。

参考文献 (References)

- [1] IPCC Houghton J T, Ding Y, Griggs D J et al. Climate Change 2001: The Scientific Basis. A Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report [J]. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 2001.
- [2] Dyurgerov M B, Meier M F. 20th Century Climate Change: Evidence from Small Glaciers [A]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America [J]. 2000, **97**: 1406—1411.
- [3] Haeberli W, Frauenfelder R, Hoelzle M et al. Rates and Acceleration Trends of Global Glacier Mass Changes [J]. Geografiska Annaler, 1999, **81**: 585—591.
- [4] Oerlemans J. Quantifying Global Warming from the Retreat of Glaciers [J]. Science, 1994, **264**: 243—245.
- [5] Yao T D, Wang Y, Liu S et al. Recent Glacier Retreat in High Asia in China and its Impact on Water Resource in Northwest China [J]. Science in China (D), 2004, **47** (12): 1065—1075.
- [6] Shi Y F. Glacier and Environment in China—Present, Past and Future [M]. Beijing: Science Press, 2000 [施雅风. 中国冰川与环境——现在、过去和未来 [M]. 北京: 科学出版社, 2000]
- [7] Zheng D. Formation Environment and Development of the Tibetan Plateau [M]. Shijiazhuang: Hebei Science and Technology Press, 2003 [郑度. 青藏高原形成演化与发展 [M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2003]
- [8] Qin D H, Chen Y Y, Li X Y. Evolution of Climate and Environment in China [M]. the First Part: Climate and Environment Evolution and Prediction in China. Beijing: Science Press, 2005 [秦大河, 陈宜瑜, 李学勇. 中国气候与环境演变 (上卷), 气候与环境的演变及预测 [M]. 北京: 科学出版社, 2005]
- [9] Mayewski P A, Jeschke P A, Hinakyan and Trans-Himalayan Glacier Fluctuations Since A. D. 1812 [J]. Arct. Alp. Res., 1979, **11** (3): 267—287.
- [10] Li Z, Sun W, Zeng Q Z. Measurements of Glacier Variation in the Tibetan Plateau Using Landsat Data [J]. Remote Sensing of Environment, 1998, **63** (3): 258—264.
- [11] Pu J C, Yao T D, Wang N L et al. Recent Variation of Major Glacier in High Xil Region, Center of Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, **23** (2): 189—192 [蒲健辰, 姚桃栋, 王宁练等. 可可西里马兰山冰川的近期变化 [J]. 冰川冻土, 2001, **23** (2): 189—192]
- [12] Wang Z T, Liu C H. Geographical Characteristics of the Distribution of Glaciers in China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, **23** (3): 231—237. [王宗太, 刘潮海. 中国冰川分布的地理特征 [J]. 冰川冻土, 2001, **23** (3): 231—237]
- [13] Su Z, Liu Z X, Wang W D et al. Glacier Response to the Climatic Change and its Trend Forecast in the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Advance in Earth Sciences, 1999, **14** (6): 607—612 [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]
- [14] Jing Z F, Ye B S, Jiao K Q et al. Surface Velocity on the Glacier No. 51 at Haxijiege of the Kuoyun River, Tianshan Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, **24** (5): 563—566 [井哲帆, 叶柏生, 焦克勤等. 天山奎屯河哈希勤根 51 号冰川表面运动特征分析 [J]. 冰川冻土, 2002, **24** (5): 563—566]
- [15] Chen J M, Liu C H, Jin M Y. Application of the Repeated Aerial Photogrammetry to Monitoring Glacier Variation in the Drainage Area of the Uumqi River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, **18** (4): 331—336 [陈建明, 刘潮海, 金明彦. 重复航空摄影测量方法在乌鲁木齐河流域冰川变化监测中的应用 [J]. 冰川冻土, 1996, **18** (4): 331—336]
- [16] Bindenschadler R, Dowdeswell J, Hall D et al. Glaciological Applications with Landsat 7 Imagery: Early Assessments [J]. Remote Sensing of Environment, 2001, **78**: 163—179.
- [17] Meier M F. Evaluation of ERTS Imagery for Mapping and Detection of Changes in Snow Cover on Land and on Glaciers [A]. Symposium on Significant Results Obtained from the Earth Resources Technology Satellite-1 [C]. NASA SP-327 Washington DC: NASA, 1973.
- [18] Bishop M P, Osenholler J A, Schroder J F et al. Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS): Remote Sensing and GIS Investigations of the Earth's Cryosphere [J]. Geocarto International, 2004, **19** (2): 57—84.
- [19] Paul F, Kääb A, Maisch M et al. The New Remote Sensing

