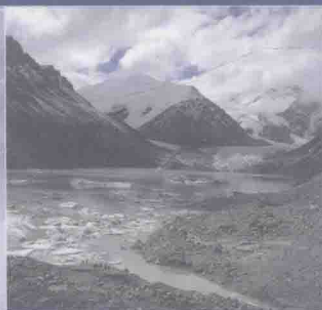




# 中国喜马拉雅山冰碛湖溃决 灾害评价方法与应用研究

王 欣 刘时银 丁永建 著



科学出版社

# 中国喜马拉雅山冰碛湖溃决 灾害评价方法与应用研究

王 欣 刘时银 丁永建 著

国家自然科学基金(41271091)

科技部科技基础性工作专项项目(2013FY111400)

国家自然科学基金重大项目(41190084)

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书系统地阐述了潜在危险性冰碛湖识别的指标体系、溃决风险评价、溃决洪水模拟等方面的理论与方法,提出了冰碛湖溃决概率计算的事件树模型。然后,建立基于 GIS 技术的冰湖编目规范,完成中国喜马拉雅山冰湖编目,全面调查和分析了中国喜马拉雅山区冰湖分布与变化及其气候意义。并针对西藏定结县典型高危险的冰碛湖——龙巴萨巴湖,开展溃决风险评价、溃决洪水模拟和减灾减缓的应用研究。研究成果对从事寒区水文过程与灾害、寒区水资源变化及其生态环境效应等方面研究与应用工作具有重要的参考意义。

本书适合从事地理、资源、环境、自然灾害等的教学和科研人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

中国喜马拉雅山冰碛湖溃决灾害评价方法与应用研究/王欣,刘时银,丁永建著. —北京:科学出版社,2016

ISBN 978-7-03-042004-6

I. ①中… II. ①王…②刘…③丁… III. ①喜马拉雅山脉-冰川湖-山地灾害-评价 IV. ①P694

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 223811 号

责任编辑:周 炜 / 责任校对:桂伟利  
责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2016 年 1 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 1 月第一次印刷 印张:21

字数:408 000

定价:120.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 序

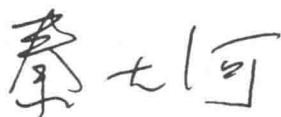
在全球气候变暖、冰川普遍退缩的背景下,冰川灾害事件增多,冰湖溃决灾害尤其突出。究其原因:一方面,冰川作用区环境的变化使冰湖变得不稳定,溃决风险增大;另一方面,人类活动不断向山区扩展使冰湖溃决灾害区扩大,潜在损失增加。此外,冰湖溃决灾害多发生在边远山区,这些区域一般经济欠发达,防灾减灾能力有限,因此冰湖溃决灾害正日益严重地威胁着人们的生命和财产安全,为社会各界广泛关注,冰湖溃决灾害也成为冰川学研究的热点内容之一。

喜马拉雅山位于印度河与雅鲁藏布江以南的中国西藏南部、巴基斯坦北部、印度西北部和东北部,以及尼泊尔和不丹境内。山系的范围有广义和狭义划分方案,其中狭义的喜马拉雅山是按照地质构造带划分的,西端至印度河干流旁的南迦帕尔巴特峰,东端止于南迦巴瓦峰之间的喜马拉雅山弧,长 2300km;北面以噶尔藏布(印度河上游)—玛旁雍错—雅鲁藏布江大拐弯为界,南界为喜马拉雅山南沿的低山丘陵,南北宽约 200km。喜马拉雅山北坡位于中国境内,为藏民聚居区。该区气候环流条件和地形条件复杂,既表现出从东到西的经度地带性差异,又表现出由于山脉屏障作用而产生的南北差异,更表现出由于高大山体形成的垂直地带性差异。该区分布数以千计的冰湖,既是一种宝贵的水资源,又是许多冰川灾害的孕育者和发源地。近几十年来,中国喜马拉雅山区总体呈现气候变暖、冰川退缩趋势,冰湖呈扩张态势,是中国冰湖溃决灾害最为频发的地区。据统计,20 世纪中期以来,西藏 19 个有记录的溃决冰碛湖先后发生了 25 次溃决,其中有 13 个溃决湖位于该区。因此,加强对我国喜马拉雅山冰湖遥感调查与溃决灾害评价具有重要的现实意义。

我国老一辈冰川学家早在 20 世纪 50 年代就开始对冰湖溃决事件进行考察研究,取得了丰硕的成果。1954 年桑旺湖溃决后,施雅风先生在杨宗辉先生等的陪同下对桑旺湖进行了考察,拉开了我国冰湖研究的序幕。1985~1987 年对喀喇昆仑山叶尔羌河突发洪水全面考察的成果——《喀喇昆仑山叶尔羌河冰川湖突发洪水研究》等专著的出版,是我国进行冰湖突发洪水研究的一个重要总结。自 20 世纪中期以来,由于喜马拉雅山及邻近山区发生多起冰碛阻塞湖溃决并引起洪水/泥石流灾害事件,针对冰湖溃决灾害的研究也日益受到重视。1987 年我国学者开展喜马拉雅山朋曲一波曲流域冰湖调查与编目,并完成了区域冰湖的综合考察报告。之后,研究者主要从灾害的角度,对典型区域和典型溃决事件进行调查和研究,特别是近年来随着遥感与地理信息系统广泛应用到冰湖研究中,冰湖变化及冰湖溃

