

冰冻圈告急

MELTING EARTH

GLACIER RETREAT AND ITS IMPACTS IN CHINA'S CRYOSPHERE

2018气候变化影响下中国冰川研究



冰冻圈告急

MELTING EARTH

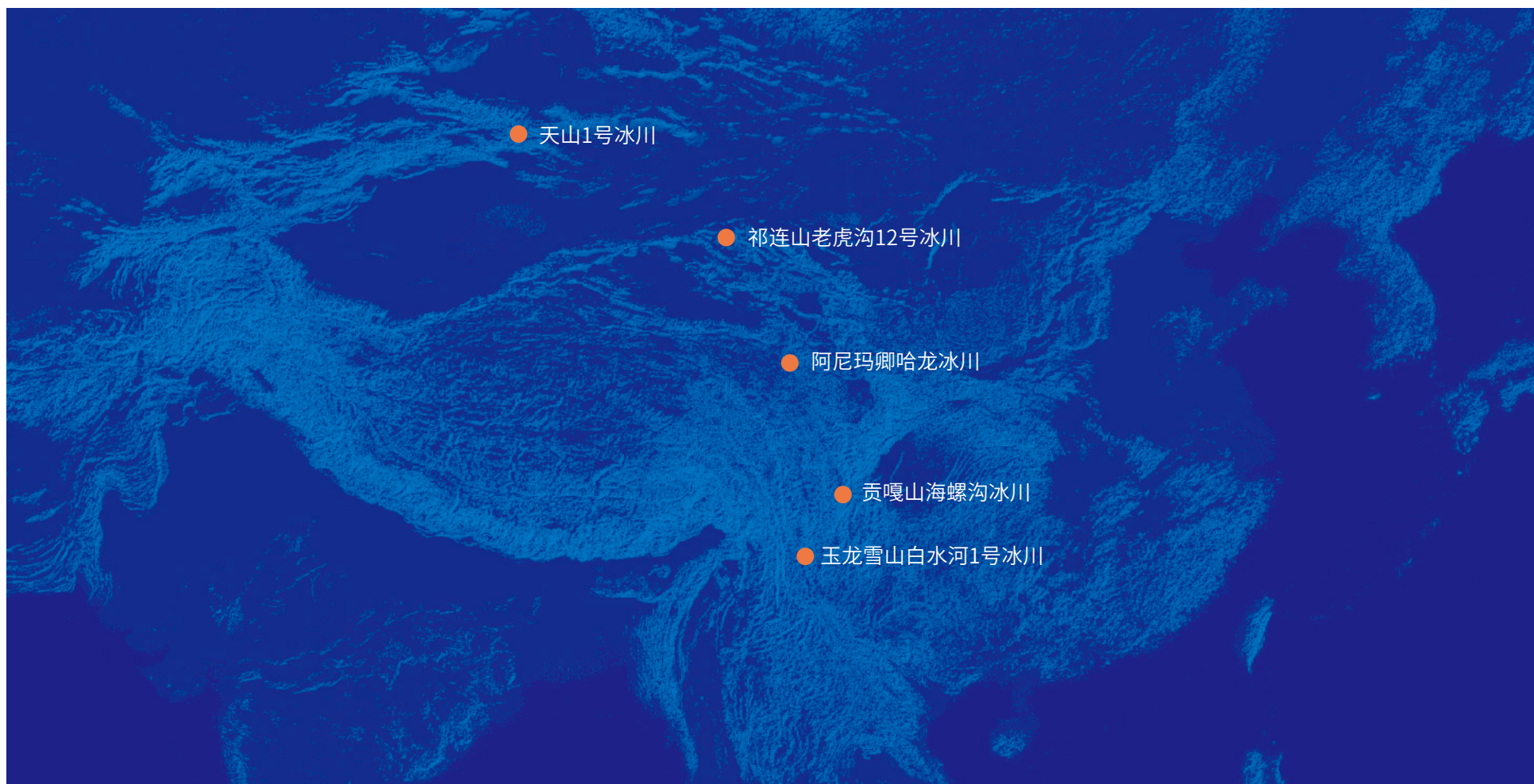
GLACIER RETREAT AND ITS IMPACTS IN CHINA'S CRYOSPHERE 2018气候变化影响下中国冰川研究

