

文章编号: 1008 - 2786 - (2015) 2 - 148 - 09

DOI: 10. 16089/j. cnki. 1008 - 2786. 000020

基于遥感资料的中亚阿拉套地区冰川 变化及动因分析

何毅 杨太保 龔琴

(兰州大学资源环境学院, 冰川与生态地理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 以 1990 年、1999 年、2006 年和 2013 年的 Landsat TM/ETM+ 及 OLI/TIRS 遥感资料为数据源, 通过计算机半自动解译及人工目视解译方法得到中亚阿拉套地区 1990—2013 年 4 景冰川数据, 同时对研究区周边气温、降水进行趋势分析和周期性分析, 并应用 GIS 技术研究了过去近 24 年来冰川变化特征及其与气候变化的响应过程。结果表明: ①1990—2013 年, 中亚阿拉套地区冰川退缩明显, 冰川总面积从 680.73 km² 退缩到 539.28 km², 总面积减少了 141.45 km², 退缩率为 20.78%, 平均单条冰川面积减小 0.12 km²; ②1990—1999 年、1999—2006 年及 2006—2013 年 3 个时段年均退缩速率经历了“慢—快—慢”的过程, 但后两个时段都较前一时段退缩快, 表明自 1999 年以来阿拉套地区的冰川进入加速退缩的新阶段; ③大规模冰川分解使得小规模冰川的总面积和条数均有所增加; ④研究区处于气温偏高期, 降水偏少期, 区域变暖是该区冰川退缩的主要因素; ⑤通过分形理论对研究区冰川空间结构特征分析表明, 预计未来该区冰川消融率将趋于稳定但仍处于较高状态; ⑥与中国天山各地区冰川变化进行对比, 发现该地区冰川退缩速率较天山其他区域快。

关键词: 冰川变化; 退缩; GIS 和 RS 技术; 周期性分析; 阿拉套

中图分类号: P343.6

文献标志码: A

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change, 政府间气候变化委员会)第五次(AR5)报告指出, 气候变暖是非常明确的, 且从 1950 年以来的气候变化是千年以来所未见的。从 1983—2012 年这 30 a 可能是北半球自 1400 年以来最热的 30 a。1880—2012 年, 全球海陆表面平均温度呈线性上升趋势, 升高了 0.85℃; 2003—2012 年平均温度比 1850—1900 年平均温度上升了 0.78℃。冰川是气候的产物, 又是全球气候变化灵敏的指示器, 对气候变暖高度敏感; 冰川融化和海水温度升高引发的热膨胀导致了海平面的上升。从 1901—2010 年, 全球平均海

平面上升了 0.19 m, 平均每年 1.7 mm; 1971—2010 年间平均速度达每年 2.0 mm; 1993—2010 年间平均速度则达到每年 3.2 mm, 海平面上升的速度在加快^[1]。冰川又是中国西北干旱区重要的淡水资源, 也是山地环境的组成要素, 因此研究近年来西北地区冰川变化显得非常重要。

根据最新研究表明^[2], 近几十年来青藏高原地区大多数冰川均处于退缩状态, 但由于受制于区域气候变化, 冰川退缩区域差异明显, 青藏高原中部和北部地区冰川变化幅度较小, 向东和向南冰川变化幅度显著增大。李宗省等^[3]研究青藏高原东南部

收稿日期(Received date): 2014 - 04 - 28; 改回日期(Accepted): 2014 - 11 - 02。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(41271024); 黄河上游晚更新世河流阶地和冰川演化对千年尺度气候变化的响应, 国家自然科学基金项目“兰州大学地理基地科研训练及科研能力提高项目”(J1210065)。[Yellow River Late Pleistocene river terraces and glacial evolution on millennial-scale climate change and National Natural Science Foundation of China] Research training and scientific research ability of the geography base Project in Lanzhou university(J1210065)。

作者简介(Biography): 何毅(1987 -), 男, 甘肃会宁人, 博士研究生, 主要研究基于环境演变与全球变化。[He Yi(1987 -), male, gansu, huining, Doctor, the main research based on GIS and RS glacier changes.] E-mail: heyi11@lzu.edu.cn

* 通信作者(Corresponding author): 杨太保(1962 -), 男, 山西人, 博士, 教授/博导, 主要从事自然地理环境变化研究。[Yang Taibao(1962 -), male, shanxi, PhD, Mainly engaged in natural and geographical environment change research.]

