

中国冰川区表碛厚度估算及其影响研究进展

张 勇¹, 刘时银^{2,3,4}

(1. 湖南科技大学资源环境与安全工程学院, 湘潭 411201; 2. 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650091; 3. 云南省国际河流与跨境生态安全重点实验室, 昆明 650091; 4. 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, 兰州 730000)

摘要: 表碛覆盖型冰川是中国西部分布较为广泛的冰川类型, 其典型特征是冰川消融区部分或全部覆盖了一层厚度不一的表碛。与裸冰或雪相比, 表碛覆盖层下冰的融化过程有独特性, 表碛厚度空间分布对一条冰川的消融、物质平衡和径流过程的影响有别于无表碛覆盖型冰川。本文回顾了近年来表碛厚度分布及其影响的研究, 通过对这些进展进行总结以进一步明晰表碛影响研究的方向; 同时着重介绍了近期发展的基于遥感影像热红外波段和可见光近红外波段、大气—表碛层—冰川界面能量平衡过程的表碛厚度估算方法和表碛覆盖综合评估模型, 结合地面观测, 分析了以遥感反演的表碛层热阻系数表征表碛厚度的精度, 介绍了这类模型在表碛覆盖型冰川物质平衡和径流研究中的应用效果, 以及在综合评估流域/区域尺度表碛影响的应用情况, 并分析了该模型存在的不足及进一步改进的研究方向, 为实现中国西部区域表碛影响的系统评估奠定基础, 从而提升对区域水资源和冰川灾害的模拟和预测能力。

关键词: 表碛覆盖型冰川; 表碛; 热阻系数; 消融; 水资源; 中国

DOI: 10.11821/dlxb201709006

1 引言

表碛覆盖型冰川是指消融区部分或全部为表碛所覆盖的冰川, 该类型冰川在中国天山、帕米尔高原、喀喇昆仑山、昆仑山、念青唐古拉山、喜马拉雅山、横断山等山区分布广泛^[1-6]。据中国第二次冰川编目统计, 中国境内表碛覆盖型冰川共有 1723 条, 总面积为 12974.7 km², 表碛覆盖面积占这些冰川总面积的 11.5%^[7]。其中, 天山地区表碛覆盖型冰川数量最多、面积最大, 其次为喜马拉雅山、帕米尔高原东部、念青唐古拉山、喀喇昆仑山和昆仑山地区 (表 1)。在这些表碛覆盖型冰川中, 有 299 条冰川表碛面积超过 1.0 km², 总面积为 7474.0 km², 表碛覆盖面积占冰川面积的比例达 15.5%, 其中 21 条冰川表碛面积超过 10.0 km²^[7]。在中国面积超过 100.0 km² 的 22 条冰川中, 10 条为表碛覆盖型冰川^[7]。在兴都库什—喀喇昆仑—喜马拉雅山地区的 287 条表碛覆盖型冰川中, 表碛面积比例介于 2.8%~34.6%^[5], 青藏高原东南部贡嘎山地区表碛覆盖型冰川的表碛面积比例介于 1.7%~53.0%^[8]。与裸冰或雪相比, 表碛覆盖层由于反射率、颗粒大小、颜色等物理性质

收稿日期: 2016-12-27; 修订日期: 2017-05-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671057); 科技部科技基础性工作专项(2013FY111400); 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-12-1); 国家自然科学基金项目(41130641, 41190084); 云南大学引进人才项目(YJRC3201702) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41671057; National Basic Work Program of MST, No.2013FY111400; Major Project of CAS, No.KZZD-EW-12-1; National Natural Science Foundation of China, No.41130641, No.41190084; Introduction of talent project of Yunnan University, No.YJRC3201702]

作者简介: 张勇(1979-), 男, 山东滕州人, 博士, 主要研究方向为冰冻圈与全球变化研究。E-mail: zhangy@lzb.ac.cn
刘时银(1963-), 男, 河南信阳人, 教授, 主要从事冰川变化及其影响研究。E-mail: shiyin.liu@ynu.edu.cn

表1 中国境内各山系表碛覆盖型冰川分布特征

Tab. 1 Distribution characteristics of debris-covered glaciers in different mountains of China

山系	条数	面积 (km ²)	所占全部冰川 面积比例(%)	表碛区域 面积(km ²)	表碛区域占表碛型冰川 面积比例(%)
阿尔金山	6	30.5	10.3	2.3	7.4
阿尔泰山	10	46.0	25.7	1.2	2.6
冈底斯山	9	28.1	2.2	2.5	9.0
横断山	26	166.5	11.8	30.0	18.0
喀喇昆仑山	274	2249.3	37.5	188.4	8.4
昆仑山	349	2214.6	18.9	182.3	8.2
念青唐古拉山	170	1336.5	13.7	125.7	9.4
帕米尔	132	1094.1	56.9	191.2	17.5
祁连山	12	28.0	1.8	1.1	4.0
羌塘高原	2	26.6	1.3	0.3	1.0
唐古拉山	7	47.1	2.6	2.3	4.9
天山	578	3938.0	54.1	480.9	12.2
喜马拉雅山	148	1769.4	27.6	285.6	16.1
总计	1723	12974.7	25.0	1493.7	11.5

注: 数据来源于刘时银等^[7]。

的差异, 具有独特的热力过程, 导致其下覆冰川冰的消融过程不同^[9-12], 使得表碛覆盖型冰川与无表碛覆盖型冰川对同样的气候变化条件显示了不同的响应特征^[5, 13]。野外观测试验与研究表明^[9-12, 14-16], 表碛厚度及其空间分布对下覆冰川消融过程的影响显著, 从而影响冰川物质平衡的空间分布特征与高度结构特征^[13, 16-17]。然而中国西部地区仅少数冰川有表碛厚度的实测资料^[2, 4, 15-16, 18-23], 区域冰川表碛厚度空间分布及其影响尚不清楚。

消融区是冰川主要的产流区, 表碛的不均匀分布及其加速或抑制冰川消融这一过程深刻影响着冰川流域径流的形成与变化过程^[13, 24-26]。在天山南坡科其喀尔冰川流域的冰川径流模拟中发现, 与假设消融区无表碛覆盖冰面条件下的冰川径流相比, 表碛覆盖条件下的冰川径流量减少了约35%^[26], 而在青藏高原东南部的海螺沟冰川流域, 表碛覆盖导致冰川径流增加了约22%^[24]。大多数表碛覆盖型冰川面积较大^[5, 7, 13], 其在不同时空尺度的变化势必导致以冰川融水补给为主河流水量的变化, 从而影响流域水资源及其未来趋势。尽管部分流域的水文模拟考虑了表碛对冰川消融及其径流的影响^[26-28], 但这些研究并没有考虑表碛厚度空间分布的影响。表碛厚度不均匀的空间分布使得冰川表面产生了差异性的消融, 从而在消融区容易形成冰面湖塘^[29-30]和冰崖^[31-33]。冰面湖塘和冰崖在表碛覆盖型冰川消融区分布较为广泛, 这些冰面湖塘和冰崖是冰川流域水文过程的重要影响因素^[13, 25, 32-34], 同时冰面湖塘还是冰川灾害的策源地(如溃决洪水), 影响下游地区生产和生活^[13, 35-38]。因此, 迫切需要发展较好刻画表碛覆盖型冰川消融区表碛厚度空间分布及其下覆冰川消融物理过程的模型, 将有助于研究该类型冰川的气候响应过程和水资源效应。

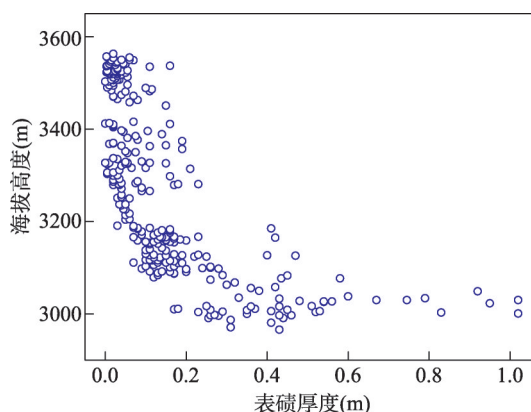
对于表碛厚度的不均匀分布及其影响这一过程的模拟一直以来都为人们所关注。Kraus^[39]首先从冰雪表面能量平衡的角度, 构建了一个理论消融模型, 该模型特别考虑了表碛覆盖、地形风系统和坡度等的变化对冰面消融的影响。Nakawo等^[10-11]基于能量平衡方程, 对薄层表碛覆盖下的冰面消融进行了估算, 估算结果与实测消融量有着较好的一致性。随后, 基于热传导理论和能量平衡原理, 在不同表碛覆盖型冰川区发展了不同类型的基于物理过程的表碛覆盖冰川消融模型^[11, 15, 23, 40-43], 在冰川尺度上能够较好模拟不同厚度表碛层下的冰川消融过程, 从物理机制上分析了表碛空间分布的影响。然而, 这些