- Derived Swiss Glacier Inventory: J. Methods [J]. *Annals of Glaciology* 2002 **34**: 355—361
- [20] Kääb A. Combination of SRTM3 and Repeat ASIR Data for Deriving Alpine Glacier Flow Velocities in the Bhutan Himalaya [J]. *Remote Sensing of Environment* 2005, **94**: 463—474
- [21] Chen S P. A Discussion of Geoinformatic TUPU [J]. *Geography Research* 1998 **17**(Supplement): 5—10 [陈述彭. 地学信息图谱综述 [J]. *地理研究* 1998, **17**(增刊): 5—10]
- [22] Chen S P. Exploring Research on Geoinformatic TUPU [M]. Beijing: Commercial Press, 2001. [陈述彭. 地学信息图谱探索研究 [M]. 北京: 商务印书馆, 2001]
- [23] Ye Q H, Liu G H, Lu Z, et al. Research of TUPU on Land Use/Land Cover Change Based on GIS [J]. *Progress in Geography* 2002 **21**(4): 349—357. [叶庆华, 刘高焕, 陆洲等. 基于 GIS 的时空复合体——土地利用图谱模型研究方法 [J]. *地理科学进展* 2002, **21**(4): 349—357]
- [24] Ye Q H, Liu G H, Tian G L, et al. Geospatial-temporal Analysis of Land Use Changes in the Yellow River Delta in the Last 40 Years [J]. *Science in China (D)*, 2004 **47**(11): 1008—1024.
- [25] Hall D K, Klaus J B, Wolfgang Schöner. 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**: 566—577
- [26] Paul F, Huggel C, Kääb A. Combining Satellite Multispectral Image Data and a Digital Elevation Model for Mapping of Debris-covered Glaciers [J]. *Remote Sensing of Environment* 2004, **89**: 510—518.
- [27] Khromova T E, Osipova G B, Tsvetkov D G, et al. Changes in Glacier Extent in the Eastern Pamir Central Asia Determined from Historical Data and ASIR Images [J]. *Remote Sensing of Environment* 2006, **102**: 24—32
- [28] Ye Q H, Liu G H, Marco RUSSJ, et al. Tupu Analysis of Land Cover Evolution Patterns for the Newborn Wetland of the Yellow River Delta [J]. *Acta Geoscientia Sinica* 2003, **5**(3): 107—111 [叶庆华, 刘高焕, Marco RUSSJ 等. 黄河三角洲 (东营市) 各县区土地利用“涨势”图谱的时空特征 [J]. *地球信息科学*, 2003 **5**(3): 107—111.]
- [29] Ye Q H, Tian G L, Liu G H, et al. Tupu Methods of Spatial-temporal Pattern on Land-use Change: A Case Study in the Yellow River Delta [J]. *Journal of Geographical Sciences* 2004 **14**(2): 131—142
- [30] Ye Q H, Yao T D, Kang S C, et al. Glacier Variations in the Mt. Namcha Nbari Region, Western Himalayas, in the Last Three Decades [J]. *Annals of Glaciology* 2006 **43**: 230—238
- [31] Liu X, Chen B. Climatic Warming in the Tibetan Plateau During Recent Decades [J]. *International Journal of Climatology* 2000, **20**: 1729—1742
- [32] Wu S H, Yin Y H, Zheng D, et al. Climate Changes in the Tibetan Plateau During the Last Three Decades [J]. *Acta Geographica Sinica* 2005, **60**(1): 3—11 [吴绍洪, 尹云鹤, 郑度等. 青藏高原近 30 年气候变化趋势 [J]. *地理学报*, 2005, **60**(1): 3—11.]
- [33] Guan Z H, Chen C Y, Qu Y X, et al. Rivers and Lakes of Xizang [M]. The Series of the Scientific Expedition to the Qinghai-xizang Plateau. Beijing: Science Press, 1984 [关志华, 陈传友, 区裕雄等. 西藏河流与湖泊 [M]. 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 北京: 科学出版社, 1984]
- [34] Ye Q H, Kang S C, Chen F, et al. Glacier Variations on Mt. Geladandong, Central Tibetan Plateau, from 1969 to 2002 Using Remote Sensing and GIS Technologies [J]. *Journal of Glaciology* 2006 **52**(179): 537—545.
- [35] Zhang L, Liao M S. Contextual Fuzzy Clustering of Remote Sensing Images [J]. *Journal of Remote Sensing* 2006, **10**(1): 58—65. [张路, 廖明生. 一种顾及上下文的遥感影像模糊聚类 [J]. *遥感学报*, 2006 **10**(1): 58—65]
- [36] Gong P, Li X, Xu B. Interpretation Theory and Application Method Development for Information Extraction from High Resolution Remotely Sensed Data [J]. *Journal of Remote Sensing* 2006 **10**(1): 1—5. [宫鹏, 黎夏, 徐冰. 高分辨率影像解译理论与应用方法中的一些应用问题 [J]. *遥感学报*, 2006, **10**(1): 1—5.]