

冰湖的界定与分类体系 ——面向冰湖编目和冰湖灾害研究

姚晓军¹, 刘时银^{2,3}, 韩 磊⁴, 孙美平^{1,2}

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000; 3. 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650091; 4. 四川省地质调查院, 成都 610081)

摘要: 冰川湖泊(简称冰湖)不仅是高山区重要的水资源,而且是许多冰川灾害的孕育者和发源地,在冰冻圈科学、气候变化和山地灾害研究中具有重要地位。本文系统讨论了现有冰湖定义及存在的问题,从冰湖编目和冰湖灾害研究视角提出冰湖的定义,指出现有冰湖研究主要是基于“以现代冰川融水为主要补给源或在冰碛垄洼地内积水形成的天然水体”这一冰湖定义的。同时,从冰湖形成机理、地貌形态和空间分布位置将冰湖划分为冰川侵蚀湖(冰斗湖、冰川槽谷湖和其他冰川侵蚀湖)、冰碛阻塞湖(终碛阻塞湖、侧碛阻塞湖、冰碛垄热融湖)、冰川阻塞湖(冰川前进阻塞湖和其他冰川阻塞湖)、冰面湖、冰下(内)湖和其他冰川湖6大类及8个亚类,并给出各冰湖类型相应的遥感判识指标和定量指标,以期建立具有普适性和可操作性的冰湖分类体系。

关键词: 冰湖;冰川;定义;分类;编目;灾害

DOI: 10.11821/dlxb201707004

1 引言

湖泊是指在陆地表面盆地或洼地积水形成的、有一定水域面积、换水较为缓慢的水体^[1]。湖泊作为陆地水圈的重要组成部分,能忠实记录湖区不同时间尺度气候变化和人类活动信息,是揭示全球气候变化与区域响应的重要信息载体^[2-5]。冰川湖泊(简称冰湖)作为湖泊类型之一,既是一种宝贵的水资源和自然景观,又是许多冰川灾害的孕育者和发源地^[6-7]。在全球气候变暖背景下,由冰湖溃决引发的洪水和泥石流灾害呈现数量增多、危害程度加剧特征^[8],如中国西藏地区自20世纪30年代以来至少发生过28次冰湖溃决事件,且2000年后此类灾害具有频次增加和时空延拓趋势^[9-10],因此冰湖研究备受学术界和地方政府的广泛关注。

在全球,冰湖主要分布在北美的落基山脉和阿拉斯加海岸山脉^[11-12]、南美的安第斯山脉^[13],欧洲的冰岛^[14]、阿尔卑斯山^[15-16]和高加索地区^[17],亚洲的中亚地区^[18-22]、喜马拉雅

收稿日期: 2016-12-19; 修订日期: 2017-04-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41261016, 41561016); 中国科学院冰冻圈科学国家重点实验室开放基金项目(SKLCs-OP-2016-10); 西北师范大学青年教师科研能力提升计划项目(NWNU-LKQN-14-4); 中国地质调查局地质调查项目(DD2016034206) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41261016, No.41561016; Opening Foundation Projection of State Key Laboratory of Cryosphere Sciences, CAS, No. SKLCs-OP-2016-10; Youth Scholar Scientific Capability Promoting Project of Northwest Normal University, No.NWNU-LKQN-14-4; Geological Survey Project of China Geological Survey, No.DD2016034206]

作者简介: 姚晓军(1980-), 男, 山西夏县人, 博士, 副教授, 研究方向为地理信息技术与冰冻圈变化。

E-mail: xj_yao@nwnu.edu.cn

1173-1183 页

山^[6, 7, 23-25]和青藏高原东南部^[26-27]等地区。中国境内冰湖的研究区域主要集中在喜马拉雅山^[28-29]、天山^[20]、喀喇昆仑山^[30]、阿尔泰山^[31]和藏东南地区^[26-27]，其侧重点在于冰湖变化研究^[20, 26, 28, 32-33]、潜在危险性冰湖识别^[34-35]和冰湖溃决洪水模拟^[36]等方面。近年来，一些学者或机构先后基于多源遥感影像数据在部分山区开展了冰湖编目工作，如王欣等^[7]完成了中国喜马拉雅山地区冰湖编目，Wu等^[37]和国际山地中心（ICIMOD）^[38]则对兴都库什—喜马拉雅山地区冰湖进行了系统性地编目，这些研究成果已成为认识这一地区冰湖变化的时空特征和探讨冰湖对气候变化响应规律的重要数据。然而，作为冰湖相关研究的基础，关于冰湖的定义及其分类体系目前仍存在很大争议，这直接导致不同研究成果往往难以进行比较，甚至出现截然相反的结论。如高晓等^[28]和Wang等^[39]分别对科西河流域2000-2010年冰湖变化进行了研究，前者认为该流域冰湖数量与面积均为增加，后者则认为冰湖数量减少而面积增加，在所用遥感影像（2000年）几乎相同情况下，冰湖的数量亦有很大差距，分别为1228个和1680个。因此，准确定义冰湖、合理划分冰湖类型以及给出相应的遥感判识依据就显得尤为必要和迫切。

2 冰湖的定义

在《冰冻圈科学辞典》^[40]中，冰湖（Glacial Lake）被定义为由冰川作用形成的湖泊。维基百科（<https://en.wikipedia.org>）将冰湖定义为末次冰期以来冰川在进退过程中侵蚀地表形成洼地，由冰川融水补给形成的湖泊。吕儒仁等在《西藏泥石流与环境》^[41]一书中指出，冰湖是指由古冰川和现代冰川作用形成的类似人工水库的天然水体。类似的定义还有：冰湖是由冰川作用形成的湖泊或以冰川融水为主要补给源的湖泊^[34]；冰湖是由于冰川退缩产生的融水在冰川末端或者侧部汇集而成的高原湖泊^[42]；冰湖是末次冰期以来山岳冰川在进退过程中形成湖盆，由现代冰川融水或由大气降水补给的湖泊^[31]。由上述可知，在冰湖的定义中都强调冰湖是由冰川作用所形成，主要区别一是冰川作用时期，二是湖泊物质来源。由于定义中对时间信息和湖水物质来源的模糊化，造成在冰湖研究中难以将冰湖从湖泊水体准确分离出来，这一点在冰湖编目工作和冰湖变化研究中尤为突出。如Wang等^[43]和Zhang等^[44]在对天山和青藏高原冰湖变化研究时只选取距现代冰川10 km的湖泊作为冰湖，而不考虑这些湖泊是否是由冰川作用所形成或此范围外是否还存在由冰川作用形成的湖泊。在上述冰湖定义中，一些学者强调冰湖以冰川融水为主要补给源，但在实际工作中冰川融水量的计算及其所占湖泊的比重往往难以量化，尤其是有冰川融水汇入但距冰川较远的湖泊是否归属为冰湖，一旦补给湖泊的冰川消失则该湖是否还为冰湖等，即现有冰湖定义的可操作性较差，这就导致不同学者的研究成果不具有对比性，同时也造成不同部门机构间的冰湖数据难以共享。

