

doi: 10.13866/j.azr.2016.03.24

1972—2013年新疆玛纳斯河流域冰川变化^①

徐春海^{1,2}, 王飞腾¹, 李忠勤^{1,3}, 王林¹, 王璞玉¹

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈科学国家重点实验室/天山冰川站, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 利用多期遥感资料, 分析了新疆玛纳斯河流域 1972—2013 年的冰川变化, 并对其原因进行了分析。结果表明: 1972—2013 年冰川共退缩了 159.02 km² (变化率为 -24.61%), 海拔 3 800 ~ 4 200 m 之间退缩最为强烈, 冰川末端海拔升高明显 (41 a 间海拔 3 200 ~ 3 300 m 之间的冰川消失)。冰川变化存在一定的区域差异性, 玛纳斯河主源冰川退缩速度最快, 左岸次之, 右岸退缩速度最慢。从朝向上看, 各个朝向的冰川均处于退缩状态, 偏东向的冰川退缩面积明显大于其他方向。近 40 a 流域冰川总储量减少了 59.09 ~ 85.94 km³。与中国天山其他地区冰川相比, 该流域的冰川退速率较高, 气温升高是该区域冰川退缩的主要原因。

关键词: 冰川变化; 遥感监测; 气候背景; 玛纳斯河流域; 新疆

在全球气候变暖背景下, 山地冰川呈现不同程度的退缩, 最近几十年尤为明显⁽¹⁻²⁾。据研究, 近 50 a 我国西部 82.2% 的冰川处于退缩状态, 面积减少了 4.5%⁽³⁾。冰川在我国西北干旱区具有极其重要的作用, 其融水径流是水资源的一个重要补给, 是维系绿洲经济发展和确保寒区生态系统稳定的重要保障⁽⁴⁻⁵⁾。而冰川的这种变化趋势无疑会引发冰雪融水补给减少, 对河川径流的调节作用下降, 对干旱区水资源的开发利用、工程建设及工农业生产布局产生重要影响⁽⁶⁾。加强冰川变化监测力度, 获取冰川的变化信息, 对于阐明其对气候变化的响应机理和水资源的响应机制具有十分重要的意义。然而, 冰川大部分分布在气候条件恶劣的偏远地区, 常规人工观测方法难以广泛开展和实施, 遥感和 GIS 的快速发展, 使获取大范围的冰川变化信息成为可能⁽⁷⁾。

玛纳斯河是天山北麓最大的内陆河, 拥有我国最大的人工绿洲区和第四大农业灌溉区⁽⁸⁾。河流多年平均径流量为 12.8 × 10⁸ m³, 其中, 冰川平均融水量 4.42 × 10⁸ m³, 占总径流量的 34.6%⁽⁹⁾。目前, 对该区域的研究主要集中在气候、水文、积雪、景观、生态等方面, 很少涉及冰川。本文利用 1972—

2013 年陆地卫星影像, 分析了 41 a 间玛纳斯河流域冰川的变化过程, 以期对该地区水资源的合理开发利用、生态脆弱性评估等提供参考。

1 研究区概况

玛纳斯河位于新疆天山中段, 准噶尔盆地南缘, 南起依连哈比尔尕山乌代肯尼河的 43 号冰川, 与和布克赛尔县、福海县分界, 包括 6 个子流域, 从东到西依次为: 塔西河、玛纳斯河、宁家河、金沟河、大南沟河、巴音沟河。本文重点研究玛纳斯河子流域 (以下称玛纳斯河流域), 地理位置为 84°50′ ~ 86°35′E, 43°00′ ~ 44°00′N, 流域面积约为 5 200 km², 长度约为 400 km (流域集水口为肯斯瓦特水文站), 流域地势由东南向西北倾斜, 海拔最高 5 138 m, 最低 862 m (图 1)。3 000 m 以上常年被积雪和冰川覆盖, 据第一次冰川编目, 该流域被分为右岸、主源、左岸, 编号分别为 5Y734、5Y735、5Y736, 冰川总条数为 800 条, 面积为 671.38 km², 平均雪线高度约为 3 970 m⁽¹⁰⁾。玛纳斯河流域气候干燥, 属于典型的大陆性气候, 该区日平均气温 6.6 °C, 年平均风速 1.7 m · s⁻¹, 年降水量由山地的 ≥500 mm 减

① 收稿日期: 2015-01-26; 修订日期: 2015-05-29

基金项目: 中国科学院重点部署项目 (KJZD-EW-G03-01); 国家重大科学研究计划项目 (2013CBA01801); 国家自然科学基金 (41471058, 41171057, 41301069); 国家重点室自主课题 (SKLCS-22-2015-01-11); 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所青年人才基金项目 (Y551C41001) 资助

作者简介: 徐春海 (1989-) 男, 硕士研究生, 主要从事 GIS 与冰川测绘方面的研究。E-mail: xuchunhai716@163.com

通讯作者: 王飞腾。E-mail: wangfeiteng@lzb.ac.cn

小到河流末端的 100 mm⁽¹¹⁾。

2 数据与方法

2.1 数据源

本研究数据主要有: Landsat 影像、数字高程模型(digital elevation model, DEM)、气象数据。影像数据源于美国地质调查局(U. S. Geological Survey, <http://www.usgs.gov/>) 数据共享服务平台(表 1), 表中主影像用于冰川解译, 辅助影像用来识别季节性积雪。DEM 源于 SRTM (shuttle radar topography mission), 空间分辨率为 90 m, 由美国太空总署(NASA) 和国防部国家测绘局(NIMA) 联合测量, 该数据在地理空间数据云服务平台(<http://www.gscloud.cn/>) 上获取。流域周边气象数据源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov>。