模型均需要较多的输入参数,尤其是表碛厚度、地表温度、表碛热属性参数等,限制了这类模型在流域/区域尺度上的应用。本文旨在介绍中国西部表碛覆盖型冰川区表碛厚度分布估算及其影响的研究进展,重点介绍近期发展的基于遥感影像热红外波段和可见光近红外波段、大气—表碛层—冰川界面能量平衡过程的表碛厚度估算方法和表碛覆盖综合评估模型及其应用,为进一步研究中国西部流域/区域尺度表碛覆盖型冰川区表碛影响及该类型冰川对气候变化响应特征和区域水资源效应奠定基础。

2 表碛—海拔分布特征

青藏高原东南部海螺沟冰川开展的表碛厚度观测表明^[16],消融区上部表碛相对较薄,随着海拔高度的降低,表碛厚度呈增加趋势,冰川末端最厚(图1)。冰川在重力的作用下能够通过冰川内部的塑性变形和底部滑动实现向下游的运动,在运动过程中除通过刨蚀和掘蚀从冰床上获得冰碛物外,冻融作用、冰/雪崩都会导致冰川两侧山坡上的岩屑物质崩落至冰川表面或进入冰川内部^[2, 44-45]。随着冰川向下的运动,冰川内部分布较浅的岩屑由于冰面消融而暴露于冰川表面,与冰面岩屑物质等形成了大量粒度不一(从细粒到巨大的漂砾)、成分复杂的表碛。表碛与冰川一起向下游运动,随着冰川运动速度的减缓,表碛在不同海拔高度堆积,尤其在冰川末端。因此冰川末端的表碛较厚,而消融区上部较薄。在其他典型表碛覆盖型冰川开展的表碛厚度观测中,也发现了相同的表碛—海拔高度分布特征^[2, 4, 18-20, 46-47]。在海螺沟冰川区的表碛厚度观测中发现,在同一海拔高度上表碛厚度的空间分布差异较大,其厚度一般由中间向两侧逐渐增厚^[16]。

基于中国西部少数几条冰川表碛厚度—海拔分布数据^[2, 4, 16, 18-19]分析发现,不同区域、不同类型的表碛覆盖型冰川区的表碛厚度差异显著。天山南坡科其喀尔冰川(亚大陆型)末端表碛平均厚度为1.5 m,局部超过2.0 m^[19];位于青藏高原东南部贡嘎山东坡的海螺沟冰川(海洋型),其冰川末端表碛平均厚度为0.4 m,最大表碛厚度约1.0 m^[16](图1),贡嘎山西坡的大贡巴冰川和小贡巴冰川末端平均厚度分别为1.0 m和0.3 m左右^[2]。表碛在冰川区的积累受多个因素的影响,其中最重要的因素是冰川流域潜在表碛供应陡坡的分布^[6, 44],该类型陡坡在冰川流域分布越广,通过冻融作用、冰/雪崩等使得陡坡上的岩屑物质崩落至冰川表面或进入冰川内部的越多^[2, 6, 44-45]。表碛在冰川区积累后随冰川一起向下游运动,从而在不同海拔高度堆积,形成厚度不一的表碛层。通过对比上述4条冰川的运动速度^[2, 48-49]发现,海螺沟冰川平均冰川运动速度最大^[49],其次是科其喀尔冰川^[48],大贡巴和小贡巴冰川相对较小^[2]。尽管海螺沟冰川与小贡巴冰川末端表碛平均厚度差别不大,但二者的冰川运动速度相差很大,前者最大冰川流速可达205.0 m a⁻¹^[49],而后者仅为36.0 m a⁻¹^[2],由此可见,冰川运动速度的大小对表碛厚度的影响较小。然而,由于表碛厚度监测数据的限制,目前对中国西部不同区域、不同类型冰川表碛厚度差异特征及原因尚需进一步分析。



注:数据来源于Zhang等^[16]。

图1 青藏高原东南部海螺沟冰川区表碛厚度随海拔高度的变化特征

Fig. 1 Variation in debris thickness with altitude on the Hailuoguo Glacier in the southeastern Tibetan Plateau

3 表碛厚度估算方法

目前发展的各类表碛覆盖冰川消融模型,均需要表碛厚度、表碛层热属性及其分布等输入参数^[14-15, 23, 40-42]。由于获取困难,仅少数表碛覆盖型冰川有表碛厚度、地表温度、热属性参数等实测资料^[4, 15-16, 18-23, 40],因而制约了在流域/区域尺度上认识表碛的影响。随着遥感技术的发展,由于其监测的全球覆盖能力、区域快速重复观测能力以及高空间分辨率优势,为流域/区域尺度表碛厚度、表碛层热属性参数及其空间分布的估算提供了数据支持。基于遥感影像,发展了不同的表碛厚度估算方法,已在不同地区表碛覆盖型冰川的研究中得到了广泛地应用^[8, 20-21, 47, 50-61]。

3.1 地表温度—表碛厚度关系法

表碛层属于不良导热体,而其下覆的冰川冰具有冷却作用,导致不同厚度的表碛向下传导的热量和所受的冰川冰冷却作用不同。与裸冰相比,不同厚度的表碛具有不同的温度差,从而基于表碛层的表面温度对其厚度进行间接的反演。基于遥感影像的热红外波段数据,利用定标系数对图像整型数值(DN值)进行辐射定标,将像元的DN值转换为大气层上界光谱辐射亮度,然后利用与传感器对应的近似普朗克函数公式转化为地表温度^[62-64],获取冰川区地表温度及其空间分布。基于冰川区不同海拔高度表碛厚度实测数据和相应位置遥感反演的地表温度,建立地表温度—表碛厚度经验关系;基于该关系式和遥感反演的地表温度值,估算表碛的厚度及其空间分布^[20-21, 50, 65]。

Mihalcea等^[20-21]基于ASTER影像的热红外波段反演了冰川区的地表温度,结合野外实测的表碛厚度,利用统计回归方法获取了不同海拔高度带地表温度与表碛厚度之间的统计关系,以此为基础,分别估算了喀喇昆仑山巴托拉冰川和意大利Miage冰川消融区的表碛厚度,分析了表碛厚度的空间分布特征。Juen等^[50]利用3种不同的回归方法构建了天山南坡科其喀尔冰川消融区ASTER影像反演地表温度与表碛厚度之间的关系式,但3类方法获取的相关关系都不显著,这可能是由于表碛在消融区的分布具有显著的异质性特征,消融区冰崖、冰面湖塘等广泛分布^[31],导致冰川消融区地形条件非常复杂,实测数据很难代表整个海拔高度的表碛厚度分布特征。然而,依据这些统计关系式和遥感反演的地表温度对表碛层厚度进行间接反演时会产生一定误差,尤其不适用于较厚的表碛分布区^[20, 58-59];同时这些经验关系式通常不能直接应用于其他冰川区,需要针对不同的气象条件和不同的冰川对地表温度—表碛厚度关系重新进行校准。

3.2 SAR表碛厚度探测

中国西部表碛覆盖型冰川地处偏远,海拔较高,进行冰川区实地监测较为困难。如上所述,遥感现已成为大范围表碛覆盖型冰川研究的必备手段,尤其是合成孔径雷达(SAR)技术。在全极化SAR图像中,表碛粗糙度比周边地物的高,显示了其独特的散射信息^[51-53],进而可有效区分表碛覆盖区与非表碛覆盖区。在天山南坡科其喀尔冰川的研究表明,在交叉极化通道,无论是SAR的L波段还是C波段,与周围地物相比,表碛的后向散射系数高,从而有效区分表碛与非表碛,其精度达到了90%^[51]。合成孔径雷达,尤其是长波段雷达,对地物具有一定的穿透性,特别是L波段的全极化雷达,在其对表碛穿透深度范围内,体散射分量随着表碛厚度的增加而增大,而C波段的雷达没有这一现象^[51],基于此,通过合成孔径雷达估算表碛的厚度。

