

# 变化气候中的格陵兰冰原：

北极积雪、水体、冰块和永久冻土（SWIPA）2009年项目概要



AMAP  
Arctic Monitoring and  
Assessment Programme

引语：AMAP，2009年。《变化气候中的格陵兰冰原：北极积雪、水体、冰块和永久冻土（SWIPA）2009年》概要。北极监测和评估计划（AMAP）、奥斯陆，22页

ISBN 13 978 82 7971 058 5

© Arctic Monitoring and Assessment Programme, 2009

出版商：

Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), P.O. Box 8100 Dep., N-0032 Oslo, Norway ([www.amap.no](http://www.amap.no))

订购：

AMAP Secretariat, P.O. Box 8100 Dep., N-0032 Oslo, Norway ([amap@amap.no](mailto:amap@amap.no))

订购本报告也以PDF格式出版，可从[www.amap.no](http://www.amap.no)免费下载。

AMAP在此向《变化气候中的格陵兰冰原：北极积雪、水体、冰块和永久冻土（SWIPA）2009年》科学报告的作者致谢：

D. Dahl-Jensen, J. Bamber, C.E. Bøggild, E. Buch, J.H. Christensen, K. Dethloff, M. Fahnestock, S. Marshall, M. Rosing, K. Steffen, R. Thomas, M. Truffer, M. van den Broeke and C.J. van der Veen.

制作：Carolyn Symon ([carolyn.symon@btinternet.com](mailto:carolyn.symon@btinternet.com)), Simon Wilson ([s.wilson@inter.nl.net](mailto:s.wilson@inter.nl.net)), Henning Thing ([thing@gfy.ku.dk](mailto:thing@gfy.ku.dk))

图片制作：Narayana Press

封面照片：Henrik Egede Lassen/Alpha Film - 冰原表面的土壤颗粒加快了靠近边缘部分的融化

印刷和装订：Narayana Press, Gylling, DK-8300 Odder, Denmark ([www.narayanapress.dk](http://www.narayanapress.dk)); a Swan-labelled printing company, 541 562.

本报告中复制的图片来源列于《变化气候中的格陵兰冰原：北极积雪、水体、冰块和永久冻土（SWIPA）2009年》科学背景报告中。

本报告中照片材料的提供者名单如下：

- © Bryan & Cherry Alexander/ArcticPhoto ([www.arcticphotos.com](http://www.arcticphotos.com)) – pages 6, 13, 15, 18, 21 and 22.
- © Dana Caccamise, Ohio State University – page 9
- © Carsten Egevang/ARC-PIC ([www.ARC-PIC.com](http://www.ARC-PIC.com)) – pages 16, 20, 21.
- © Ian Joughin/Mark Fahnestock, University of Washington/APL – page 8.
- © Rene Forsberg/DTU Space (National Space Institute, Denmark) – page 6.
- © Henrik Egede Lassen/Alpha Film ([www.alphafilm.dk](http://www.alphafilm.dk)) – cover photo.
- © NEEM ice core drilling project ([www.neem.ku.dk](http://www.neem.ku.dk)) – page 3.
- © Ivars Silis – page 19.
- © Tommy Hatting Sørensen – page 19.
- © Konrad Steffen/CIRES, University of Colorado (<http://cires.colorado.edu/steffen/>) – pages 5, 6, 7, 9 and 21.
- © Henning Thing/Things Unlimited ([hthing@gmail.com](mailto:hthing@gmail.com)) – pages 1 and 6.
- © Carsten Egestal Thuesen/GEUS – page 2

变化气候中的格  
陵兰冰原：北极积  
雪、水体、冰块和永  
久冻土（SWIPA）2009  
年项目概要

# 序言

本报告对北极理事会永冻圈项目—北极积雪、水体、冰块和永久冻土（SWIPA）格陵兰冰原（GRIS）部分的初步科学研究结果进行了汇总，也对题为《变化气候中的格陵兰冰原：北极积雪、水体、冰块和永久冻土（SWIPA）2009年》的综合性科学技术报告（全文引用）进行了概括。

SWIPA项目是由北极理事会在2008年4月作为2005年北极气候影响（ACIA）的跟进项目确定的。其目标是评估关于北极永冻圈变化的已有科学资料，包括可能对北极和整个地球具有深远影响的永冻圈变化所造成的影响。

SWIPA项目通过北极理事会与国际北极科学委员会（IASC）、国际北极社会科学家协会（IASSA）、国际地球极年和WCRP-CliC计划（详见[www.amap.no/swipa](http://www.amap.no/swipa)）合作开展的北极监测和评估计划（AMAP）进行协调的。SWIPA项目的格陵兰冰原部分由丹麦主持开展。

本总结报告也提供中文、丹麦文、法文、格陵兰文和俄文版本；但英文版为本报告的正式版本。SWIPA-GRIS报告及SWIPA的其他出版物将在2009年12月哥本哈根举行的《联合国气候变化框架公约》（UNFCCC）缔约方第15次会议上提交。SWIPA项目的结果也将提交给UNFCCC政府间气候变化委员会（IPCC）用于将来IPCC进行的评估。

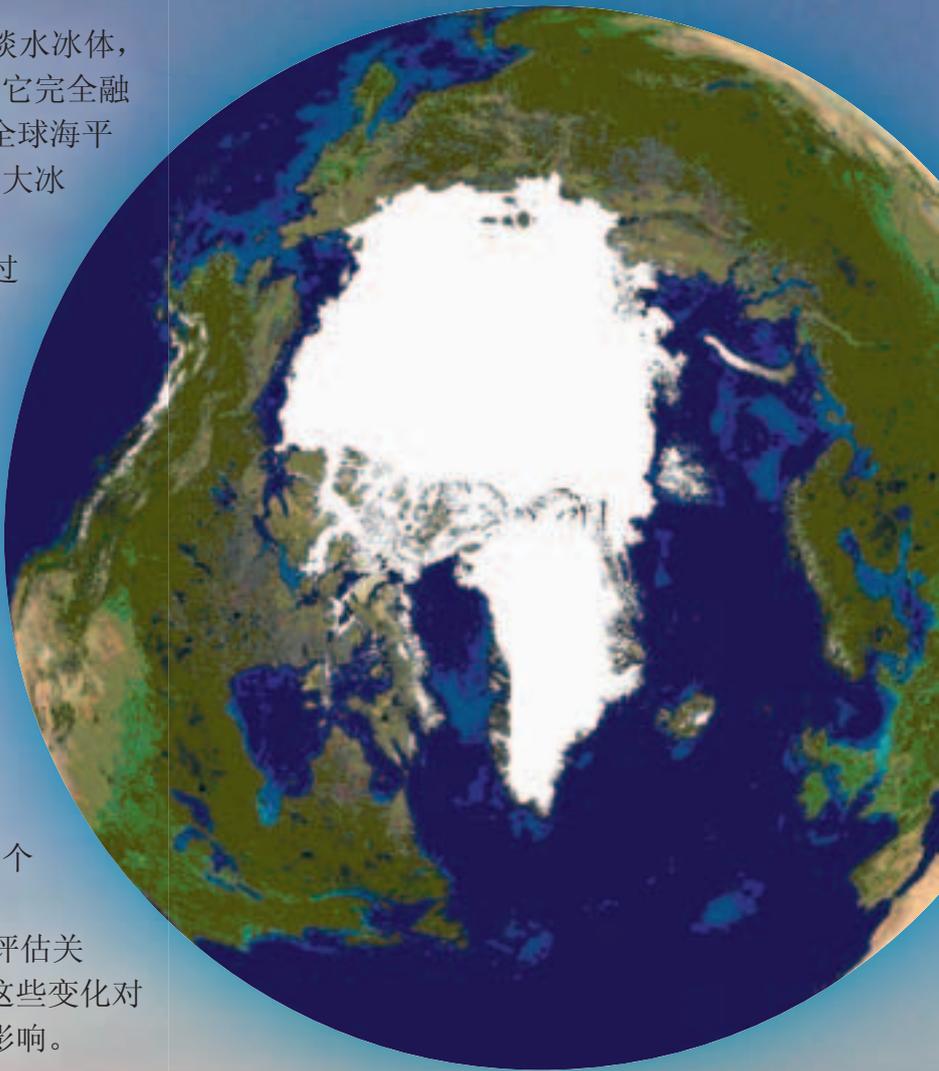
AMAP在此感谢参与本次评估的全体科学专家。本科学背景报告作者和参与者的名单见本报告出版信息页。此外，感谢Carolyn Symon编制本概要，并感谢丹麦主持开展SWIPA项目的本部分。

北极各国所给予的支持对于SWIPA和AMAP整体工作的顺利实施至关重要。而且，如果没有加拿大、丹麦、挪威和北欧部长理事会提供的额外资助，SWIPA-GRIS项目将无法开展。

SWIPA的后续报告将包含关于格陵兰冰原的最新资料，尤其是涉及对生物体系 and 人群的潜在影响的部分。我们只能从永冻圈所有要素变化的综合影响方面来充分考察这些潜在影响—由此构成SWIPA综合评估的一部分。

# 格陵兰冰原—北极的标志

格陵兰岛的冰原是北半球最大的一个淡水冰体，其中含有约300万立方千米的冰。如果它完全融化，那么这个巨大的冰雪储藏体会使全球海平面上升约7米。格陵兰冰原是全球第二大冰原，仅次于比它大得多的南极冰原。随着地球气候的变化，格陵兰冰原经过无数次膨胀和收缩，而且预计未来数十年乃至数个世纪内将要发生的强烈全球变暖作用将对它造成很大的影响。冰原的近期变化表明它已经对气候变化做出了显著的反应，但未来数十年内它将收缩到何种程度仍无法确定。格陵兰冰原的不断减少会对环境及生态系统以及人类社会造成局部性、地区性乃至全球性的影响。本次评估是对目前气候变化下的格陵兰冰原的首次全面考察，也是北极理事项目“气候变化与冰冻圈：积雪、水体、冰块和永久冻土(SWIPA)”的一个组成部分。SWIPA项目 ([www.amap.no/swipa](http://www.amap.no/swipa)) 将评估关于北极冰冻圈变化的最新科学资料，这些变化对于北极和整个地球都可能有着深远的影响。



# 格陵兰冰原的历史变迁

什么是格陵兰冰原，它是怎样形成的？

除一小部分外，格陵兰岛都位于北极圈的北面，一年当中有几个月的时间都有极夜或极昼现象。格陵兰岛的表面积刚超过200万平方公里，是世界上最大的岛屿(就其自身而言并非一块大陆)。格