决灾害的研究工作取得了卓有成效的进展,但未出版阶段性冰湖研究专著。

该书以我国喜马拉雅山为研究试验区,系统地总结了我国喜马拉雅山地区冰湖变化、溃决风险及应对措施。从操作层面上进一步完善冰湖编目的基本规范,对喜马拉雅山区冰湖位置、规模、类型等进行编目,获得两期冰湖编目数据,初步探明我国喜马拉雅山地区冰湖的数量及其变化规律。该书构建了冰碛湖溃决概率计算和溃决灾害风险评价模型,估算出我国喜马拉雅山地区冰湖溃决概率及其潜在危险性等级,并对典型溃决高危险性冰湖进行详细的溃决风险评价与减缓分析,为我国喜马拉雅山冰碛湖溃决灾害评价和减缓提供理论支持和决策依据。特别是在冰湖编目规范制定、危险性冰湖溃决概率计算、冰湖溃决风险评价等的理论与方法上,当前国内外的研究很少,更不系统,本书开展的相关研究和系统总结填补了该方面的空白。该书由理论方法与应用实践构成,从分析与度量已溃决冰碛湖入手,构建冰碛湖溃决灾害评价体系,并进行区域应用和个案评估实证。该书的出版,使得我国冰湖溃决灾害研究工作迈上了新的台阶,对于今后冰湖变化监测和冰湖溃决灾害防范等具有重要的指导意义。



中国科学院院士

IPCC 第四、第五评估报告第一工作组联合主席

2015 年 3 月

## 前 言

我国为冰湖溃决灾害事件频发的国家,自 20 世纪 90 年代以来,我国冰湖与冰湖溃决灾害问题一直是本书作者及其所在的研究团队重点关注的内容,研究区域从天山冰川阻塞湖(如麦兹巴赫湖)到喜马拉雅山的冰碛物阻塞湖,对冰湖有较深厚的研究积累。近年来,随着喜马拉雅山冰碛湖溃决高发期的到来,本研究团队加强了冰碛湖溃决灾害的研究力量,在系列有关冰川-冰湖灾害课题的支持下,开展了我国喜马拉雅山冰湖的遥感监测、冰湖编目和灾害评价工作,并自 2006 年起开展了喜马拉雅山冰湖灾害野外考察,在朋曲流域、叶如藏布的支流给曲的源头龙巴萨巴湖和皮达湖建立半定位观测站,开展对潜在危险性冰碛湖的持续观测,为本书撰写奠定良好的基础。

本书旨在详细调查我国喜马拉雅山地区冰湖的数量、类型、分布及其变化的基础上,通过发展适合于本区域的潜在危险冰碛湖识别的指标体系、冰湖溃决概率计算与危险性评估模型,识别出潜在的危險冰湖并计算出每一个潜在危险冰湖溃决概率等级,为深入进行喜马拉雅山地区冰湖溃决灾害的“非常详细评价”与溃决灾害预警与预报提供依据。本书完成了我国喜马拉雅山地区两期冰湖编目工作,在理论上建立起冰湖溃决的事件树模型和溃决后果评价方法,针对典型的冰碛湖开展详细研究,对于监测和防范冰湖溃决洪水具有重要的指导意义,特别是在危险冰湖溃决概率计算模型和溃决风险评价方法的定量研究上,填补了国内在此方面的研究空白。与国内外同类著作相比,本书的特点和独到之处在于:

(1) 本书由理论探讨到应用实例,根据不同的评价层次,建立基于喜马拉雅山地区溃决冰湖样本的冰湖溃决的事件树模型和溃决后果评价方法,选取的指标合理,模型恰当适用,丰富了冰碛湖溃决灾害的评价理论与方法,为今后开展区域地理专项研究提供范例。

(2) 从冰湖界定与编码到母冰川确立,本书建立起一整套的基于 GIS 技术的冰湖编目规范,为后续冰湖提供参考。本书完成了我国喜马拉雅山地区 1970~1980 年和 2004~2008 年冰湖编目工作,第一次全面查清我国喜马拉雅山地区冰湖的数量、类型、分布,探明本书研究区冰湖变化特征,为地方经济建设提供基础数据。