与热红外波段相比,全极化合成孔径雷达分辨率更高,且几乎不受天气条件的影响^[52],为地处偏远、海拔较高的冰川区表碛厚度的估算提供了可能,使其在表碛覆盖型冰川研究中有广泛的应用前景。然而,SAR对表碛层的穿透深度较浅,对厚层表碛很难识别。

3.3 基于能量平衡方程估算表碛厚度

发展基于物理机制的表碛厚度估算模型是表碛覆盖型冰川研究的重要研究内容之一。基于热传导理论和能量平衡原理,该类模型首先通过对表碛层能量平衡方程求解,获取表碛层中的传导热通量;同时,基于傅立叶定律,假定表碛—冰川冰界面处的温度为0℃,表碛层传导热通量可作为表碛层导热系数、地表温度和表碛厚度的函数;然后将两类不同方法获取的表碛层传导热通量相结合,从而估算表碛厚度^[54-55, 61]。需要指出的是,由于潜热通量在表碛层能量组成中所占比例较小^[66],在模型计算过程中忽略不计。

Foster等^[61]利用遥感影像的热红外波段数据、实测的表碛厚度、表碛温度和气象数据,发展了基于能量平衡方程估算表碛厚度的模型。该模型在计算过程中,假定表碛层内的温度剖面呈线性变化,且认为遥感影像获取时段的表碛层较为干燥,同时基于机载激光雷达测量生成的数字高程模型评估了冰川表面坡度等地形特征对模型估算表碛厚度的影响。该模型已应用于意大利的Miage冰川,与该冰川表碛厚度实测值和已发布的表碛厚度分布图^[20]对比发现,能够较为准确地估算出表碛厚度及其分布,并基于不同时期的遥感影像数据,成功验证了该模型在同一冰川区的时间可转移性。Schauwecker等^[54-55]进一步发展了上述模型,认为表碛层内的温度剖面呈非线性变化而不是线性变化,且表碛层能量平衡闭合于表碛层的上层而非整层,并成功应用于喜马拉雅山区的Bara Shigri冰川。

模型越是基于物理基础,其受到所使用的输入数据质量的影响就越大。上述模型使用了大量的冰川区实测数据^[54-55, 61],如机载雷达测量数据、地表特征数据、表碛厚度、地表温度、表碛导热系数等,导致模型很难移植到其他表碛覆盖型冰川区,尤其是很难在流域/区域尺度上应用于较为偏远的表碛覆盖型冰川的研究。

3.4 基于表碛热阻系数估算表碛厚度

为了获取流域/区域尺度表碛厚度及其空间分布特征,提出了表碛层热阻系数这一概念,其定义为表碛厚度与表碛层导热系数的比值^[10-11],并采用这一参数作为冰川区不同厚度表碛空间分布的代用指标^[10-11, 16, 25, 47, 56, 60]。由其定义可知,在表碛厚度和表碛层导热系数已知的情况下可计算出表碛热阻系数,然而,在较大尺度上,尤其区域尺度上,上述各参数很难获取。在实际计算表碛热阻系数的过程中,通常假定冰内热传导为零、表碛层内储热变量忽略不计,且表碛层的温度剖面呈线性变化^[10, 39],表碛层内的传导热通量可描述为地表温度与表碛热阻系数的函数;同时传导热通量也可描述为表碛层能量平衡的残余项,可基于能量平衡方程求解获取;上述两种方法获取的表碛层传导热通量相结合,可以计算表碛热阻系数^[8, 10-11, 16, 25, 56, 60]。

在喜马拉雅山、喀喇昆仑山、贡嘎山等地区表碛覆盖型冰川开展的能量平衡野外观测试验与研究中发现,在能量组成中,净辐射是主要的热量来源,湍流热通量(感热和潜热通量)所占比例较小,尤其在冰川消融期的晴朗天气条件下,这一能量组成特征更显著^[9, 11, 14, 16, 60, 67]。因此,在表碛热阻系数的计算过程中忽略了湍流热通量。图2是基于ASTER影像的可见光近红外波段(VNIR;波段1~3)、热红外波段(TIR;波段10~14)和太阳辐射(包括长波、短波辐射)数据估算冰川区表碛热阻系数的流程图。其中,地表温度是基于ASTER影像数据的热红外波段应用3.1节中方法进行估算^[62-64],ASTER影像可见光近红外波段大气顶部的光谱反射率用来估算宽波段的反照率^[68],然后结合太阳长波、短波辐射数据,计算冰川区的净辐射;最后依据估算的净辐射和地表温度获取冰川区的表碛热阻系数(图2)。需要指出的是,太阳辐射数据来源于冰川区观测资料或再分析数据,如NCEP/NCAR数据^[69]、FLASHFlux数据^[70]等,其获取的时间和位置必须与ASTER影像获取时间和位置一致。

上述方法已应用于喜马拉雅山^[25, 47, 56, 60]、贡嘎山^[8, 16]、高加索山^[70]和西南天山等地区。在不同典型表碛覆盖型冰川的研究中。在不同规模、不同类型典型冰川区研究中发现, 遥感反演的表碛热阻系数与表碛厚度实测值具有较好的相关性, 且二者的空间分布较为一致(图3)。同样, 在喜马拉雅山 Khumbu 冰川也发现了表碛热阻系数与表碛厚度空间分布相一致的规律^[60]。尽管该方法具有一定的不确定性, 但 Zhang 等^[16]成功地验证了表碛热阻系数作为不同厚度表碛空间分布的代用指标, 并且这一方法的不确定性已在不同地区表碛覆盖型冰川开展的研究中进行了深入探讨^[8, 16, 25, 60]。在喜马拉雅山不同表碛覆盖型冰川的研究中, Suzuki 等^[60]采用两种完全不同的方法获取了同一冰川区表碛的热阻系数及其空间分布, 首先基于多期 ASTER 影像数据和 NCEP/NCAR 太阳辐射资料, 应用上述方法估算了表碛的热阻系数; 同时, 基于该冰川区的野外观测数据(包括温度、湿度、风速、太阳辐射等), 采用能量平衡模型估算了同一冰川区的表碛热阻系数, 在这一计算过程中考虑了所有能量组分, 包括湍流热通量(感热和潜热通量)。对比发现, 在表碛热阻系数估算过程中, 忽略湍流热通量和应用不同时段 ASTER 影像数据基本不影响表碛热阻系数的空间分布趋势; 同时发现山体对太阳辐射的遮蔽作用对热阻系数空间分布的影响不明显^[60]。Fujita 等^[25]评估了基于 ASTER 影像和 NCEP/NCAR 太阳辐射数据反演的表碛热阻系数及其不确定性对冰川流域径流模拟的影响, 结果发现, 应用上述方法计算的表碛热阻系数和反照率所产生的不确定性对流域径流模拟的影响相对较小, 在没有校准数据的情况下, 二者所产生的不确定性对径流的影响仅占径流总量的 8%, 且表碛热阻系数不确定性的影响比反照率的影响小。由此可见, 遥感反演的表碛热阻系数可作为不同厚度表碛空间分布的代用指标, 其在流域/区域尺度表碛影响的研究中具有广泛的应用前景。

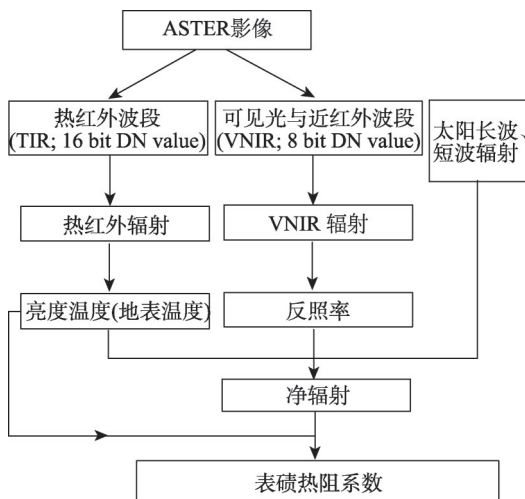


图2 基于 ASTER 数据反演表碛层热阻系数流程 (TIR 和 VNIR 分别指 ASTER 数据的热红外波段和可见光近红外波段)

