

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0038

ZHANG Taigang, GAO Tanguang, DIAO Wenqin, et al. Snow/ice albedo variation and its impact on glacier mass balance in the Qilian Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(1):145–157. [张太刚, 高坛光, 刁文钦, 等. 祁连山区雪冰反照率变化及其对冰川物质平衡的影响[J]. 冰川冻土, 2021, 43(1):145–157.]

# 祁连山区雪冰反照率变化及其对冰川物质平衡的影响

张太刚<sup>1</sup>, 高坛光<sup>1,2</sup>, 刁文钦<sup>1</sup>, 张玉兰<sup>2,3</sup>

(1. 兰州大学 资源环境学院 西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 中国科学院 青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101)

**摘 要:** 雪冰反照率能够改变冰川表面能量收支平衡, 是影响冰川消融的重要因素之一。利用祁连山区冰川面积矢量数据、MODIS 逐日积雪反照率、气温和降水以及冰川物质平衡等数据, 探讨了祁连山典型冰川区雪冰反照率特征及其对冰川物质平衡的影响。结果表明: 祁连山区冰川多年平均反照率为 0.532, 冰川区面积大小与其多年平均反照率之间呈显著正相关 ( $R^2=0.16, P<0.05, N=91$ ), 即冰川面积缩减 1 km<sup>2</sup>, 对应的平均反照率下降 0.0025。祁连山老虎沟 12 号冰川反照率在夏季有明显的海拔效应, 且强于其他时段, 达到  $0.047 \cdot (100\text{m})^{-1}$ 。典型冰川年均物质平衡量与冰川表面夏季 (6—8 月) 平均反照率之间存在显著的正相关关系, 老虎沟 12 号冰川和七一冰川决定系数  $R^2$  分别达到了 0.48 ( $P<0.05$ ) 和 0.66 ( $P<0.05$ )。冰川表面夏季平均反照率这一指标能够较好地衡量青藏高原北部祁连山区冰川物质平衡的变化。

**关键词:** 雪冰反照率; 冰川变化; 冰川物质平衡; 祁连山

**中图分类号:** P343.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)01-0145-13

## 0 引言

冰川是气候和水文过程的产物, 它的形成与发展深受气候变化的影响<sup>[1]</sup>。山地冰川是冰冻圈的重要组成部分, 对太阳辐射具有较高的反照率, 冰川加速消融深刻影响着冰冻圈地区水量平衡、水文过程乃至大气环流<sup>[2-3]</sup>。中国冰川面积在全球排名第四<sup>[4]</sup>, 冰川资源十分丰富。发源于青藏高原及其周边地区的数条重要河流 (如黄河、长江、印度河和恒河) 均受到雪冰融水的补给, 冰川的动态变化不仅影响河流下游几十亿人的生产生活和社会经济的稳定发展<sup>[5-6]</sup>, 还对全球气候变化和海平面升高等具有重要影响<sup>[3,7-8]</sup>。

雪冰反照率可影响冰川表面能量收支状况, 特

别是雪冰反照率的降低可显著加速冰川表层雪的老化过程, 是影响雪冰消融的重要因素之一<sup>[9-11]</sup>。冰川表面反照率的变化受诸多因素的控制, 如气温、降水、成冰作用、黑碳等, 其中黑碳等吸光性杂质 (包括黑碳、粉尘、有机碳等) 的影响备受关注<sup>[12-16]</sup>。由于吸光性杂质的存在, 雪冰表面变暗, 促进雪的老化以及雪粒径的增大, 加速雪冰消融; 该过程又使得吸光性杂质富集于冰川表面且浓度进一步增大, 进而导致冰川反照率的持续降低<sup>[11,15]</sup>, 形成正反馈作用。目前, 基于 WRF-Chem 模式模拟以及卫星数据评估结果表明, 季风时期, 吸光性杂质的作用可导致喜马拉雅冰川区反照率降低 4%~8%, 导致的辐射强迫可达  $30\sim50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ <sup>[17]</sup>, 雪冰消融加

收稿日期: 2019-12-14; 修订日期: 2020-08-28

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目 (2019QZKK0605); 国家自然科学基金项目 (41671067; 41690141); 中国科学院“西部之光”人才培养计划项目 (张玉兰); 冰冻圈科学国家重点实验室自主课题 (SKLCS-ZZ-2020) 资助

作者简介: 张太刚, 硕士研究生, 主要从事冰湖研究. E-mail: zhangtg16@lzu.edu.cn

通信作者: 张玉兰, 副研究员, 主要从事冰冻圈气候与环境变化研究. E-mail: yulan.zhang@lzb.ac.cn; 高坛光, 副教授, 主要从事冰冻圈环境记录研究. E-mail: gaotg@lzu.edu.cn

剧,并可影响该地区的水循环过程。这种影响在喜马拉雅西部地区更为显著,反照率降低导致的雪冰消融可达 $3.00\sim 9.65\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ <sup>[18]</sup>。

研究发现,对藏东南地区冰川而言,由于反照率降低而导致的雪冰消融约为 $350\text{ mm w. e.}\cdot\text{a}^{-1}$ ,其贡献可达总消融量的15%<sup>[10]</sup>。青藏高原西部帕米尔地区冰川雪冰表面反照率降低对冰川消融的贡献可达6.3%,对应的冰川夏季消融速率可增加 $0.8\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ <sup>[14]</sup>。高原北部的祁连山老虎沟12号冰川,由于消融期雪冰反照率降低而导致的冰川消融量为 $200\sim 400\text{ mm w. e.}$ ,占总消融量的20%~40%<sup>[12]</sup>。上述研究进一步证实,雪冰反照率的变化深刻影响着冰川的物质能量平衡。但是,在青藏高原地区,基于观测与模拟的冰川反照率变化及其与物质平衡之间的研究仍显薄弱,特别是较大范围内雪冰反照率的变化特征及其对冰川物质平衡的影响亟待加强。

祁连山位于青藏高原北部边缘,冰川及其融水是我国西北干旱区重要的水资源,对绿洲生态系统及其社会经济可持续发展有重要意义。祁连山冰川目前处于亏损状态,普遍退缩减薄<sup>[3,19-21]</sup>。整体上,冰川面积和储量减少幅度呈山区南坡大于北坡、东侧大于西侧的特征<sup>[22]</sup>。已有研究发现,老虎沟12号冰川雪冰反照率的降低显著影响其消融<sup>[12]</sup>,但目前仍缺乏对祁连山地区冰川反照率变化及其物质平衡的系统性研究。鉴于此,本文利用美国国家雪冰数据中心提供的逐日积雪反照率数据、中国气象数据网提供的气象数据进行系统分析与归纳,以期阐明祁连山区典型冰川区反照率的时空变化特征及其影响因素,厘清冰川面积与雪冰反照率变化之间的响应关系,结合两条典型冰川(老虎沟12号冰川和七一冰川)探讨冰川反照率变化对冰川物质平衡的影响,为进一步研究冰川变化以及对冰川水资源的影响提供新的有益参考。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区概况

祁连山位于青藏高原北部边缘,周边分布着沙漠、戈壁和荒漠。祁连山区内由多条西北—东南走向的山系组成(图1)。根据《中国第二次冰川编目》统计,祁连山区共发育冰川2 683条,冰川面积 $1\,579.81\text{ km}^2$ ,冰储量 $88.48\text{ km}^3$ <sup>[23]</sup>,这些冰川分属于黄河水系、柴达木内流水系、以及河西内流水系。

祁连山位于我国西北干旱区与半干旱区的中心,冰川融水径流可以占到出山口径流的22%,在有些地区甚至更高<sup>[24]</sup>,为周边地区经济社会的发展提供了重要水资源保障<sup>[25]</sup>。因此,这一地区冰川的发育与演替,对其自身和周边区域的自然环境和人类活动都会产生重大影响。

祁连山地区的气候全年受中纬度西风环流的影响,但在夏季山区的南部和东部可以分别受到南亚季风和东亚季风的影响<sup>[26]</sup>。祁连山周边分布着大量的沙漠、戈壁,其对全球气候变化非常敏感,是生态环境最为脆弱的地区之一。过去40多年来,受全球气候变化的影响,祁连山区整体呈现暖湿化的趋向,平均气温和降水量的增加速率分别达到 $0.38\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 和 $9.7\text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ <sup>[27]</sup>。根据Liu等<sup>[28]</sup>对冰芯及气象数据的分析,老虎沟12号冰川退缩的主要原因是温度的升高,温度升高 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 所造成的冰川消融量需要降水增加30%来弥补<sup>[29]</sup>。

