
*** 学科发展 ***

冰冻圈与全球变化

施雅风* 程国栋

(兰州冰川冻土研究所)

〔摘要〕 本文简要地阐述了冰冻圈的定义与分布并详细地讨论了冰冻圈与大气圈、水圈、岩石圈、生物圈等的相互作用,本文最后还对冰冻圈今后的主要研究内容提出了建议。

一、冰冻圈的定义与分布

地球上在一定低温条件下由固态水(冰川、积雪、海冰、河冰、湖冰、多年冻土和季节冻土等)所组成的特殊圈层,称为冰冻圈(Cryosphere),它有时被作为水圈(Hydrosphere)的组成部分,有时因固态水的特殊作用而被独立出来,和大气圈、水圈、岩石圈、生物圈一起组成地壳表层的五大圈层。当前,多年冰复盖了全球海洋面积的 7%,陆地面积的 11%;多年冻土占据了陆地面积的 24%;季节性冰雪在 1 月复盖陆地面积的 15%,在 7 月复盖 9%;而季节冻土更为广泛。冰冻圈主要分布于高纬度两极地区,在中、低纬度高山、高原也广泛存在,特别以青藏高原为主体的高亚洲的冰冻圈在全球变化中有其独特的地位。

二、冰冻圈和大气圈的相互作用

由于冰雪的反射率(0.7—0.9)比土(0.1—0.25)和水(0.05—0.10)大得多,又由于冰的融化热和水的汽化热分别是同体积液态水升温 1℃ 所需热量的 80 和 539 倍,因而冰冻圈在地表热量平衡中有举足轻重的作用,每年到达地面的太阳能大约有 30% 消耗于冰冻圈中。因此,冰雪下垫面变化(主要是冰盖、海冰和积雪的收缩与扩大),在以能量平衡为基础的气候模式中有重大作用。近来的研究已指出青藏高原积雪异常对东亚大气环流、印度降水以及长江中下游梅雨都有相当大的影响。在 CO₂ 增加引起的全球增暖过程中,大尺度、高反射率的正反馈作用必需给予足够的重视。冷圈是气候的产物,又反过来通过近地面、空气和土中的水热平衡影响气候条件。如夏天活动层融化时冻土吸收大量的热,冻土又滞留了大量的水分,随着气候转暖,活动层的增厚和土温的提高将使大量含水土参与局部的能量平衡,而增加的蒸发将使云量的多少、时间和类型发生改变,从而对整个能量平衡产生重大影响。

由于还不很清楚的某种原因,冰川和多年冻土都对气候变化有较高的灵敏度。如亚洲中部冰川普遍的后退和物质平衡明显负值增长的趋势,指示气候暖干化,而阿拉斯加太平洋岸冰川

* 学部委员、地学部副主任。

伴随温度升高物质平衡正值增加则指示了气候的暖湿化。多年冻土钻孔中地温垂直廓线能如实反映地表温度的长期趋势,阿拉斯加北缘的巴罗、汤普森角等地直到地下 100 米处的温度自 19 世纪中叶以来已升高 4°C ,而且 1950 年后又曾降温 1°C ,远大于中低纬地带的温度变化。青藏高原的气候变化比东部地区早若干年出现,则已为冰芯、树轮和气象台站的观测资料所证实。所以在全球变化研究中必须加强对冰川和冻土的监测,而在青藏高原建立若干监测点尤其重要。不论在极地或在高亚洲,人口和气象台站都很稀少,交通不便,除建立必要的少数观测站外,充分利用现代实时遥感资料与地面工作相结合是最基本的监测手段。

