

研究进展

南极冰盖物质平衡与海平面变化研究新进展

张栋^{1,2} 孙波² 柯长青¹ 唐学远² 崔祥斌² 张向培² 郭井学²

(¹ 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210093; ² 中国极地研究中心, 上海 200136)

提要 简要介绍冰盖物质平衡及其对海平面影响, 从整体法和分量法两个方面总结南极冰盖物质平衡研究的最新进展, 并分析了影响其物质平衡的不确定因素。研究表明, 整个南极冰盖物质平衡呈现负增长的趋势, 其中西南极 Amundsen 海湾附近的冰盖物质流失最为明显。另外, 南极冰盖边缘的大部分地区还呈现变薄的趋势。南极冰盖物质流失是引起海平面上升的最大潜在因素之一, 其冰架的缓冲作用、冰盖的不稳定性和冰盖底部融水的作用等不确定因素对南极冰盖物质平衡具有重要的影响。未来随着观测技术和数据处理技术的不断提高, 南极冰盖物质平衡的估算及其不确定因素有望得到进一步的认识, 从而为预测海平面的上升范围提供更多的理论和技术支撑。

关键词 南极冰盖 物质平衡 海平面变化

doi:10.3724/SP.J.1084.2010.00296

0 引言

受全球变暖的影响, 海平面在过去一个世纪的上升速率达到了 $1.7 \text{ mm/a}^{[1]}$ 。海平面的上升使海岸侵蚀、风暴潮等自然灾害加剧, 对沿海地区社会和经济的发展有着巨大的影响。如今, 海平面上升已成为人类面临的突出环境问题之一, 越来越受到国际社会的关注。

引起海平面上升的因素主要包括海水热膨胀、冰川和冰帽融化以及极地冰盖的消融。在 1993—2003 年间, 海平面平均每年上升 2.4 mm , 其中热膨胀的贡献量约为 50% , 其他贡献主要来自地球上冰川、冰帽和冰盖的消融^[2]。尽管南极冰盖在此期间对海平面的贡献量仅为 8.7% , 但其所含冰量约占地球总冰量的 88% , 如果其全部融化将会使海平面上升 $56.6 \text{ m}^{[3]}$ 。同时, 南极冰盖的动力过程和底部环境仍存在很多不确定性, 因此为了更

[收稿日期] 2010 年 3 月收到来稿, 2010 年 5 月收到修改稿。

[基金项目] 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2010CB950301)、国家 863 计划(2008AA121705)、国家科技支撑重点项目(2006BAB18B01)、国家自然科学基金(40476005、40906101)资助。

[作者简介] 张栋, 男, 1984 年生。硕士研究生, 主要从事遥感技术在极地环境变化中的应用研究, E-mail: zhangdong@pric.gov.cn。

准确地理解南极冰盖变化对海平面升降的影响,对南极冰盖物质平衡的状态进行监测并预测就显得尤为重要。本文将针对这一研究领域,总结南极冰盖物质平衡估算和海平面变化研究的最新进展,并对影响南极冰盖物质平衡不确定性的因素进行分析。

1 冰盖物质平衡

冰盖物质输入的主要方式是通过降雪^[4]。当积雪长期处于其融化点以下温度时,经过多年到几个世纪的演化将转化为冰,成为冰盖的一部分。由于受到冰盖表面地形、大气以及与海岸之间距离等因素的影响,物质输入量在南极冰盖不同区域的分布有着显著的差异。图 1 显示的是南极冰盖的物质积累速率分布图。可以看到,南极洲沿海地区降雪的积累要大于内陆地区,并且西南极的降雪显著大于东南极,尤其在南极半岛部分地区,其降雪积累率甚至每年达到 500 kg/m^2 。

