

过去 2000 年北半球代表性冰川变化数据集研发

任鹏杰*, 余武生, 徐柏青, 张小龙, 李久乐

中国科学院青藏高原研究所, 青藏高原地球系统与资源环境全国重点实验室, 北京 100101

摘 要: 全球气候波动显著影响冰川变化。作为气候变化的记录器, 冰川变化反映了全球百年、千年乃至更长时间尺度上的气候变化。因此, 冰川变化数据集的研制对研究气候变化具有重要意义。北半球冰川分布范围较广, 主要分布在青藏高原、阿尔卑斯山、格陵兰、阿拉斯加等地。本数据集基于温度或温度与降水量耦合关系、冰芯包裹气体氧同位素记录、“冰-湖”联动系统等方法, 构建了过去 2,000 年北半球代表性冰川变化数据集。数据时间分辨率为年, 数据存储为.shp、docx 和.xlsx 格式, 由 10 个数据文件组成, 数据量为 136 KB(压缩为 1 个文件 87.6 KB)。结果显示, 受气候变化的影响, 北半球不同地区冰川在过去 2,000 年不同时段均出现了若干次冰川前进和退缩的现象, 但近几十年来总体呈现加剧退缩的趋势。

关键词: 冰川; 气候变化; 青藏高原; 阿尔卑斯山; 格陵兰

DOI: <https://doi.org/10.3974/geodp.2022.03.03>

CSTR: <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2022.03.03>

数据可用性声明:

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志(中英文)》出版, 可获取:

<https://doi.org/10.3974/geodb.2022.02.01.V1> 或 <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2022.02.01.V1>.

1 前言

冰川是地球上最大的淡水储存库。据估计, 冰川总量占全球水分的 2%, 约占全球可用淡水的 80%^[1]。冰川不仅是全球气候变化的驱动因素, 而且记录了百年、千年尺度乃至更长时间尺度上的气候信息, 对全球气候变化尤为敏感, 揭示其对全球气候变化的响应有重要意义^[2]。受全球变暖的影响, 北半球冰川出现不同程度的退缩, 重建过去 2,000 年北半球代表性冰川变化, 可以更好地认识过去千年尺度上冰川的变化以及气候变化对冰川变化的影响, 为揭示现代冰川对气候变化的响应以及研究全球气候变化提供数据支撑。鉴于此, 本数据集重建了过去 2,000 年北半球 22 条冰川的变化, 其中包括青藏高原 8 条冰川、西伯利亚 1 条冰川、阿尔卑斯山 1 条冰川、阿拉斯加 3 条冰川、格陵兰 8 条冰川、洛基山 1 条

收稿日期: 2022-02-09; 修订日期: 2022-07-11; 出版日期: 2022-09-25

基金项目: 中华人民共和国科学技术部(2017YFA0603303)

*通讯作者: 任鹏杰, 中国科学院青藏高原研究所, 青藏高原地球系统与资源环境全国重点实验室, renpengjie@itpcas.ac.cn

数据引用方式: [1] 任鹏杰, 余武生, 徐柏青等. 过去 2000 年北半球代表性冰川变化数据集研发[J]. 全球变化数据学报, 2022, 6(3): 339–348 <https://doi.org/10.3974/geodp.2022.03.03>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2022.03.03>.

[2] 任鹏杰, 余武生, 徐柏青等. 过去 2000 年北半球代表性冰川变化数据集[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2022. <https://doi.org/10.3974/geodb.2022.02.01.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2022.02.01.V1>.

冰川，各冰川分布位置如图 1 所示。主要方法为温度或温度与降水量耦合关系、冰芯包裹气体稳定氧同位素记录以及“冰-湖”联动系统等。

2 数据集元数据简介

《过去 2000 年北半球代表性冰川变化数据集》^[3]的名称、作者、地理区域、数据年代、时间分辨率、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表 1。

