

亚洲冰川湖泊分类与最大分布数据集 (1980s–2019)

马劲松^{1,2}, 宋春桥^{1*}, 王艳君², 张大鹏^{1,3}

1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 流域地理学重点实验室, 南京 210008; 2. 南京信息工程大学地理科学学院, 南京 210044; 3. 河南理工大学测绘与国土信息工程学院, 焦作 454000.

摘要: 基于全球地表水数据集 (JRC Global Surface Water, GSW), 结合目视解译和质量控制, 开展了 1980s–2019 时段形成和发育的亚洲冰湖最大水域范围 ($\geq 0.01 \text{ km}^2$) 的空间编目; 根据冰湖与冰川的关系, 将冰湖分为冰川补给湖 (包括: 冰上湖、冰川接触湖和冰川不接触湖 3 个亚类) 和非冰川补给湖 2 类, 同时分析了不同类型冰湖的空间分布特征, 最终得到亚洲冰川湖泊分类与最大分布数据集 (1980s–2019)。研究表明, 冰湖总绝对面积误差为 98.91 km^2 , 平均相对误差为 19.1%。该数据集包括: (1) 空间数据, 即 1980s–2019 年亚洲冰湖最大分布范围与类型数据; (2) 表格数据, 包括: 1980s–2019 年亚洲不同大小、类型、高程尺度下冰湖的数量与面积统计。数据集存储为.shp 和.xlsx 格式, 由 9 个数据文件组成, 数据量为 21.8 MB (压缩为 1 个文件, 4.92 MB)。

关键词: GSW 数据; 亚洲; 冰湖; 类型; 遥感

DOI: <https://doi.org/10.3974/geodp.2022.02.05>

CSTR: <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2022.02.05>

数据可用性声明:

本文关联数据集已在《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.2021.11.02.V1> 或 <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2021.11.02.V1>.

1 前言

全球气候变暖在高海拔地区尤其明显, 冰川加速退缩或变薄^[1–3]。持续的冰川消融和融水补给促进了地表水的循环, 增加了冰湖的丰度^[4]。冰湖保留了大量的冰川融水, 对维系高山区淡水资源等方面起着重要作用^[5]。其次, 鉴于全球范围内冰湖的扩张和不稳定性, 其意外爆发将导致灾难性洪水, 严重威胁下游居民、基础设施和区域生态环境安全^[6]。因此, 对冰湖开展实时的全方位的调查尤为重要且迫切需要。

鉴于遥感技术的快速发展, 各种高分辨率卫星和传感器在冰湖的识别、提取和监测方面表现出卓越的潜能^[7]。例如, 美国陆地卫星计划提供近 50 年光学影像序列已经成为监测

收稿日期: 2021-11-17; 修订日期: 2022-01-19; 出版日期: 2022-06-25

基金项目: 中国科学院 (XDA23100102); 中华人民共和国科学技术部 (2019YFA0607101)

*通讯作者: 宋春桥, 中国科学院南京地理与湖泊研究所, cqsong@niglas.ac.cn.

数据引用方式: [1] 马劲松, 宋春桥, 王艳君等. 亚洲冰湖最大分布范围和类型数据集 (1980s–2019) [J]. 全球变化数据学报, 2022, 6(2): 200–208. <https://doi.org/10.3974/geodp.2022.02.05>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2022.02.05>.

[2] 马劲松, 宋春桥, 王艳君等. 亚洲冰湖最大分布范围和类型数据集 (1980s–2019) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2021. <https://doi.org/10.3974/geodb.2021.11.02.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2021.11.02.V1>.

冰湖动态的主要数据源。基于遥感数据，已存在一些研究针对高山亚洲地区的冰湖空间分布特征开展遥感调查，如天山^[8]、喜马拉雅山脉^[9]、唐古拉山^[10]等，此类研究为揭示冰湖时空变化特征、了解冰湖对气候变化的响应提供了有效途径，也为后续冰湖水量估算和突发性洪水研究提供了数据来源。

当前，对亚洲冰湖的研究呈现局地或区域性的特征，且不同冰湖清单间存在先验知识差异（冰湖的定义、识别准则和分类等），缺乏在大区域尺度下以一致时空参照标准开展冰湖空间编目工作。为加深亚洲冰湖对山地环境的影响及对气候变化响应的理解，需要较新的详细的冰湖空间数据。为此，本文借助遥感产品，以同一标准编目了整个亚洲冰湖的最大分布范围数据，进一步分析了冰湖的空间异质性，以填补现有冰湖数据的不足。