从冰湖的形成机理来看，冰川在前进退缩时通过侵蚀搬运地表物质而在地表形成侵蚀洼地，继而接纳冰川融水和大气降水形成湖泊，即冰川作用是冰湖形成的主导因素。末次冰期冰盛期（LGM）是距今最近且冰川规模最大的时期，因此在理论上可将冰湖定义为“末次冰期冰盛期以来在受冰川侵蚀作用形成的洼地中积水而形成的天然水体”。然而，在研究工作中依靠上述定义仍会存在诸多问题或争议，如某一区域末次冰期冰盛期冰川覆盖范围的确定，青藏高原上的大湖是否为冰川湖泊等。近期对冰湖的研究多侧重于基于遥感影像的冰湖编目、冰湖对现代气候变化的响应、冰川变化与冰湖演化间的耦合关系、潜在危险性冰湖识别、冰湖溃决灾害等方面，即这些研究一方面在时间尺度上为现代过程，另一方面强调现代冰川及其融水对冰湖形成及演化的作用。因此，从面向

现代过程和实际应用研究角度可将冰湖定义为“以现代冰川融水为主要补给源或在冰碛垄洼地内积水形成的天然水体”。在这一冰湖定义中，更加强调现代冰川在冰湖形成和变化中所起的作用。在中国不同山区开展冰湖编目和冰湖变化研究时，建议以中国第一、二次冰川编目数据集作为本底来判别研究区是否存在现代冰川。需要说明的是，本文在下节所讨论的冰湖分类体系是基于后一冰湖定义的。

3 冰湖分类体系

目前，国际上关于冰湖的分类体系并没有统一标准，不同机构和学者多根据自己的研究目的或侧重点而对冰湖进行分类。如 ICIMOD^[38]在对兴都库什—喜马拉雅山地区冰湖编目时，将冰湖划分为冰川侵蚀湖、冰碛阻塞湖、冰川阻塞湖、冰面湖和冰下湖5大类；Wu等^[37]则将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。易朝路等^[45]根据冰湖形成的机械和热力方面的差异，将阿尔泰山地区冰湖分为冰川侵蚀湖、冰川阻塞湖、冰碛阻塞湖、冰川热融湖和复合成因型冰川湖；按补给成因又划分为冰水湖泊和非冰水湖泊，其中前者以冰川融水径流补给为主，后者以大气降水形成的地表径流或坡面水流补给为主。在中国喜马拉雅山地区冰湖编目工作中，王欣等^[7]将冰湖划分为冰碛湖、冰川阻塞湖、冰斗湖、冰蚀湖、滑坡体阻塞湖、冰面湖和槽谷/河谷湖7种类型；曹学诚等^[34]则采用3大类6亚类分类方案，分别为冰川侵蚀湖（冰斗湖和其他冰川侵蚀湖）、冰碛阻塞湖（终碛阻塞湖、侧碛阻塞湖和其他冰碛阻塞湖）和冰面湖。此外，王欣等^[46]根据冰湖形成年代、湖坝属性、湖盆形态、补给水源、面积变化、与母冰川的空间关系、危险程度等分类标准，将冰湖系统性地分为27种类型，但依然存在实际冰湖分类结果与理论分类体系难以对照等缺陷。在遵循前人研究成果基础上，以系统性、规范性、可操作性和扩展性为原则，按照冰湖形成机理本文将冰湖划分为冰川侵蚀湖、冰碛阻塞湖、冰川阻塞湖、冰面湖、冰下（内）湖和其他冰川湖6大类，其中前3种类型按冰湖所在的空間位置或地貌形态又可次分为冰斗湖、冰川槽谷湖、其他冰川侵蚀湖、终碛阻塞湖、侧碛阻塞湖、冰碛垄热融湖、冰川前进阻塞湖和其他冰川阻塞湖8个亚类（表1），从而构建完整的冰湖分类体系。

考虑到冰湖编目工作和冰湖变化研究大多是基于卫星遥感影像的，因此以下在对各

表 1 冰湖分类体系
Tab. 1 The classification system of glacial lake

大类		亚类		含义
编号	名称	编号	名称	
10	冰川侵蚀湖	11	冰斗湖	形成于冰斗内的湖泊
		12	冰川槽谷湖	形成于由冰川作用形成的U型槽谷中的湖泊
		13	其他冰川侵蚀湖	由冰川作用所形成但难以明确分类的湖泊
20	冰碛阻塞湖	21	终碛阻塞湖	在冰川终碛垄与冰川末端洼地间形成的湖泊
		22	侧碛阻塞湖	受冰川侧碛垄阻挡积水形成的湖泊
		23	冰碛垄热融湖	在冰川终碛垄或侧碛垄上洼地内形成的湖泊
30	冰川阻塞湖	31	冰川前进阻塞湖	由于冰川前进或跃动阻塞河谷渚水形成的湖泊
		32	其他冰川阻塞湖	坝体为冰川冰体但非冰川前进而形成的湖泊
40	冰面湖			位于冰川表面的湖泊
50	冰下(内)湖			位于冰川内部或冰床上的湖泊
60	其他冰川湖			由滑坡、基岩崩塌、泥石流阻塞冰川融水形成的湖泊

冰湖类型阐述时从冰湖遥感影像解译特征角度分别加以说明。在开展冰湖遥感解译工作之前, 研究人员首先应根据冰川编目数据和数字高程模型 (DEM) 数据来确定研究区冰湖大致分布范围, 即仅考虑有现代冰川分布流域内的湖泊。其次, 尽管湖泊水体与其周边地物在遥感影像上的光谱特征差异明显而容易判识, 但仅依靠单一传感器或单时相遥感影像来区分冰湖的类型往往难度很大, 还应借助 DEM 数据 (用于去除可能误判为湖泊的山体阴影)、三维可视化技术 (如 Google Earth) 和一些平台上 (如天地图) 或来自其他传感器的高分辨率遥感影像综合判别。

