

引用格式: 姬鑫慧, 叶庆华, 聂维, 陈益民, NAUMAN Ali. 基于 TerraSAR/TanDEM-X 监测岗日嘎布山脉东南段冰川冰面高程变化(2000—2014) [J]. 山地学报, 2021, 39(5): 631-645.

Ji Xinhui, YE Qinghua, NIE Wei, CHEN Yimin, NAUMAN Ali. Glacier surface elevation change in southeastern Mt. Kangri Karpo on Tibet during 2000—2014 based on TerraSAR/TanDEM-X data [J]. Mountain Research, 2021, 39(5): 631-645.

基于 TerraSAR/TanDEM-X 监测岗日嘎布山脉 东南段冰川冰面高程变化(2000—2014)

姬鑫慧^{1,2}, 叶庆华^{1*}, 聂维³, 陈益民¹, NAUMAN Ali¹

(1. 中国科学院青藏高原研究所 青藏高原地球系统科学国家重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院资源与环境学院, 北京 100049; 3. 南湖实验室 大数据技术研究中心, 浙江 嘉兴 314000)

摘要: 岗日嘎布山区是海洋型山地冰川集中发育地区之一。海洋型冰川对气候变化敏感, 藏东南多云雨天气使可用光学遥感影像数据少, 限制了该地冰川变化遥感监测研究, 雷达数据的应用为解决这一问题提供了有效途径。基于 2000 年 SRTM DEM 与 2014 年 TerraSAR/TanDEM-X 雷达数据, 采用差分干涉测量(D-InSAR)方法, 研究岗日嘎布山区东南段冰面高程变化及冰储量变化特征, 得出如下结论: (1) 研究区 2000—2014 年冰储量变化为 -1.69 ± 0.12 Gt, 冰面高程年均变化为 $-0.86 \pm 0.13 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 。(2) 冰面高程变化整体与海拔高度呈正相关(皮尔森系数为 0.93)。在 3700~3900 m, 随海拔升高冰面高程变化加剧; 在 3900—5800 m, 冰面高程变化逐渐趋于零; 在 5800 m 以上高海拔积累区, 冰面高程变化为正值。(3) 表碛覆盖冰川消融较快。表碛覆盖冰川区冰面高程变化为 $-1.71 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 裸冰区为 $-0.73 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 。(4) 结合波密、察隅和左贡站年均温与年降水变化可知, 2000—2014 年研究区年均温显著升高, 年降水变化不明显, 冰川快速消融是区域气温升高所致。本文可为青藏高原冰川时空变化研究提供基础数据支持。

关键词: 冰川变化; TerraSAR/TanDEM-X; 雷达差分干涉测量(D-InSAR); 气候响应; 岗日嘎布山; 青藏高原

中图分类号: P343.6

文献标志码: A

冰川是全球气候变化中最显著的指标, 是天然敏感指示器^[1-2]。全球冰川近几十年处于消融状态, 是海平面上升的主要因素之一^[3-7]。山地冰川虽然只占全球冰川总量的 0.6%, 但近几十年山地冰川融化对同时期海平面上升贡献率达到 25%~30%^[8]。青藏高原山地冰川占全球山地冰川面积的 20.4%^[8], 其中藏东南在印度洋季风影响下, 海洋型冰川发育集中、冰温高、消融快、物质损耗严

重^[9], 对气候变化敏感^[10], 如 1976—2009 年藏东南冰川物质平衡亏损率大于 $0.6 \text{ m} \cdot \text{w. e. a}^{-1}$ ^[8]。冰川的持续消融影响当地水资源与生态条件^[11], 造成高原湖泊水位上升、冰崩、冰川泥石流等灾害^[12], 威胁流域内居民生命、财产安全^[6, 13-14]。

遥感技术的发展在大范围、高时空分辨率冰川变化监测中发挥了重要的作用^[15], 目前基于遥感数据研究冰面高程变化的方法包括基于 TerraSAR/

收稿日期(Received date): 2020-10-25; 改回日期(Accepted date): 2021-07-30

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(91747201, 41530748); 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0202); 中国科学院“十三五”信息化建设专项(XXH13505-06) [National Natural Science Foundation of China (91747201, 41530748); The Second Comprehensive Scientific Investigation and Research on the Tibetan Plateau (2019QZKK0202); Informatization Construction of the 13th Five Year Plan of Chinese Academy of Sciences (XXH13505-06)]

作者简介(Biography): 姬鑫慧(1996-), 女, 山西晋城人, 硕士研究生, 主要研究方向: 冰川遥感。[Ji Xinhui (1996-), female, born in Jincheng, Shanxi province, M. Sc. candidate, research on remote sensing of glaciers] E-mail: jixinhui@itpcas.ac.cn

* 通讯作者(Corresponding author): 叶庆华(1972-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 资源环境遥感与 GIS 应用。[YE Qinghua (1972-), female, Ph. D., professor, specialized in remote sensing in resources & environment change and its applications of GIS] E-mail: yeqh@itpcas.ac.cn

TanDEM-X 进行 D-InSAR 测量^[16-24]、基于光学立体像对生成 DEM 与基准参考 DEM 计算冰面高程差^[13,25-27]、激光雷达测高(如 ICESat^[28])、雷达测高(如 CryoSat-2^[29])等。藏东南云雨天气频繁,云、雪的高反照率导致部分光学像元过饱和、立体像对生成的 DEM 存在数据无值区^[26-27],ICESat 和 CryoSat-2 雷达测高数据脚点没有覆盖大量小冰川^[28-29]。因此全天候、不受云雨影响且分辨率高的 TerraSAR/TanDEM-X 雷达数据成为本研究的主要数据源,基于 D-InSAR 测量技术可准确提取地表形变特征^[30]。国内外学者采用 TerraSAR/TanDEM-X 雷达数据,对青藏高原祁连山^[124]、喜马拉雅山^[23]、昆仑山^[31-33]、喀喇昆仑山^[34-36]、唐古拉山^[17,21,36-37]、念青唐古拉山^[13,20,22,25]以及岗日嘎布山区^[18,38]等地进行研究,表明青藏高原冰川变化呈显著空间分异性,如 2000—2012 年喀喇昆仑地区冰面高程变化 $-0.09 \sim 0.21 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[16,34-35],2000—2016 年西昆仑地区冰川物质平衡变化 $0.03 \text{ m} \cdot \text{w. e. a}^{-1}$ ^[32],2000—2012 年喜马拉雅物质平衡变化 $-0.38 \pm 0.04 \text{ m} \cdot \text{w. e. a}^{-1}$ ^[23],2000—2014 岗日嘎布西段冰面高程变化 $-0.79 \pm 0.12 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[18,38]。

藏东南岗日嘎布地区是我国青藏高原冰川消融最大地区之一^[39-41],其东南段为印度季风进入高原的重要水汽通道,研究该地区冰川变化对青藏高原气候、冰川及其水文过程、灾害防治等具有重要意义。本研究选取 2014 年岗日嘎布山脉东南段的一对 TerraSAR/TanDEM-X 雷达数据与 2000 年的 SRTM DEM,研究雷达影像覆盖区冰面高程变化时空特征,补充岗日嘎布山脉东南段部分冰川的冰面高程变化数据,分析冰川变化主要原因。研究成果可为青藏高原冰川时空变化研究提供基础数据支持。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

藏东南岗日嘎布山呈西北—东南走向,位于察隅曲北部,西侧是雅鲁藏布江河谷,受印度洋季风影响,雨雪频繁,年降水量 1000~3000 mm,是海洋型冰川发育最重要的地区之一^[40]。研究区地处藏东南岗日嘎布山东南部(图 1; $96^{\circ}57.096'E \sim 97^{\circ}12.118'E$, $28^{\circ}57.226'N \sim 29^{\circ}17.152'N$),年均温

$-8.9^{\circ}\text{C} \sim 3.2^{\circ}\text{C}$,冰川平衡高度线上的夏季均温在 1°C 以上^[39],海拔 3004~6161 m,平均海拔高度为 4500 m。

据第二次冰川编目^[42],研究区共 71 条冰川,面积总计 167.53 km^2 ,包括青古冰川(50291B0248)、贡扎冰川(50291B0362)、不冻冰冰川(50291B0366)等。研究区西北侧有帕隆藏布 4 号和帕隆藏布 10 号物质平衡实测冰川^[10](图 1)。2006—2007 年帕隆 4 号年均物质平衡变化为 $-0.71 \text{ m} \cdot \text{w. e. a}^{-1}$,2005—2009 年帕隆 10 号冰川为 $-0.83 \text{ m} \cdot \text{w. e. a}^{-1}$,作为本文冰面高程变化结果的验证数据。

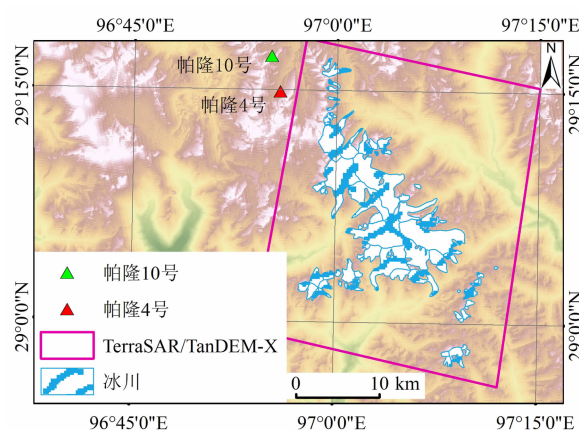


图 1 研究区位置

Fig. 1 Geographic location of study area

1.2 数据源

本研究在德国宇航网站获得 2014 年 2 月 7 日的一对 TerraSAR-X/TanDEM-X 影像,以 2000 年 C 波段的 SRTM DEM 作为基准 DEM 数据,模拟 2000 年地形相位。SRTM 的 C 波段和 X 波段重叠部分用于评估并校正积雪穿透误差。

基于第二次冰川编目^[42]和 1976 年青藏高原冰川专题矢量数据(TPG1976 数据)^[43],结合 2000 年与 2014 年两期 Landsat 卫星影像确定冰川边界。