作者 / 沈永平 王国亚 刘君言 李朝

2018年夏季,绿色和平与甘肃省科学院地质自然灾害防治研究所以及中国科学院西北生态环境资源研究院沈永平研究员合作,前往中国西部的冰川进行实地调研,见证并记录气候变化下的冰川消融与冰川灾害,考察冰川变化和冰川灾害对下游流域的影响。

这是继2005至2009年间,绿色和平四次前往“亚洲水塔”青藏高原地区调研之后,对冰冻圈气候变化影响调研的最新跟进。

今年的考察路线,如下图,包括了:天山1号冰川、玉龙雪山白水河1号冰川、贡嘎山海螺沟冰川、祁连山老虎沟12号冰川等,和阿尼玛卿雪山哈龙冰川。



2001

© Tianshan Glaciological Station



2008

© Li Zhongqin



2018

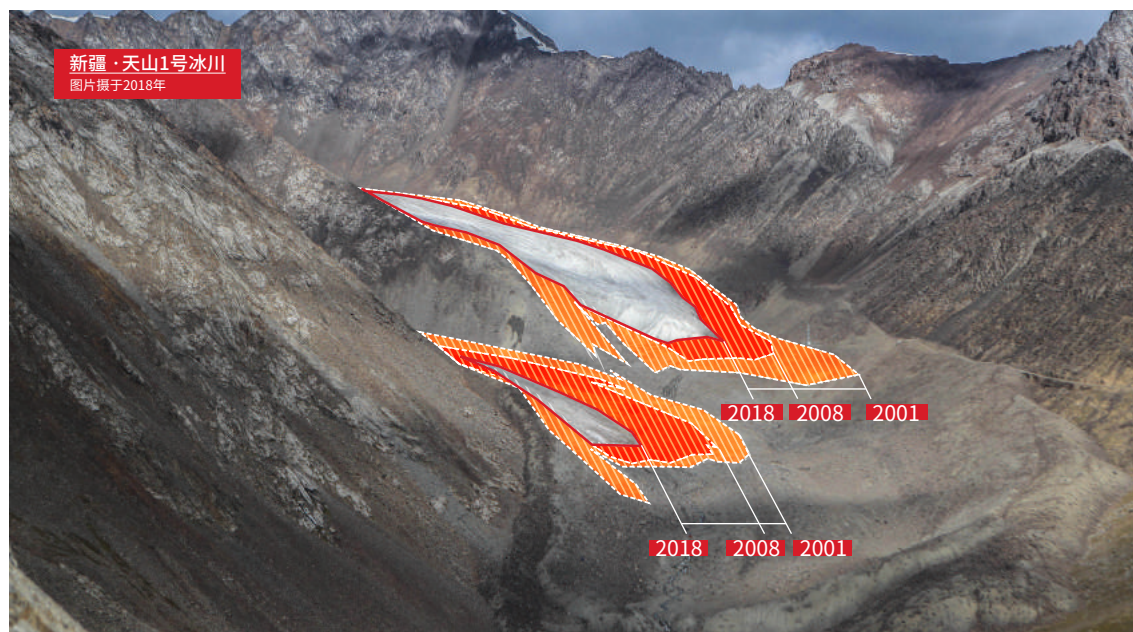
© Tie Gai / Greenpeace



天山1号冰川

天山1号冰川是乌鲁木齐市主要水源乌鲁木齐河上游最大的冰川。自1959年以来,天山1号冰川一直处于退缩状态。2001年冰川面积缩减至**1.71km²**,2008年缩减至**1.59km²***,2018年进一步缩小至**1.51km²****,2001年至今,天山1号冰川面积减少**11.7%**。

自1986年起,该冰川退缩加剧,导致其末端在1993年分离为东、西两支。东支至今后退**90.63m**,西支后退**119.16m**。



数据来源 /

* 李开明,陈世峰,康玲芬等,2018 中国大陆型冰川和海洋型冰川变化比较分析——以天山乌鲁木齐河源1号冰川和玉龙雪山白水河1号冰川为例,干旱区研究,35(1)12-19。