三、冰冻圈与水圈的水分循环

从上世纪小冰期结束以来的百多年间,全球性的气候变暖,导致世界大部分冰川消融加剧而后退,海水热膨胀和冰川融水增加是近百年世界性海平面上升的基本原因。不同研究者计算的 1880—1980 年海平面上升量在 $0.9\text{--}2.3\text{mm/a}$ 间,一般取 $1.0\text{--}1.5\text{mm/a}$ 。近年海平面上升有加快趋势,冰川融水的贡献主要来自南极和格陵兰两大冰盖以外的山地冰川,可达 $0.4\text{--}0.5\text{mm/a}$,其次是格陵兰冰盖为 $-0.1\text{--}0.3\text{mm/a}$,而对南极冰盖的估计出入很大,从 $-0.8\text{--}0.87\text{mm/a}$ 。对到 2100 年海面上升量的计算,不同研究者提出了 $0.10\text{--}3.68\text{m}$ 的出入较大的推算结果,有些研究者认为取 $0.5\text{--}1.0\text{m}$ 为最佳估计。1990 年秋季第二届国际气候大会宣言选取到下世纪末温度上升 $2\text{--}5^{\circ}\text{C}$,海平面上升值为 $65\text{cm}\pm 35\text{cm}$ 的估算值,同时声明预测值在时限、幅度和地区型式上有很大的不确定性。对冰川融化导致海面上升的推算量,山地冰川为 $0.8\text{--}3.2\text{mm/a}$,格陵兰冰盖为 $0.5\text{--}3.9\text{mm/a}$,南极大陆为 $-0.9\text{--}7.0\text{mm/a}$ 。对未来海面上升推算的不确定性,在一定程度上是由于对南极大陆冰盖情况不够了解,因而出现了正负值不同的估计。争论的焦点在西南极冰盖方面,该冰盖一部分贴着于海面下 500 多米深处的基岩上,一部分是从冰盖伸向海洋的冰架,只有不大的范围内出露基岩,因此被称为“海洋冰盖”(Marine Ice Sheet),它的崩塌和融化受大气和海洋的双向作用。在海面趋于上升的时代,更显得不稳定,这部分冰盖的“崩塌”可使全球海面上升 6 米多。为了预测西南极冰盖在今后数年至数世纪内对海面上升的影响,美国学者正酝酿组织一项投资约 2500 万美元的联合冰川、海洋、大气、地质和地球物理等多学科的五项研究计划,并邀请国际同行参加。我国的南极研究,在设置长城站(靠近西南极半岛)和中山站(东南极)后,有了基本的工作条件,应将研究项目与世界和国内的全球变化研究结合起来,以期更为有效地工作。在 9000—5000 年前的全新世气候最宜期,我国东部大陆平均气温比现在高 $2\text{--}3^{\circ}\text{C}$ 或更多,海平面也高 2—3 米。渤海湾周边,苏北至杭州湾和珠江三角洲大片肥沃富庶的平原曾没入海中。这样的高海面重现并不排除在上述研究推算的下世纪海平面上升数值之外,如果再考虑到滨海三角洲平原由于自然的和人为的(大量抽取地下水)下降趋势,我们必须更加重视研究全球变化中的海面变化问题并预筹对策。

固态水在山地冰川中滞留时间即代谢率一般为 100—1000 年,在大陆冰盖中为 10000—100000 年。因此冰川是巨大的固体水库,它蓄积了全球淡水资源的 85%。在亚洲中部,干旱地区的冰川尤其显得重要。冰川对河川径流量的调蓄作用,使有冰川补给的河川径流量年际变率远小于无冰川补给的河流。随着气温变暖,冰川退缩,固体水库的作用日益减少。从小冰

期首次冰川前进以来,年均温度上升 1°C 左右,天山乌鲁木齐河、祁连山水管河流域的小冰川已缩去将近43—46%,雪线升高130—140米。如果在下个世纪中期, CO_2 倍增时全球气温比现今升高 $3^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$,经过一段滞后时间(10—100年),亚洲中部高山冰川必然会大量消失,而对水资源产生大量的不利影响。在若干冰湖溃决与冰川泥石流多发的地区(喜马拉雅山区和西藏东南部),因冰川融水的增加,灾害也会相应加剧,多年冻土与地下冰的萎缩退化,会造成地面大幅度下沉,破坏工业和民用设施。