玉龙雪山 1957—1999 年冰川面积退缩 26.78% ,姜珊瑚等^[4] 研究位于青藏高原中部马兰冰帽 1973—2010 年间冰川面积退缩 6.04% ,何毅等^[5] 研究位于青藏高原北部的北天山 1989—2011 年间冰川面积退缩 14.93% 。李开明等^[6] 研究位于天山东部的博格达峰地区 1962—2006 年间冰川面积退缩 21.6% 。阿拉套地区属于天山山系 ,位于天山西部 ,由于处于高海拔山区 ,自然条件恶劣 ,受自然和物质因素的限制 ,研究冰川变化的信息很少。因此本文利用 Landsat TM/ETM + 和 OLI/TIRS 遥感影像 ,分析了该地区最近 24 a 的冰川变化情况 ,并结合周边气象观测数据探讨其对气候变化的关系。

1 研究区概况

中亚阿拉套地区位于中国新疆博尔塔拉蒙古自治州的北部 ,在 79°30′~81°45′E 和 44°40′~45°20′N 之间 ,属于天山山系 ,处于天山西段。山脉近东西走向 ,其北坡为哈萨克斯坦共和国。该地区冰川主要以悬冰川和冰斗冰川为主 ,其中大部分冰川分布在北坡 ;同时雪线较低 ,其高度已降至 3 500~3 800 m ,末端降至海拔 3 300 m ,山脊海拔 4 000 m ,最高峰达 4 570 m。北侧哈萨克斯坦境内湿润 ,雪线低于 3 600 m ,南侧中国境内干燥 ,雪线可上升到 3 900 m ,大约 2/3 的冰川分布在北侧哈萨克斯坦境内。中国境内的冰川不到 100 条 ,最大的冰川位于 4 221 m 的萨尔坎峰下 ,长 6 km ,面积 10 km² 左右 ,末端降至 3 213 m ,冰面洁净 ,高山带年降水量可达 900~

1 000 mm。研究区示意图如图 1 所示。

2 材料来源及处理方法

2.1 数据来源

本研究使用的 TM/ETM + 及 OLI/TIRS 遥感影像数据均来自美国地质调查局 USGS(glovis.usgs.gov) 的陆地卫星。下载数据为 NASA 和 USGS 发布的 Level 1T 级数据产品。该产品经过了系统辐射校正和地面控制点几何校正 ,并且利用 DEM 数据进行了地形校正。已有研究验证 USGS 所提供的 Landsat 遥感影像具有相当高的校正精度^[7] ,因此 ,本文未做进一步的校正。为了减少不同时期冰川变化所造成的误差以及积雪对提取冰川边界的影响 ,我们选取影像时间间隔为 7 a 左右的数据 ,并尽可能选取夏季获取的少云或者无云的影像。在选取影像的过程中 ,2013 年采用 Landsat8 卫星传感器为 OLI/TIRS 的数据 ,在 1990 年没有找到行列号 148/29 对应的影像 ,用 1989 年的影像代替。所利用的 DEM 数据来源于国际科学数据服务平台(<http://datamirror.csdb.cn/>) ,分辨率为 90 m 的 SRTM 数据。气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>) 的中国地面气候资料数据集 ,选用研究区周边阿拉山和温泉 2 个气象站近 30 a 的月均气温、月均降水量数据 ,具体信息见表 2。

2.2 冰川边界处理方法

Landsat TM/ETM + 影像包含 7 个波段 ,OLI/TIRS 包含 11 个波段 ,可以利用比值阈值法 ,比值阈

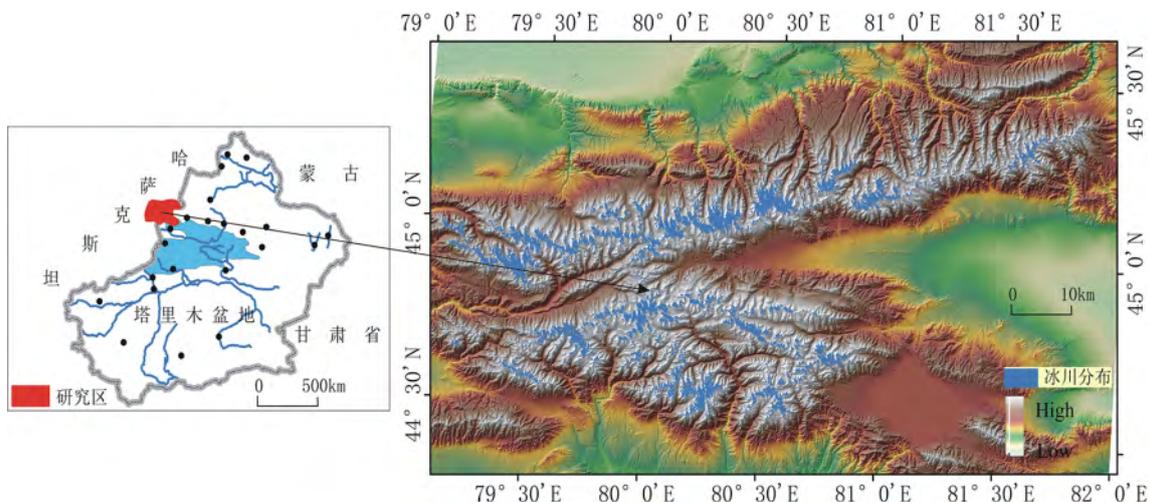


图 1 研究区示意图及冰川分布

Fig. 1 Schematic of the study area and glacier distribution

表 1 遥感影像数据信息

Table 1 Remote sensing image datum used in this study

轨道号		成像日期	卫星	传感器	平均云量/%	分辨率/m
Path	Row					
147	28	2013-09-09	Landsat8	OLI/TIRS	0	30
147	29	2013-09-09	Landsat8	OLI/TIRS	1	30
148	29	2013-07-30	Landsat8	OLI/TIRS	0	30
147	28	2006-08-12	Landsat7	TM/ETM+	0	30
147	29	2006-08-21	Landsat7	TM/ETM+	0	30
148	29	2006-08-12	Landsat7	TM/ETM+	0	30
147	28	1999-08-26	Landsat7	TM	0	30
147	29	1999-08-26	Landsat7	TM	0	30
148	29	1999-09-18	Landsat7	TM	0	30
147	28	1990-09-10	Landsat7	TM	0	30
147	29	1990-09-10	Landsat7	TM	0	30
148	29	1989-09-14	Landsat7	TM	0	30