** 2018年数据由绿色和平依据 sentinel2 卫星影像解译。

2009

Creative Commons: Wikipedia



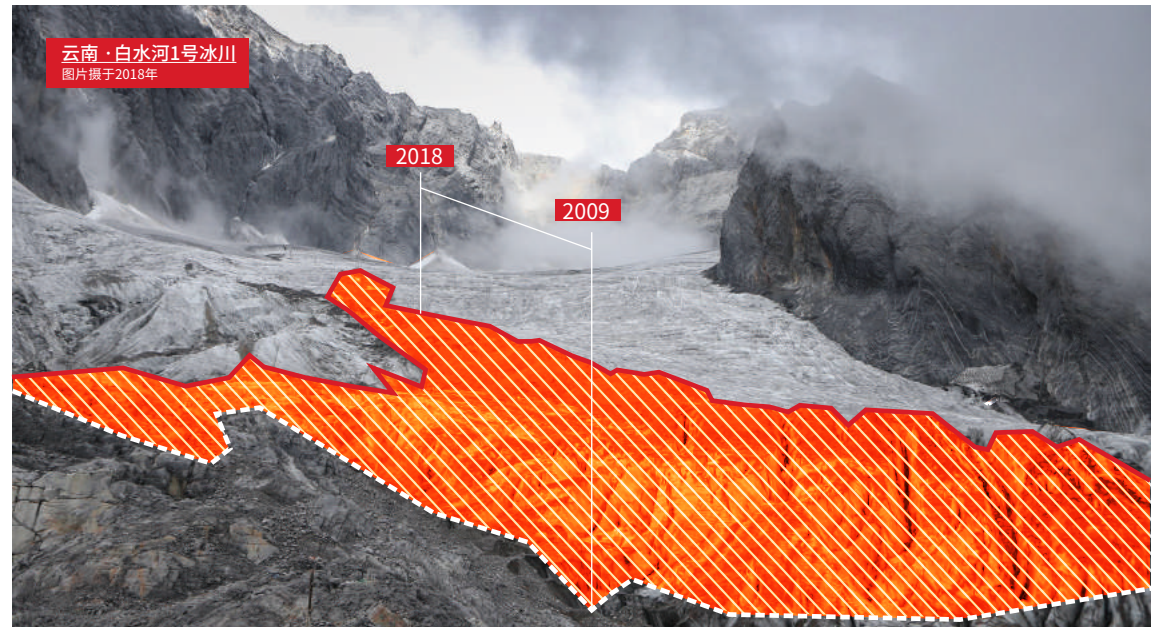
2018

© Tie Gai / Greenpeace



玉龙雪山白水河1号冰川

玉龙雪山白水河1号冰川属于海洋型冰川, 该类冰川在气候变化的影响下运动速度加剧, 退缩幅度最大。自2009年以来白水河1号冰川呈现全面退缩态势, 自2009年至2017年, 白水河1号冰川面积由1.229km²* 缩减至1.21km²** , 冰舌末端长度退缩78.1m。



数据来源 /

* 李开明, 陈世峰, 康玲芬等, 2018 中国大陆型冰川和海洋型冰川变化比较分析——以天山乌鲁木齐河源1号冰川和玉龙雪山白水河1号冰川为例, 干旱区研究, 35(1) 12-19。

