

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0086

ZHANG Yong, LIU Shiyin, WANG Xin. Debris-cover effect in the Tibetan Plateau and surroundings: a review[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(3):900-913. [张勇, 刘时银, 王欣. 青藏高原及周边冰川区表碛影响研究进展[J]. 冰川冻土, 2022, 44(3):900-913.]

青藏高原及周边冰川区表碛影响研究进展

张 勇¹, 刘时银², 王 欣¹

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 云南大学 国际河流与生态安全研究院, 云南 昆明 650500)

摘 要: 青藏高原及周边冰川区表碛分布十分广泛,其通过地-气-能-水交换、反照率变化等影响冰川消融及空间特征,导致表碛覆盖型冰川物质平衡响应机制、水文效应及其致灾过程不同于无表碛覆盖型冰川。本文在系统梳理青藏高原及周边冰川区表碛空间分布特征的基础上,综合分析了表碛对冰川区消融、物质平衡和水文过程的影响及其对气候的响应过程,并系统分析了表碛影响观测与模拟的研究进展。目前不同尺度冰川物质平衡和径流模型对表碛影响的考虑依然不足,导致应用现有模型开展表碛分布及动态变化和评估气候变化条件下表碛影响面临诸多挑战。展望未来,深入认识气候-冰川-表碛系统相互作用与反馈机制,发展考虑多物理过程的冰川-表碛系统协同演化的动态模型,预估气候变化驱动下的冰川区表碛动态影响及趋势,进而服务于区域社会经济发展和“绿色丝绸之路”建设。

关键词: 表碛覆盖型冰川; 表碛影响; 消融; 水资源; 青藏高原

中图分类号: P343.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)03-0900-14

0 引言

青藏高原及周边地区是除南北极以外冰川储量最大的区域,被称为“亚洲水塔”^[1-2]。作为“亚洲水塔”冰冻圈重要组成部分的冰川,对气候变化的响应极为迅速^[3-4]。其中表碛覆盖型冰川是青藏高原及周边地区分布较为广泛的冰川类型^[5-10],其独特的气候响应特征和变化已引起了显著的水资源效应^[10-13]和灾害效应^[11,14],已成为影响我国和“一带一路”区域众多国家流域水资源安全与社会经济发展的重要因素。

表碛覆盖型冰川的典型特征是消融区部分或全部覆盖了一层厚度不一的表碛(图1)。冰川在运动过程中除通过刨蚀和掘蚀从冰床获得冰碛物外,冻融作用、冰/雪崩、重力滑塌等都会导致冰川周围山坡上的岩屑物质崩落至冰川表面或进入冰川内部^[15-18]。冰内岩屑物质从冰川上部随着冰川向下运动至消融区[图2(a)],在消融区融出冰面,与冰面岩屑等物质形成表碛。表碛和冰川一起向末端运动的过程中,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。与裸冰或雪相比,表碛层的物理性质(颗粒大小、颜色等)、热力过程和反射率不同,导致表碛下覆冰川的消融过程不同^[19-23]。表碛对下覆冰川消融的影响主要取决于其厚度变化[图2(b)]。当表碛层厚度较薄时,表碛的存在加速了冰川消融,其下覆冰层消融速率大于裸冰区消融速率;随着表碛层的增厚,表碛的存在抑制了冰川消融,其下覆冰层消融速率小于裸冰区消融速率^[19-23]。这一过程深刻地影响了表碛覆盖型冰川的物质平衡响应特征、水文过程及相关灾害的形成^[10-14,24-26],进而影响流域周边及下游地区社会生产与生活。

在气候变暖和冰川剧烈变化背景下,青藏高原及周边不同冰川区表碛覆盖范围呈逐渐扩张趋势^[17,28-30],上述表碛的影响将日趋显著。表碛分布及影响的研究一直以来备受关注^[10-11,23-25,31-35]。然而,受冰川区表碛观测和数据积累的限制,现有研究对青藏高原及周边冰川区表碛影响动态过程与机理的认识较为有限^[10,36],尤其对广大无资料或缺

收稿日期: 2021-06-30; 修订日期: 2021-09-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(42171134;41671057;41761144075)资助

作者简介: 张勇,教授,主要从事冰冻圈变化及其水资源影响研究. E-mail: yong.zhang@hnust.edu.cn

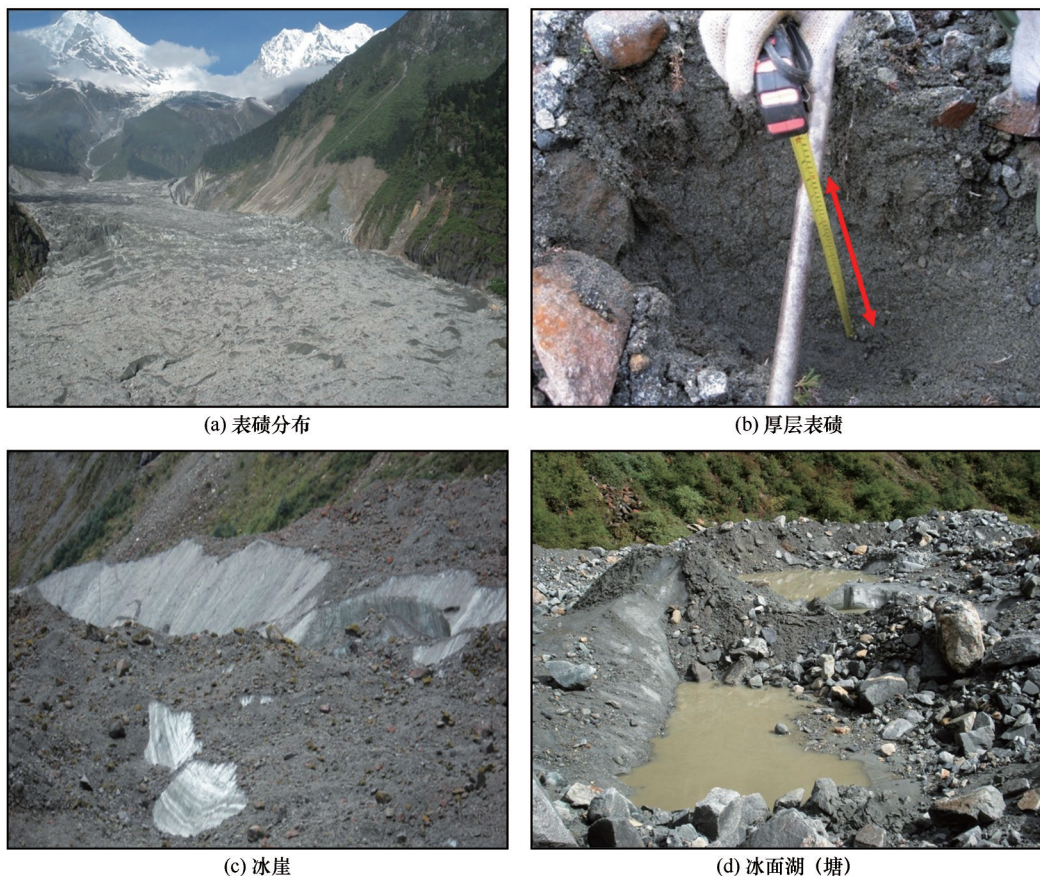


图1 青藏高原东南部海螺沟冰川区表碛分布(a),厚层表碛(b),冰崖(c)与冰面湖(塘)(d)
Fig. 1 Debris distribution (a), thick debris cover (b), ice cliff (c) and supraglacial pond (d)
on the Hailuoguo Glacier in the southeastern Tibetan Plateau

资料冰川区的表碛影响评估,已成为制约认识青藏高原及周边地区冰川差异性变化(退缩、前进或稳定)影响研究的重要因素。为更好地理解表碛覆盖型冰川对气候变化的响应特征及其影响,服务于区域社会经济可持续发展,迫切需从观测与模型的角度审视气候-冰川-表碛系统相互作用与反馈机制,深入研究气候变化背景下冰川区表碛覆盖范围和厚度的动态变化及其影响。

本文以目前所获取的观测数据和相关研究结果为基础,系统分析了青藏高原及周边冰川区表碛空间分布特征,梳理了表碛对冰川区能水过程的影响特征及其研究现状,同时探讨了现有表碛影响研究面临的问题和挑战,展望与表碛分布和影响研究相关的前沿问题,为准确评估气候变化条件下青藏高原及周边表碛覆盖型冰川变化及其响应特征、水资源效应和灾害效应奠定基础。

1 青藏高原及周边冰川区表碛分布

全球冰川区表碛覆盖总面积约 26 000 km²,占

全球冰川面积的 4.4% 左右^[9],其中,青藏高原及周边冰川区是世界上最大的表碛分布区(图 3)。在青藏高原及周边地区,冰川区表碛覆盖面积约 8 415 km²,占该地区冰川面积的 9.0% 左右,占全球表碛覆盖面积的 32.4%^[9]。喜马拉雅山地区表碛覆盖型冰川条数最多,且表碛覆盖面积最大,占青藏高原及周边地区表碛覆盖面积的 31.3%,其次是喀喇昆仑山(18.6%)、帕米尔高原(14.2%)、天山(10.9%),祁连山地区表碛覆盖面积相对较小。据中国第二冰川编目统计,中国境内表碛覆盖型冰川共有 1 723 条,表碛覆盖面积占这些冰川总面积的 11.5%,其中面积超过 100 km² 的 22 条冰川中 10 条冰川有表碛覆盖^[5]。托木尔冰川、土格别里齐冰川和音速盖提冰川是中国面积最大的三条冰川,同时也是表碛覆盖面积最大的三条冰川,表碛面积占冰川面积的比例分别为 17.6%、13.7% 和 10.6%^[5]。