四、冰冻圈与岩石圈的相互作用

地处中低纬度远离海洋的高亚洲存在11万平方公里的冰川和近200万平方公里的多年冻土,这显然是喜马拉雅、喀拉昆仑、天山等几个山系在第四纪强烈隆起导致地面进入冷冻圈的结果。第三纪末期的高原高度不过1000米左右,只是到中、晚更新世高原升至3000—4000米以上时,冰川才得以大规模发展。已知的地质和地貌证据表明高原未曾形成过统一的冰盖。而以高原冰盖触发第四纪冰期的假说更是无稽之谈。但是晚更新世以来青藏高原和喜马拉雅的加速隆升则可能和冰期后气候迅速变暖、冰川大半消失卸荷作用有关。根据古冰斗高度所指示的古雪线变化的异常现象,我们曾指出从珠穆朗玛冰期(相当于末次冰期和倒数第二次冰期之和)至今,珠穆朗玛峰的上升量较其北侧高原大700米左右,较其南侧尼泊尔境内相距50—70公里处山地高1000米左右。根据相距不远的冰斗骤然升降情况,也可以得到断层活动的补充证据。至于冰川磨蚀和堆积作用,修蚀与塑造特殊的冰川地形,更是人所共知。需要指出的是冰川地形越新越是清楚鲜明,越古越是隐晦,本是地质上的常识,但近来有人认为青藏高原保存有早更新世冰盖的大量遗迹,而中晚更新世的冰川现象反不清楚,并被誉之为大发现,真是匪夷所思。南极大陆和格陵兰岛在数千米厚的冰盖重压下,有相当大部分冰盖底下的基岩面下沉至海平面以下,而冰盖的变薄消失,使基岩面回弹上升。在北欧和加拿大,第四期末次冰盖消失以后,已经上升数千年,迄今仍未停止,山地冰帽或大冰川对地壳升降的影响迄今还缺乏认真的研究,青藏高原应是开展此项研究的好地方。

大量天然气水合物的存在是近年来的一个新发现,其形成需要低温和高压的条件,通常见于海底和多年冻土区。估计目前有1.1万GT(gross ton)碳储存于海洋沉积中,400GT碳储存于多年冻土区。由于天然气水合物的稳定带在这些地区埋藏较浅,所以易受地表温度和压力变化的影响而分解或重新生成。冰川和多年冻土的发展和退化,及由此而引起的海平面的升降都极大地改变了地表的温度和压力条件,从而导致天然气水合物的分解或重新生成。由天然气水合物分解而释放的甲烷及随后氧化而生成的 CO_2 ,进入大气圈后对大气的组成有极大的影响。末次冰期最盛时,大气中 CO_2 的含量为182PPMV,而在工业革命前为280PPMV。南极东方站的资料也表明,末次冰期大气中甲烷含量为0.32ppmv,而以后的间冰期为0.62ppmv。这意味着从冰期到间冰期的几千年期间,大约有2000亿吨碳进入大气圈。一些学者认为,这一现象与冰川和多年冻土退缩而引起的天然气水合物的分解有关。有的还认为,人造卫星在苏联本尼特岛上发现的150多个羽毛状物体,可能就是甲烷从天然气水合物中释放出来后留下的痕迹。由 CO_2 和甲烷浓度增加而引起的气候转暖,将进一步加速天然气水合物的分解,从而加速增温,对这一与冰冻圈变化有关的正反馈机制今后应加强研究。

多年冻土的存在从根本上改变了冻土区地下水的补给、径流和排泄条件,所以冻土区的地下水从来就是按其与冻土的关系而划分的。随着气候转暖,多年冻土厚度发生变化,该地的水文地质条件也将极大地改变,这点必须加以考虑。