目前,祁连山地区面积小于 $1\text{ km}^2$ 的冰川急剧萎缩导致冰川面积显著减少。到1990年,祁连山西段,冰川面积和冰储量相较于1956年分别减少了10.3%和9.3%;而在1956—2003年期间,祁连山中段冰川面积减少了21.7%;祁连山东段冷龙岭地区,1972—2012年,冰川面积从 $101.6\text{ km}^2$ 减少到 $66.7\text{ km}^2$ ,面积退缩率达到 $0.86\%\cdot\text{a}^{-1}$ ,部分冰川完全消失,冰川整体处于退缩状态<sup>[23,30-31]</sup>。1956—2010年祁连山区冰川面积和冰储量分别减少 $420.81\text{ km}^2$ (约占20.88%)和 $21.63\text{ km}^3$ (约占20.26%),冰川数量和面积在各个朝向均呈减少势态<sup>[23,32]</sup>。

老虎沟12号冰川(冰川编号5Y448D0012,  $39^{\circ}26.4'\text{ N}$ 、 $96^{\circ}32.5'\text{ E}$ ),位于祁连山西段边缘北坡,隶属于疏勒河上游区域,是该区域最大的山谷型冰川,按冰川的物理特性分类,属于极大陆型冰川。该冰川由东西两支组成,全长 $9.8\text{ km}$ ,面积为 $21.03\text{ km}^2$ ,平均厚度为 $101.05\text{ m}$ ,冰川末端海拔 $4\,300\text{ m}$ ,冰川朝向北[图1(b)]。降水主要发生在春夏季,4—9月降水量占到全年降水的84%<sup>[12]</sup>。过去50多年来,老虎沟12号冰川退缩了约 $240\text{ m}$ <sup>[19]</sup>,2000—2014年高程年均变化为 $-0.29\text{ m}$ <sup>[20]</sup>,2012年6月1日—9月30日模拟的冰川物质平衡为 $-506\text{ mm w. e.}$ <sup>[21]</sup>。七一冰川(冰川编号5Y437C18,  $39^{\circ}14.22'\text{ N}$ 、 $97^{\circ}45.34'\text{ E}$ )位于祁连山走廊南山西段,冰川融水流入北大河支流柳沟泉河,最高峰海

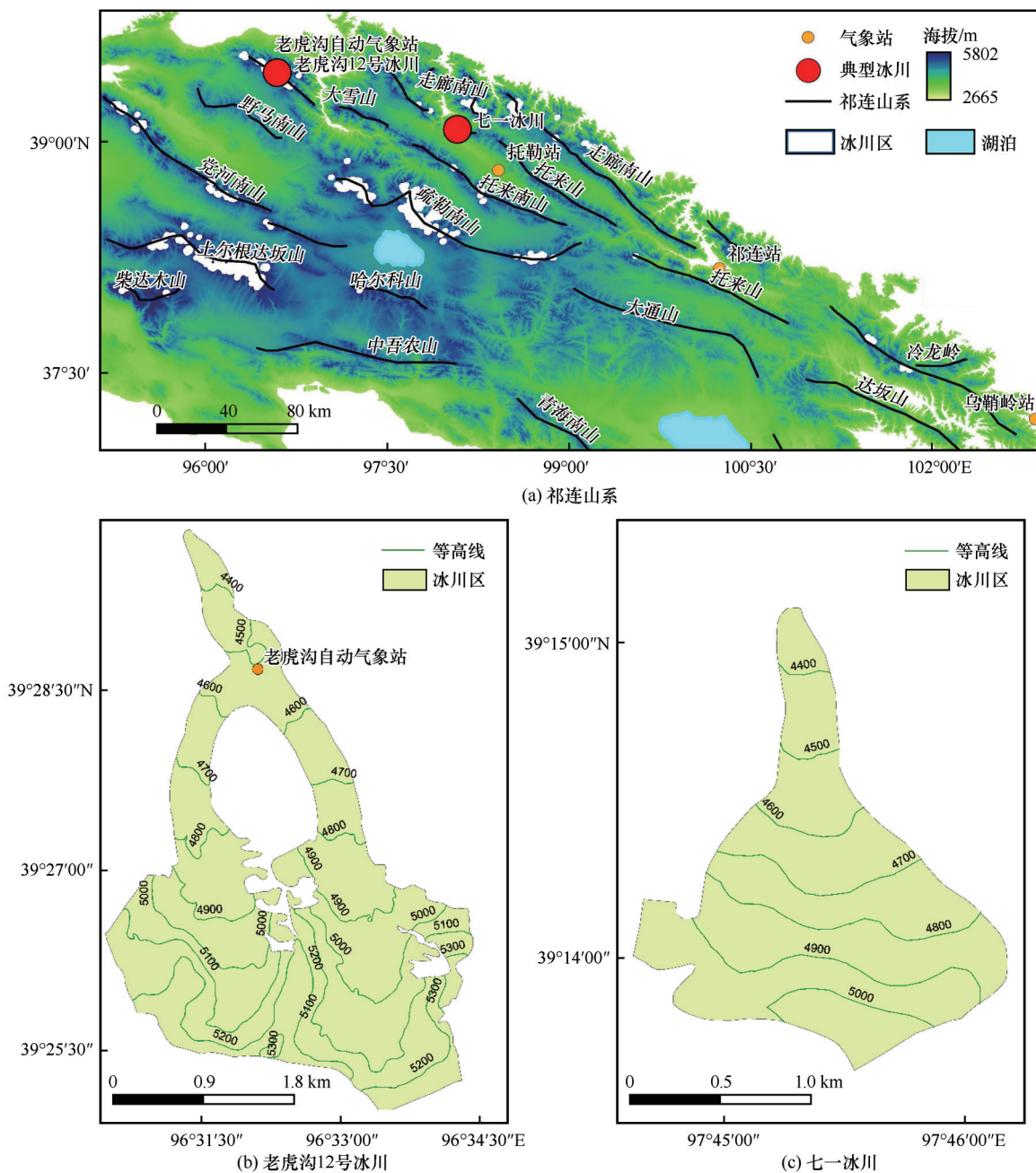


图 1 祁连山系(a)及老虎沟 12 号冰川(b)和七一冰川(c)示意图

Fig. 1 The Qilian Mountains system (a), and sketch map of Laohugou Glacier No. 12 (b) and Qiyi Glacier (c)

拔 5 158.8 m, 冰川规模较小, 面积 2.53 km<sup>2</sup>, 冰川主体朝向北[图 1(c)], 按冰川的物理特性分类, 属于亚大陆型冰川<sup>[33]</sup>。

## 1.2 数据与处理方法

### 1.2.1 数据来源及处理方法

MODIS 识别积雪的方法主要是利用了积雪在波长 1.6 μm 处的强吸收特性<sup>[-34-35]</sup>。MOD10A1 (MODIS/Terra Snow Cover Daily L3 Global 500 m SIN Grid V006) 积雪产品是美国国家雪冰数据中心 (NSIDC) 发布的逐日积雪产品, 空间分辨率 500 m,

利用专门为地球观测系统设计的数据存储格式 EOS-HDF 进行分层存储。该产品由积雪分类、积雪反照率、积雪覆盖率以及质量控制四部分组成。

在老虎沟冰川海拔约 4 500 m 处[图 1(b)], 建立了一个自动气象站进行了连续 6 年的持续观测, 实测数据显示, 2010 年、2013 年、2014 年及 2015 年这 4 年的年平均反照率分别为 0.52、0.43、0.46 和 0.54<sup>[36]</sup>, 这与 MODIS 遥感数据的观测结果相近, 分别为 0.52、0.40、0.42、0.54, 这说明此反照率产品在本地区拥有良好的适用性, 可以用于积雪反照率



时空变化研究。本文利用祁连山冰川面积矢量数据和美国国家雪冰中心提供的地表反射率产品 MYD09A1 (MODIS/Terra Surface Reflectance 8-Day L3 Global 500 m SIN Grid V006), 提取冰川有效行列号, 按照子流域编号归类各冰川区, 之后利用 Matlab 程序提取积雪产品 MOD10A1 (2001—2017 年) 数据层中的积雪反照率数据 (SAD), 产品编码为 h25v05 和 h26v05。考虑到陆地对雪冰反照率的影响, 本文将未包裹在冰川边界内部的像元全部剔除。去掉云影响及其他无效值的 MODIS 反照率产品, 在各个冰川区实际运用率达到 37.1%, 最高为 47.7%, 最低 30.0%。