cn/)。此外, 在解译冰川边界时参照了第一次冰川编目⁽¹⁰⁾。

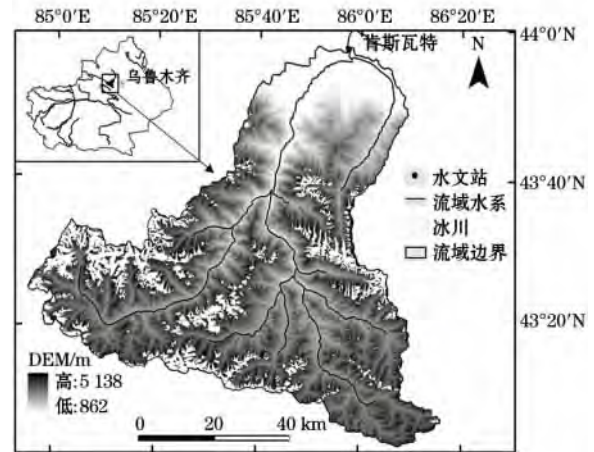


图 1 研究区及其地理位置

Fig. 1 Geographical location of the Manas River Basin

表 1 Landsat 系列遥感影像数据信息

Tab. 1 Remote sensing image data of Landsat series

年份	影像	获取日期	轨道号	传感器	分辨率/m	备注
1972	LM11550301972245AAA04	1972-09-01	155/30	MSS	60	主影像
	LM21550301976287TGS02	1976-10-13	155/30	MSS	60	辅助影像
2000	LE71440302000220SGS00	2000-08-07	144/30	ETM+	30/15	主影像
	LE71440302000188SGS01	2000-07-06	144/30	ETM+	30/15	辅助影像
	LT51440301998270BIK00	1998-09-27	144/30	TM	30	辅助影像
2013	LC81440302013231LGN00	2013-08-19	144/30	OLI_TIRS	30/15	主影像
	LE71440302013239SG100	2013-08-07	144/30	ETM+	30/15	辅助影像

2.2 研究方法

所用 Landsat 影像数据类型为 Level 1T, 数据经过了系统辐射校正和地面控制点几何校正, 并且通过 DEM 进行了地形校正。此产品的大地测量校正依赖于精确的地面控制点和高精度的 DEM 数据。对 Landsat 系列的影像数据和 DEM 统一采用 UTM 45°N 投影和 WGS84 坐标系统。

目前, 基于遥感影像获取冰川边界的自动解译方法有比值阈值法⁽¹²⁾、雪冰指数法⁽¹³⁾、监督非监督分类法⁽¹⁴⁾、最大似然法⁽¹⁵⁾、决策树法⁽¹⁶⁾、面向对象分类法⁽¹⁷⁾等。然而, 积雪、阴影、冰碛物及水体的存在, 使得这些方法在获取冰川边界的精度上难以得到保障。目视解译是根据现有的冰川学知识, 利用遥感影像获取冰川边界信息, 该方法是目前获取冰川边界精度最高的方式⁽¹⁸⁾。为提高解译精度, 本研究对 3 期遥感影像数据采用目视解译法, 对于 1972 年的 MSS 影像, 在 ArcGIS 10.1 中利用 4、2、1 波段

进行假彩色合成, 同时结合第一次冰川编目数据、1976 年的遥感影像, 人工勾画冰川边界; 2000 年的 ETM+ 影像首先进行多光谱波段和全色波段的融合, 使其空间分辨率提高到 15 m, 然后结合 Google Earth 历史影像数据、1998 年的 TM5 数据, 人工获取冰川边界; 对 2013 年 Landsat 8 影像, 在图像融合的基础上采用同样的方法获取冰川边界。

2.3 精度评价

对影像上获取冰川信息的精度评价是一个十分重要的问题, 本文从 3 个方面评价玛纳斯河流域冰川信息提取的精度: ① 云、积雪的影响。所选影像除 1972 年有少量云覆盖, 其他几期云量基本为零, 为消除积雪的影响, 选择消融期末的(8—9 月)影像, 同时结合冰川编目、临近年份的影像、Google Earth; ② 冰碛物的识别。主要借助流域 DEM、Google Earth 影像进行修正; ③ 传感器和影像分辨率的影响。据 Hall⁽¹⁹⁾、Silvreo⁽²⁰⁾、Ye⁽²¹⁾ 等的研究,

计算冰川长度和面积变化不确定性公式为:

$$U_T = \sqrt{\sum \lambda^2} + \sqrt{\sum \varepsilon^2} \quad (1)$$

$$U_A = 2U_T \sqrt{\sum \lambda^2} + \sqrt{\sum \varepsilon^2} \quad (2)$$

式中: U_T 为冰川终端长度的不确定性值; λ 为影像分辨率; ε 为各时期影像图与基准图像的配准误差; U_A 为面积不确定性。结果表明, 该研究区冰川长度不确定性为 ± 65.6 m, 面积不确定性为 ± 0.008 km²。

3 结果分析

3.1 冰川面积变化

根据影像解译结果, 过去 41 a 间(1972—2013 年) 玛纳斯河流域冰川面积共退缩 159.02 km², 退缩率为 24.61%, 退缩速率为 0.60% · a⁻¹ (表 2)。即 1972 年冰川面积为 646.18 km², 2000 年减少到