(3) 本书明确地、有充分根据地划分出潜在的危險冰湖等级,针对典型的冰碛湖开展详细研究,提出降低风险的措施,为我国喜马拉雅山区冰湖灾害减缓提供决策依据。

本书由王欣、刘时银、丁永建讨论确定总体思路、章节结构及内容,是王欣在博

士和博士后及后续研究工作中,与博士生导师刘时银研究员和博士后合作导师丁永建研究员合作完成的。在本书撰写过程中,下述人员对完善书稿不同部分分别提出了建设性意见:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所的王宁练研究员、任贾文研究员、李新研究员、鲁安新研究员、赵林研究员、叶柏生研究员、李忠勤研究员、段克勤研究员、丁良福副研究员,兰州大学潘保田教授、王乃昂教授,西北师范大学的石培基教授等对本书提出宝贵意见;中国科学院寒区旱区环境与工程研究所郭万钦博士、上官冬辉博士、赵井东博士、张勇博士、李晶博士、刘巧博士、蒋宗立博士、武震博士、张盈松博士、姚晓军博士、魏俊锋博士、鲍伟佳博士、张秀娟博士、余蓬春硕士、许君利硕士、巩娟宵硕士等在地形图与遥感数据处理、文稿的修改、野外考察等方面提供了帮助;湖南科技大学吴坤鹏硕士、蒋亮虹硕士、刘琼欢硕士、柴开国硕士、吴珍硕士对部分插图绘制、文字校稿等也付出了辛勤的劳动。西藏自治区水利厅、西藏自治区定结县水利局等单位在数据共享、野外考察等方面提供了帮助。

本书涉及的野外考察工作开始于2006年,在此后持续至今的野外考察和研究中得到了科技部基础性工作专项(2006YF110200)、科技部全球变化国家重大研究计划项目(2013CBA01800-A)、国家自然科学基金(41071044、41271095)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KCCX2-YW-Q03-04)等资助,在此表示衷心感谢。

限于作者水平,书中难免存在疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

# 目 录

## 序

## 前言

|                   |    |
|-------------------|----|
| 第 1 章 绪论          | 1  |
| 1.1 冰湖与冰湖溃决       | 1  |
| 1.1.1 冰湖          | 1  |
| 1.1.2 冰湖溃决        | 5  |
| 1.2 研究的进展与趋势      | 9  |
| 1.2.1 研究进展        | 9  |
| 1.2.2 研究趋势        | 11 |
| 1.3 本书的结构及主要内容    | 12 |
| 第 2 章 我国喜马拉雅山概况   | 14 |
| 2.1 山文水系          | 14 |
| 2.2 气候特征          | 20 |
| 2.3 冰川概况          | 26 |
| 2.4 冰湖概况          | 32 |
| 2.5 本章小结          | 36 |
| 第 3 章 冰碛湖溃决分析与度量  | 38 |
| 3.1 西藏冰碛湖溃决主要特征   | 38 |
| 3.1.1 溃决冰湖的空间分布   | 38 |
| 3.1.2 冰湖溃决的时间分布   | 39 |
| 3.2 冰碛湖的形成与溃决     | 42 |
| 3.2.1 冰碛湖的形成      | 42 |
| 3.2.2 冰碛湖溃决诱因     | 52 |
| 3.2.3 冰碛湖溃决的水文条件  | 56 |
| 3.2.4 冰碛坝稳定性与溃决机制 | 59 |
| 3.3 冰碛湖溃决的气候背景    | 67 |
| 3.3.1 气候特征分析      | 67 |
| 3.3.2 溃决气候背景度量    | 70 |
| 3.4 溃决冰碛湖的溃决模式    | 72 |
| 3.4.1 溃决模式分类      | 72 |

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| 3.4.2 我国溃决冰碛湖的溃决模式 .....     | 79         |
| 3.5 溃决冰碛湖溃决后果度量 .....        | 80         |
| 3.6 本章小结 .....               | 82         |
| <b>第4章 冰碛湖溃决灾害评价体系 .....</b> | <b>83</b>  |
| 4.1 冰碛湖溃决灾害评价 .....          | 83         |
| 4.1.1 冰碛湖溃决灾害评价体系结构 .....    | 83         |
| 4.1.2 危险性冰湖评价指标 .....        | 86         |
| 4.2 冰碛湖溃决模拟 .....            | 92         |
| 4.2.1 冰碛湖溃决洪水模拟 .....        | 92         |
| 4.2.2 冰碛湖溃决泥石流模拟 .....       | 98         |
| 4.3 冰碛湖溃决概率计算模型 .....        | 101        |
| 4.3.1 逻辑回归模型 .....           | 102        |
| 4.3.2 模糊综合评价模型 .....         | 104        |
| 4.3.3 等级矩阵图解模型 .....         | 109        |
| 4.4 溃决概率事件树模型构建 .....        | 113        |
| 4.4.1 事件树模型的理论基础 .....       | 113        |
| 4.4.2 溃决的概率分级方法 .....        | 115        |
| 4.4.3 冰碛湖溃决模式定性描述和概率转换 ..... | 117        |
| 4.4.4 溃决后果计算方法 .....         | 120        |
| 4.4.5 冰碛湖溃决事件树模型的应用试验 .....  | 126        |
| 4.5 本章小结 .....               | 135        |
| <b>第5章 冰湖变化与溃决概率 .....</b>   | <b>136</b> |
| 5.1 数据源与数据处理 .....           | 136        |
| 5.1.1 数据源 .....              | 136        |
| 5.1.2 数据处理 .....             | 138        |
| 5.2 冰湖自动提取 .....             | 140        |
| 5.2.1 冰湖自动提取方法 .....         | 140        |
| 5.2.2 冰湖自动提取波段选择 .....       | 143        |
| 5.2.3 冰湖自动提取过程 .....         | 145        |
| 5.2.4 冰湖自动提取的精度分析 .....      | 147        |
| 5.3 冰湖编目 .....               | 148        |
| 5.3.1 冰湖的界定及其分类 .....        | 148        |
| 5.3.2 冰湖编目属性表 .....          | 150        |
| 5.4 冰湖分布与变化 .....            | 151        |
| 5.4.1 冰湖分布 .....             | 151        |