老虎沟 12 号冰川物质平衡数据来源于文献 [12], 其采用测杆和雪坑相结合的单点物质平衡观

测方法, 在冰川上共布置 14 行观测杆, 每排垂直间隔约 50 m。七一冰川物质平衡数据来源于文献 [6]。

### 1.2.2 祁连山冰川区划分

子流域编号与《中国冰川目录》中冰川编码格式含义一致。每一个子流域冰川区可能包含一条或多条冰川, 如老虎沟流域冰川区 (5Y448D), 包含 43 条冰川 (5Y448D0001~5Y448D0043)。按照这种分类方法, 将祁连山冰川区 (指包含有反照率数据的) 共分为 91 个不同的区域。在这 91 个子流域中所包含的冰川共 1 455 条, 面积达 1 281.4 km<sup>2</sup>, 占整个祁连山冰川总面积的 80%。为系统全面的分析其反照率时空变化特性, 按照冰川的地理分布特征, 将上述 91 个子流域冰川区整合为以下 15 个冰川区 [图 2(a)]。

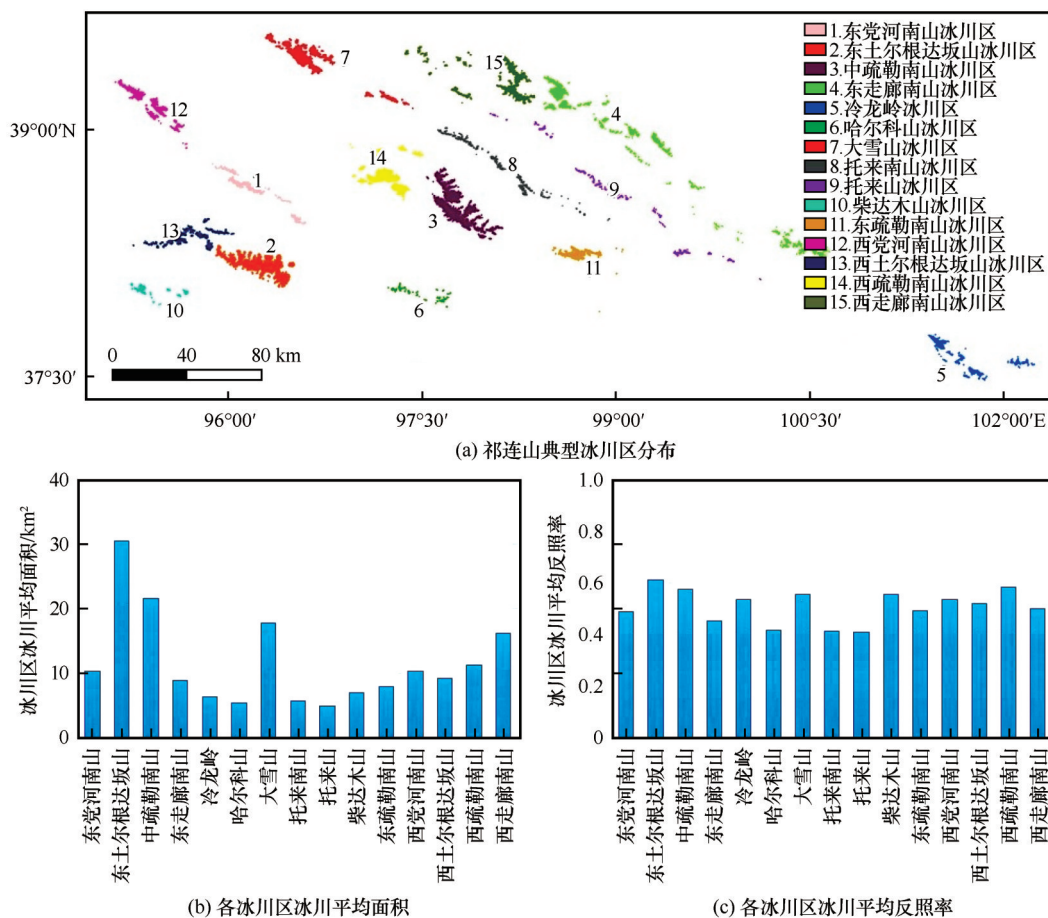


图2 祁连山典型冰川区分布(a)及各冰川区冰川平均面积(b)和反照率(c)

Fig. 2 Distribution of 15 typical glacier regions in the Qilian Mountains (a), and their average glacierized areas (b) and albedos (c)

## 2 结果与讨论

### 2.1 研究区冰川面积与反照率的关系

祁连山地区冰川反照率空间变化存在差异, 多年平均反照率变化范围为 0.34~0.74。全球变暖

导致了大规模冰川活动加剧, 较小的冰川比较大的冰川退缩更严重<sup>[3]</sup>。在祁连山, 反照率的空间变化特征为西部大、东部小, 这也与冰川区的面积相适应, 如西部东土尔根达坂山冰川区冰川平均面积达 30.48 km<sup>2</sup>, 多年平均反照率为 0.612; 东部的东走

廊南山冰川区冰川平均面积为  $8.8 \text{ km}^2$ , 多年平均反照率为  $0.453$ , 低于平均水平(图2)。整个祁连山冰川区冰川多年平均反照率为  $0.532 \pm 0.09$ , 与冰川面积之间呈一定的正相关关系( $R^2=0.16$ ,  $P<0.05$ )[图3(a)]。祁连山区可提取反照率值的冰川共  $1455$  条, 分散在  $91$  个不同的子流域中, 分别分布在图2(a)所示的  $15$  个冰川区中, 其中流域冰川面积大于  $20 \text{ km}^2$  的有  $22$  个, 面积小于  $5 \text{ km}^2$  的有  $21$  个[图3(a)]。在所研究的  $22$  个大冰川流域中, 有  $86\%$  的冰川反照率值高于祁连山冰川区多年平均反照率值  $0.532$ , 其多年反照率达到  $0.587$ ; 而在  $21$  个小流域冰川区中, 只有  $28\%$  超过了  $0.532$ , 其多年平均反照率为  $0.490$ 。该结果表明, 冰川面积

大, 雪冰反照率会偏向于高值, 小冰川较低的反照率更易于导致冰川消融加速。以老虎沟12号冰川和七一冰川为例, 老虎沟12号冰川多年反照率为  $0.661$ , 而七一冰川为  $0.439$ 。相比于大冰川, 小冰川的冰川作用正差和雪线以上的冰川面积小, 对气候变化更加敏感, 气温升高导致冰川平衡线上移, 很可能会超过流域最高高度, 使整个冰川都处于消融状态而没有积雪/粒雪的分布。大冰川由于有较高的海拔, 夏季表面还会存在积雪/粒雪, 导致较高的反照率。另外, 小冰川周围多裸露基岩, 风力容易将尘埃物质吹扬到冰川表面, 造成反照率偏低。这些原因共同造成小冰川与大冰川之间的反照率差异。

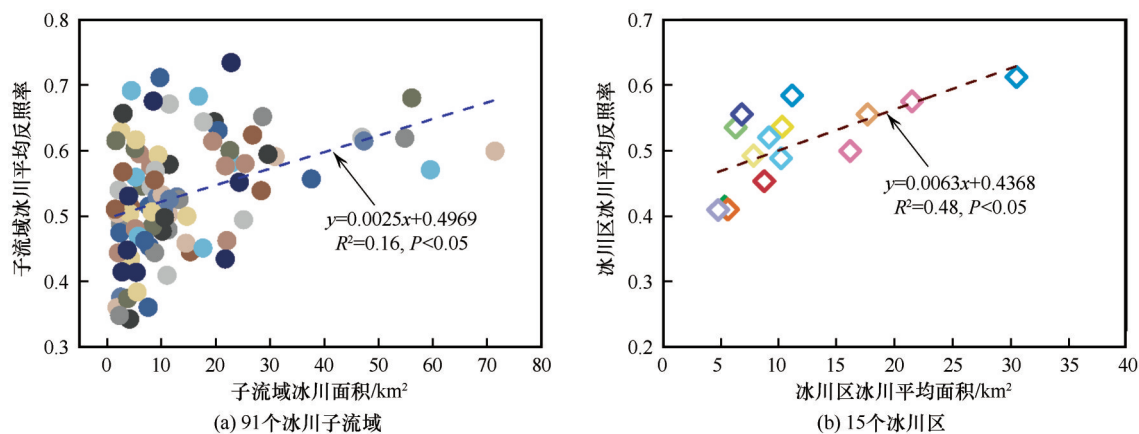


图3 祁连山冰川面积与反照率的关系

Fig. 3 The relationship between glacierized area and albedo in the Qilian Mountains: 91 glacier sub-basins (a), and 15 typical glacier regions (b)