3.1 冰川侵蚀湖 (Glacial erosion lake)

冰川侵蚀湖 (简称冰蚀湖) 是指冰川在运动过程中, 冰床受冰川刨蚀和磨蚀作用形成积水洼地并汇水形成的湖泊。目前常见的冰蚀湖多为第四纪冰川的侵蚀作用所形成^[45], 上游少有现代冰川分布, 主要依靠大气降水补给。如上所述, 若湖泊上游已无现代冰川分布则不归属为冰湖, 即不考虑古冰蚀湖。按分布位置和地貌形态, 冰蚀湖又可细分为以下 3 种类型。

(1) 冰斗湖 (Cirque lake)。冰斗湖的最大特征是湖泊发育在冰斗之内, 典型形态是三面为陡峻的岩壁, 剩余一侧为高起的反向岩槛 (图 1, 该冰斗湖质心坐标为 29°42'18"N, 96°18'32"E)。冰斗湖通常规模较小, 冰斗后壁发育有悬冰川。在遥感判识时, 需借助坡度数据或在 Google Earth 软件下判识其地形特征, 符合冰斗特征且后壁发育有冰川的水体可归为冰斗湖。

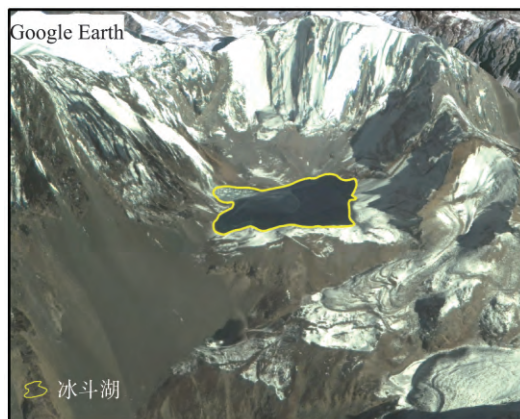


图 1 冰斗湖

Fig. 1 Cirque lake

(2) 冰川槽谷湖 (Glacial valley lake)。大型山谷冰川通过对冰床下切侵蚀和对支沟侧向侵蚀形成两侧陡直而底部宽平的“U”型谷地, 在槽谷中汇集冰川融水和大气降水所形成的湖泊可归为冰川槽谷湖。此类冰湖通常规模较大且离现代冰川较远, 尽管部分湖泊坝体为古冰碛堆积物, 为便于与小冰期以来形成的冰碛湖区分及考虑其对下游地区潜在的危险 (是冰湖溃决灾害链中的重要组成部分), 可将这些湖泊归为冰川槽谷湖。根据阿克库勒湖距其补给冰川 (喀纳斯冰川) 的距离和冰川规模 (图 2), 建议在判识冰川槽谷湖时, 首先要考虑其形态为长条状, 其次湖泊上游应有面积较大的现代冰川 ($> 20 \text{ km}^2$), 再次应考虑现代冰川融水对湖泊的补给作用, 可以湖泊距流域内面积最大冰川末端的距离小于 15 km 为参考, 以与其他构造湖相区分。

(3) 其他冰川侵蚀湖。难以通过地貌形态辨识且不属于下列其他冰湖类型的冰川湖泊可归为此类。

3.2 冰碛阻塞湖 (Moraine-dammed lake)

冰碛阻塞湖 (简称冰碛湖) 是指受冰碛垄阻塞而在冰碛垄与冰川之间形成的湖泊。按其所在位置可分为终碛阻塞湖、侧碛阻塞湖和冰碛垄热融湖 3 个子类型。

(1) 终碛阻塞湖 (简称终碛湖, End moraine-dammed lake) 是指在冰川消融退缩过程中, 在冰碛物构成的终碛垄与冰川末端之间渚水形成的湖泊, 这类冰湖是中国喜马拉雅山地区和念青唐古拉山地区造成冰湖溃决洪水或泥石流灾害的主要类型。终碛湖多与冰川末端相连或与冰川末端间的距离甚小, 在遥感影像上易于判别 (图 3a)。在 Google

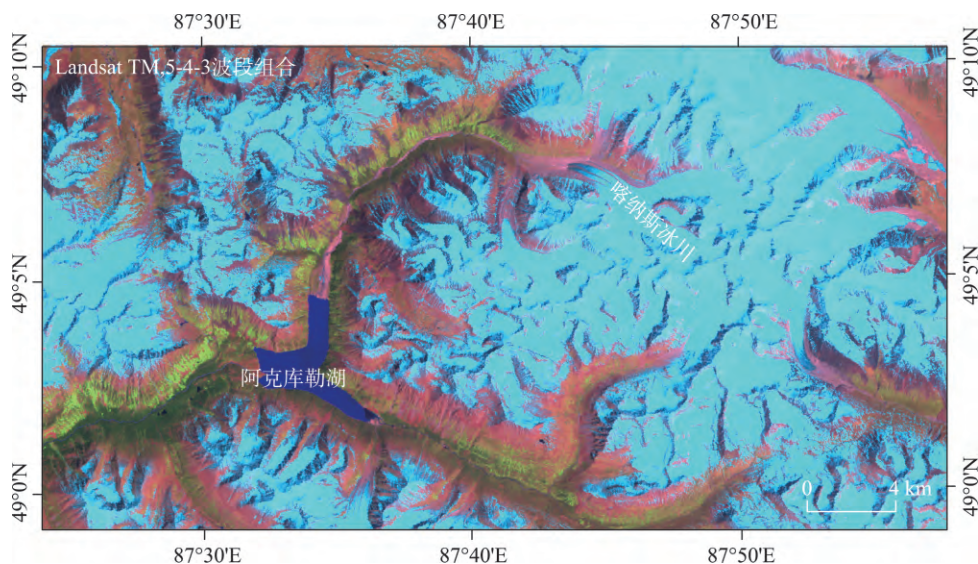


图2 冰川槽谷湖(阿克库勒湖)
Fig. 2 Glacial valley lake (Akkol Lake)