2 数据集元数据简介

《亚洲冰川湖泊分类与最大分布数据集（1980s–2019）》^[11]的名称、作者、地理区域、数据年代、时间分辨率、空间分辨率、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。

表 1 《亚洲冰川湖泊分类与最大分布数据集（1980s–2019）》元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	亚洲冰川湖泊分类与最大分布数据集（1980s–2019）
数据集短名	GlacialLakeAsia_1980s-2019
作者信息	马劲松，中国科学院南京地理与湖泊研究所，南京信息工程大学地理科学学院，20191210011@nuist.edu.cn, 宋春桥，中国科学院南京地理与湖泊研究所，cqsong@niglas.ac.cn, 王艳君，南京信息工程大学地理科学学院，yjwang78@163.com, 张大鹏，中国科学院南京地理与湖泊研究所，河南理工大学测绘与国土信息工程学院，zdp_1994@163.com
地理区域	亚洲
数据年代	1980s–2019
空间分辨率	30 m
时间分辨率	年代
数据格式	.shp、.xlsx
数据量	4.92 MB（压缩后）
数据集组成	空间数据：亚洲冰川湖泊分类与最大分布数据集（1980s–2019） 表格数据：1980s–2019 年亚洲不同大小、类型、高程尺度下冰湖的数量与面积统计
基金项目	中国科学院（XDA23100102）；中华人民共和国科学技术部（2019YFA0607101）
数据计算环境	ArcGIS、Google Earth Engine
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 ^[12]
数据和论文检索系统	DOI, CSTR, Crossref, DCI, CSCD, CNKI, SciEngine, WDS/ISC, GEOSS

3 数据研发方法

3.1 数据源

本文基于全球地表水数据集^[13] (JRC Global Surface Water, GSW) 完成了亚洲冰湖最大分布范围数据的空间编目。GSW 作为陆地卫星 (Landsat) 数据的子产品, 在各类水域变化研究中得到广泛使用。它是 Pekel 团队基于 1984–2019 年近 400 万幅 Landsat 影像采用专家系统的分类方法将影像中的每个像素单独分类为水体和非水体, 并将结果整理成整个时间段以及月度和年度合成的数据。该数据集的空间分辨率为 30 m, 包含 7 个波段 (各波段详细内容见表 2), 存放在 GEE¹云平台上供全球用户开放使用。本文利用的是数据集中最大水淹范围图层 (max_extent), 用于获取冰湖边界。

表 2 GSW 数据波段简介

波段名称	简介
occurrence	1984–2019 年间水体存在的频率
change_abs	两个时期之间发生的绝对变化: 1984–1999 年与 2000–2019 年
change_norm	两个时期之间发生的标准变化: 1984–1999 年与 2000–2019 年
seasonality	存在水的月份
recurrence	每年水重现的频率
transition	水体存在第一年和最后一年之间的变化
max_extent	1984–2019 年间水体存在的范围, 即最大水淹范围

此外, 由美国航空航天局 (NASA) 和国防部国家测绘局 (NIMA) 联合提供的航天飞机雷达地形测绘任务 (Shuttle Radar Topography Mission, SRTM v3) 数字高程数据拥有高达 1 角秒的空间分辨率², 能精确提取出冰湖的高程 (冰湖质心点的高程); RGI 6.0 全球冰川轮廓数据³, 涵盖了所有现代冰川且提供了详细的冰川属性, 用于确定冰湖数据分布的缓冲区域范围。

3.2 研究方法

3.2.1 冰湖最大水域范围编目方法

冰湖边界提取方法目前主要包括计算机自动提取与人工目视解译两类。其中, 计算机自动提取具有解译速度快, 不受主观因素影响等优势; 目视解译的优势在于精度高和易于实现, 被广泛应用于各地的冰湖编目研究^[14,15]。GSW 数据的公开发布为冰湖水域范围的提取提供了便利, 然而数据集描绘了所有不同类型的地表水体, 例如河流、滩涂、湖泊、水库等。人工检查可有效消除非冰湖的噪声、提高冰湖清单精度。

目前已存在大量针对冰湖开展的研究工作, 但对冰湖的定义或识别的具体规则尚未达成共识。基于不同的观点对冰湖有多个定义, 其中, 姚晓军等^[16]将冰湖定义为以现代冰川

¹ <https://code.earthengine.google.com/>.
² <http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>.
³ <https://www.glims.org/RGI/>.