531.84 km² 到 2013 年冰川面积为 487.16 km²。

从区域上看, 主源、左岸、右岸的冰川均处于退缩状态(图 2), 1972—2013 年, 左岸、主源、右岸冰川分别退缩了 27.67%、29.79%、21.01%, 退缩速率为 0.67% · a⁻¹、0.73% · a⁻¹、0.51% · a⁻¹。由此可见, 主源冰川退缩速度最快, 左岸次之, 右岸最慢。就不同时段而言, 1972—2000 年和 2000—2013 年冰川分别退缩了 17.69%、8.4%, 退缩速率为 0.63% · a⁻¹、0.65% · a⁻¹, 表明流域冰川有加速退缩的趋势, 这可能与 20 世纪 90 年代新疆地区气温普遍升高有关⁽²²⁾。

为探讨不同规模冰川面积的退缩率, 将冰川面积分为 5 个等级(图 3)。可以看出, 除面积 < 0.1 km² 规模的冰川总面积增加外, 其余面积等级的冰川总面积均出现不同程度的减少, 41 a 间面积介于 1~5 km² 规模的冰川退缩最为严重, 共减少了 91.14 km² (退缩率为 39.30%), 其次是面积介于

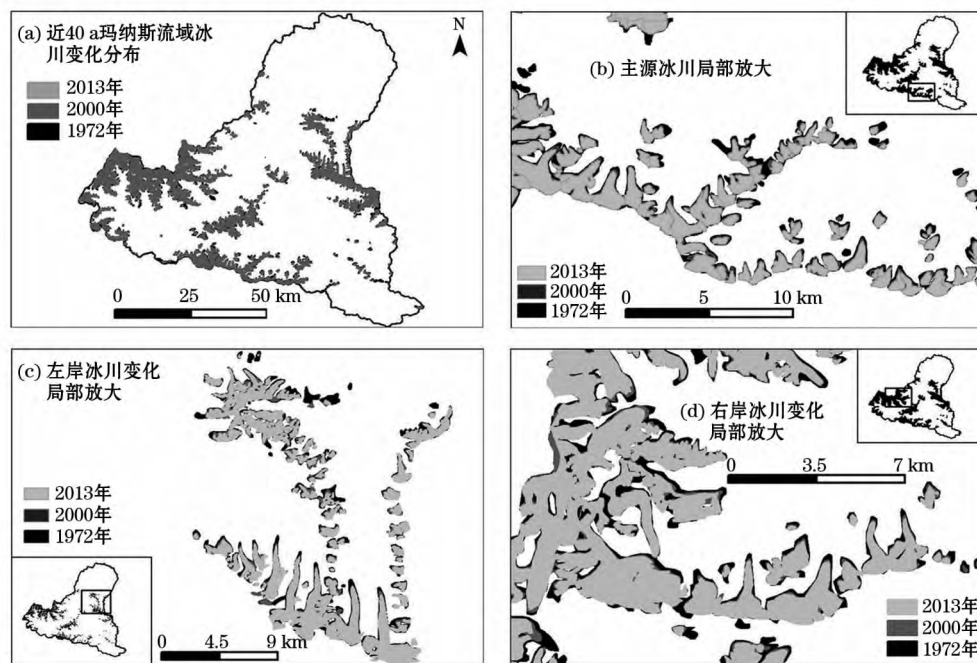


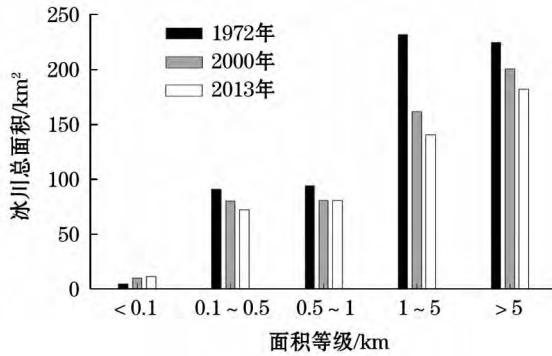
图 2 玛纳斯河流域冰川变化

Fig. 2 Glacier shrinkage in the Manas River Basin

表 2 玛纳斯流域冰川面积变化

Tab. 2 Glacier area variation in the Manas River Basin

年份	冰川面积/km ²				时段	冰川减少面积/km ²				冰川退缩率/%			
	左岸	主源	右岸	合计		左岸	主源	右岸	合计	左岸	主源	右岸	合计
1972	70.95	211.21	364.01	646.18	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2000	58.57	163.04	310.23	531.84	1972-2000	12.38	48.17	53.79	114.34	17.45	22.81	14.78	17.69
2013	51.32	148.29	287.54	487.16	2000-2013	7.25	14.75	22.68	44.68	12.38	9.05	7.31	8.40
-	-	-	-	-	1972-2013	19.63	62.92	76.47	159.02	27.67	29.79	21.01	24.61



冰川面积等级 S (单位: km^2) 为: $S < 0.1$;
 $0.1 \leq S \leq 0.5$; $0.5 < S \leq 1$; $1 < S \leq 5$; $S > 5$ 。

图 3 不同等级的冰川面积变化

Fig. 3 Area variation of glaciers with different sizes

0.1 ~ 0.5 km^2 和 $> 5 \text{ km}^2$ 规模的冰川, 退缩率分别为 20.71%、18.95%, 再次是面积介于 0.5 ~ 1 km^2 规模的冰川, 退缩率为 13.87%。该流域冰川规模以大、中型冰川为主(2013 年面积 $\geq 1 \text{ km}^2$ 的冰川占冰川总面积的 66.32%), 正是由于大、中型冰川在退缩中出现分离, 使面积 $< 0.1 \text{ km}^2$ 规模的冰川面积不断增加。