青藏高原及周边不同冰川区的表碛覆盖比例差异较大,喜马拉雅山东段以及青藏高原东南部冰川区表碛覆盖比例较高(图 3)。喜马拉雅山中

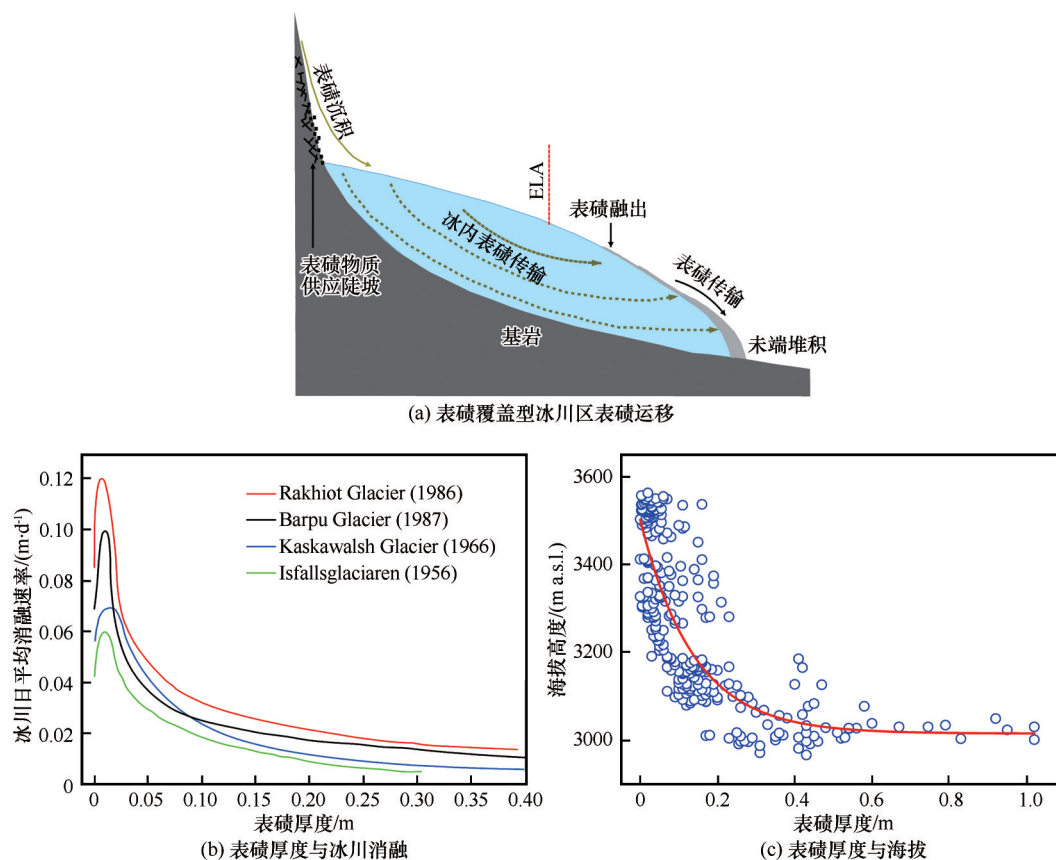


图2 表碛覆盖型冰川区表碛运移(a),表碛厚度与冰川消融关系(b)和表碛厚度-海拔分布图(c),其中图2(b)和图2(c)数据来源于 Mattson 等^[22]和 Zhang 等^[27]

Fig. 2 Debris transport processes (a), relationship between ice melting rate and debris thickness (b) and variation in debris thickness with altitude (c) on debris-covered glaciers, datasets in Fig. 2(b) and 2(c) are derived from Mattson et al^[22] and Zhang et al^[27], respectively

段南坡表碛覆盖面积占冰川面积的比例较高,达36.0%,其次是兴都库什山达22.0%,喜马拉雅山西段、喀喇昆仑山、喜马拉雅山中段北坡表碛面积比例介于18.0%~21.0%,西昆仑山地区表碛面积较小,仅为2.8%^[37]。在青藏高原东南部的贡嘎山,表碛覆盖型冰川占该地区冰川数量的68.0%,其表碛覆盖比例介于1.7%~53.0%之间^[6]。图4(a)显示了青藏高原及周边地区冰川和表碛覆盖面积随海拔高度的分布,其中表碛覆盖主要分布在海拔3 500~5 000 m之间,分别占该地区表碛覆盖总面积和冰川总面积的81%和7.5%。尽管海拔3 000 m以下的表碛覆盖面积较小[图4(a)],但其表碛覆盖比例达到了79.6%,且表碛层相对较厚。

2 表碛对冰川区能水过程的影响及对气候变化的响应

2.1 表碛对冰川区能水过程的影响

与裸冰区不同,表碛层作为大气—冰川界面的

隔热层改变了其覆盖表面的能量平衡收支和热传导过程,进而影响其下覆冰川的消融机制^[19,23,39]。与裸冰表面反照率(0.34~0.51)相比,表碛覆盖表面的平均反照率较小(0.10~0.15)^[16],导致其表面吸收的太阳辐射能增加。基于此,当表碛层厚度较小时,表碛覆盖表面吸收的热量在加热表碛层的同时,仍有大量热量有效地传输到下覆冰层,进而加速下覆冰层融化。随着表碛层厚度增加,其获取的热量大部分用于加热表碛层,减少了到达下覆冰层的热量,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,进一步减少了到达下覆冰层的热量^[39-40],因而与裸冰区消融相比表碛下覆冰层消融受到了抑制。

冰川区表碛层厚度随海拔高度增加而呈逐渐减薄趋势[图2(c)],在同一海拔高度上由中间向两侧表碛逐渐增厚^[27]。由于冰川区表碛厚度空间分布的异质性,改变了冰川区消融的空间特征^[6,11],从而影响表碛覆盖型冰川物质平衡变化的空间分布

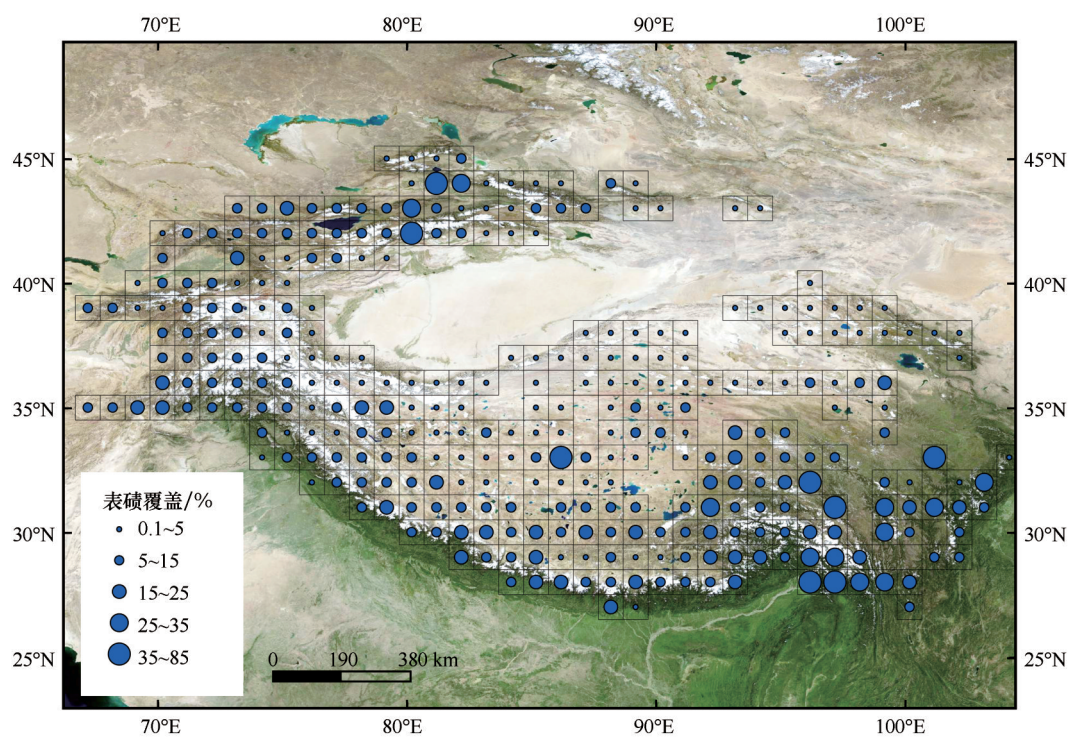


图3 青藏高原及周边冰川区表碛覆盖分布,其中表碛覆盖数据来源于 Scherler 等^[9]
Fig. 3 Spatial distribution of debris cover in the Tibetan Plateau and surroundings, debris cover dataset is derived from Scherler et al^[9]