融水为主要补给源或在冰碛洼地内积水形成的天然水体。这一概念虽已得到很多研究者的认可，然而结合这一概念以及 GSW 数据集的特征在开展冰湖编目过程中依旧无法准确识别冰湖。前人对冰湖的研究往往是结合研究目的和研究区域的地理条件，设立一些阈值以区分冰湖与其他自然或人工湖泊。一些研究强调冰湖与冰川的关系，认为冰湖是自上次冰川最大时期以来由冰川运动产生的天然水体，通过设立距离现代冰川末端 3、5 或 10 km 的缓冲区作为自冰川最大时期以来冰川退缩的距离，并将这一范围内的湖泊视为冰湖^[17–19]。此外还有通过设定海拔阈值等其他参数来定义冰湖^[20]。采用海拔阈值提取冰湖的方法不具有普适性（不同冰川地区的海拔差异显著），建立缓冲区的方式依旧是当前提取或辅助识别冰湖的主流手段。

通过对亚洲冰川及其周围湖泊的可视化经验判断，确定以距离冰川末端 3 km 的缓冲区筛选区域内水体较为合理，与此同时我们对缓冲区周围的湖泊开展进一步的人工质量控制：删除误判的冰湖（主要是一些构造湖），补充遗漏的冰湖。此外，研究编目的冰湖清单旨在为气候-冰川-冰湖相互作用、淡水资源管理和冰湖溃决灾害研究提供基础数据（当冰湖发生溃坝时，面积超过 0.01 km² 的冰湖对下游流域可能造成严重威胁^[6]），因此将冰湖定义为距离现代冰川末端 3 km 范围内，面积 ≥0.01 km²，由冰川作用形成的天然湖泊。为确保冰湖编目数据的精确性，我们叠加了高分辨率的谷歌影像辅助人工识别，区域内所有冰湖都经过专业人员的仔细鉴定，这是一个极其耗时的过程，但此方法实现了冰湖的一致性检查和质量控制。图 1 展示的是详细的冰湖编目流程。

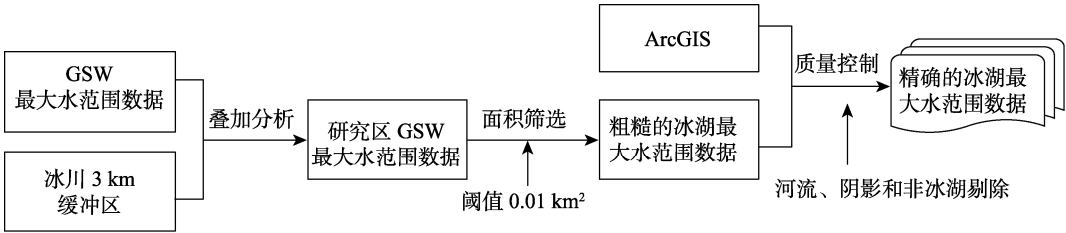


图 1 冰湖编目流程图

3.2.2 冰湖分类体系

冰湖的分类对于了解冰湖的形成机理和演化过程至关重要。冰湖的特征，包含湖泊的形成过程、湖盆的形状、湖坝的类型或物质成分、补给水源等是冰湖分类体系的基础。结合现有研究，可概括为两种分类系统，一种是基于冰湖和冰川之间的关系，如陈方等^[17]研究高亚洲冰湖年际变化特征时，将冰湖分为 4 类：冰前湖、冰上湖、冰川不接触湖和冰川边缘湖；另一种是依据冰湖的形成机制，如吴立宗等^[21]将兴都库什-喜马拉雅地区的冰湖分为冰川侵蚀湖、冰碛阻塞湖和冰川阻塞湖 3 大类及 10 个亚类。一般来说，仅依据遥感影像难以精确判断冰湖的形成机制。本研究使用的冰湖分类系统是以冰湖和冰川之间的关系为基础（表 3），这种分类体系能体现出冰川在冰湖形成过程中扮演的重要角色。为了获得可靠的分类结果，我们叠加高分辨率遥感影像和 RGI 6.0 的冰川轮廓等，对冰湖加以区分。