此外,收集了 2000—2014 年地面气象要素数据集^[44]和青藏高原 88 个国家基准气象站数据。地面气象要素数据集格网分辨率为 0.1° ,气象站数据类别为日均温和日降水量(20 时为日界)。本文所用遥感数据情况汇总见表 1,矢量数据与文献资料见表 2。

表 1 遥感影像数据源

Tab. 1 Overview of satellite images data sources

传感器	使用波段	遥感图像编号	日期	分辨率/m	影像来源
Landsat5	波段 4、3 和 2	LT51340402000366BJC00	2000 - 12 - 31	30	https://earthexplorer.usgs.gov/
Landsat8	波段 6、5 和 4	LC81340402014260LGN01	2014 - 09 - 17	30	https://earthexplorer.usgs.gov/
SRTM	X 波段和 C 波段		2000 - 02 - 11	30	https://earthexplorer.usgs.gov/
TerraSAR/TanDEM	X 波段	20140207T232940_20140207T232948	2014 - 02 - 07	1.36(距离向) 2.20(方位向)	德国宇航局

表 2 矢量数据与文献数据资料表

Tab. 2 Overview of vector and literatures data sources

数据名称	数据格式	冰川条数	数据类型	获取方式或数据来源
第二次冰川编目	.shp	71	矢量数据	参考文献[42]
冰川专题矢量数据	.shp	71	矢量数据	参考文献[43]
中国区域地面气象要素数据集	netcdf		年均温、年降水量	参考文献[44]
全国基准站气象资料	文本格式		日平均温度、降水量	国家气象科学数据中心

2 研究方法

2.1 冰面高程变化计算

雷达数据不受云雨影响,采用 D-InSAR 方法可准确提取地表形变特征^[30]。其中,D-InSAR 方法基于双基雷达数据生成干涉图,去除平地相位(基于轨道卫星数据生成)、地形相位(基于基准参考 DEM 模拟生成)后,由残差相位直接生成冰面高程变化数据(图 2)。

相较传统 InSAR 方法,D-InSAR 不用生成 DEM,数据处理精度也高。其计算原理如下:

$$\begin{aligned}\Delta\varphi_{D-int} &= -\frac{2\pi B_{\perp} (H_{glacier} - H_{srtm})}{\lambda R \sin\theta} \\ &= -\frac{2\pi B_{\perp} \cdot \Delta h_{residual}}{\lambda \sin\theta \cdot R}\end{aligned}\quad (1)$$

式中, $\Delta\varphi_{D-int}$ 是 TerraSAR - X/TanDEM-X 数据与基准参考 DEM 由于冰面高程变化形成的地形残差相位; $H_{glacier}$ 是冰面高程值(m); H_{srtm} 是 SRTM 的高程值(m); B_{\perp} 是垂直基线; λ 是雷达信号波长; θ 是入射角(°); R 是斜距; $\Delta h_{residual}$ 是冰川冰面高程变化(m)。

侧视雷达成像有透视收缩、叠掩和阴影等几何特征,在山区更显著。这些几何特征在雷达图像中表现为低相干属性,影响差分干涉结果,因此通过限制局地入射角 θ_{local} 来减小误差,其计算公式如下:

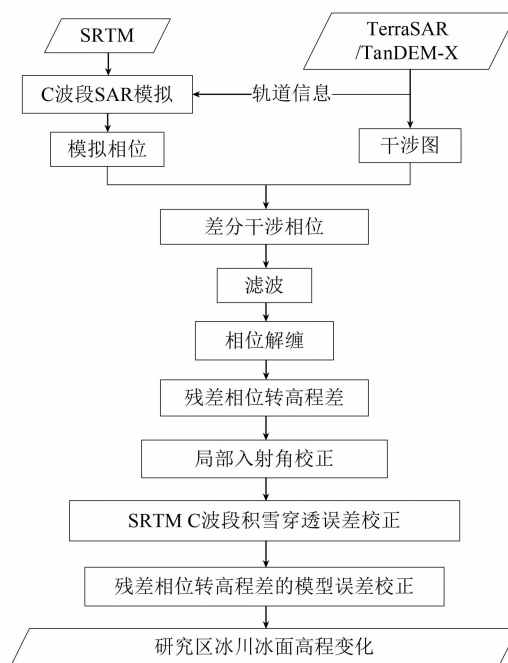


图 2 冰面高程变化计算流程

Fig. 2 Calculation flow of glacier surface elevation change

$$\theta_{local} = \theta_{flat} + N_{slope} \cdot \sin(N_{aspect} - N_{heading}) \quad (2)$$

式中, θ_{flat} 是雷达入射角,为 45.09° ; N_{slope} 是地形坡度(°); N_{aspect} 是地形方位角(°); $N_{heading}$ 是相对于北方向顺时针旋转的卫星轨道方位角,为 189.59° ;降轨约 190° ;升轨约 -10° 。根据 Li^[20]等的研究,将局地入射角限制在 $18^{\circ} \sim 72^{\circ}$ 。

先将 SRTM C 波段和 X 波段基于坡度、坡向等地形因素进行配准^[45]。经水平配准 X 波段 SRTM 向经度正方向(东)偏移 0.59 个像元(17.85 m),向纬度负方向(南)偏移 0.26 个像元(-7.95 m)。之后比较研究区 X 波段和 C 波段在积雪表面高程差,用于 C 波段积雪穿透深度校正。配准后统计,研究区范围内 C 波段 SRTM 积雪穿透深度为 2.21 m,这与 Li 等在珠穆朗玛峰地区的穿透深度近似(2.26 m)^[23]。

2.2 冰面高程变化计算误差

误差来源于系统误差和随机误差,系统误差包括 C 波段 SRTM 在积雪表面的穿透计算误差、非冰川区基准面高程变化误差和季节变化造成的地表形变误差等。TerraSAR/TanDEM-X 与 SRTM DEM 时间均为 2 月,可忽略季节性形变误差。随机误差来源于 TerraSAR/TanDEM-X 和 SRTM DEM 空间分辨率、研究区冰川覆盖范围等。

其中 C 波段 SRTM DEM 积雪穿透误差 Err_p 计算如下^[23]:

$$Err_p = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\text{non-glacier}}}{\sqrt{n_{\text{non-glacier}}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\text{glacier}}}{\sqrt{n_{\text{glacier}}}}\right)^2} \quad (3)$$

式中, $\sigma_{\text{non-glacier}}$ 为 C 波段与 X 波段 SRTM DEM 于非冰川区高程差标准差; σ_{glacier} 为 SRTM DEM 的 C 波段与 X 波段于冰川区高程差标准差; $n_{\text{non-glacier}}$ 为非冰川区有效观测点数量; n_{glacier} 为冰川区有效观测点数量。

TerraSAR/TanDEM-X 与 SRTM DEM 的基准误差 Err_{datum} ^[23] 为 0.06 m。系统误差 Err_{sys} 由积雪穿透性误差 Err_p 和基准误差 Err_{datum} 得到,计算如下:

$$Err_{\text{sys}} = \sqrt{Err_p^2 + Err_{\text{datum}}^2} \quad (4)$$

随机误差 Err_{random} 的计算如下^[23]:

$$Err_{\text{random}} = \frac{Err_{\text{data-srtm}}}{\sqrt{N_{\text{data-srtm(on)}}}} \quad (5)$$

$N_{\text{data-srtm(on)}}$ 为 TSX/TDX 与 SRTM DEM 的差分结果 $Err_{\text{data-srtm}}$ 在冰川表面的有效观测点。通过系统误差 Err_{sys} 与随机误差 Err_{random} , 可得到冰面高程变化误差 $U_{\Delta h}$ 如下:

$$U_{\Delta h} = \sqrt{Err_{\text{sys}}^2 + Err_{\text{random}}^2} \quad (6)$$

研究区年均冰面高程变化误差 $U_{\Delta h}$ 为 $\pm 0.13 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

2.3 冰川物质平衡变化和冰储量变化计算

在 2000—2014 年冰面高程变化数据 $DH(\text{m} \cdot \text{a}^{-1})$ 基础上,采用冰密度 $\rho(850 \pm 60 \text{ kg} \cdot \text{mw}^{-3})$ ^[46] 获得大地测量冰川物质平衡变化 $\Delta MB(\text{m} \cdot \text{w.e.} \cdot \text{a}^{-1})$:

$$\Delta MB = DH \cdot \rho \quad (7)$$

统计每 50 m 海拔高度范围冰面高程变化平均值 $DH_i(\text{m} \cdot \text{a}^{-1})$, 对研究区冰川储量变化 ΔM 进行统计如下:

$$\Delta M = \sum_{i=1}^n A_i \cdot DH_i \cdot \rho \quad (8)$$

式中, i 为不同海拔区间; A_i 为对应海拔区间的冰川面积(m^2); DH_i 为对应海拔区间的平均冰面高程变化值($\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$)。

2.4 冰储量变化计算误差

大地测量冰川物质平衡变化误差 U_{mc} 由冰面高程变化误差 $U_{\Delta h}$ 与冰密度 ρ ^[46] 决定,计算如下:

$$U_{\text{mc}} = \sqrt{\left(\frac{U_{\Delta h}}{t} \cdot \frac{\rho}{\rho_w}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h}{t} \cdot \frac{U_{\rho}}{\rho_w}\right)^2} \quad (9)$$

式中, $U_{\Delta h}$ 和 U_{ρ} 分别是冰面高程变化误差与冰密度的不确定性($\pm 60 \text{ kg} \cdot \text{mw}^{-3}$)^[46]; ρ_w 为水密度($1000 \text{ kg} \cdot \text{mw}^{-3}$); t 为观测时间,即 14 a。