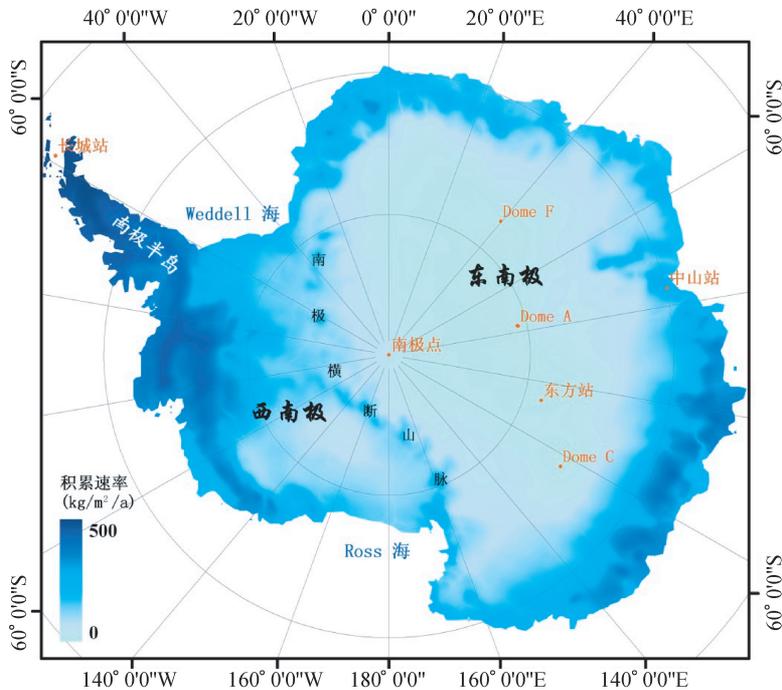


图 1 南极冰盖的物质积累图^[9]

Fig. 1. The accumulation map of the Antarctic ice sheet^[9]

冰盖的物质输出包括表面与冰下消融、快速冰流及外流冰川、冰架消融及崩解等^[5]。受其自身重力的作用,冰盖从海拔较高的内陆地区向海拔较低的沿海滑动。在内陆地区,冰流速每年仅有几米。越接近沿岸冰的流速越快,进而形成冰流或者外流冰川。快速冰流和外流冰川汇入冰架后,通过冰架融化和崩解等方式从冰盖分离。整个冰架约 80% 的融化发生在距冰架边缘 100 km 以上的位置^[6],海水温度每升高 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 将使冰架底部每年融化 1 m ^[7]。一些大的冰架(如 Ross 和 Amery 冰架)在厚度小于 300 m 时,大块的冰

山将从其前端分离^[8]。因此,冰架边缘是冰盖物质支出的一个主要场所。

冰盖物质的输入和输出被称为冰盖物质平衡。如果每年输出的物质与输入相同,那么就认为冰盖是平衡的;如果输出大于输入,则称冰盖物质平衡为负,反之为正。冰盖物质平衡的任何变化,将会引起海平面发生变化。以目前南极冰盖的物质平衡状态为基准,如果冰盖物质质量偏离平衡状态的 5%,将会使海平面变化 0.3 mm。南极冰盖物质的输入即降雪量对天气和气候的变化反应迅速,而以冰流为主要形式的物质输出则主要受到冰盖底部融水的流动^[10]以及冰架缓冲作用^[11]等因素的影响。

2 冰盖物质平衡对海平面的影响

众多研究通过对冰芯记录、深海地球化学记录的分析以及对过去海平面状态的模拟,反映出冰盖物质平衡在过去对海平面变化的作用极大。Raymo 等^[12]分析前人的研究指出,当西南极冰盖和格陵兰冰盖在上新世中期部分不存在或者全部不存在时,海平面比现在高出 5—40 m。进入第四纪后,气候一直处于冰期—间冰期旋回的过程中^[13]。其间影响海平面变化的主要因素是冰盖和海洋物质的交换^[14],其次是温度变化引起的海水膨胀和收缩,两者的综合作用导致海平面的变化范围在 120 m 以上。在这个阶段中的末次间冰期,海平面高出现在 4—6 m^[15, 16],甚至有研究表明要大于 6.6 m^[17]。尽管此时山地冰川和海水的膨胀对海平面上升起了一定的作用,但上升主要还是来自南极和格陵兰两个冰盖的贡献。另外,Rohling 等^[18]基于海底沉积物和珊瑚数据的研究显示,在末次间冰期部分阶段的海平面上升速率高达每世纪 1.6 m。进入末次冰盛期后,南极和格陵兰的冰盖不断扩张,并且在北美和北欧存在着两个大冰盖。这些大的冰盖储存了全球大量的水,导致全球海平面下降了 125 m^[19]。直到距今 7000 年左右,北美和北欧的这两大冰盖才完全崩解。研究表明 7000—3000 年前冰消融对海平面上升的贡献约为 3 m^[20],其中贡献最大的冰盖是南极冰盖^[21]。

