1961~2016年全球变暖背景下冰川物质亏损加速度研究

李耀军^{1,2,3}, 丁永建^{1,2,3,4*}, 上官冬辉^{1,4†}, 刘风景⁵, 赵求东^{1,2}

1. 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;

2. 中国科学院西北生态环境资源研究院内陆河流域生态水文重点实验室, 兰州 730000;

3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. China-Pakistan Joint Research Center on Earth Sciences, CAS-HEC, Islamabad 45320, Pakistan;

5. School of Forest Resources and Environmental Science, Michigan Technological University, Houghton 49931, USA

* 通讯作者, E-mail: dylj@lzb.ac.cn;

† 通讯作者, E-mail: dhguan@lzb.ac.cn

收稿日期: 2020-06-11; 收修改稿日期: 2020-10-16; 接受日期: 2020-11-09; 网络版发表日期: 2021-01-25

中国科学院战略性先导科技专项项目(编号: XDA19070501)和国家自然科学基金项目(批准号: 41730751, 41671066, 41871059, 41871055)资助

摘要 过去几十年间, 全球冰川物质亏损的加速趋势日益显著, 而这种加速趋势将对全球海平面上升、流域水资源以及冰冻圈灾害等方面产生深远的影响. 针对目前关于冰川物质亏损加速度的研究仍然比较贫乏的问题, 本研究利用实测冰川物质平衡记录和最新的融合实测资料与大地测量法表面高程变化的冰川物质变化数据, 对全球冰川物质亏损加速度进行研究. 结果表明, 1961~2016年全球冰川物质亏损经历了显著的加速过程. 在全球尺度上, 冰川物质亏损加速度分别为 $(5.76 \pm 1.35) \text{ Gt a}^{-2}$ (冰量损失加速度)和 $(0.0074 \pm 0.0016) \text{ m w.e.a}^{-2}$ (单位面积冰量损失加速度). 在区域尺度上, 冰川主要分布区(除南极冰盖边缘地区)的冰量损失加速度大于冰川储量较小的区域, 其中阿拉斯加地区的冰量损失加速度最大 $((1.33 \pm 0.47) \text{ Gt a}^{-2})$. 对单位面积冰量变化而言, 冰川分布面积较小的区域和几个主要冰川分布区都呈现出较大的冰川消融加速度, 其中欧洲中部的冰川单位面积物质亏损的加速度最大 $((0.024 \pm 0.0088) \text{ m w.e.a}^{-2})$. 全球气候变暖是冰川物质亏损加速的主要驱动力. 通过对比研究, 发现格陵兰冰盖和南极冰盖对全球海平面上升贡献的加速度均大于冰川. 本研究将有助于提升对冰川变化机理的认识, 为应对冰川变化的影响提供科学依据.

关键词 冰川, 物质亏损, 加速度, 全球变暖

1 引言

冰川被称作“气候变化的指示器”, 在气候变暖的

大背景下, 冰川变化对海平面上升、流域水资源变化以及冰冻圈灾害等与人类社会息息相关的事件影响日益广泛而深远(Zemp等, 2019; Gardner等, 2013; Huss和

中文引用格式: 李耀军, 丁永建, 上官冬辉, 刘风景, 赵求东. 2021. 1961~2016年全球变暖背景下冰川物质亏损加速度研究. 中国科学: 地球科学, 51(3): 453–464, doi: [10.1360/N072020-0189](https://doi.org/10.1360/N072020-0189)

英文引用格式: Li Y, Ding Y, Shanguan D, Liu F, Zhao Q. 2021. Climate-driven acceleration of glacier mass loss on global and regional scales during 1961–2016. Science China Earth Sciences, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9700-1>

Hock, 2018; Kaser等, 2010), 因而在全球变化研究中备受关注. 许多学者利用实测数据、大地测量法、遥感数据以及模型模拟等研究手段发现, 过去几十年间, 全球绝大多数冰川均呈现物质亏损的状态(Li等, 2019; Brun等, 2017; Zemp等, 2015; Vaughan等, 2013; Hock等, 2009), 且自2000年以来部分区域冰川物质亏损速率呈现出明显的加速趋势(Zheng等, 2018; Harig和Simons, 2016; Gardner等, 2011). 基于冰川物质平衡观测数据, 发现21世纪初期冰川物质亏损速率达到了有记录以来的历史最大值(Zemp等, 2015).

在全球变暖的大背景下, 冰川物质亏损加速将会对人类社会可持续发展产生深刻的影响. 第一, 冰川加速消融会导致其对全球海平面上升的贡献呈现非线性上升趋势(Meier等, 2007). 已有研究发现, 到2100年格陵兰冰盖和南极冰盖物质亏损加速将会导致海平面上升56cm, 这要比线性趋势下(即冰盖物质亏损速率不变)的贡献多出大约43cm (Rignot等, 2011). 2006~2016年, 冰川对海平面上升的贡献速率约为 0.92mm a^{-1} , 与格陵兰冰盖的贡献速率相当而且远大于南极冰盖对海平面上升的贡献速率(Zemp等, 2019). 准确识别冰川物质亏损加速度将有助于降低未来海平面上升预测研究中的不确定性. 第二, 冰川加速消融将对流域水资源产生显著影响. 当冰川消融加速时, 冰川径流将会先增加直至冰川储量不能继续维持加速消融, 而此时冰川径流也将达到最大并开始下降(Ye等, 2003). 第三, 冰川加速消融将会直接影响冰川灾害的发生频率、程度和影响范围(Kaab等, 2018; Haeberli和Whiteman, 2015). 例如, 当冰川物质亏损开始加速, 冰川末端的冰川湖扩张速度也会增大并最终溃决引发冰湖溃决洪水, 危害下游人类社会的生存与发展(Shangguan等, 2017).