3 结果与讨论

3.1 冰面高程变化

3.1.1 冰面高程总体变化

研究区冰川 2000—2014 年冰面高程变化及冰储量变化结果为 $-0.86 \pm 0.13 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$; 冰储量变化 $-1.69 \pm 0.12 \text{ Gt}$, 冰川消融速率略高于吴坤鹏等发布的岗日嘎布冰面高程变化数据集($-0.79 \pm 0.11 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$)^[18], 但研究区位于岗日嘎布东侧, 为西南季风进入岗日嘎布地区的第一通道, 符合冰面减薄较大的特征。由图 3 可知重叠部分不同海拔处的冰面高程变化相似, 数据集^[18] 中重叠地区冰面高程变化与海拔间皮尔森系数为 0.89; 而本文相同地区皮尔森系数为 0.85, 两者均呈正相关趋势。

3.1.2 典型冰川变化

2000—2014 年冰面高程变化空间分布(图 4), 冰川末端消融率显著高于高海拔积累区(图 4a, 表 3)。71 条冰川中编号为 50291B0358 冰川冰面高程变化最快($-1.469 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$), 编号为 50291B0295 的冰川冰面高程变化最慢($-0.185 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$)。其

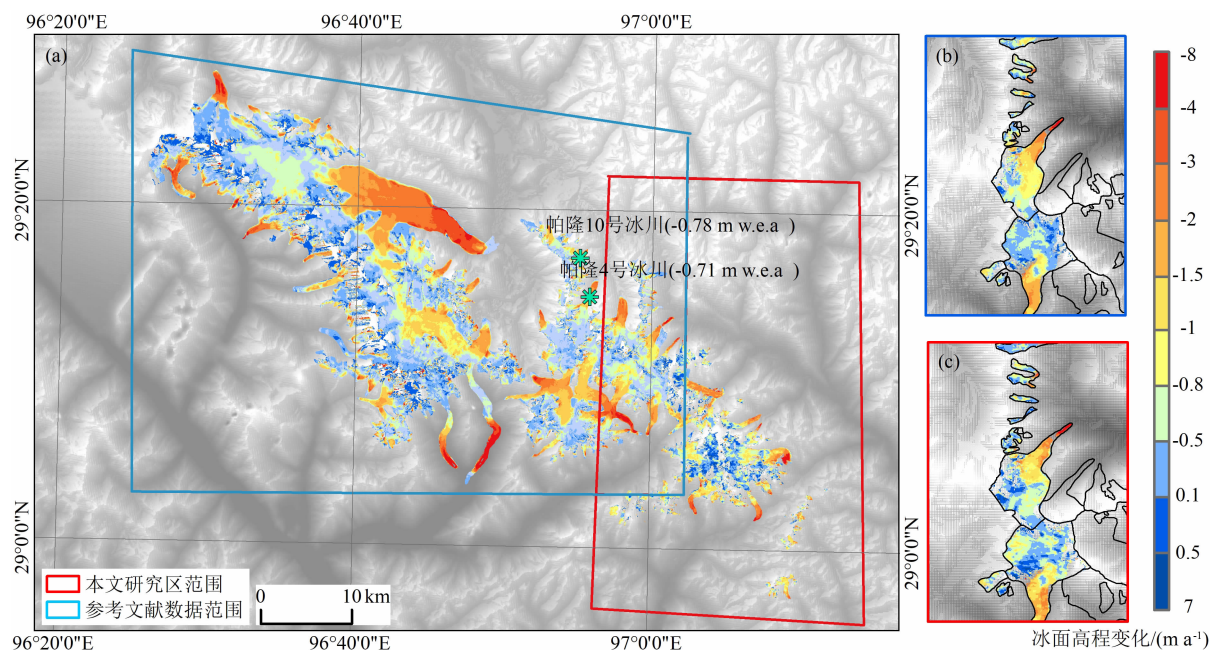


图3 冰面高程变化结果验证:(a)本文与文献[18]结果;(b)文献[18]重叠部分结果;(c)本文重叠部分结果

Fig. 3 Verification of glacier elevation change results: (a) result of this study and reference [18];

(b) reference [18] in the overlay region; (c) result of this paper in the overlay region

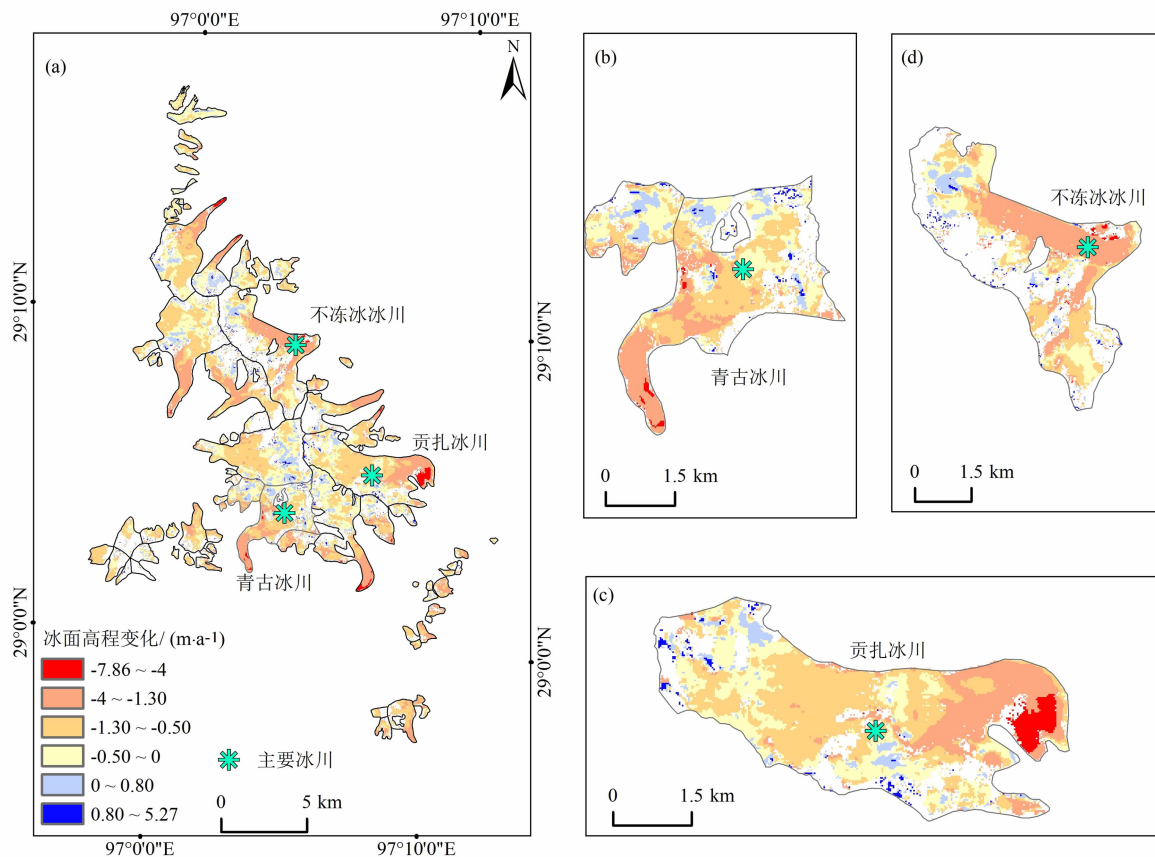


图4 研究区各冰川冰面高程变化:(a)整个研究区;(b)青古冰川;(c)贡扎冰川;(d)不冻冰冰川

Fig. 4 Elevation change of glaciers in the study area: (a) the whole study area; (b) Qinggu glacier;

(c) Gongzha glacier; (d) Ice-Free glacier

中不冻冰冰川(50291B0366)物质平衡变化为 $-0.94 \pm 0.11 \text{ m} \cdot \text{w. e. a}^{-1}$, 与 $\text{Ke}^{[13]}$ 等这条冰川监测结果相似($-0.8 \text{ m} \cdot \text{w. e. a}^{-1}$)。

研究区与帕隆藏布 4 号冰川和 10 号冰川相邻

表 3 研究区冰川冰面高程变化与冰储量变化

Tab.3 Changes of glacier elevation and mass budgets in the study area

第一次冰川 编目编码	第二次 冰川 编目编码	冰面高程 变化/ ($\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$)	冰川 面积 / km^2	冰储量 变化/ Gt
50291B0198	G096979E29146N	-0.76	0.93	-0.01
50291B0199	G096984E29143N	-0.40	0.33	0
	G096989E29141N	-0.96	0.11	0
50291B0200	G097005E29155N	-0.77	14.52	-0.13
50291B0201	G097039E29128N	-0.93	9.52	-0.06
50291B0202	G097050E29114N	-0.37	1.39	-0.01
50291B0203	G097036E29106N	-0.25	0.19	0
50291B0204	G097031E29104N	-0.55	0.18	0
50291B0205	G097056E29097N	-0.46	15.00	-0.08
50291B0206	G097037E29087N	-0.26	0.18	0
	G097040E29082N	-1.04	0.37	-0.01
50291B0207	G097031E29071N	-0.63	0.30	0
50291B0208	G097018E29054N	-0.92	2.73	-0.03
50291B0209	G096993E29049N	-0.70	1.08	-0.01
50291B0209	G097005E29054N	-0.46	0.42	0
50291B0210	G096978E29049N	-0.65	2.10	-0.02
50291B0237	G096958E29038N	-0.92	1.17	-0.01
50291B0238	G096972E29033N	-0.66	1.43	-0.01
50291B0239	G096977E29028N	-0.50	0.55	0
50291B0240	G096986E29032N	-1.38	0.69	0
50291B0241	G096989E29040N	-0.53	1.17	-0.01
50291B0242	G097008E29042N	-0.77	0.17	0
50291B0243	G097016E29040N	-0.78	0.28	0
50291B0244	G097023E29039N	-1.13	0.89	-0.01
50291B0246	G097030E29046N	-1.26	0.19	0
50291B0247	G097029E29053N	-1.01	0.56	-0.01
50291B0248	G097034E29069N	-1.45	0.15	0
	G097046E29075N	-0.44	2.68	-0.01
	G097069E29065N	-1.04	10.78	-0.13
50291B0249	G097082E29055N	-1.11	2.15	-0.03
50291B0251	G097104E29063N	-0.85	11.58	-0.1
50291B0252	G097127E29069N	-0.94	3.56	-0.04
50291B0253	G097174E29043N	-0.78	0.24	0
	G097176E29046N	-0.68	0.20	0