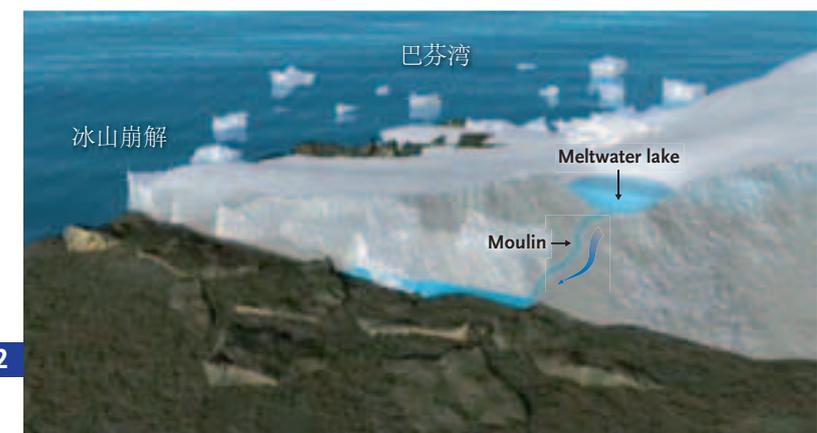
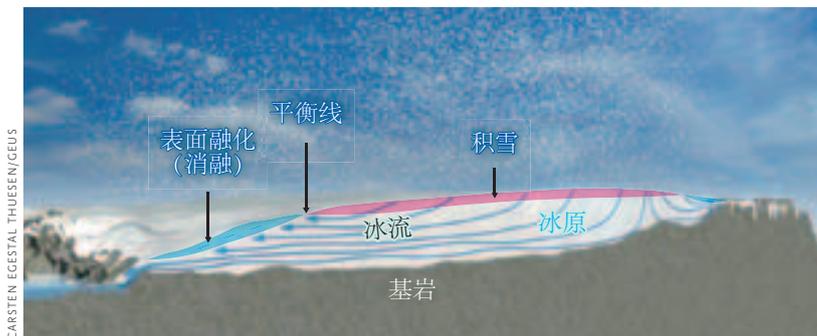
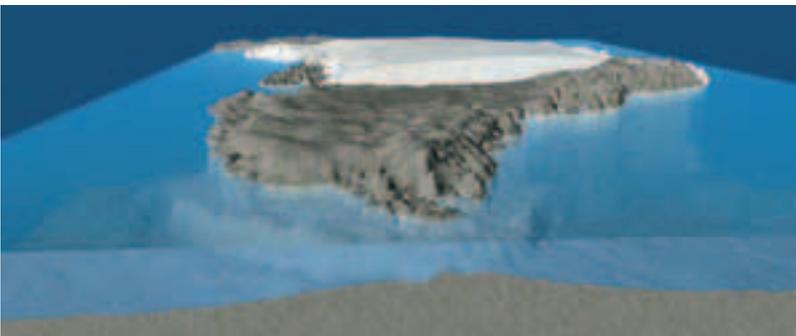
陵兰岛80%以上的面积都被内陆冰穹(即格陵兰冰原)覆盖。

气候寒冷到足以使雪积聚的时候就会形成冰原。经过数千年，积雪的年层被覆雪的重量压缩成冰。冰原在不断流动，在自重作用下从冰原中心的积雪处延展到位于其侧翼的融化带。在冰原边缘附近接近海岸的地方，冰会融化或流动相对较快、形成通往大海的冰流和冰川。在这里，冰的融化或断裂(崩解)入海，形成冰川。如果冰原积聚的雪量与其失去的雪量相当，则认为它是稳定的。

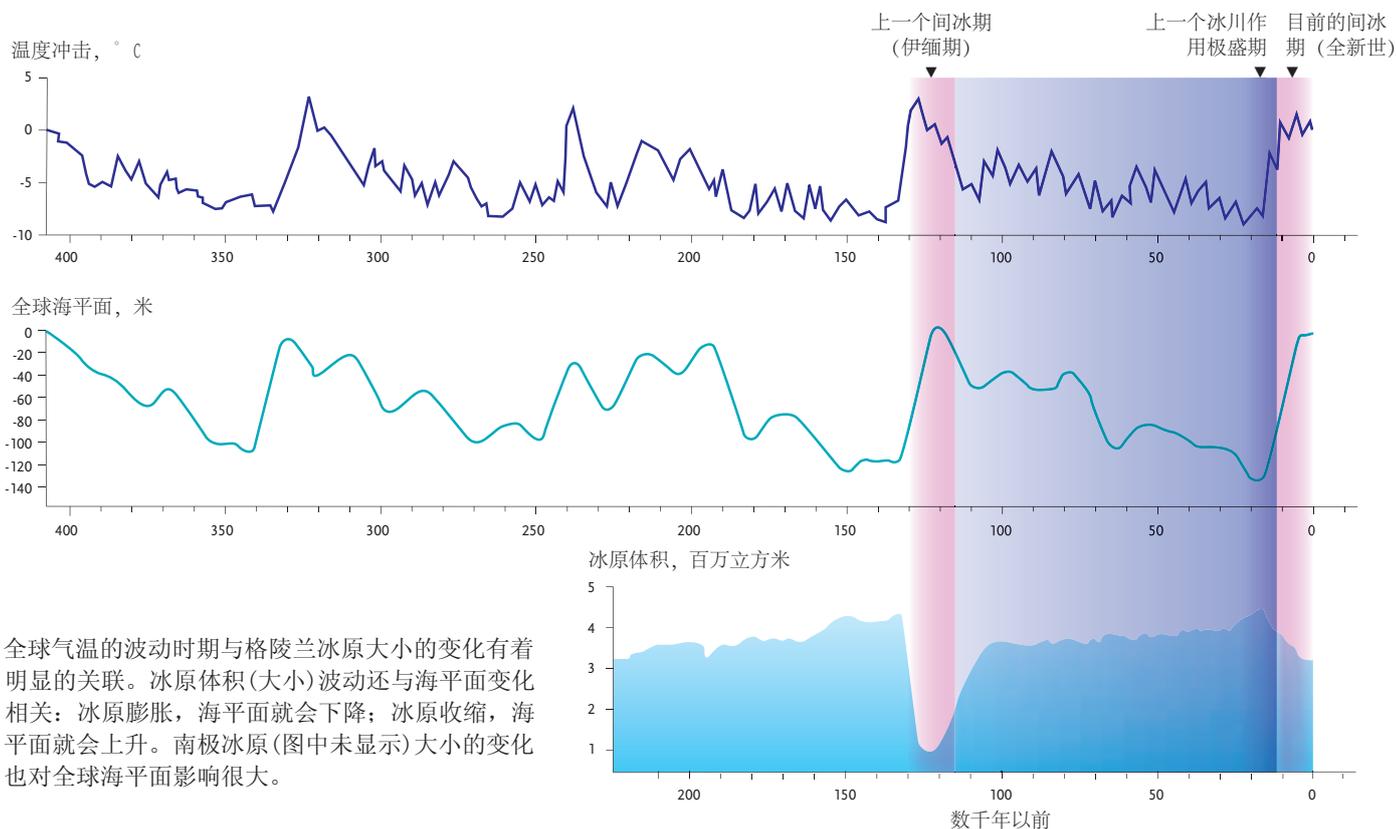
## 过往变化反映了自然气候变化

全球气候的自然变化是过去数百万年来地球演化史的特征之一。曾经有多个严寒时期，地球表面大部分都被冰层覆盖(冰川作用)，也有多个几乎没有覆冰的温暖时期。广泛的冰川作用首先是约300万年前从北半球开始的。从那时起，格陵兰冰原就随着各冰川期和间冰期而不断膨胀、收缩。

过去300万年内，格陵兰岛的气候变化尤其剧烈，但并非所有这些变化都是逐渐发生的。格陵兰冰原的冰核表明上一个冰川期内发生了25次气候剧变又称为“丹斯加德-奥斯切尔事件”。在其中每一次变暖事件中，温度都会在数十年期间内上升10-15℃，与之相伴的是全球海平面上升5-20米。突如其来的变暖事件之后是延续1000到5000年的很长一段气温渐冷期，直到下一次急剧变暖事件发生时为止。格陵兰冰原在上一次冰川作用中的急剧变暖事件期间对海平面上升有多大贡献仍未可知。



CARSTEN EGESTAL THUISEN/GEUS



全球气温的波动时期与格陵兰冰原大小的变化有着明显的关联。冰原体积(大小)波动还与海平面变化相关：冰原膨胀，海平面就会下降；冰原收缩，海平面就会上升。南极冰原(图中未显示)大小的变化也对全球海平面影响很大。

## 能否根据过去情况预测未来变化？

12,000年前上一个冰川期结束后，气候变暖进入目前的间冰期(又称为“全新世”)。这段时期气候一直保持温暖，气温波动很小。

伊甸期(即上一个间冰期)是尤其值得考察的时期，因为它与目前气温持续上升的格陵兰冰原有很多相似之处。伊甸期内格陵兰岛的气温也在数千年内保持相对稳定，但比目前约高5°C。海平面比目前约高4—6米，利用冰核数据进行的重构研究表明，海平面上升中有1—3米可能是由格陵兰冰原的部分融化造成的。这就引出了一个问题：预计未来数十年乃至数个世纪内将要发生的全球变暖作用会不会使海平面升到与上一个间冰期相同的高度？



格陵兰岛冰核钻取。冰核是指垂直钻入冰原后获得的冰柱，用于重构过去125,000年内的大气条件。将冰核切成片段，对各片段中的冰进行分析。每个片段都反映了特定历史时期的大气条件。用于重构格陵兰冰原对过往气候变化反应的很多资料都是从冰核中获取的。