目前已有相关研究关注到部分地区出现冰川物质亏损速率增加的现象, 这些研究大多集中在北极地区(Zheng等, 2018; Gardelle等, 2012), 但冰川物质亏损加速的趋势是否在所有的冰川区内都已出现目前仍是未知. 虽然已有研究利用实测物质平衡记录研究冰川消融加速问题(Zemp等, 2017; Zemp等, 2015), 但全球可利用的观测冰川数量太少且分布存在明显的区域差异, 这导致其结果缺乏代表性, 因此严重制约了对全球尺度冰川物质亏损加速的认识(Marzeion等, 2017). 近年来, 许多学者利用GRACE (Gravity Recovery and Experiment)重力卫星测量的重力场数据变化研究冰川

物质亏损加速现象(Ciraci等, 2020; Wouters等, 2019; Jacob等, 2012), 但由于GRACE数据的时间序列太短且空间分辨率过于粗糙导致其不能反演小冰川和冰盖边缘冰川的变化趋势. 需要指出的是, 现有的冰川物质亏损加速研究中, 都是通过对两个不同时间段内冰川物质变化的平均速率进行简单的比较, 缺乏冰川变化过程中物质亏损加速度的研究. 这就导致很难判断过去几十年间在全球及区域尺度上冰川物质亏损速率的变化过程. 在全球气温持续上升的情况下, 研究冰川物质亏损加速度将有助于提高人类社会减缓与适应全球变化的能力.

综上所述, 本研究将利用长时间序列的实测冰川物质平衡数据, 同时结合最新的通过融合实测资料与大地测量法冰川表面高程变化数据而得到的全球冰川物质变化数据, 研究冰川物质亏损加速的趋势是否在全球尺度以及19个RGI一级冰川区内(网络版附图S1和网络版附表S1, <http://earthcn.scichina.com>, RGI Consortium, 2017)都已出现, 继而利用冰川物质亏损加速度去评估冰川物质亏损的速率在不同区域、不同时间段内的增加幅度. 本研究拟解决以下科学问题: (1) 是否在全球与区域尺度上都已出现冰川物质亏损加速的趋势? (2) 冰川物质亏损速率在过去几十年间究竟增加了多少?

2 数据与方法

2.1 实测冰川物质平衡数据

实测物质平衡资料是研究冰川对气候变化响应最直接也是最可靠的数据(Kaser等, 2006; Kaser等, 2003). 由于冰川观测异常艰难且冰川数量巨大等原因, 世界冰川监测服务处(World Glacier Monitoring Service, WGMS)中可利用的冰川观测数据质量参差不齐. 有鉴于此, WGMS选取了40条具有良好的区域代表性, 且有着长期连续物质平衡观测记录的冰川作为参考冰川以表征全球冰川物质平衡变化状况. 本研究利用由WGMS提供的两种冰川物质平衡变化序列研究全球冰川年际物质平衡的变化特征, 分别是: (1) 包含全球当年所有监测记录的冰川物质平衡序列, (2) 利用全球参考冰川的观测数据整理而成的参考冰川物质平衡序列. 在单条冰川尺度上, 鉴于全球不同监测站点的冰川观测资料质量差别巨大, 而冰川消融加速度的

图 1 选取的91条冰川年际物质平衡变化趋势示意图

每条冰川的具体信息可见网络版附表S2. 红色代表物质亏损速率增加, 蓝色代表物质亏损速率降低, 圆圈面积则代表加速度

研究需要连续长时间的观测数据积累, 因此本研究根据以下标准筛选符合要求的观测冰川: (1) 冰川物质平衡连续观测记录超过20年(Bormann等, 2018), (2) 时间序列必须覆盖2000年以保证观测结果能代表冰川物质平衡现状. 本研究从全球450条有观测记录的冰川站点中, 选取出91条符合上述标准的冰川. 这91条冰川的具体信息包括经纬度、序列长度以及起止时间、多年平均物质平衡等信息, 如网络版附表S2、附图S2所示.

2.2 全球冰川物质变化数据

监测冰川数量太少且区域分布严重不均等问题严重制约着利用实测冰川物质平衡数据去评估全球冰川物质变化特征(Marzeion等, 2017; Radić和Hock, 2014). 截至目前, 全球只有不到0.3%的冰川有物质平衡监测记录, 而其中具有长时间观测资料的冰川更是少之又少. 利用大地测量法研究冰川物质变化具有覆盖范围大的优点, 但获取的数据时间间隔较长, 难以反映冰川物质平衡的年际分布与变化. 基于WGMS收集的全球实测冰川物质平衡数据和大地测量法冰川表面高程变化数据, Zemp等(2019)制作了一套全球冰川物质变

化数据集以评估1961~2016年全球冰川变化对海平面上升的贡献. 该数据集包含了450条冰川的实地观测资料 and 19130条冰川的大地测量法冰川表面高程变化数据, 具体研究方法和处理过程详见Zemp等(2019). 本研究中利用这套冰川物质变化数据集计算了全球和区域尺度上的冰川物质亏损加速度, 其中冰川密度设定为 850 kg m^{-3} .