进入 20 世纪后,随着观测手段和数据的丰富,人类对海平面的变化及其影响因素有了更深的认识。Holgate^[22]使用 9 个验潮站在 1904—2003 年间的观测数据对海平面的变化进行了分析,结果显示海平面在 1904—1954 年的上升速率比 1954 年之后的速率大,分别为 (2.03 ± 0.35) mm/a 和 (1.45 ± 0.34) mm/a,20 世纪的上升速率为 (1.74 ± 0.16) mm/a。这与 Church 等^[23]估算的每年上升 (1.7 ± 0.3) mm 的结果基本一致。与海平面在冰期—间冰期旋回变化的影响因素不同,海洋增温引起的热膨胀是其变化的主导因素。表 1 显示,海水热膨胀使海平面在 1961—2003 年每年上升 0.4 mm 左右,1993—2003 年每年约上升 1.6 mm。Willis 等^[24]对 Argo 数据的研究显示,2003—2007 年海洋热膨胀对海平面上升的贡献仅为 (-0.5 ± 0.5) mm/a,但海平面的上升速率在 2005—2008 年间约为 2.5 mm/a,最近的研究^[25]发现这期间海平面的上升主要是由陆地冰的消融引起的,并且两极冰盖物质流失对海平面的贡献量达到了 (1 ± 0.15) mm/a,大于 1993—2003 年间的贡献量。

表 1 海平面上升的物质来源^[25, 26]
Table 1. The source of the sea level rise^[25, 26]

海平面上升来源	海平面上升速率(mm/a)		
	1961—2003	1993—2003	2003—2008
海水热膨胀	0.42±0.12	1.60±0.50	0.37±0.10
冰川和冰帽	0.50±0.18	0.77±0.22	1.10±0.24
格陵兰冰盖	0.05±0.12	0.21±0.07	
南极冰盖	0.14±0.41	0.21±0.35	1.00±0.15
观测值	1.80±0.50	3.10±0.70	2.50±0.40

IPCC 第 4 次评估报告^[26]中预测到 21 世纪末海平面相对于 1980—1999 年最大将上升 0.59 m。但是报告也指出这些预测不包括气候—碳循环反馈的不确定性,也不包括冰流速率变化的整体效应,因此这是一个较低的估算值。2007 年后,许多关于 21 世纪末海平面上升预测的研究都引入了冰流快速变化响应的内容。Pfeffer 等^[27]通过对冰流快速变化的最可能范围进行估算,推测整个海平面在 2100 年上升 0.8—2.0 m,并且最可能的情况是接近 0.8 m。Grinsted 等^[28]在 A1B 假设条件下估计到 2090—2099 年海平面上升将达到 0.9—1.3m,与 Pfeffer 等的预测基本相符。2009 年 3 月,哥本哈根气候变化综合报告^[29]根据最近观察到的南极、格陵兰冰盖及冰川的物质流失量的增加,预测到 2100 年全球平均海平面上升(1±0.5)m。最近,Siddall 等^[30]的研究得出了在 A1F1 假设排放情况下,认为温度升高 6.4 °C 将使海平面上升 0.82 m。尽管上述研究改进了海平面上升的预测范围并且取得了相似的预测结果,但是冰盖物质平衡在未来的变化仍是海平面预测中最不确定的因素。

3 南极冰盖物质平衡估算新进展

冰盖物质平衡的估算方法主要有整体法和分量法两种^[31]。近年来随着遥感观测手段的改进和反演算法的提高,采用这两种方法对冰盖物质平衡和海平面变化进行观测和估算越来越广泛。

整体法是指直接观测整个冰盖在不同时间的高程或者质量变化。

对高程的测量主要使用机载的激光测距仪和星载激光或雷达测距仪测量传感器至冰盖表面的距离,然后结合传感器自身的位置信息得到高程。最后通过计算不同时间的高程差值得到高程的变化。近年采用高程测量估算南极冰盖物质平衡得到的结果均显示西南极冰盖物质消融比较明显。Li 等^[32]对 ERS-2 和 ENVISat 卫星获取的 1995—2006 年的南极冰盖高程数据进行分析,得知南极冰盖物质流失速率约为(26±12)Gt/a,并且东南极冰盖变厚而西南极冰盖在变薄。Pritchard 等^[33]使用高分辨率卫星对南极冰盖进行高程测量,结果显示在南极大陆沿海大部分地区变薄的情况比以前更加突出。Amundsen 海湾的冰盖变薄最为明显,其中 Smith 冰川变薄的速率甚至超过了 9 m/a。