Earth软件中,通常可见清晰的呈隆起状的冰川终碛垄(图3b)。在一些冰川末端下游通常存在若干条终碛垄并在其间形成湖泊,因其形成主因是冰川作用且湖水主要靠冰川融水补给,故可将这些湖泊划归为终碛阻塞湖。通过对喜马拉雅山地区此种类型湖泊间距离量测,最上游终碛阻塞湖与最下游终碛阻塞湖的距离不超过2.0 km,即距最上游终碛湖2.0 km以外且位于其下游的湖泊不再判识为终碛阻塞湖。

(2) 侧碛阻塞湖(简称侧碛湖, Lateral moraine-dammed lake)是指受冰川侧碛垄阻挡积水而形成的湖泊。侧碛湖通常位于规模较大的山谷冰川侧碛垄两侧,由主谷冰川侧碛垄阻塞支谷冰川融水而形成。如在珠穆朗玛峰南侧最大的冰川——格重巴(Ngozumpa)冰川侧碛垄两侧就发育有5个侧碛阻塞湖(图4),其中第3高佑湖(Gokyo Lake)是面积最大的侧碛湖,为0.59 km²。

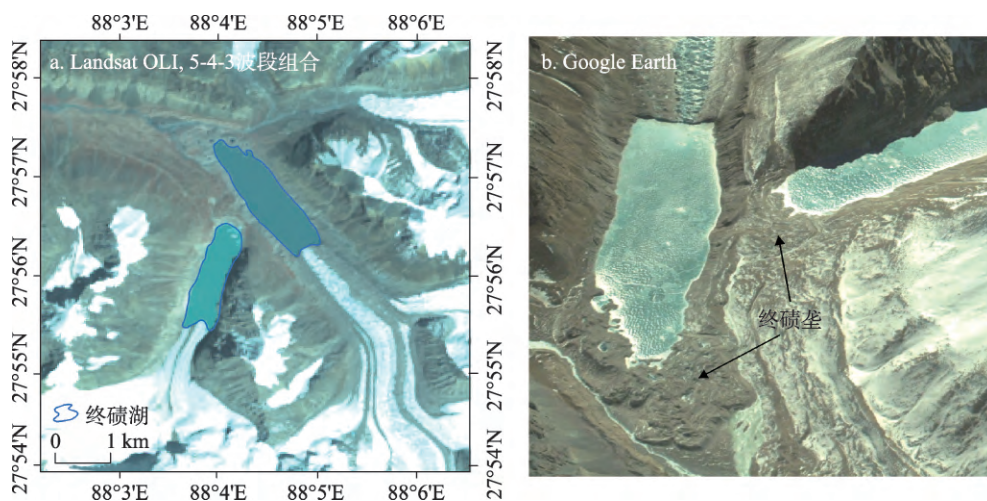


图3 终碛阻塞湖
Fig. 3 End moraine-dammed lake

(3) 冰碛垄热融湖 (Moraine thaw lake)。在一些冰川终碛垄或侧碛垄上通常也分布着数量众多但规模较小的湖泊 (图5), 因其距冰碛湖很近, 一些学者将其归属为冰碛湖, 亦有学者称之为冰前热融湖^[45]。此类湖泊以冻融作用为主要营力, 如埋藏于冰碛中的死冰受热融化后引起地表沉陷而形成积水洼地, 尽管其本身现在并不接纳冰川融水, 但因死冰消融而形成, 故可列入冰湖范畴。需要指出的是, 在石冰川和冻土区广泛分布的热融湖不属于冰碛垄热融湖, 在冰湖编目工作或冰湖变化研究中应予以剔除。

3.3 冰川阻塞湖 (Ice-blocked lake)

无论是冰川前进或跃动堵塞主河谷蓄水成湖, 还是由于支冰川快速退缩与主冰川分离, 在支冰川末端空出的冰蚀谷地中由主冰川阻塞而形成的湖泊, 都是以冰川冰作为坝体的, 因此可称此类冰川湖为冰川阻塞湖 (简称冰坝湖)。根据冰川阻塞湖的形成原因可分为冰川前进阻塞湖 (Advancing glacier-blocked lake) 和其他冰川阻塞湖 (Glacier-blocked lake), 前者主要出现在中国境内的叶尔羌河流域 (如克亚吉尔特索湖), 后者典型代表是库玛拉克河流域的麦茨巴赫湖 (属吉尔吉斯斯坦), 但在中国羌塘高原发现也存在此类冰川阻塞湖 (图6), 之前尚未见报道。对于冰川前进阻塞湖而言, 冰坝冰体受低海拔气温较高和湖水侵蚀作用, 生存期往往较短 (几个月至一年); 对于其他冰川阻塞湖, 其演变呈现不同特征, 如麦茨巴赫湖溃决后因排水通道闭合蓄水能够再次成湖, 具有一定的周期性, 但在青藏高原内部此类冰湖通常较稳定。