表 3 冰湖分类体系

冰湖类型		简介
非冰川补给湖 (NGFL)		没有现代冰川融水补给的湖泊
冰川补给湖 (GFL)	冰上湖 (SGL)	在冰川表面发育的湖泊
	冰川不接触湖 (IUL)	不与冰川接触但有冰川融水补给的湖泊
	冰川接触湖 (ICL)	有冰川融水补给且与冰川接触的湖泊

3.2.3 冰湖面积不确定性评估

受遥感产品的自身属性（如空间分辨率、云层覆盖水体提取算法等）、目视判读人员的先验知识、操作主观性、对冰湖的识别准则和冰湖清单最低面积阈值等影响，在编目冰湖清单过程中会产生不可避免的误差。本研究采用半自动的方法来绘制冰湖清单，并对每个湖泊进行了核查或编辑，然而，对于人工校正的过程缺乏合理的可量化的指标，因此，本文假设由人工校正导致的冰湖面积误差遵循高斯分布，仅考虑由遥感产品空间分辨率造成的冰湖面积提取误差。研究表明，空间分辨率引起的混合像素是误差来源的关键因素，利用划定的湖泊边界两侧一个像素的误差较为合适^[22]，因此单个湖泊面积的不确定性为：

$$e = n^{1/2} \times m \tag{1}$$

$$r = \frac{e}{A} \times 100\% \tag{2}$$

式中， e 是每个冰湖的绝对面积误差（ m^2 ）， n 表示冰湖边界上的像素数量（近似为湖的周长与空间分辨率之比）， m 是遥感产品每个像素的面积（GSW 数据集的空间分辨率为 30 m，因此 $m = 900 \text{ m}^2$ ）； r 是单个湖泊的相对误差， A 是湖泊的面积。由此得到的面积误差表明：亚洲冰湖的总绝对面积误差为 98.91 km^2 ，平均相对误差为 19.1%，每个湖的相对面积误差在 0.2%到 47.7%之间。图 2 展示的是每个冰湖的相对面积误差与冰湖大小的关系，由变化趋势可以发现冰湖的相对面积误差与冰湖大小呈现显著的幂函数关系，随着冰湖面积的增大，冰湖的相对面积误差呈现减小趋势。分析表明，当冰湖面积约 0.02 km^2 时，相对面积误差为 20%；当冰湖面积约 0.06 km^2 时，相对面积误差为 10%；当冰湖面积约 0.15 km^2 的时候，相对面积误差为 5%。

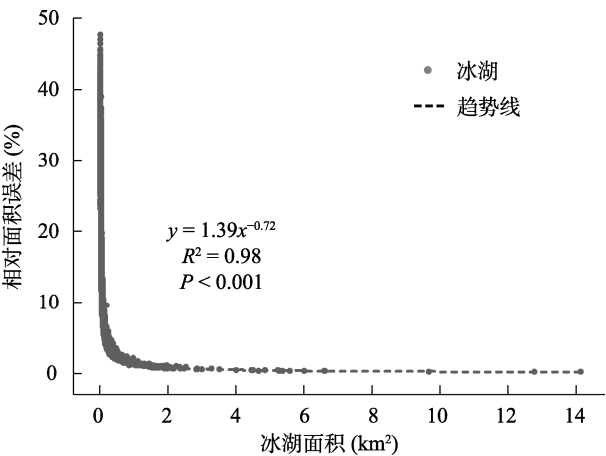


图 2 冰湖相对面积误差

4 数据结果

4.1 数据集组成

数据集为亚洲冰湖最大分布范围空间分布数据和统计表格数据。空间数据包括：1980s–2019 年亚洲不同类型冰湖最大水体分布数据（.shp）。表格数据包括：1980s–2019 年亚洲不同大小、类型、高程尺度下冰湖的数量与面积统计。