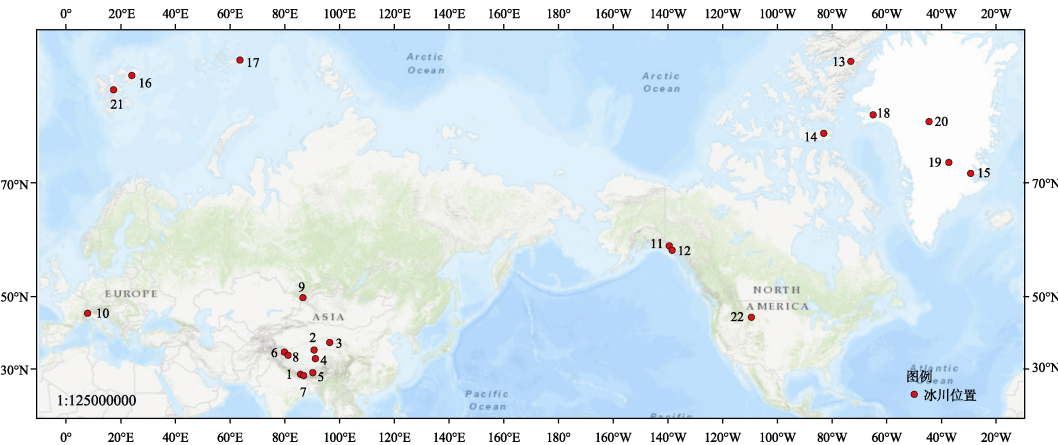


图 1 重建的北半球 22 条冰川的分布位置

（注：1-达索普冰川，2-马兰冰川，3-敦德冰川，4-龙匣宰陵巴冰川，5-枪勇冰川，6-阿克塞钦湖上游冰川，7-珠峰 2 号冰湖上游冰川，8-德普昌达克冰川，9-Belukha 冰川，10-Colle Gnifetti 冰川，11-Eclipse 冰原，12-Logan 冰川，13-Agassiz 冰帽，14-Devon 冰帽，15-Renland 冰川，16-Austfonna 冰帽，17-Windy 冰帽，18-Akademii Nauk 冰帽，19-格陵兰顶部冰川，20-Crete 冰川，21-Lomonosovfonna 冰川，22-Beartooth Plateau 冰川）

3 数据研发方法

3.1 原始数据

本研究利用的原始数据来源于国内外公开发表的冰芯稳定同位素记录和积累量数据以及本研究的冰芯稳定同位素记录和积累量数据、湖泊沉积物元素数据以及冰芯包裹气体稳定同位素数据。无论是公开发表的，还是本研究的冰芯相关原始数据（包括冰芯稳定同位素记录和积累量数据以及冰芯包裹气体稳定同位素数据），这些原始数据的研制方法类似，具体流程如下：（1）在冰川上钻取冰芯；（2）在实验室按照一定的长度将冰芯从顶部到底部切割成片段；（3）利用稳定同位素质谱仪测定冰芯片段中稳定同位素组成和冰芯包裹气体中的稳定同位素组成；（4）利用冰芯稳定同位素记录恢复冰芯积累量数据。

关于本研究的湖泊沉积物元素数据，原始数据的研制方法如下：（1）在湖泊钻取湖芯；（2）在实验室按照一定的长度将湖芯从顶部到底部切割成片段；（3）利用 Thermo X-7 电感耦合等离子体质谱仪对 Na、Mg、Al、K、Ca、Fe 等元素进行定量分析^[4]。

3.2 研发流程

基于温度或温度与降水量耦合关系、冰芯包裹气体氧同位素记录、“冰-湖”联动系统等方法重建了北半球典型地区 22 条冰川过去 2,000 年的变化，形成了《过去 2000 年北半

球代表性冰川变化数据集》，具体内容见附件，表格的形式参照 Solomina 等的文章^[5]。

“温度+降水量”的耦合关系主要依据是：当温度降低，且降水量增加时，则冰川消融强度较弱；反之，当温度升高，且降水量减少时，则冰川消融强度较强。如果只有温度序列时，则温度升高对应于冰川消融，温度降低对应于冰川积累。

冰芯包裹气体氧同位素记录的依据是：通过从钻取的冰芯中提取冰包裹气体，测定气体的同位素值，然后重建温度变化历史。冰川消融越强烈，冰川中的同位素越容易与气体中的同位素交换，导致气体同位素越低。因此，冰芯包裹气体氧同位素负值表示冰川消融，正值表示冰川积累。