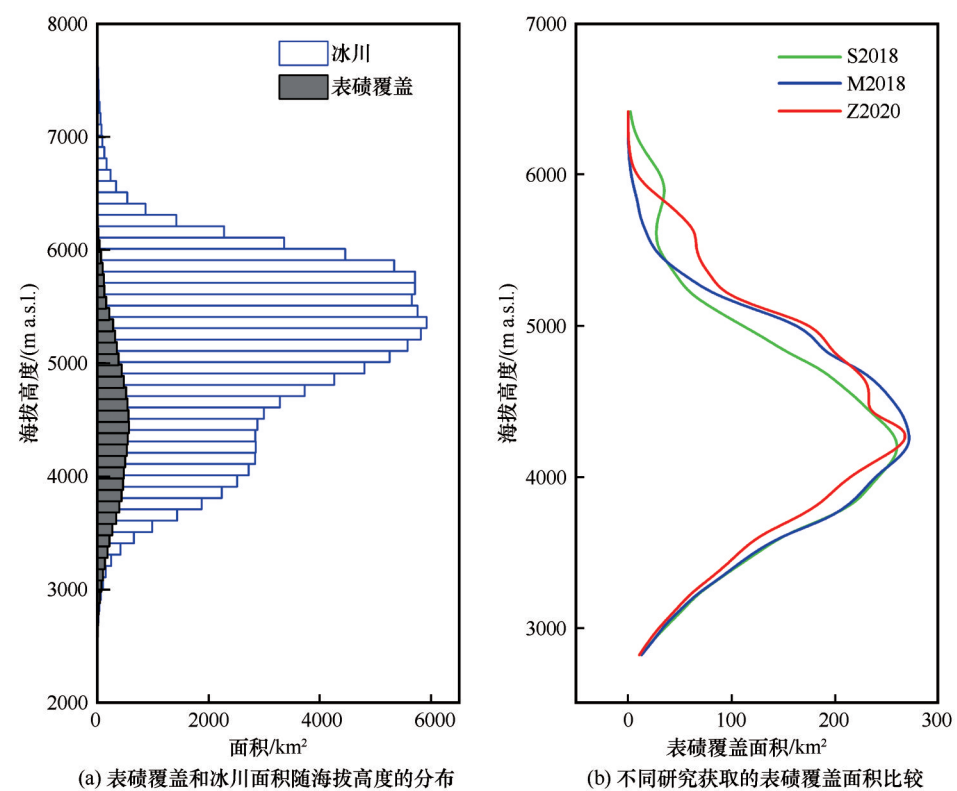


图4 青藏高原及周边地区表碛覆盖和冰川面积随海拔高度的分布(a)和不同研究获取的表碛覆盖面积比较(b), 其中M2018、S2018和Z2018数据分别来自Mölg等^[8]、Scherler等^[9]和Zheng等^[38]
Fig. 4 Area-altitude distribution of debris-covered surface and glacier in the Tibetan Plateau and surroundings (a), and comparison of debris-covered area-altitude distribution from different studies (b), datasets for M2018, S2018 and Z2018 in b are derived from Mölg et al^[8], Scherler et al^[9] and Zheng et al^[38], respectively

与高度结构。这导致该类型冰川与无表碛覆盖型冰川相比,对同样的气候变化显示了不同的响应特征^[11]。从冰川物质平衡梯度变化可以看出,无表碛覆盖型冰川物质损失最强烈的区域出现在末端[图 5(a)]。与之不同,表碛覆盖型冰川物质损失最强烈的区域出现在消融区中部,这一区域表碛层厚度较小且分布不连续,而冰川末端由于表碛层较厚且连续分布导致物质损失相对较小[图 5(b)]。因而,表碛覆盖型冰川物质损失的主要方式是冰面减薄,而无表碛覆盖型冰川以末端退缩为主要方式^[41]。因此,与相同规模的无表碛覆盖型冰川相比,表碛覆盖型冰川由于末端表碛相对较厚且连续的分布[图 2(a)],表碛影响以抑制消融为主,导致该类型冰川即使在气候变化强烈的条件下仍可在较低海拔高度上继续存在^[11,42]。

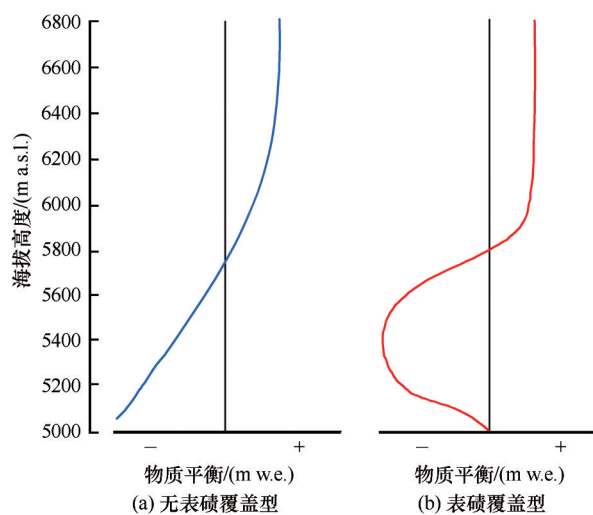


图5 无表碛覆盖型(a)和表碛覆盖型(b)冰川物质平衡梯度示意图

Fig. 5 Schematic diagram of mass balance gradients for debris-free (a) and debris-covered (b) glaciers

消融区是冰川主要的产流区,也是表碛主要的分布区。不同冰川区开展的示踪实验表明,冰面融水输入量和日增加幅度与冰内/冰下水文系统排水效率的提高密切相关,显著影响冰川区排水系统的季节演变特征^[43-44]。对于冰川消融区表碛层较厚且连续分布的区域,由于表碛的抑制消融作用,冰川消融速率较小,加之冰面地形复杂,导致该区域冰内/冰下排水系统效率较低;而对于冰川消融区中上部来说,该区域表碛层较薄且不连续分布,表碛分布加速了冰川消融,消融速率较大,促进了冰内/冰下排水系统的早期发展,且排水效率较高^[26,45]。因

此,表碛分布显著影响其下覆冰川消融速率及其空间结构特征,进而影响冰川区排水系统的形成和季节演化过程及其排水效率,以此改变流域汇水储水和径流的形成过程^[12,26,45-47]。此外,表碛厚度的空间异质性使得冰川表面产生显著的差异性消融,导致消融区容易形成冰崖[图 1(c)]和冰面湖(塘)[图 1(d)]^[48-51]。众多冰崖和冰面湖(塘)的形成与消亡是消融区局部加速消融的重要影响因素^[34,51-55]。例如在喜马拉雅山 Langtang 流域发现,冰崖导致冰川消融区的减薄速率高于预期,流域物质损失在不考虑冰崖影响的情况下将会被低估 17.0% 左右^[34,51];而冰面湖(塘)促进的消融量占该流域冰川物质损失的 12.5%^[55]。在喜马拉雅山典型表碛覆盖型冰川流域的径流模拟表明,该流域 55.5% 的流域径流量来源于表碛覆盖区的冰川融水^[24]。近期全球冰川水资源量估算表明,模型考虑表碛分布与否将导致冰川融水量差异超过 10.6%^[10]。由此可见,表碛加速/抑制消融及由此形成的冰崖、冰面湖(塘)等过程显著影响冰川区融水总量的变化,进而影响冰川区径流的形成与变化过程。

2.2 气候对表碛及其覆盖区能水过程的影响

随着青藏高原气候变暖,青藏高原及周边地区的大多数冰川正在发生以减薄退缩为特征的剧烈变化^[1,4-5,7,13],深刻影响着冰川区表碛分布的空间格局^[9-10]。Kirkbride^[56]研究发现,随着气候变暖,冰川处于强烈的负物质平衡过程,导致冰流速减慢,加之消融增大,继而导致表碛覆盖范围向冰川上部进一步扩展;反之,冰川处于正物质平衡时期,较快的冰流速和较小的消融过程导致表碛在冰川末端进一步形成与堆积。同时,气候变化可能通过加速冰川周围山坡岩石的崩解与堆积^[16,18],或者增加高海拔地区冰/雪崩活动^[30],导致更多的岩屑物质从周围山坡进入冰川区,继而随冰川运动在消融区运移与再分布。近期不同研究表明,随着冰川退缩和物质损失加剧,不同冰川区的表碛覆盖面积正在增加^[17,28-30]。如在喀喇昆仑山的洪扎河流域,流域内各冰川表碛覆盖范围呈向冰川上部平衡线扩张的趋势,在 1990—2019 年间表碛覆盖面积增加了 8.1%~21.3%。全球气候将呈持续升温的态势,冰川区表碛分布势必持续增加^[9-10]。

在气候变暖背景下,随着冰川区表碛覆盖范围的不断扩展,如果冰川区堆积了较薄的表碛层,冰川消融势必加速,冰川物质损失加剧、融水径流增

加,导致冰川对气候变化的正反馈效应^[56-57]。反之,如果冰川区堆积了较厚的表碛,冰川消融势必受到抑制,进而减缓冰川物质损失,导致冰川对气候变化的负反馈效应^[56-57]。气候-冰川-表碛系统的这一反馈机制深刻影响着表碛覆盖区的能水过程。在青藏高原东南部海螺沟流域发现,气温升高是流域各冰川物质损失的主要原因,而表碛的存在加速了该流域冰川的物质亏损,与假定无表碛覆盖条件下的物质平衡和径流相比,表碛覆盖导致物质损失增加了一倍^[58],而流域总径流量增加了11.0%,尤其是低海拔表碛覆盖区的冰川融水贡献量超过了一半以上^[25]。而在喜马拉雅山地区,由于气候变暖,导致该山区几乎所有的无表碛覆盖型冰川的响应特征一致表现为退缩趋势,而表碛覆盖型冰川除了呈显著的负物质平衡和减薄趋势外,其末端并没有对气候变化呈现出一致的响应特征^[11,59-60],其中,一些表碛覆盖型冰川呈前进状态,一些处于稳定状态,而另一些呈退缩趋势^[11,37,59]。表碛覆盖型冰川和无表碛覆盖型冰川物质平衡与末端响应之间的这种显著差异突出表明了气候-冰川-表碛系统这一反馈机制对冰川区物质响应和能水过程的深刻影响。