4.2 数据结果

4.2.1 冰湖区域分布特征

基于全球地表水数据集，研究区内共识别出 17,213 个冰湖（ $\geq 0.01 \text{ km}^2$ ），总覆盖面积约 $1,299.06 \pm 98.91 \text{ km}^2$ 。冰湖分布广泛且聚集，主要分布于青藏高原及邻近山脉，如喜马拉雅山、天山山脉、昆仑山脉等（图 3）；低海拔地区，如堪察加半岛等也有冰湖分布。总体来说，亚洲以小型冰湖为主，单个冰湖的面积介于 $0.01\text{--}14.27 \text{ km}^2$ 之间，几个面积较大的冰湖均位于喜马拉雅山脉。其中，面积小于 0.1 km^2 的冰湖约占总数量的 85.3%，但其面积仅占总量的 35.7%。占比只有 14.7% 的面积超过 0.1 km^2 的冰湖，面积却占冰湖总面积的 64.3%。因此，尽管亚洲拥有众多小型冰湖，但该地区冰湖的总面积仍以较大的冰湖为主（图 4a、4b）。图 3 和图 4c、4d 分别展示了不同类型冰湖的空间分布及其数量和面积。研究区内，不同类型冰湖参差不齐，其中冰川补给湖远超非冰川补给湖，数量和面积分别占 82.2% 与 87.5%。具体而言，四类冰湖中，冰川不接触湖的数量占优，约占 53.6%，冰川接触湖、冰上湖和非冰川补给湖的数量占比相对较少，分别占 18.8%、9.8%和 17.8%。就冰湖面积而言，四种冰湖（冰川不接触湖、冰川接触湖、冰上湖和非冰川补给湖）分别占 57.0%、