2.3 冰川物质亏损加速度计算

冰川物质亏损加速度是指在一定时间内冰川物质亏损速率的变化大小. 在本研究中, 冰川物质亏损加速度包含两个方面: 冰量损失加速度(Gt a^{-2})和单位面积冰量损失加速度(m w.e.a^{-2}), 分别通过冰量变化速率和冰川物质平衡对时间进行求导而得到; 其中, 冰量变化(Gt a^{-1})代表冰川储量收支的变化, 即冰量增加或损失的速率; 而冰川物质平衡(m w.e.a^{-1})则指冰川单位面积上冰量的变化, 相当于整个冰川表面高程变化的速率, 以水当量或水层深表示(Cogley, 2012; Cogley等, 2011). 通过计算冰川物质平衡使得比较不同地区冰川物质变化速率成为可能(Cogley等, 2011). 以冰川物质平衡为例, 冰川物质亏损加速度计算方程如下:

$$A = \frac{\Delta MB}{\Delta t} = \frac{MB_f - MB_i}{\Delta t}, \quad (1)$$

式中, A 指冰川物质亏损的加速度(m w.e.a^{-2}), ΔMB 指冰川物质亏损速率的变化量(m w.e.a^{-1}), MB_f 是指某个时间段结束时冰川的物质平衡(m w.e.a^{-1}), MB_i 是指某个时间段开始时冰川的物质平衡(m w.e.a^{-1}), Δt 是指物质平衡变化所用的时间(a). 冰量损失加速度计算方法与物质平衡加速度计算方法相同. 由于加速度是矢量包含两个特征: 变化大小和方向. 在本研究中将冰川物质亏损定义为加速度的正方向而物质积累定义为加速度的负方向. 综上所述, 如果加速度 A 为正值, 则表示冰川物质亏损呈加速状态, 如果 A 为负值, 则表示冰川的物质亏损呈现减速状态.

参考Rignot等(2011)的研究, 利用线性回归方法计算长时间序列的冰川物质亏损加速度, 如IPCC AR5推荐, 最小二乘法(ordinary least squares, OLS)是计算线性趋势及其不确定性的最好方法(Hartmann等, 2013). 加速度的不确定性通过斜率的95%置信区间来确定(Rignot等, 2011). 本研究中假设冰川物质变化数据的测量误差与序列值之间相互独立, 则在使用OLS方法计算斜率时的结果就不会被序列的误差而影响(Oli-

veira和Aguilar, 2013; Fuller, 1987). 综上所述, 当序列斜率为负数时, 说明冰川消融存在加速的趋势; 而当斜率为正数时, 说明冰川消融速率在下降, 冰川物质亏损加速度等于序列斜率的相反数. 本研究基于上述方法计算了三个时间段内的冰川物质亏损加速度: (1) 全部时间段, 即1961~2016年; (2) 1981~2016年, 因为自20世纪80年代开始, 冰川物质亏损开始呈现加速的趋势(Zemp等, 2015); (3) 1997~2016年, 即冰川物质变化数据序列里最后一个20年.

3 结果

3.1 全球冰川物质亏损加速的观测事实

研究发现, 自1961年以来, 全球冰川实测物质平衡曲线呈现出明显的下降趋势(图1、2). 图1展示了选取的91条冰川年物质平衡序列在各自的监测时间段内的变化趋势, 所有被选取的冰川多年平均物质平衡均为负值(网络版附表S2), 即冰川处于物质亏损状态. 由于被选取的冰川各自的序列长度不一且起止年份不同, 因此比较单条冰川之间的多年平均物质平衡和物质平衡序列的斜率大小存在较大偏差. 在所有的91条冰川

图2 全球所有可利用监测冰川(a)和全球参考冰川(b)物质平衡累积曲线、全球所有可利用监测冰川(c)和全球参考冰川(d)物质平衡年际变化曲线

表 1 全球冰川和两大冰盖对海平面的贡献与加速度^{a)}

名称	时间段	年均贡献 (mm a ⁻¹)	加速度 (mm a ⁻²)	参考文献
冰川	1997~2016	0.83±0.53 [*]	0.019±0.013 [*]	—
格陵兰 冰盖	1992~2009	—	0.060±0.0028	Rignot等, 2011
	2003~2012	0.69±0.055	0.069±0.025	Wouters等, 2013
	2003~2013	0.77±0.16	0.070±0.0033	Velicogna等, 2014
	1992~2018	0.41±0.036	0.028±0.013	Imbie Team, 2020
南极 冰盖	1992~2009	—	0.040±0.0055	Rignot等, 2011
	2003~2012	0.31±0.063	0.058±0.036	Wouters等, 2013
	2003~2013	0.18±0.12	0.029±0.010	Velicogna等, 2014
	1992~2017	0.30±0.15	0.023±0.010	Imbie Team, 2018

a) * 1mm海平面上升=362.5 Gt

中, 88条冰川的物质平衡变化曲线呈现下降趋势(表1), 意味着这些冰川物质亏损处于加速状态. 这些所选取的冰川年际物质平衡序列的下降趋势表明冰川的物质亏损处于加速状态, 说明全球绝大部分冰川区的冰川消融正在加速.

全球尺度上, 两条冰川物质平衡累积曲线(包括全部监测冰川和参考冰川)表明在1961~2016年, 全球冰川经历了显著的物质亏损, 且具有明显的加速趋势(图2). 在最初的20年里(1961~1980)全球冰川亏损处于平缓状态, 平均亏损速率较小, 而在1981~2000年冰川亏损开始加速, 直到进入21世纪, 冰川亏损的速率迅速增加. 全球监测冰川物质平衡年际变化曲线如图2c、2d所示. 结果表明, 1961~2016年全球冰川物质平衡多年平均值为 -0.38m w.e.a^{-1} , 参考冰川的多年平均值为 -0.40m w.e.a^{-1} . 两条年际物质平衡序列在研究时间段内均呈现出显著的下降趋势, 这表明冰川消融在全球尺度呈现加速状态. 自1961年以来, 全球冰川物质平衡的加速度为 0.015m w.e.a^{-2} , 而参考冰川加速度也是 0.015m w.e.a^{-2} .