|                                          |            |
|------------------------------------------|------------|
| 5.4.2 冰湖变化 .....                         | 160        |
| 5.4.3 冰湖变化的影响因素 .....                    | 172        |
| 5.5 冰湖溃决概率估算 .....                       | 175        |
| 5.5.1 潜在危险冰湖筛选 .....                     | 175        |
| 5.5.2 危险冰湖的溃决概率计算 .....                  | 178        |
| 5.5.3 不同溃决概率等级冰湖的分布 .....                | 186        |
| 5.6 本章小结 .....                           | 191        |
| <b>第6章 典型危险性冰碛湖溃决风险评价</b> .....          | <b>193</b> |
| 6.1 典型危险性冰湖的基本情况 .....                   | 193        |
| 6.1.1 龙巴萨巴湖和皮达湖概况 .....                  | 193        |
| 6.1.2 龙巴萨巴湖和皮达湖变化 .....                  | 196        |
| 6.2 危险性分析 .....                          | 200        |
| 6.2.1 野外调查分析 .....                       | 200        |
| 6.2.2 危险性指标评价 .....                      | 205        |
| 6.3 溃决洪水强度模拟 .....                       | 207        |
| 6.3.1 龙巴萨巴湖湖盆形态模拟 .....                  | 207        |
| 6.3.2 溃决口洪峰流量估算 .....                    | 210        |
| 6.3.3 溃决口水文过程模拟 .....                    | 212        |
| 6.3.4 溃决洪水演进模拟 .....                     | 217        |
| 6.4 溃决风险指数 .....                         | 225        |
| 6.4.1 灾害损失评价 .....                       | 225        |
| 6.4.2 风险指数计算 .....                       | 226        |
| 6.5 风险减缓 .....                           | 227        |
| 6.5.1 安全湖水位估算 .....                      | 228        |
| 6.5.2 减缓措施比选 .....                       | 229        |
| 6.6 本章小结 .....                           | 231        |
| <b>第7章 总结与展望</b> .....                   | <b>233</b> |
| 7.1 总结 .....                             | 233        |
| 7.2 展望 .....                             | 234        |
| <b>参考文献</b> .....                        | <b>237</b> |
| <b>附录一 我国喜马拉雅山 2004~2008 年冰湖编目</b> ..... | <b>260</b> |
| <b>附录二 我国喜马拉雅山潜在危险性冰碛湖编目</b> .....       | <b>305</b> |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 冰湖与冰湖溃决

### 1.1.1 冰湖

冰湖(glacial lake)属于在洼地积水形成的自然湖泊的一种,一般把在冰川作用区内与冰川有着直接或间接联系的湖泊称为冰湖,是冰冻圈最为活跃的成员之一。冰湖的补给来源主要是冰雪融水,一般补给区面积大于  $2\text{km}^2$  才能形成一定规模的冰川和冰湖,在冰川作用区,冰湖分布的数量及规模与冰川分布的数量及规模呈正相关关系。与一般自然湖泊相比,冰湖多具有如下特征:①规模小,多变化于  $1\times 10^{-3}\sim 1\times 10^2\text{km}^2$ ;②受补给水源的影响,年内和年际的面积/水量变化大;③存在周期短,一般从不足一年到数十年;④与冰川有着直接或间接联系,对气候变化敏感;⑤位于高寒山区,既是一种珍贵的水资源,又是灾害的孕育者。当前,研究者根据研究目的和用途的不同,根据形成年代、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的不同,将冰湖分为 27 种类型(表 1-1)。