续表 3

第一次冰川 编目编码	第二次 冰川 编目编码	冰面高程 变化/ ($\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$)	冰川 面积 / km^2	冰储量 变化/ Gt
50291B0254	G097162E29037N	-0.85	0.18	0
50291B0255	G097154E29035N	-0.62	0.08	0
50291B0256	G097163E29030N	-0.30	0.31	0
50291B0260	G097154E29010N	-0.71	0.48	0
50291B0261	G097139E28968N	-0.86	0.50	-0.01
50291B0262	G097142E28959N	-0.99	0.81	-0.01
50291B0291	G097153E28970N	-1.28	2.43	-0.04
50291B0292	G097162E28974N	-1.14	0.58	-0.01
50291B0293	G097157E29004N	-0.81	0.22	0
50291B0294	G097161E29011N	-1.38	0.66	-0.01
50291B0295	G097163E29019N	-0.19	0.13	0
50291B0296	G097168E29024N	-1.20	0.53	-0.01
50291B0297	G097171E29035N	-1.40	0.87	-0.01
50291B0357	G097179E29045N	-0.91	0.24	0
50291B0358	G097181E29053N	-1.47	0.36	-0.01
50291B0359	G097199E29062N	-0.46	0.10	0
50291B0360	G097144E29071N	-0.53	1.09	-0.01
50291B0362	G097121E29094N	-1.01	18.07	-0.22
50291B0363	G097135E29110N	-0.89	0.20	0
50291B0364	G097086E29121N	-1.04	7.83	-0.1
50291B0365	G097084E29135N	-1.11	0.77	-0.01
50291B0366	G097053E29152N	-1.11	18.35	-0.24
50291B0367	G097049E29184N	-0.62	0.15	0
50291B0368	G097063E29185N	-0.75	0.55	-0.01
50291B0369	G097060E29196N	-0.50	1.37	-0.01
50291B0371	G097015E29186N	-0.74	3.64	-0.03
	G097034E29188N	-0.49	3.21	-0.06
50291B0372	G096999E29200N	-0.83	10.15	-0.1
50291B0373	G096989E29220N	-0.50	0.92	-0.01
50291B0374	G096992E29241N	-0.48	0.42	0
50291B0375	G096994E29252N	-0.80	1.19	-0.01
50291B0376	G096990E29268N	-0.28	2.04	-0.01
50291B0377	G096986E29276N	-0.47	0.60	-0.01
—	G096997E29232N	-0.21	0.30	0
—	G096998E29222N	-1.15	0.12	0
—	G097039E29182N	-0.51	0.04	0
—	G097104E29148N	-0.73	0.29	0

(图 1),根据野外实测,2006—2007 年帕隆藏布 4 号冰川的冰川物质平衡变化 $-0.71 \text{ m} \cdot \text{w. e.} \cdot \text{a}^{-1}$ [10], 2005—2009 年帕隆藏布 10 号冰川的物质平衡变化 $-0.78 \text{ m} \cdot \text{w. e.} \cdot \text{a}^{-1}$ [10],同本文研究区 2000—2014 年的大地测量平均冰川物质平衡变化 $-0.73 \text{ m} \cdot \text{w. e.} \cdot \text{a}^{-1}$ 接近,证实了本文数据与方法的可靠性。

2000—2014 年青古、贡扎和不冻冰冰川(图 4b—d)冰面高程整体降低,青古冰川冰舌区的冰川消融更剧烈;贡扎冰川有极少高海拔积累区冰面高程增加,南北两侧冰川末端冰川消融较快;不冻冰冰川西部高海拔积累区冰面高程增加。

3.2 冰面高程变化影响因素

3.2.1 气候变化特征

据中国区域气象数据集^[44]产品,采用 Linear 方法计算每个栅格 2000—2014 年的年均温(图 5a)和年降水变化率(图 5b),发现藏东南地区气温、降水变化不同,导致不同地区冰川变化有差别。本文结合青藏高原基准气象站数据具体分析气温与降水特征。

2000—2014 年青藏高原 88 个气象站中 78 个站年均温增加,升温率最大为藏东南巴塘站($0.091 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$),通过了 0.001 显著性检验,降温率最大为藏西普兰站($-0.047 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$)(图 6a—b);48 个站年降水增加,年降水量增加率最多为清水河站($10.23 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$),通过了 0.01 显著性水平检验;年降水量减少最快为藏东南贡山站($-20.34 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$)。青藏高原由西北向东南升温

逐渐加快,由北向南降水减少逐渐加快(图 6a—c)。与此同时,冰川变化也呈显著空间分异性,由西北向东南冰川消融愈加剧烈,例如藏西北帕米尔—喀喇昆仑—西昆仑山脉冰川处于微弱退缩、稳定或增加状态^[47-50],而藏南喜马拉雅山脉和藏东南地区横断山脉、念青唐古拉山脉冰川消融量巨大^[13,39]。其中,依据藏东南气象站(图 6a—b),年均温均处于显著升高状态,而年降水量则有增有减。由此可推断藏东南气温显著升高是冰川变化的主导因素。

研究区气候变化见附近波密($95^{\circ}46' \text{ E}$, $29^{\circ}52' \text{ N}$)、察隅($97^{\circ}28' \text{ E}$, $28^{\circ}39' \text{ N}$)及左贡气象站($97^{\circ}50' \text{ E}$, $29^{\circ}40' \text{ N}$)的年均温和年降水量变化特征(图 7)。波密、察隅和左贡的升温率分别为 $0.025 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $0.027 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $0.027 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ (图 7a—c),岗日嘎布山区东南段附近升温由西向东逐渐加快。同时波密年降水量增加,变化率为 $6.34 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,察隅站和左贡站年降水量减少,变化率分别为 $-7.74 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $-11.73 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,年降水增加率由南向北逐渐升高。温度每升高 $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 导致的冰川消融量需增加 25%~35% 的降水量弥补^[36-37],仅波密站年降水量增加不足以弥补温度升高所导致的冰川消融,物质平衡长期亏损导致冰面高程降低。

3.2.2 地形变化特征

(1) 冰面高程变化与海拔的关系

岗日嘎布山区冰川海拔分布范围 3700 ~

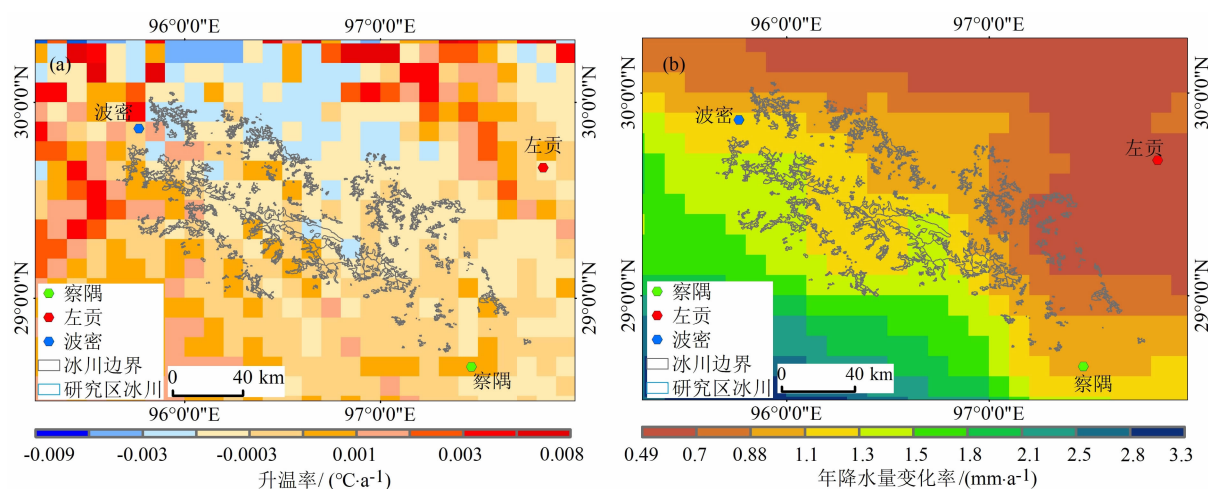
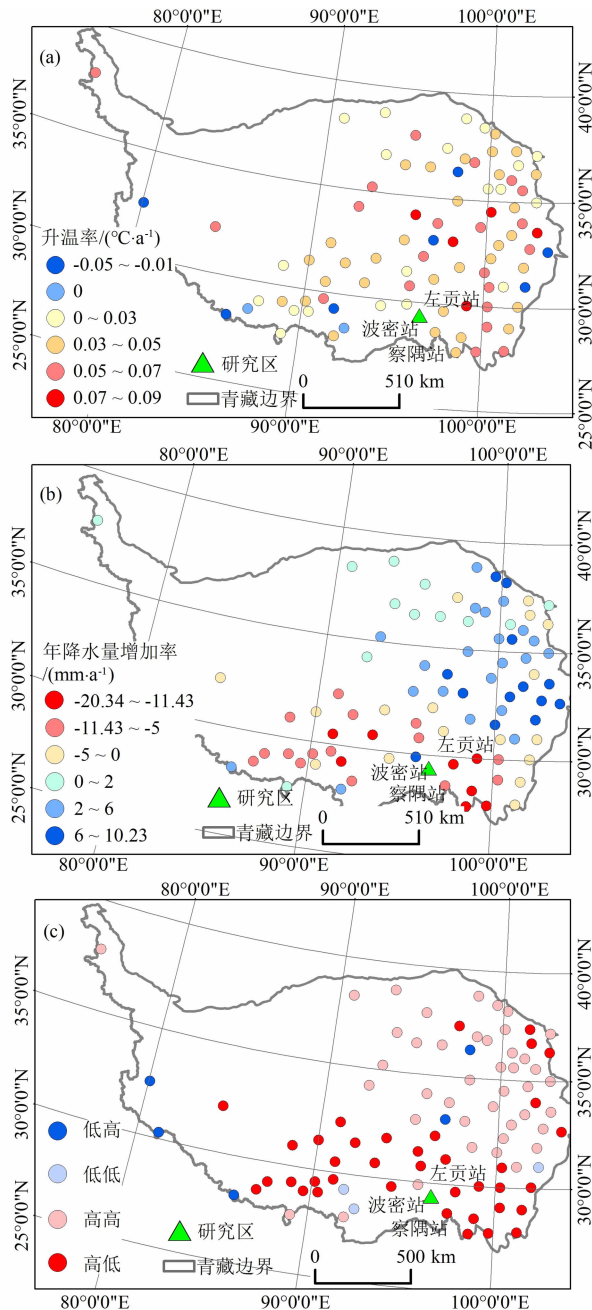