不同冰川区所研究的冰川的平均面积以及反照率结果也显示, 较大的冰川区雪冰反照率相比于小冰川区更趋向于高值[图2(b)和(c)]。分析表明, 在这些冰川流域中, 当冰川面积减小  $1 \text{ km}^2$ , 平均反照率就要下降  $0.0025$ [图3(a)]。而对于祁连山各冰川区来说, 冰川面积减小  $1 \text{ km}^2$ , 平均反照率下降  $0.0063$ [图3(b)]。

## 2.2 典型冰川表面反照率变化特征

对典型冰川而言, 老虎沟12号冰川年均雪冰反照率变化虽有波动, 但幅度不大, 平均反照率约为  $0.661$ , 变化范围为  $0.62 \sim 0.70$ [图4(a)], 随时间并无显著变化趋势。该冰川年均反照率最低值出现在2013年, 为  $0.627$ ; 最高值出现在2008年, 为  $0.694$ 。对面积较小的七一冰川分析结果表明, 年均反照率为  $0.439$ , 且各时段的反照率值均低于老虎沟12号冰川; 冰川反照率在2013年出现最低值, 为  $0.383$ ;

最高值出现在2008年, 为  $0.478$ [图4(b)]。

在研究时段内, 老虎沟12号冰川雪冰反照率的季节变化大致相似, 月均反照率最低值大部分出现在8月(平均为  $0.514$ ), 次之出现在7月; 冰川月均反照率最高值大致出现在1月或2月, 平均为  $0.769$ , 之后逐渐降低。但在某些年份(如2001、2006、2013年), 雪冰反照率从4月开始有一个短暂的升高, 进入6月后迅速降低并在7月或8月出现最小值[图4(c)]。老虎沟12号冰川反照率在夏季消融期出现低值这一特征, 与该冰川海拔  $4550 \text{ m}$  处的实测结果一致<sup>[12]</sup>。对七一冰川而言, 雪冰反照率通常在2月出现极小值, 之后升高, 到7月或8月再出现极小值[图4(d), 表1]。

祁连山老虎沟12号冰川积累区朝向北, 消融区朝向西北。多年平均反照率在空间的分布上呈现由高海拔向低海拔降低的趋势, 这与海拔效应相一

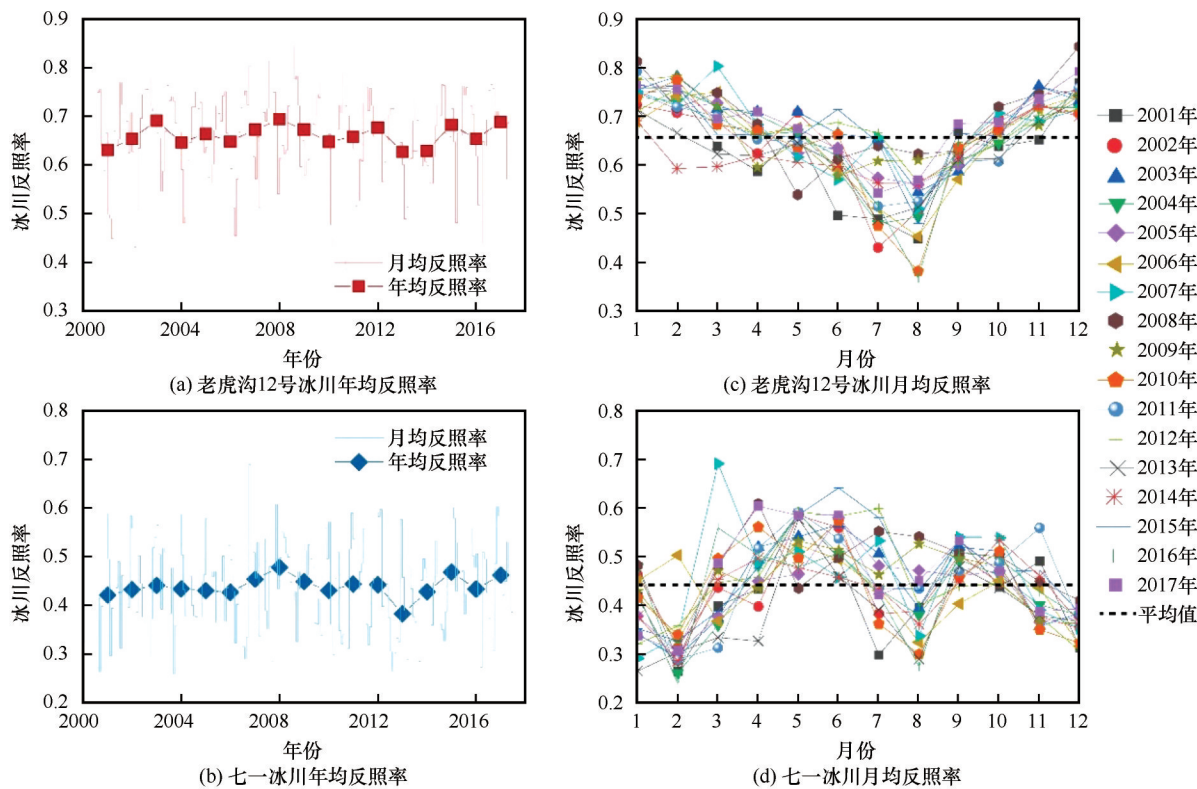


图4 祁连山老虎沟12号冰川与七一冰川2001—2017年反照率变化(a, b)及老虎沟12号冰川和七一冰川月均反照率变化(c, d)  
Fig. 4 Variations of albedo for Laohugou Glacier No. 12 (a) and Qiye Glacier (b) in the Qilian Mountains during 2001—2017, and monthly average albedos for Laohugou Glacier No. 12 (c) and Qiye Glacier (d)

表1 祁连山老虎沟12号冰川和七一冰川月均反照率及其变化趋势  
Table 1 Monthly average albedos for Laohugou Glacier No. 12 and Qiye Glacier in the Qilian Mountains and their changing trend

月份	老虎沟12号冰川		七一冰川	
	多年平均反照率	变化趋势	多年平均反照率	变化趋势
1	0.747	无( $P>0.05$ )	0.385	下降( $R^2=0.16, P=0.1$ )
2	0.732	无( $P>0.05$ )	0.313	无( $P>0.05$ )
3	0.700	无( $P>0.05$ )	0.436	无( $P>0.05$ )
4	0.659	无( $P>0.05$ )	0.481	无( $P>0.05$ )
5	0.652	无( $P>0.05$ )	0.537	无( $P>0.05$ )
6	0.619	上升( $R^2=0.18, P=0.1$ )	0.529	无( $P>0.05$ )
7	0.557	无( $P>0.05$ )	0.453	无( $P>0.05$ )
8	0.514	无( $P>0.05$ )	0.393	无( $P>0.05$ )
9	0.627	无( $P>0.05$ )	0.489	无( $P>0.05$ )
10	0.665	无( $P>0.05$ )	0.478	无( $P>0.05$ )
11	0.718	无( $P>0.05$ )	0.413	无( $P>0.05$ )
12	0.743	无( $P>0.05$ )	0.359	无( $P>0.05$ )

致[图5(a)]。高反照率值出现在海拔5 100~5 200 m范围内的平坦粒雪盆[图5(a)中1#、2#],为0.731。海拔5 200 m往上的区域,冰川反照率并不会随海拔的升高而升高,主要原因可能与冰川边缘往往是由被积雪覆盖的山体有关,该区域地形起伏较大,通常会有岩石出露,造成反照率的降低。这可能也是东支冰川的反照率要明显高于西支冰川的原因,是海拔和地形共同作用的结果,如在图5(a)中3#区,地形变幅大,相比于同海拔地区,反照率明显偏低。在图5(a)中4#区,处于平衡线附近,此处往往是反照率变化最为敏感的地区。在反照率的变化上,东支冰川也是高于西支冰川的[图5(b)]。反照