表 2 气象站说明

Table 2 Introduction of the weather stations

站点编号	名称	经度/°E	纬度/°N	海拔/m
51330	温泉	82.57	45.18	1357.8
51463	阿拉山	88.01	44.96	336.1

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^[8]。本文运用比值阈值法结合目视解译的方法提取冰川边界。具体流程:对于 TM/ETM+ 影像,采用 TM3/TM5 进行提取冰川边界,对于 OLI/TIRS 影像,采用 TM4/TM6 进行提取冰川边界,经过多次试验后最后确定最有效的阈值为 2.3。刘宇硕^[9]等人研究了 Landsat 影像在冰川面积信息提取中的精度评价,得出的结论是目视解译最为精确。因此我们采用人工目视解译进行冰川边界修正,结合冰川编目数据和 Google Earth 三维图像作为目视解译的参考。对 TM/ETM+ 影像采用 5、4、3 波段合成假彩色,对于 OLI/TIRS 影像采用 6、5、4 波段合成假彩色,然后在 ArcGIS 软件中进行人工目视解译修正边界。对提取的冰川边界转换成 Albers 等积投影,最后统计冰川面积及其变化。运用更高分辨率影像人工提取冰川面积验证 Landsat 影像的精度是应用较广泛的方法^[10-11]。Paul^[11]通过对 Spot 影像人工提取的冰川面积和 TM 影像得到的面积对比,误差 < 1%。本文中运用此种方法,下载 2011 年 8 月 Google Earth 影像(分辨率为 9.5

m) 进行验证,发现误差为 ±1.8%。冰川提取边界分布图如图 2 所示。

2.3 冰川面积变化率

冰川面积平均变化率(annual percentages of area changes,简称 APAC)是一种评价冰川面积变化程度的常见指标,可以较好地将不同时间尺度的冰川变化研究结果进行统一比较,其计算公式如下

$$APAC = \frac{\Delta S}{\Delta t S_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中 ΔS 为冰川变化面积(km^2); S_0 代表初始状态下冰川面积(km^2); Δt 代表研究时段的年限(a)。