图 5 2000—2014 年藏东南地区气候变化:(a)升温率;(b)年降水量增加率

Fig. 5 Climate change in the southeast Qinghai-Tibet Plateau during 2000 to 2014:

(a) variations of annual mean temperature; (b) variations of annual precipitation



注:“低高”为年均温降低、年降水增加;“低低”为年均温降低、年降水减少;“高高”为年均温增加、年降水增加;“高低”为年均温增加、年降水减少。

图6 气象站升温率与年降水量增加率空间分布:

(a) 升温率; (b) 年降水量增加率; (c) 气温降水高低分布

Fig.6 Variations of annual mean temperature and annual precipitation: (a) annual mean temperature increase rate; (b) annual precipitation change rate; (c) change rate of annual mean temperature and annual precipitation

拔 3700 ~ 3900 m, 随海拔升高, 岗日嘎布山区冰面高程变化加剧; 在海拔 3850 ~ 3900 m 冰面高程减少最多, 为 $-3.67 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$; 3900 ~ 5800 m 逐渐变缓, 直至海拔 5800 m 及以上, 冰面高程增加。

青古、贡扎和不冻冰冰川均处于冰面高程减少状态, 其与海拔的皮尔森系数分别为 0.64、0.82 和 0.83 (图 8b ~ d)。青古冰川在海拔 4000 m 左右冰面高程变化最剧烈, 为 $-3.58 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 4000 ~ 5100 m 逐渐减缓, 5100 m 后随海拔升高冰面高程变化再次加快。贡扎冰川在海拔 4300 m 左右冰面高程变化最剧烈, 为 $-4.14 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$; 海拔 4300 m 之后, 随海拔升高, 冰面高程变化逐渐减缓。不冻冰冰川在海拔 4150 m 左右冰川消融最快, 冰面高程变化为 $-2.52 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$; 海拔 4250 m 以上冰川消融减缓, 直至 5250 m 及以上高海拔积累区冰面高程变化出现正值。

(2) 冰面高程变化与坡度坡向的关系

将研究区冰面高程变化分区统计 (表 4, 图 9a), 可得东南坡冰川消融最快, 冰面高程变化为 $-0.97 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 西北坡最慢, 为 $-0.67 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 东南、东、东北和南坡的冰川消融显著快于其他坡向, 原因是加快冰川消融的印度洋暖湿气流是通过藏东南进入青藏高原。

根据水土保持综合治理规划通则对不同坡度范围冰面高程变化分区统计 (表 5), 可得较缓坡时冰川消融最快, 为 $-1.04 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$; 急陡坡时冰川消融最慢, 为 $-0.57 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ (图 9b), 且冰川多发育于平坡、较缓坡和缓坡, 共占研究区面积 77.77% (图 9c)。该地冰面高程减少量同坡度成反比, 坡度越陡, 冰面高程减少量越少。

3.2.3 冰面高程变化与表碛关系

表碛覆盖是海洋型冰川的典型特征之一^[51]。岗日嘎布山区表碛覆盖冰川的海拔范围为 3700 ~ 5200 m, 2000—2014 年表碛覆盖冰川区冰面高程变化为 $-1.71 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 裸冰区为 $-0.73 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 表碛覆盖冰川的冰面高程变化更剧烈。Wu 等研究发现在中念青唐古拉山, 2800 ~ 5700 m 海拔表碛覆盖冰川消融比裸冰剧烈, 1986—2013 年表碛覆盖冰川区冰面高程变化分别为 $-0.92 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 裸冰区为 $-0.51 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[22]。

6200 m, 冰面高程变化与海拔的皮尔森系数为 0.93 (图 8a), 低海拔冰面高程减少量多于高海拔。在海

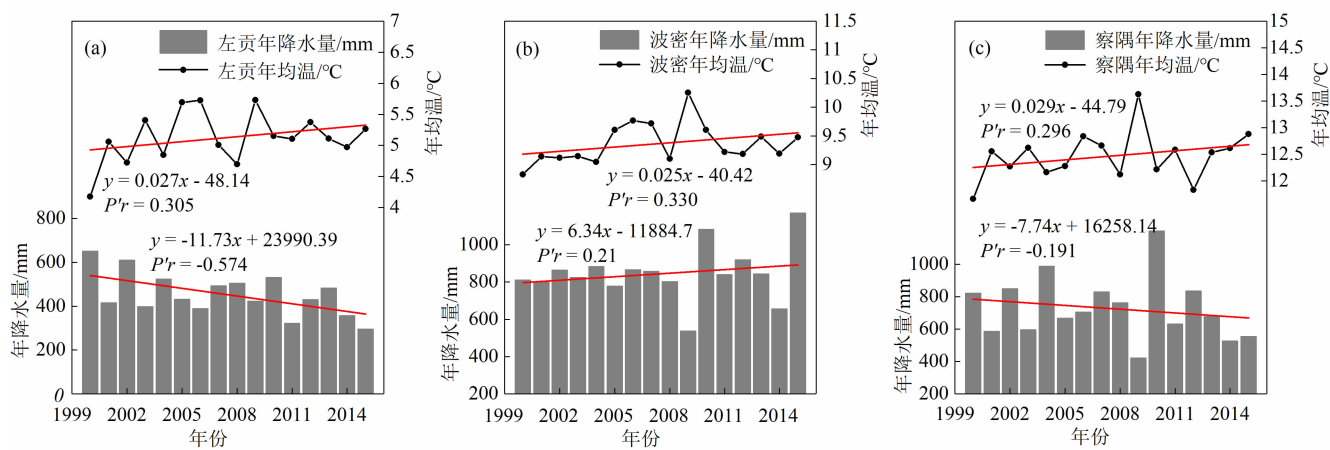


图 7 研究区附近气象站年均温与年降水变化率：(a)波密站；(b)察隅站；(c)左贡站

Fig. 7 Variations of annual mean temperature and annual precipitation in nearby meteorological stations:

(a) Bomi station; (b) Chayu station; (c) Zuogong station

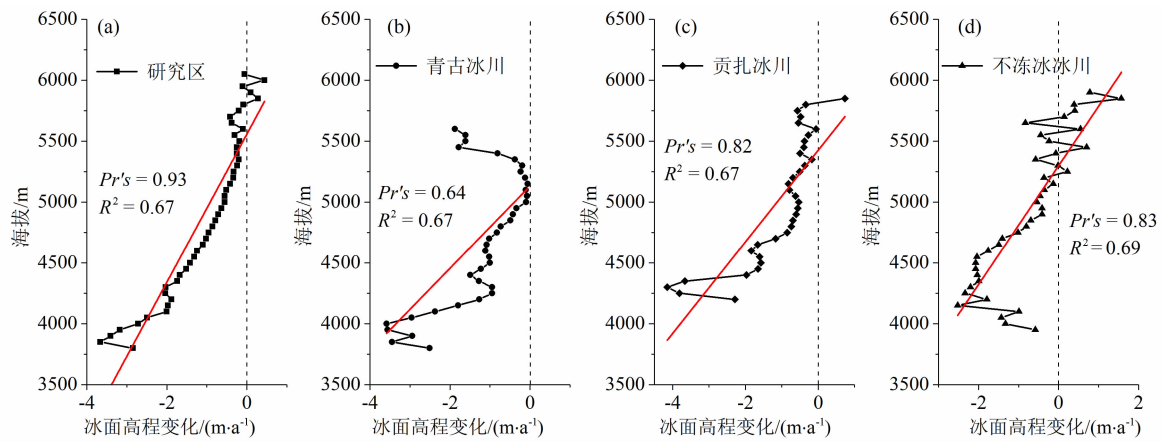


图 8 冰面高程差与海拔相关性：(a)研究区；(b)青古冰川；(c)贡扎冰川；(d)不冻冰冰川

Fig.8 Correlation between glacier elevation change and altitude;

(a) the whole region; (b) Qinggu glacier; (c) Gongzha glacier; (d) Ice - Free glacier

表 4 各坡向冰面高程变化

Tab. 4 Glacier elevation changes of different aspects

方位	坡向	面积/ km ²	冰面高程变化/ (m · a ⁻¹)	物质平衡变化/ (m · w. e. a ⁻¹)	冰储量变化/ (Gt · a ⁻¹)
正北	0° ~ 22.5°、337.5° ~ 360°	14.42	-0.75	-0.63	-0.009
东北	22.5° ~ 67.5°	15.82	-0.93	-0.79	-0.013
正东	67.5° ~ 112.5°	14.67	-0.94	-0.80	-0.012
东南	112.5° ~ 157.5°	17.48	-0.97	-0.83	-0.015
正南	157.5° ~ 202.5°	20.33	-0.89	-0.76	-0.016
西南	202.5° ~ 247.5°	13.28	-0.80	-0.68	-0.009
正西	247.5° ~ 292.5°	7.42	-0.76	-0.65	-0.005
西北	292.5° ~ 337.5°	7.23	-0.67	-0.57	-0.004