表 1 《过去 2000 年北半球代表性冰川变化数据集》元数据简表

项目	描述
数据集名称	过去 2000 年北半球代表性冰川变化数据集
数据集短名	GlacierChangeNHPast2000
作者信息	任鹏杰，中国科学院青藏高原研究所，青藏高原地球系统与资源环境全国重点实验室，renpengjie@itpcas.ac.cn 余武生，中国科学院青藏高原研究所，青藏高原地球系统与资源环境全国重点实验室，yuws@itpcas.ac.cn 徐柏青，中国科学院青藏高原研究所，青藏高原地球系统与资源环境全国重点实验室，baiqing@itpcas.ac.cn 张小龙，中国科学院青藏高原研究所，青藏高原地球系统与资源环境全国重点实验室，zhangxiaolong@itpcas.ac.cn 李久乐，中国科学院青藏高原研究所，青藏高原地球系统与资源环境全国重点实验室，jlli@itpcas.ac.cn
地理区域	青藏高原、西伯利亚、阿尔卑斯山、阿拉斯加、格陵兰、洛基山
数据年代	过去 2,000 年
时间分辨率	年
数据格式	.shp、.docx、.xlsx
数据量	136 KB（压缩为 1 个文件 87.6 KB）
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 http://www.geodoi.ac.cn
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101，中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据（中英文）、通过《全球变化数据仓储电子杂志（中英文）》发表的实体数据集和通过《全球变化数据学报（中英文）》发表的数据论文。其共享政策如下：（1）“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放，用户免费浏览、免费下载；（2）最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源；（3）增值服务用户或以任何形式散发和传播（包括通过计算机服务器）“数据”的用户需要与《全球变化数据学报（中英文）》编辑部签署书面协议，获得许可；（4）摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10%引用原则，即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%，同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 ^[6]
数据和论文检索系统	DOI, CSTR, Crossref, DCI, CSCD, CNKI, SciEngine, WDS/ISC, GEOSS

“冰-湖”联动系统的依据是：冰前湖泊沉积物的沉积年龄与同层位孢粉 ¹⁴C 年龄的差值（ΔAge）是反映冰川消融强度的良好指标^[7]。在大气干湿沉降不变的前提下，沉降在冰川中的老大气粉尘，随冰川消融加强而被释放，汇入湖泊沉积，对应气候较暖的时期；在冰川融化较弱、冰川稳定前进时，推动基岩，汇入湖泊，导致基岩贡献增加，其对应气候较冷的时期。因此，将各指标和元素标准化，从而获得老大气粉尘和基岩中的 6 种常量元素（钠、镁、铝、钾、钙、铁）和 26 种微量元素（锂、铈、钛、钒、铬、锰、钴、镍、铜、

锌、砷、铷、锶、钇、锆、铈、镉、镓、铊、铟、铅、铋、钍、铀)的第一主成分(PC1)时间序列,以此指示冰川变化。“冰-湖”联动系统概念模型如图2所示。

重建的冰川变化数据集相关信息见表2。

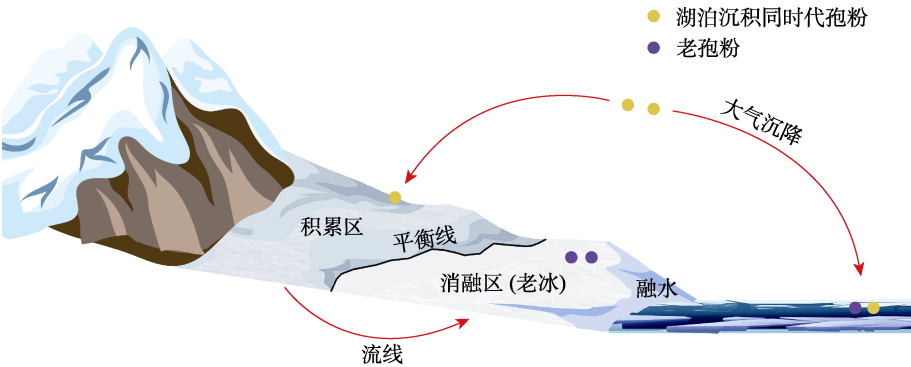


图2 冰川—冰前湖孢粉沉降-释放-沉积 (“冰-湖” 联动) 概念模型图 (参照 Zhang 等^[7])

表2 《过去 2000 年北半球代表性冰川变化数据集》相关信息汇总表

序号	冰川	所处位置	地理区域	重建方法	数据来源
1	达索普冰川	希夏邦马峰	青藏高原	温度与降水量耦合	[8]
2	马兰冰川	可可西里	青藏高原	温度	[9]
3	敦德冰川	柴达木盆地	青藏高原	温度与降水量耦合	本研究
4	龙匣宰陇巴冰川	唐古拉山	青藏高原	冰芯包裹气体氧同位素	本研究
5	枪勇冰川	羊卓雍措流域	青藏高原	“冰-湖”联动系统	本研究
6	阿克塞钦湖上游冰川	昆仑山	青藏高原	“冰-湖”联动系统	本研究
7	珠峰2号冰湖上游冰川	珠穆朗玛峰	青藏高原	“冰-湖”联动系统	本研究
8	德普昌达克冰川	阿里	青藏高原	“冰-湖”联动系统	本研究
9	Belukha 冰川	阿尔泰山	西伯利亚	温度与降水量耦合	[10]
10	Colle Gnifetti 冰川	瑞士	阿尔卑斯山	温度	[11]
11	Eclipse 冰原	加拿大	阿拉斯加	温度与降水量耦合	[12]
12	Logan 冰川	阿拉斯加	阿拉斯加	温度与降水量耦合	[13]
13	Agassiz 冰帽	加拿大	阿拉斯加	温度	[14,15]
14	Devon 冰帽	努纳武特	格陵兰	温度	[16,17]
15	Renland 冰川	东格陵兰	格陵兰	温度	[18]
16	Austfonna 冰帽	斯瓦尔巴群岛	格陵兰	温度	[19]
17	Windy 冰帽	Franz Josef 群岛	格陵兰	温度	[20]
18	Akademii Nauk 冰帽	北极地区	格陵兰	温度	[21]
19	格陵兰顶部冰川	格陵兰	格陵兰	温度与降水量耦合	[22]
20	Crete 冰川	中格陵兰	格陵兰	温度与降水量耦合	[23]
21	Lomonosovfonna 冰川	斯瓦尔巴群岛	格陵兰	温度	[24]
22	Beartooth Plateau 冰川	怀俄明	洛基山	温度	[25]

