

高亚洲冰川消融季遥感反照率与年际物质平衡相关性评估及分析

刘易^{1,2}, 江利明^{1,2}, 张志敏³, 李超¹

1. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院 大地测量与地球动力学国家重点实验室, 武汉 430077;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 河南城建学院 测绘与城市空间信息学院, 平顶山 467036

摘要: 冰川消融季反照率是表征冰川年际物质平衡变化的重要参数之一。高海拔亚洲地区(以下简称高亚洲)冰川类型多样且变化机制复杂, 冰面反照率对不同类型冰川的年际物质平衡的表征能力及其区域特征还有待进一步认识。本文基于2000–2019年MODIS冰雪反照率产品和物质平衡时间序列观测数据, 分析了高亚洲23条冰川4种消融季反照率参数的变化特征, 评估了不同反照率参数与年际物质平衡的相关性, 并探讨了反照率变化对不同地区和不同类型冰川的年际物质平衡的影响。结果表明: 近20年内, 除喜马拉雅西段和祁连山地区的冰川外, 其他冰川的反照率均呈下降趋势, 消融季最小反照率波动大于平均反照率, 后者在相同冰川子区内的年际变化和长期趋势较为一致; 共计13条冰川的反照率与年际物质平衡呈现显著线性正相关关系($P < 0.05$), 4种反照率参数中8类合成产品的平均反照率相关性最优; 两者线性关系在不同冰川子区和冰川类型中均无明显的区域性分布规律。本文研究可为加深认识冰雪反照率对高亚洲冰川物质平衡的影响规律提供有益参考。

关键词: 冰川反照率, 冰川物质平衡, MODIS冰雪反照率, 高亚洲

引用格式: 刘易, 江利明, 张志敏, 李超. XXXX. 高亚洲冰川消融季遥感反照率与年际物质平衡相关性评估及分析. 遥感学报, XX (XX): 1–17

LIU Yi, JIANG Liming, ZHANG Zhimin, LI Chao. XXXX. Assessment and analysis of correlation between remote sensing albedo in ablation season and annual mass balance for glaciers in High Mountain Asia. National Remote Sensing Bulletin, [DOI: 10.11834/jrs.20221814]

1 引言

作为气候变化的灵敏指示器, 冰川物质平衡在区域水资源管理、生态环境评估、冰川灾害预警及海平面变化预估等方面具有重要作用(姚檀栋等, 2013; 王宁练等, 2019)。以青藏高原为中心的高亚洲地区(High Mountain Asia, HMA)是中低纬度地区最大的现代冰川区(叶万花等, 2016), 在全球气候变暖的背景下, 近二十年来该地区冰川多数呈现末端退缩及物质亏损, 尤其是喜马拉雅和青藏高原东南部的冰量亏损更为严重(Shean等, 2020)。年际物质平衡能够详细刻画冰川的波动状况, 对高亚洲地区冰川变化特征及机

制的深入理解具有重要意义。

冰川学实地测量方法、卫星重力测量法以及卫星大地测量法等是冰川物质平衡估算的主要手段(李新等, 2020)。受限于复杂的地形条件和极端的气候状况, 基于花杆测量、探地雷达等冰川学现场观测(Gardner等, 2013; Vincent等, 2013), 虽单点精度高, 却耗费大量人力物力, 目前高亚洲仅有30余条冰川的年际物质平衡实地观测资料, 不及冰川总条数的0.04%(Bhattacharya等, 2021), 无法估算大范围冰川年际物质平衡。卫星重力测量能够获取区域尺度物质平衡的月际变化, 但其较低的空间分辨率不足以反映单条冰川的变化特征, 此外, 受信号泄漏和噪声的

收稿日期: XXXX-XX-XX; 预印本: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家重点研发计划课题(编号: 2017YFA0603103); 国家自然科学基金(编号: 41431070; 42174046); 中国科学院A类战略性先导科技专项(编号: XDA19070104)

第一作者简介: 刘易, 主要从事基于多源遥感数据的高亚洲冰川物质平衡反演。E-mail: liuyi@apm.ac.cn

通信作者简介: 江利明, 主要从事影像大地测量与卫星遥感研究。E-mail: jlm@whigg.ac.cn

影响, 同一区域的估算结果也存在较大差异 (Matsuo 和 Heki, 2010; Jacob 等, 2012)。以 DEM (Digital Elevation Model)、激光测高数据为主的大地测量法常用于多年或年代际的区域性冰川物质平衡估算 (Shean 等, 2020; Wang 等, 2021; 庞书剑等, 2021), 具备较高的空间分辨率和估算精度, 但受限于 DEM 数据的更新能力以及激光点的稀疏分布, 对冰川年际物质平衡重建尚有困难, Hugonnet 等 (2021) 利用预测的冰面高程时间序列重建了全球冰川年际物质平衡, 但其估算结果在单条冰川尺度上仍存在较大误差。

太阳短波辐射是冰川消融的主要能量来源 (Greuell 和 Oerlemans, 2005), 作为重要的冰川表面参数之一, 反照率直接支配着冰川表面对太阳辐射能量的吸收, 调控其消融过程 (Hock, 2003; Zhang 等, 2021), 进而影响物质平衡, 当反照率增大, 冰川表面吸收的太阳辐射减小, 有利于冰川的物质积累, 反之则加剧冰川的消融。近年来, 国内外学者陆续在全球多个冰川区发现消融季的冰川表面反照率与年际物质平衡存在显著的正相关关系, 并探讨了消融季反照率用于估算冰川年际物质平衡的潜力。Dumont 等 (2012) 在阿尔卑斯山的 Saint Sorlin 冰川上评估了消融季最小反照率与实测年际物质平衡的线性关系, 决定系数 R^2 高达 0.95, Wu 等 (2015) 和 Sirguey 等 (2016) 分别在小冬克玛底与 Brewster 冰川的研究中进一步验证了二者显著的线性相关性。Wang 等 (2013) 及张太刚等 (2021) 在高亚洲地区几条大陆型冰川的研究显示夏季平均反照率与年际物质平衡同样存在较强的相关性。此外, Brun 等 (2015) 与 Zhang 等 (2018) 构建冰川反照率与物质平衡二者间的经验模型, 分别重建了喜马拉雅和青藏高原内陆冰川的年际物质平衡, 并通过大地测量年均物质平衡或雪线海拔 (Snow Line Altitude, SLA) 验证了结果的可靠性, 但该方法在区域尺度冰川年际物质平衡的估算中还未得到推广。最近, Zhang 等 (2021) 在区域尺度上分析了 2001–2018 年青藏高原冰川表面反照率变化的时空分布, 探究了 3 条典型冰川的表面平均反照率变化与年际物质平衡的关系, 并评估了夏季冰川表面反照率降低对冰川消融量的贡献。反照率与物质平衡的相关性研究能为冰川年际物质平衡变化监测提供参考, 但由于高亚洲冰川类型多样且变

化机制复杂, 不同冰川表面反照率参数对冰川物质平衡的表征能力还缺乏系统性的评估, 此外, 反照率变化对不同地区和不同类型冰川的年际物质平衡的影响仍有待进一步认识。

本文选取高亚洲地区 23 条具有年际物质平衡连续观测的冰川, 基于 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 逐日和 8 天均值合成的冰雪反照率产品, 提取 2000–2019 年冰川消融季最小和平均反照率, 分析 23 条冰川 4 种消融季反照率参数的变化特征, 评估 4 种不同反照率参数与年际物质平衡的相关性, 探讨冰川反照率变化及其与年际物质平衡关系在不同地区和不同类型冰川之间的差异。

2 研究区与数据

2.1 研究区概况

高亚洲地处亚洲中央的高山及高原地区, 经度跨越 $70^{\circ}\sim 105^{\circ}$ E, 纬度跨越 $27^{\circ}\sim 50^{\circ}$ N (谢自楚, 1994), 西部和北部主要受西风环流的影响, 西南部和东南部分别受印度季风和东亚季风的影响 (施雅风等, 1988), 多种环流的共同作用为冰川的形成和发育提供了有利条件。据统计, 高亚洲发育有 95536 条冰川, 约占全球冰川 (不包括南极与格陵兰冰盖) 面积的 13.8% (牟建新等, 2018), 根据气候条件的不同, 冰川类型可大致划分为亚大陆型、极大陆型和海洋型等三类 (Shi 和 Liu, 2000)。研究区涵盖的 23 条冰川主要分布在天山、希萨尔-阿莱、喜马拉雅、青藏高原内陆、横断山以及祁连山地区等 10 个冰川区 (图 1), 冰川面积在 $1.03\sim 21.35$ km^2 之间, 海拔介于 3400–6600 m 之间, 均具有 5 年及以上的年际物质平衡观测资料, 详细信息见表 1。

2.2 MODIS 冰雪反照率产品

MOD10A1 和 MYD10A1 (MODIS Terra/Aqua Snow Cover Daily 13 Global 500 m SIN Grid) 是由美国国家雪冰数据中心 (National Snow & Ice Data Center, NSIDC) 发布的全球覆盖逐日积雪产品, 分别对应 Terra 和 Aqua 卫星的观测数据, 空间分辨率为 500m, 提供积雪覆盖比率以及积雪反照率等波段信息 (<https://doi.org/10.5067/MODIS/-MOD10A1.061>), 被广泛应用于冰雪反照率研究。