表 1-1 冰湖分类及其分类的标准

| 分类标准    | 类别及定义                                                                                                                      |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 形成年代    | ① 古冰湖:在小冰期以前形成的冰湖,多由古代冰川作用形成<br>② 现代冰湖:在小冰期以后形成的冰湖,多与现代冰川有直接或间接水力联系                                                        |
| 与母冰川的距离 | ① 冰川接触湖:与母冰川相连的冰湖,冰川融水直接汇入湖中<br>② 非冰川接触湖:与母冰川有一定距离的冰湖,冰川融水流经一定距离汇入湖中                                                       |
| 湖坝属性    | ① 冰川湖:湖坝为冰川的冰湖<br>② 冰碛湖:湖坝为冰碛物的冰湖<br>③ 滑坡阻塞湖:由滑坡体阻塞冰川融水的湖泊<br>④ 基岩阻塞湖:在未被冰碛物覆盖的基岩低洼处汇聚冰川融水而成,湖坝为基岩,但坝体几何形态不太明显             |
| 湖盆形态    | ① 河谷湖:冰川融水在河谷洼地汇集形成的湖泊<br>② 冰蚀湖:由于冰川侵蚀作用形成洼地,冰川退缩后,积水形成的湖泊<br>③ 冰斗湖:为冰蚀湖的一种,为有三侧被陡坡包围,近似圆形的冰蚀湖<br>④ 槽谷湖:由于冰川作用,在冰川槽谷区形成的湖泊 |

续表

| 分类标准      | 类别及定义                                                                                                                                                               |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 面积变化      | ① 面积增大冰湖:冰湖面积呈年际或年代际增大趋势的冰湖<br>② 面积稳定冰湖:冰湖面积年际或年代际变化不大的冰湖<br>③ 面积减少冰湖:冰湖面积呈年际或年代际减少趋势的冰湖<br>④ 新增冰湖:两次冰湖调查,某位置上第一次没有出现,第二次出现的冰湖<br>⑤ 消失冰湖:两次冰湖调查,某位置上第一次出现,第二次未发现的冰湖 |
| 补给水源      | ① 冰川融水补给型:在冰川作用区内,以冰川融水补给为主的湖泊<br>② 降水补给型:在冰川作用区内,以降水补给为主的湖泊                                                                                                        |
| 与母冰川的空间关系 | ① 冰面湖:在冰川表面形成的湖泊<br>② 侧碛湖:在冰川两侧,由侧碛阻塞形成的湖泊<br>③ 冰前湖:在冰川末端前方存在的冰湖<br>④ 冰下湖:冰川融水汇集在冰川下面冰床的凹地中积水所形成的湖泊<br>⑤ 冰内湖:在冰川内部不断扩大的裂隙、洞穴中积融水形成的湖泊                               |
| 危险程度      | ① 潜在危险性冰湖:在现有外部环境作用强度下,各种外部诱因的作用导致冰湖溃决的可能性大于某一设定阈值<br>② 已溃决冰湖:在历史上已经发生过溃决洪水或泥石流的冰湖<br>③ 稳定冰湖:在现有外部环境作用强度下,各种可能外部诱因导致冰湖溃决的可能性均小于某一设定阈值的冰湖                            |

需要指出的是,因分类标准不同,同一冰湖可分属不同的类型,并且对于冰湖的归类,不同学者因各自的侧重点和着眼点存在不同的看法。在冰岛人术语中,Jökulhlaup 指的是冰阻塞湖(sensu stricto)。后来研究者将这个术语引申到与冰川有关的所有阻塞湖(glacial lake),其中冰阻塞湖(ice-dammed lake)和冰碛阻塞湖(moraine-dammed lake)是与冰川有关的阻塞湖的两个主要类型。在冰湖分类中,尼泊尔研究者从区域性灾害防治出发,把冰川湖分为冰阻塞湖、冰碛湖和冰核心冰碛湖。张祥松和周聿超(1990)认为尼泊尔研究者的分类有欠妥之处,把冰川湖分为冰阻塞湖、冰碛阻塞湖、冰内湖、冰下湖。我国冰川作用区广泛分布规模不等的冰湖,主要分布在喜马拉雅山、喀喇昆仑山、天山、念青唐古拉山、横断山等的冰川分布边缘(图 1-1),尤其以喜马拉雅山分布最为密集。在我国各大山脉中,以冰碛阻塞湖居多,且越接近冰川末端,冰湖分布越密集,主要分布以下几种类型。

(1) 冰碛阻塞湖。与世界上大多数山区冰川一样,我国山地冰川在 1850~1905 年冰川较普遍前进,接近小冰期最大位置并形成规模不等的终碛。随着 20 世纪上半叶全球气候变暖,我国大部分山地冰川强烈退缩、冰舌变薄,于是在后退冰川的末端与小冰期终碛垄之间形成湖盆(图 1-2)。由于冰碛坝(或埋藏死冰)阻塞,冰川融水被拦蓄成湖,冰川继续退缩,冰碛阻塞湖不断扩大。这类冰湖在喜马拉雅山中段、北坡和藏东南分布最为广泛。