3 表碛影响研究进展

目前气候变暖和冰川变化日益强烈,冰川区表碛覆盖扩张的现象已在不同地区被观测证实^[17,28-30],加之大多数表碛覆盖型冰川面积较为巨大^[5,11,40],其变化导致的影响日趋显著。受观测条件

和数据积累的限制,本文主要围绕表碛影响的观测与模拟,系统梳理当前表碛影响的研究进展。

3.1 表碛影响观测研究

Østrem^[19]率先开展了表碛覆盖下冰川消融影响的野外量化观测,提出了表碛下覆冰川消融速率与表碛厚度之间的关系曲线[图2(b)]。同时,他指出当表碛厚度约为2 cm时,表碛下覆冰川消融速率与裸冰区相当,该表碛厚度称为临界厚度,超过这一临界厚度后,消融速率逐渐减小^[61]。Mattson等^[22]在喜马拉雅山地区Rakhiot冰川进行了类似的野外观测实验,结果发现,当表碛厚度为1 cm左右时,其下覆冰川消融量达到最大值,表碛临界厚度约为3 cm。随后,不同研究者在不同冰川区开展了表碛下覆冰川消融和表碛厚度野外观测实验,其结果进一步证实了上述冰川消融与表碛厚度之间的关系曲线^[20-21,62],同时指出不同冰川区表碛临界厚度的差异较大,一般为3 cm左右^[63]。对于较厚的表碛覆盖消融观测发现,表碛层厚度超过2 m后,其下覆冰层的消融基本处于停滞状态^[22,61,64]。

近年来,在青藏高原及周边不同表碛覆盖型冰川区相继开展了表碛厚度、冰川消融、表碛层温度等的观测^[27,65-80]。表1列举了青藏高原及周边地区不同表碛覆盖型冰川表碛观测状况。可以看出,不同山区、不同冰川的表碛厚度变化差异十分显著。在位于青藏高原东南部贡嘎山的海螺沟冰川区,通过挖掘方法实测的最大表碛层厚度达到了1.2 m,冰川末端表碛层平均厚度约为0.4 m^[27],同样位于青藏高原东南部岗日嘎布山的24K冰川观测的最

表1 青藏高原及周边典型冰川区表碛观测

Table 1 Summary of debris observations on glaciers of the Tibetan Plateau and surroundings

冰川名称	纬度/N	经度/E	表碛厚度范围/m	表碛覆盖海拔范围/m	山脉	文献来源
科其喀尔冰川	41°49′	89°10′	0.01~2.5	3 000~4 000	天山	[67,71]
72号冰川	41°46′	79°54′	0.05~0.11	3 720~4 200	天山	[72]
Baltoro冰川	35°35′	76°04′	0.01~0.15	3 370~5 000	喀喇昆仑山	[73]
Hinarche冰川	36°03′	74°34′	0.01~0.38	2 703~3 169	喀喇昆仑山	[74]
Biafo冰川	35°40′	75°50′	0.005~0.07	3 602~4 105	喀喇昆仑山	[75]
Batal冰川	32°13′	77°05′	0.0~1.0	4 300~5 000	喜马拉雅山	[76]
Khumbu冰川	27°56′	86°49′	0.10~2.0	4 900~5 400	喜马拉雅山	[77]
Ngozumpa冰川	27°57′	85°42′	0.05~3.0	4 659~5 500	喜马拉雅山	[33]
Imja-Lhotse Shar冰川	27°54′	86°56′	0.05~0.35	—	喜马拉雅山	[78]
Lirung冰川	28°14′	85°33′	0.11~2.3	4 004~5 260	喜马拉雅山	[79]
绒布冰川	28°05′	86°50′	0.01~0.45	5 260~5 750	喜马拉雅山	[68]
24K冰川	29°45′	95°44′	0.01~0.7	3 900~4 240	岗日嘎布山	[69]
海螺沟冰川	29°36′	101°57′	0.01~1.2	2 900~3 600	贡嘎山	[27]

大表碛厚度约为 0.7 m 左右^[69]。位于天山南坡的科其喀尔冰川观测的表碛厚度介于 0.01~2.5 m 之间,末端平均厚度 1.5 m,局部超过 2.0 m^[31],而喜马拉雅山区的 Ngozumpa 冰川区的最大表碛厚度达到了 3.0 m^[33],且该冰川采用探底雷达表碛厚度观测表明,表碛厚度在较小的区域内变化很大,其频率分布的偏度和峰度随着平均表碛厚度的增加而降低,这可能与表碛覆盖区的重力物质再分布过程有关^[33]。

由于不同冰川区表碛覆盖比例和表碛厚度分布不同,导致表碛影响的区域差异显著。喀喇昆仑山区不同典型冰川区野外消融观测表明,该区表碛对下覆冰川消融的影响以抑制作用为主^[65-66,80],如 Baltoro 冰川表碛覆盖区冰川平均消融量相对于裸冰区减少了约 22.0%^[65]。同样,在天山南坡科其喀尔冰川表碛覆盖区,表碛厚度为 3 cm 处的平均消融量与裸冰区相比减少了 46.5%^[71],与之临近的琼台兰冰川观测发现,与裸冰相比,10 cm 和 20 cm 厚度的表碛下覆平均消融量分别减少了 10.0% 和 56.0%^[40]。与之相反,喜马拉雅山绒布冰川表碛厚度 5 cm 处的平均消融量与裸冰区相比增加了 67.0%^[68],而青藏高原东南部海螺沟冰川区表碛对下覆冰川消融的影响总体上以加速作用为主,其中 44.0% 的表碛覆盖区处于加速消融状态,17.0% 的表碛覆盖区冰川消融受到了抑制^[6]。

3.2 表碛影响模拟研究

目前青藏高原及周边地区仅有十余条冰川开展了表碛厚度及影响的观测(表 1),仍有广大无表碛相关观测资料的冰川区。加之表碛覆盖型冰川区开展表碛实地观测的困难性,限制了冰川区表碛观测的范围和密集度。因而,模型模拟研究成为认识冰川区表碛影响这一物理机制的有效途径。

对于观测资料相对较少的冰川区,不同研究多应用度日模型进行表碛下覆冰川消融的估算^[69,73,81-85]。度日模型是基于冰雪消融与气温之间的线性关系建立的^[5,71,81],结构较为简单,气温和度日因子值是其主要的输入参数。该类模型通常对裸冰区和表碛覆盖区分别采用不同的度日因子值,以此考虑表碛分布对冰川消融和径流过程的影响。模型中表碛覆盖区度日因子值一般小于裸冰区度日因子值^[81,83-84],不同表碛覆盖型冰川区表碛覆盖区和裸冰度日因子差异显著,二者的比值一般介于 0.40~0.83 之间^[81]。在天山南坡科其喀尔冰川夏季径流模拟研究中,基于度日模型,开展了考虑冰川

区表碛覆盖与否的实验,结果表明考虑表碛分布,流域径流总量与假定无表碛分布时减少了约 35%^[85]。在青藏高原东南部岗日嘎布山的 24K 冰川基于度日模型分析发现,假定无表碛覆盖条件下,该冰川消融量将会增加 36%^[69]。此外,不同研究在喜马拉雅山-喀喇昆仑山区多个流域基于度日模型开展了冰雪径流对气候变化的响应与预估研究中,冰川区表碛分布的影响是通过在裸冰消融量估算的基础上乘上一个折算系数或采用固定表碛度日因子值来考虑的^[86-89]。

与裸冰区不同,表碛覆盖区冰面状况复杂,导致不同冰川相同表碛厚度的度日因子值变化幅度较大^[81,83-84],同时度日模型不能考虑表碛覆盖区地-气-能-水交换的物理过程。为此,基于冰雪表面能量平衡过程,Kraus^[90]率先发展了一个理论消融模型,考虑了表碛分布及其他因素变化对冰面消融过程的影响。Nakawo 等^[20-21]基于对表碛层温度梯度线性变化和储热变量的假设,构建了一个以能量平衡为基础针对薄层表碛覆盖的消融模型。此后,不同研究根据热传导理论和能量平衡原理,发展了多种类型的表碛覆盖消融模型^[23,27,32-33,35,91-93],并在相应的冰川区开展了应用。上述各类模型在点和冰川尺度上获得了较好的模拟效果,探讨了表碛分布对冰川区能水物理过程的影响。这些模型均以表碛厚度、表碛层温度、表碛热属性参数等作为输入数据,一定程度上影响了这些模型在流域或区域尺度上表碛影响研究中的应用。Zhang 等^[6,27]尝试基于遥感影像热红外和可见光近红外波段、大气-表碛-冰川界面能量平衡过程发展了表碛覆盖消融模型,该模型基于遥感反演的表碛热阻系数,以此作为表碛厚度的代用指标来考虑表碛厚度的空间分布;该模型与其他模型相比输入数据较少,在冰川尺度和区域尺度上获取了较好的模拟效果^[6,27]。Fujita 等^[24]基于相同方法,尝试了在冰川流域径流模拟中考虑表碛厚度空间分布对流域径流过程的影响,并评估遥感反演表碛热阻系数和反照率不确定性对径流模拟结果的影响,分析发现,二者的不确定性对流域径流产生的误差影响占该流域径流总量的 8.0%。

