

Study on Recent Change of Glacier*

Zichu Xie^{1#}, Yanan Dai¹, Xin Wang²

¹Resources and Environment Sciences College, Hunan Normal University, Changsha

²Department of Geography, Hunan University of Science & Technology, Xiangtan

Email: #xiezc@hunnu.edu.cn

Received: Mar. 12th, 2012; revised: Mar. 19th, 2012; accepted: Mar. 21st, 2012

Abstract: The global glacier area is 16 million km² and there is 60 thousand km² in China. The steady and high accuracy information about the old climate and environmental change that stored in glaciers can be got by ice core studies. Chinese studies in ice core of alpine glacier have been equivalent to the world advanced level. The glacier responses to climate change sensitively, which mainly reflected in the fluctuation of mass balance, and there have 226 glaciers been monitored about glacier mass balance in the world. In recent decades it shows the increasing negative mass balance. The change information about the glaciers in vast area in recent decades can be got by comparing the satellite remote sensing data with the glacier inventory data. Preliminary results suggest that the glacier area in the northwestern China has retreated about 4.5% in recent thirty years, among which the edge of mountains retreats faster and the northwestern Tibet Plateau retreats the slowest. The tendency of glacier change can be forecasted by the application of the model of glacier system. That has no evident difference compared with that of the recent change of glacier.

Keywords: Ice Core Study; Mass Balance; Glacier Change; Forecast the Variation Tendency

冰川变化研究近况*

谢自楚^{1#}, 戴亚南¹, 王欣²

¹湖南师范大学资源与环境科学学院, 长沙

²湖南科技大学地理学, 湘潭

Email: #xiezc@hunnu.edu.cn

收稿日期: 2012年3月12日; 修回日期: 2012年3月19日; 录用日期: 2012年3月21日

摘要: 全球冰川面积 1600 万 km², 中国冰川面积约 6 万 km²。冰川中储存了古代气候与环境变化的大量的精度高的信息, 它可通过冰芯研究取得。中国在高山冰川的冰芯研究已处于世界前列。冰川对气候变化的反应敏锐, 主要反映在物质平衡的波动上, 全球现已有 226 条冰川进行了冰川物质平衡的监测。近数十年来表现为不断增大的负平衡。应用卫星遥感资料与冰川编目数据对比可以获得广大地区冰川近数十年的变化资料, 初步结果表明, 中国西北冰川面积在近 30 年中约退缩 4.5%, 其中边缘山脉退缩较快, 青藏高原西北部退缩最慢。应用冰川系统模型可以预测冰川未来变化趋势, 与冰川近期变化的实况对比, 差别不大。

关键词: 冰芯研究; 物质平衡; 冰川变化; 趋势预测

1. 引言

全球冰川总面积约 1600 万 km², 占地球陆地面积

11%, 冰川总储量约 3000 万 km³, 占全球淡水资源 3/4, 因此冰川是地球上五大圈层之一冰冻圈的主体, 它在地球的环境演化中有着举足轻重的作用。冰川的存在不仅为人类提供最丰富的淡水储存, 而且极大的影响地球上的水循环, 海平面的升降, 气候的分带及变化,

*基金项目: 国家自然科学基金(41140004, 40871043), 湖南省重点学科建设项目(2008001)。

#通讯作者。

以及地壳的均衡运动和地貌演化过程。因此冰川学是地球科学中不可或缺的重要内容^[1]。

中国是世界上首先记录冰川现象的国家，早在公元 629 年，唐朝的玄奘开始了他漫长的西行南下取经的路径，他的弟子在途径天山的冰川作用区时，就对冰川的表面现象及遇到的雪崩情况作了生动的描述^[2]，在欧洲，虽然早在 13 世纪，古冰岛人就有关火山爆发引起冰川洪水灾害的记述，但直到 19 世纪初才由瑞士人 Agassiz 在阿尔卑斯山建立了第一个冰川站，对冰川的物理性质进行了观测，开创了近代的冰川学。因此作为一门学科来说，冰川学建立的历史只有 200 多年。

冰川学发展的初期是以描述记载冰川的各种表现为主，到了 20 世纪中期，在对冰的物理性质进行实验研究之后，冰川学兴起地球物理研究方向，并成为国际性的研究对象，在第三次国际地球物理年(1957~1959)及国际水文十年(1965~1974)两次国际研究计划之后，突出了冰川学的水文研究方向。上世纪 80 年代以后，随着人们对由于人类活动引起的全球性气候与环境变化的认识加深，冰川学的研究便很快融汇到全球变化研究的大军中，这是因为冰川不仅是气候变化的最敏锐的指示者，也是过去气候与环境变化的准确记录者，而且还是气候与环境变化的重要反映者。