# 如今的格陵兰冰原

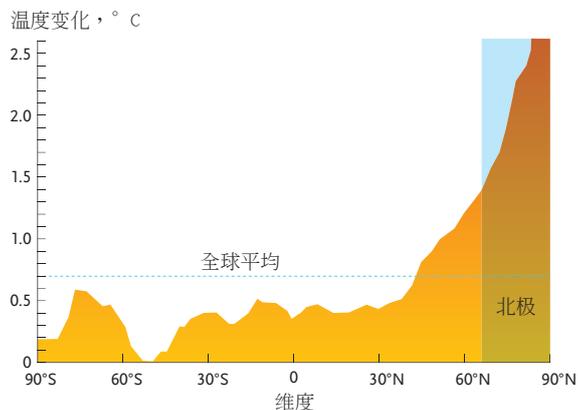
## 北极正在变暖

过去50年内，北极呈现大幅变暖的趋势。虽然全球平均气温只升高了0.7°C左右，但格陵兰岛平均气温的上升幅度是其两倍以上。北极地区的气温上升幅度也远远超出了南极洲的大部分地区。据联合国政府间气候变化委员会(IPCC)预计，到2100年，北极地区的年均气温将比1951—1980年基准期内观测到的气温高出3—8°C，其中冬季变暖速度将快于夏季。如此幅度的温升将是格陵兰冰原10万年来幅度最大的(即从上一个间冰期结束时起)。

## 格陵兰岛一带的变暖趋势

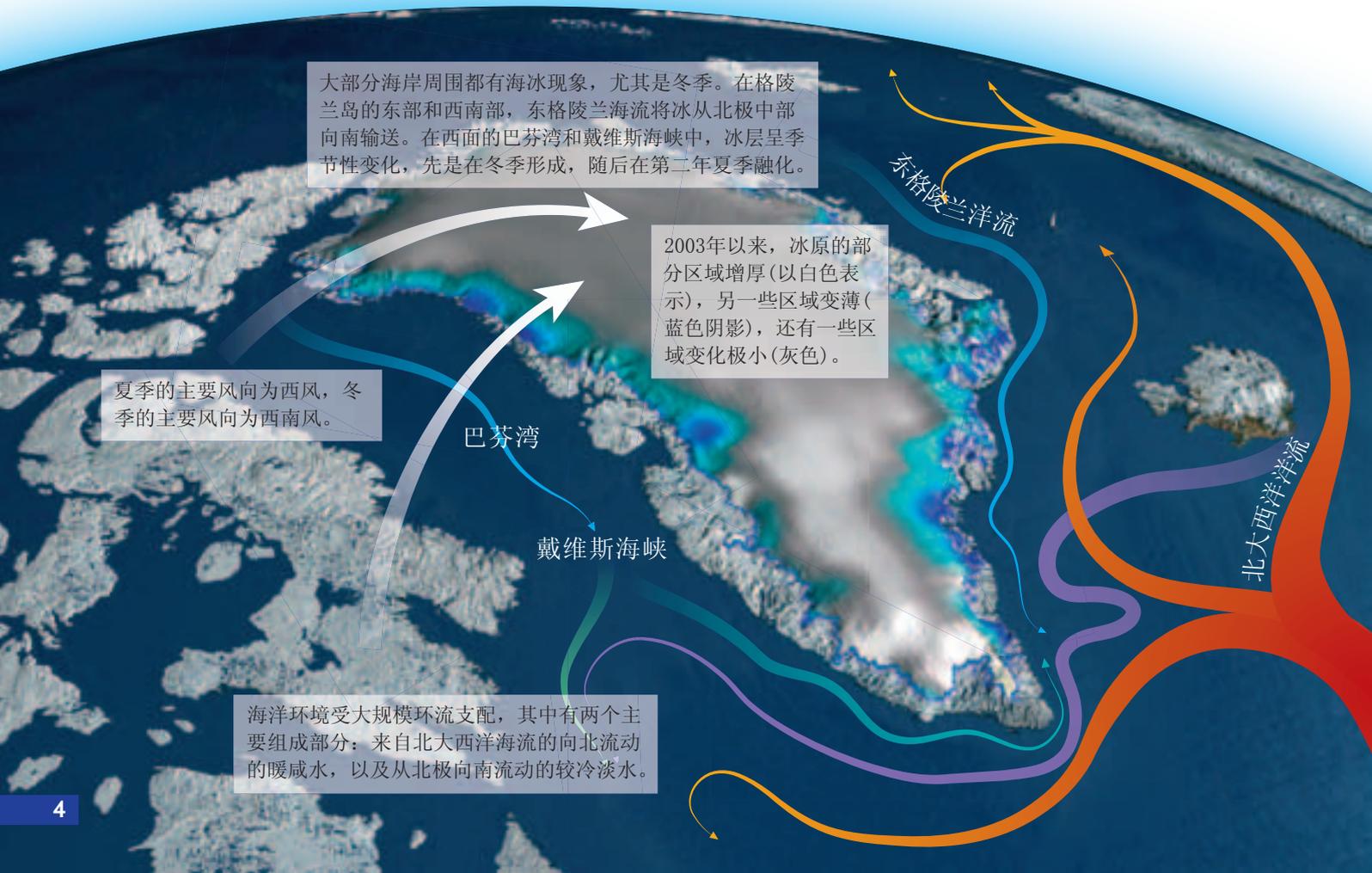
必须掌握关于格陵兰冰原对当前气候变化所作响应的更详实的资料，才有可能针对冰原对未来气候变化的可能响应方式做出可靠的预测。

影响格陵兰岛气候的主要因素包括其极北的地理位置、冰原高度以及环绕该岛的季节性冰封的海水。



1951—1980年基准期以来，北极地表温度的平均上升幅度最大。

由于格陵兰冰原幅员辽阔、地处偏远，因此实地气候测量难以进行。但目前仍有冰原各部分的长期整套数据。最长的气象测量系列是由丹麦气象研究所从沿南格陵兰海岸的8个站点收集的。这些测量系列中的一部分延续100年以上。还从20世纪90年代在冰原上设置的自动气象站网收集了一些数据。1840年至今的海岸气象记录表明20世纪30和40年代的气温最高。这些整套海岸



大部分海岸周围都有海冰现象，尤其是冬季。在格陵兰岛的东部和西南部，东格陵兰海流将冰从北极中部向南输送。在西面的巴芬湾和戴维斯海峡中，冰层呈季节性变化，先是在冬季形成，随后在第二年夏季融化。

2003年以来，冰原的部分区域增厚(以白色表示)，另一些区域变薄(蓝色阴影)，还有一些区域变化极小(灰色)。

夏季的主要风向为西风，冬季的主要风向为西南风。

海洋环境受大规模环流支配，其中有两个主要组成部分：来自北大西洋海流的向北流动的暖咸水，以及从北极向南流动的较冷淡水。

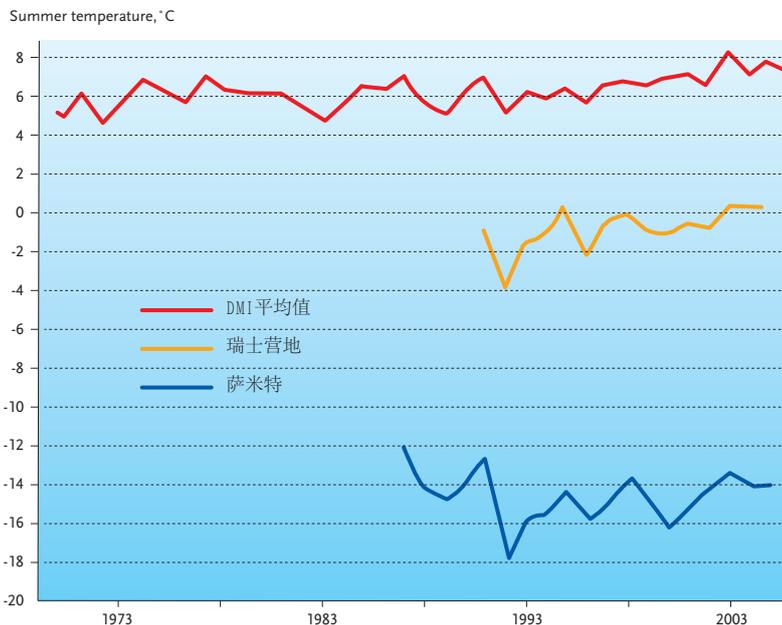
气象数据还表明，从20世纪80年代末起气温总体升高了2—4℃，而且主要发生在冬季。自动气象站的数据表明，近年来冰原的西部边缘也有明显的变暖迹象。但由于整套数据过少而且已有的整套数据延续时间仍然过短，因此不足以确定辽阔冰原内部的温度变化趋势。20世纪90年代初以来的海岸变暖现象尤其值得研究，因为这种情况是在1991年大规模火山喷发(菲律宾皮纳图博火山)使大量火山灰排入高层大气引起的全球降温效应之后发生的。这种情况不同于20世纪30和40年代的变暖现象，因为那时是一个异常的非火山活跃时期。气象资料证实，格陵兰冰原内部、周围和上空的气候变化很大；从北到南、从东到西变化很大，冰原中央的气候变化与海岸地区差异很大。科学家们曾尝试为这些局部气温变化建立模型，但大多以失败告终。各种模型所作的预测与温度测量结果之间的差异表明，需要通过改善气候测量结果的地理分布来推动这些模型。延续时间更长的整套数据十分重要而且现存时间序列的连续性也是不可缺的，如有可能最好能向后延伸，例如利用从冰核获得的数据进行延伸。



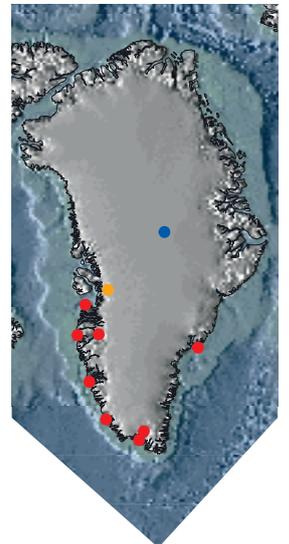
萨米特站观测站主站楼在冰原顶部。



从2000年至今，瑞士营地冰面融化的增加使冰面下降了3.5米。



与较低海拔(●瑞士营地)和冰原边缘周围(●丹麦气象研究所站)地区的变暖趋势相比，冰原顶部(●萨米特站)的近地表气温似乎略呈总体下降趋势。



# 格陵兰冰原的稳定性

冰原是膨胀还是收缩取决于冰量增加或减少过程之间的平衡。每年通过积雪获得的质量增加与通过冰山崩解和融化径流发生的质量损失之间的总平衡称为“总质量平衡”。这是冰原“健康度”的有效量度。如果一段时间内冰原损失量超过增加量，则冰原的总质量将逐渐减小。