4 数据结果

4.1 数据集组成

《过去 2000 年北半球典型地区代表性冰川变化数据集》为.shp、.docx 和.xlsx 格式，包括 22 条冰川的名称、地理区域、前进或后退时期（表 3、表 4）等要素。

表 3 过去 2,000 年北半球 22 条代表性冰川的前进时期

序号	冰川名称	地理区域	所处位置	重建方法	年代	数据来源
1	达索普冰川	青藏高原	希夏邦马峰	温度与降水量耦合	1851–1857、 1870–1875、 1883–1890、 1908–1915、 1966–1973	[8]
2	马兰冰川		可可西里	温度	1690–1773	[9]
3	敦德冰川		柴达木盆地	温度与降水量耦合	/	本研究
4	龙匣宰陇巴冰川		唐古拉山	冰芯包裹气体氧同位素	100–300、 1200–1900	本研究
5	枪勇冰川		羊卓雍措流域	“冰-湖”联动系统	600–800、 1050–1850	本研究
6	阿克塞钦湖上游冰川		昆仑山	“冰-湖”联动系统	1811–1970	本研究
7	珠峰 2 号冰湖上游冰川		珠穆朗玛峰	“冰-湖”联动系统	1920–1940、 1993–1972	本研究
8	德普昌达克冰川		阿里	“冰-湖”联动系统	/	本研究
9	Belukha 冰川	西伯利亚	阿尔泰山	温度与降水量耦合	1825–1832、 1884–1890	[10]
10	Colle Gnifetti 冰川	阿尔卑斯山	瑞士	温度	1000–1360、 1845–1878	[11]
11	Eclipse 冰原	阿拉斯加	加拿大	温度与降水量耦合	1976–1992	[12]
12	Logan 冰川		阿拉斯加	温度与降水量耦合	1825–1925	[13]
13	Agassiz 冰帽		加拿大	温度	1815–1858	[14,15]
14	Devon 冰帽		努纳武特	温度	/	[16,17]
15	Renland 冰川		东格陵兰	温度	1450–1700	[18]
16	Austfonna 冰帽	格陵兰	斯瓦尔巴群岛	温度	1470–1493、 1580–1621、 1737–1773	[19]
17	Windy 冰帽		Franz Josef 群岛	温度	1425–1470、 1560–1590、 1750–1773	[20]
18	Akademii Nauk 冰帽		北极地区	温度	1937–1948	[21]
19	格陵兰顶部冰川		格陵兰	温度与降水量耦合	493–800、 1260–1820	[22]
20	Crete 冰川		中格陵兰	温度与降水量耦合	1620–1665、 1760–1800	[23]
21	Lomonosovfonna 冰川		斯瓦尔巴群岛	温度	810–850、 900–980、 1250–1850	[24]
22	Beartooth Plateau 冰川	洛基山	怀俄明	温度	630–800、 1050–1400、 1690–1775	[25]