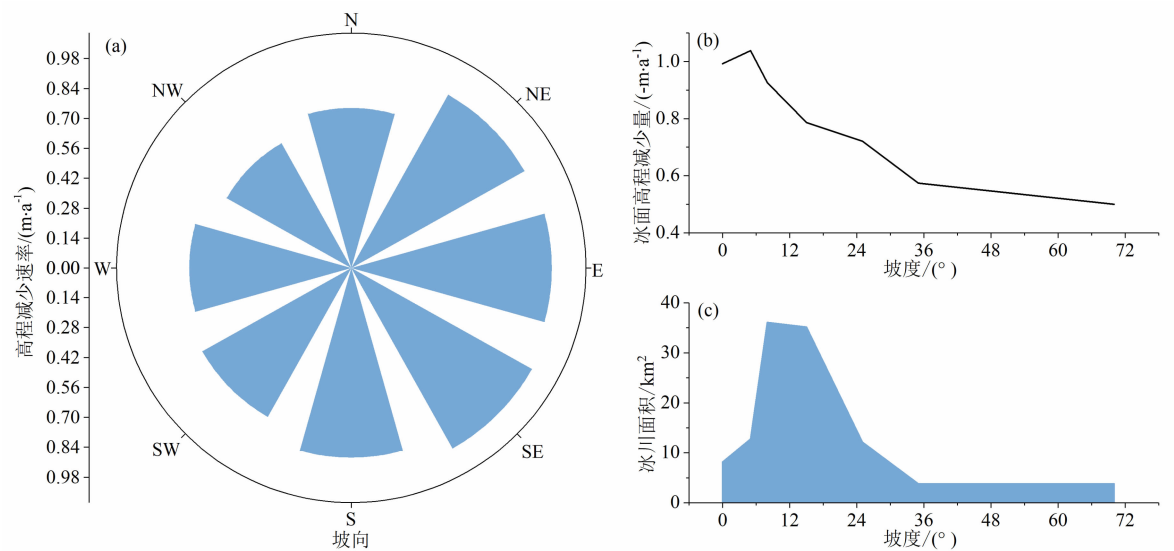


图 9 冰川变化与坡向、坡度的关系:(a)冰面高程减少量与坡向关系;(b)冰面高程减少量与坡度关系;(c)冰川面积同坡度关系

Fig.9 Correlation between glacier changes and slope/aspect: (a) correlation between the glacier elevation changes and aspects; (b) correlation between glacier elevation changes and slopes; (c) correlation between glacier area and slopes

表 5 各坡度冰面高程变化

Tab.5 Glacier elevation changes of different slopes

坡度		面积/km ²	冰面高程变化/(m·a ⁻¹)	物质平衡变化/(m·w.e. a ⁻¹)	冰储量变化/(Gt·a ⁻¹)
平坡	0°~5°	8.15	-0.99	-0.84	-0.007
较缓坡	5°~8°	12.78	-1.04	-0.88	-0.011
缓坡	8°~15°	36.07	-0.93	-0.79	-0.028
较陡坡	15°~25°	35.14	-0.79	-0.67	-0.023
陡坡	25°~35°	12.11	-0.72	-0.61	-0.007
急陡坡	>35°	3.80	-0.57	-0.49	-0.002

表碛覆盖层对冰川变化的影响与表碛厚度、表碛物质颗粒大小、颜色和研究区海拔有关。表碛的反照率较低,辐射吸收增强,导致表碛受热,向裸冰辐射和传热。表碛物质颗粒大小、颜色、厚度等物理性质不同,具有不同的热力传导,从而影响冰川消融^[54]。在低海拔地区,较厚的表碛会减少向下热传导从而抑制冰川消融。海拔较高,表碛较薄时相反,较薄表碛吸收辐射大于裸冰,向冰的热传递增加,促使冰川加速消融^[25]。岗日嘎布山东南段,海拔 3200~4250 m 裸冰消融速率快于表碛覆盖冰川,海拔 4250~5200 m 表碛覆盖冰川消融速率大于裸冰(图 10)。此外裸冰与表碛覆盖冰川的冰储量变化均呈正态分布,研究区冰川表碛覆盖部分主要集中于海拔 4000~4700 m,裸冰集中于海拔 4250~5250 m(图 10b)。因此,表碛覆盖冰川区海拔较

低,表碛物吸热与导热效应下冰川消融较快。

3.3 讨论

青藏高原冰川变化呈显著空间分异性,主要表现为藏西北喀喇昆仑地区、藏中昆仑和西唐古拉地区冰川消融平缓,藏南喜马拉雅和藏东南念青唐古拉地区冰川消融剧烈。消融剧烈的喜马拉雅山脉和念青唐古拉山脉冰川变化也有差别,例如 2000 年以来喜马拉雅山脉冰川物质平衡变化 $-0.38 \pm 0.04 \text{ m} \cdot \text{w. e. a}^{-1}$ ^[23],而念青唐古拉西部为 $-0.28 \pm 0.28 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$,念青唐古拉东部为 $-0.71 \pm 0.24 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[38-39]。其中念青唐古拉东部的岗日嘎布西北段冰面高程变化为 $-0.79 \pm 0.11 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[18],而东南段冰面高程变化为 $-0.86 \pm 0.13 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

影响藏东南地区冰川变化的因素主要包括:季

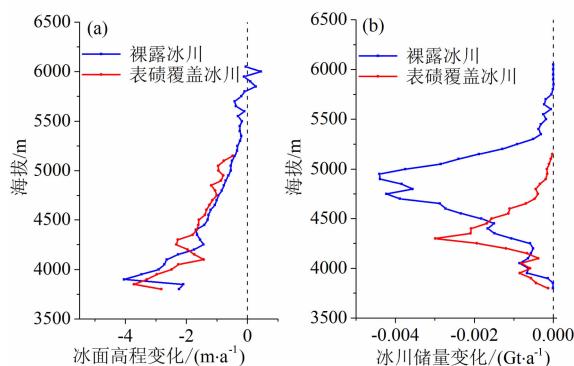


图 10 各海拔表碛覆盖与裸冰的冰川变化:

(a) 冰面高程变化;(b) 冰川储量变化

Fig. 10 Glacier changes in different altitudes for

exposed ice and debris-covered ice;

(a) glacier elevation change; (b) glacier volume change

风气候、地形地貌(包含海拔、坡度与坡向)、表碛覆盖及末端接触介质影响^[22,25,28]。例如, Ren^[25]等在2020年5月基于ZY-3和SRTM DEM数据对藏东南冰面高程变化研究,发现影响该地区冰川物质平衡的原因包括温度、冰川是否有表碛覆盖以及坡度;而 Wu^[22]等在2019年1月发现念青唐古拉山的冰川变化会受表碛覆盖、冰川形态(地貌)、末端接触介质(陆地或湖泊等)的影响。同样, Wu^[38]等在2018年岗日嘎布地区冰川物质平衡变化研究中发现冰川变化主要受季风主导的气候变化影响。对比前人研究,本文从气候变化(气温和降水)、地形地貌(海拔、坡度和坡向)和表碛覆盖三方面分析岗日嘎布地区冰川消融剧烈原因,发现岗日嘎布东南段为印度季风进入青藏高原的重要通道,近年来气温显著升高,导致冰川变化剧烈,此外地形与表碛覆盖也影响冰川变化。然而仅分析了不同海拔范围的表碛覆盖冰川变化特征,没有实地测量表碛厚度和颗粒物质的大小颜色等物理属性。因此对于表碛覆盖部分的分析不够全面,今后此方面工作需深入研究。

4 结论

基于 TerraSAR/TanDEM-X 数据, SRTM DEM 结合第二次冰川编目数据、TPG1976 数据, 使用 D-InSAR 方法对岗日嘎布山区东南段冰川冰面高程变化、冰川物质平衡变化、冰储量变化及影响因素进行研究, 结果表明:

(1) 2000—2014 年岗日嘎布山区东南段 71 条冰川处于消融状态。研究区冰储量变化为 $-1.69 \pm 0.12 \text{ Gt}$, 冰面高程年均变化 $-0.86 \pm 0.13 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$; 冰川物质平衡年均变化 $-0.73 \pm 0.11 \text{ m} \cdot \text{w. e.} \cdot \text{a}^{-1}$ 。编码为 50291B0358 的冰川冰面高程减少量最多 ($-1.469 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$), 编码为 50291B0295 冰川冰面高程减少量最少 ($-0.185 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$)。

(2) 研究区冰川消融受气候变化影响。青藏高原年均温上升显著, 年降水量增加不显著, 藏东南升温更快, 降水量有增有降。结合附近波密、左贡、察隅气象站年均温与年降水变化结果可知气温升高是冰面高程变化的主导因素。

(3) 研究区冰川变化受地形和表碛影响。冰面高程减少量最大的地区分布于海拔 3850 ~ 3900 m, 坡向为东南、东、东北和南坡, 多为坡度较缓地区。冰面高程变化整体与海拔呈正相关, 海拔 3850 ~ 3900 m 冰面高程变化最大, 为 $-3.67 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 3900 m 以上变化逐渐变缓, 直到高海拔积累区 (5800 m 以上) 冰面高程有所增加。表碛覆盖冰川区的冰面高程变化为 $-1.71 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 裸冰区为 $-0.73 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 。表碛覆盖冰川区分布海拔低、消融更剧烈。

参考文献 (References)

- [1] OERLEMANS J. Quantifying global warming from the retreat of glaciers [J]. *Science*, 1994, **264**(5156): 243–245. DOI: 10.1126/science.264.5156.243
- [2] YAO Tandong, WANG Youqing, LIU Shiyang, et al. Recent glacial retreat in High Asia in China and its impact on water resource in Northwest China [J]. *Science in China Series D Earth Sciences*, 2004, **47**(12): 1065–1075. DOI: 10.1360/03yd0256
- [3] PFEFFER W T, ARENDT A A, BLISS A, et al. The Randolph Glacier inventory: A globally complete inventory of glaciers [J]. *Journal of Glaciology*, 2014, **60**(221): 537–552. DOI: 10.3189/2014JoG13J176
- [4] 蒲健辰, 姚檀栋, 王宁练, 等. 近百年来青藏高原冰川的进退变化 [J]. *冰川冻土*, 2004, **26**(5): 517–522. [PU Jianchen, 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] DOI: 10.1007/BF02873097
- [5] 鲁安新, 姚檀栋, 王丽红, 等. 青藏高原典型冰川和湖泊变化遥感研究 [J]. *冰川冻土*, 2005, **27**(6): 783–792. [LU Anxin, YAO Tandong, WANG Lihong, et al. Study on the fluctuations of typical glaciers and lakes in the Tibetan Plateau using remote sensing