Fig. 2 Schematic diagram of the method used to calculate the thermal resistance of the debris cover using ASTER data (TIR and VNIR denote thermal infrared and visible/near-infrared bands of ASTER)

4 表碛厚度分布影响及其评估

4.1 表碛厚度分布影响

研究表明^[9-12, 14], 当表碛层厚度小于某一临界厚度(<约 20~30 mm), 其下覆冰川冰消融大于裸冰消融, 即表碛加速了冰川消融; 随着表碛厚度的增大(大于临界厚度), 表碛的阻热作用抑制了冰川消融(图4)。表碛层的反照率远低于冰雪表面, 能够接受更多的太阳辐射, 对于较薄的表碛来说, 在加热表碛层的同时, 仍有大量热量向下覆冰层输送, 进而使下覆冰层融化增加; 当表碛层较厚时, 大部分热量用于加热表碛层, 随表碛厚度的增加, 到达下覆冰面的热量随之减少, 且在气层不稳定层结条件下, 表碛层表面部分热量还要向上传导给空气, 从而减少了到达冰川表面的热量, 对冰面消融起到了抑

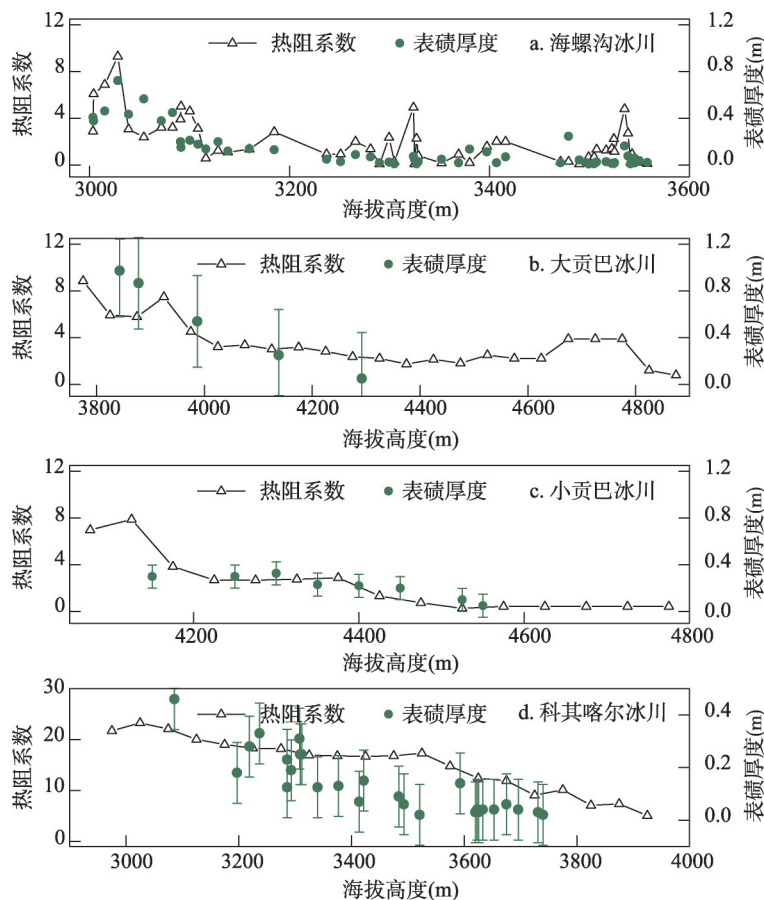
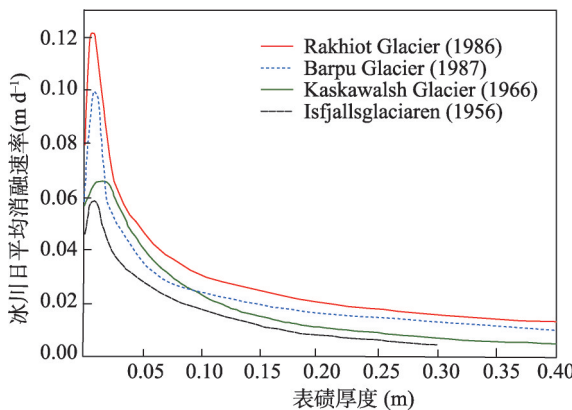


图3 不同冰川区表碛厚度实测数据与ASTER影像反演的表碛热阻系数($\times 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$)对比图
Fig. 3 Comparison of ground-surveyed debris thicknesses and ASTER-derived thermal resistances of debris layers ($\times 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$) on the Hailuoguo (a), Dagongba (b), Xiaogongba (c) and Keqicar (d) glaciers. Error bars denote standard deviation

制作用^[3, 9, 13, 15]。在天山南坡科其喀尔冰川海拔3620 m处的消融观测点,表碛厚度约为30 mm左右,与裸冰区消融量相比,该处的消融量减少了46.5%^[19];而在喜马拉雅山绒布冰川海拔5750 m处的消融观测点,相比裸冰,表碛厚度为50 mm处的冰川消融速率增加了67%^[18]。

在青藏高原东南部海螺沟冰川消融区的研究表明,由于表碛厚度的不均匀分布,消融区44.0%的区域处于加速消融状态,约17%的冰川消融受到抑制^[8]。对于青藏高原东南部贡嘎山地区的表碛覆盖型冰川来说,当表碛覆盖比例小于20%时,表碛的存在导致该地区25%的表碛覆盖型冰川物质损失加速,随着表



注:数据来源于Mattson等^[9]。

图4 不同冰川区日平均消融强度与表碛厚度的关系
Fig. 4 Relationship between ice ablation rate and debris thickness on different debris-covered glaciers

碛覆盖比例的增加, 冰川物质损失逐渐受到抑制^[8]。基于不同表碛覆盖型冰川的消融观测资料分析发现^[13, 16, 18-19, 72], 冰川区最大消融量并没有出现在冰川末端, 而是出现于消融区中部区域, 与无表碛覆盖型冰川不同。冰川消融的这种空间分布特征势必影响冰川物质平衡梯度^[13]和冰川径流的空间分布^[24-25]。在尼泊尔喜马拉雅山 Trambau 冰川流域的径流模拟表明, 表碛覆盖冰川区是该流域径流主要的产流区, 大约 55.5% 的流域径流量来源于表碛覆盖冰川区, 特别是海拔较低的表碛分布区^[25]。

基于不同山区有限的表碛厚度观测及其影响分析发现 (表 2), 冰川区表碛覆盖比例介于 2.0%~36.0% 之间, 且不同山区表碛覆盖比例差异很大。尽管这些山区表碛覆盖比例差异显著, 但总体上表碛的影响以抑制冰川消融为主, 仅部分表碛厚度分布较薄的区域以加速冰川消融为主, 如喜马拉雅山的 Trambau 冰川流域和贡嘎山区。

4.2 表碛覆盖综合评估模型及应用

综上所述, 表碛覆盖及其影响的区域差异显著 (表 2)。在兴都库什—喀喇昆仑—喜马拉雅山地区, 基于不同的遥感数据, 评估了该地区冰川的物质变化特征, 分析发现, 尽管表碛影响以抑制冰川消融为主, 但表碛覆盖冰川平均物质损失速率与无表碛覆盖冰川相差无几^[76-77], 即使在同一海拔范围内也具有类似的结果^[78]; 而在喜马拉雅山区的 Langtang 流域冰川物质变化研究中没有发现类似的现象^[79]。然而, 这些研究中对表碛覆盖影响的评估是基于不同的方法获取的, 加之使用的遥感数据类型、空间分辨率等的不同^[76-79], 尤其是很多区域没有表碛厚度分布的观测数据 (表 2), 导致在流域/区域尺度上表碛影响的空间变异性较大^[77-78], 且仍存在一定的争议。因此, 迫切需要发展表碛空间分布与影响评估方法对表碛分布及影响进行综合评估, 将有助于研究表碛覆盖型冰川物质平衡变化过程及其水资源效应。