表 4 过去 2,000 年北半球 22 条代表性冰川的后退时期

序号	冰川名称	地理区域	所处位置	重建方法	年代	数据来源	
1	达索普冰川	青藏高原	希夏邦马峰	温度与降水量耦合	1848–1851、1862–1870、1875–1883、1890–1903、1915–1966、1973–1980、1985–1994	[8]	
2	马兰冰川		可可西里	温度	1450–1690、1773–2000	[9]	
3	敦德冰川		柴达木盆地	温度与降水量耦合	>1950	本研究	
4	龙匣宰陇巴冰川		唐古拉山	冰芯包裹气体氧同位素	300–1200、>1900	本研究	
5	枪勇冰川		羊卓雍措流域	“冰-湖”联动系统	100–600、850–1050、>1850	本研究	
6	阿克塞钦湖上游冰川		昆仑山	“冰-湖”联动系统	>1970	本研究	
7	珠峰 2 号冰湖上游	西伯利亚	珠穆朗玛峰	“冰-湖”联动系统	1940–1972、1993–2020	本研究	
8	德普昌达克冰川		阿里	“冰-湖”联动系统	1733–1910	本研究	
9	Belukha 冰川		阿尔泰山	温度与降水量耦合	1840–1851、1870–1881、1898–1990、1960–2000	[10]	
10	Colle Gnifetti 冰川		阿尔卑斯山	瑞士	温度	>1878	[11]
11	Eclipse 冰原		加拿大	温度与降水量耦合	1932–1976	[12]	
12	Logan 冰川		阿拉斯加	温度与降水量耦合	1749–1825、1960–1965	[13]	
13	Agassiz 冰帽	阿拉斯加	加拿大	温度	1741–1815、>1858	[14,15]	
14	Devon 冰帽		努纳武特	温度	1850–1960	[16,17]	
15	Renland 冰川		东格陵兰	温度	1250–1450、1700–2000	[18]	
16	Austfonna 冰帽		斯瓦尔巴群岛	温度	1773–2000	[19]	
17	Windy 冰帽		Franz Josef 群岛	温度	1220–1380、1773–2000	[20]	
18	Akademii Nauk 冰帽		格陵兰	北极地区	温度	1885–1937、1973–2000	[21]
19	格陵兰顶部冰川	格陵兰	格陵兰	温度与降水量耦合	800–1044、1820–1900	[22]	
20	Crete 冰川		中格陵兰	温度与降水量耦合	1888–1980	[23]	
21	Lomonosovfonna 冰川		斯瓦尔巴群岛	温度	850–900、980–1010、1850–2000	[24]	
22	Beartooth Plateau 冰川		洛基山 怀俄明	温度	800–1050、1775–1950	[25]	

4.2 数据结果分析

4.2.1 基于温度或温度与降水量耦合重建

依托对冰川物质平衡的野外观测，将其与温度、降水量等气象要素进行对比分析，建立冰川变化与温度、降水量之间的内在联系，构建耦合函数，从而揭示冰川变化对气候变化的响应。达索普冰川位于喜马拉雅山脉中段的希夏邦马峰，根据温度或“温度+降水量”

的耦合关系重建了达索普冰川变化，发现该冰川的前进时段是 1851–1857、1870–1875、1883–1890、1908–1915、1966–1973 年，后退时段是 1848–1851、1862–1870、1875–1883、1890–1903、1915–1966、1973–1980、1985–1994 年，尤其是 1915 年以来该冰川消融呈现出加剧的趋势（图 3）。用类似的方法，重建了青藏高原的马兰冰川、敦德冰川，西伯利亚的 Belukha 冰川，阿尔卑斯山的 Colle Gnifetti 冰川，阿拉斯加的 Eclipse 冰原、Logan 冰川、Agassiz 冰帽，格陵兰的 Devon 冰帽、Renland 冰川、Austfonna 冰帽、Windy 冰帽、Akademii Nauk 冰帽、格陵兰顶部冰川、Crete 冰川、Lomonosovfonna 冰川和洛基山的 Beartooth 高原冰川等 16 条冰川。