尽管有物质平衡监测记录的冰川在全球和区域尺度上分布严重不足, 而且多为易达到的小冰川(Marzeion等, 2017; Radić和Hock, 2014), 但通过上述分析可以得出明确的结论, 即在1961~2016年, 全球冰川出现了明显的物质亏损速率增加的趋势. 此外, 全球参考冰川和全部有监测记录冰川的物质平衡年际变化序列、累积变化曲线和加速度十分接近, 这不仅说明参考冰川具有良好的代表性, 同时也说明全球冰川在变

化趋势上存在一致性.

3.2 全球及区域冰川物质亏损加速度

全球冰川物质变化的时空特征在Zemp等(2019)文章中有详细描述, 本研究主要关注全球及区域尺度的冰川物质亏损加速度. 结果表明, 在1961~2016年全球冰川冰量损失的加速度为 $(5.76\pm1.35)\text{Gt a}^{-2}$, 而全球冰川单位面积冰量损失的加速度为 $(0.0074\pm0.0016)\text{m w.e.a}^{-2}$ (图3); 在1981~2016年, 全球冰川冰量损失的加速度为 $(10.17\pm2.11)\text{Gt a}^{-2}$, 冰川单位面积冰量损失的加速度为 $(0.013\pm0.0030)\text{m w.e.a}^{-2}$ (网络版附图S3a); 在1997~2016年, 冰川物质亏损加速度分别为 $(6.83\pm4.59)\text{Gt a}^{-2}$ 和 $(0.0096\pm0.0056)\text{m w.e.a}^{-2}$ (网络版附图S3b).

在区域尺度上, 就冰川冰量变化而言, 冰川分布面积大、储量大的区域(除南极冰盖边缘地区之外)冰川物质亏损加速度明显大于冰川储量较小的区域(图4). 在3个研究时间段内, 阿拉斯加不仅是冰量损失最大的地区, 同时也是1961~2016年冰量损失加速度最大 $((1.33\pm0.47)\text{Gt a}^{-2})$ 的地区; 而在1981~2016年, 作为全球冰川覆盖面积最大、冰储量最大的南极冰盖边缘区域, 其冰川冰量损失加速度在19个一级冰川区内最大 $((1.94\pm0.69)\text{Gt a}^{-2})$. 在1997~2016年, 加拿大北极北部地区冰量损失加速度最大 $((2.64\pm1.79)\text{Gt a}^{-2})$, 其次为阿拉斯加地区 $((1.31\pm2.81)\text{Gt a}^{-2})$. 所有的一级冰川区在三个研究时间段内, 只有冰岛 $((-0.29\pm0.45)\text{Gt a}^{-2})$ 、中亚 $((-0.19\pm0.48)\text{Gt a}^{-2})$ 、南亚西部 $((-0.32\pm0.46)$

图3 1961~2016年全球冰川物质变化示意图

其中加速度通过OLS方法计算(即红线), 加速度的不确定性通过斜率的95%置信区间来确定. k 指线性回归斜率

Gt a^{-2})和南极冰盖边缘地区(-0.17 ± 1.09) Gt a^{-2}) 在1997~2016年时间段内出现冰川冰量损失速率下降的趋势.

对于单位面积冰量变化而言, 冰川面积较小的区域以及冰川分布面积大、储量大的区域均呈现出较大的冰川消融加速度(图4), 而影响下游十几亿人口水资源补给的高山亚洲地区冰川的消融加速度在所有地区中相对较小. 结果表明, 在1961~2016年, 欧洲中部冰川单位面积冰量损失加速度最大(0.024 ± 0.0088) m w.e. a^{-2}), 其次是低纬度地区的冰川(0.022 ± 0.0028) m w.e. a^{-2})和阿拉斯加地区的冰川(0.017 ± 0.0054) m w.e. a^{-2}). 同时, 在1981~2016年, 最大加速度出现在低纬度地区和斯堪的纳维亚冰川区(0.029 ± 0.029) m w.e. a^{-2}). 而在1997~2016年, 高加索和中东地区单位面积冰川物质亏损加速度最大(0.039 ± 0.028) m w.e. a^{-2}). 只有冰岛(-0.02 ± 0.043) m w.e. a^{-2})、中亚(-0.0034 ± 0.0096) m w.e. a^{-2})、南亚西部(-0.0093 ± 0.014) m w.e. a^{-2})和南极冰盖边缘地区(-0.0009 ± 0.0089) m w.e. a^{-2})的冰川单位

面积物质亏损在1997~2016年出现过速率下降的趋势.