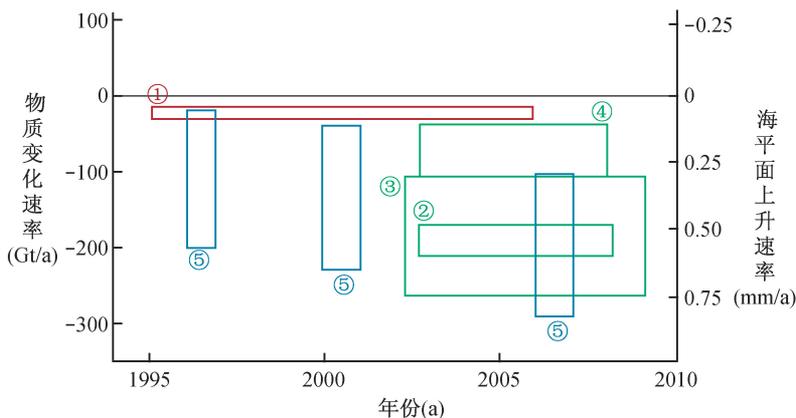
目前主要使用重力反演与气候实验(Gravity Recovery and Climate Experiment, GRACE)卫星精确测量冰盖重力场的变化,从而获得冰盖质量的变化。该卫星的基本原理是通过两颗卫星之间的距离变化反演出地球重力场变化的微妙特征^[34]。Cazenave 等^[25]估计南极冰盖在 2003—2008 年期间平均每年物质流失(198±22)Gt。Chen 等^[35]使

用 2002 年 4 月至 2009 年 1 月的 GRACE 数据估算得到南极物质流失速率为 (190 ± 77) Gt/a 的结果,其中西南极每年流失 (132 ± 26) Gt,而东南极流失为 (57 ± 52) Gt/a,并指出之所以与过去估算结果不同是因为自 2006 年起东南极物质流失明显增加。鄂栋臣等^[36]利用 GRACE 数据研究显示在 2002 年 7 月到 2007 年 9 月间南极冰盖物质变化为 $-(78 \pm 37)$ km³/a,相当于海平面每年上升 (0.21 ± 0.1) mm,并且西南极 Amundsen 区域物质明显地呈现负增长,南极半岛也存在着负增长。

分量法指估算冰盖输入的全部物质与输出物质的差值。与整体法相比,分量法可以提供冰盖物质积累、传输、消融和流失等信息,这些信息是冰盖预测模式的基础。

分量法主要通过现场观测、冰雷达及微波数据获取冰盖在时空上的物质输入和输出。相对于现场观测,遥感技术观测能够获得更大范围和更高精度的数据,是近年分量法研究南极冰盖物质平衡所使用的主要手段。Pritchard 等^[37]对南极半岛 300 多条冰川的流速进行监测发现,1992—2005 年间冰川的流速平均提高了 12%。他们认为造成此现象的主要因素是冰川下游变薄,并且估算 2005 年左右南极半岛物质输出为 (52 ± 20) Gt。Rignot 等^[38]使用卫星观测数据研究了南极 85% 的海岸线上的冰流失情况。其研究表明西南极注入 Bellingshausen 和 Amundsen 海的冰川流速在加速。到 2006 年,这些区域物质流失速率达到 (132 ± 60) Gt/a,此时南极半岛的物质流失速率也达到了 (60 ± 46) Gt/a。温家洪等^[39]对 Lambert, Mellor 和 Fisher 冰川物质平衡的研究发现,三条冰川的总净平衡为 (-2.6 ± 6.5) Gt/a。靠近 Amery 冰架南端的着地线处,冰架底部的平均融化速率为 (23.0 ± 3.5) m。这表明东南极 Lambert 冰川流域也存在物质流失现象。

图 2 显示的是上述研究所获得的结果。每个方框的垂线是其对应研究的起止时间,上下两条水平线是该研究估算物质平衡的最大最小值。图中红色方框表示采用的是高程测量方法,绿色是质量测量方法,蓝色是分量法。从图中可以看到,最近两年对南极冰盖物质平衡估算的研究结果都显示了冰盖物质流失的趋势,这对海平面的上升起到了促进作用。



①Li, 2008; ②Cazenave, 2009; ③Chen, 2009; ④鄂栋臣, 2009; ⑤Rignot, 2008

图 2 近年南极冰盖的物质平衡估算

Fig. 2. Recent estimates of the net mass budget of the Antarctic Ice Sheet

由于上述研究使用的数据在时空范围及处理方法等方面不同,所以结果上存在一定的差异。但是可以看到,南极冰盖物质整体上趋于负平衡。其中西南极冰盖的物质流失最快,尤其是靠近 Amundsen 海湾的冰盖,而且其表面外流冰川的流速也在加快。另外,南极冰盖边缘的大部分地区还呈现出动态变薄的趋势。