- [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, **27**(6): 783 – 792] DOI: 10.7522/J.issn.1000-0240(2005)06-0783-10
- [6] 秦大河, 丁永建. 冰冻圈变化及其影响研究——现状、趋势及关键问题[J]. *气候变化研究进展*, 2009, **5**(4): 187 – 195. [QIN Dahe, DING Yongjian. Cryospheric changes and their impacts: Present, trends and key issues [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2009, **5**(4): 187 – 195] DOI: 10.1016/S1003-6326(09)60084-4
- [7] OPPENHEIMER M, GLAVOVIC B C, HINKEL J, et al. Sea level rise and implications for low lying islands, coasts and communities [EB/OL]. // IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (2021-11-25) [2021-11-25]. <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-4-sea-level-rise-and-implications-for-low-lying-islands-coasts-and-communities/>
- [8] 王宁练, 姚檀栋, 徐柏青, 等. 全球变暖背景下青藏高原及周边地区冰川变化的时空格局与趋势及影响[J]. *中国科学院院刊*, 2019, **34**(11): 1220 – 1232. [WANG Ninglian, YAO Tandong, XU Baiqing, et al. Spatiotemporal pattern, trend, and influence of glacier change in Tibetan Plateau and surroundings under global warming [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, **34**(11): 1220 – 1232] DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.2019.11.005
- [9] YAO Tandong, THOMPSON L, YANG Wei, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings [J]. *Nature Climate Change*, 2012, **2**(9): 663 – 667. DOI: 10.1038/NCLIMATE1580
- [10] 杨威, 姚檀栋, 徐柏青, 等. 青藏高原东南部岗日嘎布地区冰川严重损耗与消融[J]. *科学通报*, 2008, **53**(17): 2091 – 2095. [YANG Wei, YAO Tandong, XU Baiqing, et al. Quick ice mass loss and abrupt retreat of the maritime glaciers in the Kangri Karpo Mountains, southeast Tibetan Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, **53**(17): 2091 – 2095] DOI: 10.1007/s11434-008-0288-3
- [11] 姚檀栋, 秦大河, 沈永平, 等. 青藏高原冰冻圈变化及其对区域水循环和生态条件的影响[J]. *自然杂志*, 2013, **35**(3): 179 – 186. [YAO Tandong, QIN Dahe, SHEN Yongping, et al. Cryospheric changes and their impacts on regional water cycle and ecological conditions in the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2013, **35**(3): 179 – 186] DOI: 10.3969/j.issn.0253-9608.2013.03.004
- [12] 陈发虎, 傅伯杰, 夏军, 等. 近 70 年来中国自然地理与生存环境基础研究的重要进展与展望[J]. *中国科学: 地球科学*, 2019, **49**(11): 1659 – 1696. [CHEN Fahu, FU Bojie, XIA Jun, et al. Major advances in studies of the physical geography and living environment of China during the past 70 years and future prospects [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2019, **49**(11): 1659 – 1696] DOI: 10.1360/SSTe-2019-0174
- [13] KE Linghong, SONG Chunqiao, YONG Bin, et al. Which heterogeneous glacier melting patterns can be robustly observed from space? A multi-scale assessment in southeastern Tibetan Plateau [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, **242**: 111777. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111777
- [14] 郭光剑, 姚檀栋, 王伟财, 等. 青藏高原及周边地区的冰川灾害[J]. *中国科学院院刊*, 2019, **34**(11): 1285 – 1292. [WU Guangjian, YAO Tandong, WANG Weicai, et al. Glacial hazards on Tibetan Plateau and surrounding alpine [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, **34**(11): 1285 – 1292] DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.2019.11.011
- [15] 叶庆华, 程维明, 赵永利, 等. 青藏高原冰川变化遥感监测研究综述[J]. *地球信息科学学报*, 2016, **18**(7): 920 – 930. [YE Qinghua, CHENG Weiming, ZHAO Yongli, et al. A Review on the research of glacier changes on the Tibetan Plateau by remote sensing technologies [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2016, **18**(7): 920 – 930] DOI: 10.3724/SP.J.1047.2016.00920
- [16] ROUND V, LEINSS S, HUSS M, et al. Surge dynamics and lake outbursts of Kyagar Glacier, Karakoram [J]. *The Cryosphere*, 2017, **11**(2): 723 – 739. DOI: 10.5194/tc-11-723-2017
- [17] LIU Guang, FAN Jinghui, ZHAO Feng, et al. Monitoring elevation change of glaciers on Geladandong Mountain using TanDEM-X SAR interferometry [J]. *Journal of Mountain Science*, 2017, **14**(5): 859 – 869. DOI: 10.1007/s11629-016-3992-5
- [18] 吴坤鹏, 刘时银, 蒋宗立, 等. 1980—2014 年岗日嘎布地区冰川高程变化数据集[J]. *中国科学数据*, 2018, **3**(4): 93 – 104. [WU Kunpeng, LIU Shiyin, JIANG Zongli, et al. A dataset of glacier elevation changes in the Kangri Karpo Mountains during 1980 – 2014 [J]. *China Science Data*, 2018, **3**(4): 93 – 104] DOI: 10.11922/sciencedb.574
- [19] 张其兵, 康世昌, 王晶. 2000—2014 年祁连山西段老虎沟 12 号冰川高程变化[J]. *冰川冻土*, 2017, **39**(4): 733 – 740. [ZHANG Qibing, KANG Shichang, WANG Jing. Elevation change of the Laohugou Glacier No. 12 in the western Qilian Mountain from 2000 to 2014 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, **39**(4): 733 – 740] DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2017.0083
- [20] LI Gang, LIN Hui. Recent decadal glacier mass balances over the western Nyaingentanglha Mountains and the increase in their melting contribution to Nam Co Lake measured by differential bistatic SAR interferometry [J]. *Global and Planetary Change*, 2017, **149**: 177 – 190. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2016.12.018
- [21] LIU Lin, JIANG Liming, JIANG Houjun, et al. Accelerated glacier mass loss (2011 – 2016) over the Puruogangri ice field in the inner Tibetan Plateau revealed by bistatic InSAR measurements [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, **231**: 111241. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111241
- [22] WU Kunpeng, LIU Shiyin, JIANG Zongli, et al. Glacier mass

- balance over the central Nyainqentanglha Range during recent decades derived from remote-sensing data [J]. *Journal of Glaciology*, 2019, **65** (251): 422 – 439. DOI: 10.1017/jog.2019.20
- [23] LI Gang, LIN Hui, YE Qinghua. Heterogeneous decadal glacier downwasting at the Mt. Everest (Qomolangma) from 2000 to 2012 based on multi-baseline bistatic SAR interferometry [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, **206**: 336 – 349. DOI: 10.1016/j.rse.2017.12.032
- [24] SUN Yafei, JIANG Liming, LIU Lin, et al. Mapping glacier elevations and their changes in the western Qilian Mountains, northern Tibetan Plateau, by bistatic InSAR [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, **11**(1): 68 – 78. DOI: 10.1109/JSTARS.2017.2764751
- [25] REN Shaoting, MENENTI M, LI Jia, et al. Glacier mass balance in the Nyainqentanglha mountains between 2000 and 2017 retrieved from ZiYuan-3 stereo images and the SRTM DEM [J]. *Remote Sensing*, 2020, **12**(5): 864. DOI: 10.3390/rs12050864
- [26] 张鑫,周建民,刘志平. 基于 KH-9 数据对青藏高原山地冰川 DEM 提取及精度评价——以普若岗日冰川和雅弄冰川为例 [J]. *冰川冻土*, 2019, **41**(1): 27 – 35. [ZHANG Xin, ZHOU Jianmin, LIU Zhiping. DEM extraction and precision evaluation of mountain glaciers in the Qinghai-Tibet Plateau based on KH-9 data: Take the Purog Kangri glacier and Jiong glacier as example [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, **41**(1): 27 – 35] DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2019.0005
- [27] ZHOU Yushan, LI Zhiwei, LI Jia, et al. Glacier mass balance in the Qinghai-Tibet Plateau and its surroundings from the mid-1970s to 2000 based on Hexagon KH-9 and SRTM DEMs [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, **210**: 96 – 112. DOI: 10.1016/j.rse.2018.03.020
- [28] 宗继彪,叶庆华,田立德. 基于 ICESat/GLAS, SRTM DEM 和 GPS 观测青藏高原纳木那尼冰面高程变化(2000—2010 年) [J]. *科学通报*, 2014, **59**(21): 2108 – 2118. [ZONG Jibiao, YE Qinghua, TIAN Lide. Recent Naimona'nyi Glacier surface elevation changes on the Tibetan Plateau based on ICESat/GLAS, SRTM DEM and GPS measurements [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, **59**(21): 2108 – 2118] DOI: 10.1360/972013-1243
- [29] 程澍,熊章强,李新武,等. 基于 CryoSat-2 数据的纳木那尼冰川冰面高程变化方法研究[J]. *测绘与空间地理信息*, 2018, **41**(1): 189 – 192. [CHENG Shu, XIONG Zhangqiang, LI Xinwu, et al. Naimona'nyi Glacier elevation changes from 2010 to 2016 using Cryosat-2 satellite data [J]. *Geomatics and Spatial Information Technology*, 2018, **41**(1): 189 – 192] DOI: 10.3969/j.issn.1672-5867.2018.01.052
- [30] 孙亚飞,江利明,柳林,等. TanDEM-X 双站 InSAR 地形提取及精度评估[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2016, **41**(1): 100 – 105. [SUN Yafei, JIANG Liming, LIU Lin, et al. Generating and evaluating digital terrain model with TanDEM-X bistatic SAR interferometry [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, **41**(1): 100 – 105] DOI: 10.13203/j.whugis20130618
- [31] ZHANG Zhen, LIU Shiyin, JIANG Zongli, et al. Glacier variations at Xinqingfeng and Malan ice caps in the inner Tibetan Plateau since 1970 [J]. *Remote Sensing*, 2020, **12**(3): 421. DOI: 10.3390/rs12030421
- [32] CAO Bo, GUAN Weijin, LI Kaiji, et al. Area and mass changes of glaciers in the west Kunlun mountains based on the analysis of multi-temporal remote sensing images and DEMs from 1970 to 2018 [J]. *Remote Sensing*, 2020, **12**(16): 2632. DOI: 10.3390/rs12162632
- [33] ZHOU Yushan, HU Jun, LI Zhiwei, et al. Quantifying glacier mass change and its contribution to lake growths in central Kunlun during 2000 – 2015 from multi-source remote sensing data [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, **570**: 38 – 50. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.01.007
- [34] VIJAY S, BRAUN M. Early 21st century spatially detailed elevation changes of Jammu and Kashmir glaciers (Karakoram-Himalaya) [J]. *Global and Planetary Change*, 2018, **165**: 137 – 146. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2018.03.014
- [35] RANKL M, BRAUN M. Glacier elevation and mass changes over the central Karakoram region estimated from TanDEM-X and SRTM/X-SAR digital elevation models [J]. *Annals of Glaciology*, 2016, **57**(71): 273 – 281. DOI: 10.3189/2016AoG71A024
- [36] LIU Lin, JIANG Liming, ZHANG Zhimin, et al. Recent accelerating glacier mass loss of the Geladandong Mountain, inner Tibetan Plateau, estimated from ZiYuan-3 and TanDEM-X measurements [J]. *Remote Sensing*, 2020, **12**(3): 472. DOI: 10.3390/rs12030472
- [37] LIU Lin, JIANG Liming, SUN Yafei, et al. Morphometric controls on glacier mass balance of the Puruogangri ice field, central Tibetan Plateau [J]. *Water*, 2016, **8**(11): 496. DOI: 10.3390/w8110496
- [38] WU Kunpeng, LIU Shiyin, JIANG Zongli, et al. Recent glacier mass balance and area changes in the Kangri Karpo Mountains from DEMs and glacier inventories [J]. *The Cryosphere*, 2018, **12**(1): 103 – 121. DOI: 10.5194/tc-12-103-2018
- [39] 吴坤鹏,刘时银,鲍伟佳,等. 1980—2015 年青藏高原东南部岗日嘎布山冰川变化的遥感监测[J]. *冰川冻土*, 2017, **39**(1): 24 – 34. [WU Kunpeng, LIU Shiyin, BAO Weijia, et al. Remote sensing monitoring of the glacier change in the Gangrigabu Range, southeast Tibetan Plateau from 1980 through 2015 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, **39**(1): 24 – 34] DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2017.0004
- [40] 李霞,杨太保,冀琴. 岗日嘎布地区冰川变化特征研究[J]. *水土保持研究*, 2014, **21**(4): 233 – 237. [LI Xia, YANG Taibao,