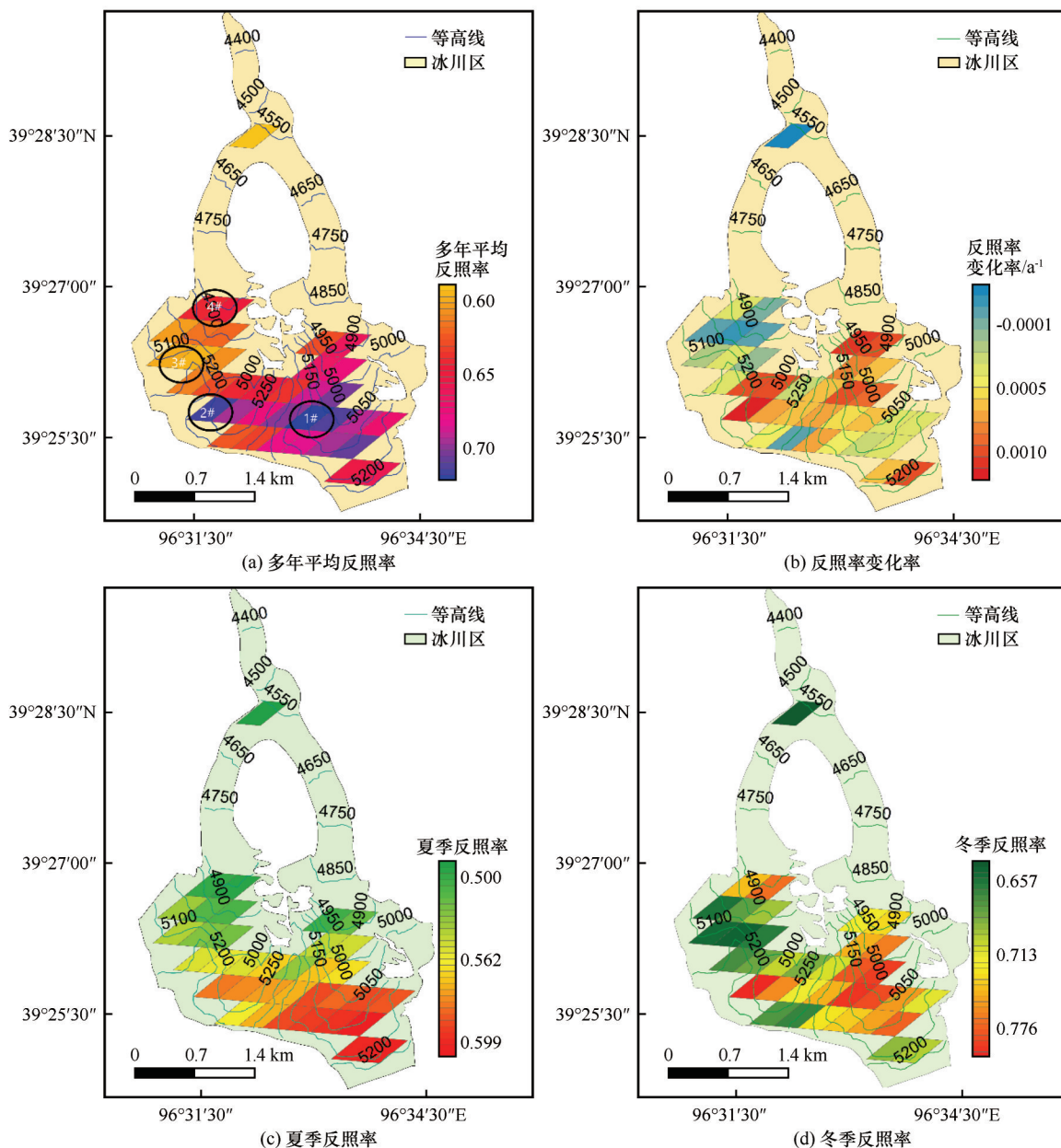


图5 祁连山老虎沟12号冰川反照率空间分布

Fig. 5 The spatial distribution of albedo for Laohugou Glacier No. 12, Qilian Mountains: annual averaged albedo (a), change rate of albedo (b), albedo in summer (c), and albedo in winter (d)

率在夏季,有着明显的随海拔升高而增加的趋势,变化幅度可达到 $0.047 (100\text{m})^{-1}$ [图5(c)],夏季平均反照率为0.555。而在冬季,平均反照率可达0.726,反照率会在冰川上游开阔处表现出高值,为0.808,并未表现出明显的海拔效应[图5(d)]。

### 2.3 雪冰反照率变化的影响因素

已有研究表明,雪冰反照率的变化受当地降水、气温、太阳高度角、以及冰川表面的吸光性杂质(如黑碳和粉尘)等的影响<sup>[3, 12-13, 37]</sup>。气温从物理上影响冰川表面反照率,温度升高可导致冰川积累区

面积缩小,雪的变质老化作用由于辐射的增强而加快,细粒雪更快的向粗粒雪转化,造成包括积累区在内的整个冰川的反照率下降<sup>[32]</sup>。该过程除了加速冰川表面新降雪消融转化,也会加速黑碳和粉尘等吸光性杂质的富集,进一步降低雪冰表面反照率而形成正反馈效应<sup>[11]</sup>。

在全球变暖的大背景下,遥感和实测数据均显示祁连山大部分地区气温升高的现象,通过站点观测的降水变化较小(图6)。祁连山东段冷龙岭冰川区,降水波动变化不大,而气温上升较快,乌鞘岭站

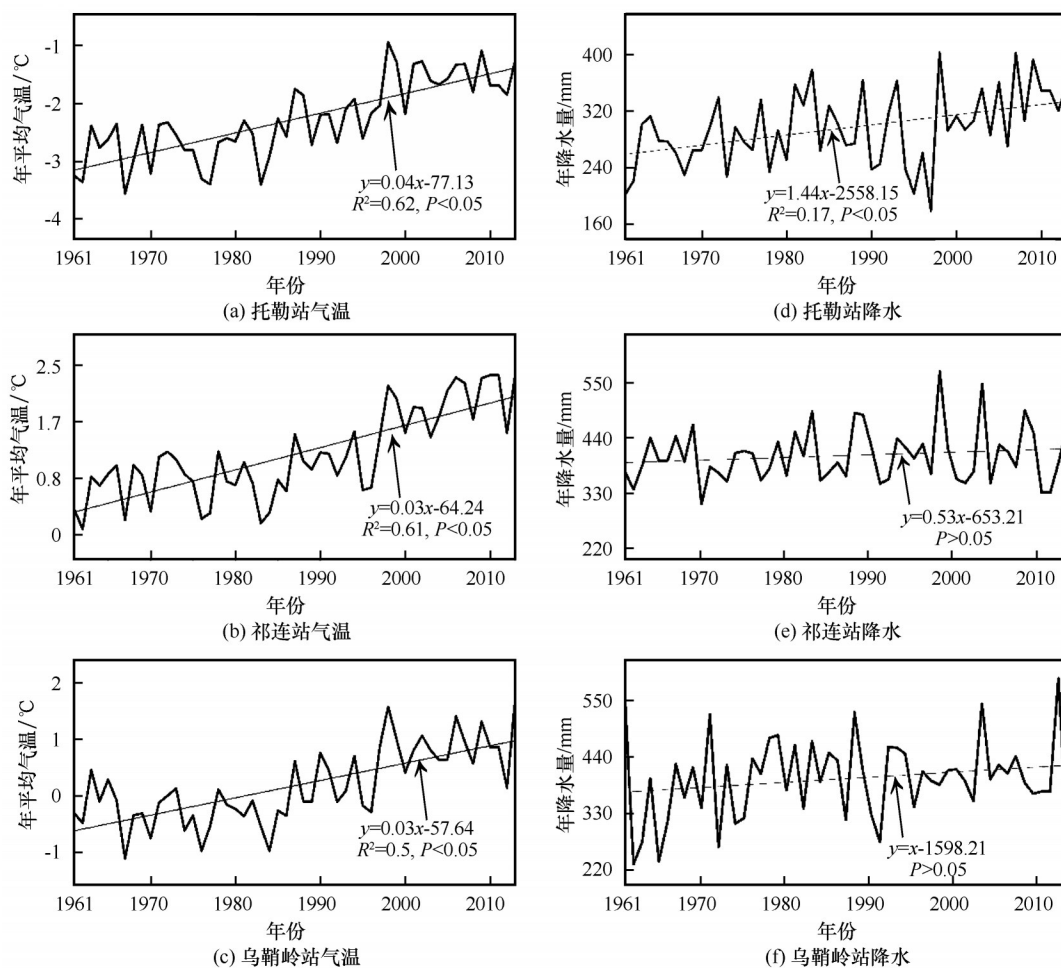


图6 祁连山地区气象台站1961—2012年气温与降水变化

Fig. 6 Annual variations of air temperature and precipitation recorded from the meteorological stations in the Qilian Mountains during 1961—2012