** 2017年数据由绿色和平依据 sentinel2 卫星影像解译。

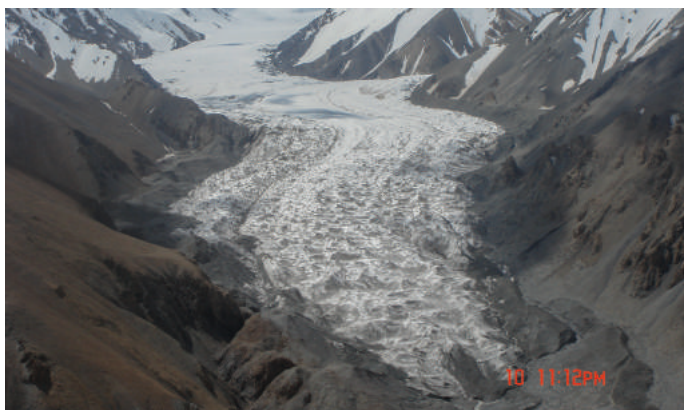
2006

© Du Wentao



2010

© Liu Yushuo



2018

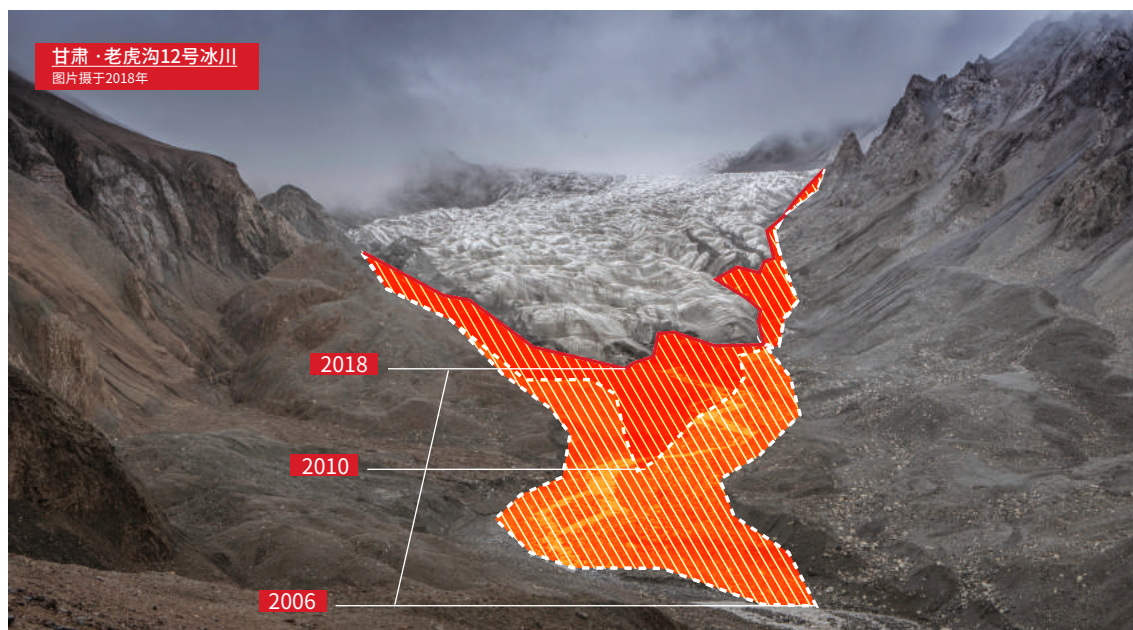
© Tie Gai / Greenpeace



祁连山老虎沟12号冰川

祁连山老虎沟12号冰川是祁连山区域最大的冰川,属于相对稳定的极大陆型冰川。然而自1990年以来,该冰川呈现出持续退缩的态势。

自2006年至2018年,祁连山老虎沟冰川由20.42km^{2*}, 缩减至20.2km^{2**}。1986-2005年冰舌末端长度退缩速率为7.0m/a^{***},2006-2018年冰舌末端长度退缩达170.5m,退缩速率达13.1m/a,退缩速率较上一时间段增加87%。