4 表碛影响研究的挑战与展望

4.1 数据缺失的挑战

表碛影响研究所需的参数除冰川消融、径流和

气象等数据外,主要包括表碛覆盖范围、表碛厚度和热属性参数及其动态变化特征。目前,基于多源遥感数据,不同研究提取了区域或全球尺度冰川区的表碛覆盖范围^[8-10,38]。图4(b)显示了喀喇昆仑山和帕米尔高原冰川区不同研究基于不同遥感数据和不同方法获取的表碛覆盖范围。可以看出,各研究获取表碛覆盖范围的方法和遥感数据不同,但获取的表碛覆盖范围结果总体上较为一致。尽管对青藏高原及周边冰川变化及影响的认识不断加强,该区域冰川区表碛观测数据在观测范围和密集度上仍较为欠缺,仅十余条表碛覆盖型冰川有表碛厚度等相关参数的观测(表1),且多分布于喀喇昆仑山和喜马拉雅山地区,其他山区的观测较少,无法满足流域/区域表碛影响评估所需的参数信息。加之,流域/区域冰川区表碛厚度、热属性参数等随时间的动态变化特征很难准确地获取。因此,冰川区表碛相关数据的监测与积累仍存在较大的缺口,这是不同尺度表碛影响研究面临的关键问题,严重制约了青藏高原及周边地区表碛分布对冰川区能水过程物理机制的认识和表碛影响模型的发展。

4.2 模拟的挑战

张勇等^[31]系统地总结了近年来表碛厚度估算方法的发展现状。其中,基于遥感反演的地表温度和表碛厚度实测数据建立地表温度-表碛厚度经验关系式和SAR表碛探测是目前常用的表碛厚度方法,但这两种方法对于厚层表碛的估算不适用^[31,76,94-95]。基于能量平衡方程估算法物理基础较强,但需要大量的冰川区实测数据作为输入数据^[89],如机载雷达测量数据、表碛厚度、地表温度、导热系数等。由此可见,表碛厚度估算方法在不同冰川区的适用性和模拟精度亟待提高,尤其在较大空间尺度且相对偏远无/缺资料冰川区表碛厚度模拟精度的提高是表碛影响研究面临的巨大挑战。

表碛覆盖区冰川消融模拟主要基于度日模型和能量平衡模型开展的。如上所述,度日模型结构简单,所需输入参数较少,通过采用不同的度日因子值来考虑表碛分布的影响。然而,表碛覆盖区由于冰面条件复杂,其度日因子值变幅较大^[81,83-84],模型对于表碛下覆冰川消融所涉及的物理机制及过程过于简化。相反,基于能量平衡过程的表碛消融模型能够较好地考虑表碛覆盖区地-气-能-水交换的物理过程^[20-23,27,32,35,91-93],而在计算过程中假定表碛层内的温度剖面呈线性变化^[20-21,23,27,91],这与实际

表碛层内温度梯度非线性变化有所不同^[32,92,96]。同时,该类模型不仅需要详细的表碛厚度、表碛层温度、表碛热属性参数等输入数据,还需要气候、地形等驱动数据,限制了该类模型在较大尺度上表碛影响研究中的发展与应用。因此,发展精细刻画表碛厚度空间分布和下覆冰川消融物理过程的模型是目前研究表碛分布及影响亟须解决的难题。

4.3 流域/区域模型耦合表碛影响的挑战

气候-冰川-表碛系统之间的相互作用较为复杂[图6],同时它们之间在时空上有着显著的变化,这意味着表碛厚度及对冰川各物理过程的影响具有强烈的时空变化特征。针对量化气候-冰川-表碛相互作用物理过程与反馈机制的研究取得了一定的进展。现有模型模拟了气候变化驱动下表碛随着冰川运动而运移再分布的过程^[97-100],近期研究还简单考虑了岩屑物质在冰内的运移过程^[101-103]。青藏高原及周边地区针对冰川的数值模型近年来发展较为迅速,从二维到三维的冰川动力学模型对不同冰川的物质变化和动力响应过程开展了研究^[104-108],然而针对表碛覆盖型冰川区气候-冰川-表碛系统的数值模型研究十分薄弱。总体而言,现有表碛覆盖型冰川区表碛动态过程数值模型面临诸多问题,要么将表碛输入限制在冰川消融区,或使用经验关系描述表碛在冰川表面的堆积过程,或简化了岩屑物质在冰内的运移过程,尚无模型明确解决冰流场内表碛厚度与分布随时间演化的物理过程。

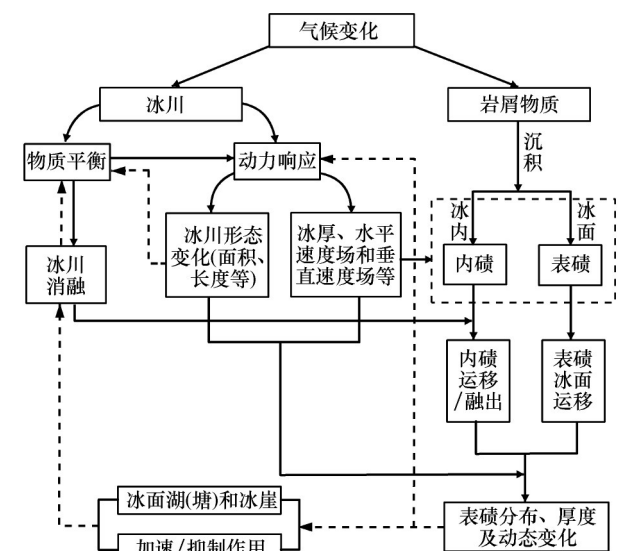


图6 气候-冰川-表碛系统相互作用示意图

Fig. 6 Interaction diagram of climate-glacier-debris system

目前,众多流域/区域物质平衡和径流模型普遍基于无表碛覆盖型冰川的众多过程发展的,没有考虑上述气候-冰川-表碛系统之间复杂的相互作用及对冰川区能水过程的影响。随着对冰川区表碛影响物理过程认识的增加,在应用该类模型开展流域/区域冰川物质变化与径流模拟与预估研究时,通常采用固定度日因子值或折算系数的方式简单处理表碛的影响过程^[36,86-89]。Kraaijenbrink 等^[7]率先在青藏高原及周边冰川物质平衡预估研究中尝试解释由于表碛覆盖、冰面湖塘和冰崖引起的消融率变化对冰川物质变化的影响,然而该研究中过多的参数化过程掩盖了表碛覆盖等过程对冰川物质平衡的影响,导致其冰川物质平衡的预估结果与没有考虑表碛影响的已有研究结果较为类似^[109]。总体上,现有模型通常采用简化或者参数化手段来考虑表碛的影响过程,并没有考虑表碛分布的时空动态变化过程。这一处理方式限制了现有模型对表碛动态物理过程及影响的精细描述,导致这些模型对这一物理过程模拟能力不足,是开展流域/区域冰川物质平衡和径流模拟与未来预估研究中不确定性的重要来源之一^[10,36]。由此可见,气候变化条件下青藏高原及周边地区冰川-表碛系统变化的协同监测仍需加强,同时,冰川区表碛时空动态变化过程的精细刻画是未来气候变暖情景下流域/区域冰川变化及其水资源效应评估精度提高面临的巨大挑战。

4.4 展望

在全球变暖背景下,青藏高原及周边地区的表碛覆盖型冰川变化及其对水资源和相关灾害的影响日益显著^[10-12,14,25]。与无表碛覆盖型冰川不同,表碛覆盖型冰川物质平衡和径流模拟与预估以及冰湖溃决洪水评估等过程都需要考虑表碛厚度的时空动态变化及其影响。如上所述,表碛厚度实测数据缺乏是开展青藏高原及周边冰川区不同尺度表碛影响研究的难点。在众多表碛厚度估算方法中,基于表碛热阻系数法对于估算流域/区域尺度表碛厚度及空间分布具有较好的适用性^[31]。表碛热阻系数是表碛厚度与其导热系数的比值^[20-21],在实际应用过程中,基于遥感影像(可见光近红外和热红外波段)和冰川编目数据可获取冰川区表碛热阻系数的空间分布[图7]。该方法已在喜马拉雅山^[24,110-111]、中巴经济走廊^[38]、贡嘎山^[6,27]、西南天山^[31]等不同区域冰川进行了应用与验证,并系统评

估了该方法的不确定性^[24,111]。上述不同区域冰川区的应用表明,遥感反演的表碛热阻系数可作为冰川区表碛覆盖范围和厚度及其空间分布的代用指标。随着遥感大数据的日益丰富和青藏高原及周边地区冰川编目数据的逐渐完善,应用上述方法开展不同空间尺度表碛覆盖范围和表碛厚度估算成为可能。以遥感反演的表碛热阻系数空间分布为基础,结合 Zhang 等^[6,27]基于大气-表碛层-冰川界面能量平衡过程构建的表碛消融模型,进而可系统分析青藏高原及周边冰川区表碛厚度分布的区域差异和评估表碛覆盖对冰川响应的影响机制。

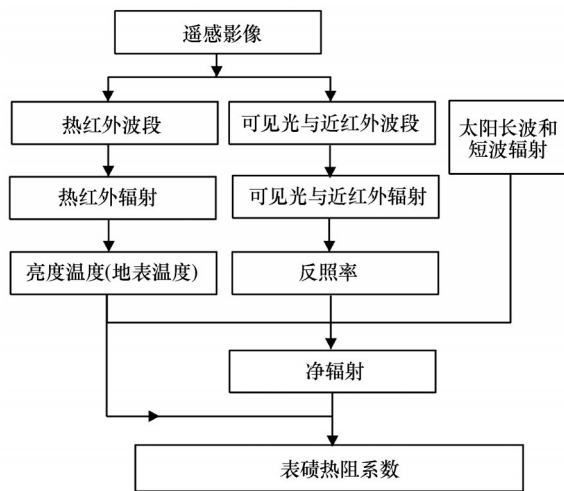


图7 基于遥感影像反演冰川区表碛热阻系数流程图
Fig. 7 Schematic diagram of calculating the thermal resistance of the debris layer based on remotely sensed data