在全球冰川绝大部分集中在南极和北极格陵兰两大冰盖中，其余分布在极地岛屿和高山上，称为“小冰体”，它的面积只占全球的 3.55%，储量不到全球冰川的 0.4%。中国是世界上中低纬度山岳冰川最多的国家，冰川总面积 60,000 km²，冰储量 5600 km³，1958 年，中国正式开始对现代冰川的研究，这比欧美国家迟得多，但在国家的支持和冰川学者的努力下，发展很快。初期偏重于冰川地理学方面研究^[3,4]，在对中国各的山区冰川考察的基础上，完成了中国冰川的系统编目^[5]。

进入上世纪 90 年代后，中国冰川学者紧跟国际冰川学发展的前沿领域，迅速发展冰川学的气候与环境方向的研究，建立了从冰芯与寒区环境扩大为冰冻圈科学国家重点实验室，同时又开展了对中国冰川的第二次全面调查。这些都为冰川对气候的响应研究提供了很好的平台，大量的研究成果在国际上出现，为国际冰川学研究做出了重大贡献^[6]。

2. 对气候与环境记录的研究

冰川是大气降雪在地球表面不断积累变质成冰，并且不断移动，在低处消融的自然体。在它的积累区保存了大量过去气候与环境变化的信息，如温度、降水、二氧化碳、甲烷、尘埃、化学物质，以及有机物质。这些信息的获得主要是通过冰川上钻取冰芯，分析得到的，简称冰芯研究。极地冰盖中心冰的厚度达 3000~4000 m，是数十至上百万年以来大气降雪逐年积累起来的，这里的冰芯中包含了远古以来连续的高分辨率的气候与环境变化的信息，突出的是采自南极中央俄罗斯东方站的冰芯。为取得这里的冰芯，从 20 世纪 60 年代开始便在那里打钻取样，经过多次挫折及停顿，和近半个世纪的努力，现在终于打透 3700 多 m 的冰层，到达封闭达 2000 多万年的冰下湖面。东方站冰芯记录提供的是全球范围的大气记录，冰芯的分析是俄罗斯与法国冰川学者合作完成的，其阶段性结果陆续多次发表。

图 1 中 $\delta D(\%)$ 反映的是大气温度的变化，可见在 40 多万年间，地球上经历了四次大的冰期 - 间冰期的气候转回变化，与此同时，大气中的二氧化碳(CO₂)也发生了相应的变化，这个现象可似乎解释近代全球转暖与 CO₂ 增加有关，但冰川学者对此存在着很大分歧，从前几支冰芯记录来看，很难分辨 δD 与 CO₂ 谁因谁果，许多科学家认为 CO₂ 是因， δD 是果，但有些科学家认为 CO₂ 滞后于 δD 的变化，认为应是温度变化是因，CO₂ 的变化是果，它反过来又加剧了温度的变化，这个观点与目前认为 CO₂ 的增加是人类社会工业化以来大量燃烧化石产品的结果的认识还存在着矛盾，这有待科学家们深入研究。

受到深岩芯记录的鼓舞，许多国家联合或单独在南极和格陵兰冰盖相继进行钻取深钻孔冰芯的竞赛。中国南极的昆仑站位于南极中央最高点冰穹 A，该处冰层厚度达 4000 m 以上，可望获得 100 万年以来的冰芯记录。

从 20 世纪 80 年代中期以来，中国便与美国合作在青藏高原的冰帽上开展冰芯研究。中国第一支祁连山的敦德透底冰芯，揭示了过去 5000 年的温度变化^[7]，取自西昆仑山的古里雅冰芯，深达 300 多米的冰床，可以恢复末次间冰期以来的气候变化^[8]，记录了在末次冰期至全新世过渡期间(新仙女木事件)温度

