

中国冰冻圈变化对海平面上升潜在贡献的初步估计

任贾文, 叶柏生, 丁永建, 刘时银

中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000

E-mail: jwren@lzb.ac.cn

2010-11-03 收稿, 2011-03-14 接受

国家重点基础研究发展计划资助项目(2007CB411501)

摘要 最新研究表明, 2003 年以来冰冻圈已成为海平面上升最主要的影响因素, 其中山地冰川和冰帽的贡献量最大. 分析中国冰冻圈融水总量的估算结果, 并粗略估计中国冰川区降水, 大致推断中国冰冻圈对海平面上升的潜在总贡献量为 $0.14\sim 0.16 \text{ mm a}^{-1}$, 其中主要为冰川贡献量, 约为 0.12 mm a^{-1} . 在冰川贡献中, 外流河流域冰川融水补给对海平面的贡献则仅为 0.07 mm a^{-1} , 占全球山地冰川和冰帽贡献量的 6.4%.

关键词

冰冻圈
海平面上升
冰川
多年冻土
积雪

冰冻圈是影响全球海平面变化的主要因素之一. 中国是中低纬度冰冻圈最发育的国家, 但关于中国冰冻圈变化对海平面变化的贡献尚未有研究报道. 其主要原因在于: (1) 从全球尺度考虑, 中国冰冻圈的冰储量不大; (2) 对中国冰冻圈冰储量的估算有很大不确定性, 而且缺乏关于全部冰川的物质平衡、冻土融化量的估算.

在最近几十年全球气候变暖、冰冻圈普遍退缩、海平面持续上升的背景下, 对冰冻圈融化水量的估算吸引着各方面的目光. 最新的研究表明, 2003 年以来, 冰冻圈融化的水量可能超过海水热膨胀而成为海平面上升的最主要贡献者, 而其中山地冰川和冰帽的贡献又排在第一位^[1-3]. 另外, 最近对于我国冰川物质平衡总量和冻土融化量的估计也有一些尝试, 因此, 本文试图根据有关这方面的研究结果, 就我国冰冻圈对海平面的潜在贡献给予初步讨论.

中国冰冻圈主要成分量为冰川、冻土和积雪, 河冰、湖冰和海冰相对较少. 据 21 世纪初完成的中国冰川目

录^[4], 中国境内共有冰川 46377 条、总面积 59425 km^2 , 冰储量 5600 km^3 . 但是, 该冰川目录的编纂自 20 世纪 70 年代末开始, 历经 23 年, 数据主要来源于航空照片、地形图及个别冰川的实地考察, 反映的是我国第一次航测成图时期(1950~1980s)的冰川状态. 据目前正在进行的第二次冰川编目结果显示, 由于航测成图误差及积雪误判等, 第一次编目得到的冰川面积比实际面积略小一些; 已经完成的部分流域新的冰川面积比以前的大 1.2%. 按此比例并假设厚度不变, 目前中国的冰川总面积约为 $60.138 \times 10^3 \text{ km}^2$, 冰储量为 $5.667 \times 10^3 \text{ km}^3$, 以密度为 917 kg m^{-3} 计算, 折合水量约 $5.2 \times 10^3 \text{ km}^3$.

中国国土面积约一半为季节冻土区, 主要分布在我国北方地区, 多年冻土则主要分布在青藏高原及其周围的高山和东北地区, 总面积约为 $1489 \times 10^3 \text{ km}^2$. 其中, 青藏高原多年冻土面积约为 $1299 \times 10^3 \text{ km}^2$, 东北地区多年冻土面积约为 $116 \times 10^3 \text{ km}^2$, 天山和阿尔泰山等高山地区多年冻土面积约为 $74 \times 10^3 \text{ km}^2$ ^[5]. 多年冻土厚度资

料仅限于沿青藏公路和铁路的某些钻孔测量结果, 因此过去一直缺乏中国冻土冰储量的估算. 最近, 赵林等人^[6]根据现有资料对青藏高原多年冻土冰储量得出的估计值为 $9.5 \times 10^3 \text{ km}^3$. 高山和东北地区多年冻土厚度小于青藏高原的多年冻土厚度, 而且多为不连续岛状冻土, 估计平均厚度可能不到青藏高原的一半. 但高山区和东北地区降水较青藏高原丰沛, 特别是东北地区土壤湿度更大, 似应冻土层含冰量较高. 如果假设其单位面积含冰量约为青藏高原的一半, 则高山和东北多年冻土含冰量折合水量约 $0.65 \times 10^3 \text{ km}^3$. 这样, 总计中国多年冻土含冰量约为 $10.15 \times 10^3 \text{ km}^3$ (折合水当量约 $9.3 \times 10^3 \text{ km}^3$). 与北半球冻土含冰量为 $11 \times 10^3 \sim 37 \times 10^3 \text{ km}^3$ ^[7] 的较早估计值相比, 这一数值显得非常大. 不过, 国外冻土含冰量的研究报道极少, 目前对北半球这个唯一的估算可能偏小.