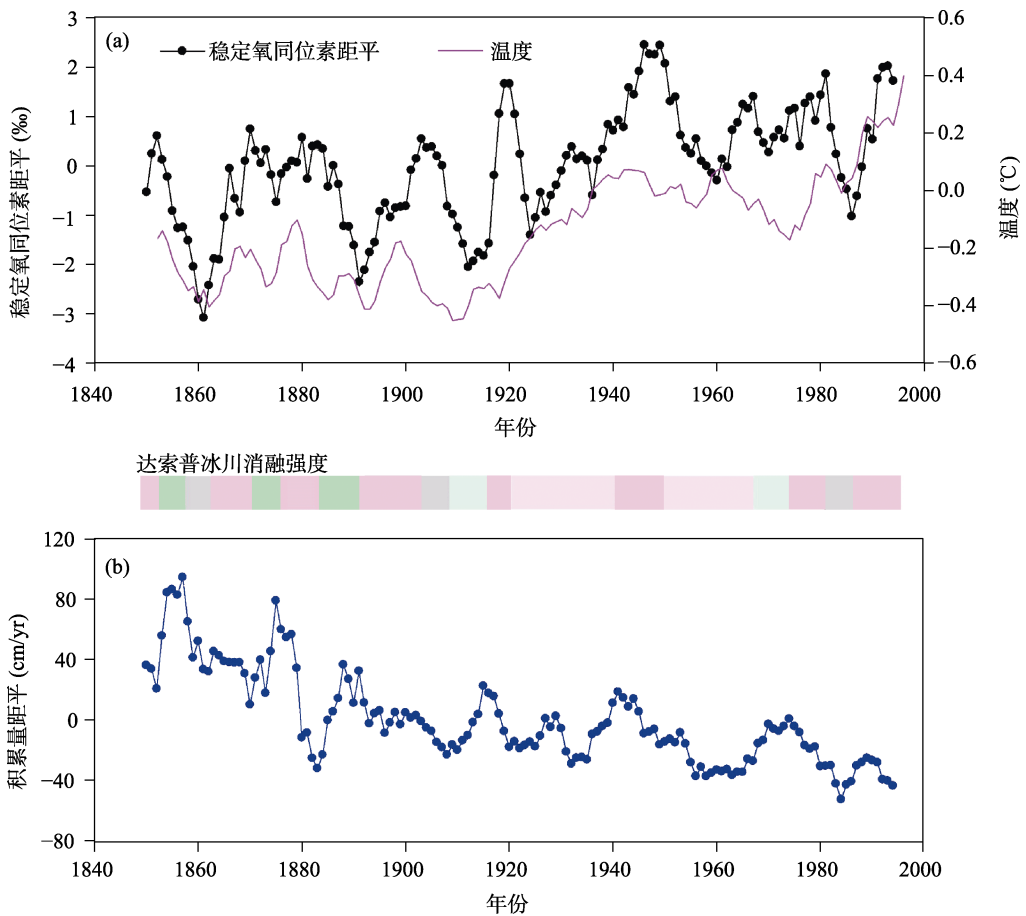


图 3 基于温度与降水量耦合关系重建的希夏邦马峰达索普冰川变化：(a) 黑线表示达索普冰芯稳定氧同位素距平，紫线表示北半球温度序列；(b) 达索普冰芯积累量距平
(注：达索普冰川消融强度，粉色越深表示冰川消融越强，绿色越深表示冰川积累越强)

4.2.2 利用冰芯包裹气体氧同位素重建

冰川冰体中包裹的气泡蕴含着大量的气候环境信息，是古气候环境重建的理想对象之一。尤其对于山地冰川，其表面粒雪成冰过程对气候环境变化响应敏感，会造成冰体中包裹气体的含量或组分发生变化，可用来揭示区域性或短时间尺度的气候环境事件。利用冰

芯包裹气体氧同位素记录重建的温度变化，可根据冷暖变化进一步推断冰川变化。龙匣宰陇巴冰川位于青藏高原中部的唐古拉山，属于西风-季风交互作用区。利用相关手段，对龙匣宰陇巴冰川的冰芯进行了冰芯年代学、冰体氧同位素、冰体包裹气体含量和氧气氧稳定同位素分析与研究。根据龙匣宰陇巴冰芯包裹气体氧同位素记录，恢复了过去 3,600 年的温度记录（图 4）。结果表明，唐古拉山在过去 3,600 年的公元前 1600—公元前 400 年、公元 100—300 年、公元 1200—1900 年为冰川前进期，公元前 400—公元 100 年、300—1200 年、1900 年以来为冰川后退期。

4.2.3 利用“冰-湖”联动系统反演

利用“冰-湖”联动方法重建了枪勇冰川的变化。枪勇错（28°53'N，90°13'E）位于青藏高原南部喜马拉雅山脉和雅鲁藏布江之间，属于季风气候区。枪勇错包括大枪勇错和小枪勇错 2 个湖盆。由于枪勇错处于雨影区，冰川融水是两湖最直接和主要的补给。因此，枪勇错是研究枪勇冰川变化的良好环境载体。由图 5 可知，枪勇冰川的前进期为公元前 560—公元 100 年、公元 600—800 年、公元 1050—1850 年，后退期为公元 100—600 年、公元 850—1050 年、公元 1850 年以来。利用类似的方法重建了阿克塞钦湖上游冰川、德普昌达克冰川和珠峰 2 号冰湖上游山谷冰川的变化，具体前进时段和后退时段见数据文件。