- JI Qin. Study on glacier variations in the Gangrigabu Range [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, **21** (4): 233 – 237] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2014.04.046
- [41] 刘时银,上官冬辉,丁永建,等. 20 世纪初以来青藏高原东南部岗日嘎布山的冰川变化[J]. 冰川冻土,2005,**27**(1): 55 – 63. [LIU Shiyin, SHANGGUAN Donghui, DING Yongjian, et al. Glacier variations since the early 20th century in the Gangrigabu Range, southeast Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, **27** (1): 55 – 63] DOI: 10.3969/j.issn.1000-0240.2005.01.008
- [42] 刘时银,姚晓军,郭万钦,等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状[J]. 地理学报,2015,**70**(1): 3 – 16. [LIU Shiyin, YAO Xiaojun, GUO Wanqin, et al. The contemporary glaciers in China based on the Second Chinese Glacier Inventory [J]. Acta Geographica Sinica, 2015, **70** (1): 3 – 16] DOI: 10.11821/dlxb201501001
- [43] YE Qinghua, ZONG Jibiao, TIAN Lide, et al. Glacier changes on the Tibetan Plateau derived from Landsat imagery: Mid – 1970s – 2000 – 13 [J]. Journal of Glaciology, 2017, **63** (238): 273 – 287. DOI: 10.1017/jog.2016.137
- [44] CHEN Yingying, YANG Kun, HE Jie, et al. Improving land surface temperature modeling for dry land of China [J]. Journal of Geophysical Research, 2011, **116**: D20104. DOI: 10.1029/2011JD015921
- [45] NUTH C, KAAB A. Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change [J]. The Cryosphere, 2011, **5** (1): 271 – 290. DOI: 10.5194/tc – 5 – 271 – 2011
- [46] HUSS M. Density assumptions for converting geodetic glacier volume change to mass change [J]. The Cryosphere, 2013, **7** (3): 877 – 887. DOI: 10.5194/tc – 7 – 877 – 2013
- [47] KAAB A, TREICHLER D, NUTH C, et al. Brief communication: Contending estimates of 2003 – 2008 glacier mass balance over the Pamir-Karakoram-Himalaya [J]. The Cryosphere, 2015, **9** (2): 557 – 564. DOI: 10.5194/tc – 9 – 557 – 2015
- [48] SHEAN D E, BHUSHAN S, MONTESANO P, et al. A systematic, regional assessment of high mountain Asia glacier mass balance [J]. Frontiers in Earth Science, 2020 (7): 363. DOI: 10.3389/feart.2019.00363
- [49] 李成秀,杨太保,田洪阵. 近 40 年来西昆仑山冰川及冰湖变化与气候因素[J]. 山地学报,2015,**33**(2): 157 – 165. [LI Chengxiu, YANG Taibao, TIAN Hongzhen. Variation of western Kunlun mountain glaciers monitored by remote sensing during 1976 – 2010 [J]. Mountain Research, 2015, **33**(2): 157 – 165] DOI: 10.16089/j.cnki.1008 – 2786.000021
- [50] 张威,王宁练,李想,等. 近 20a 西喀喇昆仑地区吉尔吉特河流域冰川面积变化及其对气候变化的响应[J]. 山地学报,2019,**37**(3): 347 – 358. [ZHANG Wei, WANG Ninglian, LI Xiang, et al. Glacier changes and its response to climate change in the Gilgit River basin, western Karakorum Mountains over the past 20 years [J]. Mountain Research, 2019, **37** (3): 347 – 358] DOI: 10.16089/j.cnki.1008 – 2786.000428
- [51] 刘巧,张勇. 贡嘎山海洋型冰川监测与研究:历史,现状与展望[J]. 山地学报,2017,**35**(5): 717 – 726. [LIU Qiao, ZHANG Yong. Studies on the dynamics of monsoonal temperate glaciers in Mt. Gongga: A review [J]. Mountain Research, 2017, **35** (5): 717 – 726] DOI: 10.16089/j.cnki.1008 – 2786.000271
- [52] 张勇,刘时银. 中国冰川区表碛厚度估算及其影响研究进展[J]. 地理学报,2017,**72**(9): 1606 – 1620. [ZHANG Yong, LIU Shiyin. Research progress on debris thickness estimation and its effect on debris-covered glaciers in western China [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, **72** (9): 1606 – 1620] DOI: 10.11821/dlxb201709006

Glacier Surface Elevation Change in Southeastern Mt. Kangri Karpo on Tibet during 2000—2014 Based on TerraSAR/TanDEM-X Data

JI Xinhui^{1,2}, YE Qinghua^{1*}, NIE Wei³, CHEN Yimin¹, NAUMAN Ali¹

(1. State Key Laboratory of Tibetan Plateau Earth System Science (LATPES),

Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. College of Resources and Environment, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Research Center of Big Data Technology, Nanhu Laboratory, Jiaxing 314000, Zhejiang, China)

Abstract: Glaciers in Mt. Kangri Karpo of southeastern Qinghai – Tibet Plateau are marine glaciers, which are more sensitive to global climate change than continental ones. It is of great significant to investigate glacier coverage

changes at Mt. Kangri Karpo for a better knowledge of climate change effects. Unfortunately, the frequent cloudy weather at Mt. Kangri Karpo limits the quality of optical images, which has become a bottleneck for glacier studies in the area. Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (D-InSAR), provides a more accurate way to study glacier elevation changes. Based on TerraSAR / TanDEM-X data in 2014 and SRTM DEM in 2000, this research studied geodetic glacier surface elevation change and geodetic glacier mass balance changes in the southeast of Mt. Kangri Karpo. The results showed that: (1) During 2000—2014, the glacier geodetic mass change was -1.69 ± 0.12 Gt, i. e. the averaged glacier surface elevation change was -0.86 ± 0.13 m \cdot a $^{-1}$. (2) The glacier surface elevation change had a positive correlation with the altitude. The Pearson coefficient was 0.93. At the altitude of 3700 ~ 3900 m \cdot a. s. l., the glacier surface downwasting was more dramatic as the altitude increases. From 3900 m to 5800 m \cdot a. s. l., glacier surface elevation change gradually increased from a negative value to zero. While above 5800 m \cdot a. s. l., the glacier surface elevation change was always positive in the accumulation area. (3) The debris-covered glaciers melted faster (the average surface elevation change was by -1.71 m \cdot a $^{-1}$) than the exposed glaciers (-0.73 m \cdot a $^{-1}$). (4) According to the meteorological data at Bomi, Zayu and Zuogong stations, it showed that the annual mean air temperature had increased significantly during 2000—2014, while the annual precipitation did not present obvious change trend. Therefore, the rapid melting of glaciers was mainly caused by regional rising temperatures. This study provides basic data support for understanding the spatial-temporal glacier changes in the Qinghai – Tibet Plateau.

Key words: glacier change; TerraSAR/TanDEM-X; Differential Intereferometric Synthetic Aperture Radar (D-InSAR); climate change; Mt. Kangri Karpo; the Qinghai – Tibet Plateau