4 南极冰盖物质平衡变化的不确定性

南极冰盖物质平衡的变化具有很多不确定性,主要表现在冰架的缓冲作用、冰盖的不稳定性和冰盖底部融水的作用等方面。随着近几年观测手段的提高,人类对南极冰盖动力过程的认识得到了进一步加深,这为更好地理解这些方面提供了有力的支撑。

在南极冰盖边缘漂浮的冰架,不但是冰盖物质流失输出的主要场所,同时还对外流冰川的流速起到缓冲作用。尽管漂浮的冰架崩解后本身不会对海平面产生重要影响,但研究证明冰架与冰盖的交界处极不稳定^[40],崩解的冰架会加速冰盖物质的流失以及着地线的后撤。Larsen B 冰架发生大面积崩解后,到 2006 年,注入 Hektorica 冰川和 Green 冰川的流速比 2004 年分别增加了 20% 和 30%,冰川的着地线也向内陆后撤了 7 km^[41]。近年的观测发现,南极部分区域冰架崩解经历的时间极短。2002 年 1 月 31 日开始,南极半岛东部 Larsen B 冰架在一个月的时间里崩解了 3250 km²^[42],而西南极的 Wilkins 冰架也在 2008 年 3 月发生了大面积的崩解,造成约 431 km² 冰架的丢失^[43]。2010 年 2 月中旬东南极 Mertz 冰川下游的冰舌受到一个长度为 97 km 冰山的撞击,导致面积达 2500 km² 的冰舌从南极大陆分离,造成此处着地线距冰舌边缘缩短了近 80 km^[44],这个事件对 Mertz 冰川未来流速产生的影响值得关注。

西南极的海洋型冰盖着地线在海平面的几百米以下,其沿海区域底部的基岩高于内陆地区,这种特殊的环境可能造成冰盖极不稳定^[45-47]。因为海洋型冰盖必须足够厚才能保证其完全着地,当冰盖与基岩分离时,其边缘对冰流速的抑制作用会减弱,而冰流速的增快会使得冰盖物质流失增强,造成冰盖变薄及着地线后撤,从而形成恶性循环^[48]。最近研究发现西南极 Amundsen 海区附近冰盖迅速退却,Pine Island 冰川流速在增加而且 Thwaites 冰川也在加宽^[49],这些现象可能意味着今后西南极冰盖会迅速地崩解。Bamber 等^[50]对西南极海洋型冰盖进行重新研究后发现,如果西南极不稳定的海洋型冰盖全部崩解,将引起海平面上升 3.3 m,尽管这个结果比过去预测的 5—6 m 要小,但对人类来说仍是一个潜在的威胁。

冰盖底部融水在冰盖动力学过程中的作用至今也不十分清楚。最近几年探测到南极冰盖底部的冰下湖大约有 280 个^[51]。很多研究表明并不是所有的湖都是静态的^[52, 53],Smith 等^[51]通过 ICESat 探测的数据发现在 2003—2008 年间 60°S 以北的南极冰盖下有 124 个活跃的冰下湖,它们周期性地排水并且通过冰下洪水得到补给。冰下湖的排水降低了冰盖底部基岩的摩擦作用,从而加快冰川的流动^[54]。另外,有证据表明冰下湖的流动产生的热量将引起了冰盖底部的融化,使冰下湖成为新冰流的源头^[10]。总之,冰盖底部融水和冰下湖的作用在冰盖的动力学过程中十分重要,但要充分理解这些内容还依赖于进一步的观测和分析。

要准确判断南极冰盖物质平衡变化的后果或趋势,需要通过冰盖动力学研究充分认识冰盖上物质传输、转化的机理和过程^[55]。尽管现今对南极冰盖的动力过程及影响因素已经有了更深的理解,但是由于冰下环境很难把握,加之卫星及现场观测存在的误差,观测和模拟冰盖复杂的动力学过程仍是一个亟待解决的问题。

5 讨论

南极冰盖对海平面上升的潜在贡献巨大,加强对南极冰盖物质平衡的观测以及评估其对海平面的影响具有重要意义。本文总结了近年国内外对南极冰盖物质平衡和海平面变化进行研究所获得的一些成果。

遥感技术在极地领域的广泛使用,为冰盖物质平衡估算提供了多种实时的并且覆盖范围广的数据。使用这些数据得到的研究表明,近十年来南极冰盖物质平衡呈现出负增长的趋势,尤其是西南极靠近 Amundsen 海湾的冰盖物质流失最为明显,另外南极冰盖边缘的大部分地区还呈现动态变薄的趋势。