中国积雪的地理分布相当广泛, 且极不均匀. 如果将年积雪日数大于 60 天称作稳定积雪, 则稳定积雪区主要分布在东北-内蒙古地区、新疆北部

和西部地区以及青藏高原地区,较早的研究结果得出总面积约为 $420 \times 10^6 \text{ km}^2$ ^[8],但最近的结果为 $3.4 \times 10^6 \text{ km}^2$ ^[9]。如果按照我国积雪年平均深度 0.041 m ^[8]和平均密度 160 kg m^{-3} ^[10]计算,中国稳定积雪年平均水当量约 22.3 km^3 。

综合上述结果,中国冰川、冻土和稳定积雪储存的水量总计约 $14.5223 \times 10^3 \text{ km}^3$,其中,冰川储水量占 35.8%,冻土地下冰占 64.0%,而积雪水当量约 0.2%。冰川的储量估算误差相对较小,尽管仅有少量的冰川有厚度测量资料,大多数冰川的厚度由经验公式计算获得。多年冻土的厚度和含冰比例直接观测资料要稀缺得多,所得的储水量估计值其不确定性很大。积雪面积和深度的年际变化很大,而且积雪深度和密度观测资料又比较少,积雪水量估算值也具有很大不确定性。

大量研究结果表明,过去几十年中国冰冻圈具有普遍萎缩的趋势,而且近十多年来加速萎缩的迹象也愈加明显^[4,11-13]。依据近年卫星遥感影像和 20 世纪 60 年代航空照片对全国范围内 1700 多条冰川的分析对比以及对数十条冰川实地考察验证结果表明,约 82% 的冰川处于退缩状态。所调查的总面积近 20000 km^2 的冰川中,过去 40 多年间总体处于面积缩小状态,缩小比例为 7%,最大超过 20%。关于中国冰川融水总量的估算研究结果不是很多。20 世纪 90 年代初杨针娘^[14]应用冰川融水径流模数法并对比几个站点的实验观测,估算出中国冰川融水年总量为 56.4 km^3 。后来,康尔泗等人^[15]对此进行修正后得出的估算值增大到 60.5 km^3 。谢自楚等人^[16]则应用冰川系统模型估算冰川径流,得出的中国冰川融水年总量为 61.6 km^3 。由于这些估算中所用的冰川融化观测值主要来自 20 世纪 80~90 年代,而 20 世纪 90 年代后期以来是冰川退缩最为强烈的时期,因而得出的估算值很可能偏小。最近,高鑫等人^[17,18]以冰川数字高程模型为基础,应用气象台站降水和温度资料,构建流域尺度度日模型

估算冰川物质平衡和融水径流序列,估算了塔里木河和叶尔羌河等流域的冰川融水。高鑫^[19]还对全中国冰川融水年总量进行了尝试性估算,得出 1961~2006 年的平均值为 62.3 km^3 ,2001~2006 年为 79.4 km^3 ,其中外流河水系为 46.7 km^3 ,占 59%。由 2000 年以前冰川融水年总量比较一致的估算值为 60 km^3 略多一点来看,近几年随着气候变暖,消融进一步加剧,融水总量增加到 80 km^3 以上是可能的。