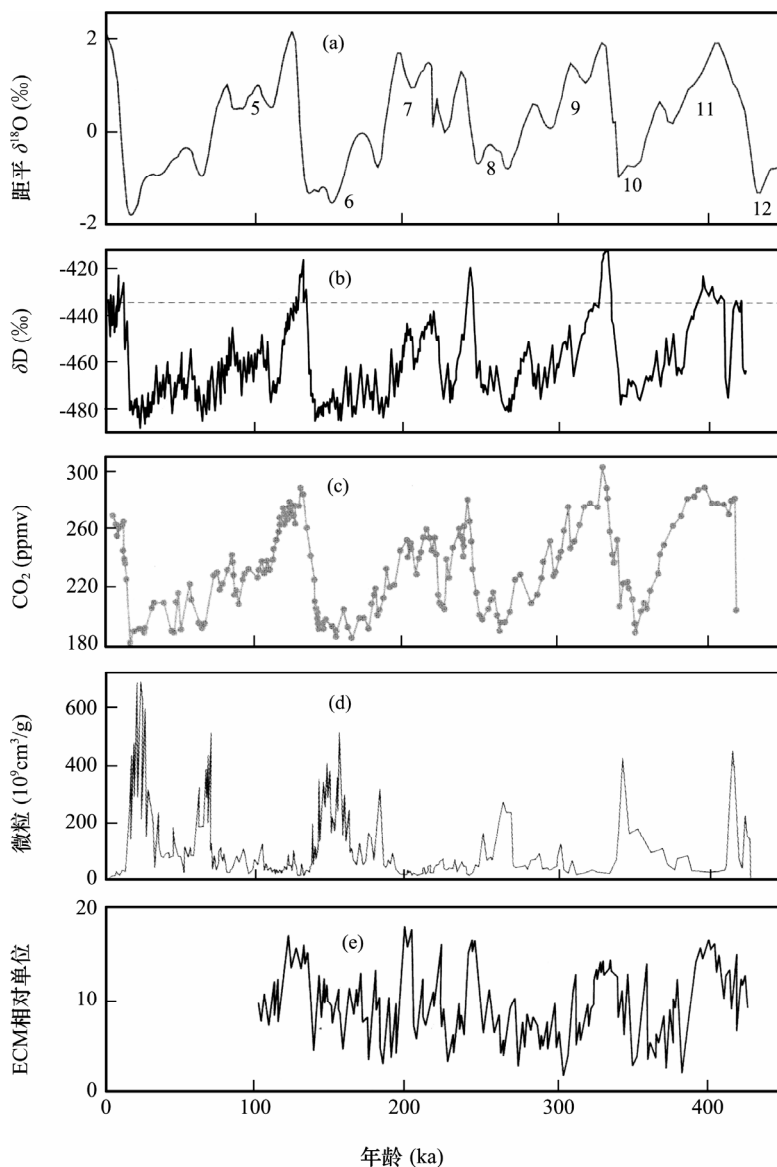


Figure 1. Four changes of climate from the ice core of the east station
图 1. 东方站冰芯反映的四次气候

变化的剧烈性^[9]。取自希夏邦马峰海拔 7000 m 的达索普冰芯记录了过去 400 年印度夏季风降水变化历史^[10]。现在青藏高原的冰芯研究遍及高原中、西、南部许多著名的冰帽及高峰,如马兰雪山,普若普日冰原,慕士塔格峰,纳木那里峰,珠穆朗玛峰的东绒布冰川等,冰芯记录涉及二氧化碳、甲烷、大气沉降、大气污染等许多方面的信息,在山地冰川的冰芯研究方面中国已处于世界前列。

3. 冰川的物质平衡

当冰川的消融大于积累时,冰川的物质平衡产生

负值,冰川就要退缩,因此,物质平衡是控制冰川变化的直接因素。对有代表性冰川进行物质平衡的长期的有系统观测是监测冰川变化的有力手段。联合国环境署,(UNEP)和教科文组织(UNESCO)等在瑞士建立了世界冰川监测服务处(WGMS)长期系统收集全球有关冰川物质平衡、末端变化等资料,定期向世界发表,全球有冰川末端变化的冰川有 1800 多条,冰川物质平衡观测的冰川 226 条,观测系列最长的冰川多分布于欧洲^[11]。

中国天山乌鲁木齐河源 1 号冰川从 1959 年起开始了对冰川物质平衡的系统观测,该冰川已被列入全

球重点监测冰川, 现在已有物质平衡观测的冰川散布在祁连山、贡嘎山、唐古拉山, 喜马拉雅山和念青唐古拉山等, 虽然这些地区观测系列较短, 但在物质平衡的理论研究方面取得不少进展, 如提出季风和内陆冰川属于暖季补给型冰川^[12], 零平衡高度处的物质平衡等于整个冰川的平均物质平衡^[13]等, 乌鲁木齐河源 1 号冰川半世纪以来冰川物质平衡长期为负值, 并有增大的趋势与冰川末端的退缩及冰川面积的减少十分对应^[14]。