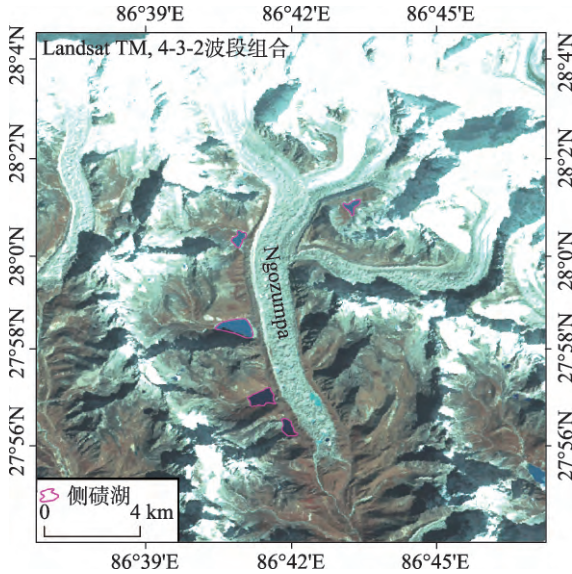


图4 侧碛阻塞湖
Fig. 4 Lateral moraine-dammed lake

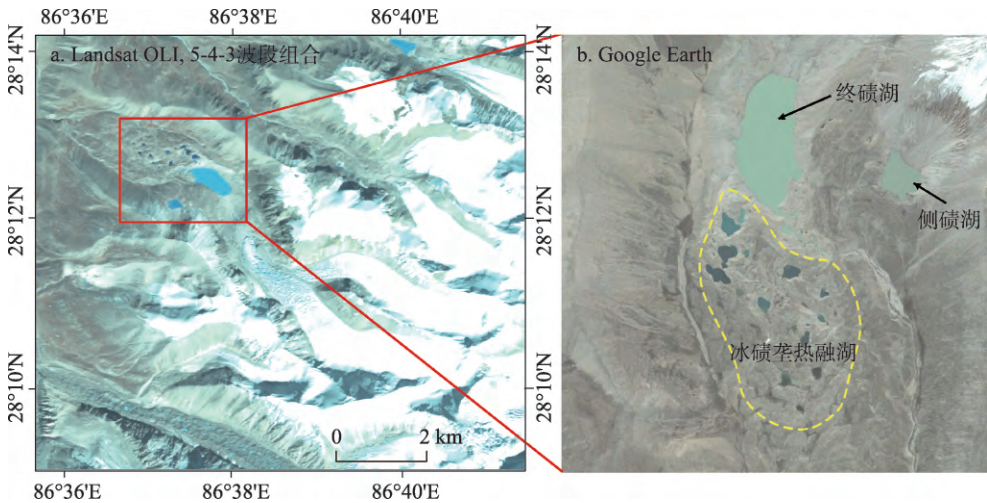


图5 冰碛垄热融湖(b图中黄色线条内蓝绿色水体)
Fig. 5 Moraine thaw lake (water body in blue-green color within the yellow-color polygon in sub-figure b)

3.4 冰面湖(Supraglacial lake)

冰面湖是指位于冰川表面的湖泊,因冰川表面差异消融形成的临时性积水洼地。冰面湖多出现在规模较大的表碛覆盖型冰川消融区表面,如在珠穆朗玛峰北侧绒布冰川消融区就发育有数量众多的冰面湖(图7),其中面积最大湖泊约 0.47 km^2 (2016年)。在天山托木尔峰地区,诸如托木尔冰川、土格别里齐冰川、科契卡尔巴西冰川、琼台兰冰川等表碛覆盖型冰川表面亦有大量冰面湖发育。当冰面湖与冰内排水系统连通时,湖水可以快速排出,因此冰面湖通常年内、年际变化都较大。鉴于目前研究常用的 Landsat 系列卫星遥感影像空间分辨率小、冰面湖变化迅速、面积较大的冰面湖是终碛湖的雏形等,建议以面积 $\geq 0.02\text{ km}^2$ 的冰面湖作为冰湖编目对象。冰面湖与冰碛垄热融湖的区别主要在于二者所处部位不同,前者位于冰川表面,后者则位于冰碛垄上。

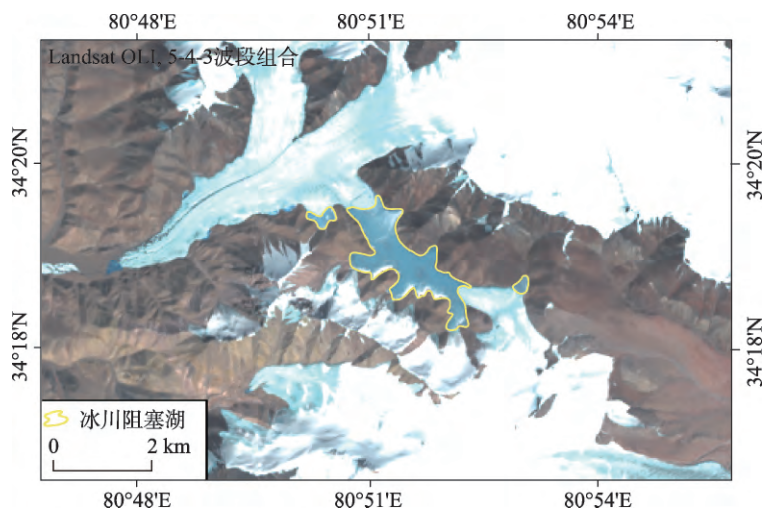


图6 青藏高原冰川阻塞湖

Fig. 6 Ice-blocked lake over the Tibetan Plateau

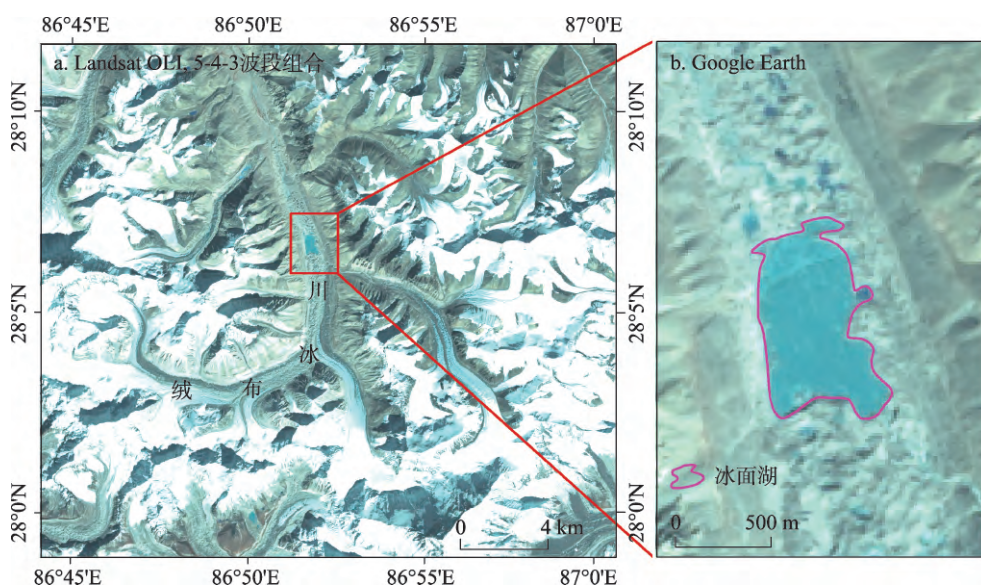


图7 冰面湖

Fig. 7 Supraglacial lake

3.5 冰下(内)湖(Subglacial lake)

冰下(内)湖是指在冰川内部或冰床上发育形成的湖泊。研究发现在南极冰盖下存在 140 个以上的冰下湖^[47], 最大的湖泊即 Vostok Lake (沃斯托克湖, 又名东方湖)。对于山地冰川而言, 目前尚未有此类冰湖见诸报端, 但在中国藏东南海洋性冰川分布区, 由于冰下水系通道发育, 小规模冰下(内)湖有可能存在, 但需借助冰雷达等仪器, 仅依靠卫星遥感影像难以判识。为保证冰湖分类体系的完整性, 本文将冰下(内)湖作为冰湖的一种类型列出, 但在基于卫星遥感影像开展冰湖相关研究时可将其剔除。