该产品选取无云的积雪覆盖像元, 使用离散坐标辐射传输 (Discrete-ordinate Radiative Transfer, DISORT) 模型 (Stamnes 等, 1988) 对非森林雪

面反射进行各向异性校正, 完成窄波段至宽波段反照率转换后, 得到短波辐射范围的晴空反照率 (Klein 和 Stroeve, 2002)。

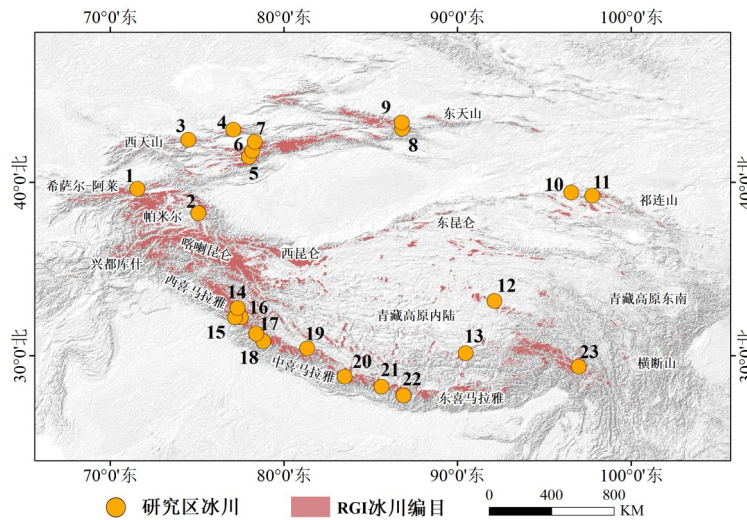


图1 高亚洲地理位置及冰川分布图

Fig. 1 Geographic location and glaciers distribution map of High Mountain Asia

Wang 等 (2011) 利用经地面站点检验后的 Landsat TM 反照率, 通过升尺度转换的方法来验证 MOD10A1 反照率产品在三条高亚洲冰川上的精度。对于两条大陆型冰川 (冬克玛底和老虎沟 12 号), 均方根误差分别为 0.068 和 0.064, 海洋型的帕隆藏布 4 号冰川则为 0.112。此外, Brun 等 (2015) 在喜马拉雅地区 Mera 冰川上, 将 MOD10A1 反照率与自动气象站观测数据进行对比, 发现均方根误差达到 0.08。除此之外, 还有其它众多学者开展类似工作 (毛瑞娟等, 2013; 鄒宇凡, 2020), 验证了 MODIS 冰雪反照率数据在高亚洲冰川反照率研究中的适用性。

2.3 冰川年际物质平衡数据

老虎沟 12 号冰川的年际物质平衡数据由国家青藏高原科学数据中心 (<http://www.tpdc.ac.cn>) 提供 (刘宇硕, 2018; Chen 等, 2018)。其余冰川物质平衡数据来自世界冰川监测服务中心 (World Glacier Monitoring Service, WGMS) 于 2020 年 8 月最新发布的冰川波动数据库 (<http://dx.doi.org/10.5904/wgms-fog-2020-08>), 该数据库记录了上世纪以来基于实地或遥观测获取的冰川参数年际变化信息 (面积、周长、体积和质量等), 当前全球范围内共收集有 252 条冰川的物质平衡时间序列数据, 高亚洲地区有 49 条。

2.4 冰川编目数据

研究区冰川边界矢量参考第六版 RGI (Randolph Glacier Inventory) 全球冰川编目数据 (<https://doi.org/10.7265/N5-RGI-60>)。RGI6.0 冰川编目以 Landsat TM/ETM+ 遥感影像为主要数据源, 并用 ASTER、IKONOS 和 SPOT 等高分辨率影像和地形图资料作为补充, 通过自动或半自动解译方式提取冰川轮廓 (牟建新等, 2018)。RGI 冰川编目依据地理邻近度对冰川进行区域划分 (Radić 和 Hock, 2010), 将全球冰川划分为 19 个冰川区, 91 个二级冰川区, 高亚洲共包含 15 个二级冰川区。由于 RGI6.0 不包含乌鲁木齐河源 1 号冰川, 矢量边界采用其东支与西支的合并结果。

表1 研究区冰川基本信息

Table 1 Basic information of glaciers in study area

序号	冰川名称	面积/km ²	经度/E	纬度/N	所属区域
1	Abramov	21.345	71.560°	39.620°	希萨尔-阿莱
2	慕斯塔格峰15号	1.087	75.063°	38.238°	帕米尔
3	Golubin	4.827	74.495°	42.460°	西天山
4	TS.Tuyuksuyskiy	2.838	77.080°	43.050°	西天山
5	Glacier No.354 (Akshiyrak)	6.537	78.546°	41.799°	西天山
6	Sary Tor (No.356)	2.925	78.174°	41.830°	西天山
7	Kara-Batkak	2.046	78.270°	42.140°	西天山
8	乌鲁木齐河源1号东支	1.034	86.811°	43.111°	东天山
9	乌鲁木齐河源1号	1.581	86.811°	43.118°	东天山
10	老虎沟12号	20.419	96.550°	39.430°	祁连山
11	七一	2.531	97.756°	39.240°	祁连山
12	小冬克玛底	1.77	92.130°	33.170°	青藏高原内陆
13	古仁河口	1.333	90.467°	30.183°	青藏高原内陆
14	Patsio	2.605	77.329°	32.757°	西喜马拉雅
15	Hamtah	3.434	77.374°	32.235°	西喜马拉雅
16	Tiphon Shigri	16.764	77.516°	32.235°	西喜马拉雅
17	Naradun	3.017	78.405°	31.290°	西喜马拉雅
18	Dakriani	6.518	78.818°	30.855°	中喜马拉雅
19	纳木那尼	13.726	81.333°	30.450°	中喜马拉雅
20	Rikha Samba	6.504	83.490°	28.820°	中喜马拉雅
21	Yala	2.107	85.620°	28.250°	中喜马拉雅
22	Mera	5.615	86.885°	27.720°	东喜马拉雅
23	帕隆94号	2.792	96.976°	29.386°	横断山

3 研究方法

本研究通过MODIS冰雪反照率产品和RGI6.0冰川编目数据提取2000–2019年冰川消融季最小和平均反照率时间序列，并分析其年际变化规律和长期变化趋势，结合年际物质平衡时间序列数据构建反照率-物质平衡的一元线性回归模型，以此评估两者之间的相关性（图2）。Google Earth Engine (GEE) 作为行星尺度的遥感影像处理平台，极大提高了数据运算效率，被广泛应用于大范围长时间序列研究（付东杰等，2021），后续相关的数据处理均在GEE平台中完成。

3.1 MODIS数据预处理

GEE平台已提供MODIS冰雪反照率产品，并剔除了云覆盖、云雪混淆等非积雪观测，保留了数值在0~100之间的有效反照率像元。本文统一选

取2000–2019年消融季时期（6月1日–9月30日）的MOD10A1和MYD10A1逐日反照率数据，地图投影设定为WGS84地理坐标系。由于卫星过境时间及观测条件的不同，致使覆盖研究区冰川的MOD10A1和MYD10A1像元存在不同程度缺失，反照率数值也有差异。为适应传感器性能变化，MODIS数据被定期校准，目前已更新至V6版本（Version 6），相比于早期版本，产品精度进一步提升，同时减小了Terra和Aqua数据的不一致性（Casey等，2017），有利于两个卫星遥感产品的联合应用。图3为研究区内30个随机点对应的MOD10A1与MYD10A1反照率差值分布直方图（约3600个样本），平均值为0.003，标准差为0.14，两类反照率产品之间的差异较小。因此，本文采用Zhang等（2018）的方法，对两类产品进行融合处理，生成新的冰雪反照率产品—MO&YD10A1，以提高反照率数据的利用效率。为与逐日产

品反照率参数进行对比,在此基础上进一步对逐日反照率进行8天均值合成处理,生成8天合成反照率产品。

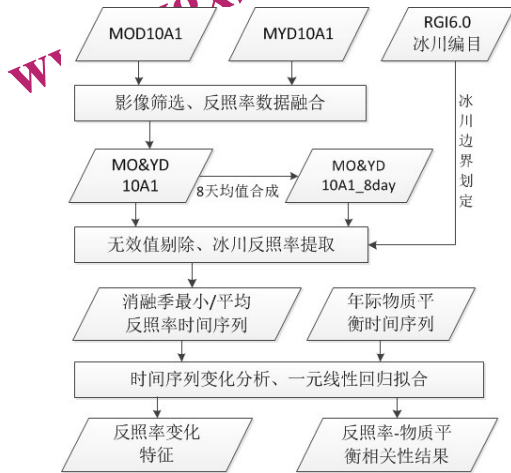


图2 研究技术流程图

Fig. 2 Flow chart of research technology

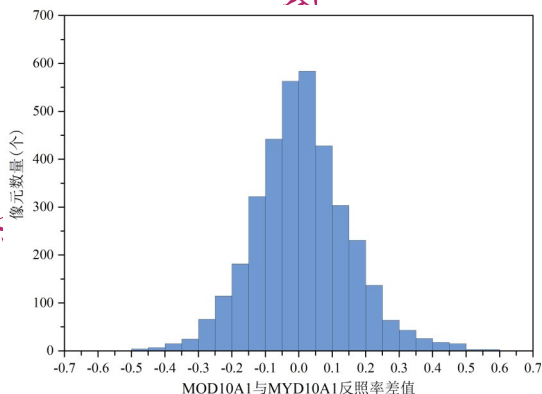


图3 MOD10A1与MYD10A1反照率差值分布直方图

Fig. 3 Histogram of albedo difference distribution between MOD10A1 and MYD10A1

3.2 消融季反照率参数及其物质平衡相关性估算

冰川表面反照率是整个冰川范围内所有像元的算术平均值 (Dowson 等, 2020), 在每年的消融季时期, 对逐时相的MO&YD10A1反照率影像进行提取, 得到相应的反照率时间序列。数据融合能够提升冰川内部的有效像元数量, 但部分地区高频次的云覆盖仍限制了冰川表面反照率的获取, 参照 Davaze 等 (2018) 的研究, 剔除时间序列中冰川表面云量占比高于30%的观测结果, 按最小值或均值聚合, 最终获得逐年的消融季最小反照率和平均反照率。包括逐日以及8天合成数据的最小和平均反照率在内, 共有4种反照率参数, 以下简称逐日产品最小反照率、逐日产品平均反