冰量减少过程



HENNING THING



BRYAN & CHERRY ALEXANDER/ARCTIC PHOTO



RENE FORSBERG/DIU SPACE

## 冰量增加过程

降水会增加冰原表面的质量。冰原的绝大部分降水(约占96%)都是降雪,其余部分为降雨。过去50年中,格陵兰冰原的降雪量显著增加,主要是因为近地表气温的上升使空气中的水分增加,从而增加了降水量。2000年以来,由于降雪量的增加,冰原内部的较高部分(2,000米以上部分)增厚,每年约升高5厘米。2002/2003年(格陵兰东南部)和2004/2005年(西格陵兰)都属于强降雪年。一些科学家认为,随着冬季气温的上升,强降雪年会更频繁出现。

## 冰量减少过程

格陵兰冰原冰面融化后发生质量损失,在冰原边缘处则是由于形成冰川及与温热海水接触的冰面融化而发生质量损失。

## 冰面融化

接近冰原表面的气温和风是冰面融化最主要的影响因素。另一个重要因素是冰面对入射阳光的反射率 - 这种属性称为地表反射率。大气中的灰尘和煤灰(碳黑)颗粒会直接沉积在冰原表面,从而减小融化带的反射率。

在冰原周边的几个站点对消融带内的融化情况进行了测量。这几个站点的代表性以及对冰面变化过程的了解都有一定的不确定性。一部分融水直接流失,一部分经冰内裂隙流出,另一部分会重新结冰。

卫星资料表明,1979年以来夏季融化面积显著增大。2007年测得了有史以来最大的冰面融化面积。

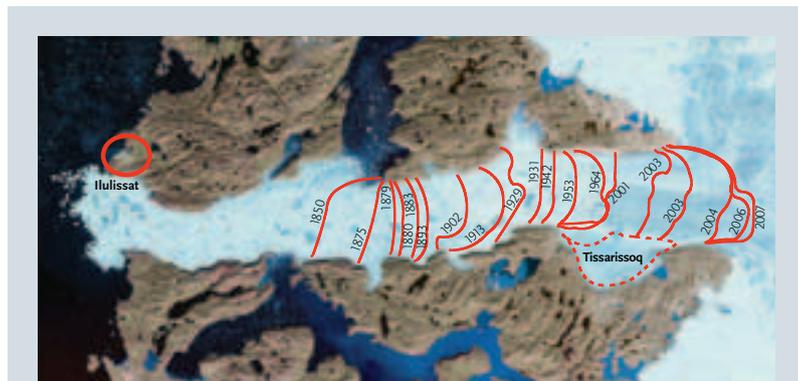
## 从边缘开始的冰量损失

在接近冰原的地方,冰从冰原上部堆积带流失的速度会变得极不稳定 - 流速慢的部分与快速流动的注出冰川及冰流分开流动。

大量的冰从冰川的末端排入海中。这些注出冰川(在第8页图中以红色表示)

通常先流经既深又窄的冰峡,然后以冰山和融水的形式从与海水接触的冰面上释放。冰山是冰原边缘冰量损失的主要来源。格陵兰冰原上最大的注出冰川是雅各布港冰河。

较长的夏季融化期集中在南部和西南部。

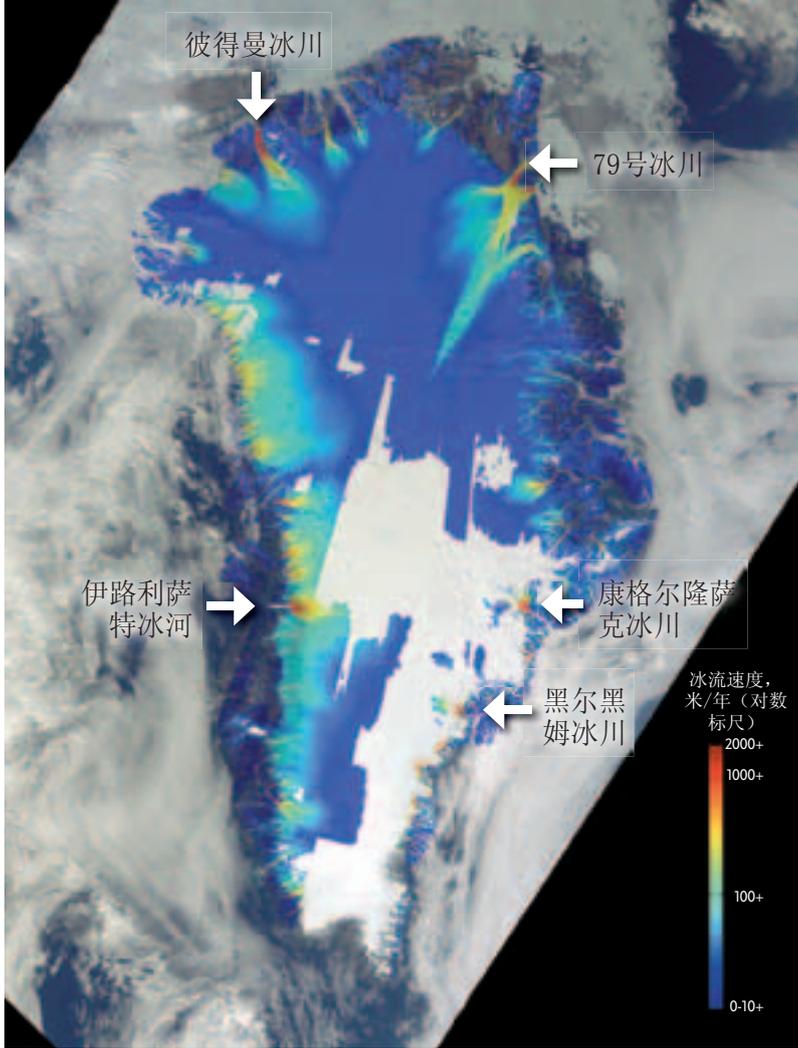


伊路利萨特冰河(格陵兰语称瑟梅哥-库雅雷戈)是格陵兰岛西海岸上的一个大型注出冰川。冰流经一条深藏于冰川下的槽谷,这条槽谷从距目前冰崖约50公里的内陆一直延伸到海平面以下1,500米。这条槽谷较窄约5公里,但能排出格陵兰冰原约7%面积内的冰。近期对伊路利萨特冰河/瑟梅哥-库雅雷戈冰流量的估计表明,过去几年内冰量损失显著增加。格陵兰岛上约10%的冰山都是由伊路利萨特冰河/瑟梅哥-库雅雷戈崩解形成的。人们认为1912年撞沉泰坦尼克号的那座冰山也来源于此。过去8年内,伊路利萨特冰河/瑟梅哥-库雅雷戈收缩了15公里。

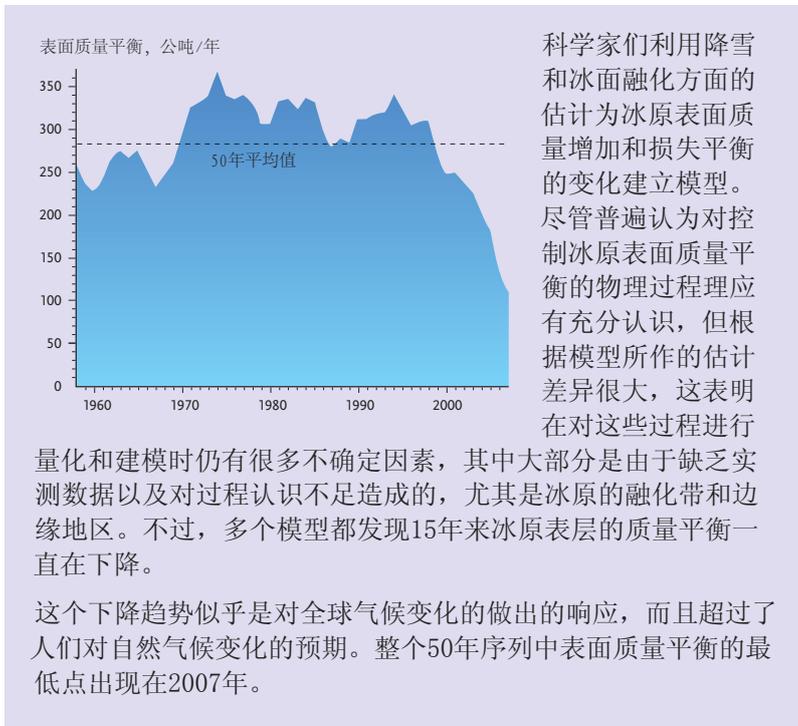


KONRAD STEFFEN/RUSSELL HUFF/CIRES

KONRAD STEFFEN



沿西格陵兰海岸，从缓慢流动的内陆冰过渡到快速流动的注出冰川的过程尤为明显。



尤为引人关注的一项近期科研成果是发现过去10年中，整个格陵兰冰原的年冰流量增加了30%：从1995年的3300亿吨增加到2005年的4300亿吨，增加原因是注出冰川及冰流的流动加快。

近年来，很多注出冰川(包括西海岸的雅各布港冰河和东海岸的康格尔隆萨克冰川和黑尔黑姆冰川)的年冰流量每年都会显著增加。1995—2000年间，南部很多注出冰川的冰流量迅速增加，而且往往成倍增加。到2005年，这种模式扩大到北部地区的注出冰川。但各地区之间有一定的差异，例如2006年黑尔黑姆和康格尔隆萨克冰川的冰流量回落到以前水平，而雅各布港冰河的冰量损失仍然保持很高的水平。

由于流出量持续超过输入量，因此注出冰川中流动较快的冰使得这些冰川普遍收缩。南部很多冰川与海洋之间的这种不平衡冰量损失造成接近冰原边缘的部分大面积变薄(“减少”)。

针对注出冰川速度的加快提出了很多见解。其中很可能涉及某些类型的冰—海相互作用，因为所有主要变化都是首先在海洋附近发生再扩散到冰原内陆的。由于入海冰川大部分是漂浮的，因此认为相对温暖的海流起着尤为重要的作用。

### 测量平衡——格陵兰冰原的命运

直到1990年格陵兰冰原似乎才大致达到平衡，在此之后注出冰川的冰流速度加快，冰面融化引起的质量损失也有增加的趋势。每年增加和损失的总冰量约为5,000亿吨；在增加的5,000亿吨降雪量中，约50%是以冰面融化径流的形式损失的，约50%是以冰山的形式流出的。近期测量结果表明这种平衡已发生变化，而且冰面融化和冰流量变化很大

$$\text{总质量平衡} = \text{输入量} - (\text{输出量}) = \text{积累量} - (\text{地表径流} + \text{形成冰山} + \text{底部融化})$$