当估算冰川融水对海平面贡献时,还有一个关键问题需要解决。那就是冰川融水总量是每年冰川物质损失总量,而冰川上每年还有降水补给,即存在冰川的物质收入部分(有降低海平面的效应)。因此对海平面的贡献应当是积累和消融的差额,即净物质平衡量。由于仅十多条冰川有冰川物质平衡观测研究结果,要将其推广到整个中国冰川不现实。但根据不同区域冰川区降水量的分布,可以大致估计中国冰川上每年的降水总量。根据区域冰川考察和典型冰川监测研究结果,天山、喜马拉雅北坡等区域冰川区年降水量大致为 600 mm 左右,祁连山、唐古拉山等山区为 $400 \sim 500 \text{ mm}$,藏北高原和西昆仑山区在 300 mm 以下,帕米尔高原和喀喇昆仑山区在 1000 mm 左右,横断山为 $700 \sim 1400 \text{ mm}$,藏东南念青唐古拉山东段在 1000 mm 以上。中国冰川主要分布区为昆仑山、念青唐古拉山、天山、喜马拉雅山和喀喇昆仑山,粗略平均年降水量约为 600 mm ,由此估计中国冰川上年物质收入约为 36 km^3 。由冰川融水总量减去降水收入总量,中国冰川目前每年的净物质损失约为 44 km^3 。另一方面,根据流域水量平衡模型也可以大致估计每个流域的冰川物质。最近,高鑫^[19]用水文模型对中国西部冰川过去几十年的物质平衡分流域进行了估算尝试,结果为 1991~2006 年单位面积冰川上每年净物质损失量为 327 mm ,而 2001~2006 年则超过 600 mm 。如果按目前冰川净物质平衡为每年 -700 mm

计算,中国冰川年物质损失总量约为 42 km^3 水当量,与根据降水分布粗略估计相差不大。

多年冻土融化产生的水量直接观测极为困难,因而对中国冻土融水的估计也很少,唯一的估计是根据青藏高原公路沿线某些站点多年冻土活动层底部至 10 m 深度内的含冰量观测和预估 21 世纪初至 2050 年活动层增厚 $0.2 \sim 0.4 \text{ m}$,得出青藏高原多年冻土每年融化释放的水量为 $5 \sim 11 \text{ km}^3$ ^[20]。天山和东北地区多年冻土退化比青藏高原更为迅速,如乌鲁木齐河源多年冻土层厚度 1992~2008 年间减小了 7.7 m ^[21];过去 50 年间,东北多年冻土南界北移 $40 \sim 120 \text{ km}$ ^[22],小兴安岭地区黑河-北安公路沿线岛状多年冻土面积比例由 20 世纪 70 年代的 20% 已减少到 2%^[23,24]。青藏高原公路沿线 1996~2006 年多年冻土 6 m 深度温度升高 $0.43 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[25],天山乌鲁木齐河源多年冻土 5 m 深度处的温度 1993~2008 年升高了 $1 \text{ }^\circ\text{C}$, 10 m 温度升高 $0.6 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[26]。也就是说,天山多年冻土升温幅度超过青藏高原 1 倍以上。东北地区多年冻土温度资料比较缺乏,但估计比青藏高原升温幅度大。如果按单位面积融化水量是青藏高原的 2 倍计算,东北和天山等高山多年冻土融化每年释放的水量约为 $1.3 \sim 2.8 \text{ km}^3$ 。这样,中国多年冻土融水年总量大约为 $6 \sim 14 \text{ km}^3$ 。

在前述中国冰冻圈主要分量冰川、冻土和积雪融水中,冰川融水以径流形式注入河流,对海平面变化有相对较为直接的影响。按全球海洋面积 $3.62 \times 10^8 \text{ km}^2$ 、海水密度 1028 kg m^{-3} 计算^[27],中国冰川融水对海平面上升的潜在贡献量目前约为 0.12 mm a^{-1} 。需要指出的是,中国冰川发育在内陆高山区,虽然直接补给河流,但其中约 41% 为内流河补给,这部分水量通过流域内的水循环过程加入到全球水循环,从而对海平面升高具有潜在的贡献,在直接补给海洋的外流河中,中国冰川净损失冰量对海平面上升的贡献为 0.07 mm a^{-1} 。

在全球尺度上, 山地冰川和高纬度冰帽对海平面上升的贡献很大. 例如, IPCC 报告^[27]的结果为 1961~2003 年冰川和冰帽对海平面上升的贡献约为 0.5 mm a^{-1} , 1993~2003 年上升到约 0.8 mm a^{-1} , 而最新的估算结果则更增大到 1.1 mm a^{-1} ^[1,2], 为所有贡献量中最大的, 占 2003~2008 年观测到的海平面上升速率的 44%(表 1). 中国冰川面积约占全球冰川和冰帽面积的 12%, 体积占 4%~11% (全球冰川体积估算存在很大不确定性), 目前对海平面潜在贡献则占全球冰川和冰帽贡献量的 6%~11%, 占全球海平面上升速率的 2.8%~4.8% (表 1).