4 讨论

冰川的发育规模在千年或更长的时间尺度上主要受地形因子控制, 而在十年或百年时间尺度上, 冰川物质变化则由其周围的气候状况所决定(Marzeion等, 2018; Kaser等, 2006). 冰川物质亏损加速可以归因于积累的减少或消融的增加, 而两者都是气候变暖的结果(Vaughan等, 2013). 在全球尺度上, 冰川物质变化与全球地表平均气温距平值之间有着非常好的相关性(图5), 利用HadCRUT4数据(Morice等, 2012), 通过计算皮尔逊相关系数发现全球地表平均气温的距平值与实测冰川物质平衡($r = -0.82$, $p < 0.001$)以及全球冰川物质变化数据之间($r = -0.78$, $p < 0.001$)均呈现非常显著的负相关, 且相关性良好. 在区域尺度上, Zheng等(2018)研究发现北极区域的变暖导致俄罗斯北极地区冰川物质亏损速率的增加, Gardner等(2012)则通过分析指出气

图 4 区域尺度冰川物质变化速率及物质亏损加速度

(a) 冰量损失加速度; (b) 冰量变化速率多年平均值; (c) 单位面积冰量损失加速度; (d) 冰川物质平衡多年平均值. 图中具体数值如网络版附表 S3 所示. 区域代码如网络版附表 S1 所示

温上升是导致加拿大北极地区冰川加速消融的主要原因, 在喜马拉雅地区, 冰川物质亏损加速与区域变暖呈现非常良好的一致性(Maurer等, 2019). 同时, 最新研究指出新西兰地区出现的极端冰川物质亏损事件主要是由人类活动所引发的气候变暖而导致的(Vargo等, 2020). 与之相反的是, 区域气温下降则有可能导致区域冰川异动(Mackintosh等, 2017), 例如由于冰雪反照率的改变引发区域气温下降进而导致喀喇昆仑地区冰川物质变化呈微弱正平衡状态(Guo等, 2020; Forsythe等, 2017). 由此可见, 气温上升是全球冰川物质亏损加

速的主要驱动力. 由于冰川变化是由包括气候、冰川自身特性、地形特征等多重因素的综合作用而决定的(Qin等, 2018; Radić和Hock, 2014; Barry, 2006), 全面认识冰川物质亏损加速的机制还需要进一步的数据来支撑, 包括高精度高分辨率的气象数据、更加准确的冰川物质变化数据以及其他影响冰川变化要素的数据等.

准确理解冰川物质亏损加速度将有助于人类社会更好的预测冰川变化对流域水资源的影响, 为提高水资源利用能力提供支撑. 冰川消融对流域水资源具有

图5 基于HadCRUT4数据的全球地表平均气温距平值(a)和1961~2016年全球冰川物质变化与地表平均气温距平值关系示意图(b)

气温距平采用1961~1990年的平均值

显著作用(Kaser等, 2010). 持续的冰川物质亏损对下游径流产生了显著的影响, 即使在冰川覆盖面积小的大流域, 这种影响也不可忽视(Huss和Hock, 2018). 在冰川水文的诸多研究课题当中, 冰川水文学的核心问题和主要挑战之一就是如何能够准确预测各个山区之间的冰川径流拐点(Qin等, 2018; Huss和Hock, 2018), 而利用加速度将有助于在区域尺度上准确预测冰川径流的拐点. 当冰川开始消融时, 冰川径流将会增加直至到达拐点, 冰川径流也会达到最大, 之后由于冰川储量不能继续维持冰川的快速消融, 冰川物质亏损速率开始下降, 冰川径流也随之开始减少(Hock等, 2005). 换言之, 当冰川物质亏损加速度为零时, 冰川径流到达拐点(网络版附图S4). 因此, 由于大多数冰川区在最近20年(1997~2016年)的冰川物质亏损加速度仍然为正值, 说明这些地区的冰川径流在未来一段时间内仍然会继续增加. 值得一提的是, 本研究关于拐点的研究结果与Huss和Hock(2018)两人通过模型模拟得到结果大相径庭. Huss和Hock(2018)指出, 在其所研究的全部流域当中, 超过1/2的流域已经出现拐点, 也就意味着冰川径流开始下降, 特别是欧洲中部和北美西部地区. 但本研究中的结果却显示在这两个地区冰川仍然在经历物质亏损的加速过程(图4), 这说明两个地区的冰川径流仍然在增加, 而本研究结果与阿尔卑斯山地区最新的利用冰川观测物质平衡数据的研究结果(Vincent等, 2017), 以及北美西部基于多源DEM反演冰川物质平衡

的研究结果(Menounos等, 2019)是一致的, 即两个地区冰川仍然在经历加速消融的过程. 此外, 对于亚洲中部地区, Huss和Hock(2018)的研究结果显示该地区将在未来几十年经历冰川径流的拐点, 而本文的研究结果以及两条位于天山的实测冰川物质平衡序列都显示该地冰川径流在过去20年经历了一个下降的过程(图6). 造成两种结果差异的一个重要原因在于本研究只关注冰川自身消融产生的径流而在Huss和Hock(2018)的研究中将产生自冰川区的所有径流(包括降水)都作为冰川径流, 即使某个冰川完全消失, 产自该地的径流仍然被当作冰川径流来处理. 为消除这种研究结果的不一致性需要更多高质量的冰川变化数据和更多综合性的研究.

过去几十年间, 全球冰川积累区面积比例(accumulation area ratio, AAR)急剧下降(Mernild等, 2013; Bahr等, 2009). 通过对来自WGMS有限的冰川AAR数据进行整理分析后发现单条冰川的物质亏损加速度与冰川的AAR变化率之间负相关性良好, 且通过显著性检验(图7). 此外, 利用遥感数据计算冰川积累区比例要比传统的冰川物质平衡实地观测或者模型模拟等方法省时省力(Mernild等, 2013). 因此可以利用这一特性来计算冰川物质亏损的加速度, 并进一步为研究流域尺度的冰川径流拐点问题提供帮助.

过去几十年间, 全球冰川与冰盖物质亏损超过热力膨胀成为全球海平面上升的主要原因(IPCC, 2019).