气候转暖也将引起冻土中地下冰融化和冻融作用的改变,从而极大地改变该地的工程地质条件,造成冻土区各种工程设施的破坏。特别是我国多数冻土属高温冻土,且已经采用的设计原则为保护冻土,气候转暖将极大地威胁到现有冻土上建筑物的稳定性,并对保护冻土的原则是否适用于现在的高温冻土区提出了疑问。

五、冰冻圈与生物圈的相互作用

冰冻圈的低温减少了生物活动性,所以冰冻圈内的生态系统十分脆弱,一旦破坏,恢复十分缓慢。多年冻土上部的活动层是为植物生长提供水分和养分的场所,而其下的多年冻土则起隔水作用,并且阻止了植物根系向深处生长。活动层的冻结及伴随的冻胀作用能造成植物根系的力学破坏,而植被的存在又反过来保护了多年冻土。

随着气候转暖,作为隔水层的多年冻土的上限将下降,甚至消失,从而使活动层中水分向深处流失,可能导致草场退化和沙漠化,这一迹象在青藏高原已有所表现,应加强观测研究,制定对策。

通常认为冰冻圈的植被,特别是苔原是吸取 CO_2 和甲烷的汇。随着气候转暖,以往冻结的生物体如泥炭等将加速分解和氧化而大规模地释放 CO_2 和甲烷,从而增加大气中温室效应气体的含量,加速气候变暖,这一正反馈机制必须着力加以研究。

六、冰冻圈储存有高分辨率的气候和环境变化的记录

在两极冰盖和高山冰帽中储存着远到数万年乃至数十万年的连续可靠的高分辨率的气候和环境记录。60年代格林兰世纪营地冰芯的氧同位素温度记录,早为竺可桢引用来和他的物候温度记录比较。近年最受人称道的是南极东方站苏联与法国科学家合作对2038米的冰芯进行分析,取得了16万年来同位素温度和 CO_2 浓度变化的记录。它表明上次间冰期出现于距今14—11.6万年间,最暖期温度高出现代(-55.5°C) 2.5°C 左右,末次冰期出现于距今11.6—1.3万年间,由3个特低的冷期间隔和2个相对暖期组成,最冷期温度比现代低 9°C 左右,出现于第三个特冷阶段。全新世高温期的温度高于现代不到 2°C 。15万年前倒数第二次冰期后阶段温度还略低于末次的最冷期。对冰芯中所含气泡的 CO_2 含量测定得知,冰期时大气中 CO_2 值变化在190—240ppmv间,而上次间冰期时平均值为272ppmv,全新世时为263ppmv,它与氧同位素温度变化间存在很高的相关性,但也不是完全一致。从冰期向间冰期过渡时,二者同步变化,而从间冰期向冰期过渡时,温度迅速转变, CO_2 则缓慢变化。上述 CO_2 大幅度变化的原因还不很清楚,但可以肯定,它在气候变化中具有重要作用。美国Ohio州立大学极地研究中心和兰州冰川冻土所合作,对祁连山敦德冰帽海拔5325米处的140米长度的冰芯进行分析,在高亚洲首次获得了万年以上进入末次冰期的氧同位素、温度、尘埃、冰晶体、化学成分等多方面的环境信息资料。在孔深129.2米以下氧同位素值急剧降低(2‰)、尘埃微粒的急速增加(比全新世时高4—8倍)、冰晶的缩小等等,都表明是寒冷多风的冰期沉积,推算时间在距今11950年之前。氧同位素曲线揭露出末次冰期中的相对暖阶段(30000—38000a.B.P)