2.4 小波分析

小波分析是一种时、频多分辨率分析方法,是时间和频率的区域变换,能有效的从信号中提取信息,这里简单采用 Morlet 能谱小波函数,具体方法如下

$$\Psi(t) = e^{-2\pi i t} \exp[-(2\pi/k\Phi)^2 |t|^2] \quad (2)$$

小波变换系数为

$$\xi(t', a) = a^{-1/2} \int f(t) \Psi^*(t/a - t'/a) dt \quad (3)$$

式中 $\xi(t', a)$ 是小波系数, $f(t)$ 是时间序列, Ψ^* 是 Ψ 的共轭函数^[12]。

3 结果与分析

3.1 冰川面积的变化

3.1.1 冰川整体面积变化

总体上,中亚阿拉套地区冰川面积退缩明显,

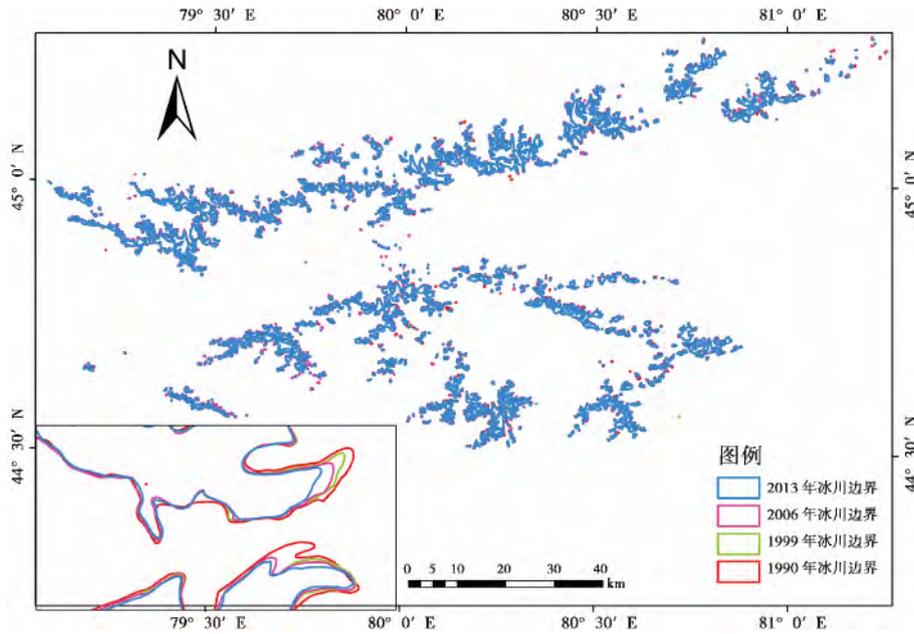


图2 不同时期冰川边界示意图

Fig.2 Example for a comparison of glacier outlines of different periods

1990—2013年间,冰川面积从680.73 km²减少到539.28 km²,冰川总面积减少了141.45 km²,占1990年冰川面积的20.78%,年均退缩率达到0.87%,年均减少约5.89 km²,平均单条冰川面积减少0.12 km²。在此过程中,冰川条数在不断的增加(表3),可能是由于在退缩的过程中大规模冰川分解成小规模冰川,使得小规模冰川的面积和条数增加。四期数据的解译结果表明在不同时段内冰川退缩程度有所不同,体现了时段上的差异。1990—1999年、1999—2006年及2006—2013年的年均退缩速率经历了“慢—快—慢”的过程。总体来看,后两个时段均较前一时段退缩快,表明自1999年来阿拉套地区的冰川进入加速退缩的新阶段。

3.1.2 不同规模冰川面积的变化

根据阿拉套地区冰川规模的分布情况,将该区

冰川按照面积大小分为 ≤ 0.02 km²、0.02~0.05 km²、0.05~0.1 km²、0.1~0.5 km²、0.5~1 km²、1~5 km²、5~10 km²及 ≥ 10 km² 8个等级。统计各等级的冰川面积以及冰川数量(表4),可以看出小冰川数量众多。按1990年计算,面积 ≤ 1 km²的冰川多达1042条,占总数的87.78%,占冰川面积的32.66%。面积 > 1 km²的冰川有145条,占总数的12.22%,占冰川面积的67.34%。其中面积 > 10 km²的冰川仅有6条,占总条数的0.5%;占总面积的18.6%。从表4可以看出,1990—1999年、1999—2006年、2006—2013年各时段内,大规模的冰川面积和条数都在不断地减少,其中 < 0.1 km²的冰川面积和条数均在增加,这可能是大规模的冰川在退缩的过程中不断分解成小规模冰川,使得小规模冰川条数和面积均有所增加。

表3 1990—2013年阿拉套地区冰川面积变化

Table 3 Glacier area variation of Alatau regions from 1990 to 2013

时间	冰川面积/km ²	条数/条	时间/a	面积减少量/km ²	面积退缩率/%	年均退缩率/%
1990	680.73	1187	—	—	—	—
1999	628.21	1216	1990—1999	52.52	7.72	0.77
2006	575.59	1226	1999—2006	52.62	8.38	1.05
2013	539.28	1234	2006—2013	36.31	6.31	0.79
总计	—	—	1990—2013	141.45	20.78	0.87

表 4 不同规模冰川的变化

Table 4 Glacier changes in different sizes

规模 /km ²	1990 年		1999 年		2006 年		2013 年	
	面积/km ²	条数/条						
<0.02	1.70	115	2.35	183	2.65	224	3.15	248
0.02~0.05	6.46	197	7.04	212	6.59	217	7.14	220
0.05~0.1	11.64	158	10.99	150	11.03	148	11.12	158
0.1~0.5	109.78	442	100.38	415	95.76	389	91.16	378
0.5~1	92.73	130	84.14	119	78.67	113	73.07	108
1~5	233.05	124	214.33	118	199.62	116	190.25	107
5~10	98.65	15	84.12	13	77.83	12	72.18	11
>10	126.73	6	124.86	6	103.44	6	91.21	4

3.2 气温和降水变化

3.2.1 气温降水整体变化趋势

如图 3 所示,1980—2013 年阿拉山和温泉年均气温均值分别为 9.14℃ 和 4.08℃,最低值均出现在 1984 年。增温倾向率分别为 0.14℃/(10 a) 和 0.28℃/(10 a),从倾向率看出,温泉海拔高,升温幅度大,阿拉山海拔低,升温幅度小,表明可能海拔越高升温越明显,这与前人^[13]对新疆近 50 a 的气温变化研究的结果相一致;从图 3 中可以看出 2000 年之后温度都较前段时间高,显示出 21 世纪以来研究区升温较显著。1980—2013 年阿拉山和温泉年均降水量的倾向率分别为 6.32 mm/(10 a) 和 6.38

mm/(10 a)。可见,研究区降水量微弱增加,变化幅度不大。

3.2.2 周期性分析

1980—2013 年阿拉山和温泉的年均气温和降水量的小波分析图谱如图 4。2 个站点年均气温全时域均表现出明显的 8 a 周期,阿拉山站点周期性较强。1980—1990 年代中期,有 4 a 周期变化的主要成分,1990 年代中期开始至 21 世纪准 2~3 a 振荡又成为周期变化的主要成分。1990 年、2000 年及 2008 年左右均处于气温偏高期。降水量 2 个站点周期性不明显,1980—1990 年代中期出现 8 a 左右周期振荡。1990 年代后期到 21 世纪存在 2~3 a 的