冻土融水基本上并不能全部形成地表径流, 目前对其水量平衡仍缺乏认识. 即使将多年冻土融水年总量也全部看作对海平面有潜在影响, 其量大约只有 $0.016\sim 0.038 \text{ mm a}^{-1}$. 积雪只是降水在地表的季节性聚集, 一般不将其看作是影响海平面变化的一个重要因素^[27].

总体来看, 如果将冰川对内流河的补给和冻土融化也计算在内, 中国

冰冻圈目前对海平面上升的潜在最大贡献约为 $0.14\sim 0.16 \text{ mm a}^{-1}$.

国际上关于海平面变化及其影响因素的最新研究结果认为, 自 2003 年以来, 全球海平面上升量多半来自冰冻圈融化, 而山地冰川和冰帽又是冰冻圈中最大的贡献者, 尽管格陵兰和南极冰盖的贡献份额在快速上升.

如果将冰川融水对内河补给和多年冻土融水都看作对海平面上升的潜在贡献, 则中国冰冻圈的贡献总量约为 $0.14\sim 0.16 \text{ mm a}^{-1}$, 占海平面上升速率的 5.6%~6.4%, 占全球山地冰川和冰帽贡献量的 12.7%~14.5%, 占全球冰冻圈贡献量的 6.8%~7.8%. 外流河冰川融水补给对海平面上升的贡献为 0.07 mm a^{-1} , 占全球山地冰川和冰帽贡献量的 6.4%.

相对于全球冰冻圈而言, 中国冰冻圈的冰储量很小, 对海平面上升的贡献也很小. 但在冰冻圈普遍强烈退缩的情况下, 研究中国冰冻圈对海平面贡献仍有非常重要的意义. 本文只是很粗略地给予大致估计, 要进一步给出相对准确的估计, 需要对流域和

区域尺度的冰川物质平衡进行研究, 对冻土融化量以及融水的去向也要给予关注, 这就不仅需要大量系统地实地观测来支持, 还要发展各种模式, 如流域尺度冰川物质平衡和动力学模式, 各类冻土的水分循环模式, 等等.

尽管冰冻圈对全球海平面的影响受到格外重视, 但目前无论是全球尺度还是区域尺度, 关于冰冻圈融化量的估算仍然存在很大不确定性. 另外, 对海平面的观测和模拟结果也存在不确定性. 例如, 2007 年 IPCC 报告给出的 1993~2003 年海平面上升速率为 3.1 mm a^{-1} , 海水热膨胀是第一主因^[28], 但 2007 年以来的主要结果认为海平面上升速率, 海水热膨胀都有所减缓, 冰冻圈融化成为第一贡献者^[1,2], 2010 年 6 月由 IPCC 在马来西亚吉隆坡主办的冰盖稳定性与海平面上升研讨会交流了对海平面观测和预测、冰盖和冰川(及冰帽)变化监测和模拟的最新进展, 某些结果显示目前海平面上升速率超过 3 mm a^{-1} , 而冰川和冰盖的贡献与表 1 所列差异不大, 但这些结果只以摘要形式公布, 还没有全文发表^[3].

表 1 中国冰冻圈与全球冰冻圈对海平面的潜在贡献^{a)}

冰冻圈分量	冰储量(10^3 km^3)	完全融化对海平面的潜在贡献(m)	年净损失水当量(km^3)	目前对海平面潜在贡献(mm a^{-1})	占海平面上升的比例(%)
全球冰川和冰帽	50~130	0.15~0.37	410	1.1	44
南极和格陵兰冰盖	27600	63.9	354	0.95	38
北半球多年冻土	11~37	0.03~0.10	-	-	-
北半球积雪	0.5~5	0.0013~0.0134	-	-	-
中国冰川	5.667	0.014	44	0.12	4.8
中国多年冻土	10.15	0.025	6~14	0.016~0.038	0.7~1.5
中国稳定积雪	0.022	0.00006	-	-	-

a) 全球冰冻圈冰储量和完全融化对海平面上升的潜在贡献引自文献[27]; 全球冰川和冰帽、南极和格陵兰冰盖目前对海平面上升的潜在贡献引自文献[1], 年融化水量系由此反推得出;“-”表示无值