冰川区表碛厚度及其动态变化过程是由气候-冰川-表碛系统一系列相互关联的反馈过程组成的[图6]。如图6所示,在气候变化条件下,冰川物质变化和动力响应共同影响着冰川形态和冰川内部应变场与速度场,进而控制着冰川内部岩屑物质(内碛)和冰面表碛物质的迁移过程,进而影响冰川区表碛厚度的变化。因此,冰川物质变化和冰川动力响应过程在冰川区表碛厚度动态变化中起着重要作用^[42,100-101],如下式所示:

$$\frac{dH_{\text{debris}}}{dt} = -\frac{C_{\text{debris}} b_{\text{debris}}}{(1 - \phi_{\text{debris}}) \rho_{\text{debris}}} - \frac{\partial u_{\text{sfc}} H_{\text{debris}}}{\partial x} \quad (1)$$

式中: H_{debris} 为表碛厚度变化; t 为时间; x 为沿冰川主流线距离; C_{debris} 为表碛浓度变化率; b_{debris} 为表碛覆盖区物质平衡; ϕ_{debris} 和 ρ_{debris} 分别是冰面表碛的孔隙度和密度; u_{sfc} 是冰川表面运动速度。

相对于无表碛覆盖型冰川,连续的表碛覆盖又进一步减小了冰流量和冰厚变化梯度,扰动冰川区

速度分布,并减小积累区面积比率^[10,16]。同时,表碛厚度动态变化加剧了其空间差异性分布特征,进而导致冰川表面产生差异性消融,这一过程进一步破坏了表碛覆盖层的稳定性,继而塑造冰川表面形态(如冰面湖(塘)、冰崖等),加剧影响消融过程和冰川物质平衡响应过程。随着青藏高原及周边地区冰川数值模型的不断发展与完善,加之对冰川物质变化-动力响应-表碛的相互作用与反馈机理的认识不断深入^[104-108],为发展耦合多物理过程的冰川-表碛系统协同演化的动态模型奠定了理论与方法基础。这一动态模型需要精细刻画表碛沉积、内碛运移与融出、冰面表碛运移、冰川物质平衡和动力响应等物理过程[图2(a)和图6],尤其提高内碛和表碛运移过程的模拟能力,这一过程控制着冰川区正在形成中的表碛层的组成、分布与厚度变化特征。通过系统发展冰川-表碛系统协同演化的动态模型,可以量化表碛分布、厚度及其动态变化过程,进而实现气候变化条件下冰川物质变化、动力响应和表碛动态变化之间的集成研究。

5 结论

青藏高原及周边地区分布着广泛的表碛覆盖型冰川,其独特的气候响应特征和变化引起了广泛关注的流域水资源效应和灾害效应。表碛的差异性分布是表碛覆盖型冰川的典型特征,其通过地-气-能-水交换、反照率变化等影响冰川消融及其空间特征,进而影响冰川物质平衡响应机制、流域径流过程及其致灾过程。青藏高原及周边冰川区地面、卫星观测资料逐渐丰富,但冰川区表碛厚度、表碛层热属性等相关参数在观测范围、密集度上仍存在较大的缺口。本文在梳理已有观测数据和研究成果的基础上,系统分析了青藏高原及周边地区表碛分布特征,综合剖析了表碛对冰川消融、物质平衡和径流过程的影响及其气候变化的响应,并从观测与模拟的角度,系统分析了表碛影响的研究现状,进而分析了现有表碛影响研究存在的主要问题和挑战。同时,未来表碛影响研究将通过开展地面综合观测,结合多源遥感资料,发展耦合多物理过程的冰川-表碛系统协同演化的动态模型,系统认识气候变化驱动下表碛与冰川之间相互作用与反馈机制,揭示表碛与冰川随气候变化的协同演化机理,综合评估表碛厚度动态变化对冰川各物理过程的影响,为进一步认识青藏高原及周边地区表碛覆

盖型冰川变化及其水资源效应和灾害效应奠定理论和方法基础,以期为区域社会经济发展和“绿色丝绸之路”建设服务。

参考文献(References):

- [1] Yao Tandong, Wu Guangjian, Xu Baiqing, et al. Asian Water Tower change and its impacts[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(11): 1203-1209. [姚檀栋, 邬光剑, 徐柏青, 等. “亚洲水塔”变化与影响[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1203-1209.]
- [2] Immerzeel W W, Beek L P H V, Bierkens M F P, et al. Climate change will affect the Asian Water Towers[J]. Science, 2010, 328(5984): 1382-1385.
- [3] 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.]
- [4] Wang Ninglian, Yao Tandong, Xu Baiqing, et al. Spatiotemporal pattern, trend, and influence of glacier change in Tibetan Plateau and surroundings under global warming[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(11): 1220-1232. [王宁练, 姚檀栋, 徐柏青, 等. 全球变暖背景下青藏高原及周边地区冰川变化的时空格局与趋势及影响[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1220-1232.]
- [5] Liu Shiyin, Zhang Yong, Liu Qiao, et al. Study on the impact of climate change on glacier and its risk[M]. 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[M]. 北京: 科学出版社, 2017.]
- [6] Zhang Y, Hirabayashi Y, Fujita K, et al. Heterogeneity in supraglacial debris thickness and its role in glacier mass changes of Mount Gongga[J]. Science China: Earth Sciences, 2016, 59(1): 170-184.
- [7] Kraaijenbrink P D A, Bierkens M F P, Lutz A F, et al. Impact of a global temperature rise of 1.5 degrees Celsius on Asia's Glaciers[J]. Nature, 2017, 549: 257-260.
- [8] Mölg N, Bolch T, Rastner P, et al. A consistent glacier inventory for the Karakoram and Pamir derived from Landsat data: distribution of debris cover and mapping challenges[J]. Earth System Science Data, 2018, 10: 1807-1827.
- [9] Scherler D, Wulf H, Gorelick N. Global assessment of supraglacial debris-cover extents[J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45(21): 11798-11805.
- [10] Herreid S, Pellicciotti F. The state of rock debris covering Earth's glaciers[J]. Nature, 2020, 13(9): 621-627.
- [11] 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[J]. Earth-Science Reviews, 2012, 114(1/2): 156-174.
- [12] Jones D B, Harrison S, Anderson K, et al. Rock glaciers and mountain hydrology: a review[J]. Earth-Science Reviews, 2019, 193: 66-90.
- [13] Ding Yongjian, Zhao Qidong, Wu Jinkui, et al. The future changes of Chinese cryospheric hydrology and their impacts on water security in arid areas[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(1): 23-32. [丁永建, 赵求东, 吴锦奎, 等. 中国冰冻圈水文未来变化及其对干旱区水安全的影响[J]. 冰川冻土, 2020, 42(1): 23-32.]
- [14] Dubey S, Goyal M K. Glacial lake outburst flood hazard downstream impact, and risk over the Indian Himalaya[J]. Water