由于冰原质量平衡的过往变化会影响冰原目前的冰流，因此预测冰原质量平衡的变化时需要考虑质量平衡的过往变化。

1 Gt=1000 000 000吨。1 Gt冰大致相当于一块1.1立方千米大小的冰。

2005年4300亿吨的冰山流量(见正文)相当于当年每天都有足够淡水为每一个地球人提供174升洁净饮用水。

也很迅速。一系列质量平衡估计(见方框中的图)都表明格陵兰冰原从20世纪90年代初以来发生了总体冰量损失。在1995—2000年间,估计年均损失冰量约为500亿吨;但在2003—2006年间,损失率显著增加到平均每年1600亿吨,相当于海平面每年上升0.44毫米。

从1990年以来观测到的质量损失是格陵兰冰原气候变暖直接引起的。预计高北纬地区将来会发生的强烈变暖作用会使格陵兰冰原的质量损失增加,同时造成局部性、地区性和全球性影响。

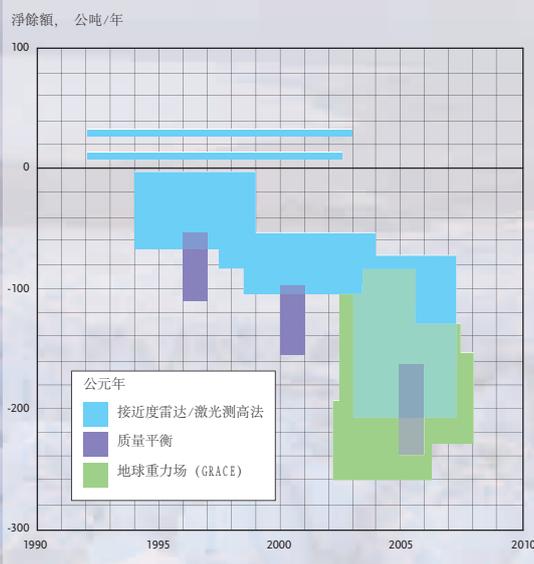


DANA CACCIAMISE

### 总质量平衡估计

有三种估计或观测总质量平衡变化的方法:质量预算法、反复测高法和重力变化法。只有重力测量才能直接衡量冰的质量变化。前两种方法测量其他量值(例如融化、地表高度)的变化,然后将其换算成冰的质量变化。

- 质量预算法根据冰量增加(降雪)和冰量损失(融化、形成冰山)的分别估计来计算总质量平衡。
- 卫星雷达测高法和飞机激光测高法被广泛用于测量冰原高度变化。冰原高度变化反映了总含冰量的变化。
- 地球重力场的变化直接影响着质量变化。从2002年起,GRACE(重力反演与气候实验)计划对地球重力场进行了测量。



多种方法均表明冰原总质量平衡有所下降。图中的“方框”表示质量损失估计的范围(纵轴)和做出估计的时期(横轴)。数据跨度较大表明估计中存在不确定性。

## 格陵兰冰原未来变化预测

格陵兰冰原对气候变化所作的响应非常复杂，取决于冰原、大气与海洋之间的相互作用。直到近期才建立了对该体系进行整体描述的复杂数学模型，从而提高了我们为整个自然体系建立模型的能力。

无论是目前还是将来，改善对冰原表面平衡的估计都依赖于能否缩小区域性大气模型的规模以及能否了解控制快速冰流的过程。其他不确定因素也关系到我们对大部分格陵兰冰原之下融水影响的认识程度。

必须记住的是，所有模型都是建立在假设的基础上，因此模型的所有预测都带有一定的不确定性。预测越深入未来，不确定性就往往越大。但只要正确理解了不确定因素，这些模型就能对未来发生的情况做出预测，这或许也是目前唯一的预测工具。

尽管数学模型有自身的局限性，但我们可以从中明显地看到格陵兰冰原对气候变暖非常敏感。

### “不可逆”变化的温度阈值？

随着近年来气候变暖，格陵兰冰原发生质量损失。即使温度保持稳定，冰原也将继续融化一段时间。超过一定程度时，冰原甚至可能进入“不可逆的不稳定”状态，进而导致冰原完全融化。正如上一个冰河期末覆盖北欧和北美洲很大部分的冰原所发生的情况一样。在这种情况下，格陵兰冰原会逐渐消融，直到出现新的冰川作用。冰原融化“不可逆”时的地表变暖程度即所谓的“阈值”。

一些科学家认为如果全球平均气温上升 $3.1^{\circ}\text{C}$ （格陵兰岛气温相应上升 $4.5^{\circ}\text{C}$ ），那么冰原变薄会加快冰原整体的消融。即使温度稳定，快速冰川流动引起的冰原减少也会使消融过程不可逆。

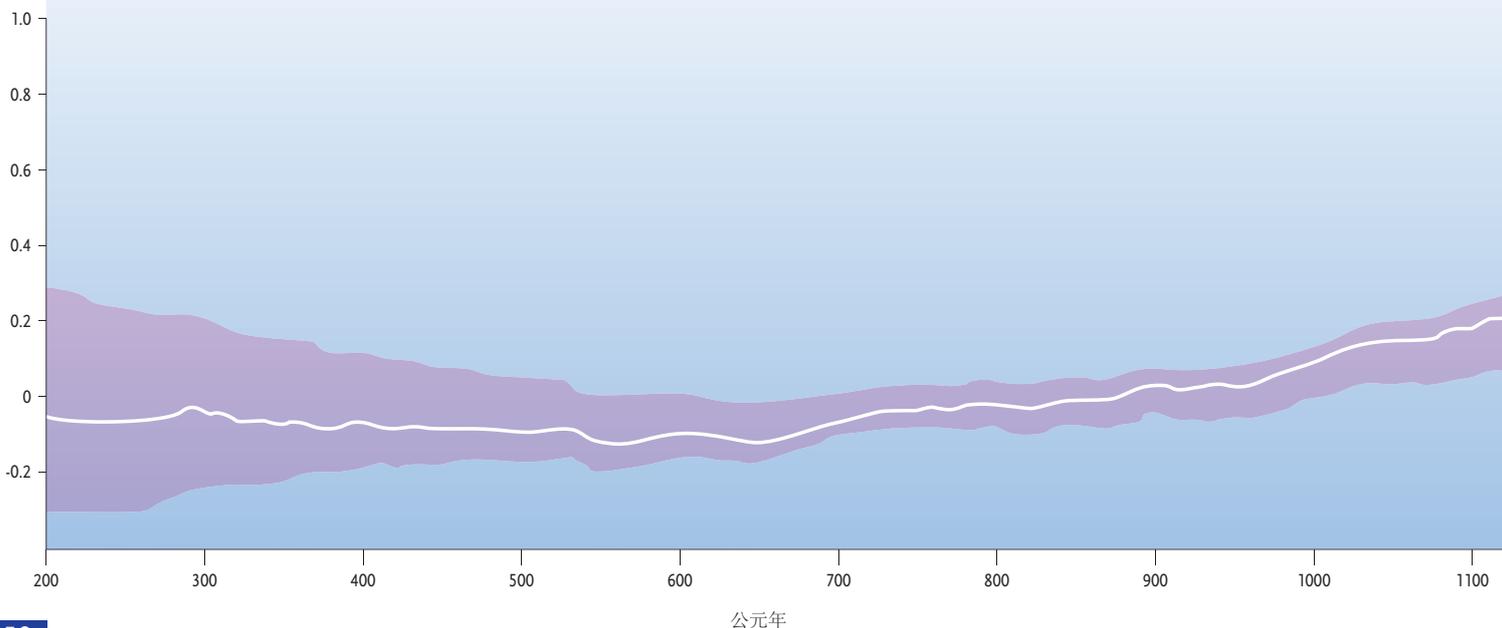
尽管对构成该阈值的确切温度上升缺乏足够了解，但一致认为在达到阈值之前很久冰原的整体质量平衡就已开始下降 - 这种情况在20世纪90年代和21世纪初就已经出现了。

目前最有效的一些模型 - 包括IPCC采用的几个模型 - 提高了这里提出的“阈值”的可信度。根据模型得出的结果，科学家认为相当于3万亿吨二氧化碳的温室气体累积排放量有可能使气温超过格陵兰冰原不可逆融化的阈值。因此，目前人类活动产生的二氧化碳排放量可能会使海平面持续上升数个世纪。

值得注意的是，即使上一个间冰期（即伊甸期 - 见第3页）内格陵兰岛的气温上升了 $5^{\circ}\text{C}$ ，但格陵兰冰原并未出现完全融化现象。

全球海平面，米

过去估计



# 格陵兰冰原在全球气候变化中所起的作用

上文所述的冰原变化是由冰原上方和周围的地区性气象体系的变化、海洋状况和冰原变化过程所推动的。同时，冰原自身的特性在形成局部性和地区性气候中发挥着主要作用。冰原变化也有可能影响全球气候和海洋环流。

使格陵兰冰原与北极和全球气候体系关联的反馈机制是冰原未来变化所产生的影响中最引人关注的方面。冰原所隐含的风险和未来可能的变化与变化(由此引起海平面上升)速度的关系十分密切。这些方面的不确定性仍然很大，因为它们取决于加快冰流和使冰川快速移动的过程，而对这些过程的了解仍不够透彻。必须在这些方面大力开展研究。

## 海平面上升

谈到起全球气候变化问题，海平面上升就是首先讨论的问题之一。因此，要确定海平面上升未来预测的不确定性，其关键问题和主要来源就是根据本世纪及以后格陵兰冰原的变化估计海平面可能的上升幅度。

冰原融化显然已经在全球海平面上升中起到了一定的作用(尽管格陵兰冰原的融化只是引起全球海平面上升的因素之一——见方框)。目前，格陵兰冰原(1600±500亿吨)的年冰量损失对应的海平面上升幅度约为每年半毫米，即每年观测到的全球海平面上升幅度3毫米的10—20%。