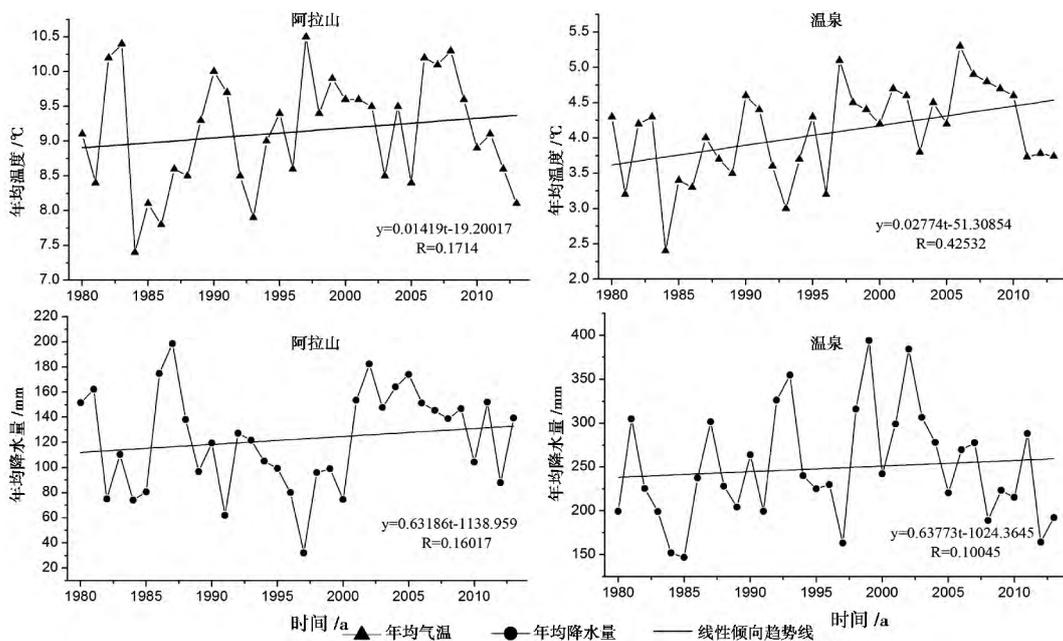


图 3 1980—2013 年年均温、年降水量变化

Fig. 3 Average annual precipitation and annual temperature from 1980 to 2013

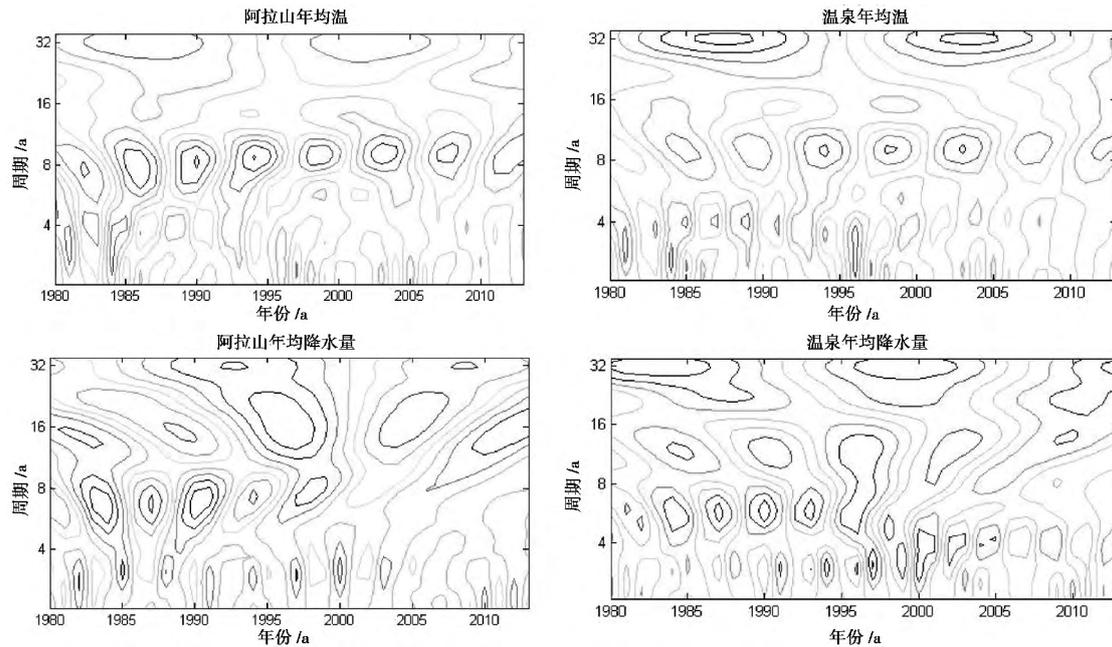


图4 1980—2013年年均温、降水量周期变化

Fig. 4 Period changes of annual precipitation and annual temperature during 1980 to 2013