表 2 不同山区表碛影响的特征

Tab. 2 Characteristics of the debris-cover effect in different mountains

区域	表碛覆盖比例(%)	表碛影响	表碛厚度(m)	参考文献
高加索山	8.1~23.0	抑制消融为主	—	[73]
阿尔泰山	3.7~25.8	抑制消融为主	—	[74]
天山托木尔峰地区	7.5~22.0	抑制消融为主, 2%的区域加速消融	0~2.5	[1, 3, 26]
兴都库什—喀喇昆仑—喜马拉雅山地区	2.0~36.0	抑制消融为主	—	[5]
Langtang 流域	19.0	抑制消融为主	—	[32, 56]
Trambau 冰川流域	15.1	加速消融为主	—	[25]
贡嘎山地区	13.5	10.2%的消融区加速消融, 40.8%抑制消融	0~1.4	[8]
新西兰南阿尔卑斯山区	8.0	抑制消融为主	0~3	[75]

为了克服上述困难, Zhang 等^[8]在综合评估青藏高原东南部贡嘎山地区表碛厚度空间分布的影响研究中, 基于遥感影像热红外波段和可见光近红外波段、大气—表碛层—冰川界面能量平衡过程构建了表碛覆盖综合评估模型。该模型基于遥感反演的表碛热阻系数及其空间分布, 耦合了大气、表碛层、冰川等不同界面的能量收支过程, 主要包括三个模块: 表碛空间特征提取模块、冰川消融模块和冰川物质平衡/径流模块 (图 5)。

表碛空间特征提取模块是基于遥感影像的热红外波段和可见光近红外波段, 反演表碛热阻系数及其空间分布 (图 2), 从而表征冰川区表碛厚度的空间分布特征。依据表碛热阻系数 (R), 将冰川区划分为表碛覆盖区 ($R > 0$) 和无表碛覆盖区 ($R \leq 0$)。在消融模块中, 表碛覆盖区和无表碛覆盖区的冰川消融量是基于相应界面的能量平衡过程计算

获取。在冰川物质平衡/径流模块中,冰川区任一点的物质平衡与径流量可基于对冰川消融、降雨和融水再冻结量的计算获取。为综合评估表碛空间分布的影响,提出了消融比率(MR)这一概念,其定义为表碛覆盖格网冰川消融量与同一格网假定无表碛覆盖时冰川消融量的比值。当 $MR > 1.0$,表明表碛覆盖冰川冰消融量大于无表碛覆盖冰川冰的消融量,即表碛覆盖促进冰川消融;当 $MR < 1.0$,说明表碛抑制冰川消融;当 $MR = 1.0$,说明表碛下覆冰川消融量与裸冰消融量一致。该模型及其计算过程的详细介绍可参考Zhang等^[8]。

上述模型已成功应用于不同尺度的表碛影响研究中^[8, 24]。在流域尺度上,Zhang等^[24, 80]应用该模型评估了青藏高原东南部海螺沟冰川流域表碛空间分布对流域冰川消融和径流的影响。该流域有7条冰川,其中3条较大的冰川属于表碛覆盖型冰川。基于ASTER影像数据,反演了3条冰川区的表碛热阻系数及其空间分布,分析发现表碛覆盖面积占3条冰川消融区总面积的39%^[80]。以此作为模型输入计算了不同表碛厚度下的冰川消融速率和流域径流量。与不同时期、不同表碛厚度下的冰川消融、流域径流实测值对比发现,尽管个别时间点的模拟值有偏差,但大多数情况下的模拟消融与径流比较准确^[8, 24, 80]。由此可见,该模型能够较好的模拟不同厚度表碛下的冰川消融速率和流域径流过程。基于模型效果,评估了表碛空间分布对该流域消融和径流的影响。分析发现,该流域表碛的不均匀分布主要起到了加速冰川消融的作用,而抑制作用相对较小;与无表碛覆盖条件下的流域径流相比,表碛覆盖状态下的流域径流将增加约8.1%^[24]。这一发现与Fujita等^[25]在尼泊尔喜马拉雅山Trambau冰川流域所获取的结果类似,而与Nakawo等^[56]在尼泊尔Lirung冰川流域获取的结果相反。在区域尺度上,Zhang等^[8]获取了贡嘎山地区冰川消融区表碛的空间分布特征,分析了其空间分布的影响,结果发现,贡嘎山地区冰川的表碛分布十分广泛,68%的冰川属于表碛覆盖型冰川,表碛覆盖面积为32 km²,占冰川面积的13.5%,且多分布于面积较大的冰川;依据消融比率值可知,约10.2%的区域表碛起到了促进冰川消融的作用,约40.8%的区域表碛抑制了冰川消融。对于该地区5条长于10 km的冰川来说,其表碛覆盖率介于1.74%~20.1%之间,其中,磨子沟冰川的表碛覆盖面积最小,南门关沟冰川最大;仅海螺沟冰川区以表碛促进消融为主,其余冰川区则以抑制作用为主(表3)。

5 结论与展望

中国西部表碛覆盖型冰川分布广泛,其冰川物质平衡模拟、径流预估以及冰面湖泊突发洪水评估等都需要考虑表碛厚度的空间分布及其对冰川消融过程的影响,这一特征

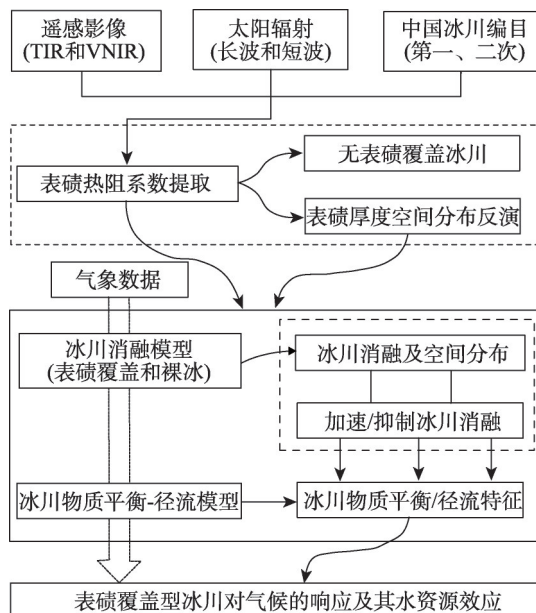


图5 表碛覆盖综合评估模型在中国西部冰川区应用流程图

Fig. 5 Flow chart of debris-cover effect assessment model applied to the Chinese glaciers

表3 青藏高原东南部贡嘎山区长度大于10 km 冰川表碛分布及其影响

Tab. 3 Distribution of debris cover and its effect on five debris-covered glaciers with length >10 km on Mount Gongga of the southeastern Tibetan Plateau

冰川	海拔 (m a.s.l.)	面积 (km ²)	长度 (km)	表碛面积 比例(%)	表碛覆盖影响(%)	
					加速	抑制
海螺沟	2990~7556	25.7	13.1	6.4	44.0	17.0
大贡巴	3660~6684	21.2	11.0	16.8	3.0	56.0
磨子沟	3600~6886	26.8	11.6	1.74	2.0	11.0
燕子沟	3680~7556	32.2	11.7	11.7	41.0	50.1
南门关	3460~6540	16.7	10.0	20.1	17.0	35.6

注: 数据来源于Zhang等^[8]。

完全不同于无表碛覆盖型冰川。目前, 在流域/区域尺度上, 对表碛厚度、表碛热属性参数及其空间分布等进行实地观测较为困难, 导致观测资料缺乏, 使得表碛影响的系统评估能力不强。为了克服上述的困难, 发展了基于遥感影像和大气—表碛层—冰川界面能量平衡过程的表碛覆盖综合评估模型。该模型以遥感反演的表碛热阻系数为核心, 能够有效地模拟冰川消融、物质平衡和径流, 系统分析表碛厚度空间分布对这些物理过程的影响。该模型不需要直接测量表碛层厚度及相关的热属性参数, 直接以遥感影像反演的表碛层热阻系数为输入参数, 有效地评估表碛对消融、物质平衡和径流过程的影响, 减少了野外监测工作, 简化了计算过程。