根据 WAMS 提供的有关物质平衡的资料, 有的冰川学者对 1960 年以来全球冰川的变化及其对海平面上升的影响进行了全面评估^[15], 表明高亚洲冰川的退缩在全球处于中等水平。负平衡最大的冰川分布于北美洲太平洋沿岸山脉和欧洲阿尔卑斯山, 较小的在加拿大北极岛屿, 高加索山和阿尔泰山。在斯堪的纳维亚半岛, 近 30 年来累计物质平衡还出现了微弱正值^[16]。

4. 冰川面积变化

从本世纪初开始, 国际上推行了全球陆地冰川监测计划(GLIMS), 利用地球 Terra 卫星搭载的高级发射与反射辐射表(ASTER)及陆地资源卫星(Landsat)的测量数据源, 在数字高程模型(DEM)及地理信息系统(GIS)的配合下, 进行冰川编目及动态监测, 可以得到冰川面积及一些主要表面特征的资料, 与已有第一次冰川编目的数据对比可以得到广大地区冰川在近数十年变化的数据。美国地质调查局编的世界冰川卫星影片地图集^[17]也为冰川变化的研究提供了新的平台。

现在各国冰川学者普遍利用卫星遥感这个新的技术广泛开展冰川变化的监测。俄罗斯冰川学者最近在总结前苏联境内冰川变化时, 应用卫星影像和重编的冰川编目资料得到俄北极冰帽、高加索山、帕米尔、天山、阿尔泰山、远东堪察加半岛冰川约半个世纪的面积变化数据^[18]。

中国从 21 世纪初开始加强了对中国冰川变化的监测, 对 15 个试验区^[19]的卫星监测结果发现中国冰川变化的差异很大, 从数十年变化的速率来看, 最小的为每年 -0.01% 到 -0.1% , 大的为 -0.26% 到 -0.5% , 前者主要分布于高原中、西部及中央天山等冰帽及大冰川集中区。后者主要分布于青藏高原东北部, 祁连山及天山的东段边缘山脉及小冰川作用区。对中国西北部大面积冰川变化的评估表明, 近数十年来, 退缩的

冰川面积约为 4.5% ^[20]。在喜马拉雅山的部分流域的研究表明近数十年冰川的衰退速率约为 $0.3\%/a$ 左右^[21-23]。对青藏高原西部羌塘高原面积达 2075 km^2 冰帽型冰川大面积的遥感监测结果表明^[24], 1970~2000 年间, 冰川面积只减少了 4.3% , 平均退缩速率为 -0.145% , 是目前已知中国冰川减少率最低的。阿尔泰山冰川在近半个世纪中冰川强烈退缩, 其中在中国冰川面积减少 31% , 平均退缩率达 $0.76\%/a$, 是中国冰川退缩速率最大的山区^[25]。

目前, 中国冰川的第二次编目已全面展开, 部分成果已陆续出现, 相信将两次冰川目录对比, 可望得到对中国冰川近数十年变化的全面认识。

5. 冰川变化趋势的预测

冰川既然是气候变化的最敏锐指示者, 它对于未来气候变化的趋势的响应也就可以预测。近来, 在媒体上, 对冰川未来的命运出现不少预测, 许多预测是夸大的, 缺乏科学依据, 其中最典型的是在国际最著名最权威的机构 IPCC 的第四次评估报告中出现了严重的错误, 声称喜马拉雅山的冰川到 2035 年将全部消失^[26]。这个错误很快受到国际冰川学者的严厉批评^[27], 提出报告的起草者将个别极小的、对气候变化最敏感的冰川及最近极大负平衡的现象夸大至整个喜马拉雅山地区。日本冰川学者以他们对尼泊尔喜马拉雅山三条不同规模和类型冰川物质平衡的观测结果有力的反驳了上述错误论断^[28]。

早在 20 世纪 90 年代, 许多冰川学者便开始进行冰川变化趋势的预测研究, 有的预测只是概念性的^[29]。针对高亚洲冰川变化趋势的预测^[30]也必较抽象。能量平衡的动力学模型^[31]曾被国际上广泛应用, 但这个模型只应用于有详细能量平衡和冰川动力学观测的少数个别冰川, 难以推广至全球许多无观测资料的大面积的冰川区。

瑞士冰川学者提出地形模型^[32], 预测瑞士阿尔卑斯冰川在几种气候情景下, 瑞士冰川数量、面积和体积在不同冰川积累去比率(AAR)时变化趋势。如在 $AAR_0 = 0.6$ 时, 稳定状态时的平衡线(ELA₀)上升 200 m 或 400 m, 冰川面积将比 1973 年分别减少 54% 和 80% , 体积相应减少为 50% 和 78% 。乌兹别克斯坦与日本冰川学者合作^[33]提出在气候变化时估算山岳冰川流域范围内冰川作用面积的变化, 应用了三次冰川