振荡信号,1990年、2000年及2010年左右降水处于偏少期。

3.3 气候变化与冰川变化的关系

冰川受许多因素的影响,其中气温和降水量是冰川变化的重要因素,降水量变化决定冰川的积累,气温变化决定消融。因此,降水量的多少影响冰川的补给,而气温变化的高低影响冰川融水^[14-15]。在中国西部高山区,由于气象站点较少,而且记录的时间也较短。本文根据研究区的位置,选用该区附近能代表其区域的阿拉山和温泉2个气象站点的气温和降水资料用于近似分析,以此作为探讨研究区冰川变化的依据。分析了研究区周边站点的年均气温、年均降水量(图3)的变化情况和周期性特征(图4)。通过站点对比分析表明海拔越高升温越明显。由于冰川处于高海拔地区,可以认为冰川区升温幅度很可能比研究区周边区域更高。据研究表明^[16-17],升温会使冰川加速退缩,降水增加能弥补冰川的消融,在气温每升高1℃需要降水量增加25%或35%才能弥补由升温引起的冰川消融;2个站点的升温率分别为0.14℃/(10a)和0.28℃/(10a),而降水的增加幅度仅分别为6.32mm/(10a)和6.38mm/(10a),降水量的增加远远不足以弥补升温引起的消融。Morlet小波分析显示研究区1990年、2000年及2008年左右均处于气温偏后期和降水偏少期,而对应的1990年、1999年、2006年和

2013年冰川面积不断退缩,因此推断气温升高可能是研究区近24年以来冰川不断萎缩且近20年来退缩速率加快的重要因素。

3.4 冰川空间形态对冰川变化的影响

随着气候的变化,冰川空间结构的不同将会对冰川的消融产生影响。分形理论是建立在周长-面积基础上关于地物空间结构的理论^[18]。冰川是一个具有复杂空间结构的集合体,因此,应用分形理论研究冰川的空间结构将是定量化的一种方法。用1990年和2013年冰川数据,利用分形理论建立周长-面积关系,通过线性回归分析求得冰川分形指数,及空间结构稳定指数(表5)。并根据稳定性指数分析1990—2013年阿拉套地区冰川变化的基本特征,同时对该区未来冰川变化的趋势做出初步预测。

结果显示,近24a来稳定指数有一定上升,表明该区域今后冰川退缩仍然较高但趋于稳定状态。面积0.1~0.5km²的冰川稳定指数最低,说明空间形态最为复杂,衰减幅度最大,最易发生退缩,对气候变化敏感程度最明显;面积≥10km²冰川稳定指数变化最大,表明其空间结构最大,对气候敏感程度会增强,随着气候变化,不稳定性也加强,导致未来冰川消融幅度将会有所加强,全部冰川稳定指数上升幅度最大,表明该区域未来冰川退缩将仍然保持较高状态,但会趋于稳定状态。

表 5 冰川形态指数

Table 5 Shape index of glaciers

面积 /km ²	影像(1990)		影像(2013)		稳定指 数变化
	分形指数	稳定指数	分形指数	稳定指数	
0.1~0.5 km ²	2.922	1.422	2.997	1.469	0.047
0.5~1 km ²	2.788	1.288	2.867	1.342	0.054
1~5 km ²	2.547	1.047	2.578	1.104	0.057
5~10 km ²	2.557	1.057	2.618	1.129	0.072
>10 km ²	2.489	0.989	2.573	1.073	0.084
全部	2.517	1.017	2.584	1.136	0.119

表 6 中国天山冰川变化比较

Table 6 Statistics of glaciers of Tien Shan in china

位置	时间段	面积退缩/%	年均退缩率/%	数据源	资料来源
中天山	1990—2010 年	6.4	0.64	TM/ETM +	Osmonov ^[21]
艾比湖流域	1964—2004 年	14.7	0.40	SPOT、ASTER	Wang 等 ^[22]
北天山	1989—2011 年	14.93	0.64	TM/ETM +	何毅等 ^[5]
北天山东段	1989—2011 年	17.13	0.74	TM/ETM +	何毅等 ^[23]
北天山西段	1989—2011 年	12.76	0.56	TM/ETM +	何毅等 ^[23]
博格达峰	1962—2006 年	21.6	0.49	地形图、SPOT、ASTER	李开明等 ^[6]
阿拉套地区	1990—2013 年	20.78	0.87	TM/ETM +、OLI/TIRS	本研究

3.5 与中国天山其他地区冰川变化的对比

为了更细致的了解阿拉套地区冰川变化特征,选取最新研究的中国天山典型山区及流域的冰川变化情况与本研究结果进行对比(表 6)。表明:阿拉套地区冰川变化趋势与其他区域冰川所表现的趋势相吻合,但该区冰川变化相对于中国天山其他区域较快,并在近 10 a 冰川呈加速退缩状态,一方面是该地区的冰川总体规模较小,对气候响应较敏感;另一方面可能是由于冰舌末端存在表碛物、冰川内部岩石出露以及季节性积雪引起。本研究得到 1990—2013 年阿拉套地区冰川退缩速率为 0.87% / a,2000 年后该区冰川退缩速率显著增加,这与 Oerlemans^[19]、施雅风^[20] 预测 21 世纪冰川在全球变暖大环境下,加速退缩趋势是吻合的。

4 结论与讨论

1. 中亚阿拉套地区冰川整体呈退缩状态。1990—2013 年冰川面积从 680.73 km² 减少到 539.28 km²,退缩率为 20.78%,年均退缩率达到 0.87%,平均单条冰川面积减小 0.12 km²,大规模