观测到年平均气温有明显随时间升高的趋势( $R^2=0.5$ ,  $P<0.05$ )。气温的升高可能是造成这一地区冰川反照率降低、冰川加速退化的主要原因。对老虎沟12号冰川而言,消融期内气温升高 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 导致月均雪冰消融增加 $10\sim 25\text{ mm w. e.}$  [12]。老虎沟12号冰川与七一冰川反照率虽然没有逐年下降的趋势[图4(a)和(b)],但两者的变化较为同步,有同增同减的特性,这说明影响两者反照率变化的很可能是同一因素。托勒站是最靠近这两条冰川的国家台站[图6(a)和(d)],近50年来的观测结果显示,在温度逐年升高的同时,降水也在增加( $R^2=0.17$ ,  $P<0.05$ )。Chen等[12]模拟了1960—2015年间老虎沟12号冰川的物质平衡变化,发现自2000年以来温度虽然持续上升,但冰川物质平衡并没有呈现急剧的负增长,且在2010年以后,由于降水的不断增加,老虎沟12号冰川负物质平衡状态减缓,在2015年甚至呈现正物质平衡状态。这表明降水增加对

雪冰反照率的影响弥补了因温度升高、吸光性杂质的富集而导致的反照率下降。这与青藏高原西部帕米尔地区冰川的变化较为类似[38–39],即降水增加或降水形态改变了冰川夏季雪线的分布位置,将雪线向下推移,消融区大范围、长时间的裸冰覆盖减少,黑碳吸光性杂质的富集减弱,导致冰川表面反照率增加,减缓冰川消融。

冰川反照率除了受气温、降水的影响外,近期对于冰川表面吸光性杂质(主要包括黑碳、粉尘、有机碳等物质)对雪冰消融的影响也备受关注[10,16]。特别由于近几十年来社会、经济的不断发展,排放到大气中的黑碳越来越多,这些物质沉降到冰川表面,降低雪冰反照率,同时气温升高会加快冰川消融,进而导致黑碳、粉尘等吸光性杂质在冰川表面富集,形成正反馈作用过程[9,11]。利用雪冰气溶胶反照率(SNICAR)[9]模型模拟的老虎沟12号冰川表层雪冰含有黑碳/粉尘和未含黑碳粉尘的反照率结



果表明(图7),雪冰中黑碳和粉尘的作用可显著加剧反照率的降低。在老虎沟12号冰川区2015年8月4—6日的实验发现,冰川表面新雪的黑碳浓度为 $193 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$  [40], 相对于纯雪模拟的反照率(图7, 0.793)而言,新雪中黑碳导致的反照率降低可达0.762,对反照率降低的贡献率可达13%;到第三天表面已经变为附加冰,黑碳浓度达到 $11\,040 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ , 浓度高了两个数量级,导致的反照率为0.509(图7),对反照率降低的贡献可达57%。已有研究表明,在青藏高原中部地区,黑碳和粉尘对反照率降低的贡献可达52%和25% [12],藏东南地区黑碳对雪冰反照率降低的贡献约为15% [10,41-42]。这表明,黑碳和粉尘等吸光性杂质对冰川反照率降低的影响不可忽略。特别是在冰川消融区,由于冰川消融导致黑碳等吸光性杂质在冰川表面富集,会进一步降低冰川反照率。

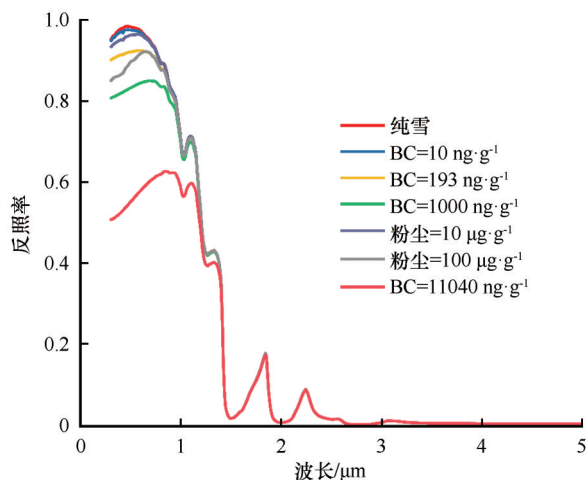


图7 SNICAR模型模拟的纯雪反照率以及雪冰中不同浓度黑碳(BC)和粉尘对反照率的影响

Fig. 7 The simulated albedo for pure snow and the impact of different concentrations of black carbon and dust on the snow/ice albedo by using SNICAR model

总体而言,冰川在消融季节的表面能量平衡普遍受太阳辐射的控制,其表面融化对反照率变化极其敏感。引起小冰川强烈退缩的原因主要是升温幅度大、冰川规模小以及冰川表面的黑碳等吸光性杂质的影响。

#### 2.4 反照率与冰川物质平衡的关系

Wu等 [35]对青藏高原中部小冬克玛底冰川的研究中发现,冰川年物质平衡与年反照率最低值之间存在显著的正相关关系。不同的地区会有不同的气候条件、大气状况和冰川性质,相对于用来衡量

物质平衡变化的反照率指标也有相当大的复杂性和不确定性。对老虎沟12号冰川和七一冰川的研究发现,两条冰川年物质平衡与一个物质平衡年的平均反照率之间存在显著的正相关关系,夏季(6—8月)平均反照率也同样与物质平衡存在显著的相关性(图8)。对老虎沟12号冰川而言[图8(a)和(b)],一个物质平衡年的平均反照率和夏季平均反照率与物质平衡拟合后决定系数 $R^2$ 分别达到了0.36( $P>0.05$ )、0.48( $P<0.05$ ),七一冰川则分别为0.54( $P<0.05$ )、0.66( $P<0.05$ ) [图8(c)和(d)]。冰川反照率指标与年物质平衡之间的良好线性关系可以很好地模拟重建出一个地区冰川物质平衡的历史变化 [43-44]。Zhang等 [45]根据小冬克玛底冰川反照率与年物质平衡的统计关系,重建了普若岗日冰盖、各拉丹冬山区冰川2000—2016年间的物质平衡变化,很好地剖析了高原中部冰川近年的变化特征。老虎沟12号冰川和七一冰川夏季平均反照率与年物质平衡之间良好的相关性,对研究祁连山地区冰川变化有着重要的意义。

观测结果发现,老虎沟12号冰川2014年的消融量为 $1\,003 \text{ mm w. e.}$ ,由于黑碳和粉尘等吸光性杂质导致反照率降低而增加的消融量约为 $200\sim 400 \text{ mm w. e.}$  [12]。夏季是整个冰川消融最剧烈的季节,雪冰反照率随着吸光性杂质的富集变化而变化,反照率的变化可直接体现出冰川消融的状况。夏季平均反照率更适合作为衡量冰川物质平衡变化的指标,但需要在其他冰川区上加强验证。

### 3 结论

本文利用2001—2017年MODIS逐日积雪反照率产品,阐明了祁连山冰川区反照率时空变化特性,探讨了反照率变化的影响因素以及与冰川面积大小的关系;基于老虎沟12号冰川和七一冰川物质平衡数据,评估了祁连山地区冰川反照率变化反映冰川物质平衡的适用性。主要结论如下:

(1)老虎沟12号冰川年均反照率变化虽有波动,但幅度不大,多年平均反照率为0.661,在0.62~0.70之间变化,没有明显的变化趋势。月均反照率中以1月反照率值最高,达到0.747,8月最低,为0.514。反照率在空间的分布上呈现由高海拔向低海拔递减的趋势,与海拔效应相一致,且东支冰川的反照率要明显高于西支冰川。七一冰川多年反照率0.439,其各个时段的反照率均低于老虎沟12