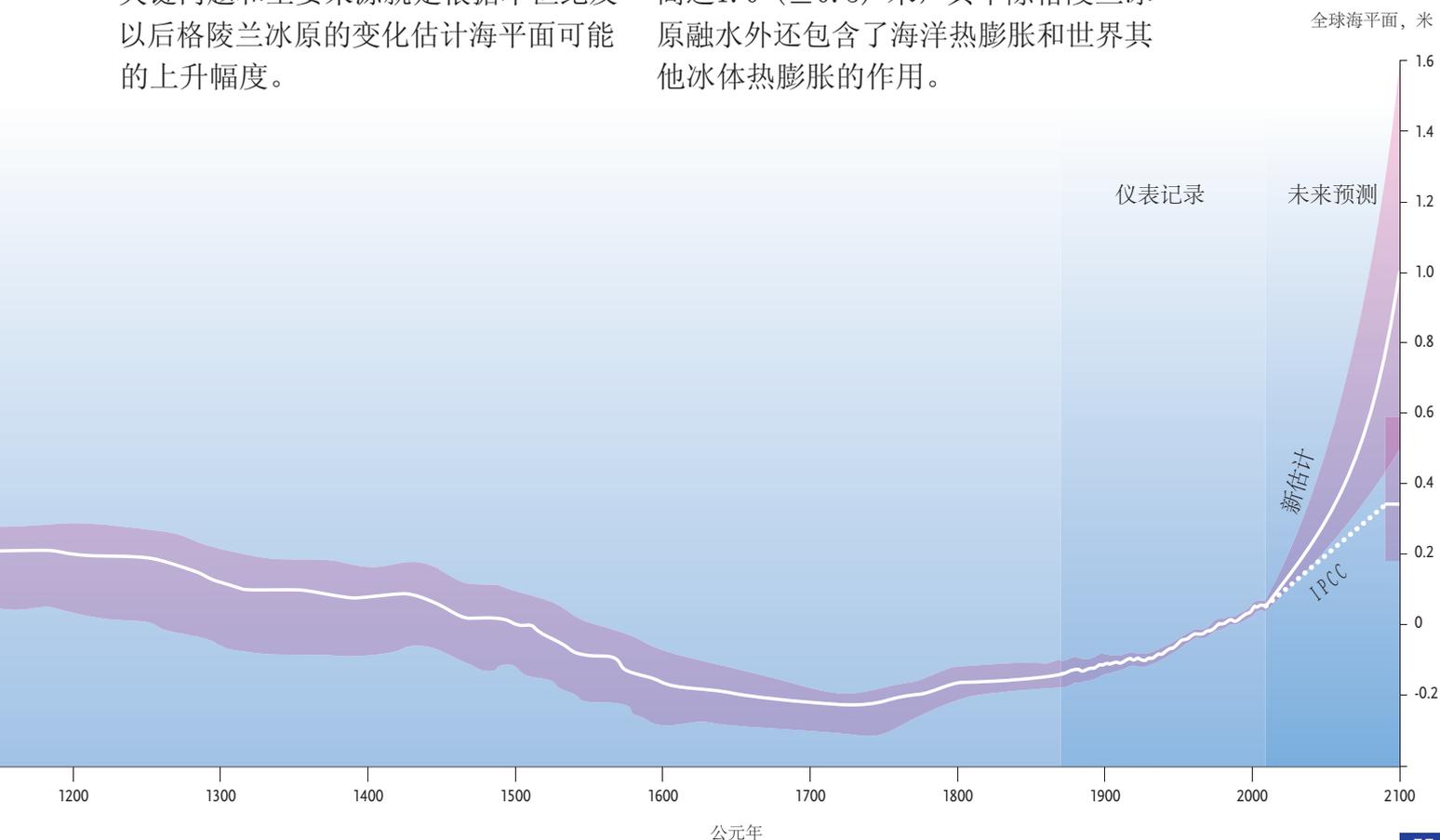
## 截至2100年的模型预测

目前大多数模型表明，到2100年，格陵兰冰原的冰量损失会使全球海平面上升约5-10厘米(见图中圆点)。但还有一些更高的估计。

如果气候变暖会使注出冰川的冰流普遍加快，正如近期观测结果表明可能发生情况的那样，那么到2100年格陵兰冰原对全球海平面上升的影响可能高达20厘米，在急剧变暖情况下甚至可能更高。近年来对2100年全球海平面上升的预测高达1.0(±0.5)米，其中除格陵兰冰原融水外还包含了海洋热膨胀和世界其他冰体热膨胀的作用。

全球变暖使海洋中的水膨胀，使土地上的冰体融化。这两个过程都会引起全球海平面上升。目前，推动海平面上升的最主要过程是海洋水的热膨胀。

根据21世纪全球气温升高3℃计算而得的预计未来全球海平面上升。虚线表示联合国政府间气候变化委员会对气候变化所作的预测。紫色阴影表示计算结果的不确定度。



全球“温盐环流”是指大规模海洋环流，它有很多别称，例如“海洋输送带”、“大洋输送带”或“全球输送带”。由于构成温盐环流的水团一边在全球流动一边传送热量，因此这种环流的任何强度或形态变化都会对全球气候造成巨大影响。



### 2100年之后的模型预测

如果我们将时间范围推向更加遥远的将来 - 未来1千年 - 目前的模型表明该地区将变暖3—4°C。到3000年，仅仅格陵兰冰原融化就会使全球海平面上升1米，而变暖5—6°C时会使全球海平面上升2米。但我们考察的范围距离现在越遥远，模型所作预测的不确定性就越大。

格陵兰冰原完全融化有可能使海平面上升7米，这对于全世界的沿海人口都是一种灾难性的前景。虽然大多数气候变化模型表明完全融化需要3,000年甚至更长的时间，但达到不稳定变化的“阈值”所需的时间可能会短得多。必须采取措施来避免可能超出我们适应能力的全球变暖所带来的变化 - 这类变化中有一种是与格陵兰冰原的不可逆融化有关的。

### 海洋环流 - 气候“突变”的幽灵

融化的北极冰对海洋环流形态的可能影响，尤其是海洋环流的改变可能与气候“突变”相关，是近年来关于气候的讨论中另一个引起广泛关注的问题。值得一提的是，欧洲西北部的气候海洋

环流形态影响很大 - 因为温暖的表层海流从温暖的低纬度地区沿大西洋会传送热量到挪威海和巴伦支海。如果没有这种变暖作用，西北欧的冬季与加拿大东部拉布拉多地区的情况类似。

随着北极海表层水的冷却，表层水会变重、下沉并以深水洋流的形式流回南大洋。这个过程有效地推动了全球温盐环流 - 又称为大洋输送带（见上图）。地球气候体系的这个重要特征使北极与世界其他地区密切联系起来，表明了北极气候对全球的重要性。有证据表明，如果北极地区变暖，使表层水下沉的冷却效应与融冰和北极河水流量输入的额外表层淡水相结合，会使这个环流变弱甚至如一些科学家所认为的那样完全停止。矛盾的是，全球气候变暖时，海洋流向北输送热量的减少会使北欧海和巴伦支海发生强烈的地区性变冷，同时会使整个北半球在一定程度上变冷。有证据表明过去海洋环流的上述变化是在很短时期(数十年)内发生的 - 造成了所谓的地区性气候“突变”。

IPCC在第四份评估报告中断定，将暖水输送到北极(大西洋经向翻转环流)的主要洋流“很有可能”在21世纪有所减小，但预计不会由此使欧洲变冷而且这

些变化“几乎不可能是”突然发生的。但这些论断所依据的模型都没有考虑冰原融化的影响。由于全球温盐环流是由密度差异推动的，因此格陵兰岛产生的越来越多的融水至少会对海洋环流造成一定的影响，并且扩大到全球气候。在海洋环流模型与冰原模型相关联的少数研究中，大多数结果表明格陵兰冰原产生的融水对大西洋经向翻转环流影响不大。这主要是因为格陵兰冰原注出所增加的淡水量只有进入北冰洋的主要北向河流的十分之一，例如北美洲的马更些河以及俄罗斯北部的鄂毕河、叶尼塞河及勒拿河。但只有更好地认识格陵兰冰原淡水所带来的影响，才能有效地评估北大西洋环流在未来气候变化情况下的稳定性，也才能更深入地了解格陵兰岛周围海洋环流形态所受到的局部影响。

## 海冰

进入格陵兰岛周围海域的融水提高了海域表层的稳定性并促进了结冰。这表明格陵兰冰原产生的融水量的增加有可能对更大范围的海面进行“预调”，使之能在冬季结冰。但观测结果表明，近年来格陵兰岛周围的海冰覆盖范围实际上有所减小。这表明很难对气温升高和淡水输入量的增加造成的总体综合影响进行预测。

由于存在与海岸陆地结合的海冰(岸冰)，似乎也会影响入海冰川的涨落。当海冰确实无法阻止巨大冰川的流动时，似乎可以暂时阻止冰山崩解。在格陵兰岛东北部的79号冰川处，一段时期内发生永久性岸冰覆盖，期间只形成了少数冰山。其后，随着岸冰的消融，堆积了数年的冰突然崩解，冰山形成作用开始加强。



# 综合考虑是了解海洋生态系统所受影响的关键

关于格陵兰冰原的融化对格陵兰岛周围海洋生态系统的影响知之甚少，这也是正在进行中的多项科学研究的课题之一。但很难将生态系统的特定变化归因于冰原的变化，因为生态系统反映了很多因素的综合影响。格陵兰冰原只是在气候变化下北极冰冻圈中可能影响海洋生态系统的若干个因素之一。海冰的变化尤为重要。本章节举出了格陵兰冰原的变化如何影响海洋生物体系的示例。要正确研究这个课题，需要进行综合评价，其中涉及的要素不仅局限于格陵兰冰原，因此从性质上看，这里给出的材料与上文关于自然环境的材料属于完全不同的类型。

## 食物链中的级联效应

气候变化对全世界的海洋体系具有显著影响。对于格陵兰岛而言，淡水从融化的冰原大量外流是导致自然环境广泛变化的另一个因素。这些变化可能会对食物链产生重大影响，而且有可能对高度依赖渔业的格陵兰岛经济具有极其重要的意义。尤为值得关注的是气候引起的变化对海洋食物链中其余生物赖以生存的初级生产者的影响。

随着漫长而寒冷的极地冬季的结束，温暖和阳光又重新回到北极，受阳光照射的富养海洋表层开始有大量海藻生长（“春季藻华”）。每年初级生产的程度由几个因素决定，包括海冰碎裂的数量和时机、阳光透入海水的深度以及营养物的供应。这些因素都直接或间接受气