图 6 1997~2016年间中亚地区(红线)、TS.Tuyuksuyskiy冰川(蓝线)和乌源1号冰川(黑线)年际物质平衡变化曲线
k 指数列线性拟合的斜率

图 7 冰川实测物质亏损加速度与积累区比例变化相关性示意图

根据最新的研究结果, 全球海平面在1993~2018年间的上升加速度为 0.1 mm a^{-2} (Gruop, 2018). 本文的研究结果表明冰川物质亏损对全球海平面上升贡献的加速度

为 $(0.019 \pm 0.013) \text{ mm a}^{-2}$, 约占海平面上升加速度的19%. 目前已有许多学者研究格陵兰冰盖和南极冰盖物质亏损加速对全球海平面上升的影响(表1), 在各自

研究的时间段内, 格陵兰冰盖对海平面上升的贡献加速度介于 $0.028\sim0.070\text{mm a}^{-2}$, 而同时期南极冰盖对海平面上升贡献的加速度则介于 $0.023\sim0.058\text{mm a}^{-2}$. 与之相比, 冰川对海平面上升贡献的加速度要小于两极冰盖贡献的加速度, 这也就意味着尽管目前两极冰盖各自对海平面的贡献仍然小于冰川, 但在21世纪, 格陵兰冰盖和南极冰盖的物质亏损都将超过冰川, 成为全球海平面上升的主要贡献源.

只有通过长时间序列的冰川物质平衡数据进行分析研究才能减少预测未来冰川物质变化的不确定性 (Marzeion等, 2015). 然而, 由于冰川分布的特殊性导致冰川观测异常艰难, 加之冰川数量巨大, 数据缺乏仍然是制约当前学界正确认识冰川变化规律的主要因素. 现有的全球冰川物质变化数据都极其依赖实测冰川物质平衡, 然而有观测记录的冰川数目不足全球冰川总数的0.3%, 且不同区域之间冰川分布数量严重不均 (Zemp等, 2019; Marzeion等, 2017; Medwedeff和Roe, 2016; Radić和Hock, 2014). 因此, 在未来的工作中需要通过不断挖掘新的全球冰川物质变化数据来提升对冰川物质亏损加速过程和机理的科学认识并减少由于数据精度问题所带来的不确定性.

5 结论

在全球尺度和区域尺度上冰川物质亏损加速度的系统研究仍然比较缺乏, 而且目前关于冰川物质亏损速率增加的研究仍然只是对两个不同时间段内物质变化的平均速率进行简单的比较. 因此, 本研究利用实测冰川物质平衡数据和最新的融合实测资料与大地测量法表面高程变化数据的全球冰川物质变化数据, 首次对全球冰川物质亏损加速度进行研究. 结果表明, 过去几十年间全球冰川物质亏损出现了明显的加速趋势. 1961~2016年, 全球冰川冰量损失的加速度为 $(5.76\pm1.35)\text{Gt a}^{-2}$, 单位面积冰量损失的加速度为 $(0.0074\pm0.0016)\text{m w.e.a}^{-2}$. 在区域尺度上, 就冰川冰量变化而言, 冰川覆盖面积大、冰储量大的冰川分布区的冰量损失加速度大于冰川覆盖面积小的冰川区. 针对单位面积冰量变化而言, 冰川覆盖面积大、冰储量大的区域与冰川覆盖面积较小的区域都呈现出较大的消融加速度. 只有冰岛、亚洲中部、南亚西部以及南极冰盖边缘区域的冰川在1997~2016年间, 物质亏损呈现减

速的趋势. 冰川物质变化与全球地表平均气温之间具有显著负相关性说明气温上升对冰川物质亏损加速有着重要作用. 通过对比研究发现冰川物质亏损对海平面上升贡献的加速度小于两极冰盖的对应值.

致谢 感谢中国-巴基斯坦地球科学研究中心提供科研条件完成此项研究.

参考文献

- Bahr D B, Dyurgerov M F, Meier M F. 2009. Sea-level rise from glaciers and ice caps: A lower bound. *Geophys Res Lett*, 36: L03501
- Barry R G. 2006. The status of research on glaciers and global glacier recession: A review. *Prog Phys Geogr-Earth Environ*, 30: 285–306
- Bormann K J, Brown R D, Derksen C, Painter T H. 2018. Estimating snow-cover trends from space. *Nat Clim Change*, 8: 924–928
- Brun F, Berthier E, Wagnon P, Kääb A, Treichler D. 2017. A spatially resolved estimate of High Mountain Asia glacier mass balances from 2000 to 2016. *Nat Geosci*, 10: 668–673
- Ciraci E, Velicogna I, Swenson S. 2020. Continuity of the mass loss of the world's glaciers and ice caps from the GRACE and GRACE follow-on missions. *Geophys Res Lett*, 47: e86926
- Cogley J. 2012. The future of the world's glaciers. In: Henderson Sellers A, McGuffie K, eds. *The Future of the World's Climate*. Waltham: Elsevier. 197–222
- Cogley J G, Hock R, Rasmussen L A, Arendt A A, Bauder A, Braithwaite R J, Jansson P, Kaser G, Möller M, Nicholson L, Zemp M. 2011. Glossary of glacier mass balance and related terms. Research Report. Paris: UNESCO/IHP
- Farinotti D, Huss M, Fürst J J, Landmann J, Machguth H, Maussion F, Pandit A. 2019. A consensus estimate for the ice thickness distribution of all glaciers on Earth. *Nat Geosci*, 12: 168–173
- Forsythe N, Fowler H J, Li X F, Blenkinsop S, Pritchard D. 2017. Karakoram temperature and glacial melt driven by regional atmospheric circulation variability. *Nat Clim Change*, 7: 664–670
- Fuller W A. 1987. *Measurement Error Models*, 305. Hoboken: John Wiley & Sons
- Gardelle J, Berthier E, Arnaud Y. 2012. Slight mass gain of Karakoram glaciers in the early twenty-first century. *Nat Geosci*, 5: 322–325
- Gardner A S, Moholdt G, Cogley J G, Wouters B, Arendt A A, Wahr J, Berthier E, Hock R, Pfeffer W T, Kaser G, Ligtenberg S R M, Bolch T, Sharp M J, Hagen J O, van den Broeke M R, Paul F. 2013. A reconciled estimate of glacier contributions to sea level rise: 2003 to 2009. *Science*, 340: 852–857