表碛覆盖型冰川所分布的区域是很多大江大河的水资源形成区, 这些表碛覆盖型冰川在不同时空尺度的变化势必导致这些河流流量的丰枯变化, 从而影响各流域及下游地区的水资源。表碛覆盖综合评估模型为分析这些地区表碛覆盖型冰川对气候变化的响应及其对水资源的影响提供方法支持。基于遥感影像数据 (包括可见光近红外和热红外波段)、中国第一、二次冰川编目数据^[81]和太阳辐射数据 (包括长波、短波辐射) (图5), 可以估算中国西部表碛覆盖型冰川区表碛热阻系数; 基于表碛热阻系数的空间分布, 区分表碛覆盖冰川区和无表碛覆盖冰川区, 进而反演表碛厚度及其空间分布, 从而分析表碛厚度分布的区域差异; 以此作为表碛覆盖综合评估模型的输入数据, 结合长序列的气象观测资料或再分析资料, 系统评估表碛对冰川消融、物质平衡与水资源的影响, 进而研究该类型冰川对气候响应的区域性差异。

表碛厚度空间分布具有显著的异质性特征, 导致冰川表面显著地差异性消融, 从而在消融区表面形成了复杂的地表形态, 即冰崖、冰面湖塘、裸冰、表碛覆盖等共同存在^[13, 29-31, 37, 82-84]。研究表明^[13, 82-83], 表碛覆盖区这一地表组合分布较为广泛, 能提供相当于同面积中厚层表碛覆盖区数倍的冰川融水。冰面湖形成后, 通过湖岸冰崖面消融、湖水水位线附近的热融扩张、湖底冰面消融、湖岸冰崖冰崩解等方式扩张^[84]。而许多高大的冰崖下侧常常发育有巨大的冰湖, 一方面, 冰崖的存在对冰湖起到了拦蓄的作用; 另一方面, 在气候因子作用下, 冰崖的不断消融与形态演化也可能为冰湖的溃决创造条件。然而, 表碛覆盖综合评估模型没有考虑这一复杂地表组合对该界面能量平衡过程的影响, 因此, 通过强化野外综合观测 (如典型冰面湖—大气界面能量通量等) 和室内分析, 结合高分辨率数字高程模型, 发展表碛覆盖消融区复杂地表过程模型, 如冰崖消融—演化模型^[34, 85]和冰面湖塘能量平衡模型^[86], 并集成到现有的表碛覆盖综合评估模型中, 从而实现表碛影响系统的、全面的评估, 以便更好地认识表碛及周边复杂地表相互作用机理, 提升对区域表碛影响的评估能力, 准确认识中国西部表碛覆盖型冰川对气候响应的机理, 促进其对区域水资源和冰川灾害的模拟和预测能力。

参考文献(References)

- [1] Zhang Yong, Liu Shiyin, Ding Yongjian, et al. Preliminary study of mass balance on the Keqicar Baxi Glacier on the south slope of Tianshan Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(4): 477-484. [张勇, 刘时银, 丁永建, 等. 天山南坡科契卡尔巴西冰川物质平衡初步研究. *冰川冻土*, 2006, 28(4): 477-484.]
- [2] Li Jijun, Su Zhen. *Glaciers in the Hengduan Mountains*. Beijing: Science Press, 1996, 70-110. [李吉均, 苏珍. 横断山冰川. 北京: 科学出版社, 1996, 70-110.]
- [3] Su Zhen, Zhang Wenjin, Ding Liangfu. Modern glaciers in Tuomur District//Mountaineering and Expedition Term of Chinese Academy of Science. *Glacial and Weather in Mt. Tuomuer District, Tianshan*. Urumqi: Xinjiang People's Publishing House, 1985: 32-88. [苏珍, 张文敬, 丁良福. 托木尔峰地区的现代冰川//中国科学院登山考察队. 天山托木尔峰地区的冰川与气象. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1985: 32-88.]
- [4] Yang Wei, Yao Tandong, Xu Baiqing, et al. Characteristics of recent temperat glacier fluctuations in the Parlang Zangbo River basin, southeast Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(18): 1775-1780. [杨威, 姚檀栋, 徐柏青, 等. 近期藏东南帕隆藏布流域冰川的变化特征. *科学通报*, 2010, 55(18): 1775-1780.]
- [5] Scherler D, Bookhagen B, Strecker M R. Spatially variable response of Himalayan glaciers to climate change affected by debris cover. *Nature Geoscience*, 2011, 4: 156-159.
- [6] Benn D I, Owen L A. Himalayan glacial sedimentary environments: A framework for reconstructing and dating the former extent of glaciers in high mountains. *Quaternary International*, 2002, 97-98: 3-25.
- [7] Liu Shiyin, Zhang Yong, Liu Qiao, et al. *Study on the Impact of Climate change on Glacier and Its Risk*. Beijing: Science Press, 2017. [刘时银, 张勇, 刘巧, 等. 气候变化对冰川影响与风险研究. 北京: 科学出版社, 2017.]
- [8] Zhang Y, Hirabayashi Y, Fujita K, et al. Heterogeneity in supraglacial debris thickness and its role in glacier mass changes of the Mount Gongga. *Science China: Earth Sciences*, 2016, 59(1): 170-184.
- [9] Mattson L E, Gardner J S, Young G J. Ablation on debris covered glaciers: An example from the Rakhiot Glacier, Punjab, Himalaya. *International Association of Hydrological Sciences Publication*, 1993, 218: 289-296.
- [10] Nakawo M, Young G J. Field experiments to determine the effect of a debris layer on ablation of glacier ice. *Annals of Glaciology*, 1981, 2: 85-91.
- [11] Nakawo M, Young G J. Estimate of glacier ablation under a debris layer from surface temperature and meteorological variables. *Journal of Glaciology*, 1982, 28(98): 29-34.
- [12] Østrem G. Ice melting under a thin layer of moraine and the existence of ice cores in moraine ridges. *Geografiska Annaler*, 1959, 41: 228-230.
- [13] Benn D I, Bolch T, Hands K, et al. Response of debris-covered glaciers in the Mount Everest region to recent warming, and implications for outburst flood hazards. *Earth-Science Reviews*, 2012, 114(1/2): 156-174.
- [14] Kayastha R B, Takeuchi Y, Nakawo M, et al. Practical prediction of ice melting beneath various thickness of debris cover on Khumbu Glacier, Nepal, using a positive degree-day factor. *International Association of Hydrological Sciences Publication*, 2000, 264: 71-81.
- [15] Nicholson L, Benn D I. Calculating ice melt beneath a debris layer using meteorological data. *Journal of Glaciology*, 2006, 52(178): 463-470.
- [16] Zhang Y, Fujita K, Liu S, et al. Distribution of debris thickness and its effect on ice melt at Hailuoguo Glacier, southeastern Tibetan Plateau, using in situ surveys and ASTER imagery. *Journal of Glaciology*, 2011, 57(206): 1147-1157.
- [17] Benn D I, Lehmkuhl F. Mass balance and equilibrium-line altitudes of glaciers in high-mountain environments. *Quaternary International*, 2000, 65-66: 15-29.
- [18] Liu Weigang, Xiao Cunde, Liu Jingshi, et al. Analyzing the ablation rate characteristics of the Rongbuk Glacier on the Mt. Qomolangma, Central Himalayas. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(4): 814-823. [刘伟刚, 效存德, 刘景时, 等. 喜马拉雅山珠穆朗玛峰北坡绒布冰川消融速率特征分析. *冰川冻土*, 2013, 35(4): 814-823.]
- [19] Zhang Yong. Study on response of glacier runoff to climate change in representative glacierized catchment, China [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2009. [张勇. 典型流域冰川径流对气候变化的响应研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009.]
- [20] Mihalcea C, Brock B W, Diolaiuti G, et al. Using ASTER satellite and ground-based surface temperature measurements to derive supraglacial debris cover and thickness patterns on Miage Glacier. *Cold Regions Science and Technology*, 2008, 52: 341-354.