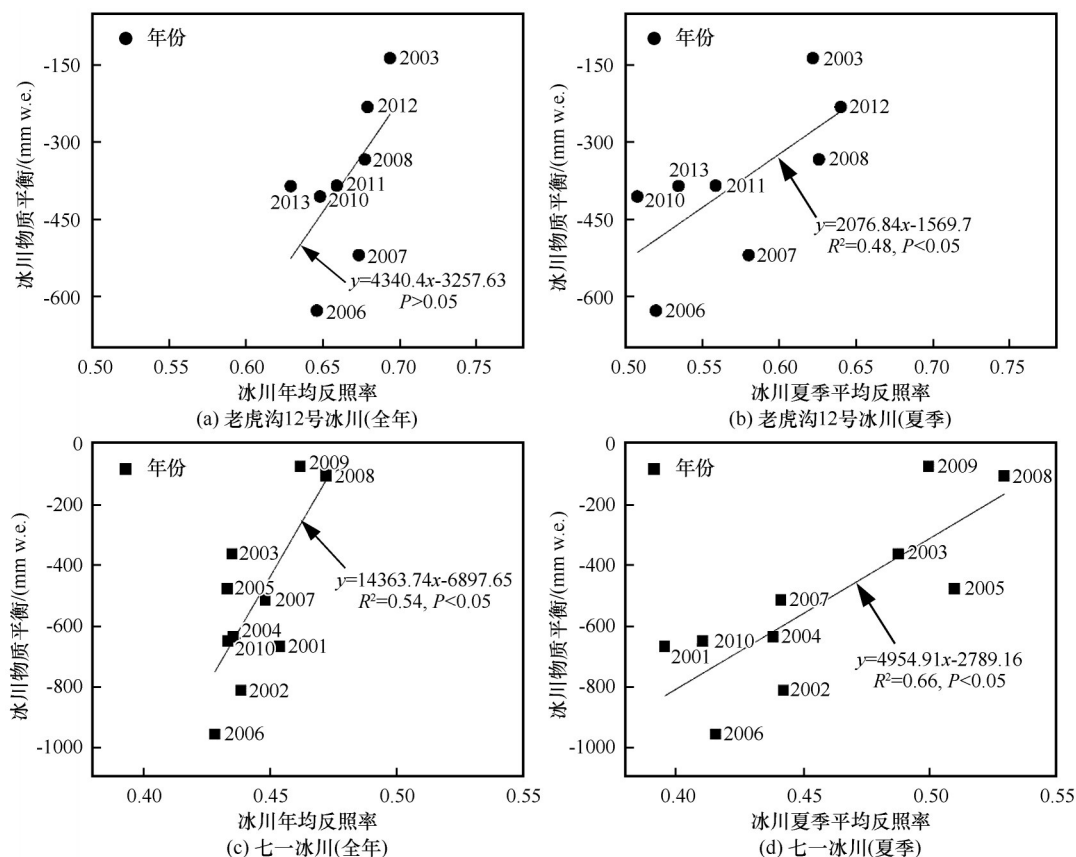


图8 祁连山老虎沟12号冰川(a,b)及七一冰川(c,d)年均反照率和夏季平均反照率与冰川物质平衡的关系  
Fig. 8 Relationship between annual and summer albedos and glacier mass balance for Laohugou Glacier No. 12 (a, b) and Qiyi Glacier (c, d) in the Qilian Mountains

号冰川区的反照率,月均反照率最高值出现在5月,为0.537,最低值出现在2月,为0.313。这种反照率的差异与人类活动的影响密不可分。老虎沟12号冰川反照率在夏季有着明显的海拔效应,且强于其他季节,达到 $0.047 \cdot (100\text{m})^{-1}$ 。

(2)祁连山冰川区多年反照率为0.532,冰川面积的大小与其年均反照率之间呈现出一定的正相关关系( $R^2=0.16, P<0.05$ ),即冰川面积越大,其反照率值就越高,冰川面积减小 $1\text{ km}^2$ ,平均反照率就要下降0.0025。影响反照率变化的主要原因归咎于气温、降水模式的变化以及冰川表面吸光性杂质的富集等因素的影响。祁连山大部分地区温度都在升高,但老虎沟12号冰川和七一冰川反照率并没有下降的趋势,其主要原因是降水的增加使得雪冰反照率增大,弥补了因气温升高、吸光性杂质富集损失的部分。夏季消融期,冰川表面黑碳和粉尘等吸光性杂质的富集对反照率降低有相当大的贡献。

(3)对老虎沟12号冰川和七一冰川的研究发现,两条冰川年物质平衡与夏季(6—8月)平均反照

率之间存在显著的相关性。对老虎沟12号冰川而言,夏季平均反照率与物质平衡拟合后决定系数 $R^2$ 达到了0.48( $P<0.05$ ),七一冰川为0.66( $P<0.05$ )。夏季平均反照率更适合作为衡量冰川物质平衡变化的指标,但需要在其他地方加强验证。

#### 参考文献(References):

- [1] Shi Yafeng. Glaciers and their environment in China: the present, past and future[M]. Beijing: Science Press, 2000: 101-105. [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: 101-105.]
- [2] Huss M, Hock R. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss[J]. Nature Climate Change, 2018, 8(2): 135-140.
- [3] 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.
- [4] Shi Yafeng. Concise glacier inventory of China[M]. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2005. [施雅风. 简明中国冰川目录[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2005.]
- [5] Immerzeel W W, van Beek L P H, Bierkens M F P. Climate change will affect the Asian water towers[J]. Science, 2010, 328: 1382-1385.
- [6] Yao Tandong, Thompson L, Mosbrugger V, et al. Third Pole