3.2 冰川朝向、海拔分布变化

基于研究区的 DEM 数据, 将冰川分布划分为 8 个方向(图 4), 分别为北(N)、东北(NE)、东(E)、东南(SE)、南(S)、西南(SW)、西(W)、西北(NW)。根据数据统计, 1972 年偏北向(N、NW 和 NE)、偏南向(S、SW 和 SE)冰川总面积分别为 345.65 km^2 、192.13 km^2 , 分别占冰川总面积的 53.49% 和 29.74%。南北向的冰川面积比值为 0.56, 到 2013 年这种趋势保持不变, 即偏北向的冰川面积明显大于偏南向。表明玛纳斯河流域冰川分布呈现明显的不对称性, 主要由于北坡接受太阳辐射少, 有利于冰川发育。从图 4 可以看出, 近 40 a 玛纳斯河流域各朝向的冰川均在退缩, 表明冰川普遍处于退缩状态, 北、东北、东、东南、南、西南、西、西北 8 个方向的冰川退缩率分别为 18.9%、29.57%、38.83%、34.88%、22.11%、20.49%、20.43%、17.43%, 可以看出偏东向(NE、E 和 SE)冰川退缩率明显高于其他方向, 这是由于偏西向冰川正迎西风带水汽输送, 冰川发育所需的降水条件较其他方向优越。

据第一次冰川编目^[10], 该地区的冰川主要分布于海拔 3 000 ~ 5 200 m, 依据流域 DEM 数据, 以 100 m 为高度带, 将流域冰川分为 20 个带(图 5)。统计

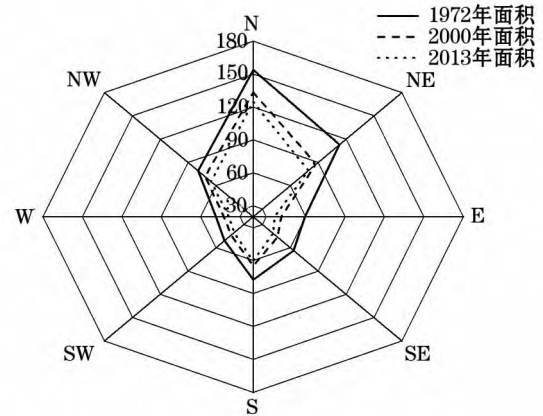


图 4 不同时期冰川朝向变化(单位 km^2)

Fig. 4 Change of the slope aspect of glaciers in the Manas River Basin during the period from 1972 to 2013

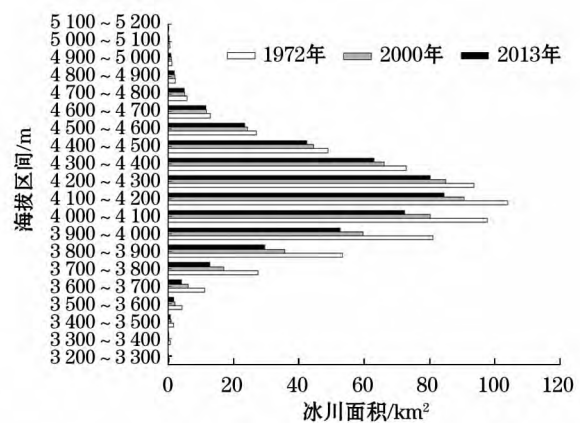


图 5 玛纳斯河流域不同海拔高度带冰川面积变化

Fig. 5 Area change of glaciers with different altitudes in the Manas River Basin

发现: 该流域冰川主要集中在海拔 3 800 ~ 4 500 m, 2013 年该海拔高度区间内的冰川面积占总面积的 81.20%。各个海拔区间冰川均处于退缩状态, 2013 年海拔 3 200 ~ 3 300 m 的冰川消失, 海拔 3 800 ~ 4 200 m 的冰川面积减少最多, 占整个冰川面积退缩量的 61.16%。表明气候变暖背景下, 冰川退缩加速, 冰川末端海拔高度上升明显。

3.3 冰川储量变化

为分析流域冰储量的变化情况, 根据已有研究, 选用以下几种方法计算冰川储量(表 3)。结果表明, 41 a 间研究区冰川储量减少了 59.09 ~ 85.94 km^3 , 折合水当量为 53.17 ~ 77.34 km^3 (冰的密度取 $0.9 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), 冰储量变化为 31.71% ~ 32.26%, 年速率为 0.75% ~ 0.78%。从变化比率上看, 冰川储量的变化大于冰川面积的变化, 符合冰川储量变化大于面积变化这一认识^[23]。

表3 基于不同经验公式计算的冰川体积

Tab.3 Glacier volumes estimated with different empirical formulas

公式	冰川体积/km ³			1972-2013年		文献来源
	1972年 (S=646.18 km ²)	2000年 (S=531.84 km ²)	2013年 (S=487.16 km ²)	体积变化	变化率/%	
$0.040 \cdot S^{1.35}$	248.91	191.37	169.99	78.92	31.71	(24-25)
$0.0285 \cdot S^{1.357}$	185.57	142.47	126.48	59.09	31.84	(26)
$0.0298 \cdot S^{1.379}$	223.72	171.03	151.54	72.18	32.26	(27)
$0.0365 \cdot S^{1.375}$	267.01	204.29	181.07	85.94	32.19	(28)
$0.037 \cdot S^{1.314}$	182.39	141.22	125.84	56.56	31.01	(29)