南极冰盖物质平衡估算的方法还存在不足之处。雷达对积雪的穿透性和冰盖表面地形粗糙度的变化使高程测量存在不确定性;有限的现场观测数据,对表面积雪的密度剖面认识不足,着地线位置及该处冰厚的不确定性是分量法估算时遇到的困难之一^[38, 56];另外遥感数据自身的精度和处理方法等方面也存在很多不足。这些问题造成了冰盖物质平衡估算结果存在一定的误差,因此需要继续加强观测和改进数据处理的方法。

由于南极冰盖冰架的缓冲作用、冰盖的不稳定性以及冰盖底部融水作用等方面的不确定性,预测未来海平面的上升仍比较困难。近年借助遥感技术和现场观测等多种手段,已经发现南极冰架快速崩解加快了注入其冰川的流速,西南极冰盖的不稳定性可能是造成 Amundsen 海区附近冰盖迅速退却的原因之一,而冰盖底部融水加速了冰川流动。这些观测结果,提高了人们对冰盖物质平衡变化的不确定性的认识。但是,由于遥感技术在极地领域的使用时间较短并且对冰盖底部环境进行监测仍存在困难,所以充分理解这些不确定性因素将极大地依赖于观测技术的发展。

总之,只有利用更多的手段加强对冰盖表面的物质平衡以及冰盖底部环境的监测,加深对南极冰盖动力学的理解,同时不断改进数据的处理方法,才能进一步改进海平面变化的预测模式,从而得到更加准确的预测结果。

参考文献

- 1 Cazenave A, Lombard A and Llovel W. Present-day sea level rise: A synthesis. *Comptes Rendus Geosci*, 2008, 340 (11): 761—770.
- 2 Domingues C M, Church J A, White N J, et al. Improved estimates of upper-ocean warming and multi-decadal sea-level rise. *Nature*, 2008, 453: 1090—1093.
- 3 Steffen K, Thomas R, Marshall S, et al. Rapid Changes in Glaciers and Ice Sheets and their Impacts on Sea Level. *Abrupt Climate Change SAP-3.4*, U. S. Climate Change Science Program, 2008.

- 4 Monaghan A J and Bromwich D H. Advances in describing recent Antarctic climate variability. *Bull Am Meteorol Soc*, 2008, 89: 1295—1306.
- 5 秦大河, 任贾文. 南极冰川学. 北京: 科学出版社, 2001.
- 6 Doake C S M. Ice-shelf stability. *Encyclopedia of Ocean Sciences*, 2001, doi: 10.1006/rwos.2001.0005.
- 7 Rignot E, Jacobs S. Rapid bottom melting widespread near Antarctic Ice Sheet grounding lines. *Science*, 2002, 296: 2020—2023.
- 8 Dowdeswell J A, Bamber J L. Keel depths of modern Antarctic icebergs and implications for sea-floor scouring in the geological record. *Mar Geol*, 2007, 243: 120—131.
- 9 Arthern R J, Winebrenner D P and Vaughan D G. Antarctic snow accumulation mapped using polarization of 4.3-cm wavelength microwave emission. *J Geophys Res*, 2006, 111, D06107, doi: 10.1029/2004JD005667.
- 10 Bell R E. The role of subglacial water in ice-sheet mass balance. *Nat Geosci*, 2008, 1: 297—304.
- 11 Rignot E, Casassa G, Gogineni P, et al. Accelerated ice discharge from the Antarctic Peninsula following the collapse of Larsen B ice shelf. *Geophys Res Lett*, 2004, 31, doi: 10.1029/2004GL020697.
- 12 Raymo M E, Hearty P, Conto R D, et al. PLIOMAX: Pliocene maximum sea level project, *Pages news*, 2009, 17(2): 58—59.
- 13 王绍武. 冰期-间冰期旋回. *气候变化研究进展*, 2008, 4(1): 61—62.
- 14 Lambeck K, Chappell J. Sea Level Change Through the Last Glacial Cycle. *Science*, 2001, 292: 679—685.
- 15 Otto-bliesner B L, Marsall S J, Overpeck J T, et al. Simulating Arctic climate warmth and icefield retreat in the last interglaciation. *Science*, 2006, 311: 1751—1753.
- 16 Overpeck J T, Otto-bliesner B L, Miller G H, et al. Paleoclimatic evidence for future ice-sheet instability and rapid sea level rise. *Science*, 2006, 311: 1747—1750.
- 17 Kopp R E, Simons F J, Mitrovica J X, et al. Probabilistic assessment of sea level during the last interglacial stage. *Nature*, 2009, 462: 863—867.
- 18 Rohling E J, Grant K, Hemleben C H, et al. High rates of sea level rise during the last interglacial period. *Nat Geosci*, 2008, 1: 38—42.
- 19 Fleming K, Johnston P, Zwartz D, et al. Refining the eustatic sea level curve since the Last Glacial Maximum using far-and intermediate-field sites. *Earth and Planet Sci Lett*, 1998, 163(1—4): 327—342.
- 20 Milne G A, Gehrels W R, Hughes C W, et al. Identifying the causes of sea-level change. *Nat Geosci*, 2009, 2: 471—478.
- 21 Nakada M, Lambeck K. The melting history of the late Pleistocene Antarctic ice sheet. *Nature*, 1988, 333: 36—40.
- 22 Holgate S J. On the decadal rates of sea level change during the twentieth century. *Geophys Res Lett*, 2007, 34, L01602, doi: 10.1029/2006GL028492.
- 23 Church J A, White N J. A 20th century acceleration in global sea level rise. *Geophys Res Lett*, 2006, 33, L01602, doi: 10.1029/2005GL024826.
- 24 Willis J K, Chambers D T and Nerem R S. Assessing the globally averaged sea level budget on seasonal to interannual time scales. *J Geophys Res-Oceans*, 2008: C06015, doi: 10.1029/2007JC004517.
- 25 Cazenave A, Dominh K, Guinehut S, et al. Sea level budget over 2003-2008: A reevaluation from GRACE space gravimetry, satellite altimetry and Argo. *Global and Planet Change*, 2009, 65(1—2): 83—88.
- 26 IPCC. *Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- 27 Pfeffer W T, Harper J T and O'neel S. Kinematic constraints on glacier contributions to 21st-century sea level rise. *Science*, 2008, 321: 1340—1343.
- 28 Grinsted A, Moore J and Jevrejeva S. Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100 AD. *Clim Dynam*, 2008, doi: 10.1007/s00382-008-0507-2.