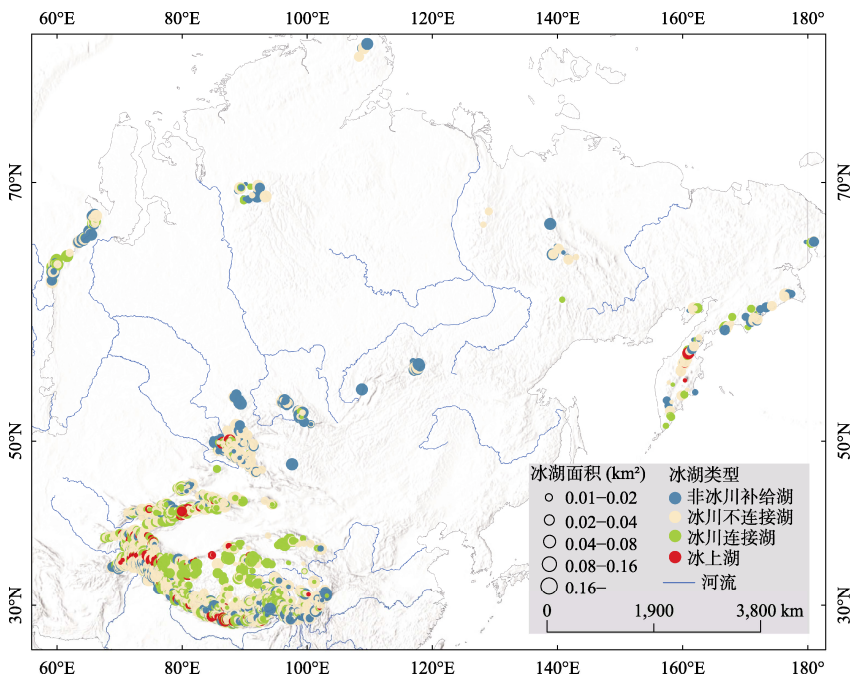


图 3 1980s–2019 年亚洲不同大小、类型的冰湖空间分布特征

25.5%、5.0%和 12.5%。与其他冰湖相比，冰川接触湖的平均面积更大，主要是因为此类湖泊与冰川末端相连，可以随着冰川的消融而演化。

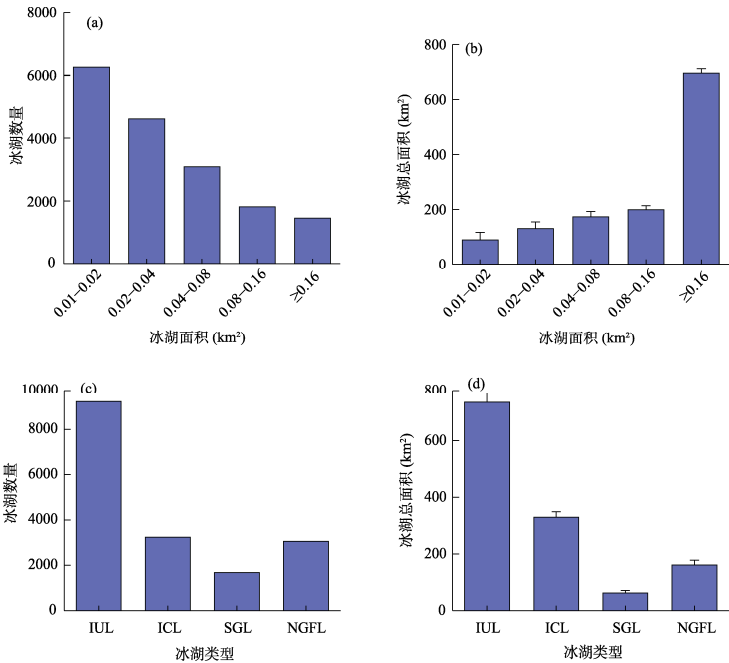


图 4 1980s–2019 年亚洲不同大小 (a、b)、类型 (c、d) 的冰湖数量和面积对比

(注：IUL、ICL、SGL、NGFL 分别表示冰川不接触湖、冰川接触湖、冰上湖和非冰川补给湖)

4.2.2 冰湖高程分布特征

定义 1,000 m 间距的海拔高度带以分析亚洲冰湖分布对海拔的依赖性。图 5 展示了亚洲冰湖的数量和面积在不同海拔带的分布情况。随着海拔的升高，冰湖的数量和面积大致呈正态分布。

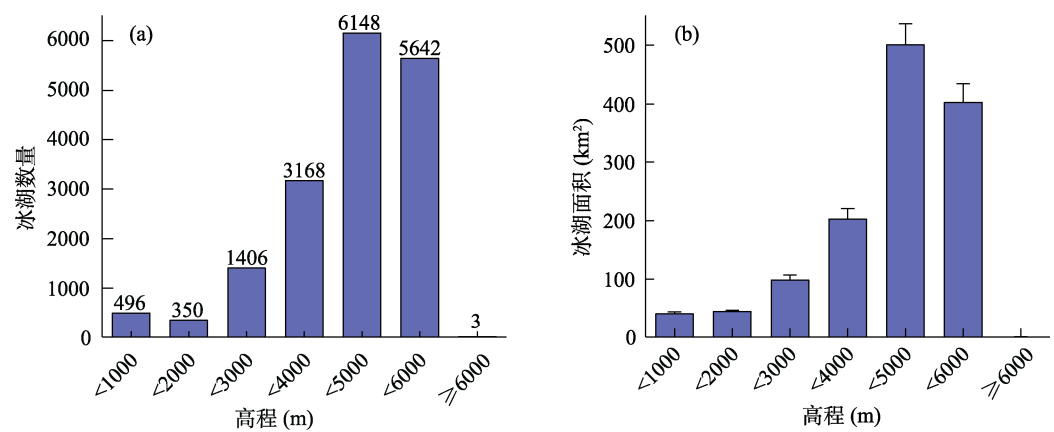


图 5 1980s–2019 年亚洲不同海拔高度带内冰湖的数量 (a) 和面积 (b) 对比

绘制的所有冰湖分布在海拔 69–6,044 m 范围内，平均海拔为 4,301 m。受冰川作用的影响，近 68.5%的冰湖分布在海拔 4,000–6,000 m 之间；在海拔 4,000–5,000 m 间（主要位

于喜马拉雅山脉），冰湖的总面积达到峰值，为 $503.62 \pm 35.40 \text{ km}^2$ （占总面积的 38.8%）。

进一步分析表明，在不同海拔高度带中，不同面积的冰湖分布不均匀，差异显著（图 6）。冰湖主要分布在 4,000–6,000 m 之间，且大多数是小型湖泊（ $\leq 0.04 \text{ km}^2$ ），较大的湖泊分布在相对低海拔地区，主要是因为低海拔地区的地势平坦，为一些大型非冰川补给湖和少数冰川不接触湖提供了良好的蓄水环境^[10]。