尘埃沉积较少, 也较湿润。而 30000—12000 a. B. P 间, 尘埃陡增, $\delta^{18}\text{O}$ 值下降 CL-1 与 SO_4^{2-} 浓度增加, 表明了晚冰期 (LGS) 的来临。而在晚冰期向全新世过渡时, 尘埃微粒 ($\geq 2\mu\text{m}$) 总数在 40 年内从 $6-9 \times 10^5/\text{ml}$ 急降至 $2-3 \times 10^5/\text{ml}$, 反映了包含风强度在内的环境突变。最触目的现象是近 60 年的 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 含 1940、1950、1980 三个最暖年代在内是有记录以来的最暖时期之一, 这标志亚洲中部确是全球气候变暖的先行地区。敦德冰芯记录在 117 米深度内可以分辨出年层厚度, 时间约为 4550 年, 据此姚檀栋绘制了 5000 年来 $\delta^{18}\text{O}$ 变化曲线, 与中国东部的竺可桢物候温度曲线相比较, 二者趋势相似, 但是前者远比后者复杂, 出现了十多次百年级的气候波动, 从中还可以捕捉到更多的细节, 如 13 世纪、8 世纪、3—5 世纪的暖期, 1900—2500 a. P. 的多世纪暖期, 但在 3600—500 a. B. P 间却以冷期占优势。自 1700 年以来, 敦德冰芯中年积累变化曲线 (反映降水量的波动) 与祁连山区树轮反映的干湿波动趋势也是一致的, 但冰芯可定量到毫米级, 近 300 年来平均年积累量低于 400 毫米, 最低年和最高年出入于 300—500 毫米间。以上说明, 冰芯所含的气候与环境变化信息是现代各种沉积物中最丰富、记录最精确的代用记录, 在青藏高原有很大的发展前途。最近用雷达探测得知西昆仑山古里雅冰帽的冰厚度在 260 米左右, 在这里进行冰芯研究, 有可能取得 10 万年左右的历史记录。看来建立一个完整的冰芯实验室, 在我国全球变化研究中是刻不容缓的重要任务。此外, 利用多年冻土区钻孔的温度剖面推测古地表温度在国外已获得成功, 在国内尚待努力。冰冻圈中各种冰缘现象如古冰川遗迹、冰楔、土楔、分选多边形等从不同侧面反映温度、降水、冻融频率等气候因素, 也可据此作为推测古气候与环境的代用资料。

综上所述。冰冻圈是地球系统中的一个子系统, 是全球变化中的一个重要环节。冰冻圈研究对古气候与环境的重建、现代各圈层的相互作用、气候模式的建立以及未来气候和环境变化的预测都有重要作用。当前, 我国冰冻圈的研究 (以高亚洲为主, 兼及南极地区), 应集中在下述方面:

(1) 重点发展冰芯研究, 建立冰芯实验室。在 90 年代, 打 3—5 个深孔, 重建高亚洲上次间冰期以来精确的气候与环境变化序列, 和其它地区、其它代用资料比较, 明确高亚洲在全球变化中的位置与所起的作用。

(2) 以设站、考察和多种遥感监测手段, 监测冰川、积雪和多年冻土的收缩和扩展对全球气候的响应和反馈, 建立相应的冰—气关系模式, 预报下世纪气候变暖条件下冰川、积雪、冻土与湖、海冰的退化情况及其对水资源和人类生活的影响, 测量深钻孔中的温度变化和冻土退化, 地面甲烷排放变化, 用以估计其对全球变暖的影响。

(3) 密切注意海平面的变化。研究中纬度山地冰川融化对海面上升的影响, 利用长城站的条件, 尽可能参加国际研究西南极冰盖变化计划, 及早掌握海平面变化趋势, 为制定海岸地带的防御规划贡献力量。

(4) 基本查明高亚洲第四纪冰川分布与规模, 与地质学、地球物理学、大地测量学者合作, 阐明冰川的收缩扩张与高亚洲在不同时段隆起速度的关系。

(5) 冰冻圈科学有高度国际性, 青藏高原已成为国际地球科学家注目的“热点”地区, 我们要精心挑选高水平的、在经济上或仪器设备上能给我们以支持并能长期共事的学术单位和科学家来与之合作研究, 共同提高。不能来者不拒, 更不能谁出钱就接待谁, 国内派出的研究技术人员也应慎重挑选。