照率、8天产品最小反照率和8天产品平均反照率。

本研究仅考虑消融季反照率和年际物质平衡的线性相关关系, 基于一元线性回归方程拟合反照率与物质平衡的相关性, 利用最小二乘估计回归方程参数, 并计算决定系数 R^2 , 在95%的置信水平下检验 (t检验) 回归参数的显著性, 以评估二者之间的相关性水平。由于MODIS逐日冰雪反照率产品在2000和2001年6-9月期间均存在近20天的数据缺失, 因此只选取2002-2019年的数据进行相关性分析。

4 结果与分析

4.1 冰川反照率的年际变化

2000-2019年冰川消融季反照率及物质平衡年际变化如图4所示。最小反照率和平均反照率取值分别集中在0.1~0.4和0.3~0.6之间, 均值合成使得8天产品的最小反照率整体高于逐日产品, 且年际变化趋势也存在一定差异, 但两类产品的平均反照率取值与年际变化趋势则较为一致。消融季最小反照率波动较为剧烈, 部分年份出现较大幅度的上升或下降, 例如中喜马拉雅地区的Rikha Samba冰川在2008-2013年期间, 8天合成产品的最小反照率在多个年份间急剧减小后又迅速增大。相比于最小反照率, 平均反照率年际间的波动较小, 例如西喜马拉雅地区Naradu和Dokriani冰川的消融季平均反照率在二十年内基本维持在同一水平, 平均为0.45和0.55, 变化较为平稳。降雪是影响消融季反照率变化的重要因素, 新雪出现会显著增加冰川表面反照率, 且最小反照率为单一时相取值, 真实信号易被掩盖, 使其年际变化出现较大波动; 对平均反照率年际变化的影响则取决于消融季降雪量及降雪频率。

不同分布区域的冰川反照率, 其数值大小和年际变化趋势都有差别, 极值分布也不尽相同, 但同一冰川区内, 冰川消融季平均反照率的变化规律高度相似 (图5)。西天山地区的Golubin和TS.Tuyuksuyskiy等5条冰川, 反照率的年际变化略有差异, 但长期变化趋势保持一致, 2000-2008年内表现为波动下降, 随后急剧上升, 2009年达到二十年内的最大值, 平均上升幅度为0.12, 而后整体又呈现下降的状态 (图5a)。该地区2009年夏

季的平均积雪覆盖面积为近几年的峰值 (唐志光等, 2017), 积雪覆盖面积的增大和覆盖时间的延长使得消融季平均反照率出现较大的提升。位于中喜马拉雅的 Dokriani、纳木那尼、Rikha Samba 和 Yala 冰川, 2000–2019 年期间, 冰川反照率取值较为接近, 主要在 0.5~0.6 之间波动, 年际变化趋势也基本相同, 如 2009、2012、2013 及 2018 年, 反照率同为极大或极小值 (图 5f)。除此之外, 东天山、青藏高原内陆和西喜马拉雅地区的冰川, 其反照率年际或长期变化趋势都表现出一定的区域相似性。而同一冰川区内冰川表面反照率可能受冰川表面状态和局部地形等因素的影响, 取值上虽有差异, 但同一区域内的气候条件接近, 使冰川反照率在年际变化规律上保持一致。

4.2 冰川反照率变化速率的空间分布

本文采用一元线性回归模型拟合反照率的长期变化趋势, 并进行显著性检验 (t 检验), 趋势线的斜率代表研究时间段内的反照率变化速率。2000–2019 年冰川消融季反照率的变化速率空间分布 (图 6) 显示, 平均反照率的变化速率整体高于最小反照率, 逐日产品与 8 天均值合成产品的反照率变化速率在取值上有所差异, 但变化趋势基本一致, 同为升高或降低, 在少数冰川上 (例如 Golubin 冰川), 不同的变化趋势可能是由两类反照率数据的差异所导致。

下面主要针对 8 天合成反照率的变化速率进行分析。2000 年以来, 研究区冰川反照率变化速率在 $-0.015\sim 0.01\text{ a}^{-1}$ 之间波动, 最小反照率中, Chhota Shigri 冰川变化速率最大, 达到 0.009 a^{-1} , 且上升趋势显著 ($P<0.05$); Dokriani 冰川变化速率最小, 仅为 -0.0002 a^{-1} , 反照率在研究时段内较为稳定 (图 6b)。平均反照率中, Mera 冰川的变化最明显, 速率达到 0.013 a^{-1} ; 纳木那尼冰川变化速率最小, 为 -0.0004 a^{-1} (图 6d)。冰川反照率大多呈下降趋势, 消融季气温升高是主要原因 (徐田利等, 2018), 过去几十年高亚洲大部分地区显著变暖 (Kraaijenbrink 等, 2021), 冰川加速融化, 雪线海拔上移, 消融区面积扩大, 雪冰变质加快。冰川粒雪面积减少及表面污化物的富集造成反照率的降低 (Xu 等, 2009), 而反照率的下降又促进冰川对太阳辐射的吸收, 又使其表面温度上升, 形成正反馈效应。与之相反, 喜马拉雅

西段及中、西段交界附近的冰川, 以祁连山地区的老虎沟 12 号及七一冰川, 其消融季反照率在近二十年来表现为上升趋势, 这与 Zhang 等 (2021) 的研究结果一致。除 Chhota Shigri 冰川和小冬克玛底冰川外, 冰川最小反照率均无显著变化趋势, 在空间上也无明显分布规律 (图 6b), 而东天山、青藏高原内陆及东喜马拉雅地区冰川的消融季平均反照率下降趋势显著, 变化速率相对较高, 约为 -0.01 a^{-1} , 冰川融化较为剧烈 (图 6d)。

4.3 冰川反照率与物质平衡的相关性

4.3.1 相关性估算结果

研究区冰川的年际物质平衡多为负值, 长期处于物质亏损状态, 与高亚洲冰川普遍退缩的情况相符 (Dehecq 等, 2018)。多数冰川的消融季反照率与年际物质平衡展现出相同的年际变化趋势, 且平均反照率与年际物质平衡的变化特征更为吻合 (图 4)。青藏高原内陆小冬克玛底冰川 (图 4l), 8 天产品最小反照率从 2006 年的 0.31 迅速增至 2008 年的 0.56, 物质平衡则从强亏损 (-0.92 m w. e.) 变为弱负平衡状态 (-0.08 m w. e.)。2009 年和 2016 年, TS.Tuyuksuyskiy 冰川都具有较高的反照率, 呈现物质积累的状态, 分别为 0.21 m w. e. 和 0.56 m w. e. , 而在低反照率的 2008 年, 则出现较大的物质亏损, 物质平衡达到 -1.36 m w. e. (图 4d)。上述现象显示了反照率与年际物质平衡之间的正相关关系。

4 种反照率参数与年际物质平衡显示出不同程度的相关性 (图 7 和表 2), 共 16 条冰川至少与一种反照率参数呈现显著相关, 而两类平均反照率参数在 Naradu 冰川上呈显著负相关 ($R<-0.8$, $P<0.05$)。8 天产品平均反照率的相关性最优, 共 13 条冰川表现为线性正相关, 其中 10 条为高度相关 ($R^2>0.64$), 3 条为中度相关; 逐日产品平均反照率次之, 线性正相关的冰川有 11 条; 逐日产品最小反照率和 8 天产品最小反照率最少, 为 8 条。

本文中仍有 7 条冰川的 4 种反照率参数均未与物质平衡呈现显著相关性, 主要与这些冰川的规模、物质平衡实测样本数量、反照率估算质量等因素有关。比如, Sary Tor (No.356) 以及纳木那尼冰川的年际物质平衡观测相对较少, 而慕士塔格峰 15 号冰川的物质平衡在 2007 年前后变化

剧烈, 观测值异常高于其他年份, 影响了相关性估算。表碛覆盖像元在MODIS冰雪反照率产品中被识别为陆地, 无反照率数值 (Spiess 等, 2015), Hamath 冰川表碛覆盖占比高达 89% (Scherler 等, 2018), 限制了冰川反照率的获取。另一方面, 复杂山地环境下存在山体阴影及多次反射效应 (林兴稳等, 2019), 光学影像也易受云盖干扰, 慕士塔格峰 15 号冰川面积小且地形陡峭, 其反照率受上述因素影响较大。