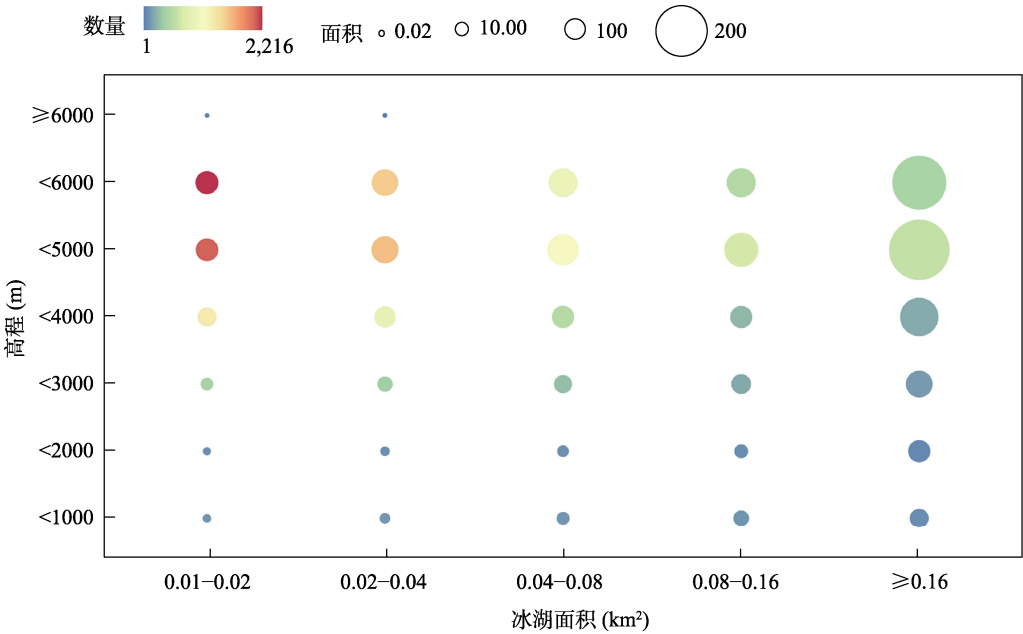


图 6 亚洲 1,000 m 间距的海拔高度带内不同面积冰湖的分布统计

5 总结

通过半自动的方法，我们使用开源的遥感产品（GSW）开展亚洲冰湖空间编目任务，并编制了不同类型的冰湖清单。结果分析表明：

亚洲范围宽广，区域内共识别出 17,213 个冰湖（ $\geq 0.01 \text{ km}^2$ ），总覆盖面积约 $1,299.06 \pm 98.91 \text{ km}^2$ 。主要分布在青藏高原及邻近山脉，如喜马拉雅山、天山山脉、昆仑山脉等。亚洲以小型冰湖为主，面积小于 0.1 km^2 的冰湖约占总数量的 85.3%，单个冰湖的面积介于 $0.01\text{--}14.27 \text{ km}^2$ 之间。此外，冰川补给湖的数量和面积远超非冰川补给湖，分别占 82.2%，87.5%；冰川不接触湖的数量（53.6%）和面积（57.0%）均处于主导地位，区域内冰上湖的数量（9.8%）和面积（5.0%）占比最少；相比较而言，冰川接触湖的平均面积（ 0.1 km^2 ）最大。

垂直方向上，所有冰湖分布在海拔 69–6,044 m 范围内，平均海拔为 4,301 m。冰湖集中分布在海拔 4,000–6,000 m 之间；海拔 4,000–5,000 m 范围内，冰湖的总面积达到峰值，为 $503.62 \pm 35.40 \text{ km}^2$ 。在不同海拔高度带中，不同大小的冰湖分布不均匀，呈现出小型冰湖平均海拔高、大型冰湖平均海拔低的特征。

本研究提供了一幅亚洲完整的冰湖最大分布范围和类型空间分布数据，为揭示冰湖时空变化特征、了解冰湖对气候变化的响应提供了有效途径，也为后续冰湖水量估算和突发

性洪水研究提供了数据来源。

作者分工：宋春桥对数据集的开发做了总体设计；马劲松采集和处理了亚洲冰湖最大分布范围与类型数据；王艳君和张大鹏做了数据验证以及指导论文写作；马劲松撰写了数据论文等。