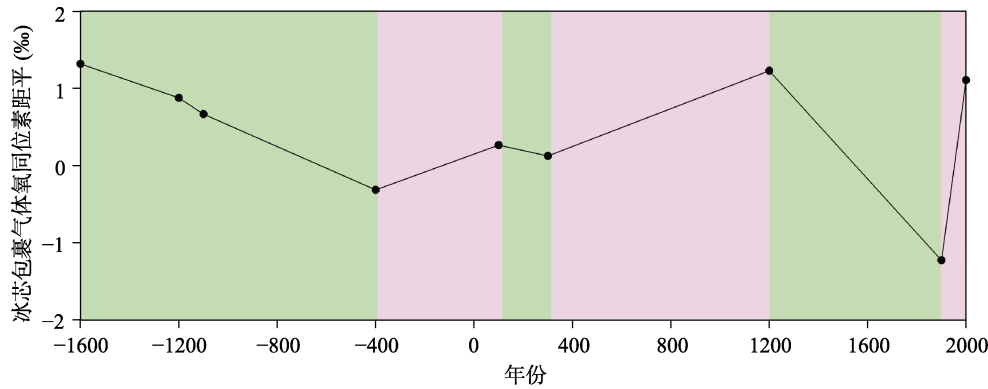


图 4 基于冰芯包裹气体稳定氧同位素重建的唐古拉山龙匣宰陇巴冰川变化
（绿色阴影表示冰川前进时段，粉红色阴影表示冰川后退时段）

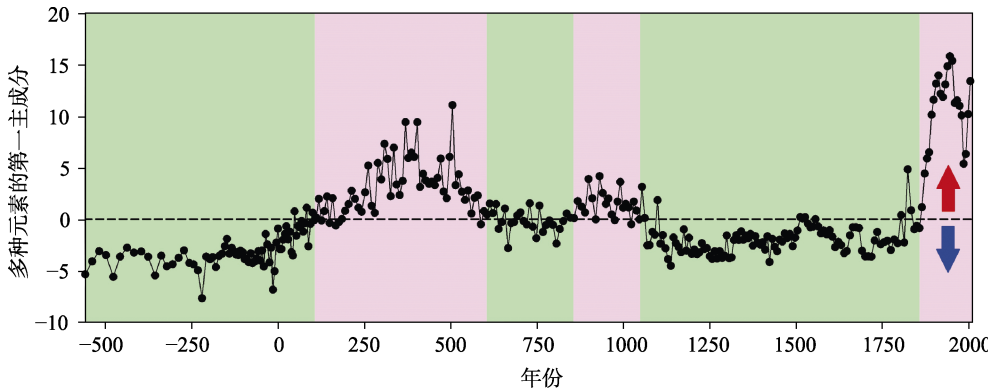


图 5 基于“冰-湖”联动系统的枪勇错沉积物中多种元素的第一主成分重建的枪勇冰川变化
（注：绿色阴影表示冰川前进时段，粉红色阴影表示冰川后退时段，蓝色箭头表示冰川前进，红色箭头表示冰川后退）

5 讨论和总结

冰川记录了长时间尺度上的气候信息和环境信息, 不仅显著地受到全球气候变化的影响, 而且对全球气候变化也能产生显著的影响, 对揭露气候变化的机制具有重要的科学意义。本数据集基于温度或温度与降水量耦合关系、冰芯包裹气体氧同位素记录、“冰-湖”联动系统等方法, 通过对北半球 22 条冰川过去 2,000 年变化的反演, 展示了北半球 22 条冰川的前进时期和后退时期, 冰川的前进和后退变化揭示了冰川对气候变化的响应。从结果来看, 数据集反映出近 2,000 年来北半球 22 条冰川都出现前进和退缩的波动变化, 但总体呈现退缩的趋势。本数据集为研究冰川变化、气候变化和环境变化提供了参考和支撑, 有助于进一步认识过去的冰川变化及气候、环境演化, 对揭示气候、环境变化与冰川的相互作用有重要意义。