- Environment (TPE) [J]. *Environmental Development*, 2012, 3: 52-64.
- [7] Jacob T, Wahr J, Pfeffer W T, et al. Recent contributions of glaciers and ice caps to sea level rise [J]. *Nature*, 2012, 482: 514-518.
- [8] Neckel N, Kropáček J, Bolch T, et al. Glacier mass changes on the Tibetan Plateau 2003-2009 derived from ICESat laser altimetry measurements [J/OL]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(1) [2021-02-06]. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/9/1/014009/pdf>.
- [9] Flanner M G, Zander C S, Randerson J T, et al. Present-day climate forcing and response from black carbon in snow [J/OL]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112 (D11) [2021-02-06]. [https://www.onacademic.com/detail/journal\\_1000035771384310\\_e4a7.html](https://www.onacademic.com/detail/journal_1000035771384310_e4a7.html).
- [10] Zhang Yulan, Kang Shichang, Cong Zhiyuan, et al. Light-absorbing impurities enhance glacier albedo reduction in the south-eastern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(13): 6915-6933.
- [11] Bond T C, Doherty S J, Fahey D W, et al. Bounding the role of black carbon in the climate system: a scientific assessment [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(11): 5380-5552.
- [12] Chen Jizu, Qin Xiang, Kang Shichang, et al. Potential effects of black carbon on glacier mass balance during the past 55 years of Laohugou Glacier No. 12, western Qilian Mountains [J]. *Journal of Earth Science*, 2020, 31: 410-418.
- [13] Qian Yun, Yasunari T J, Doherty S J, et al. Light-absorbing particles in snow and ice: measurement and modeling of climatic and hydrological impact [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2015, 32(1): 64-91.
- [14] Schmale J, Flanner M, Kang Shichang, et al. Modulation of snow reflectance and snowmelt from Central Asian glaciers by anthropogenic black carbon [J/OL]. *Scientific Reports*, 2017, 7 [2021-02-06]. <https://doi.org/10.1038/srep40501>.
- [15] Skiles S M K, Flanner M, Cook J M, et al. Radiative forcing by light-absorbing particles in snow [J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8(11): 964-971.
- [16] Xu Baiqing, Cao Junji, Hansen J, et al. Black soot and the survival of Tibetan glaciers [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(52): 22114-22118.
- [17] Sarangi C, Qian Yun, Rittger K, et al. Impact of light-absorbing particles on snow albedo darkening and associated radiative forcing over high-mountain Asia: high-resolution WRF-Chem modeling and new satellite observations [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19(10): 7105-7128.
- [18] Thind P S, Chandel K K, Sharma S K, et al. Light-absorbing impurities in snow of the Indian Western Himalayas: impact on snow albedo, radiative forcing and enhanced melting [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26: 7566-7578.
- [19] Du Wentao, Qin Xiang, Liu Yushuo, et al. Variations of the Laohugou Glacier No. 12 in the Qilian Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(3): 373-379. [杜文涛, 秦翔, 刘宇硕, 等. 1958-2005年祁连山老虎沟12号冰川变化特征研究[J]. *冰川冻土*, 2008, 30(3): 373-379.]
- [20] Zhang Qibing, Kang Shichang, Wang Jing. Elevation change of the Laohugou Glacier No. 12 in the western Qilian Mountains from 2000 to 2014 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(4): 733-740. [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.]
- [21] Chen Jizu, Qin Xiang, Wu Jinkui, et al. Simulating the energy and mass balance on the Laohugou Glacier No. 12 in the Qilian Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(1): 38-47. [陈记祖, 秦翔, 吴锦奎, 等. 祁连山老虎沟12号冰川表面能量和物质平衡模拟[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(1): 38-47.]
- [22] Liu Shiyin, Ding Yongjian, Li Jing, et al. Glaciers in response to recent climate warming in western China [J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(5): 762-771. [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.]
- [23] 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. [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.]
- [24] Yang Zhenning. *Glacier water resources in China* [M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1991: 135-158. [杨针娘. *中国冰川水资源* [M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1991: 135-158.]
- [25] Pritchard H D. Asia's shrinking glaciers protect large populations from drought stress [J]. *Nature*, 2019, 569 (7758): 649-654.
- [26] Zhang Qiang, Sun Zhaoxuan, Chen Lihua, et al. Reviews on studies of exploitation and utilization of cloud-water resource in the Qilian Mountains region [J]. *Arid Land Geography*, 2009, 32(3): 381-390. [张强, 孙昭宣, 陈丽华, 等. 祁连山空中云水资源开发利用研究综述[J]. *干旱区地理*, 2009, 32(3): 381-390.]
- [27] Wang Zhongwu, Qi Weixiu, Bai Lin, et al. Reanalysis of climate change characteristics in Qilian Mountain area [J]. *Qinghai Prataculture*, 2018, 27(2): 42-48. [王忠武, 祁维秀, 白林, 等. 祁连山地区气候变化特征再分析[J]. *青海草业*, 2018, 27(2): 42-48.]
- [28] Liu Yushuo, Qin Xiang, Chen Jizu, et al. Variation of Laohugou Glacier No. 12 in the western Qilian Mountains, China, from 1957 to 2015 [J]. *Journal of Mountain Science*, 2018, 15(1): 25-32.
- [29] Chen Jizu, Kang Shichang, Qin Xiang, et al. The mass-balance characteristics and sensitivities to climate variables of Laohugou Glacier No. 12, western Qilian Mountains, China [J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2018, 9(6): 543-553.
- [30] Cao Bo, Pan Baotian, Gao Hongshan, et al. Glacier variation in the Lenglongling Range of Eastern Qilian Mountains from 1972 to 2007 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(2): 242-248. [曹泊, 潘保田, 高红山, 等. 1972-2007年祁连山东段冷龙岭现代冰川变化研究[J]. *冰川冻土*, 2010, 32(2): 242-248.]
- [31] Liu Shiyin, Shen Yongping, Sun Wenxin, et al. Glacier variation since the maximum of the Little Ice Age in the Western Qilian Mountains, Northwest China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(3): 227-233. [刘时银, 沈永平, 孙文新, 等. 祁连山西段小冰期以来的冰川变化研究[J]. *冰川冻土*, 2002, 24(3): 227-233.]
- [32] Sun Meiping, Liu Shiyin, Yao Xiaojun, et al. Glacier changes in the Qilian Mountains in the past half-century: based on the revised first and second Chinese glacier inventory [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(2): 206-220.
- [33] Pu Jianchen, Yao Tandong, Duan Keqin, et al. Mass balance of the Qiyi Glacier in the Qilian Mountains: a new observation



- [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(2): 199-204. [蒲建辰, 姚檀栋, 段克勤, 等. 祁连山七一冰川物质平衡的最新观测结果[J]. 冰川冻土, 2005, 27(2): 199-204.]
- [34] Zhang Shuai, Shi Chunxiang, Liang Xiao, et al. Assessment of FY-3 snow cover product[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2018, 33(1): 35-46. [张帅, 师春香, 梁晓, 等. 风云三号积雪覆盖产品评估[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(1): 35-46.]
- [35] Wu Xuejiao, Wang Ninglian, Lu Anxin, et al. Variations in albedo on Dongkemadi Glacier in Tanggula Range on the Tibetan Plateau during 2002-2012 and its linkage with mass balance[J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2015, 47(2): 281-292.
- [36] Sun Weijun, Qin Xiang, Wang Yetang, et al. The response of surface mass and energy balance of a continental glacier to climate variability, western Qilian Mountains, China[J]. *Climate Dynamics*, 2018, 50(9/10): 3557-3570.
- [37] Yang Wei, Yao Tandong, Guo Xiaofeng, et al. Mass balance of a maritime glacier on the southeast Tibetan Plateau and its climatic sensitivity[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(17): 9579-9594.
- [38] Kapnick S B, Delworth T L, Ashfaq M, et al. Snowfall less sensitive to warming in Karakoram than in Himalayas due to a unique seasonal cycle[J]. *Nature Geoscience*, 2014, 7: 834-840.
- [39] Kääb 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.
- [40] Zhang Yulan, Kang Shichang, Li Chaoli, et al. Characteristics of black carbon in snow from Laohugou No. 12 Glacier on the northern Tibetan Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 607: 1237-1249.
- [41] Li Xiaofei, Kang Shichang, He Xiaobo, et al. Light-absorbing impurities accelerate glacier melt in the central Tibetan Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 587: 482-490.
- [42] Kang Shichang, Zhang Qiangong, Qian Yun, et al. Linking atmospheric pollution to cryospheric change in the Third Pole region: current progress and future prospects[J]. *National Science Review*, 2019, 6(4): 796-809.
- [43] Dumont M, Gardelle J, Sirguey P, et al. Linking glacier annual mass balance and glacier albedo retrieved from MODIS data[J]. *The Cryosphere*, 2012, 6(6): 1527-1539.
- [44] Brun F, Dumont M, Wagnon P, et al. Seasonal changes in surface albedo of Himalayan glaciers from MODIS data and links with the annual mass balance[J]. *The Cryosphere*, 2014, 9(1): 341-355.
- [45] Zhang Zhimin, Jiang Liming, Liu Lin, et al. Annual glacier-wide mass balance (2000-2016) of the interior Tibetan Plateau reconstructed from MODIS albedo products[J/OL]. *Remote Sensing*, 2018, 10(7) [2021-02-06]. <https://doi.org/10.3390/rs10071031>.

## Snow/ice albedo variation and its impact on glacier mass balance in the Qilian Mountains

ZHANG Taigang<sup>1</sup>, GAO Tanguang<sup>1,2</sup>, DIAO Wenqin<sup>1</sup>, ZHANG Yulan<sup>2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest

Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

3. CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Snow/ice albedo can affect the glacier surface energy budget, making it an important factor to impact glacier melt. Based on vector data of glacierized areas, MODIS daily snow albedo, air temperature and precipitation, and glacier mass balance in the Qilian Mountains, this study addressed the spatial-temporal characteristics of snow/ice albedo, and the relationship between glacier mass balance and snow/ice albedos. The results indicated an average albedo in the study area was 0.532. A positive correlation existed between glacierized area and annual averaged albedo, namely the glacierized area decreased by 1 km<sup>2</sup> will cause a reduction of albedo by 0.0025. For the typical glaciers of Laohugou Glacier No. 12 and Qiyi Glacier, average albedo during summer (June to August) was significantly positive correlated with annual glacier mass balance, coefficient of determination reaching 0.48 ( $P < 0.05$ ) and 0.66 ( $P < 0.05$ ), respectively. Such result indicated that variation of albedo played a great impact on smaller glaciers, which will further enhance the retreat of smaller glaciers. The average albedo during summer can be considered as an effective proxy for changes of glacier mass balance.

**Key words:** snow/ice albedo; glacier change; glacier mass balance; Qilian Mountains

(责任编辑: 王宁练; 编辑: 武俊杰)