4.3.2 相关性分布特征

除兴都库什与帕米尔等地区的冰川外, 反照率与物质平衡在高亚洲多个冰川区内均呈现显著线性相关, 相关性也无明显的空间分布差异, 但在天山地区两条冰川相关性相对较弱 ($R^2 < 0.4$)。

参考 Shi 和 Liu (2000) 和 Wang 等 (2019) 的研究, 将冰川类型划分为大陆型和海洋型, 其中大陆型冰川又可分为极大陆型和亚大陆型冰川。不同类型冰川的消融季反照率 (8 天产品平均反照率) 与年际物质平衡的相关性同样无明显差异 (表 2), 均存在线性相关和不相关的冰川。对于亚大陆型冰川, 多数有较强的相关性, 决定系数 R^2 最高为古仁河口冰川的 0.98, 最低为乌鲁木齐河源 1 号冰川的 0.28。对于两条极大陆型冰川, 老虎沟 12 有极强的线性关系 ($R^2 = 0.84$), 而慕士塔格峰 15 号冰川则完全不相关。对于海洋型冰川, 除横断山区的帕隆 94 号冰川外, 其余冰川均表现为高度线性相关。大陆型冰川与海洋型冰川发育的水热条件以及对气候变化的响应程度各不相同, 物质平衡的变化机理也存在差异 (苏勃等, 2015), 但反照率与物质平衡均呈现高度相关, 反照率对不同类型冰川的变化均有一定影响。

NATIONAL
REMOTE
SENSING BULLETIN | 遥感学报

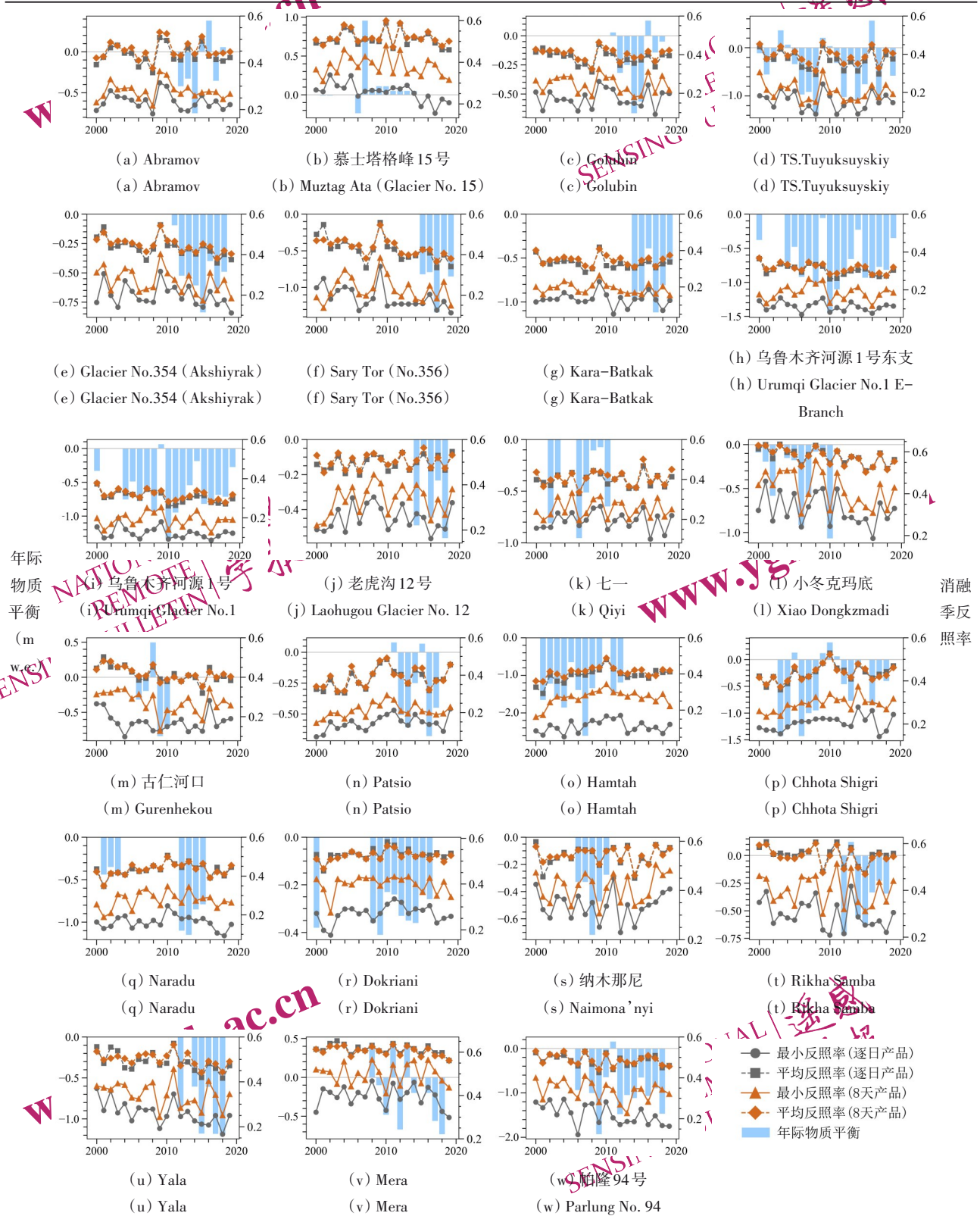
www.ygxb.ac.cn

www.ygxb.ac.cn

NATIONAL
REMOTE
SENSING BULLETIN | 遥感学报

图4 2000-2019年冰川消融季反照率与物质平衡年际变化

Fig. 4 Interannual change of glacier albedo and mass balance in ablation season from 2000 to 2019



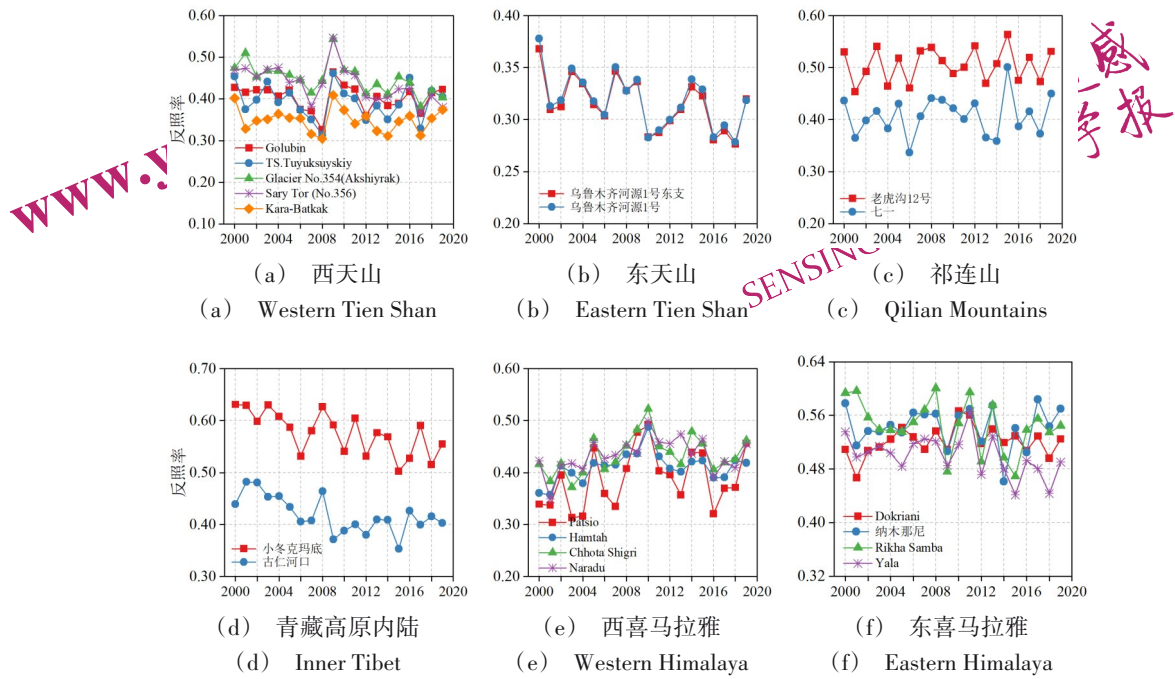


图5 不同区域的8天合成产品冰川消融季平均反照率年际变化

Fig. 5 Interannual variation of glacier averaged albedo during the ablation season of 8-day composite products in different regions