- [21] Mihalcea C, Mayer C, Diolaiuti G, et al. Spatial distribution of debris thickness and melting from remote-sensing and meteorological data, at debris-covered Baltoro glacier, Karakoram, Pakistan. *Annals of Glaciology*, 2008, 48: 49-57.
- [22] Nicholson L, Benn D I. Properties of natural supraglacial debris in relation to modelling sub-debris ice ablation. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2013, 38(5): 490-501.
- [23] Reid T D, Brock B W. An energy-balance model for debris-covered glaciers including heat conduction through the debris layer. *Journal of Glaciology*, 2010, 56(199): 903-916.
- [24] Zhang Y, Hirabayashi Y, Liu Q, et al. Glacier runoff and its impact in a highly glacierized catchment in the southeastern Tibetan Plateau: past and future trends. *Journal of Glaciology*, 2015, 61(228): 713-730.
- [25] Fujita K, Sakai A. Modelling runoff from a Himalayan debris-covered glacier. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(7): 2679-2694.
- [26] Zhang Y, Liu S, Ding Y. Glacier meltwater and runoff modelling, Keqicar Baqi Glacier, southwestern Tien Shan, China. *Journal of Glaciology*, 2007, 53(180): 91-98.
- [27] Immerzeel W W, van Beek L P H, Konz M, et al. Hydrological response to climate change in a glacierized catchment in the Himalayas. *Climate Change*, 2012, 110: 721-736.
- [28] Lutz A F, Immerzeel W W, Shrestha A B, et al. Consistent increase in High Asia's runoff due to increasing glacier melt and precipitation. *Nature Climate Change*, 2014, 4: 587-592.
- [29] Röhl K. Characteristics and evolution of supraglacial ponds on debris-covered Tasman Glacier, New Zealand. *Journal of Glaciology*, 2008, 54(188): 867-880.
- [30] Sakai A, Fujita K. Formation conditions of supraglacial lakes on debris-covered glaciers in the Himalayas. *Journal of Glaciology*, 2010, 56(195): 177-181.
- [31] Han Haidong, Liu Shiyin, Ding Yongjian, et al. Investigation of ice cliffs in the debris-covered area of Koxkar Glacier, Tianshan. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(6): 879-884. [韩海东, 刘时银, 丁永建, 等. 科其喀尔冰川表碛区冰崖形态调查. *冰川冻土*, 2006, 28(6): 879-884.]
- [32] Sakai A, Nakawo M, Fujita K. Melt rate of ice cliffs on the Lirung Glacier, Nepal Himalayas, 1996. *Bulletin of Glaciological Research*, 1998, 16: 57-66.
- [33] Thompson S, Benn D I, Mertes J, et al. Stagnation and mass loss on a Himalayan debris-covered glacier: processes, patterns and rates. *Journal of Glaciology*, 2016, 62(233): 467-485.
- [34] Buri P, Miles E S, Steiner J F, et al. A physically based 3-D model of ice cliff evolution over debris-covered glaciers. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2016, 121(12): 2471-2493.
- [35] Che Tao, Jin Rui, Li Xin, et al. Glacial lakes variation and the potentially dangerous glacial lakes in the Pumqu Basin of Tibet during the last two decades. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(4): 397-402. [车涛, 晋锐, 李新, 等. 近20a来西藏朋曲流域冰湖变化及潜在溃决冰湖分析. *冰川冻土*, 2004, 26(4): 397-402.]
- [36] Wang Xin, Liu Shiyin, Guo Wanqin, et al. Hazard assessment of moraine-dammed lake outburst floods in the Himalayas, China. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(7): 782-790. [王欣, 刘时银, 郭万钦, 等. 我国喜马拉雅山区冰碛湖溃决危险性评价. *地理学报*, 2009, 64(7): 782-790.]
- [37] Wang Xin, Liu Shiyin, Mo Hongwei, et al. Expansion of glacial lakes and its implication for climate changes in the Chinese Himalaya. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(7): 895-904. [王欣, 刘时银, 莫宏伟, 等. 我国喜马拉雅山区冰湖扩张特征及其气候意义. *地理学报*, 2011, 66(7): 895-904.]
- [38] Richardson S D, Reynolds J M. Degradation of ice-cored moraine dams: Implications for hazard development. *International Association of Hydrological Sciences Publication*, 2000, 264: 187-197.
- [39] Kraus H. An energy balance model for ablation in mountainous areas. *International Association of Hydrological Sciences Publication*, 1975, 104: 74-82.
- [40] Han H, Ding Y, Liu S. A simple model to estimate ice ablation under a thick debris layer. *Journal of Glaciology*, 2006, 52(179): 528-536.
- [41] Lejeune Y, Bertrand J-M, Wagnon P, et al. A physically based model of the year-round surface energy and mass balance of debris-covered glaciers. *Journal of Glaciology*, 2013, 59(214): 327-344.
- [42] Reid T D, Carenzo M, Pellicciotti F, et al. Including debris cover effects in a distributed model of glacier ablation. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117: D18105. doi: 10.1029/2012JD017795.
- [43] Rounce D R, Quincey D J, McKinney D C. Debris-covered glacier energy balance model for Imja-Lhotse Shar Glacier in the Everest region of Nepal. *The Cryosphere*, 2015, 9(6): 2295-2310.
- [44] Nagai H, Fujita K, Nuimura T, et al. Southwest-facing slopes control the formation of debris-covered glaciers in the

- Bhutan Himalaya. *The Cryosphere*, 2013, 7(4): 1303-1314.
- [45] Benn D I, Evans D J. *Glaciers and Glaciation*. London: Hodder Education, 2010.
- [46] Nakawo M, Iwata S, Watanabe O, et al. Processes which distribute supraglacial debris on the Khumbu Glacier, Nepal Himalaya. *Annals of Glaciology*, 1986, 8: 129-131.
- [47] Rounce D R, McKinney D C. Debris thickness of glaciers in the Everest area (Nepal Himalaya) derived from satellite imagery using a nonlinear energy balance model. *The Cryosphere*, 2014, 8(4): 1317-1329.
- [48] Lu Hongli, Han Haidong, Xu Junli, et al. Analysis of the flow features in the ablation zone of the Koxkar Glacier on south slopes of the Tianshan Mountain. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(2): 248-258. [鲁红莉, 韩海东, 许君利, 等. 天山托木尔峰科其喀尔巴西冰川表面运动速度特征分析. *冰川冻土*, 2014, 36(2): 248-258.]
- [49] Zhang Y, Fujita K, Liu S, et al. Multi-decadal ice-velocity and elevation changes of a monsoonal maritime glacier: Hailuoguo Glacier, China. *Journal of Glaciology*, 2010, 56(195): 65-74.
- [50] Juen M, Mayer C, Lambrecht A, et al. Impact of varying debris cover thickness on ablation: A case study for Koxkar Glacier in the Tien Shan. *The Cryosphere*, 2014, 8(2): 377-386.
- [51] Huang L, Li Z, Tian B, et al. Recognition of supraglacial debris in the Tianshan Mountains on polarimetric SAR images. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 145: 47-54.
- [52] Li Zhen, Liao Jingjuan. *Synthetic Aperture Radar Ground Parameters Inversion Models and Methods*. Beijing: Science Press, 2011. [李震, 廖静娟. 合成孔径雷达地表参数反演模型与方法. 北京: 科学出版社, 2011.]
- [53] Jiang Zongli, Ding Yongjian, Liu Shiyin, et al. A study of the debris-covered glacier limit based on SAR. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(11): 1245-1251. [蒋宗立, 丁永建, 刘时银, 等. 基于 SAR 的表碛覆盖型冰川边界定位研究. *地球科学进展*, 2012, 27(11): 1245-1251.]
- [54] Schauwecker S, Rohrer M, Huggel C, et al. Remotely sensed debris thickness mapping of Bara Shigri Glacier, Indian Himalaya. *Journal of Glaciology*, 2015, 61(228): 675-688.
- [55] Schauwecker S. Mapping supraglacial debris thickness on mountain glaciers using satellite data: Validation of a new, physically-based method [D]. ETH Zürich, 2012.
- [56] Nakawo M, Rana B. Estimate of ablation rate of glacier ice under a supraglacial debris layer. *Geografiska Annaler*, 1999, 81A: 695-701.
- [57] Paul F, Huggel C, Kääb A. Combining satellite multispectral image data and a digital elevation model for mapping debris-covered glaciers. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89: 510-518.
- [58] Racoviteanu A E, Paul F, Paup B, et al. Challenges and recommendations in mapping of glacier parameters from space: Results of the 2008 Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS) Workshop, Boulder, Colorado, USA. *Annals of Glaciology*, 2009, 50(53): 53-69.
- [59] Ranzi R, Grossi G, Iacovelli L, et al. Use of multispectral ASTER images for mapping debris-covered glaciers within the GLIMS Project. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Anchorage, Alaska, 2004, II: 1144-1147.
- [60] Suzuki R, Fujita K, Ageta Y. Spatial distribution of the thermal properties on debris-covered glaciers in the Himalayas derived from ASTER data. *Bulletin of Glaciological Research*, 2007, 24: 13-22.
- [61] Foster L A, Brock B W, Cutler M E J, et al. A physically based method for estimating supraglacial debris thickness from thermal band remote-sensing data. *Journal of Glaciology*, 2012, 58: 677-691.
- [62] Lillesand T M, Kiefer R W, Chipman J W. *Remote Sensing and Image Interpretation*. New York: John Wiley & Sons, 2004.
- [63] Qin Z H, Karnieli A, Berliner P. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(18): 3719-3746.
- [64] Alley R E, Nilsen M J. Algorithm theoretical basis document for: Brightness temperature Version 3.1. Jet Propulsion Laboratory, 2001: 14.
- [65] Brenning A, Peña M A, Long S, et al. Thermal remote sensing of ice-debris landforms using ASTER: An example from the Chilean Andes. *The Cryosphere*, 2012, 6: 367-382.
- [66] Brock B W, Mihalcea C, Kirkbride M P, et al. Meteorology and surface energy fluxes in the 2005-2007 ablation seasons at the Miage debris-covered glacier, Mont Blanc Massif, Italian Alps. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115: D09106.
- [67] Takeuchi Y, Kayastha R B, Nakawo M. Characteristics of ablation and heat balance in debris-free and debris-covered