3.6 其他冰川湖

除上述 5 种类型冰川湖泊外, 在冰川作用区, 由于山体滑坡、基岩垮塌、泥石流或雪崩阻塞冰川融水所形成的湖泊统一归属为其他冰川湖。此类湖泊为堰塞湖, 通常对下游居民点和道路、水电站等基础设施存在巨大潜在危害, 因此在冰湖编目中应予以考虑。对于此类冰湖的判识依据一是其坝体, 除借助高分辨率遥感影像外, 堰塞湖的形成多与地震、泥石流等活动相关^[48], 在此时间节点前后湖泊规模有明显变化, 如 2013 年 7 月 5 日西藏嘉黎县然则日阿错溃决泥石流堵塞衣布沟和罗琼沟形成的两处堰塞湖^[9]; 二是距现代冰川的距离, 建议以距冰川末端 10 km 为参考^[43-44]。

4 结语

冰湖作为冰冻圈科学领域的重要研究对象, 其形成与演化不仅与气候变化、冰川运动息息相关, 而且是山地灾害链中的重要环节, 受到学术界和政府相关部门的广泛关注。本文从概念的内涵和外延角度对冰湖定义进行了讨论, 指出现有冰湖定义主要是基于冰川作用和冰川融水补给两种视角, 但概念中时空信息的模糊化造成在冰湖编目或冰湖变化研究中实际操作性较差, 即某一湖泊是否为冰川湖泊难以确定。在理论上由冰川作用形成的湖泊都可以称为冰川湖泊, 即末次冰期冰盛期以来在受冰川侵蚀作用形成的洼地中积水而形成的天然水体。然而, 末次冰期冰盛期冰川覆盖范围的难以界定或第四纪冰川学知识的欠缺, 研究人员对于湖泊类型的判定依然存在不同的认识, 即基于理论上的冰川湖泊定义可操作性较差。由于已有冰湖的研究关注点在于冰川及其融水对冰湖的作用, 因此从面向冰湖编目和冰湖研究角度, 可将冰湖定义为“以现代冰川融水为主要补给源或在冰碛垄洼地内积水形成的天然水体”。按照冰湖形成机理可分为冰川侵蚀湖、冰碛阻塞湖、冰川阻塞湖、冰面湖、冰下(内)湖和其他冰川湖 6 大类, 其中前 3 种类型按冰湖所在的空间位置或地貌形态又可次分为冰斗湖、冰川槽谷湖、其他冰川侵蚀湖、冰碛阻塞湖、侧碛阻塞湖、冰碛垄热融湖、冰川前进阻塞湖和其他冰川阻塞湖 8 个亚类。

尽管本文尝试从遥感影像识别角度给出不同类型冰湖的判别依据, 并强调现代冰川的存在是确认其是否为冰湖的首要依据, 但在实际研究工作中依然存在一些问题, 如在某一时期(如中国第一次冰川编目)某流域存在冰川且其下游分布有冰川湖泊, 而在另一时期(如 21 世纪之后)该冰川消失则该湖泊是否为冰川湖泊? 因此, 研究人员除应明确研究时间基准外, 还应保证研究对象的前后一致性。此外, 本文对一些冰湖类型的定量判识指标(如湖泊距冰川的距离、湖泊上游冰川面积的大小)来自对典型冰湖的研究, 其代表性如何亦需要更深入的工作来验证。

参考文献(References)

- [1] Ma Ronghua, Yang Guishan, Duan Hongtao, et al. China's lakes at present: Number, area and spatial distribution. *Science China Earth Sciences*, 2011, 41(3): 394-401. [马荣华, 杨桂山, 段洪涛, 等. 中国湖泊的数量、面积与空间分