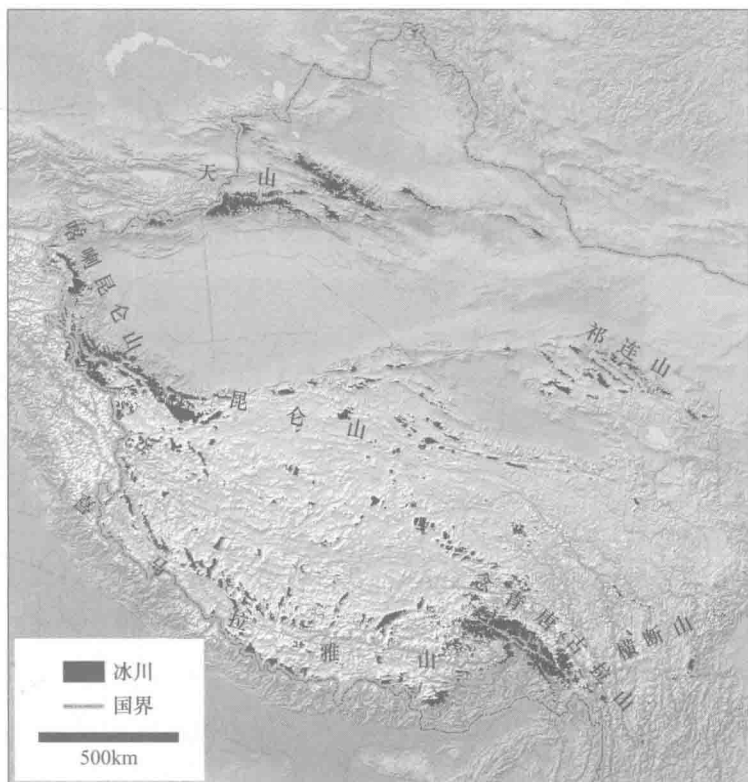


图 1-1 我国主要山脉的冰川分布图(冰湖多分布在冰川覆盖区的边缘)



图 1-2 喜马拉雅山中段北坡年楚河流域冰碛阻塞湖(什娥错)(周才平摄于 2011 年)

(2) 冰川阻塞湖。有些山地冰川在经历较长时间宁静或轻度退缩之后,突然起动以异常速度前进或产生巨大的水平位移,这种冰川称为跃动冰川。跃动冰川

迅速前进阻塞河谷形成冰川阻塞湖,例如,喀喇昆仑山赫拉希南峰南坡斯坦克河上游的库蒂亚冰川于1953年3月21日~6月11日,平均以113m/d(或4.7m/h)的速度前进,造成斯坦克河谷阻塞成湖(Desio,1954)。喀喇昆仑山是我国冰川阻塞湖主要分布地区,冰川阻塞湖溃决洪水频发区,据张祥松和周聿超(1990)研究,非跃动冰川也能形成冰川阻塞湖,例如,在我国境内克勒青河上游的克亚吉尔冰川和特拉木坎力冰川等均为非跃动冰川,其前进阻塞主河道形成冰川阻塞湖(图1-3)。



图1-3 喀喇昆仑山克勒青河上游冰川阻塞河谷形成冰川湖(丁良福摄于1987年)

(3) 冰面湖。由于冰川表面差异消融,在冰川表面形成的湖泊称为冰面湖(图1-4)。我国冰面湖多发育在被表碛覆盖的山谷冰川的消融区,这类湖变化较快,常常从形成到溃决在数月至数年。夏季由于冰川强烈消融等原因,也可能导致冰面湖突然排水形成洪水。此外,许多已经溃决或有着潜在溃决危险的冰碛湖是近数十年来冰面湖扩张、融合的结果。



图1-4 喜马拉雅山中段北坡绒布冰川冰面湖(王伟财摄于2010年)

(4) 河谷/槽谷湖。在河谷泊洼/槽谷区汇集冰川融水形成的湖泊,其分布范围广,一般在冰川作用区与母冰川有一定的距离,其大小受特定的洼地地形影响明

显,多沿河谷/槽谷呈串珠状分布。一般由于堤坝不太明显,相对稳定,但是在特定的情形下可能形成上游冰湖溃决引发下游冰湖溃决,导致冰湖溃决的链珠式反应。

(5) 冰斗湖和冰蚀湖。在我国,许多高山冰川作用地区,由于第四纪冰川侵蚀作用,当冰川消失后在某些古冰斗及冰蚀槽谷低洼处蓄水形成许多规模小的湖泊,它们为古冰川在基岩上挖掘而成,或在出口处仅有薄层冰碛物,堤坝不明显,故相对稳定,对下游威胁较小。