- areaas on Khumbu Glacier, Nepal Himalayas, in the pre-monsoon season. International Association of Hydrological Sciences Publication, 2000, 264: 53-61.
- [68] Yüksel A, Akay A E, Gundogan R. Using ASTER imagery in land use/cover classification of eastern Mediterranean landscapes according to CORINE Land Cover Project. *Sensors*, 2008, 8: 1237-1251.
- [69] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77: 437-471.
- [70] Kratz D P, Stackhouse Jr P W, Gupta S K, et al. The fast longwave and shortwave flux (FLASHFlux) data product: Single scanner footprint fluxes. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2014, 53: 1059-1079.
- [71] Noguchi O, Zhang Y, Watanabe S, et al. Estimation of spatial distribution of debris cover on Caucasus Glaciers using ASTER imagery. *Journal of Japan Society of Civil Engineers Ser G*, 2013, 69(5): 45-51.
- [72] Liu Qiao, Liu Shiyin, Zhang Yong, et al. Surface ablation features and recent variation of the lower ablation area of the Hailuoguo glaciers, Mt. Gongga. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(2): 227-236. [刘巧, 刘时银, 张勇, 等. 贡嘎山海螺沟冰川消融区表面消融特征及其近期变化. *冰川冻土*, 2011, 33(2): 227-236.]
- [73] Lambrecht A, Mayer C, Hagg W, et al. A comparison of glacier melt on debris-covered glaciers in the northern and southern Caucasus. *The Cryosphere*, 2011, 5: 525-538.
- [74] Mayer C, Lambrecht A, Hagg W, et al. Glacial debris cover and melt water production for glaciers in the Altay, Russia. *The Cryosphere Discussion*, 2011, 5: 401-430.
- [75] Anderson B, Mackintosh A. Controls on mass balance sensitivity of maritime glaciers in the Southern Alps, New Zealand: The role of debris cover. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117: F01003.
- [76] Nuimura T, Fujita K, Yamaguchi S, et al. Elevation changes of glaciers revealed by multitemporal digital elevation models calibrated by GPS survey in the Khumbu region, Nepal Himalaya, 1992-2008. *Journal of Glaciology*, 2012, 58 (210): 648-656.
- [77] Kääb A, Berthier E, Nuth C, et al. Contrasting patterns of early twenty-first-century glacier mass change in the Himalayas. *Nature*, 2012, 488: 495-498.
- [78] Gardelle J, Berthier E, Arnaud Y, et al. Region-wide glacier mass balances over the Pamir-Karakoram-Himalaya during 1999-2011. *The Cryosphere*, 7(4): 1263-1286.
- [79] Ragettli S, Bolch T, Pellicciotti F. Heterogeneous glacier thinning patterns over the last 40 years in Langtang Himal, Nepal. *The Cryosphere*, 2016, 10(5): 2075-2097.
- [80] Zhang Y, Hirabayashi Y, Liu S. Catchment-scale reconstruction of glacier mass balance using observations and global climate data: Case study of the Hailuoguo catchment, south-eastern Tibetan Plateau. *Journal of Hydrology*, 2012, 444/445: 146-160.
- [81] Liu Shiyin, Yao Xiaojun, Guo Wanqin, et al. The contemporary glaciers in China based on the Second Chinese Glacier Inventory. *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. *地理学报*, 2015, 70(1): 3-16.]
- [82] Sakai A, Nakawo M, Fujita K. Distribution characteristics and energy balance of ice cliffs on debris-covered glaciers, Nepal Himalaya. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2002, 34(1): 12-19.
- [83] Sakai A, Takeuchi N, Fujita K, et al. Role of supraglacial ponds in the ablation processes of a debris-covered glacier in the Nepal Himalayas. International Association of Hydrological Sciences Publication, 2000, 264: 119-130.
- [84] Benn D I, Wiseman S, Hands K A. Growth and drainage of supraglacial lakes on the debris-mantled Ngozumpa Glacier, Khumbu Himal, Nepal. *Journal of Glaciology*, 2001, 47(159): 626-638.
- [85] Steiner J, Pellicciotti F, Buri P, et al. Modeling ice cliff backwasting on a debris covered glacier in the Nepalese Himalayas. *Journal of Glaciology*, 2015, 61(229): 889-907.
- [86] Miles E S, Pellicciotti F, Willis I C, et al. Refined energy-balance modelling of a supraglacial pond, Langtang Khola, Nepal. *Annals of Glaciology*, 2016, 57(71): 29-40.

Research progress on debris thickness estimation and its effect on debris-covered glaciers in western China

ZHANG Yong¹, LIU Shiyin^{2,3,4}

(1. School of Resource Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411021, Hunan, China; 2. Institute of International Rivers and Eco-Security, Yunnan University, Kunming 650091, China; 3. Yunnan Key Laboratory of International Rivers and Transboundary Eco-security, Kunming 650091, China; 4. State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Debris-covered glaciers, characterized by the presence of supraglacial debris mantles in their ablation zones, are widespread in high mountain regions of western China. Supraglacial debris cover on glaciers has the unique thermal process relative to exposed snow and ice, the spatial distribution of which influences both rates and spatial patterns of melting. Due to the debris-cover effect, the responses of debris-covered glaciers to climate change are more complex compared to those of debris-free glaciers. In addition, debris-covered glaciers generally contain a large ice volume, and mass changes of these glaciers are expected to have significant impacts on the regional-scale evolution of river discharge and water resources. However, a better understanding of debris-cover effect in glacier status and hydrology at a regional scale remains a challenge. The difficulty of such a study arises mainly from limited knowledge of the large-scale spatial distribution of the thickness and properties of the debris cover in western China. This study systematically reviews the impacts of the spatial distribution of debris thickness on melting beneath surface debris, mass change and runoff process on debris-covered glaciers. In particular, a physically-based assessment model for debris-cover effect is proposed, which is based on visible and near infrared and thermal infrared bands of remotely sensed data and surface energy-balance process of the debris layer. This model does not require high-quality input parameters related to the extent, thickness and thermal properties of the debris cover, and has been applied to different glaciers of western China for systematically assessing the significance of debris cover and its influence on spatial patterns of ice melting, mass balance and runoff. This approach provides an important insight into exploring the average status of debris-covered glaciers and its impacts on regional water resources in western China. Nevertheless, this approach does not consider the effect of the complex surface composed of co-existing debris-covered ice, bare ice, ice cliffs and supraglacial ponds in the ablation zone, and needs further improvement in the future.

Keywords: debris-covered glacier; debris cover; thermal resistance; melting; water resources; China