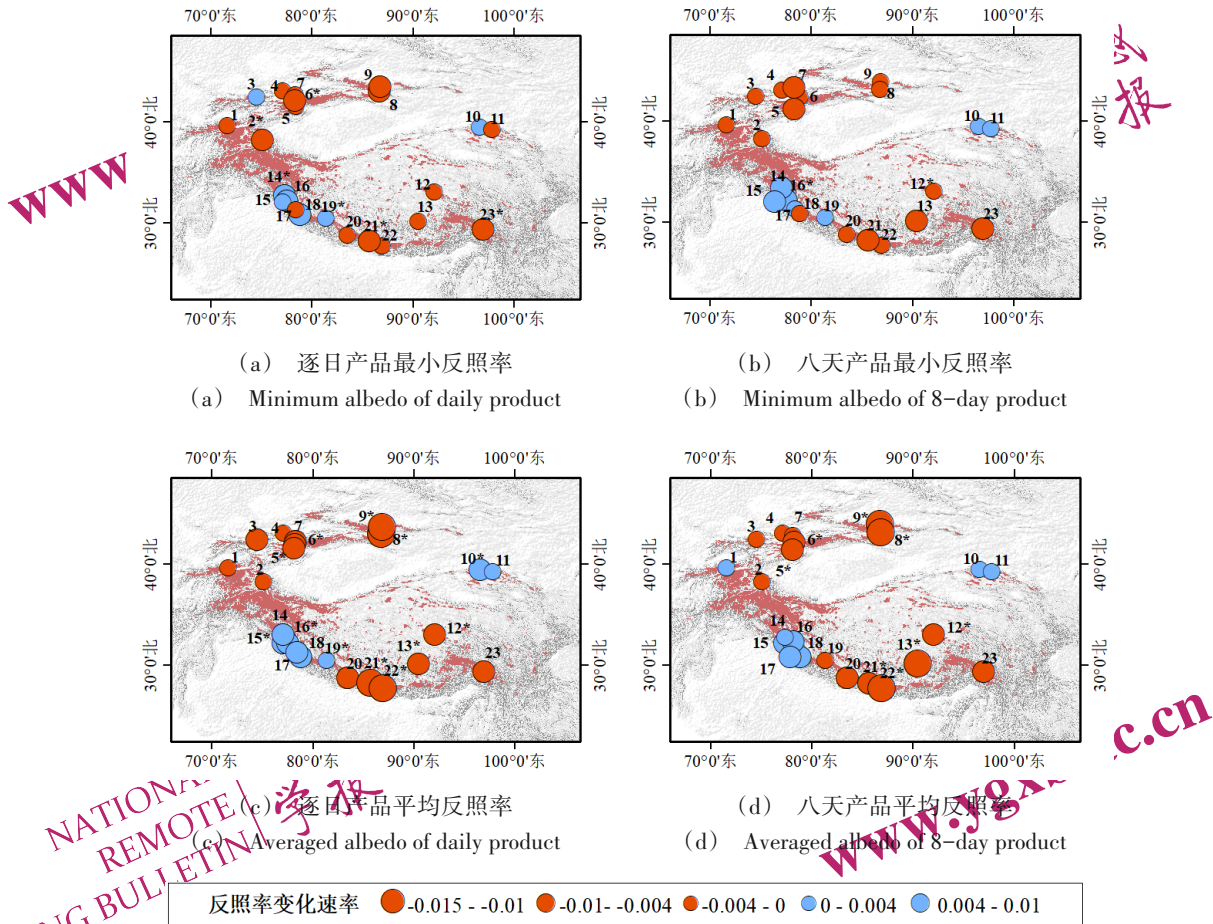


图6 2000–2019年消融季反照率变化速率空间分布(数字后面的*表示通过置信水平为95%的显著性检验)

Fig. 6 Spatial distribution of albedo change rate in ablation season from 2000 to 2019 (The * after the number indicates passing significance test with 95% confidence level)

www.ygxb.ac.cn

NATIONAL
REMOTE
SENSING BULLETIN | 遥感学报

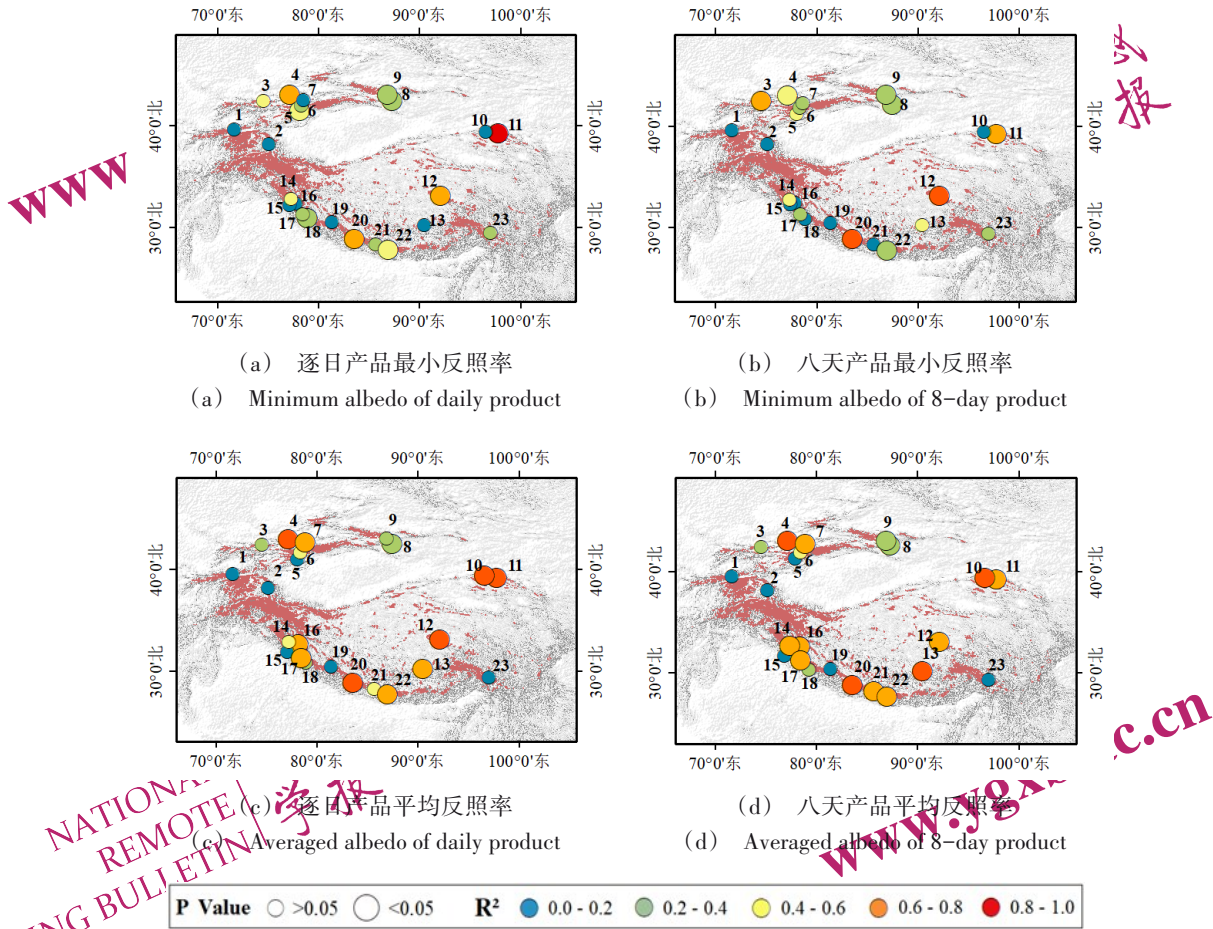


图7 消融季反照率与年际物质平衡线性回归决定系数(R²)空间分布

Fig. 7 Determining coefficient of linear regression between albedo and interannual mass balance in ablation season

www.ygxb.ac.cn

NATIONAL
REMOTE
SENSING BULLETIN | 遥感学报

表2 冰川消融季反照率与年际物质平衡线性回归决定系数 R^2 统计Table 2 Determination coefficient (R^2) statistics of linear regression between glacier albedo and interannual mass balance during ablation season

序号	冰川名称	冰川类型	逐日反照率 R^2		8天合成反照率 R^2	
			最小反照率	平均反照率	最小反照率	平均反照率
	Abramov	A	0.05	0.12	3.71×10^{-4}	0.07
2	慕士塔格峰15号	B	0.01	0.01	0.08	1.2×10^{-4}
3	Golubin	A	0.41	0.33	0.79*	0.31
4	TS.Tuyuksuyskiy	A	0.64*	0.84*	0.8*	0.85*
5	Glacier No.354 (Akshiyarak)	A	0.59*	0.08	0.46	0.16
6	Sary Tor (No.356)	A	0.26	0.41	0.27	0.47
7	Kara-Batkak	A	0.2	0.76*	0.25	0.69*
8	乌鲁木齐河源1号东支	A	0.34*	0.27*	0.26*	0.33*
9	乌鲁木齐河源1号	A	0.36*	0.2	0.29*	0.28*
10	老虎沟12号	B	0.11	0.81*	0.16	0.84*
11	七一	A	0.85*	0.9*	0.8*	0.72*
12	小冬克玛底	A	0.72*	0.88*	0.92*	0.78*
13	古仁河口	A	3.01×10^{-3}	0.78*	0.55	0.98*
14	Patsio	A	0.49	0.56	0.4	0.61*
15	Hamtabi	A	0.13	0.16	0.03	0.15
16	Chhota Shigri	A	0.07	0.76*	0.16	0.71*

Table 2 (continued)

序号	冰川名称	冰川类型	逐日反照率 R^2		8天合成反照率 R^2	
			最小反照率	平均反照率	最小反照率	平均反照率
17	Naradu	A	0.31	0.75*	0.25	0.78*
18	Dokriani	A	0.39	0.27	1.3×10^{-3}	0.28
19	纳木那尼	A	0.01	0.05	0.01	0.02
20	Rikha Samba	C	0.63*	0.84*	0.82*	0.88*
21	Yala	C	0.3	0.53	0.13	0.8*
22	Mera	C	0.43*	0.67*	0.38*	0.69*
23	帕隆94号	C	0.23	0.15	0.29	0.13