- 布. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(3): 394-401.]
- [2] Liu J, Cheng Z, Su P. The relationship between air temperature fluctuation and glacial lake outburst floods in Tibet, China. *Quaternary International*, 2014, 321(2): 78-87.
- [3] Yao Xiaojun, Liu Shiyin, Li Long, et al. Spatial-temporal variations of lake area in Hoh Xil region in the past 40 years. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(7): 886-896. [姚晓军, 刘时银, 李龙, 等. 近40年可可西里地区湖泊时空变化特征. *地理学报*, 2013, 68(7): 886-896.]
- [4] Ding Yongjian, Liu Shiyin, Ye Baisheng, et al. Climatic implications on variations of lakes in the cold and arid regions of China during the recent 50 years. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(5): 623-632. [丁永建, 刘时银, 叶柏生, 等. 近50a中国寒区与旱区湖泊变化的气候因素分析. *冰川冻土*, 2006, 28(5): 623-632.]
- [5] Cenderelli D A, Wohl E E. Peak discharge estimates of glacial-lake outburst floods and "normal" climatic floods in the Mount Everest region, Nepal. *Geomorphology*, 2001, 40(1): 57-90.
- [6] Richardson S D, Reynolds J M. An overview of glacial hazards in the Himalayas. *Quaternary International*, 2000, 65/66: 31-47.
- [7] Wang Xin, Liu Shiyin, Yao Xiaojun, et al. Glacier lake investigation and inventory in the Chinese Himalayas based on the remote sensing data. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(1): 29-36. [王欣, 刘时银, 姚晓军, 等. 我国喜马拉雅山区冰湖遥感调查与编目. *地理学报*, 2010, 65(1): 29-36.]
- [8] Cui Peng, Chen Rong, Xiang Lingzhi, et al. Risk analysis of mountain hazards in Tibetan Plateau under global warming. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis*, 2014, 10(2): 103-109. [崔鹏, 陈容, 向灵芝, 等. 气候变暖背景下青藏高原山地灾害及其风险分析. *气候变化研究进展*, 2014, 10(2): 103-109.]
- [9] Sun Meiping, Liu Shiyin, Yao Xiaojun, et al. The cause and potential hazard of glacial lake outburst flood occurred on July 5, 2013 in Jiali county, Tibet. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(1): 158-165. [孙美平, 刘时银, 姚晓军, 等. 2013年西藏嘉黎县“7.5”冰湖溃决洪水成因及潜在危害. *冰川冻土*, 2014, 36(1): 158-165.]
- [10] Yao Xiaojun, Liu Shiyin, Sun Meiping, et al. Study on the glacial lake outburst flood events in Tibet since the 20th century. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(8): 1377-1390. [姚晓军, 刘时银, 孙美平, 等. 20世纪以来西藏冰湖溃决灾害事件梳理. *自然资源学报*, 2014, 29(8): 1377-1390.]
- [11] Clague J J, Evans S G. A review of catastrophic drainage of moraine-dammed lakes in British Columbia. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19(17/18): 1763-1783.
- [12] O'Connor J E, Costa J E. Geologic and hydrologic hazards in glacierized basins in North America resulting from 19th and 20th century global warming. *Natural Hazards*, 1993, 8(2): 121-140.
- [13] Carey M. Living and dying with glaciers: people's historical vulnerability to avalanches and outburst floods in Peru. *Global & Planetary Change*, 2005, 47(2-4): 122-134.
- [14] Björnsson H. Subglacial lakes and jökulhlaups in Iceland. *Global & Planetary Change*, 2003, 35(3/4): 255-271.
- [15] Huggel C, Kääb A, Haeberli W, et al. Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: A case study in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, 39(2): 316-330.
- [16] Emmer A, Merkl S, Mergili M. Spatiotemporal patterns of high-mountain lakes and related hazards in western Austria. *Geomorphology*, 2015, 246(246): 602-616.
- [17] Stokes C R, Popovnin V, Aleynikov A, et al. Recent glacier retreat in the Caucasus Mountains, Russia, and associated increase in supraglacial debris cover and supra-/proglacial lake development. *Annals of Glaciology*, 2007, 46(1): 195-203.
- [18] Engel Z, Sobr M, Yerokhin S A. Changes of Petrov Glacier and its proglacial lake in the Akshiirak massif, central Tien Shan, since 1977. *Journal of Glaciology*, 2012, 58(208): 388-398.
- [19] Janský B, Šobr M, Engel Z. Outburst flood hazard: Case studies from the Tien-Shan Mountains, Kyrgyzstan. *Limnologia - Ecology and Management of Inland Waters*, 2010, 40(4): 358-364.
- [20] Wang Xin, Wu Kunpeng, Jiang Lianghong, et al. Wide expansion of glacial lakes in Tianshan Mountains during 1990-2010. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(7): 983-993. [王欣, 吴坤鹏, 蒋亮虹, 等. 近20年天山地区冰湖变化特征. *地理学报*, 2013, 68(7): 983-993.]
- [21] Chen Y N, Xu C C, Chen Y P, et al. Response of glacial-lake outburst floods to climate change in the Yarkant River basin on northern slope of Karakoram Mountains, China. *Quaternary International*, 2010, 226(1-2): 75-81.
- [22] Wang X, Liu Q, Liu S, et al. Heterogeneity of glacial lake expansion and its contrasting signals with climate change in Tarim Basin, Central Asia. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(8): 1-11.
- [23] Fujita K, Suzuki R, Nuimura T, et al. Performance of ASTER and SRTM DEMs, and their potential for assessing glacial lakes in the Lunana region, Bhutan Himalaya. *Journal of Glaciology*, 2008, 54(185): 220-228.

- [24] 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. *Geomorphology*, 2017, 280: 30-38.
- [25] Li Junli, Sheng Yongwei, Luo Jiancheng. Automatic extraction of Himalayan glacial lakes with remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 2011, 15(1): 29-43. [李均力, 盛永伟, 骆剑承. 喜马拉雅山地区冰湖信息的遥感自动化提取. *遥感学报*, 2011, 15(1): 29-43.]
- [26] Song C, Sheng Y, Ke L, et al. Glacial lake evolution in the southeastern Tibetan Plateau and the cause of rapid expansion of proglacial lakes linked to glacial-hydrogeomorphic processes. *Journal of Hydrology*, 2016, 540: 504-514.
- [27] Wang W, Yao T, Yang W, et al. Methods for assessing regional glacial lake variation and hazard in the southeastern Tibetan Plateau: A case study from the Boshula mountain range, China. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 67(5): 1441-1450.
- [28] Gao Xiao, Wu Lizong, Pradeep K Mool. Analysis of the characteristics of glacial lake variation in the Koshi River basin, the Himalayas based on RS and GIS. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(3): 557-569. [高晓, 吴立宗, Pradeep K Mool. 基于遥感和GIS的喜马拉雅山科西河流域冰湖变化特征分析. *冰川冻土*, 2015, 37(3): 557-569.]
- [29] Liao Shufen, Wang Xin, Xie Zichu, et al. Changes of glacial lakes in different watersheds of Chinese Himalaya during the last four decades. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(2): 293-303. [廖淑芬, 王欣, 谢自楚, 等. 近40a来中国喜马拉雅山不同流域冰湖演化特征. *自然资源学报*, 2015, 30(2): 293-303.]
- [30] Wortmann M, Krysanova V, Kundzewicz Z W, et al. Assessing the influence of the Merzbacher Lake outburst floods on discharge using the hydrological model SWIM in the Aksu headwaters, Kyrgyzstan/NW China. *Hydrological Process*, 2014, 28(26): 6337-6350.
- [31] Chen Chen, Zheng Jianghua, Liu Yongqiang, et al. The response of glacial lakes in the Altay Mountains of China to climate change during 1992-2003. *Geographical Research*, 2015, 34(2): 270-284. [陈晨, 郑江华, 刘永强, 等. 近20年中国阿尔泰山区冰川湖泊对区域气候变化响应的时空特征. *地理研究*, 2015, 34(2): 270-284.]
- [32] Liu Xiaochen, Xiao Cunde. Preliminary study of the Jiemayangzong Glacier and lake variations in the source regions of the Yarlung Zangbo River in 1974-2010. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(3): 488-496. [刘晓尘, 效存德. 1974-2010年雅鲁藏布江源头杰玛央宗冰川及冰湖变化初步研究. *冰川冻土*, 2011, 33(3): 488-496.]
- [33] Wang Yu, Li Junli, Li Changchun, et al. Spatialtemporal change of glacial lakes in the Biezhenao Mountain and its response to climate change. *Arid Zone Research*, 2016, 33(2): 299-307. [王宇, 李均力, 李长春, 等. 50a来别珍套山冰湖的时空变化及其对气候的响应. *干旱区研究*, 2016, 33(2): 299-307.]
- [34] Cao Xuecheng, Liu Zhouzhou, Li Weisheng. Glacial lake mapping and analysis of the potentially dangerous glacial lakes before Nepal 4 25 Earthquake in 2015. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(3): 573-583. [曹学诚, 刘周周, 李维胜. 尼泊尔4·25地震震前冰湖制图与潜在危险性分析. *冰川冻土*, 2016, 38(3): 573-583.]
- [35] Liu Chunling, Tong Liqiang, Qi Shengwen, et al. Remote sensing investigation and influence factor analysis of glacier lake outburst potential in the Himalayas. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2016, 28(3): 110-115. [刘春玲, 童立强, 祁生文, 等. 喜马拉雅山地区冰川湖溃决灾害隐患遥感调查及影响因素分析. *国土资源遥感*, 2016, 28(3): 110-115.]
- [36] Le Maohua, Tang Chuan, Zhang Dandan, et al. Logistic regression model-based approach for predicting the hazard of glacial lake outburst in Tibet. *Journal of Natural Disasters*, 2014, 23(5): 177-184. [乐茂华, 唐川, 张丹丹, 等. 基于逻辑回归法的西藏地区冰湖溃决危险性预测模型. *自然灾害学报*, 2014, 23(5): 177-184.]
- [37] Wu L, Li X, Liu S, et al. Remote sensing based glacial lake inventory in the Hindu Kush-Himalaya region. *International Conference on Remote Sensing*, 2011: 1451-1454.
- [38] Pradeep P K, Bajracharya S R, Joshi S P. Inventory of Glaciers, Glacial Lakes and Glacial Lake Outburst Floods. Monitoring and Early Warning Systems in the Hindu Kush-Himalayan Region: Nepal. Kathmandu: International Centre for Integrated Mountain Development, 2001: 27.
- [39] Wang S, Zhang T. Spatial change detection of glacial lakes in the Koshi River Basin, the Central Himalayas. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(11): 4381-4391.
- [40] Qin Dahe, Yao Tandong, Ding Yongjian, et al. Glossary of Cryosphere Science. Beijing: China Meteorological Press, 2014: 2-54. [秦大河, 姚檀栋, 丁永建, 等. *冰冻圈科学辞典*. 北京: 气象出版社, 2014: 2-54.]
- [41] Institute of Mountain Hazards and Environment, the Chinese Academy of Sciences and Water Conservancy Ministry, the Traffic Department of the Tibet Autonomous Region. Debris Flow and Environment in Tibet. Chengdu: Sichuan University Publishing House, 1999: 79. [中国科学院-水利部成都山地灾害与环境研究所, 西藏自治区交通厅科学研究所. *西藏泥石流与环境*. 成都: 成都科技大学出版社, 1999: 79.]