### 1.1.2 冰湖溃决

国际水文科学协会(International Association of Hydrological Sciences, IAHS)把突发性洪水(flash flood)定义为发生非常突然,通常难以预测,洪峰过程短促,以及径流模数较大的一种洪水。突发性洪水,成因除了暴雨以外,还包括任何天然和人工坝溃决所引起的洪水。在强烈冰川作用的山区,这种突发性洪水可分为:①冰川阻塞湖溃决或在冰川系统内或冰川底部堵塞融水溃决;②冰川前终碛阻塞湖溃决或溢出;③滑坡、岩(山)崩、雪崩阻塞天然河道形成的不稳定天然坝的溃决或排水等。冰湖溃决洪水(glacier lake outburst flood, GLOF)是指在冰川作用区,由于冰湖突然溃决而引发的溃决洪水/泥石流,危害了人民生命和财产安全并对自然和社会生态环境产生破坏性后果的自然灾害。早在20世纪30年代,冰岛冰川学家Thórarinnsson(1939)曾对伐特纳冰帽下Grimsvötn突发洪水进行了较深入的研究,并把冰下湖突然排水现象称为Jökulhlaup。在冰岛人术语中,Jökulhlaup指的是冰阻塞湖溃决,而且引申到冰碛阻塞而形成的围绕湖(embrace lake)溃决。广义的冰湖溃决包括冰川阻塞湖、冰碛阻塞湖、冰面湖、冰内湖等冰川湖突发性洪水。从区域范围来看,它是属于特定的地域灾害,是冰冻圈中最为常见的山地灾害之一,属性上为一种较为常见的地质灾害。一般能造成重大灾害的为冰碛湖溃决洪水/泥石流和冰川湖溃决洪水和泥石流,各地又以冰碛湖溃决洪水/泥石流最为频发。冰碛湖从形成、演化到溃决,从根本上说是地形条件和气候变化综合作用的产物。气候波动引起冰川进退,而冰川的进退变化既是冰碛湖形成和演化的主要驱动机制,又是冰碛湖溃决的主要诱发机制;此外,冰碛湖溃决灾害的形成、强度和影响范围还受流域的地形、地质条件和社会经济状况等制约。所以,冰碛湖溃决灾害涉及气候、冰川、地形地质条件以及区域社会经济环境等诸多因素,从冰川、冰湖、湖盆以及下游社会经济状况等全方面研究冰碛湖溃决灾害具有现实必要性。

在全球气候变暖(IPCC, 2007)、高海拔地区尤其是热带高海拔地区这种变暖趋势更为明显的背景下(Beniston et al., 1997),冰川普遍退缩(刘时银等, 2002a; 2002b; 上官冬辉等, 2004; Ye et al., 2006a; 2006b; Liu et al., 2006; Fujita and Nuimura, 2011; Gardelle et al., 2013),冰川灾害事件增多,冰湖溃决灾害在世界各地发生,喜马拉雅山(Buchroithner, et al., 1982; Gansser, 1983; Vuichard and Zimmerman, 1987; 徐道明

和冯清华,1989;Ding and Liu,1992;Reynolds,1995;1998;Watanabe and Rothacher,1996;Cenderelli and Wohln,1997;Hanisch et al.,1998;Kattelmann,2003)、安第斯山(Rabassa et al.,1979;Reynolds,1992)、中亚(Niyazov and Degovets,1975;Yesenov and Degovets,1979;Popov,1990)、阿尔卑斯山(Eisbacher and Clague,1984)和北美(Hopson,1960;Nolf,1966;Evans,1987;O'Connor and Costa,1993;O'Connor et al.,1993;O'Connor et al.,1994;Evans and Clague,1994;Kershaw et al.,2005)等地的冰川作用区是冰湖溃决灾害的多发区。例如,在兴都库什-喜马拉雅山自20世纪30年代以来,有记录的冰湖溃决灾害呈增加趋势,到2010年,累计发生的溃决灾害超过32次,平均每年约发生0.46次,尤其是自20世纪60年代中期以来平均几乎每年发生1次冰湖溃决事件(图1-5)。在欧洲,从冰川灾害的类型和冰川灾害导致的死亡人数上看,到21世纪初,共发生721次冰川灾害,总计造成671人伤亡。与其他类型的冰川灾害(如冰崩、冰川变化、冰川消融洪水/泥石流及多种冰灾类型组合形成的复合冰灾)相比,冰湖溃决发生的频次最高,造成的死亡人数最多,分别占58%和50%(Richard and Gay,2003)(图1-6);在秘鲁的Cordillera Blanca地区(安第斯山),有记录的资料显示,到21世纪初,共发生30次冰川灾害,冰湖溃决灾害达21次,占70%(Carey,2005a);其中,1941年秘鲁的Cohup湖溃决导致6000多人死亡,为有历史记录以来造成死亡人数最多的一次冰湖溃决事件(Clague and Evans,2000)。另外,在冰湖溃决灾害中(冰川阻塞湖、冰碛物阻塞湖、冰面湖),一般又以冰碛湖溃决的洪水规模最大、影响范围最广,在相似规模的冰湖中,冰碛湖的溃决洪峰可能较冰川湖的洪峰要大2~10倍(WECS,1987;Yamada,1993;1998;Clague and Evans,2000;Huggel et al.,2004a),因此冰碛湖溃决灾害研究备受关注。