- Gardner A S, Moholdt G, Wouters B, Wolken G J, Burgess D O, Sharp M J, Cogley J G, Braun C, Labine C. 2011. Sharply increased mass loss from glaciers and ice caps in the Canadian Arctic Archipelago. *Nature*, 473: 357–360
- Gardner A, Moholdt G, Arendt A, Wouters B. 2012. Accelerated contributions of Canada's Baffin and Bylot Island glaciers to sea level rise over the past half century. *Cryosphere*, 6: 1103–1125
- Group W G S L B. 2018. Global sea-level budget 1993–present. *Earth Syst Sci Data*, 10: 1551–1590
- Guo D, Sun J, Yang K, Pepin N, Xu Y, Xu Z, Wang H. 2020. Satellite data reveal southwestern Tibetan plateau cooling since 2001 due to snow-albedo feedback. *Int J Climatol*, 40: 1644–1655
- Haeberli W, Whiteman C. 2015. Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters: A General Framework, Snow and Ice-Related Hazards, Risks and Disasters. Amsterdam: Elsevier. 1–34
- Harig C, Simons F J. 2016. Ice mass loss in Greenland, the Gulf of Alaska, and the Canadian Archipelago: Seasonal cycles and decadal trends. *Geophys Res Lett*, 43: 3150–3159
- Hartmann D, Tank A M G K, Rusticucci M, Alexander L, Brönnimann S, Charabi Y, Dentener F, Dlugokencky E, Easterling D, Kaplan A, Soden B, Thorne P, Wild M, Zhai P M. 2013. Observations: Atmosphere and surface supplementary material. In: Stocker T F, Qin D, Plattner G, Tignor M, Allen S, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P, eds. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press
- Hock R, de Woul M, Radić V, Dyurgerov M. 2009. Mountain glaciers and ice caps around Antarctica make a large sea-level rise contribution. *Geophys Res Lett*, 36: L07501
- Hock R, Jansson P, Braun L N. 2005. Modelling the Response of Mountain Glacier Discharge to Climate Warming, Global Change and Mountain Regions. Heidelberg: Springer. 243–252
- Huss M, Hock R. 2018. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nat Clim Change*, 8: 135–140
- IPCC, 2019. Summary for Policymakers. In: Pörtner H O, Roberts D C, Masson-Delmotte V, Zhai P, Tignor M, Poloczanska E, Mintenbeck K, Nicolai M, Okem A, Petzold J, Rama B, Weyer N, eds. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate
- Jacob T, Wahr J, Pfeffer W T, Swenson S. 2012. Recent contributions of glaciers and ice caps to sea level rise. *Nature*, 482: 514–518
- Kääb A, Leinss S, Gilbert A, Bühler Y, Gascoin S, Evans S G, Bartelt P, Berthier E, Brun F, Chao W A, Farinotti D, Gimbert F, Guo W, Huggel C, Kargel J S, Leonard G J, Tian L, Treichler D, Yao T. 2018. Massive collapse of two glaciers in western Tibet in 2016 after surge-like instability. *Nat Geosci*, 11: 114–120
- Kaser G, Cogley J G, Dyurgerov M B, Meier M F, Ohmura A. 2006. Mass balance of glaciers and ice caps: Consensus estimates for 1961–2004. *Geophys Res Lett*, 33: 1–5
- Kaser G, Fountain A, Jansson P. 2003. A Manual for Monitoring the Mass Balance of Mountain Glaciers. Paris: Unesco
- Kaser G, Grosshauser M, Marzeion B. 2010. Contribution potential of glaciers to water availability in different climate regimes. *Proc Natl Acad Sci USA*, 107: 20223–20227
- Li Y J, Ding Y J, Shangguan D H, Wang R J. 2019. Regional differences in global glacier retreat from 1980 to 2015. *Adv Clim Change Res*, 10: 203–213
- Mackintosh A N, Anderson B M, Lorrey A M, Renwick J A, Frei P, Dean S M. 2017. Regional cooling caused recent New Zealand glacier advances in a period of global warming. *Nat Commun*, 8: 14202
- Marzeion B, Champollion N, Haeberli W, Langley K, Leclercq P, Paul F. 2017. Observation-based estimates of global glacier mass change and its contribution to sea-level change. *Surv Geophys*, 38: 105–130
- Marzeion B, Kaser G, Maussion F, Champollion N. 2018. Limited influence of climate change mitigation on short-term glacier mass loss. *Nat Clim Change*, 8: 305–308
- Marzeion B, Leclercq P W, Cogley J G, Jarosch A H. 2015. Brief Communication: Global reconstructions of glacier mass change during the 20th century are consistent. *Cryosphere*, 9: 2399–2404
- Maurer J M, Schaefer J M, Rupper S, Corley A. 2019. Acceleration of ice loss across the Himalayas over the past 40 years. *Sci Adv*, 5: eaav7266
- Medwedeff W G, Roe G H. 2016. Trends and variability in the global dataset of glacier mass balance. *Clim Dyn*, 48: 3085–3097
- Meier M F, Dyurgerov M B, Rick U K, O'Neel S, Pfeffer W T, Anderson R S, Anderson S P, Glazovsky A F. 2007. Glaciers dominate eustatic sea-level rise in the 21st century. *Science*, 317: 1064–1067
- Menounos B, Hugonnet R, Shean D, Gardner A, Howat I, Berthier E, Pelto B, Tennant C, Shea J, Noh M J, Brun F, Dehecq A. 2019. Heterogeneous changes in western North American glaciers linked to decadal variability in zonal wind strength. *Geophys Res Lett*, 46: 200–209
- Mernild S H, Lipscomb W H, Bahr D B, Radić V, Zemp M. 2013. Global glacier changes: A revised assessment of committed mass losses and sampling uncertainties. *Cryosphere*, 7: 1565–1577
- Morice C P, Kennedy J J, Rayner N A, Jones P D. 2012. Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: The HadCRUT4 data set. *J Geophys Res*, 117: D08101
- Oliveira E C, Aguiar P F. 2013. Least squares regression with errors in both variables: Case studies. *Quím Nova*, 36: 885–889