- Resources Research, 2020, 56(4): e2019WR026533.
- [15] Li Jijun, Su Zhen. Glaciers in the Hengduan Mountains [M]. Beijing: Science Press, 1996. [李吉均, 苏珍. 横断山冰川 [M]. 北京: 科学出版社, 1996.]
- [16] Benn D I, Evans D J. Glaciers and glaciation [M]. London: Hodder Education, 2010.
- [17] Kirkbride M P, Deline P. The formation of supraglacial debris covers by primary dispersal from transverse englacial debris bands [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2013, 38: 1779-1792.
- [18] Nagai H, Fujita K, Nuimura T, et al. Southwest-facing slopes control the formation of debris-covered glaciers in the Bhutan Himalaya [J]. The Cryosphere, 2013, 7(4): 1303-1314.
- [19] Østrem G. Ice melting under a thin layer of moraine and the existence of ice cores in moraine ridges [J]. Geografiska Annaler, 1959, 41: 228-230.
- [20] Nakawo M, Young G J. Estimate of glacier ablation under a debris layer from surface temperature and meteorological variables [J]. Journal of Glaciology, 1982, 28(98): 29-34.
- [21] Nakawo M, Young G J. Field experiments to determine the effect of a debris layer on ablation of glacier ice [J]. Annals of Glaciology, 1981, 2: 85-91.
- [22] Mattson L E, Gardner J S, Young G J. Ablation on debris covered glaciers: an example from the Rakhiot Glacier, Punjab, Himalaya [J]. International Association of Hydrological Sciences Publication, 1993, 218: 289-296.
- [23] Nicholson L, Benn D I. Calculating ice melt beneath a debris layer using meteorological data [J]. Journal of Glaciology, 2006, 52(178): 463-470.
- [24] Fujita K, Sakai A. Modelling runoff from a Himalayan debris-covered glacier [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, 18(7): 2679-2694.
- [25] Zhang Y, Liu S, Liu Q, et al. The role of debris cover in catchment runoff: a case study of the Hailuoguo catchment, South-Eastern Tibetan Plateau [J]. Water, 2019, 11: 2601.
- [26] Miles K E, Hubbard B, Irvine-Fynn T D L, et al. Hydrology of debris-covered glaciers in High Mountain Asia [J]. Earth-Science Reviews, 2020, 207: 103212.
- [27] 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 [J]. Journal of Glaciology, 2011, 57(206): 1147-1157.
- [28] Thakuri S, Salerno F, Smiraglia C, et al. Tracing glacier changes since the 1960s on the south slope of Mt. Everest (central Southern Himalaya) using optical satellite imagery [J]. The Cryosphere, 2014, 8: 1297-1315.
- [29] Tielidze L G, Bolch T, Wheate R D, et al. Supra-glacial debris cover changes in the Greater Caucasus from 1986 to 2014 [J]. The Cryosphere, 2020, 14: 585-598.
- [30] Xie F, Liu S, Wu K, et al. Upward expansion of supra-glacial debris cover in the Hunza Valley, Karakoram, during 1990~2019 [J]. Frontiers in Earth Science, 2020, 8: 308.
- [31] Zhang Yong, Liu Shiyin. Research progress on debris thickness estimation and its effect on debris-covered glaciers in western China [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(9): 1606-1620. [张勇, 刘时银. 中国冰川区表碛厚度估算及其影响研究进展 [J]. 地理学报, 2017, 72(9): 1606-1620.]
- [32] Han H, Ding Y, Liu S. A simple model to estimate ice ablation under a thick debris layer [J]. Journal of Glaciology, 2006, 52(179): 528-536.
- [33] Nicholson L, McCarthy M, Pritchard H D, et al. Supraglacial debris thickness variability: impact on ablation and relation to terrain properties [J]. The Cryosphere, 2018, 12: 3719-3734.
- [34] Buri P, Miles E S, Steiner J, et al. Supraglacial ice cliffs can substantially increase the mass loss of debris-covered glaciers [J]. Geophysical Research Letter, 2021, 48: e2020GL092150.
- [35] Reid T D, Brock B W. An energy-balance model for debris-covered glaciers including heat conduction through the debris layer [J]. Journal of Glaciology, 2010, 56(199): 903-916.
- [36] Rounce D R, Hock R, Shean D E. Glacier mass change in High Mountain Asia through 2100 using the open-source Python Glacier Evolution Model (PyGEM) [J]. Frontiers in Earth Science, 2020, 7: 331.
- [37] Scherler D, Bookhagen B, Strecker M R. Spatially variable response of Himalayan glaciers to climate change affected by debris cover [J]. Nature Geoscience, 2011, 4: 156-159.
- [38] Zheng Y, Zhang Y, Gu J, et al. Spatial distribution of supraglacial debris thickness on glaciers of the China-Pakistan Economic Corridor and surroundings [J]. Science in Cold and Arid Regions, 2020, 12(6): 447-460.
- [39] Reznichenko N, Davies T, Shulmeister J, et al. Effects of debris on ice-surface melting rates: an experimental study [J]. Journal of Glaciology, 2010, 56(197): 384-394.
- [40] Mountaineering and Expedition Team of Chinese Academy of Sciences. Glacial and weather in Mt. Tuomuer district, Tianshan [M]. Urumqi: Xinjiang People's Publishing House, 1985. [中国科学院登山队. 天山托木尔峰地区的冰川与气象 [M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1985.]
- [41] Hambrey M J, Quincey D J, Glasser N F, et al. Sedimentological, geomorphological and dynamic context of debris-mantled glaciers, Mount Everest (Sagarmatha) region, Nepal [J]. Quaternary Science Reviews, 2008, 27: 2361-2389.
- [42] Anderson, R S. A model of ablation-dominated medial moraines and the generation of debris-mantled glacier snouts [J]. Journal of Glaciology, 2000, 46: 459-469.
- [43] Nienow P W, Sharp M, Willis I C. Seasonal changes in the morphology of the subglacial drainage system, Haut Glacier d'Arolla, Switzerland [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 23: 825-843.
- [44] Campbell F M A, Nienow P W, Purves R S. Role of the supraglacial snowpack in mediating meltwater delivery to the glacier system as inferred from dye tracer investigations [J]. Hydrological Processes, 2006, 20: 969-985.
- [45] Fyffe C L, Brock B W, Kirkbride M P, et al. Do debris-covered glaciers demonstrate distinctive hydrological behaviour compared to clean glaciers? [J] Journal of Hydrology, 2019, 570: 584-597.
- [46] Liu Qiao, Liu Shiyin. Progress in the study of englacial and subglacial drainage system of glaciers [J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(6): 660-669. [刘巧, 刘时银. 冰川冰内及冰下水系研究综述 [J]. 地球科学进展, 2012, 27(6): 660-669.]
- [47] Mair D, Nienow P, Sharp M J, et al. Influence of subglacial drainage system evolution on glacial surface motion: Haut Glacier d'Arolla, Switzerland [J]. Journal of Geophysical Research, 2002, 107 (B8): EPM 8-1-EPM 8-13.
- [48] Han Haidong, Liu Shiyin, Ding Yongjian, et al. Investigation of ice cliffs in the debris-covered area of Koxkar Glacier, Tianshan [J]. 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 [J]. 冰川冻土, 2006, 28(6):

- 879-884.]
- [49] Sakai A, Fujita K. Formation conditions of supraglacial lakes on debris-covered glaciers in the Himalayas[J]. *Journal of Glaciology*, 2010, 56(195): 177-181.
- [50] Sakai A, Nakawo M, Fujita K. Distribution characteristics and energy balance of ice cliffs on debris-covered glaciers, Nepal Himalaya[J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2002, 34(1): 12-19.
- [51] Buri P, Miles E S, Steiner J F, et al. A physically based 3-D model of ice cliff evolution over debris-covered glaciers[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2016, 121(12): 2471-2493.
- [52] Han H, Wang J, Wei J, et al. Backwasting rate on debris-covered Koxkar Glacier, Tuomuer Mountain, China[J]. *Journal of Glaciology*, 2010, 56(196): 287-296.
- [53] Pellicciotti F, Stephan C, Miles E, et al. Mass-balance changes of the debris-covered glaciers in the Langtang Himal, Nepal, from 1974 to 1999[J]. *Journal of Glaciology*, 2015, 61(226): 373-386.
- [54] Ragettli S, Bolch T, Pellicciotti F. Heterogeneous glacier thinning patterns over the last 40 years in Langtang Himal, Nepal[J]. *The Cryosphere*, 2016, 10(5): 2075-2097.
- [55] Miles E S, Willis I, Buri P, et al. Surface pond energy absorption across four Himalayan Glaciers accounts for 1/8 of total catchment ice loss[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45: 10464-10473.
- [56] Kirkbride M. Ice-marginal geomorphology and Holocene expansion of debris-covered Tasman Glacier, New Zealand[J]. *International Association of Hydrological Sciences Publication*, 2000, 264: 211-217.
- [57] Bosson J-B, Lambiel C. Internal structure and current evolution of very small debris-covered glacier systems located in alpine permafrost environments[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2016, 4: 39.
- [58] 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[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 444/445: 146-160.
- [59] Bolch T, Kulkarni A, Kääb A, et al. The state and fate of Himalayan glaciers[J]. *Science*, 2012, 336: 310-314.
- [60] Kääb A, Berthier E, Nuth C, et al. Contrasting patterns of early twenty-first-century glacier mass change in the Himalayas[J]. *Nature*, 2012, 488: 495-498.
- [61] Østrem G. Ice-cored moraines in Scandinavia. *Geografiska Annaler*, 1964, 46(A): 282-337.
- [62] Khan M. Ablation on Barpu Glacier, Karakoram Himalaya, Pakistan: a study of melt processes on a faceted, debris-covered ice surface[D]. Wilfrid Laurier University, Waterloo, Canada. 1989: 158.
- [63] Kirkbride M P, Dugmore A J. Glaciological response to distal tephra fallout from the 1947 eruption of Hekla, south Iceland[J]. *Journal of Glaciology*, 2003, 49: 420-428.
- [64] Bozhinskiy A N, Krass M S, Popov V V. Role of debris cover in the thermal physics of glaciers[J]. *Journal of Glaciology*, 1986, 32: 255-266.
- [65] 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[J]. *Annals of Glaciology*, 2008, 48: 49-57.
- [66] Muhammad S, Tian L, Ali S, et al. Thin debris layers do not enhance glaciers melt in the Karakoram[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 746: 141119.
- [67] Han Haidong, Liu Shiyin, Ding Yongjian. An improved model for estimating ice ablation under a debris cover[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(3): 433-439. [韩海东, 刘时银, 丁永建. 表碛下冰面消融模型的改进[J]. 冰川冻土, 2007, 29(3): 433-439.]
- [68] Liu Weigang, Xiao Cunde, Liu Jingshi, et al. Analyzing the ablation rate characteristics of the Rongbuk Glacier on the Mt. Qomolangma, Central Himalayas[J]. *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[J]. 冰川冻土, 2013, 35(4): 814-823.]
- [69] Yang W, Yao T, Xu B, et al. Influence of supraglacial debris on summer ablation and mass balance in the 24K Glacier, Southeast Tibetan Plateau[J]. *Geografiska Annaler*, 2010, 92(3): 353-360.
- [70] Luo Lun, Zhu Liping, Wang Yongjie, et al. The process of freezing and thawing and the zero curtain effect of debris-covered area of the Galongla Glacier in the southeastern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(4): 751-760. [罗伦, 朱立平, 王永杰, 等. 藏东南嘎隆拉冰川表碛冻融过程与零点幕效应[J]. 冰川冻土, 2019, 41(4): 751-760.]
- [71] 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.]
- [72] Wang L, Li Z, Wang F. Spatial distribution of the debris layer on glaciers of the Tuomuer Peak, western Tian Shan[J]. *Journal of Earth Science*, 2011, 22(4): 528-538.
- [73] Mihalcea C, Mayer C, Diolaiuti G, et al. Ablation conditions on the debris covered part of Baltoro Glacier, Karakoram[J]. *Annals of Glaciology*, 2006, 43: 292-300.
- [74] Mayer C, Lambrecht A, Mihalcea C, et al. Analysis of glacial meltwater in Bagrot Valley, Karakoram[J]. *Mountain Research and Development*, 2010, 30(2): 169-177.
- [75] Ashraf M, Khan A R. Biafo Glacier Field Investigations 2015 [M]. WAPDA, Pakistan, 2016.
- [76] Patel L K, Sharma P, Thamban M, et al. Debris control on glacier thinning: a case study of the Batal glacier, Chandra basin, Western Himalaya[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2016, 9(4): 309.
- [77] Nakawo M, Iwata S, Watanabe O, et al. Processes which distribute supraglacial debris on the Khumbu Glacier, Nepal Himalaya[J]. *Annals of Glaciology*, 1986, 8: 129-131.
- [78] 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[J]. *The Cryosphere*, 2014, 8(4): 1317-1329.
- [79] McCarthy M, Pritchard H, Willis I A N, et al. Ground-penetrating radar measurements of debris thickness on Lirung Glacier, Nepal[J]. *Journal of Glaciology*, 2017, 63(239): 543-555.
- [80] Collier E, Maussion F, Nicholson L I, et al. Impact of debris cover on glacier ablation and atmosphere-glacier feedbacks in the Karakoram[J]. *The Cryosphere*, 2015, 9: 1617-1632.
- [81] Zhang Yong, Liu Shiyin, Shanguan Donghui, et al. Study of the positive degree-day factors on the Koxkar Baqi Glacier on the south slope of Tianshan Mountains[J]. *Journal of Glaciology*