作者分工: 余武生、徐柏青对数据集的获取开发做了总体设计, 并修改了数据论文; 任鹏杰撰写了数据论文, 并整理和制作了数据集; 张小龙、李久乐收集了基础数据。

利益冲突声明: 本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献

- [1] 缪启龙, 江志红, 陈海山等. 现代气候学[M]. 北京: 气象出版社, 2010.
- [2] 谢自楚, 刘潮海. 冰川学导论[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2010.
- [3] 任鹏杰, 余武生, 徐柏青等. 过去 2000 年北半球代表性冰川变化数据集[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2022. <https://doi.org/10.3974/geodb.2022.02.01.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2022.02.01.V1>.
- [4] Zhang, X. L., Xu, B. Q., Li, J. L., *et al.* Late-Holocene fluctuations of monsoonal Qiangyong Glacier, southern Tibetan Plateau [J]. *Holocene*, 2021, 21: 1–10. <https://doi.org/10.1177/09596836211003209>.
- [5] Solomina, O. N., Bradley, R. S., Jomelli, V., *et al.* Glacier fluctuations during the past 2000 years [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 149: 61–90. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.04.008>.
- [6] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策[OL]. <https://doi.org/10.3974/dp.policy.2014.05> (2017 年更新).
- [7] Zhang, J. F., Xu, B. Q., Turner, F., *et al.* Long-term glacier melt fluctuations over the past 2500 yr in monsoonal High Asia revealed by radiocarbon-dated lacustrine pollen concentrates [J]. *Geology*, 2017, 45(4): 359–362. <https://sci-hub.se/10.1130/G38690.1>.
- [8] Thompson, L. G., Yao, T. D., Mosley-Thompson, E., *et al.* A high-resolution millennial record of the South Asian Monsoon from Himalayan ice cores [J]. *Science*, 2000, 289: 1916–1919.
- [9] Wang, N. L., Thompson, L. G., Davis, M. E., *et al.* Influence of variations in NAO and SO on air temperature over the northern Tibetan Plateau as recorded by $\delta^{18}\text{O}$ in the Malan ice core [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30: 2167.
- [10] Eichler, A., S. Olivier, K. Henderson, K. *et al.* Temperature response in the Altai region lags solar forcing [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36: L01808. <https://doi.org/10.1029/2008GL035930>.
- [11] Bohleber, P., Erhardt, T., Spaulding, N., *et al.* Temperature and mineral dust variability recorded in two low-accumulation Alpine ice cores over the last millennium [J]. *Climate of the Past*, 2018, 14(1): 21–37. <https://doi.org/10.5194/cp-14-21-2018>.

- [12] Yalcin, K., Wake, C. P. Anthropogenic signals recorded in an ice core from Eclipse Icefield, Yukon Territory [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28: 4487–4490.
- [13] Moore, G. W. K., Holdsworth, G., Alverson, K. Climate change in the North Pacific region over the past three centuries [J]. *Nature*, 2002, 420: 401–403. <https://doi.org/10.1038/nature01229>.
- [14] Fisher, D. A., Koerner, R. M., Reeh, N. Holocene climatic records from Agassiz Ice Cap, Ellesmere Island, NWT, Canada [J]. *Holocene*, 1995, 5: 19–24.
- [15] Fisher, D. A., Koerner, R. M. Signal and noise in four ice-core records from the Agassiz Ice Cap, Ellesmere Island, Canada: details of the last millennium for stable isotopes, melt and solid conductivity [J]. *Holocene*, 1994, 4: 113–120.
- [16] Fisher, D. A., Koerner, R. M. Some aspects of climatic change in the High Arctic during the Holocene as deduced from ice cores [J]. *Quaternary Climatic Change Symposium*, 1979, 33: 349–371.
- [17] Fisher, D. A. Comparison of 100,000 years of oxygen isotope and insoluble impurity profiles from the Devon Island and Camp Century ice cores [J]. *Quaternary Research*, 1979, 11: 299–304.
- [18] Holme, C., Gkinis, V., Lanzky, M., *et al.* Varying regional $\delta^{18}\text{O}$ -temperature relationship in high-resolution stable water isotopes from east Greenland [J]. *Climate of the Past*, 2019, 15: 893–912. <https://doi.org/10.5194/cp-15-893-2019>.
- [19] Saksson, E., Divine, D., Kohler, J., *et al.* Climate oscillations as recorded in Svalbard ice core $\delta^{18}\text{O}$ records between 1200–1997 AD [J]. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 2005, 87(1): 203–214. <https://doi.org/10.1111/j.0435-3676.2005.00253.x>.
- [20] Kinnard, C., Zdanowicz, C. M., Fisher, D. A. Reconstructed changes in Arctic Sea ice over the past 1450 years [J]. *Nature*, 2011, 479(7374): 509–512. <https://doi.org/10.1038/nature10581>.
- [21] Clausen, H., Gundestrup, N., Johnsen, S., *et al.* Glaciological investigations in the Crête area, Central Greenland: a search for a new deep-drilling site [J]. *Annals of Glaciology*, 1988, 10: 10–15. DOI: 10.3189/S0260305500004080.
- [22] Alley, R. B. The younger dryas cold interval as viewed from central Greenland [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19: 213–226.
- [23] Clausen, H. B., Gundestrup, N. S., Johnsen, S. J., *et al.* Glaciological Investigations in the Crete area, central Greenland: a search for a new deep-drilling site [J]. *Annals of Glaciology*, 1988, 10: 10–15.
- [24] Divine, D., Isaksson, E., Martma, T., *et al.* Thousand years of winter surface air temperature variations in Svalbard and northern Norway reconstructed from ice-core data [J]. *Polar Research*, 2011, 30(1): 73–79. <https://doi.org/10.3402/polar.v30i0.7379>.
- [25] Chellman, N. J., Pederson, G. T., Lee, C. M., *et al.* High elevation ice patch documents Holocene climate variability in the northern Rocky Mountains [J]. *Quaternary Science Advances*, 2021, 3: 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.qsa.2020.100021>.