- 29 Richardson K, Steffen W, Schellnhuber H J, et al. Synthesis Report from Climate Change: Global Risks, Challenges and Decisions. Copenhagen: University of Copenhagen, 2009: 10.
- 30 Siddall M, Stocker T F and Clark P U. Constraints on future sea-level rise from past sea-level change. *Nat Geosci*. 2009, 2: 571—575.
- 31 温家洪, 孙波, 李院生, 潘增弟. 南极冰盖的物质平衡研究: 进展与展望. *极地研究*, 2004, 16(2) 114—126.
- 32 Li Y H, Davis C H. Decadal Mass Balance of the Greenland and Antarctic Ice Sheets from High Resolution Elevation Change Analysis of ERS-2 and Envisat Radar Altimetry Measurements. *IEEE*, 2008, 4: 339—342.
- 33 Pritchard H D, Arthern R J, Vaughan D G, et al. Extensive dynamic thinning on the margins of the Greenland and Antarctic ice sheets. *Nature*, 2009, 461: 971—975.
- 34 张昌达. 三颗感受或(和)测量地球引力场的卫星——CHAMP, GRACE, GOCE. *物探与化探*, 2005, 29(5): 377—382.
- 35 Chen J L, Wilson C R, Blankenship D, et al. Accelerated Antarctic ice loss from satellite gravity measurements. *Nat Geosci*, 2009, 2: 859—862.
- 36 鄂栋臣, 杨元德, 晁定波. 基于 GRACE 资料研究南极冰盖消减对海平面的影响. *地球物理学报*, 2009, 9(52): 2222—2228.
- 37 Pritchard H D, Vaughan D G. Widespread acceleration of tidewater glaciers on the Antarctic Peninsula. *J Geophys Res*, 2007, 112, doi: 10.1029/2006JF000597.
- 38 Rignot E, Bamber J, Van M, et al. Recent Antarctic ice mass loss from radar interferometry and regional climate modelling. *Nat Geosci*, 2008, 1: 106—110.
- 39 温家洪, Jezek K C, Csathó B M, 等. 南极 Lambert, Mellor 和 Fisher 冰川的物质平衡及 Amery 冰架底部物质通量的估算. *中国科学 D 辑: 地球科学*. 2007, 37(9): 1192—1204.
- 40 Vaughan D G, Arthern R. Why Is It Hard to Predict the Future of Ice Sheets? *Science*, 2007, 315: 1503—1504.
- 41 Rott H, Rack W, Nagler T. Increased Export of Grounded Ice after the Collapse of Northern Larsen Ice Shelf, Antarctic Peninsula, Observed by Envisat ASAR. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2007: 3.
- 42 NSIDC. Larsen B ice shelf collapses in Antarctica. http://nsidc.org/news/press/larsen_B/2002.html, 2002-3-18/2010-2-11.
- 43 Scambos T, Fricker H A, Liu C C, et al. Ice shelf disintegration by plate bending and hydro-fracture: Satellite observations and model results of the 2008 Wilkins ice shelf break-ups. *Earth and Planet Sci Lett*, 2009, 280(1—4): 51—60.
- 44 ACE. Large iceberg breaks off the mertz glacier in the Australian Antarctic territory. <http://www.aad.gov.au/default.asp?casid=37551>, 2010-2-26/2010-2-26.
- 45 Hughes T. Is the West Antarctic ice sheet disintegrating? *J Geophys Res*, 1973, 78: 7884—7910.
- 46 Mercer J. West Antarctic ice sheet and CO₂ greenhouse effect: a threat of disaster. *Nature*, 1978, 271: 321—325.
- 47 Durand G, Gagliardini O, Fleurian B D, et al. Marine ice sheet dynamics: Hysteresis and neutral equilibrium. *J Geophys Res*, 2009, 114, F03009, doi: 10.1029/2008JF001170.
- 48 Vaughan D G. West Antarctic Ice Sheet collapse——the fall and rise of a paradigm. *Clim Change*, 2008, 91: 65—79.
- 49 Rignot E. Changes in ice dynamics and mass balance of the Antarctic ice sheet. *Philos Trans Roy Soc (London)*, 2006, 364: 1637—1655.
- 50 Bamber J L, Riva R E M, Vermeersen B L A, et al. Reassessment of the Potential Sea-Level Rise from a Collapse of the West Antarctic Ice Sheet. *Science*, 2009, 324: 901—903.
- 51 Smith B E, Fricker H A, Joughin I R, et al. An inventory of active subglacial lakes in Antarctica detected by ICESat (2003-2008). *J Glaciol*, 2009, 55(192): 573—595.