S为冰川面积,单位:km²。

表4 中国天山地区山地冰川退缩状况

Tab.4 Comparison of shrinkage of typical mountain glaciers in the Tianshan Mountains, China

研究区	面积变化 /km ²	冰川退缩 /%	退缩速率 /(%·a ⁻¹)	时段	数据源	方法	文献来源
乌鲁木齐河流域	-6.65	-13.8	-0.45	1962-1992	航片、地形图	摄影测量	(30)
开都河流域	-38.5	-11.6	-0.31	1963-2000	地形图、TM、ETM+	目视解译	(25)
天山	-	-11.5	-0.22	1960-2010	-	-	(31)
哈尔里克山区	-13.4	-11.4	-0.27	1959-2001	地形图、TM、ETM+	目视解译	(32)
盖孜河流域	-188.1	-10	-0.26	1960-1999	地形图、TM、ETM+	目视解译	(25)
艾比湖流域	-53.79	-14.7	-0.4	1964-2004	地形图、SPOT、ASTER	目视解译	(33)
阿拉套地区	-137.77	-20.24	-0.92	1990-2011	TM、ETM+	比值阈值	(34)
精河流域	-13.9	-15.2	-0.38	1964-2004	地形图、ASTER	目视解译	(35)
库克苏河流域	-50.46	-18.99	-0.46	1963-2004	地形图、ASTER	目视解译	(36)
台兰河流域	-50.06	-11.5	-0.22	1972-2011	地形图、ETM+	面向对象	(37)
博格达峰地区	-31.2	-21.6	-0.49	1972-2005	地形图、ASTER、SPOT	目视解译	(38)
中天山	-7	-13	-0.35	1963-2000	MSS、ETM+、SPOT	目视解译	(39)
玛纳斯河流域	-159.02	-24.61	-0.6	1972-2013	TM、ETM+	目视解译	本研究

4 讨论

4.1 天山地区山地冰川退缩状况

为进一步研究玛纳斯河流域冰川的变化特征,将其与天山地区的冰川变化作对比(表4),结果表明,本研究区冰川退缩速率仅次于阿拉套地区。考虑到研究时段的差异性,20世纪90年代以来新疆地区处于升温趋势⁽²²⁾,距离本研究区较近的乌鲁木齐河源1号冰川,1997年以来出现连续12a的物质负平衡⁽⁴⁰⁾,与本研究的冰川变化趋势相吻合。从表4可以看出,天山西段的冰川退缩速度最快,中段次之,东段最慢。从坡向上看,北坡的退缩速度明显高于南坡。这与Li X等⁽⁴¹⁾关于天山地区冰川变化的研究结果一致。

4.2 冰川变化的气候情景

水、热及其组合是影响冰川发育的主要因子,二者共同决定冰川的性质、发育和演化,降水决定积累,温度决定消融⁽⁴²⁾。为分析降水和气温对冰川变化的影响,考虑到玛纳斯河流域气象站较少,选取流

域周边的石河子、乌苏2个气象站的气温和降水数据作为研究区冰川变化的气候背景参考,为了与冰川变化研究时段保持一致,气象资料以2000年为分界点进行分析。结果表明(图6):1970—2000年2个气象站气温上升速率均大于 $0.4\% \cdot (10a)^{-1}$ (通过显著性0.001的检验),远大于全球1951—2012年地表温度的升温速率 $(0.12(0.08 \sim 0.14) \cdot (10a)^{-1})$ ⁽¹⁾。2000年以来,石河子站的气温上升较为明显,平均气温为 $8.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,较1970—2000年高出 $0.93\text{ }^{\circ}\text{C}$;乌苏站近10a气温虽有下降(表现在2010年以后),但平均气温与过去30a相比却高出 $0.72\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均气温为 $8.79\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。近40a2个气象站的降水都处于增加趋势,降水量增加均大于 $12.6\text{ mm} \cdot (10a)^{-1}$,近10a来更加明显。可见,该流域气温和降水的变化趋势与新疆地区气候由暖干向暖湿的转变相符合⁽²²⁾。据研究,气温每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 需要降水量增加25%或35%才能弥补由气温升高引起的冰川消融⁽⁴³⁾,而玛纳斯河流域虽然降水有所增加,但不足以弥补升温引起的消融,随着研究区气温的不断