- Qin D, Ding Y, Xiao C, Kang S, Ren J, Yang J, Zhang S. 2018. Cryospheric Science: Research framework and disciplinary system. *Natl Sci Rev*, 5: 255–268
- Radić V, Hock R. 2014. Glaciers in the earth's hydrological cycle: Assessments of glacier mass and runoff changes on global and regional scales. *Surv Geophys*, 35: 813–837
- RGI Consortium, 2017. Randolph Glacier Inventory, A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0. Technical Report
- Rignot E, Velicogna I, van den Broeke M R, Monaghan A, Lenaerts J T M. 2011. Acceleration of the contribution of the Greenland and Antarctic ice sheets to sea level rise. *Geophys Res Lett*, 38: L05503
- Shangguan D, Ding Y, Liu S, Xie Z, Pieczonka T, Xu J, Moldobekov B. 2017. Quick release of internal water storage in a glacier leads to underestimation of the hazard potential of Glacial lake outburst floods from lake merzbacher in central Tian Shan Mountains. *Geophys Res Lett*, 44: 9786–9795
- Imbie Team, 2018. Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017. *Nature*, 558: 219–222
- Imbie Team, 2020. Mass balance of the Greenland Ice Sheet from 1992 to 2018. *Nature*, 579: 233–239
- Vargo L J, Anderson B M, Dadić R, Horgan H J, Mackintosh A N, King A D, Lorrey A M. 2020. Anthropogenic warming forces extreme annual glacier mass loss. *Nat Clim Chang*, 10: 856–861
- Vaughan D G, Comiso J, Allison I, Carrasco J, Kaser G, Kwok R, David H. 2013. Observations: Cryosphere. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press. 317–382
- Velicogna I, Sutterley T C, van den Broeke M R. 2014. Regional acceleration in ice mass loss from Greenland and Antarctica using GRACE time-variable gravity data. *Geophys Res Lett*, 41: 8130–8137
- Vincent C, Fischer A, Mayer C, Bauder A, Galos S P, Funk M, Thibert E, Six D, Braun L, Huss M. 2017. Common climatic signal from glaciers in the European Alps over the last 50 years. *Geophys Res Lett*, 44: 1376–1383
- Wouters B, Bamber J L, van den Broeke M R, Lenaerts J T M, Sasgen I. 2013. Limits in detecting acceleration of ice sheet mass loss due to climate variability. *Nat Geosci*, 6: 613–616
- Wouters B, Gardner A S, Moholdt G. 2019. Global Glacier mass loss during the GRACE Satellite Mission (2002–2016). *Front Earth Sci*, 7: 1
- Ye B, Ding Y, Liu F, Liu C. 2003. Responses of various-sized alpine glaciers and runoff to climatic change. *J Glaciol*, 49: 1–7
- Zemp M, Frey H, Gärtner-Roer I, Nussbaumer S U, Hoelzle M, Paul F, Haeberli W, Denzinger F, Ahlström A P, Anderson B, Bajracharya S, Baroni C, Braun L N, Cáceres B E, Casassa G, Cobos G, Dávila L R, Delgado Granados H, Demuth M N, Espizua L, Fischer A, Fujita K, Gadek B, Ghazanfar A, Ove Hagen J, Holmlund P, Karimi N, Li Z, Pelto M, Pitte P, Popovnin V V, Portocarrero C A, Prinz R, Sangewar C V, Severskiy I, Sigurdsson O, Soruco A, Usabaliev R, Vincent C. 2015. Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century. *J Glaciol*, 61: 745–762
- Zemp M, Huss M, Thibert E, Eckert N, McNabb R, Huber J, Barandun M, Machguth H, Nussbaumer S U, Gärtner-Roer I, Thomson L, Paul F, Maussion F, Kutuzov S, Cogley J G. 2019. Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016. *Nature*, 568: 382–386
- Zemp M, Nussbaumer S U, Gärtner-Roer I, Huber J, Machguth H, Paul F, Hoelzle A M. 2017. Global Glacier Change Bulletin No. 2 (2014–2015)
- Zheng W, Pritchard M E, Willis M J, Tepes P, Gourmelen N, Benham T J, Dowdeswell J A. 2018. Accelerating glacier mass loss on Franz Josef Land, Russian Arctic. *Remote Sens Environ*, 211: 357–375

(责任编辑: 施建成)