北极食物

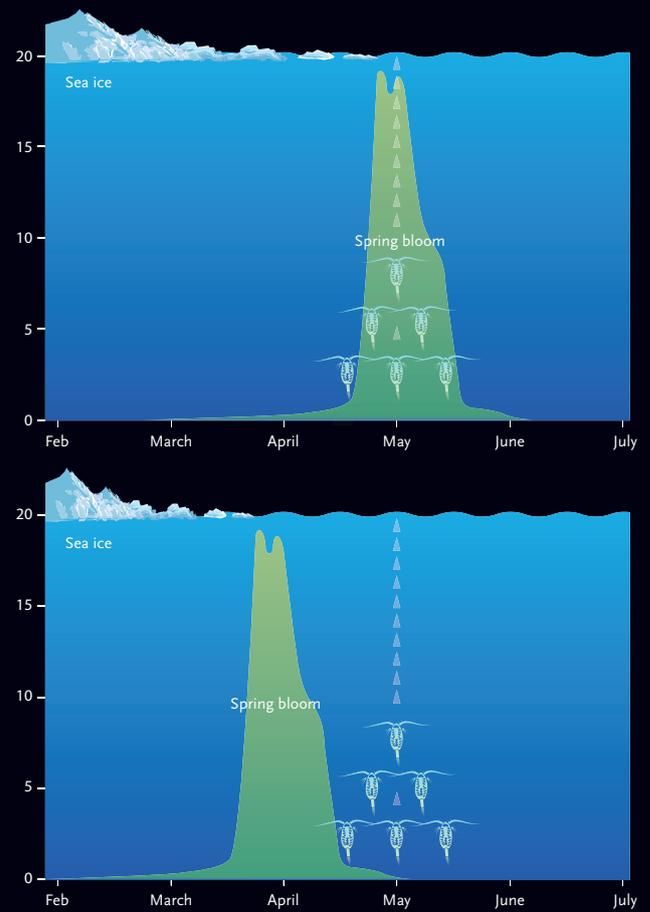




桡足动物哲水蚤是北极海洋生态系统中的一个重要种群，将能量从海洋底部的初级生产者沿食物链向上传递。这种以脂肪为基础的能量传递是北极水域盛产鱼类、鸟类和海洋哺乳动物的主要原因之一。

沿食物链成功传递能量的一个先决条件是在冰碎裂时随着发育阶段浮游植物的大量繁殖，水蚤向海面迁移（上图）。在海冰较早破裂或根本无海冰的年代里，可能会较早形成春季藻华，桡足动物可能会在达到最高点后进入表面水域（下图）。如果配合不当，沿食物链进行的能量传递将受到限制。

浮游植物叶绿素产量，微克/升



候变化以及格陵兰冰原淡水的影响。冰原产生的融水和冰山数量的增加会降低表层水的盐度和密度，尤其是海湾和沿岸水域。这对初级生产影响很大。海湾内的环流也会发生变化。随着冰原产生的淡融水流出海湾，会形成从周围大洋向内陆流动的水流，从而向海湾提供养分。

初级生产数量和时机的变化对北极食物链中的能量传递影响很大，最终会影响格陵兰岛周围鱼类、鸟类和哺乳动物的种群，并给格陵兰岛海洋生态系统的结构、生产率和开发潜力造成重大影响。



BRYAN & CHERRY ALEXANDER/ARCTICPHOTO



北极虾（学名：北方长额虾）是格陵兰岛目前最重要的海洋资源，占渔业总收入的70%以上。捕捞量逐年减少，目前约为每年150,000吨，其中90—95%是产自西格陵兰。

CARSTEN EGEVANG/ARC-PIC

格陵兰大比目鱼捕捞业始于19世纪末，当时伊路利萨特一带开始发展小规模沿海渔业。东西格陵兰的近海渔业直到1970年前后才开始发展。近期捕捞量（2007年为66,000吨）基本由西格陵兰沿海地区、西格陵兰近海地区和东格陵兰均分。



CARSTEN EGEVANG/ARC-PIC

## 渔业是格陵兰岛经济的支柱

格陵兰岛周围海域是重要的渔场，尤其是北极虾和格陵兰大比目鱼在格陵兰岛经济中起着重要作用。

对于这些渔业而言，海冰的存在是一个重要因素。由于冰层覆盖，一定时期内无法进入一些重要的捕虾场，而格陵兰大比目鱼的近海捕捞受到东西格陵兰海冰的限制。海冰还会影响沿海地区以捕猎和捕鱼为生的传统生计模式，尤其是冰层过薄以至于渔民和猎犬无法立足或冰层过厚以至于小船无法通行的情况。目前仍不清楚格陵兰冰原的融化对海冰的厚度和范围造成怎样的影响（见第13页）。

总体来说，与海温升高所带来的影响相比，格陵兰冰原融水产量的增加对格陵兰岛鱼群（尤其是近海渔场）的直接影响是微不足道的。但可能存在很多间接影响。环境变化已造成虾苗孵化与春季藻华（虾料）的时机之间配合不当，因此可能影响北极虾捕捞的作业强度。而对于格陵兰大比目鱼而言，由于它们在深海水体中产卵然后以幼体形式漂流到较浅、条件较为适宜的栖息地，因此洋流造成的影响可能会很大。



CARSTEN EGEVANG/ARC-PIC

伊路利萨特港的渔船

# 对人类社会的影响

格陵兰冰原是格陵兰岛的一个重要组成部分。自该岛有人居住时起，冰原的气候波动就对居住在其边缘的人群产生了巨大的影响。格陵兰岛远古爱斯基摩文化及后期图勒文化（逐渐演变为格陵兰岛现今的伊努特社会）的历史是一段不断适应气候变化以及与欧洲文化交往日益频繁的历史（见第20/21页）。

尽管考古学证据表明格陵兰社会的很多重大变化都是与重大环境变化一致的，但相互影响的过程非常复杂，而且自然环境变化本身引起的社会经济和文化变迁影响了社会对冰原未来变化的响应方式。过去的关联并不能用来预测冰原未来变化对现代格陵兰社会的直接或间接影响。

## 适应变化的漫长历史

包括格陵兰社会在内的北极社会在不断变化，而且在适应变化的能力上一直表现出极强的弹性。现在仍然如此，19和20世纪格陵兰岛经济的重大转变至少都在一定程度上与自然环境的变化有关（见时间轴）。

某个社会是否成功地顺应了自然环境的变化反应了环境变化与社会经济结构变化之间的相互作用。例如，与以单一资源（例如某一种鱼）支撑经济的社会相比，以多种资源支撑经济的社会不易受气候变化的影响。在西格陵兰康贾特萨克，当地经济多元化的程度足够高，因此过去70年内当地人群能够在多种活动之间进行转换，从而迅速适应环境变化：海豹和驯鹿捕猎—鳕鱼捕捞—鲑鱼捕捞—海豹网捕—鲑鱼捕捞—拖网捕虾—驯鹿捕猎并将旧渔船用于猎场往返运输—雪蟹捕捞—圆鳍鱼捕捞—鳕鱼捕捞。同在西格陵兰的乌玛纳克和乌培尔纳维克也有类似的例子，那里不断变化的海冰状况使得海冰捕猎和捕鱼十分困难，以至于当地人群乘船进行各种远海作业来适应变化。

随着交通和通讯条件的改善，旅游等新兴活动成为了新的收入来源，在一定程度上改变了依赖捕猎和捕鱼为生的状况。

19和20世纪格陵兰岛的经济发生了三次重大转变

## 方框。近期格陵兰岛渔业经济的转变

1890 1900 1910 1920 1930 1940 1950 1960 1970 1980 1990 2000 2010



格陵兰岛以海洋资源为基础的经济从海洋哺乳动物为主转向渔业为主，这是一次重大转变。这种转变与海温的显著升高和海洋哺乳动物总量的减少（以及世界鲸脂和海豹皮市场的萎缩）是一致的。大西洋鳕鱼成为主要经济物种。

渔业经济的第二次重大转变是从以大西洋鳕鱼捕捞为主转向以北极虾为主。这次转变的主要原因是格陵兰岛大西洋鳕鱼总量骤减。这是由几个因素引起的，其中一个很可能是观测到的海温下降限制了大西洋鳕鱼在格陵兰岛水域中产卵。

格陵兰岛渔业经济的第三次重大转变仍在继续，即转向更加多样化的渔业经济。这次转变无疑归因于目前的海温变化。尽管虾类捕捞仍然是经济的重心，但例如格陵兰大比目鱼和雪蟹等物种的重要性也在与日俱增。与可再生资源无关的活动对格陵兰岛经济的贡献越来越大。



BRYAN & CHERRY ALEXANDER/ARCTICPHOTO

### 冰原未来变化的后果

陆上和海上状况的变化会影响格陵兰岛上大多数人群的日常生活方式，尤其是在很大程度上依赖生计经济的人群。海上交通以及往返于格陵兰岛的海上运输对于捕猎、捕鱼和旅游业非常重要。废弃的定居点表明，并非所有人群都能够

适应变化。偏远农村社区的人群似乎尤为脆弱。捕猎驯鹿和麝牛等陆地哺乳动物是某些社区的重要生计方式，对融水排出形态造成影响的冰原变化可能会反过来影响动物的迁移。以维持生计为目的的海洋哺乳动物和海鸟捕猎也是一种重要的生计方式，尤其是偏远的小规模定居点。海冰和海温变化很可能导致食物链的结构变化，从而使部分物种较难捕猎而另一些物种较易捕猎。

格陵兰岛上的现代社会迅速发展，其中约80%的人口现已从事行政、教育等服务业。这类发展形态在格陵兰首府努克市等人口密集地区尤为显著。尽管渔业仍是该国大部分财政收入的来源，但人们对格陵兰岛巨大的原料潜力日益关注，包括油气、矿物和水电开发的潜力（利用格陵兰冰原产生的融水）。鱼类等可再生资源也会受到气候变化的影响，这是由其生存环境所受的直接影响造成的。另一方面，气候变化对不可再生资源的影响大多是通过可及性和运输的间接影响产生的。