冰川分解使得小规模冰川的总面积和条数均有所增加。

2. 研究区处于气温偏高期,降水偏少期,海拔越高升温越快,区域变暖可能是该区冰川退缩的主要因素;

3. 分析了研究区冰川空间结构特征,依据分形理论对未来冰川变化进行初步预测,表明该区冰川消融率仍保持比较高的状态,但趋于稳定退缩。与天山其他区域对比发现,该区冰川退缩较中国天山其他区域快。

4. 由于遥感数据和资料的局限性,研究较长时间序列冰川的变化比较困难,并且在数据处理和冰川提取过程中存在误差,从而影响了冰川变化监测的精度。

5. 在冰川影像提取过程中缺乏完全统一的标准,或者在执行过程中存在某些操作上的差异,从而导致对同一资料可能解读出的信息不一致,这在一定程度上影响了结论的交流和参考,因此,技术手段的更完善是对冰川变化信息更准确的重要因素。

6. 随着近年来气候变暖,冰川呈现加速退缩趋势,直接导致经验公式计算和实测数据之间的差异

扩大,因此,加强对不同类型不同规模冰川的定位观测,构建合理现状的冰储量的计算公式,为未来径流量模型预测体系提供基础。

7. 定期开展大范围的调查是相当必要的,全国跟踪监测的冰川条数有限,有些恶劣气候条件下的冰川难以监测,没有更准确的对比信息。

致谢:感谢审稿专家对文章提出的宝贵意见,同时对中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)所提供的气象数据和USGS(U. S. Geological Survey, <http://www.usgs.gov>)数据共享平台提供的Landsat TM/ETM+及OLI/TIRS影像一并表示感谢。

参考文献(References)

- [1] Shen Yongping, Wang Guoya. Key findings and assessment results of IPCC WGI Fifth Assessment Report [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(5): 1068 - 1076 [沈永平, 王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(5): 1068 - 1076]
- [2] The IPCC fifth assessment report (AR5) [R]. 2014. http://www.ipcc.ch/pdf/press/ipcc_leaflets_2010/ipcc-ar5-leaflet.pdf
- [3] Pu Jiancheng, Yao Tandong, Wang Ninglian, et al. Fluctuations of the glaciers on the Qinghai - Tibetan Plateau during the past century [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(5): 517 - 522 [蒲健辰, 姚檀栋, 王宁练, 等. 近百年青藏高原冰川的进退变化[J]. *冰川冻土*, 2004, 26(5): 517 - 522]
- [4] Li Zongsheng, He Yuanqing, Wang Shijin, et al. Changes of some monsoonal temperate glaciers in Hengduan mountains region during 1900—2007 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(11): 1319 - 1329. [李宗省, 何元庆, 王世金, 等. 1900—2007年横断山区部分海洋型冰川变化[J]. *地理学报*, 2009, 64(11): 1319 - 1329]
- [5] Jiang Shan, Yang Taibao, Tian Hongzhen. Glacier shrinkage and its dependence on climate in the Malan Mountain in past 40 years based on RS and GIS [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(3): 522 - 528 [姜珊, 杨太保, 田洪阵. 1973—2010年基于RS和GIS的马兰冰川退缩与气候变化关系研究[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(3): 522 - 528]
- [6] He Yi, Yang Taibao, Tian Hongzhen, et al. Response of glacier area variation to climate change in Northern Tianshan Mountains in the Past 23 Years [J]. *Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(3): 53 - 60 [何毅, 杨太保, 田洪阵, 等. 近23年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]
- [7] Li Kaiming, Li Zhongqin, Gao Wenyu, et al. Glacier retreat and its impact on water resources in recent east Tianshan Mountain [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(32): 2708 - 2716 [李开明, 李忠勤, 高闻宇, 等. 近期新疆东天山冰川退缩及其对水资源影响[J]. *科学通报*, 2011, 56(32): 2708 - 2716]
- [8] Guo Wanqin, Liu Shiyin, Xu Junli, et al. River glacier enlivened scale remote monitoring in Wood Zitage Northwest Slope [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(4): 765 - 774 [郭万钦, 刘时银, 徐君利, 等. 木孜塔格西北坡鱼鳞川冰川跃动遥感监测[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(4): 765 - 774]
- [9] Li Zhen, Sun Wenxin, Zeng Qunzhu. Integrated RS and GIS methods to extract information glacier variations—for example in Buta Gepeak [J]. *Geographical Science*, 1999, 54(3): 73 - 78 [李震, 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]
- [10] Liu Yushuo, Qin Xiang, Gao Siru, et al. Accuracy evaluation of glacier area information extracted from Landsat5 TM remote sensing image [J]. *Journal of Northwest A & F University*, 2013, 41(12): 209 - 216 [刘宇硕, 秦翔, 高思如, 等. Landsat5 TM影像在冰川面积信息提取中的精度评价[J]. *西北农林科技大学学报*, 2013, 41(12): 209 - 216]
- [11] Bolch T, Kulkarni A, Kaab A, et al. The state and fate of Himalayan glacier [J]. *Science*, 2012, 336: 310 - 314
- [12] Paul F. Evaluation of different methods for glacier mapping using Landsat TM [G] // Proceedings of EARSeL - SIG - Workshop Land Ice and Snow. Dresden, Germany: 2000, June 16 - 17
- [13] Wei Fengying. Statistics diagnosis and prediction of modern climate [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 175 - 181 [魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 2007: 175 - 181]
- [14] Su Hongchao, Wei Wentao, Han Ping. Changes in air temperature and evaporation in Xinjiang during recent 50 years [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(2): 174 - 178 [苏宏超, 魏文涛, 韩萍. 新疆近50年来气温的蒸发变化[J]. *冰川冻土*, 2003, 25(2): 174 - 178]
- [15] Liu Yan, Li Xiaolong. Runoff response to precipitation changes - Taking a case of Weihe [J]. *Arid Land Geography*, 2007, 30(1): 49 - 52 [刘燕, 李小龙. 河川径流对降水变化的响应研究—以渭河为例[J]. *干旱区地理*, 2007, 30(1): 49 - 52]
- [16] Yang Jinhu, Jiang Zhihong. Extreme high and low temperatures change in the northwest china in recent 45a and its response to regional warming [J]. *Arid Land Geography*, 2006, 29(5): 625 - 631 [杨金虎, 江志红. 中国西北近45年来年极端高、低温的变化及其对区域性增暖的响应[J]. *干旱区地理*, 2006, 29(5): 625 - 631]
- [17] Oerlemans J. Extracting a climate signal from 169 glacier records [J]. *Science*, 2005, 308(5722): 675 - 677
- [18] Raper S C B, Brown O, Braithwaite R J A geometric glacier model for sea level change calculations [J]. *Journal of Glaciology*, 2000, 46(154): 357 - 368
- [19] Zhu Xiaohua, Cai Yunlong. Fractal analysis of land use in China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, 25(6): 671 - 677 [朱晓华, 蔡云龙. 中国土地利用空间分形结构及其机制[J]. *地理科学*, 2005, 25(6): 671 - 677]
- [20] Oerlemans J. Quantifying global warming from the retreat of glaciers [J]. *Science*, 1994, 264: 243 - 245
- [21] Shi Yafeng, Liu Shiyin. Chinese glacier response to global warming estimate in the 21st century [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000,