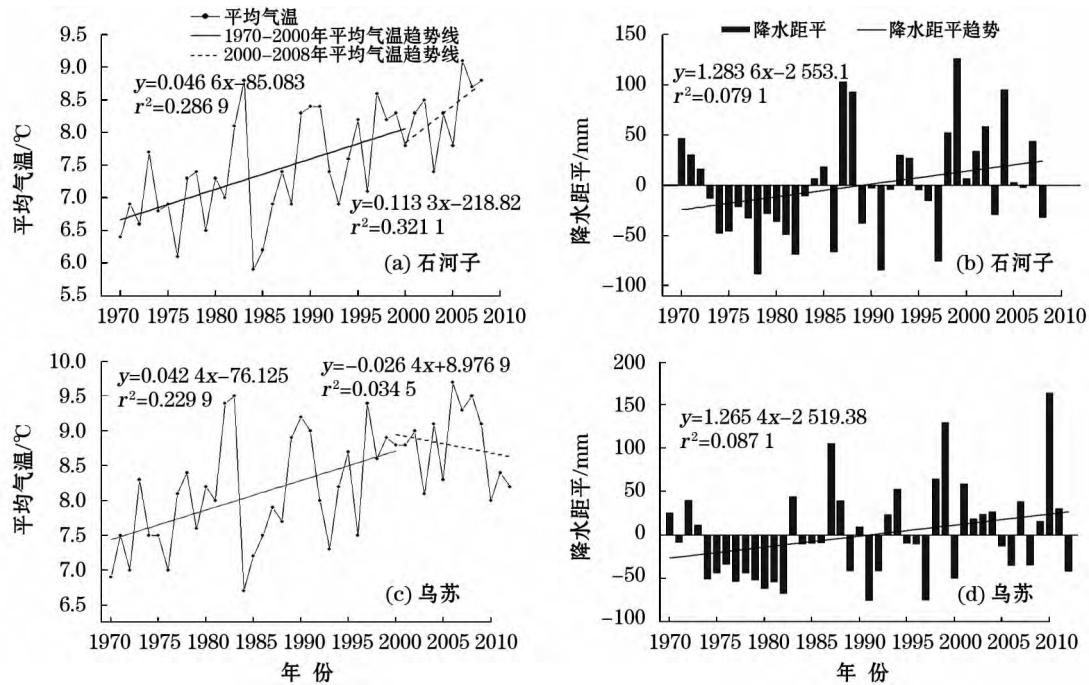


图 6 近 40 a 玛纳斯河流域周围气象台站年平均气温、降水距平变化

Fig. 6 Change of average annual temperature and precipitation anomaly in the Manas River Basin in recent 40 years

升高,冰川物质亏损加速,物质平衡线升高,导致冰川普遍退缩。

5 主要结论

(1) 过去 41 a 玛纳斯河流域冰川一直处于退缩状态,冰川面积总体减小 159.02 km^2 ,面积退缩率为 24.61% ,退缩速率为 $0.60\% \cdot \text{a}^{-1}$,近 10 a 冰川退缩速率略有增加;就不同区域而言,主源冰川退缩速度最快,左岸次之,右岸退缩速度最慢,退缩速率分别为 $0.73\% \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $0.67\% \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $0.51\% \cdot \text{a}^{-1}$;玛纳斯河流域冰川面积以大、中型冰川为主,面积在 $1 \sim 5 \text{ km}^2$ 规模的冰川退缩最为严重。

(2) 流域内各个朝向冰川均处于退缩状态,偏北向的冰川总面积明显大于偏南向,偏东向冰川的退缩率最高;流域冰川主要集中在海拔 $3800 \sim 4500 \text{ m}$,41 a 间各个海拔均处于退缩状态,海拔 $3800 \sim 4200 \text{ m}$ 的冰川面积减少量最多,占整个冰川面积退缩量的 61.16% ,冰川末端海拔升高明显。

(3) 冰川储量分析结果显示,流域冰川总储量减少了 $59.09 \sim 85.94 \text{ km}^3$,年退缩速率为 $0.75\% \sim 0.78\%$;与中国天山其他地区冰川变化相比,该流域的冰川退缩率较高。

(4) 流域周围气象资料分析表明,近 40 a 该区域气温、降水均呈快速增加趋势,特别是 1995 年以

来气温增幅较大,表明冰川退缩与该区域气温快速上升关系密切,降水增加不足以弥补气温上升导致的冰川消融。

参考文献(References):

- (1) IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis (M). Cambridge: Cambridge University Press 2013: 4 - 10 335 - 344.
- (2) Jacob T, Wahr J, Pfeffer W T et al. Recent contributions of glaciers and ice caps to sea level rise (J). Nature 2012, 482(7386): 514 - 518.
- (3) 刘时银,丁永建,李晶,等. 中国西部冰川对近期气候变暖的响应 (J). 第四纪研究, 2006, 26(5): 762 - 771. (Liu Shiyin, Ding Yongjian, Li Jing et al. Glacier in response to recent climate warming in west china (J). Quaternary Sciences 2006, 26(5): 762 - 771.)
- (4) 沈永平,苏宏超,王国亚,等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应 I. 水文效应 (J). 冰川冻土, 2013, 35(3): 513 - 527. (Shen Yongping, Su Hongchao, Wang Guoya et al. The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjing I. Hydrological effect (J). Journal of Glaciology and Geocryology 2013, 35(3): 513 - 527.)
- (5) 李忠勤,李开明,王林. 新疆冰川近期变化对水资源的影响研究 (J). 第四纪研究, 2010, 30(1): 96 - 106. (Li Zhongqin, Li Kaiming, Wang Lin. Study on recent glacier changes and their impact on water resources in Xinjiang, North Western China (J). Quaternary Sciences 2010, 30(1): 96 - 106.)
- (6) 李忠勤. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川近期研究与应用 (M). 北京: 气象出版社, 2011: 34 - 53. (Li Zhongqin. Progress and Application of Research on Glacier No. 1 at Headwaters of Urumqi river, Tianshan, China (M). Beijing: China Meteorological Press,