编目的资料对帕米尔 4 个流域冰川面积从 1954 年到 1980 年的年变化资料。

当一个冰川作用区(流域或山脉)气候状态及其他变化趋势相似时,可将其所有冰川,不论其规模、类型、朝向的差别,作为一个整体,即称为冰川系统^[34]。可以用统计学研究冰川系统内部结构特征分析其分布规律。自上世纪 80 年代以来,随着前苏联冰川编目的完成,冰川系统的概念和理论便广泛出现在研究大范围冰川作用区分布特征的文献中^[35-39]。

在中国进行冰川目录的统计中,发现冰川系统的冰川中值面积比平均面积更能代表冰川系统的规模,冰川系统面积随高度分布的模式是计算平衡线高度变化的必要条件,以稳定条件时的平衡线高度处 ELA_0

的消融和物质平衡为代表,计算在气候变化时,冰川系统结构的变化,再考虑冰川径流变化与冰川面积变化的关系,可以预测整个冰川系统变化的趋势。以这些规律为基础,应用冰川目录数据提出冰川系统模型^[40]。结果表明,在相同的气温变化的情景下,冰川中值面积 S_{med} 大,冰川作用差 ΔH 大的冰川系统如恒河流域,雅鲁藏布江,比 S_{med} 小, ΔH 小的冰川系统(如印度河)寿命长,冰川消融强度 a_0 主要影响冰川径流变化的速率,反映对气候变化响应的敏感程度(图 2)。

应用冰川系统模型预测了中国许多山区冰川系统的变化^[41-43],综合全国各大山区冰川变化趋势的结果,可以得到全国冰川在 21 世纪的变化趋势(图 3)^[44]。