注: *表示通过置信水平为95%的显著性检验;冰川类型字段中,A表示亚大陆型,B表示极大陆型,C表示海洋型。

5 讨论

5.1 与已有研究的比较

8天合成产品的消融季反照率(表3)及其物质平衡关系(表4)与已有研究的对比显示,除乌鲁木齐河源1号和Chhota Shigri冰川外,其余冰川反照率和相关性估算结果基本保持一致。小冬克玛底冰川的最小和平均反照率相差不大,平均差值小于3%,决定系数也基本相同(Zhang等,2021),七一冰川相关性结果同样无较大差别(张

太刚等,2021)。老虎沟12号冰川的反照率结果接近,但决定系数为0.84,高于同类研究的0.48和0.36,原因在于本文采用花杆实测的物质平衡数据(Chen等,2018),张太刚等(2021)的研究同为花杆实测数据,但时间范围不同,相关性结果也有所区别;而Zhang等(2021)的物质平衡数据来源于气象模型模拟结果(Chen等,2019),与实测数据存在一定误差。乌鲁木齐河源1号和Chhota Shigri冰川的反照率差值略高于其他冰川(分别为5.75%和4.71%),本文联合了MOD10A1和MYD10A1反照率产品,Zhang等

(2021) 使用单一的 MOD10A1 产品, Brun 等 (2015) 则使用了 MODImLab 产品 (Sirguey 等, 2009), 相比而言, MO&YD10A1 反照率融合数据在两条冰川中的取值偏低, 多个年份的年际变化趋势与同类研究相反, 导致相关性估算结果出现较大偏差。本文计算的冰川消融季反照率时间为每年的6月-9月, 长于同类研究的夏季消融期时间(6月-8月), 也是反照率取值出现差异的原因之一, 老虎沟12号和小冬克玛底等冰川与同类研究的反照率虽相差不大, 但不同地理位置的冰川, 气候、地形以及冰川表面状态等条件存在空间异质性, 消融过程也不尽相同, 后续研究中, 不同区域冰川消融季时间的选取需适当区分。

5.2 四种反照率参数与物质平衡相关性的差异

从统计结果来看(表2), 8天合成反照率与年际物质平衡的相关性比逐日反照率数据更优, 主要体现在以下两点: 1) 对于最小反照率, 除 Glacier No.354 (Akshiyarak) 冰川外, 8天产品最小反照率的决定系数均优秀(例如 TS.Tuyuksuyskiy 和 Rikha Samba 冰川)或接近于逐日产品最小反照率; 2) 对于平均反照率, 8天产品平均反照率与逐日产品平均反照率的相关性结果差别不大, 但8天产品平均反照率在更多冰川上显示线性相关, 例如喜马拉雅地区的 Patiso 以及 Yala 冰川(表2)。8天均值合成对相关性的估算结果有一定提升, 主要因为该数据整合了8天内的反照率观测, 能有效弥补云覆盖导致的像元缺失, 同时抑制了随机噪声。

平均反照率的相关性优于最小反照率, 与物质平衡的相关程度更高(例如西喜马拉雅地区冰川), 更具普适性(图7c和图7d)。最小反照率与平均反照率都表征冰川表面对太阳辐射的吸收能力, 但与物质平衡线性相关的原理却有所区别。一般而言, 积雪反照率高于裸冰, 随着冰川消融的进行, 积雪不断融化, 裸冰逐渐暴露, 积累区与消融区面积的相对比例相应减小, 表面反照率也随之下降, 直至消融最为剧烈时刻(Davaze 等, 2018), 当积累区积雪或消融区裸冰反照率在年际之间保持稳定时, 最小反照率可以作为消融季末积累区面积比例的代用指标(Rabatel 等, 2017), 而后者能够有效表征冰川年际物质平衡变化(Dyurgerov 等, 2009), 但是, 最小反照率由于是单一时相取值, 代表太阳辐射吸收最大的时

刻, 易受云覆盖、突发降雪等扰动因素的影响。然而, 平均反照率综合了整个消融期的太阳辐射能量吸收, 能够更好地压制上述扰动因素的影响, 其年际波动可有效反映冰川消融和物质平衡的总体变化(Williamson 等, 2020)。此外, 夏季持续降雪导致冰川表面反照率升高, 冰川表面吸收的太阳辐射减少, 能在一定时间范围内减缓冰川消融, 影响物质平衡, 平均反照率可以捕捉到这种由降雪导致的消融减缓效应(Oerlemans 和 Klok, 2004)。

表3 消融季反照率估算结果对比

冰川名称	反照率类型	时间跨度	数据来源	平均绝对差值
乌鲁木齐河源1号	平均反照率	2001-2018	Zhang 等, 2021	5.75%
老虎沟12号	平均反照率	2001-2018	张太刚等, 2021	3.53%
小冬克玛底	平均反照率	2001-2010	Zhang 等, 2021	2.10%
	最小反照率	2000-2010	Zhang 等, 2018	1.67%
Chhota Shigri	最小反照率	2000-2013	Brun 等, 2015	4.71%

表4 消融季反照率与年际物质平衡线性相关性对比

冰川名称	反照率类型	数据来源	决定系数 R ²	
			本文研究	已有研究
乌鲁木齐河源1号	平均反照率	Zhang 等, 2021	0.28	0.52
老虎沟12号	平均反照率	张太刚等, 2021	0.84	0.48
	平均反照率	Zhang 等, 2021		0.36
七一	平均反照率	张太刚等, 2021	0.72	0.66
小冬克玛底	平均反照率	Zhang 等, 2021	0.78	0.76
	最小反照率	Zhang 等, 2018	0.92	0.94
Chhota Shigri	最小反照率	Brun 等, 2015	0.16	0.75
Mera	最小反照率	Brun 等, 2015	0.38	0.13

6 结论与展望

本文利用2000-2019年消融季时期的MODIS冰雪反照率产品, 选取高亚洲地区23条冰川, 估算了逐日和8天合成反照率产品的消融季最小和平均反照率共4种反照率参数, 分析了不同反照率参数变化特征及其与年际物质平衡的相关性, 探讨了两者相关性在空间上和不同类型冰川之间的分布特征, 主要结论如下:

(1) 最小反照率和平均反照率取值分别集中在0.1~0.4和0.3~0.6之间, 相比于消融季最小反照率, 平均反照率的波动较小, 相同子区内冰川反照率的年际变化或长期变化趋势保持一致, 具有区域相似性特点; 反照率变化速率集中在 $-0.015\sim 0.01\text{ a}^{-1}$ 之间, 除西喜马拉雅和祁连山地区的几条冰川外, 多数冰川反照率在近二十年内均呈现下降趋势。

(2) 相比其他3种消融季反照率参数, 8天合成产品的消融季平均反照率与年际物质平衡相关性最优, 13条冰川呈明显线性正相关, 其中10条为高度线性相关, 3条为中度相关, 8天均值合成可进一步弥补云覆盖的影响, 且平均反照率比最小反照率稳定, 年际变化特征也与物质平衡更吻合, 因此更适用于年际物质平衡的监测。

(3) 消融季反照率与年际物质平衡在各冰川子区内的多数冰川中均存在显著线性关系, 类似的线性相关关系也出现在亚大陆型、极大陆型和海洋型冰川中, 亦均无明显的区域差异。

由于年际物质平衡数据匮乏, 兴都库什、喀喇昆仑和西昆仑等区域的冰川未开展相关性评估; 另一方面, 希萨尔-阿莱、帕米尔和横断山等区域的冰川未显示出线性相关, 上述区域冰川反照率与物质平衡的相关性还有待加强验证。后续可在MODIS冰雪反照率产品的基础上进一步融合LandSat和Sentinel-2等光学遥感数据, 获取高时空分辨率反照率, 更好地揭示冰川反照率变化及其与年际物质平衡的相关性。

志 谢 美国国家雪冰数据中心 (<https://nsidc.org/>)、国家青藏高原科学数据中心 (<http://data.tpdc.ac.cn>) 和世界冰川监测服务中心 (<https://wgms.ch/>) 对本研究提供的数据支持, 国家重点研发计划课题(2017YFA0603103)、国家自然科学基金(41431070; 42174046)和中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA19070104)对本研究提供的资助, 审稿专家和编辑对论文修改提供的宝贵建议, 在此一并表示感谢。

参考文献(References)

Bhattacharya A, Bolch T, Mukherjee K, King O, Menounos B, Kapitsa V, Neckel N, Yang W and Yao T. 2021. High Mountain Asian gla-

cier response to climate revealed by multi-temporal satellite observations since the 1960s. *Nature Communication*, 12(1): 4133 [DOI: 10.1038/s41467-021-24180-y]

Brun F, Dumont M, Wagnon P, Berthier E, Azam M, Shea J M, Sirguey P, Rabatel A and Ramanathan A. 2015. Seasonal changes in surface albedo of Himalayan glaciers from MODIS data and links with the annual mass balance. *The Cryosphere*, 9(1): 341-355 [DOI: 10.5194/tc-9-341-2015]

Casey K A, Polashenski C M, Chen J and Tedesco M. 2017. Impact of MODIS sensor calibration updates on Greenland Ice Sheet surface reflectance and albedo trends. *The Cryosphere*, 11(4): 1781-1795 [DOI: 10.5194/tc-11-1781-2017]