- 2011: 34 - 53.)
- (7) 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. (Yan Donghai, Li Zhongqin, Gao Wenyu, et al. RS-based monitoring of glacier change in the Beidahe River Basin in the Qilian Mountains (J). Arid Zone Research, 2012, 29(2): 245 - 250.)
 - (8) 阿不都外力·吉力力, 买买提·阿依古丽, 唐杨. 玛纳斯河流域绿洲土壤春季盐渍化研究 (J). 干旱区研究, 2013, 30(2): 189 - 195. (Jilili Abuduwaili, Ayiguli Maimaiti, Tang Yang. Soil salinization in the Manas River Basin in spring (J). Arid Zone Research, 2013, 30(2): 189 - 195.)
 - (9) 杨针娘. 中国冰川水资源 (M). 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1991: 142 - 143. (Yang Zhenniag. Glacier Water Resources in China (M). Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1991: 142 - 143.)
 - (10) 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 中国冰川目录 III. 天山山区 (西北部准噶尔内流区) (M). 北京: 科学出版社, 1986: 30 - 111. (Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences. Glacier Inventory of China III. Tianshan Mountains (Interior Drainage Area of Junggar Basin in Northwest) (M). Beijing: Science Press, 1986: 30 - 111.)
 - (11) 凌红波, 徐海量, 张青青, 等. 1956—2007 年新疆玛纳斯河流域气候变化趋势分析 (J). 冰川冻土, 2011, 33(1): 64 - 71. (Ling Hongbo, Xu Hailiang, Zhang Qingqing, et al. Climate change in the Manas River Basin, Xinjiang during 1956 - 2007 (J). Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(1): 64 - 71.)
 - (12) 许君利, 张世强, 上官冬辉. 30 a 来长江源区冰川变化遥感监测 (J). 干旱区研究, 2013, 30(5): 919 - 926. (Xu Junli, Zhang Shiqiang, Shanguan Donghui. Glacier change in the Yangtze River in recent three decades (J). Arid Zone Research, 2013, 30(5): 919 - 926.)
 - (13) Bolch T. Climate change and glacier retreat in northern Tianshan (Kazakhstan/Kyrgyzstan) using remote sensing data (J). Global and Planetary Change, 2007, 56(1): 1 - 12.
 - (14) Sidjak R W. Glacier mapping of the Illecillewaet icefield, British Columbia, Canada, using Landsat TM and digital elevation data (J). International Journal of Remote Sensing, 1999, 20(2): 273 - 284.
 - (15) 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): 1 430 - 1 438. (Zhu Heyong, Yang Taibao, Tian Hongzhen. Glacier variations in the Altun Mountains from 1973 to 2010 (J). Geographical Research, 2013, 32(8): 1 430 - 1 438.)
 - (16) Racoviteanu A, Williams M W. Decision tree and texture analysis for mapping debris-covered glaciers in the Kangchenjunga area, Eastern Himalaya (J). Remote Sensing, 2012, 4(10): 3 078 - 3 109.
 - (17) 怀保娟, 李忠勤, 孙美平, 等. 多种遥感分类方法提取冰川边界探讨——以喀纳斯河源地区为例 (J). 干旱区研究, 2013, 30(2): 372 - 377. (Huai Baojuan, Li Zhongqin, Sun Meiping, et al. Discussion on RS methods for glacier outline detection: A case study in headwaters of the Kanas River (J). Arid Zone Research, 2013, 30(2): 372 - 377.)
 - (18) Raup B, Racoviteanu A, Khalsa S J S, et al. The GLIMS geospatial glacier database: A new tool for studying glacier change (J). Global and Planetary Change, 2007, 56(1): 101 - 110.
 - (19) 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 - 2000) (J). Remote Sensing of Environment, 2003, 86(4): 566 - 577.
 - (20) Silverio W, Jaquet J M. Glacial cover mapping (1987 - 1996) of the Cordillera Blanca (Peru) using satellite imagery (J). Remote Sensing of Environment, 2005, 95(3): 342 - 350.
 - (21) Ye Qinghua, Kang Shichang, Chen Feng, 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.
 - (22) 施雅风, 沈永平, 胡汝冀. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号影响和前景初步探讨 (J). 冰川冻土, 2002, 24(3): 219 - 226. (Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. Preliminary study on signal impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China (J). Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(3): 219 - 226.)
 - (23) 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 中国冰川概论 (M). 北京: 科学出版社, 1988: 147 - 149. (Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences. Introduction to China Glacier (M). Beijing: Science Press, 1988: 147 - 149.)
 - (24) Liu Shiyin, Sun Wenxin, Shen Yongping, et al. Glacier changes since the Little Ice Age maximum in the western Qilian Shan, northwest China and consequences of glacier runoff for water supply (J). Journal of Glaciology, 2003, 49(164): 117 - 124.
 - (25) 刘时银, 丁永建, 张勇, 等. 塔里木河流域冰川变化及其对水资源影响 (J). 地理学报, 2006, 61(5): 482 - 490. (Liu Shiyin, Ding Yongjian, Zhang Yong, et al. Impact of the glacier change on water resources in the Tarim river basin (J). Acta Geographica Sinica, 2006, 61(5): 482 - 490.)
 - (26) Chen J, Ohmura A. Estimation of Alpine glacier water resources and their change since the 1870s (J). International Association of Hydrological Science, 1990, 193: 127 - 135.
 - (27) Macheret Y Y, Cherkasov P A, Bobrova L I. Tolschina i ob'em lednikov Djungarskogo Alatau po danniy aeroradiozondirovaniya, Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy: Khronika (J). Obsuzhdeniya, 1988, 62: 59 - 71.
 - (28) Radic V, Hock R. Regional and global volumes of glaciers derived from statistical upscaling of glacier inventory data (J). Journal of Geophysical Research: Earth Surface (2003 - 2012), 2010, 115 (F1).
 - (29) Moore J C, Grinsted A, Zwinger T, et al. Semiempirical and process-based global sea level projections (J). Reviews of Geophysics, 2013, 51(3): 484 - 522.
 - (30) 陈建明, 刘潮海, 金明变. 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. (Chen Jianming, Liu Chaohai, Jin Mingxie. Application of the repeated aerial photogrammetry to monitoring glacier variation in the drainage area of the Urumqi river (J). Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, 18(4): 331 - 336.)
 - (31) 王圣杰, 张明军, 李忠勤, 等. 近 50 年来中国天山冰川面积变化对气候的响应 (J). 地理学报, 2011, 66(1): 38 - 46. (Wang Shengjie, Zhang Mingjun, Li Zhongqin, et al. Response of glacier area variation to climate change in Chinese Tianshan Mountains in the past 50 years (J). Acta Geographica Sinica, 2011, 66(1): 38 - 46.)
 - (32) 王叶堂, 侯书贵, 鲁安新, 等. 近 40 年来天山东段冰川变化及