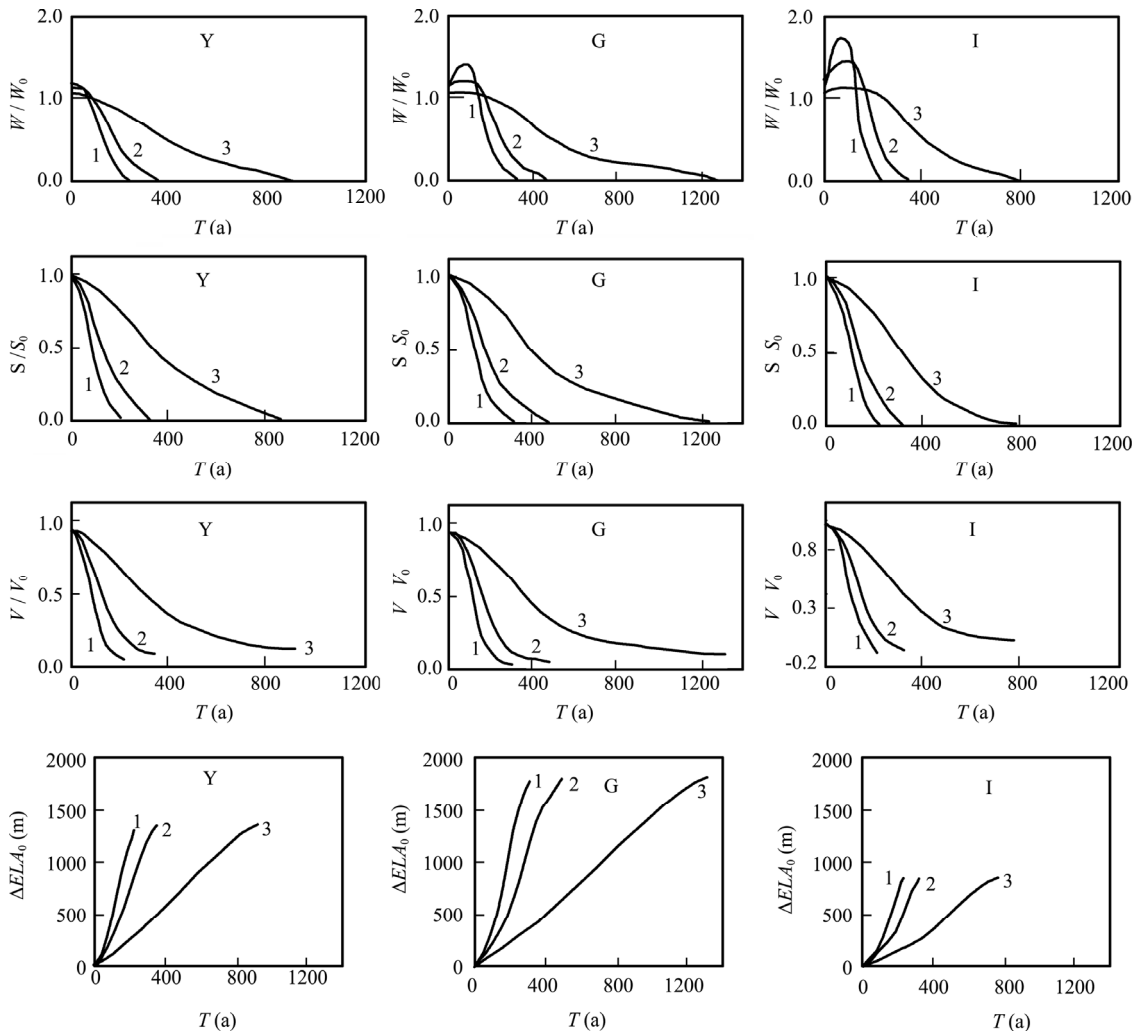


Figure 2. The change of glacier system of runoff, area, reserves and the height of equalizer line of the Yarlung Zangbo River, Ganges and Indus R (different climate scenarios: 1.05 k/a, 2.03 k/a, 3.01 k/a)
 图 2. 西藏外流河水系雅鲁藏布江(Y), 恒河(G)和印度河(I)冰川系统径流(W/W_0), 面积(S/S_0), 储量(V/V_0)及平衡线高度变化过程(据[40]), 气候情景: 1.05 k/a, 2.03 k/a, 3.01 k/a

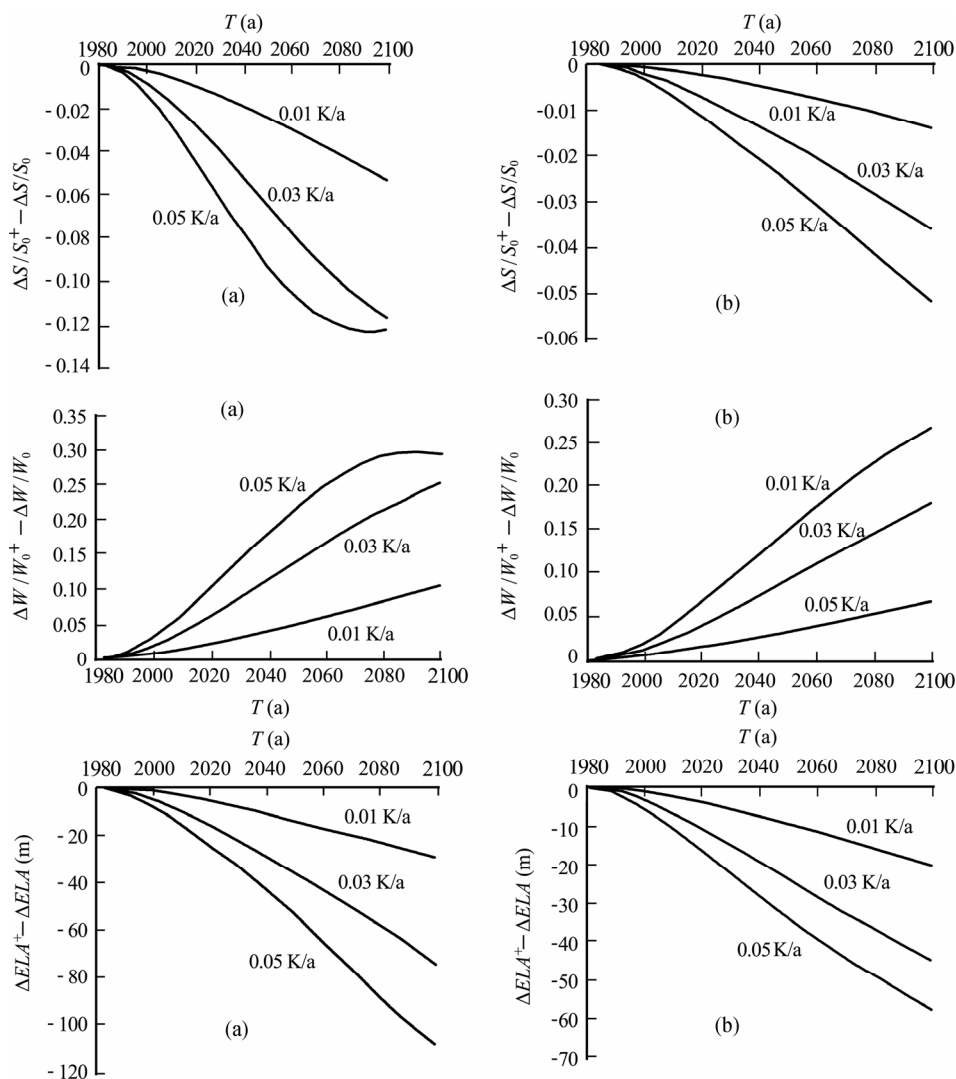


Figure 3. The change trend for Chinese glacier system in twenty-first century: (a) It is for sensitive glacier system; (b) It is for stable glacier system