参考文献

- 1 Cazenave A, Dominh K, Guinehut S, et al. Sea level budget over 2003~2008: A reevaluation from GRACE space gravimetry, satellite altimetry and Argo. *Glob Planet Change*, 2009, 65: 83~88
- 2 Cazenave A, Lombard A, Llovel W. Present-day sea level rise: A synthesis. *C R Geosci*, 2008, 340: 761~770
- 3 IPCC. Workshop Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Workshop on Sea Level Rise and Ice Sheet Instabilities. Bern: University of Bern, 2010
- 4 施雅风. 简明中国冰川目录. 上海: 科学普及出版社, 2005
- 5 丁永建, 任贾文. 冰冻圈变化及其影响. 见: 秦大河, 编. 中国国家气候评估报告(第一卷). 北京: 科学出版社, 2010

- 6 赵林, 丁永建, 刘广岳, 等. 青藏高原多年冻土层中地下冰储量估算及评价. *冰川冻土*, 2010, 32: 1-9
- 7 Zhang T. Statistics and characteristics of permafrost and ground-ice distribution in the Northern Hemisphere. *Polar Geogr*, 1999, 23: 132-154
- 8 李培基. 中国西部积雪变化特征. *地理学报*, 1993, 48: 505-515
- 9 Li X, Cheng G D, Jin H J, et al. Cryospheric change in China. *Glob Planet Change*, 2008, 62: 210-218
- 10 Che T, Li X, Jin R, et al. Snow depth derived from passive microwave remote sensing data in China. *Ann Glaciol*, 2008, 49: 145-154
- 11 王苏民, 刘时银. 冰冻圈与陆地水环境的变化. 见: 秦大河, 编. *中国气候与环境演变(上卷): 气候与环境的演变及预测*. 北京: 科学出版社, 2005. 104-186
- 12 Ding Y J, Liu S Y, Li J, et al. The retreat of glaciers in response to recent climate warming in western China. *Ann Glaciol*, 2006, 43: 97-105
- 13 Xiao C D, Liu S Y, Zhao L, et al. Observed changes of cryosphere in China over the second half of the 20th century: An overview. *Ann Glaciol*, 2007, 46: 382-390
- 14 杨针娘. *中国冰川水资源*. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1991. 137-148
- 15 康尔泗, 杨针娘, 赖祖铭, 等. 冰雪融水径流和山区河川径流. 见: 施雅风, 编. *中国冰川与环境*. 北京: 科学出版社, 2000. 190-233
- 16 谢自楚, 王欣, 康尔泗, 等. 中国冰川径流的评估及其未来 50 年变化趋势预测. *冰川冻土*, 2006, 28: 457-466
- 17 高鑫, 张世强, 叶柏生, 等. 1961~2006 年塔里木河流域冰川融水变化及其对径流的影响. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40: 654-665
- 18 高鑫, 张世强, 叶柏生, 等. 1961~2006 年叶尔羌河上游流域冰川融水变化及其对径流的影响. *冰川冻土*, 2010, 32: 445-453
- 19 高鑫. 西部冰川融水变化及其对径流的影响. 硕士学位论文. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2010
- 20 丁永建, 潘家华. 气候与环境变化对生态和社会经济影响的利弊分析. 见: 秦大河, 编. *中国气候与环境演变(下卷): 气候与环境变化的影响与适应、减缓对策*. 北京: 科学出版社, 2005. 114-194
- 21 赵林, 刘广岳, 焦克勤, 等. 1991~2008 年天山乌鲁木齐河源区多年冻土的变化. *冰川冻土*, 2010, 32: 223-230
- 22 常晓丽, 金会军, 何瑞霞, 等. 中国东北大兴安岭多年冻土与寒区环境考察和研究进展. *冰川冻土*, 2008, 30: 176-182
- 23 俞祁浩, 白旻, 金会军, 等. 应用探地雷达研究中国小兴安岭地区黑河-北安公路沿线岛状多年冻土的分布及其变化. *冰川冻土*, 2008, 30: 461-468
- 24 金会军, 于少鹏, 吕兰芝, 等. 大小兴安岭多年冻土退化及其趋势初步评估. *冰川冻土*, 2006, 28: 467-476
- 25 Wu Q B, Zhang T J. Recent permafrost warming on the Qinghai-Tibetan Plateau. *J Geophys Res*, 2008, 113: D13108, doi: 10.1029/2007JD009539
- 26 刘广岳. 天山乌鲁木齐河源区多年冻土变化研究. 硕士学位论文. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2008
- 27 Lemke P, Ren J. Observations: Changes in snow, ice and frozen ground. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 337-383
- 28 IPCC. Summary for policymakers. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 5-7