Chen J, Qin X, Kang S, Du W, Sun W and Liu Y. 2018. Effects of clouds on surface melting of Laohugou glacier No. 12, western Qilian Mountains, China. *Journal of Glaciology*, 64(243): 89-99 [DOI: 10.1017/jog.2017.82]

Chen J, Qin X, Kang S, Du W, Sun W and Liu Y. 2019. Potential Effect of Black Carbon on Glacier Mass Balance during the Past 55 Years of Laohugou Glacier No. 12, Western Qilian Mountains. *Journal of Earth Science*, 31(2): 410-418 [DOI: 10.1007/s12583-019-1238-5]

Davaze L, Rabatel A, Arnaud Y, Sirguey P, Six D, Berthier E and Dumont M. 2018. Monitoring glacier albedo as a proxy to derive summer and annual surface mass balances from optical remote-sensing data. *The Cryosphere*, 12(1): 271-286 [DOI: 10.5194/tc-12-271-2018]

Dehecq A, Gourmelen N, Gardner A S, Brun F, Goldberg D, Nienow P W, Berthier E, Vincent C, Wagnon P and Trouvé E. 2018. Twenty-first century glacier slowdown driven by mass loss in High Mountain Asia. *Nature Geoscience*, 12(1): 22-27 [DOI: 10.1038/s41561-018-0271-9]

Dowson A J, Sirguey P and Cullen N J. 2020. Variability in glacier albedo and links to annual mass balance for the gardens of Eden and Allah, Southern Alps, New Zealand. *The Cryosphere*, 14(10): 3425-3448 [DOI: 10.5194/tc-14-3425-2020]

Dumont M, Gardelle J, Sirguey P, Guillot A, Six D, Rabatel A and Arnaud Y. 2012. Linking glacier annual mass balance and glacier albedo retrieved from MODIS data. *The Cryosphere*, 6(6): 1527-1539 [DOI: 10.5194/tc-6-1527-2012]

Dyurgerov M, Meier M F and Bahr D B. 2009. A new Ind-ex of glacier area change: a tool for glacier monitoring. *Journal of Glaciology*, 55(192): 710-716 [DOI: 10.3189/002214309789471030]

Fu D J, Xiao H, Su F Z, Zhou C H, Dong J W, Zeng Y L, Yan K, Li S W, Wu J, Wu W Z and Yan F Q. Remote sensing cloud computing platform development and Earth science application. 2021, *National Remote Sensing Bulletin*, 25(1): 220-230 (付东杰, 肖寒, 苏奋振, 周成虎, 董金玮, 曾也鲁, 闫凯, 李世卫, 吴进, 吴文周, 颜凤芹. 2021. 遥感云计算平台发展及地球科学应用. *遥感学报*, 25(1): 220-230 [DOI: 10.11834/jrs.20210447])

Gardner A S, Moholdt G, Cogley J G, Wouters B, Arendt A A, Wahr J, Berthier E, Hock R, Pfeffer W T and Kaser G. 2013. A Reconciled Estimate of Glacier Contributions to Sea Level Rise: 2003 to

2009. *Science*, 340(6134): 852-857 [DOI: 10.1126/science.1234532]
- Greuell W and Oerlemans J. 2005. Assessment of the surface mass balance along the transect greenland ice sheet from satellite derived albedos. *Annals of Glaciology*, 42: 107-117 [DOI: 10.3189/172756404781812682]
- Hock R. 2003. Temperature Index Melt Modelling in Mountain Areas. *Journal of Hydrology*, 282(1): 104-115 [DOI: 10.1016/S0022-1694(03)00257-9]
- Hugonnet R, McNabb R, Berthier E, Menounos B, Nuth C, Girod L, Farinotti D, Huss M, Dussaillant I, Brun F and Kääb A. 2021. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature*, 592(7856): 726-731 [DOI: 10.1038/s41586-021-03436-z]
- Jacob T, Wahr J, Pfeffer W T and Swenson S. 2012. Recent contributions of glaciers and ice caps to sea level rise. *Nature*, 482(7386): 514-518 [DOI: 10.1038/nature10847]
- Klein A G and Stroeve J. 2002. Development and validation of a snow albedo algorithm for the MODIS instrument. *Annals of Glaciology*, 34: 45-52 [DOI: 10.3189/172756402781817662]
- Kraaijenbrink P D A, Stigter E E, Yao T and Immerzeel W W. 2021. Climate change decisive for Asia's snow meltwater supply. *Nature Climate Change*, 11(7): 591-597 [DOI: 10.1038/s41558-021-01074-x].
- Li X, Che X and Li X W. 2020. Remote Sensing of Cryosphere. Beijing: Science Press: 43-44 (李新, 车涛, 李新武. 2020. 冰冻圈遥感学. 北京: 科学出版社: 43-44)
- Lin X, Wen J G, Wu S B, Hao D L, Xiao Q and Liu Q H. 2020. Advances in topographic correction methods for optical remote sensing imageries. *National Remote Sensing Bulletin*, 24(8): 958-974 (林兴稳, 闻建光, 吴胜标, 郝大磊, 肖青, 柳钦火. 2020. 地表反射率地形校正物理模型与效果评价方法研究进展. 遥感学报, 24(8): 958-974 [DOI: 10.11834/jrs.20209167])
- Liu Y. 2018. Dataset of mass balance on the Laohugou Glacier No. 12, western Qilian Mountains (2014-2018). National Tibetan Plateau Data Center (刘宇硕. 2018. 祁连山老虎沟12号冰川物质平衡数据(2014-2018). 国家青藏高原科学数据中心 [DOI: 10.11888/Glacio.tpd.270006])
- Mao R J, Wu H B, He J Q, Guo Z M, Wu Y W and Wu X J. Spatiotemporal Variation of Albedo of Muztagh Glacier in the Kunlun Mountains and Its Relation to Dust. *Journal of Glaciology and Geocryology* 2013, 35(5): 1133-1142 (毛瑞娟, 吴红波, 贺建桥, 郭忠明, 吴玉伟, 吴雪娇. 2013. 昆仑山木孜塔格冰川反照率变化特征及其与粉尘的关系. 冰川冻土, 35(5): 1133-1142 [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0128])
- Matsuo K and Heki K. 2010. Time-variable ice loss in Asian high mountains from satellite gravimetry. *Earth & Planetary Science Letters*, 290(1-2): 30-36 [DOI: 10.1016/j.epsl.2009.11.053]
- Mu J X, Li Z Q, Zhang H and Liang P B. The global glacierized area: current situation and recent change, based on the Randolph Glacier Inventory (RGI 6.0) published in 2017. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(2): 238-248 (牟建新, 李忠勤, 张慧, 梁鹏斌. 2018. 全球冰川面积现状及近期变化——基于2017年发布的第6版 Randolph 冰川编目. 冰川冻土, 40(2): 238-248 [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0028])
- Oerlemans J., Klok E. 2004. Effect of summer snowfall on glacier mass balance. *Annals of Glaciology*, 38, 97-100 [DOI: 10.3189/172756404781815158]
- Pang S J, Ke C Q, Zhou X R, Zhang Q B, Fan Y B and Yu X N. 2021. Glacier Mass Balance Changes in Malan Mountain Based on Synthetic Aperture Radar Interferometry and LIDAR Altimetry. *National Remote Sensing Bulletin*. (庞书剑, 柯长青, 周兴华, 张其兵, 范宇宾, 喻薛凝. 2021. 基于 InSAR 与激光雷达测高的马兰冰川物质平衡变化. 遥感学报 [DOI: 10.11834/jrs.20210389])
- Qie Y F. 2020. Spatial and Temporal Variations of Glacier Surface Temperature and Albedo in the Qinghai-Tibetan Plateau during the Past 20 Years using MODIS Data. Xi'an: Northwest University. (鄒宇凡. 2020. 基于 MODIS 数据的近 20 年青藏高原冰川表面温度与反照率时空变化研究. 西安: 西北大学)
- Rabatel A, Sircugy P, Drolon V, Maisongrande P, Arnaud Y, Berthier E, Davaze L, Dedieu J-P and Dumont M. 2017. Annual and Seasonal Glacier-Wide Surface Mass Balance Quantified from Changes in Glacier Surface State: A Review on Existing Methods Using Optical Satellite Imagery. *Remote Sensing*, 9(5) [DOI: 10.3390/rs9050507]
- Radić V and Hock R. 2010. Regional and global volumes of glaciers derived from statistical upscaling of glacier inventory data. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*, 115(F1) [DOI: 10.1029/2009jfr001373]
- Scherler, D, Wulf, H, and Gorelick, N. 2018. Global assessment of supraglacial debris-cover extents. *Geophysical Research Letters*, 45, 11798 - 11805 [DOI: 10.1029/2018GL080158]
- Shean D E, Bhushan S, Montesano P, Rounce D R, Arendt A and Osmanoglu B. 2020. A Systematic, Regional Assessment of High Mountain Asia Glacier Mass Balance. *Frontiers in Earth Science*, 7 [DOI: 10.3389/feart.2019.00363]
- Shi Y F, Huang M H and Ren B H. 1988. An Introduction of glaciers in China. Beijing: Science Press (施雅风, 黄茂桓, 任炳辉. 1988. 中国冰川概论. 北京: 科学出版社)
- Shi Y F and Liu S Y. 2000. Estimation on the response of glaciers in China to the global. *Chinese Science Bulletin*, 45(7): 668-672 [DOI: 10.1007/BF02886048]
- Sircugy P, Mathieu R and Arnaud Y. 2009. Satellite monitoring of the seasonal snow cover with MODIS at 250 m spatial resolution in the Southern Alps of New Zealand: Methodology and accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, 113(1): 160-181 [DOI: 10.1016/j.rse.2008.09.008]
- Sircugy P, Still H, Cohen N J, Dumont M, Arnaud Y and Conway J P. 2016. Reconstructing the mass balance of Brewster Glacier, New Zealand, using MODIS-derived glacier-wide albedo. *The Cryosphere*, 10(5): 2465-2484 [DOI: 10.5194/tc-10-2465-2016]
- Spieß M, Maussion F, Möller M, Scherer D and Schneider C. 2015. MODIS derived equilibrium line altitude estimates for Purogangri ice cap, Tibetan Plateau, and their relation to climatic predictors (2001 - 2012). *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geogra-*