- 52 Wingham D J, Siegert M J, Shepherd A P, et al. Rapid discharge connects Antarctic subglacial lakes. *Nature*, 2006, 440: 1033—1036.
- 53 Fricker H A, Scambos T, Bindschadler R, et al. An active subglacial water system in West Antarctica mapped from space. *Science*, 2007, 315: 1544—1548.
- 54 Stearns L A, Smith B E, Hamilton G S. Increased flow speed on a large East Antarctic outlet glacier caused by subglacial floods. *Nat Geosci*, 2008, 1: 827—831.
- 55 任贾文, 秦大河. 南极冰盖表面积累速率与物质平衡. *冰川冻土*, 1996, 18: 83—89.
- 56 Rémy F, Frezzotti M. Antarctica ice sheet mass balance. *Comptes Rendus Geosci*. 2006, 338: 1084—1097.

THE LATEST RESEARCH PROGRESS ON ANTARCTIC ICE SHEET MASS BALANCE AND SEA LEVEL CHANGE

Zhang Dong^{1, 2}, Sun Bo², Ke Changqing¹, Tang Xueyuan²,
Cui Xiangbin², Zhang Xiangpei² and Guo Jingxue²

(¹ School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

² Polar Research Institute of China, Shanghai 200136, China)

Abstract

On the basis of a brief introduction to the mass balance of the ice sheet and its effect on sea level, recent studies on the mass balance of Antarctic ice sheet were reviewed from two aspects, including integrated method and flux component method, and then the uncertainties affecting the mass balance were analyzed. A pattern of mass loss from Antarctica was indicated in the studies, and the mass loss near the Amundsen Sea Embayment in West Antarctic ice sheet was the most obvious. In addition, there was extensive dynamic thinning on many margins of the ice sheet. The mass loss of Antarctic ice sheet is the largest potential contributor to sea level rise. The ice shelf buttressing, the instability of the ice sheet and the function of subglacial meltwater are important to Antarctic mass balance. As observation techniques and data processing technology constantly improve in future, the mass balance estimates and the uncertainties which affect Antarctic ice sheet are expected to be further understood. Furthermore, more theoretical and technical supports will be provided to predict the range of sea level rise.

Key words Antarctic ice sheet, mass balance, sea level change.