- 其对气候的响应 (J). 干旱区地理, 2009, 31(6): 813 - 821. (Wang Yetang, Hou Shugui, Lu Anxin, et al. Response of glacier variations in the eastern Tianshan Mountains to climate change, during the last 40 years (J). Arid Land Geography, 2009, 31(6): 813 - 821.)
- (33) Wang L, Li Z Q, Wang F T, et al. Glacier shrinkage in the Ebinur lake basin, Tianshan, China, during the past 40 years (J). Journal of Glaciology, 2014, 60(220): 245 - 254.
- (34) 何毅, 杨太保, 杜鹃, 等. 基于 GIS 和 RS 的中亚阿拉套山脉近 22 年来冰川变化 (J). 水土保持研究, 2013, 20(6): 130 - 134. (He Yi, Yang Taibao, Du Juan, et al. Glacier variation of past 22 years in Alatau Mountains of central Asia based on GIS and RS (J). Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(6): 130 - 134.)
- (35) Wang L, Li Z Q, Wang F T, et al. Glacier changes from 1964 to 2004 in the Jinghe River basin, Tian Shan (J). Cold Regions Science and Technology, 2014, 102: 78 - 83.
- (36) 高闻宇, 李忠勤, 李开明, 等. 基于遥感与 GIS 的库克苏河流域冰川变化研究 (J). 干旱区地理, 2011, 34(2): 252 - 261. (Gao Wenyu, Li Zhongqin, Li Kaiming, et al. Glacier variation in the Kukesu River Basin during 1963 - 2004 based on remote sensing data and GIS techniques (J). Arid Land Geography, 2011, 34(2): 252 - 261.)
- (37) 怀保娟, 李忠勤, 孙美平, 等. 近 40 年来天山台兰河流域冰川资源变化分析 (J). 地理科学, 2014, 34(2): 229 - 236. (Huai Bao-juan, Li Zhongqin, Sun Meiping, et al. Glaciers change in the Tairan River watershed in the last 40 years (J). Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(2): 229 - 236.)
- (38) Li K M, Li Z Q, Gao W Y, et al. Recent glacial retreat and its effect on water resources in eastern Xinjiang (J). Chinese Science Bulletin, 2011, 56(33): 3 596 - 3 604.
- (39) Li B L, Zhu A X, Zhang Y C, et al. Glacier change over the past four decades in the middle Chinese Tien Shan (J). Journal of Glaciology, 2006, 52(178): 425 - 432.
- (40) 张国飞, 李忠勤, 王文彬, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川 1959—2009 年物质平衡变化过程及特征研究 (J). 冰川冻土, 2012, 34(6): 1 301 - 1 309. (Zhang Guofei, Li Zhongqin, Wang Wenbin, et al. Change processes and characteristics of mass balance of the Urumqi Glacier No. 1 (J). Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(6): 1 301 - 1 309.)
- (41) Li X, Cheng G, Jin H, et al. Cryospheric change in China (J). Global and Planetary Change, 2008, 62(3): 210 - 218.
- (42) 李忠勤, 韩添丁, 井哲帆, 等. 乌鲁木齐河源区气候变化和 1 号冰川 40 年观测事实 (J). 冰川冻土, 2003, 25(2): 117 - 123. (Li Zhongqin, Han Tianding, Jing Zhefan, et al. A summary of 40-year observed variation facts of climate and glacier No. 1 at head-water of Urumqi river, Tianshan, China (J). Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(2): 117 - 123.)
- (43) Oerlemans J. Extracting a climate signal from 169 glacier records (J). Science, 2005, 308(5 722): 675 - 677.

Glacier Variation in the Manas River Basin during the Period from 1972 to 2013

XU Chun-hai^{1, 2}, WANG Fei-teng¹, LI Zhong-qin^{1, 3}, WANG Lin¹, WANG Pu-yu¹

- (1. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences/Tianshan Glaciological Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. College of Geography and Environmental Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: The variation of glaciers in the Manas River Basin, Xinjiang, China was studied based on the multi-phase remote sensing images. The results revealed that, during the period of 1972 - 2013, the total glacier area in the study area was reduced by 159.02 km², the reduction rate was as high as 24.61%, the most remarkable shrinkage of glaciers occurred in an elevation range of 3 800 - 4 200 m a. s. l., the terminal altitude of the glaciers ascended obviously, and the glaciers in an altitude range of 3 200 - 3 300 m a. s. l. disappeared in recent 41 years. Glacier variation was quite different from different regions, the shrinkage rate of the main-source glaciers in the Manas River Basin was the highest, than that on the left bank, and that on the right bank was the lowest. Glacier shrinkage occurred at all the slope aspects in the Manas River Basin, especially on the east slope. It was found that the glacier volume in the study area was reduced by 59.09 - 85.94 km³ in recent 41 years. Shrinkage rate of glaciers in the Manas River Basin was higher than that in other regions of the Tianshan Mountains. Air temperature increase was the main cause resulting in the shrinkage of glaciers in the study area.

Key words: glacier shrinkage; remote sensing monitoring; climate background; the Manas River Basin; Xinjiang