- 45(4):434-438 [施雅风,刘时银. 中国冰川对 21 世纪全球变暖响应的预估[J]. 科学通报 2000 45(4):434-438]
- [21] Osmonov A, Bolch T, Chen X, et al. Glacier characteristics and changes in the Sary-Jaz River Basin (Central Tien Shan, Kyrgyzstan) - 1990-2010 [J]. Remote Sensing Letters, 2013, 4(8): 725-734
- [22] Wang L, Li Z Q, Wang F T, et al. Glacier shrinkage in the Ebinur lake basin, Tien Shan, China, during the past 40 years [J]. Journal of Glaciology, 2014, 60(220): 245-254
- [23] He Yi, Yang Taibao, Ji Qin, et al. Comparative analysis of Glacier changes between eastern and western part of Northern Tianshan [J]. Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(6): 105-110 [何毅, 杨太保, 冀琴, 等. 1989-2011 年北天山东西段冰川变化对比分析研究[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(6): 105-110]

Glacier Variation and Motivation Based on Remote Sensing Data in the Central Asia Alatau Regions

HE Yi, YANG Taibao, JI Qin

(College of Earth and Environmental Sciences, Institution of Glaciology and Ecogeography, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In this paper, TM/ETM+ and OLI/TIRS remote sensing datum from 1990, 1999, 2006 and 2011 were used as the data source. Through integrated computer semi-automatic interpretation and visual interpretation methods, glacier outlines were obtained in the Central Asia Alatau regions from 1990 to 2013. Meanwhile, we analyzed the surrounding study area temperature and precipitation trends and period, and we used GIS technology to analyze glacier variation characteristics and its response to climate change process in the past nearly 24a. The results showed that: ① Between 1990 and 2013, the Alatau region glaciers experienced an evident retreat trend, the total area of glaciers was from 680.73 km² to 539.28 km², the total area reduced 141.45 km², shrinking at a rate of 20.78%, with the average single glacier area decrease was 0.12 km². ② The average annual retreat rate experienced a "slow-fast-slow" process in 1990-1999, 1999-2006 and 2006-2013 three times. However, after two periods were faster than the previous period, the glacier showed had entered a new phase of accelerated retreat since 1999 in Alatau region; ③ Massive glacier decomposition made that a total area and the number of small-scale glaciers had increased; ④ At the high temperatures and rainfall period of the study area, regional warming was a major factor glacial retreat; ⑤ At the same time, the distribution characteristics of spatial structure for the glaciers were analyzed in Finally, based on the fractal theory, it showed that the melting rate of glaciers in the study area will remain high, but they will remain stable. ⑥ Compared with China Tien Shan region glaciers, the Alatau region glaciers retreat exhibit rapid trend.

Key words: glacier changes; Shrinkage; GIS and RS; cycle analysis; Alatau Region