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] Zemp, M., Huss, M., Thibert, E., *et al.* Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016 [J]. *Nature*, 2019, 568(7752): 382–386.
- [2] Zemp, M., Frey, H., Gärtner-Roer, I., *et al.* Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century [J]. *Journal of Glaciology*, 2015, 61(228): 745–762.
- [3] Hugonnet, R., McNabb, R., Berthier, E., *et al.* Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century [J]. *Nature*, 2021, 592(7856): 726–731.
- [4] Yao, C., Wang, X., Zhao, X., *et al.* Spatial-temporal variation of glacial lakes in the China-Pakistan Economic Corridor from 1990 to 2018 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(1): 33–42.
- [5] Shugar, D. H., Burr, A., Haritashya, U. K., *et al.* Rapid worldwide growth of glacial lakes since 1990 [J]. *Nature Climate Change*, 2020, 10(10): 939–945.
- [6] Veh, G., Korup, O., Walz, A. Hazard from Himalayan glacier lake outburst floods [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, 117(2): 907–912.
- [7] 罗竹, 刘凯, 张春亢等. DEM 在湖泊水文变化研究中的应用进展[J]. 地球信息科学学报, 2020: 1510–1521.
- [8] 王欣, 吴坤鹏, 蒋亮虹等. 近 20 年天山地区冰湖变化特征[J]. 地理学报, 2013, 68(7): 983–993.
- [9] Song, C., Sheng, Y., Wang, J., *et al.* Heterogeneous glacial lake changes and links of lake expansions to the rapid thinning of adjacent glacier termini in the Himalayas [J]. *Geomorphology*, 2017, 280: 30–38.
- [10] Song, C., Sheng, Y. Contrasting evolution patterns between glacier-fed and non-glacier-fed lakes in the Tanggula Mountains and climate cause analysis [J]. *Climatic Change*, 2016, 135(3): 493–507.
- [11] 马劲松, 宋春桥, 王艳君等. 亚洲冰川湖泊分类与最大分布数据集 (1980s–2019) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2021. <https://doi.org/10.3974/geodb.2021.11.02.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2021.11.02.V1>.
- [12] 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).
- [13] Pekel, J. F., Cottam, A., Gorelick, N., *et al.* High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes [J]. *Nature*, 2016, 540(7633): 418–422.
- [14] Huang, C., Chen, Y., Zhang, S. Q., *et al.* Detecting, extracting, and monitoring surface water from space using optical sensors: a review [J]. *Reviews of Geophysics*, 2018, 56(2): 333–360.
- [15] Wang, X., Guo, X., Yang, C., *et al.* Glacial lake inventory of high-mountain Asia in 1990 and 2018 derived from Landsat images [J]. *Earth System Science Data*, 2020, 12(3): 2169–2182.
- [16] Yao, X., Liu, S., Han, L., *et al.* Definition and classification system of glacial lake for inventory and hazards study [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(2): 193–205.
- [17] Chen, F., Zhang, M., Guo, H., *et al.* Annual 30-meter dataset for glacial lakes in high mountain Asia from 2008 to 2017 [J]. *Earth System Science Data*, 2020, 13(2): 741–766.
- [18] Wood, J. L., Harrison, S., Wilson, R., *et al.* Contemporary glacial lakes in the Peruvian Andes [J]. *Global and Planetary Change*, 2021, 204: 103574.
- [19] Worni, R., Huggel, C., Stoffel, M. Glacial lakes in the Indian Himalayas—from an area-wide glacial lake inventory to on-site and modeling based risk assessment of critical glacial lakes [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 468–469: S71–S84.
- [20] Buckel, J., Otto, J. C., Prasicek, G., *et al.* Glacial lakes in Austria—distribution and formation since the Little Ice Age [J]. *Global and Planetary Change*, 2018, 164: 39–51.
- [21] Wu, L., Xin, L., Liu, S., *et al.* Remote sensing based glacial lake inventory in the Hindu Kush-Himalaya region [C]. International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering, 2011.
- [22] Krumwiede, B. S., Kamp, U., Leonard, G. J., *et al.* Recent Glacier Changes in the Mongolian Altai Mountains: Case Studies from Munkh Khairkhan and Tavan Bogd [M]. Global Land Ice Measurements from Space, 2014.