- gy and Geocryology, 2005, 27(3): 337-343. [张勇, 刘时银, 上官冬辉, 等. 天山南坡科其卡尔巴契冰川度日因子变化特征研究[J]. 冰川冻土, 2005, 27(3): 337-343.]
- [82] Mattson L E, Gardner J S. Energy exchange and ablation rates on the debris covered Rakhiot Glacier, Pakistan[J]. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, 1989, 25(1): 17-32.
- [83] 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 [J]. International Association of Hydrological Sciences Publication, 2000, 264: 71-81.
- [84] Singh P, Kumar N, Arora M. Degree day factors for snow and ice for Dokriani Glacier, Garhwal Himalayas [J]. Journal of Hydrology, 2000, 235: 1-11.
- [85] Zhang Y, Liu S, Ding Y. Glacier meltwater and runoff modeling, Keqicar Baqi glacier, southwestern Tien Shan, China [J]. Journal of Glaciology, 2007, 53(180): 91-98.
- [86] Immerzeel W W, van Beek L P H, Konz M, et al. Hydrological response to climate change in a glacierized catchment in the Himalayas[J]. Climate Change, 2012, 110: 721-736.
- [87] Immerzeel W W, Pellicciotti F, Bierkens M F P. Rising river flows throughout the twenty-first century in two Himalayan glacierized watersheds[J]. Nature Geoscience, 2013, 6: 742-745.
- [88] Lutz A F, Immerzeel W W, Kraaijenbrink P D, et al. Climate change impacts on the upper Indus hydrology: sources, shifts and extremes[J]. PLoS One, 2016, 11(11): e0165630.
- [89] 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 [J]. Nature Climate Change, 2014, 4 (7) : 587-592.
- [90] Kraus H. An energy balance model for ablation in mountainous areas [J]. International Association of Hydrological Sciences Publication, 1975, 104: 74-82.
- [91] 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 [J]. Journal of Glaciology, 2012, 58(210): 677-691.
- [92] Reid T D, Carenzo M, Pellicciotti F, et al. Including debris cover effects in a distributed model of glacier ablation[J]. Journal of Geophysical Research, 2012, 117: D18105.
- [93] 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[J]. The Cryosphere, 2015, 9(6): 2295-2310.
- [94] Huang L, Li Z, Tian B, et al. Recognition of supraglacial debris in the Tianshan Mountains on polarimetric SAR images [J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 145: 47-54.
- [95] 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 [J]. The Cryosphere, 2014, 8 (2) : 377-386.
- [96] Nicholson L, Benn D I. Properties of natural supraglacial debris in relation to modelling sub-debris ice ablation [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2013, 38(5): 490-501.
- [97] Konrad S K, Humphrey N F. Steady-state flow model of debris-covered glaciers (rock glaciers) [J]. International Association of Hydrological Sciences Publication, 2000, 264: 255-266.
- [98] Vacco D A, Alley R B, Pollard D. Glacial advance and stagnation caused by rock avalanches [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2010, 294: 123-130.
- [99] Banerjee A, Shankar R. On the response of Himalayan glaciers to climate change [J]. Journal of Glaciology, 2013, 59: 480-490.
- [100] Anderson R S, Anderson L S, Armstrong W H, et al. Glaciation of alpine valleys: the glacier-debris-covered glacier-rock glacier continuum [J]. Geomorphology, 2018, 311: 127-142.
- [101] Rowan A V, Egholm D L, Quincey D J, et al. Modelling the feedbacks between mass balance, ice flow and debris transport to predict the response to climate change of debris-covered glaciers in the Himalaya [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2015, 430: 427-438.
- [102] Anderson L S, Anderson R S. Modeling debris-covered glaciers: response to steady debris deposition [J]. The Cryosphere, 2016, 10: 1105-1124.
- [103] Wirbel A, Jarosch A H, Nicholson L. Modelling debris transport within glaciers by advection in a full-Stokes ice flow model [J]. The Cryosphere, 2018, 12: 189-204.
- [104] Chen Wanbao, Liu Shiyin, Li Weide, et al. An analysis of the ice temperature and velocity along the main flowline of Guliya Ice Cap of Western Kunlun Mountains based on glacier dynamic model [J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(33): 3910-3921. [陈万宝, 刘时银, 李维德, 等. 基于冰川动力学的古里雅冰帽稳态建模分析[J]. 科学通报, 2017, 62(33): 3910-3921.]
- [105] Duan Keqin, Yao Tandong, Wang Ninglian, et al. Numerical simulation of Urumqi Glacier No. 1 in the eastern Tianshan, central Asia from 2005 to 2070 [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(36): 3511-3515. [段克勤, 姚檀栋, 王宁练, 等. 天山乌鲁木齐河源1号冰川变化的数值模拟及其对气候变化的响应分析[J]. 科学通报, 2012, 57(36): 3511-3515.]
- [106] Zhang T, Xiao C, Colgan W, et al. Observed and modelled ice temperature and velocity along the main flowline of East Rongbuk Glacier, Qomolangma (Mount Everest), Himalaya [J]. Journal of Glaciology, 2013, 59(215): 438-448.
- [107] Zhao L, Tian L, Zwinger T, et al. Numerical simulations of Gurenhekou Glacier on the Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology, 2014, 60(219): 71-82.
- [108] Wang Y, Zhang T, Ren J, et al. An investigation of the thermomechanical features of Laohugou Glacier No. 12 on Qilian Shan, western China, using a two-dimensional first-order flow-band ice flow model [J]. The Cryosphere, 2018, 12: 851-866.
- [109] Hock R, Bliss A, Marzeion B E N, et al. GlacierMIP: a model intercomparison of global-scale glacier mass-balance models and projections [J]. Journal of Glaciology, 2019, 65: 453-467.
- [110] Nakawo M, Rana B. Estimate of ablation rate of glacier ice under a supraglacial debris layer [J]. Geografiska Annaler, 1999, 81A: 695-701.
- [111] Suzuki R, Fujita K, Ageta Y. Spatial distribution of the thermal properties on debris-covered glaciers in the Himalayas derived from ASTER data [J]. Bulletin of Glaciological Research, 2007, 24: 13-22.

Debris-cover effect in the Tibetan Plateau and surroundings: a review

ZHANG Yong¹, LIU Shiyin², WANG Xin¹

(1. School of Resource, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China; 2. Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Kunming 650500, China)

Abstract: Debris cover is widespread over the ablation zones of glaciers in the Tibetan Plateau and surroundings. It dramatically alters melt progress and its spatial pattern through the energy and water exchange between land surface and atmosphere and albedo change, and then affects the response mechanism of mass balance, runoff generation and disaster process. Debris-covered glaciers are fundamentally different from those of debris-free glaciers. This review systematically analyzes the spatial distribution characteristics of debris cover over the Tibetan Plateau and surroundings, and comprehensively examines the influence of debris thickness and its spatial distribution on the processes of ice melt, mass balance and catchment runoff, as well as the response of these processes to climate change. Furthermore, the study progress of debris-cover effect is also systematically analyzed from the perspective of field observation and model simulation. Despite the importance of debris cover, the influence of debris cover in glacier mass balance and runoff models at different scales is still insufficient. Consequently, there remains challenges in applying these models to study the influence of debris thickness and its dynamic change under the climate change. In the future, we will focus on the understanding of the interaction and feedback mechanisms of climate-glacier-debris system, develop a dynamic model of the co-evolution of the ice-debris system considering key physical processes, and then forecast the dynamic impact and change in debris cover on regional water resources due to climate change, thus serving the regional social and economic development and the green silk road construction.

Key words: debris-covered glacier; debris-cover effect; melting; water resources; Tibetan Plateau

(责任编辑: 上官冬辉)