图 3. 中国冰川系统在 21 世纪的变化趋势据[44]: 图中(a)为敏感型冰川系统; (b)为稳定型冰川系统

在气候情景分别为 0.01 k/a, 0.03 k/a 及 0.05 k/a 时, 到本世纪末中国的冰川面积将比 1980 年的初始状态分别减少 14.2%, 39.7%和 59.7%^[44]。

以已有小冰期以来及近数十年冰川变化研究地区的结果与冰川系统模型模拟的结果比较, 差别很小^[1]。

随着冰川变化研究的深入, 有更多不同类型冰川变化资料问世, 冰川系统模型的一些参数将有所改进, 相信对冰川变化趋势的预测将更加精确。

参考文献 (References)

[1] 谢自楚, 刘潮海. 冰川学导论[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2010: 1-490.
 [2] 施雅风, 王宗太. 历史上的木扎尔特冰川谷道和中西交通[J].

冰川冻土, 1979, 1(2): 22-26.
 [3] 施雅风, 谢自楚. 中国现代冰川的基本特征[J]. 地理学报, 1964, 30(3): 183-208.
 [4] 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 中国冰川概论[M]. 1988: 1-243.
 [5] 施雅风(主编). 中国冰川与环境——现代、过去与将来[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 1-462.
 [6] 施雅风(主编). 简明中国冰川目录[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2008: 1-194.
 [7] 姚檀栋, L. G. Thompson. 敦德冰芯记录与过去 5 ka 温度变化[J]. 中国科学(B), 1992, 22(10): 1089-1098.
 [8] 姚檀栋. 末次冰期青藏高原的气候突变——古里雅冰芯与格陵兰 GRIP 冰芯对比研究[J]. 中国科学(D), 1999, 29(2): 175-184.
 [9] 杨志红, 姚檀栋, 皇翠兰等. 古里雅冰芯中的新仙女木事件记录[J]. 科学通报, 1997, 42(18): 1975-1978.
 [10] 姚檀栋, 段克勤, 田立德等. 达索普冰芯积累量记录与过去 400 a 来印度夏季季降水变化[J]. 中国科学(D 辑), 2000, 30(6): 619-627.
 [11] Wgms. Global glacier changes: Facts and figures. UNEP, 2009:

- 1-88.
- [12] Z. C. Xie. Progress and prospect for research on mountain glaciers in China. *Annals of Glaciology*, 1992, 16: 207-211.
- [13] 谢自楚, 丁良福. 高亚洲冰川物质平衡线处的物质平衡及其应用[J]. *冰川冻土*, 1996, 18(1): 1-9.
- [14] 李克勤, 韩添丁, 井哲帆等. 乌鲁木齐河源气候变化和1号冰川40 a 观测事实[J]. *冰川冻土*, 2009, 25(2): 117-123.
- [15] M. B. Durgerov. Reanalysis of glacier changes: From the IGY to the IPY, 1960-2008. *Data of Glaciological Studies*, 2010, 108: 1-116.
- [16] WGMS. Glacier mass balance bulletin, 11, (2008-2009). ICSU (WDS)-IUGGC (IAHS)-UNEP-UNESCD-WMO, 2011: 1-102.
- [17] USGS. Satellite image atlas of glaciers of the world. Asia. Professional Paper, 2010: 1386.
- [18] V. M. Kotlyakov (Editor-in-Chief). Glaciation in north and central Eurasia at present time (in Russian). Moscow: Nauka, 2006: 1-481.
- [19] 刘时银, 丁永建, 李晶等. 中国西部冰川对近期气候变暖的响应[J]. *第四纪研究*, 2006, 26(5): 762-771.
- [20] 刘潮海, 谢自楚, 刘时银等. 西北干旱区冰川水资源及其变化[Z]. 见康尔泗等主编, 中国西北干旱区冰雪水资源与径流[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 14-54.
- [21] 晋锐, 车涛, 季新等. 基于遥感及 GIS 的西藏朋曲河流域冰川变化研究[J]. *冰川冻土*, 2004, 26(3): 261-266.
- [22] 叶庆华, 陈峰, 姚檀栋等. 近 30 年来喜马拉雅山脉西段纳木那尼峰地区冰川变化的遥感监测研究[J]. *遥感学报*, 2007, 11(4): 511-520.
- [23] Z. G. Li, T. D. Yao, L. D. Tian, et al. Glacier in the upstream Manla Reservoir in the Nianchu River Basin, Tibet: Shrinkage and impact. *Science in Cold and Arid Regions*, 2011, 3(2): 110-118.
- [24] 王利平, 谢自楚, 刘时银等. 1970-2000 年羌塘高原冰川变化及其预测研究[J]. *冰川冻土*, 2011, 33(5): 979-990.
- [25] 王淑红, 谢自楚, 戴亚南等. 阿尔泰山冰川系统结构特征近期变化及趋势预测[J]. *干旱区地理*, 2011, 34(1): 115-123.
- [26] Z. Gu, et al. Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability contribution of intergovernmental planet on climate change. M. L. Parry, et al., Eds. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 469-506.
- [27] J. S. Kargel, J. G. Cogley, G. J. Leonard, et al. Himalayan glaciers: The big picture is a montage. *PNAS*, 2011, 108(36): 14709-14710.
- [28] K. Fujita, T. Nuimura. Spatially heterogeneous wastage of Himalayan glaciers. *PNAS*, 2011, 108(34): 14011-14014.
- [29] В. М. Котляков, М. Г. Гросвальд and М. Г. Дюргеров М Б и др.. Реакция Оледенения на предстоящее изменение климата. *Изв. АН СССР. Сер. геогр.* 1991, 5: 35-45.
- [30] В. М. Котляков, И. М. Лебегава. Возможные изменения абляции и ледникового стока высочайших горных стран Азии в связи с глобальных потеплением климата. МГИ, 2000, 88: 3-15.
- [31] J. Oerlema, S. B. Anderson, A. Hubbard, et al. Modeling the response of glaciers to climate warming. *Climate Dynamics*, 1998, 14(4): 267-274.
- [32] F. Paul, M. Maisch, L. Rothenbühler, et al. Calculation and visualization of future glacier extent in the Swiss Alps by means of hypsographic modeling. *Global and Planetary Change*, 2007, 55(4): 343-357.
- [33] G. E. Glazirin, Y. Kodama. Evaluation of glacierized area of mountainous river basin in transition. *Bulletin of Glaciological Research*, 2008, 20: 1-6.
- [34] В. М. Котляков, N. A. Smolyarova. Elsevier dictionary of glaciology. Amsterdam-Oxford-Newyork-Tokyo: Elsevier, 1990: 1-336.
- [35] О. Н. Виноградов, Г. И. Коновалова and Т. В. Псарева. Некоторые характеристики ледниковой системы Кавказа, метрика и результаты их картографирования. МГИ, 1977, 30: 15-126
- [36] Виноградов, Г. Е. Глазырин. Статистический подход к изучению морфологии ледников Камчатки *ИЗВ. ВГО*, 1979, 111(4): 325-329.
- [37] Г. Е. Глазырин. Распределение и режим горных ледников. Л: ГИДРОМЕТОИЗДАТ, 1985: 1-181.
- [38] Г. Е. Глазырин. Горные ледниковые системы, их структура и эволюция. Л: ГИДРОМЕТОИЗДАТ, 1991: 1-108.
- [39] G. E. Glazyrin. Statistical study of mountain glacier systems: Results and perspectives (in Russian). *Data of Glaciological Studies*, 2006, 100: 1-72.
- [40] 谢自楚, 冯清华, 刘潮海. 冰川系统变化的模型研究——以西藏南部外流水系为例[J]. *冰川冻土*, 2002, 24(1): 16-27.
- [41] 王欣, 谢自楚, 冯清华等. 长江源区冰川对气候变化的响应[J]. *地理科学*, 2005, 13(2): 97-103.
- [42] 王欣, 谢自楚, 刘时银等. 塔里木河源冰川系统变化趋势预测[J]. *山地学报*, 2006, 24(6): 641-646.
- [43] 李巧媛, 谢自楚. 周期性升温下冰川系统变化预测研究——以长江流域冰川系统为例[J]. *冰川冻土*, 2008, 30(4): 583-589.
- [44] Z. C. Xie, X. Wang, Q. H. Feng, et al. Modeling the response of glaciers to climate warming in China. *Annals of Glaciology*, 2006, 43(1): 313-316.