冰原不断增加的融水产量已开始用于水力发电。格陵兰岛已有三座水电站投入运行，其他水电站正在规划中。虽然融



BRYAN & CHERRY ALEXANDER/ARCTICPHOTO

一位因纽特猎人正在用长柄网捕捉小海雀



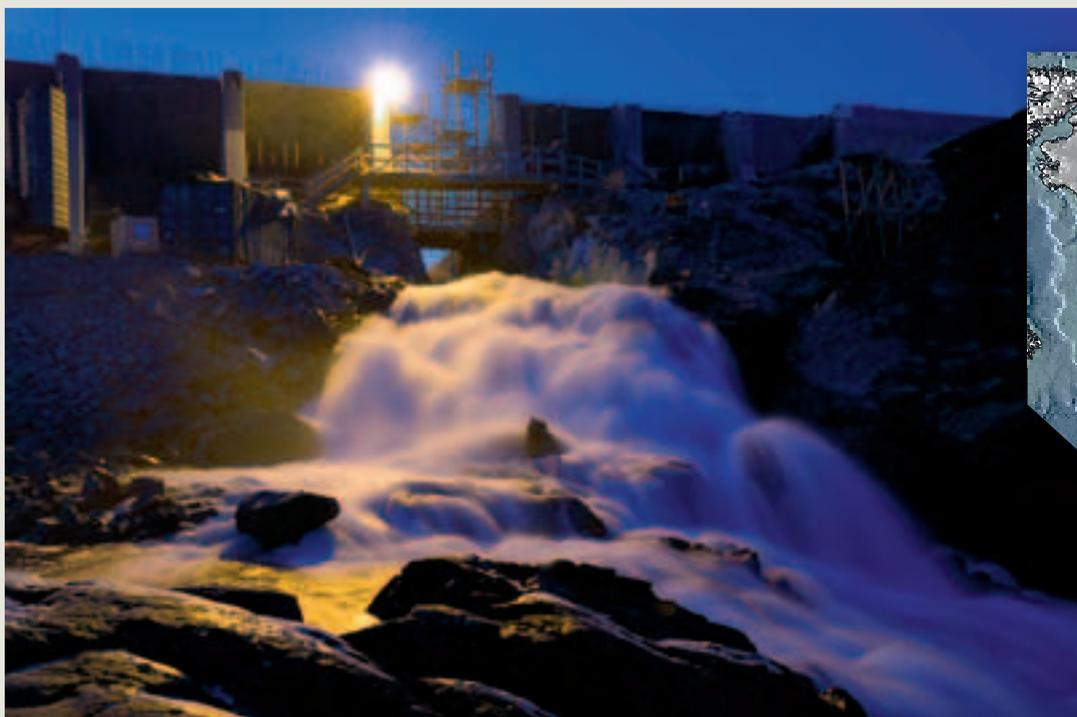
1973—1990年间，从西格陵兰Maarmorilik的黑天使锌铅矿共开采了1100多万吨矿石。在浅表矿石采尽之前，位于冰原边缘的这座矿山为当地经济做出了重大贡献。尽管附近埋藏了更高等级的矿石，但覆冰使得这些矿石难以开采。近年来冰缘处的显著回融提高了可及性，使开采以前被冰层覆盖的矿石成为可能。



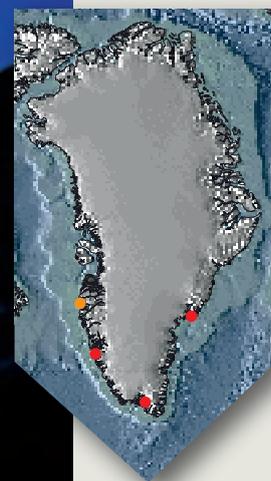
TOMMY HATTING SØRENSEN

冰有可能极大增加可用于水力发电的水量，但冰原边缘收缩时水电站的供水稳定性也是一个需要考虑的问题。格陵兰社会正以前所未有的速度发生变化，主要原因是全球化的影响。在这个背景下，一般认为格陵兰冰原变化带来

的直接影响很可能是极小的，至少在近期如此。长期情况是否也是如此仍有待观察，尤其是在气候变化给格陵兰岛在渔业和不可再生资源的经济依赖等方面带来重大变化的情况下。



IVARS SILLIS



- 运营中
- 在建

水电是格陵兰岛一种利用量逐渐增加的资源。这里的水电资源完全依赖于格陵兰冰原融水形成的流域。格陵兰岛已投入运营的三大水电站目前的发电量足以保证国内能源消耗量

的43%。第四家水电站很快将在西西米特附近投入运营，第五家水电站规划在伊路利萨特港附近

# 格陵兰冰原和伊路利萨特地区人类居住状态的变化

伊路利萨特冰河/瑟梅哥-库雅雷戈和伊路利萨特冰湾对该地区人类居住的形成有着巨大的影响。排入冰湾的富养融水使迪斯科湾一带具备良好的捕猎和捕鱼条件，构成了这里生命繁衍的基础。随着冰川前沿位置的进退，曾有很多史前捕猎区和定居点在这里设立和废弃。



山岭上的圆锥形石堆表示伊路利萨特地区数千年来有过人类活

## 伊纽特人定居点、伊路利萨特冰湾的文化变迁和作用

曾有很多人群来到该地区，在此定居从数年到数百年不等的时间，而后消失。因此，该地区曾几度无人居住。自从公元1,200年图勒人到来时起，该地区一直有人定居。图勒人在这里建立了两个繁荣的社区，即塞梅米尤特和Qaja社区。这两个社区居于格陵兰岛上最大的史前伊纽特人定居点之列，表明很长一段时间内这里拥有丰富、稳定而充裕的资源。

## 伊路利萨特冰湾及其对现今社会经济的影响

1741年，雅各布港（今称伊路利萨特）正式设立，由此使得1850年前后塞梅米尤特人口减少。目前，伊路利萨特的人口为4,000人，是格陵兰岛的第三大城镇。格陵兰岛一半的沿海渔业都是以这里作为中心。

丰富的资源和传统文化对环境条件变化的适应能力都是该地区繁荣的重要因素。然而，目前的环境变化似乎不如以前那样容易预测，而且存在更大的挑战性。这可能表明可用营养物发生了极大的变化，最终导致格陵兰大比目鱼和北极虾产量的变化。这两种生物极为重要，不仅对于人类捕捞而且对于构成当地人日常食物主要部分的海豹和鲸鱼，以及当地人喂养的雪橇犬也是如此。海鸟也是传统食物的一个重要组成部分。某些海鸟能否饲养成功及其分布也极易受气候变化影响。随着食物链的变化，其他物种也可能进入该地区，从而为经济活动带来有可能普及的新选择，但同时给已有物种带来了不确定的后果。在当今社会中适应这些变化的过程更为复杂，因为渔业已经高度产业化，而且形成了新的生产方式，这些生产方式不仅成本很高，而且需要国际参与并制定管理、可及性和权益方面的法规。海冰覆盖的变化——尤其是冬季海冰的减少——会不可避免地影响以维持生计为目的的捕猎和捕鱼行为，还有可能影响海上运输并可能增加商品鱼群的开发程度，从而也使渔业发生变化。因此，气候变化给格陵兰冰原带来的变化与冰冻圈其他部分的变化息息相关。

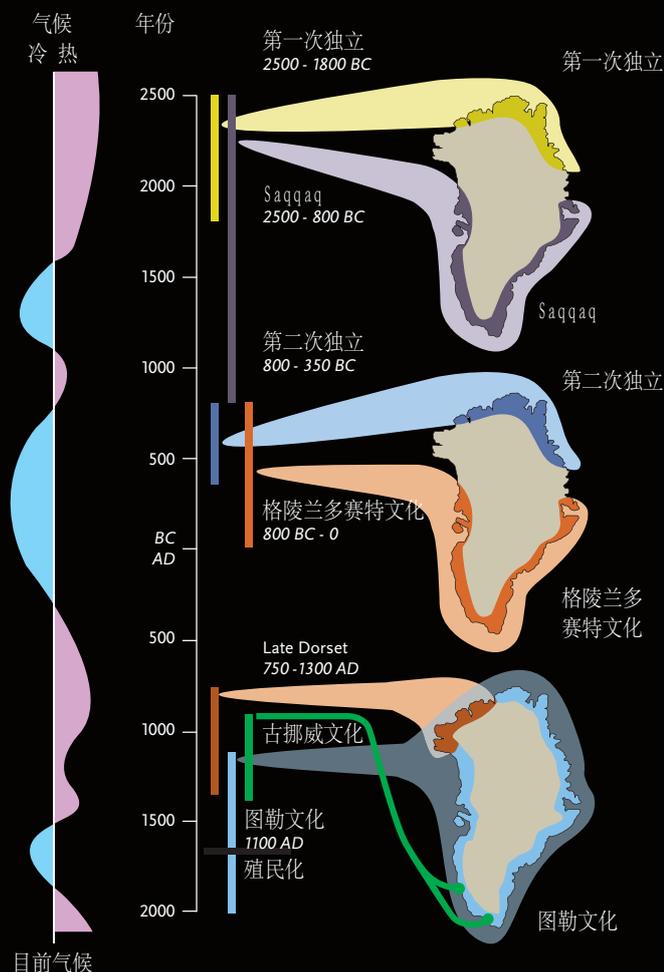
格陵兰冰原变化的不可预测性使得难以针对影响做出计划并加以控制。同时，管理不善可能会造成严重、不可挽回的损失。

## 冰湾及其对科学、政治和旅游的影响

伊路利萨特冰湾拥有世界上研究最为透彻的冰川之一。19世纪中叶，H. J. Rink率先对该冰湾进行了研究，他的工作成果为第四纪冰川作用理论奠定了基础。气候变暖给该冰湾带来了巨大变化，因此它仍然是国际研究的课题。

2004年，伊路利萨特冰湾被指定为联合国教科文组织世界遗产之一，是对该地区唯一性以及自然与文化之间广泛相互影响的认可。该地区因此成为格陵兰岛最著名的游览胜地之一，一半以上来格陵兰岛的游客都会游览该地区。

各种文化将格陵兰岛作为殖民地的年表以及过去4500年的广义气候曲



KONRAD STEFFEN



CARSTEN EGEVANG/ARCTICPIC



BRYAN & CHERRY ALEXANDER/ARCTICPHOTO



CARSTEN EGEVANG/ARCTICPIC



CARSTEN EGEVANG/ARCTICPIC



BRYAN & CHERRY ALEXANDER/ARCTICPHOTO



# 结语

格陵兰冰原只是北极冰冻圈的多个组成部分之一，北极冰冻圈发生的各种变化是与气候变暖有关的。SWIPA项目 ([www.amap.no/swipa](http://www.amap.no/swipa)) 正在研究气候变化可能对北极冰冻圈的各个组成部分、北极乃至整个地球有着长远的影响。

SWIPA项目的工作分为三个主要部分(即北极海冰、格陵兰冰原、陆地冰冻圈)

，其中陆地部分进一步分为4个子部分(积雪、永久冻土、冰川和冰帽、水文)。每个部分 / 子部分的评估报告都将在2010年编制并于2011年春提交给北极理事会。根据各份评估报告的主要结果编制的综合评估报告也将在2010年编制并于2011年春提交给北极理事会。