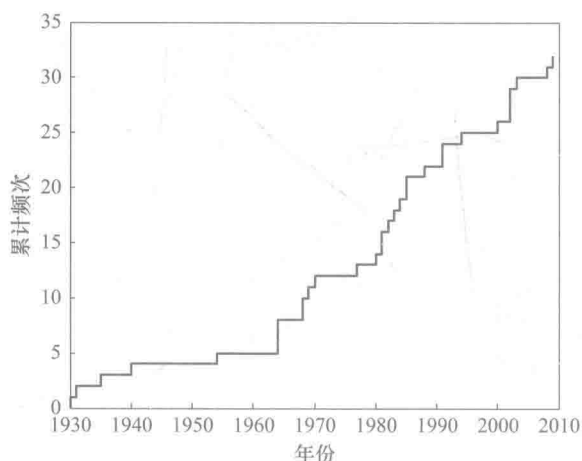


图 1-5 1930~2010 年兴都库什-喜马拉雅山冰湖溃决事件发生的累计频次

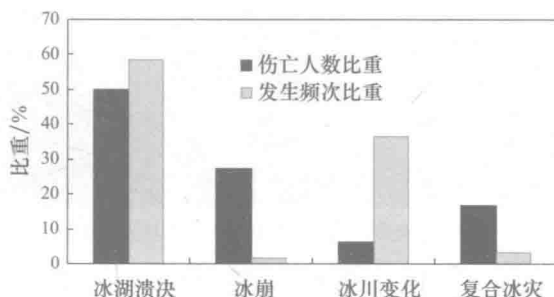


图 1-6 欧洲不同类型冰川灾害发生频次及其导致的死亡人数的比重

我国冰川作用区冰川普遍退缩,冰川灾害事件增多,冰湖溃决灾害尤其突出,目前冰湖溃决事件发生较为频繁的地区主要有两类:第一类是天山、喀喇昆仑山的冰川阻塞湖溃决;第二类是喜马拉雅山、藏东南山区的冰碛湖溃决。例如,发源于喀喇昆仑山区的叶尔羌河冰川突发洪水在沉寂 10 年后,近 10 年来又频繁发生,1998 年 11 月 5 日发生的突然洪水是卡群站 60 年来在冬季的最大洪水,流量从  $87\text{m}^3/\text{s}$  在 2h 内突然增大到洪峰流量  $1850\text{m}^3/\text{s}$ ;1999 年 8 月 10 日发生的突发洪水是卡群站 60 年来实测到的第二大洪水。当时河流处于汛期,流量从  $1100\text{m}^3/\text{s}$  在 18h 内急剧增大到洪峰流量  $6070\text{m}^3/\text{s}$ 。洪水分割后得到此次洪水水量达  $168.0 \times 10^6\text{m}^3$ ,此水量已经远远超过 1987 年调查克亚吉尔湖和特拉姆坎力湖的最大蓄水能力,说明此次洪水也是由两个湖泊共同排水组成,而且湖泊扩大 20%。新疆阿克苏河源区麦兹巴赫冰川湖溃决突发洪水的洪峰流量及总洪水量逐年增加,20 世纪 90 年代末期以来,洪水发生频率较七八十年代增加了 30%。该河下游有在建水电工程两处、拟建水电工程两处,这些工程建设面临来自上游冰川湖突发洪水的威胁无疑越来越大。在西藏高寒区,冰碛湖溃决灾害事件更为广泛和频发,有记录的冰碛湖溃决灾害事件超过 20 次,造成死亡人数最多的为 1954 年位于年楚河流域的桑旺湖溃决事件,造成超过 400 人死亡;2002 年,位于洛扎雄曲的德嘎普错溃决也致使 9 人死亡(程尊兰等,2011)。

近年来,首先由于冰川作用区自然过程变化及其对环境的压迫加大,冰湖变得不稳定,高溃决危险性冰湖增多,致灾源增多、强度加大;其次,当前社会经济的发展 and 人类活动不断向山区扩展,藏民不断向河谷洪泛区定居和放牧,区域承险体的物理暴露量增大;第三,冰湖溃决灾害多发生在边远山区,多为少数民族聚居区,一般经济欠发达,其灾害响应能力和灾后恢复能力较低(王静爱等,2006),民众存在一种抵制“转移安置”和对政府和技术的依赖心理,公共服务相对滞后(Carey, 2005a; Carey et al., 2012)。此外,西藏高溃决危险性冰湖区为藏民聚居区,民族文化独具特色,结果致使冰湖溃决灾害正日益严重地威胁着湖区生态环境及人民生命财产安全(图 1-7~图 1-9)。