- phy, 97(3), 599-614 [DOI: 10.1111/geoa.12102]
- Stammes K, Tsay S C, Wiscombe W J and Jayaweera K. 1988. Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media. *Applied Optics*, 27(12): 2502-2509 [DOI: 10.1364/AO.27.002502]
- Su B, Li Z Q, Zhang M J, Guo R, Sun M P, Che Y J and Ying X. 2015. A comparative study on mass balance between the continental glaciers and the temperate glaciers: Taking the typical glaciers in the Tianshan Mountains and the Alps as example. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 37(5): 1131-1140 (苏勃, 李忠勤, 张明军, 郭蓉, 孙美平, 车彦军, 应雪. 2015. 大陆型冰川与海洋型冰川物质平衡对比研究——以天山和阿尔卑斯山典型冰川为例. *冰川冻土*, 37(5): 1131-1140 [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2015.0127])
- Tang Z G, Wang J, Wang X, Peng H H and Liang J. 2017. Spatiotemporal variation of snow cover in Tianshan Mountains based on MODIS. *Remote Sensing Technology and Application*, 32(3): 556-563 (唐志光, 王建, 王欣, 彭焕华, 梁继. 2017. 近15年天山地区积雪时空变化遥感研究. *遥感技术与应用*, 32(3): 556-563 [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2017.3.0556])
- Vincent C, Ramanathan A, Wagnon P, Dobhal D P, Linda A, Berthier E, Sharma P, Arnaud Y, Azam M F and Jose P G. 2013. Balanced conditions or slight mass gain of glaciers in the Lahaul and Spiti region (northern India, Himalaya) during the nineties preceded recent mass loss. *The Cryosphere*, 7(2): 569-582 [DOI: 10.5194/tc-7-569-2013]
- Wang J, Ye B, Cui Y, Yang G, He X and Sun W. 2011. A-curacy assessment of MODIS daily snow albedo product based on scaling transformation. 2011 International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering, Nanjing: 2865-2870 [DOI: 10.1109/RSETE.2011.5964912]
- Wang J, Ye B, Cui Y, He X and Yang G. 2013. Spatial and temporal variations of albedo on nine glaciers in western China from 2000 to 2011. *Hydrological Processes*, 28(9): 3454-3465 [DOI: 10.1002/hyp.9883]
- Wang N L, Yao T D, Xu B Q, Chen A A and Wang W C. 2019. Spatiotemporal Pattern, Trend, and Influence of Glacier Change in Tibetan Plateau and Surroundings under Global Warming. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 34(11): 1220-1232. (王宁练, 姚檀栋, 徐柏青, 陈安安, 王伟财. 2019. 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. *中国科学院院刊*, 34(11): 1220-1232 [DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.2019.11.005])
- Wang Q, Yi S and Sun W. 2021. Continuous Estimates of Glacier Mass Balance in High Mountain Asia Based on ICESat-1, 2 and GRACE/GRACE Follow-on Data. *Geophysical Research Letters*, 48(2) [DOI: 10.1002/essoar.10504473.1]
- Wang R, Liu S, Shangguan D, Radi V and Zhang Y. 2019. Spatial Heterogeneity in Glacier Mass-Balance Sensitivity across High Mountain Asia. *Water*, 11(4): 776 [DOI: 10.3390/w11040776]
- Williamson S N, Copland L, Thomson L and Burgess D. 2020. Comparing simple albedo scaling methods for estimating Arctic glacier mass balance. *Remote Sensing of Environment*, 246 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111858]
- Wu X, Wang N, Lu A, Pu J, Guo Z and Zhang H. 2015. Variations in Albedo on Dongkemadi Glacier in Tanggula Range on the Tibetan Plateau during 2002 - 2012 and Its Linkage with Mass Balance. *Arctic, Antarctic, and Research Alpine*, 47(2): 281-292 [DOI: 10.1657/aar.00c-13-307]
- Xie Z C. 1994. Glacier mass balance research in High Mountain Asia. *Chinese Academy of Sciences*, 9(3): 245-248 (谢自楚. 1994. 高亚洲冰川物质平衡研究. *中国科学院院刊*, 9(3): 245-248 [DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.1994.03.012])
- Xu B, Cao J, Hansen J and Wang N. 2009. Black soot and the survival of Tibetan glaciers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(52): 22114-22118 [DOI: 10.1073/pnas.0910444106]
- Xu T L, Wu G J, and Zhang X L. 2018. Albedo on glaciers in the Tibetan Plateau based on MODIS data: spatiotemporal distribution and variation. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 40(5): 875-883 (徐田利, 邬光剑, 张学磊. 2018. 基于MODIS数据的青藏高原冰川反照率时空分布及变化研究. *冰川冻土*, 40(5): 875-883 [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0094])
- Yao T D, Qin D H, Shen Y P, Zhao L, Wang N L and Lu A. 2013. Cryospheric changes and their impacts on regional water cycle and ecological conditions in the Qinghai-Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Nature*, 35(3): 179-186 (姚檀栋, 秦大河, 沈永平, 赵林, 王宁练, 鲁安新. 2013. 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. *自然杂志*, 35(3): 179-186 [DOI: 10.3969/j.issn.0253-9608.2013.03.004])
- Ye W H, Wang F T, Li Z Q, Zhang H, Xu C H and Huai B J. 2016. Temporal and spatial distributions of the equilibrium line altitudes of the monitoring glaciers in High Mountain Asia. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 38(6): 1459-1469 (叶万花, 王飞腾, 李忠勤, 张慧, 徐春海, 怀保娟. 2016. 高亚洲定位监测冰川平衡线高度时空分布特征研究. *冰川冻土*, 38(6): 1459-1469 [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2016.0171])
- Zhang T G, Gao T G, Diao W Q and Zhang Y L. 2021. Snow/ice albedo variation and its impact on glacier mass balance in the Qilian Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 43(1): 145-157 (张太刚, 高坛光, 刁文钦, 张玉兰. 2021. 祁连山区雪冰反照率变化及其对冰川物质平衡的影响. *冰川冻土*, 43(1): 145-157 [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0038])
- Zhang Y, Gao T, Kang S, Shangguan D and Luo X. 2021. Albedo reduction as an important driver for glacier melting in Tibetan Plateau and its surrounding areas. *Earth-Science Reviews*, 220 [DOI: 10.1016/j.earscrv.2021.103735]
- Zhang Z, Jiang L, Liu L, Sun Y and Wang H. 2018. Annual Glacier-Wide Mass Balance (2000 - 2016) of the Interior Tibetan Plateau Reconstructed from MODIS Albedo Products. *Remote Sensing*, 10(7) [DOI: 10.3390/rs10071031]

Assessment and analysis of correlation between remote sensing albedo in ablation season and annual mass balance for glaciers in High Mountain Asia

LIU Yi^{1,2}, JIANG Liming^{1,2}, ZHANG Zhimin³, LI Chao¹

1. State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. School of Surveying and Urban Spatial Information, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan, 467036

Abstract: Ablation season albedo is one of the important parameters to characterize the variation of annual glacier mass balance. The types of glaciers in High Mountain Asia are diverse and glacier change mechanism is complex. The ability of glacier surface albedo to characterize the annual mass balance in different types of glaciers, and its regional characteristics need to be further understood. Based on the MODIS ice/snow albedo and mass balance time series from 2000 to 2019, this paper analyzes the variation characteristics of four ablation season albedo parameters of 23 glaciers in the High Mountain Asia, evaluates the correlation between different albedo parameters and annual mass balance, and discusses the impact of albedo change on the annual glacier mass balance in different regions and different types. The results show that in recent 20 years, except for the glaciers in the western Himalayas and Qilian Mountains, the albedo of other glaciers shows a decreased trend, the fluctuation of the minimum albedo in ablation season is more drastic than the averaged albedo, the interannual variation and the long-term trend of albedo are consistent in the same sub-regions; The albedo of 13 glaciers has a significant linear positive correlation with the annual mass balance ($P < 0.05$). Among the four albedo parameters, the correlation of averaged albedo derived by 8-day composite product is the best; The linear relationship between albedo and mass balance has no obvious regional distribution law in different glaciated sub-regions and types. This study can provide a useful reference for deepening the understanding of the influence of ice and snow albedo on glacier mass balance in the High Mountain Asia.

Key words: glacier albedo, glacier mass balance, MODIS ice/snow albedo, High Mountain Asian

Supported by Supported by National Key R & D Program of China (No. 2017YFA0603103); National Natural Science Foundation of China (No. 41431070 and 42174046); Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (No. XDA19070104)