- [42] Tang Shenggui, Liu Faxiang, Zhao Zhenyuan. Discuss on the temporal and spatial distribution characteristics and impact factors of the eastern Nyainqentanglha Mountain glacier lakes in Tibet. *Science & Technology Information*, 2014, 12(16): 35-36. [唐升贵, 刘发祥, 赵振远. 西藏念青唐古拉山东段冰湖的时空分布特征及其影响因素探讨. *科技资讯*, 2014, 12(16): 35-36.]
- [43] Wang X, Ding Y, Liu S, et al. Changes of glacial lakes and implications in Tian Shan, Central Asia, based on remote sensing data from 1990 to 2010. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(4): 575-591.
- [44] Zhang G, Yao T, Xie H, et al. An inventory of glacial lakes in the Third Pole region and their changes in response to global warming. *Global & Planetary Change*, 2015, 131: 148-157.
- [45] Yi Chaolu, Cui Zhijiu. Classification and sedimentary types of glacial lakes in the Halasi River catchment, the Altay Mountains, Xinjiang. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1994, 25(5): 477-485. [易朝路, 崔之久. 新疆阿尔泰山哈纳斯河流域冰川湖泊的分类与沉积类型. *海洋与湖沼*, 1994, 25(5): 477-485.]
- [46] Wang Xin, Liu Shiyin, Ding Yongjian. Study on Evaluation Method and Application of Glacial Lake Outburst Flood in Chinese Himalayan Region. Beijing: Science Press, 2016: 1-4. [王欣, 刘时银, 丁永建. 中国喜马拉雅山冰碛湖溃决灾害评价方法与应用研究. 北京: 科学出版社, 2016: 1-4.]
- [47] Wingham D J, Siegert M J, Shepherd A, et al. Rapid discharge connects Antarctic subglacial lakes. *Nature*, 2006, 440 (7087): 1033-1036.
- [48] Kargel J S, Leonard G J, Shugar D H, et al. Geomorphic and geologic controls of geohazards induced by Nepal's 2015 Gorkha earthquake. *Science*, 2016, 351(6269): aac8353. doi: 10.1126/science.aac8353.

Definition and classification systems of glacial lake for inventory and hazards study

YAO Xiaojun¹, LIU Shiyin^{2,3}, HAN Lei⁴, SUN Meiping^{1,2}

(1. College of Geography and Environment Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

2. State Key Laboratory of Cryosphere Sciences, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou 730000, China; 3. Institute of International Rivers and Eco-Security, Yunnan University, Kunming

650091, China; 4. Geological Survey Institute of Sichuan Province, Chengdu 610081, China)

Abstract: Glacial lakes not only provide the important refresh water resources in alpine region, but also act as a trigger of many glacial hazards such as glacial lake outburst flood (GLOF) and debris flow. Hence glacial lakes play an important role in the research related with cryosphere, climate change and alpine hazards. In this paper, the issues of glacial lakes were systematically discussed. Then from the view of glacial lake inventory and glacial lake hazards study, the glacial lake was defined as natural water supplied mainly by modern glacier melting water or formed in glacier moraine's depression. Furthermore, a complete classification system of glacial lakes was proposed based on its formation mechanism, topographic feature and geographical position. Glacial lakes were classified into 6 classes and 8 subclasses, i.e., glacial erosion lake (including cirque lake, glacial valley lake and other glacial erosion lake), moraine-dammed lake (including end moraine-dammed lake, lateral moraine-dammed lake and moraine thaw lake), ice-blocked lake (including advancing glacier-blocked lake and other glacier-blocked lake), supraglacial lake, subglacial lake and other glacial lakes. Meanwhile, some corresponding features presented by remote sensing images and quantitative indices for identifying different glacial lake types were proposed so as to build a universal and operational classification system of glacial lakes.

Keywords: glacial lake; glacier; definition; classification; inventory; hazard