数据来源 /

* 刘时银等,中国第二次冰川编目数据集(版本1.0)。寒区旱区科学数据中心,2014。

** 2018年数据由绿色和平依据 sentinel2 卫星影像解译。

*** 杜文涛,秦翔,刘宇硕等,2008,1958-2005年祁连山老虎沟12号冰川变化特征研究,冰川冻土,30(3):373-379

1981.6

© Dr. Matthias Kuhle



2005.6

© John Novis



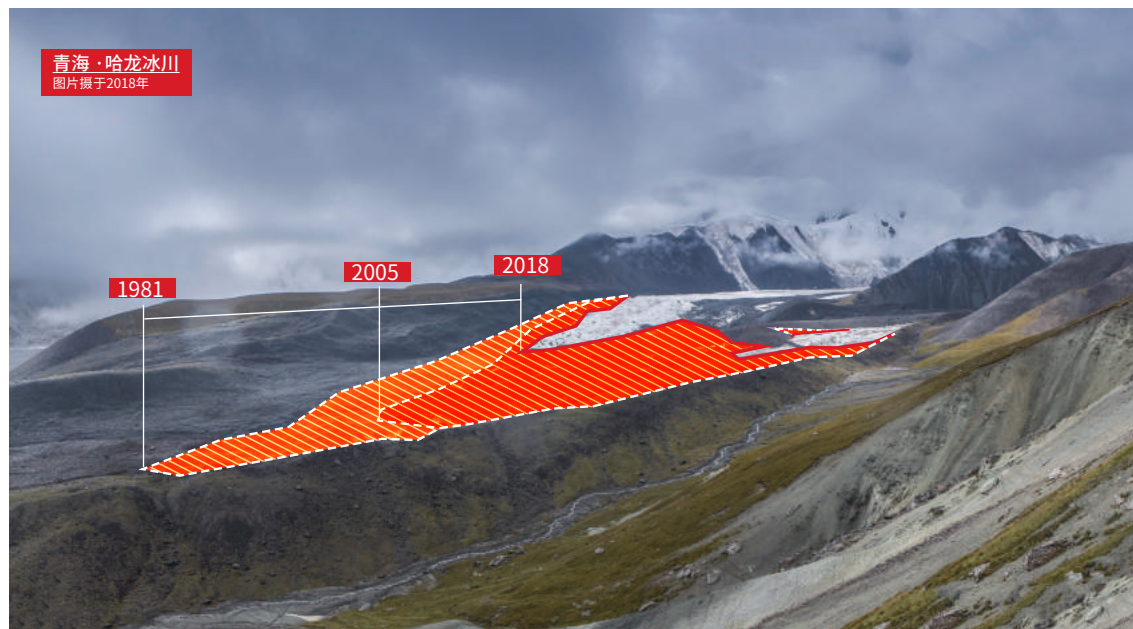
2018.8

© Tie Gai / Greenpeace



阿尼玛卿雪山哈龙冰川

阿尼玛卿雪山地处黄河源头,是黄河源头最大的冰川发育区。哈龙冰川是黄河流域最大、最长的冰川。1987年至2006年20年间,哈龙冰川面积由 21.39km^2 * 缩小至 20.59km^2 *, 2006年至2017年12年间,冰川面积进一步缩减至 19.73km^2 **。年退缩速率较上一阶段增加79%。冰舌末端长度在1987-2006年间减少750m。自2006年至2017年,冰舌末端后退450m。



数据来源 /

* 1987、2006 年数据由绿色和平依据 Landsat4-5 卫星影像解译。

** 2017 年数据由绿色和平依据 sentinel2 卫星影像解译。

INTRODUCTION

冰冻圈变化及其意义

冰冻圈是地球表层水以固态形式存在的圈层,包括冰川、冰盖、冻土、积雪、海冰、冰架、河冰和湖冰等。冰冻圈是陆地上最大的淡水资源库,储存着全球77%的淡水资源^①。冰冻圈也是受全球气候变化影响最直接和最敏感的圈层,是全球变化最快速、最显著、最具指示性的系统。随着气候变化的变率加剧,冰冻圈变化的气候效应、环境效应、灾害效应、资源效应和生态效应正日趋显著,其变化将影响亿万依赖冰冻圈生存的人的生计。

中国冰冻圈主要分布在青藏高原、新疆北部、黑龙江北部地区,是全球中低纬度冰冻圈分布最广的国家之一。依据第二次冰川编目统计数据,中国冰川面积达51800km²^②,占全球中、低纬度冰川面积的30%以上^③。中国西部冰川分布区是亚洲十余条大江大河(长江、黄河、塔里木河、怒江、澜沧江、伊犁河、额尔齐斯河、雅鲁藏布江、印度河、恒河等)的水资源形成区,冰川和积雪对这些江河水资源的形成与变化有着突出影响。

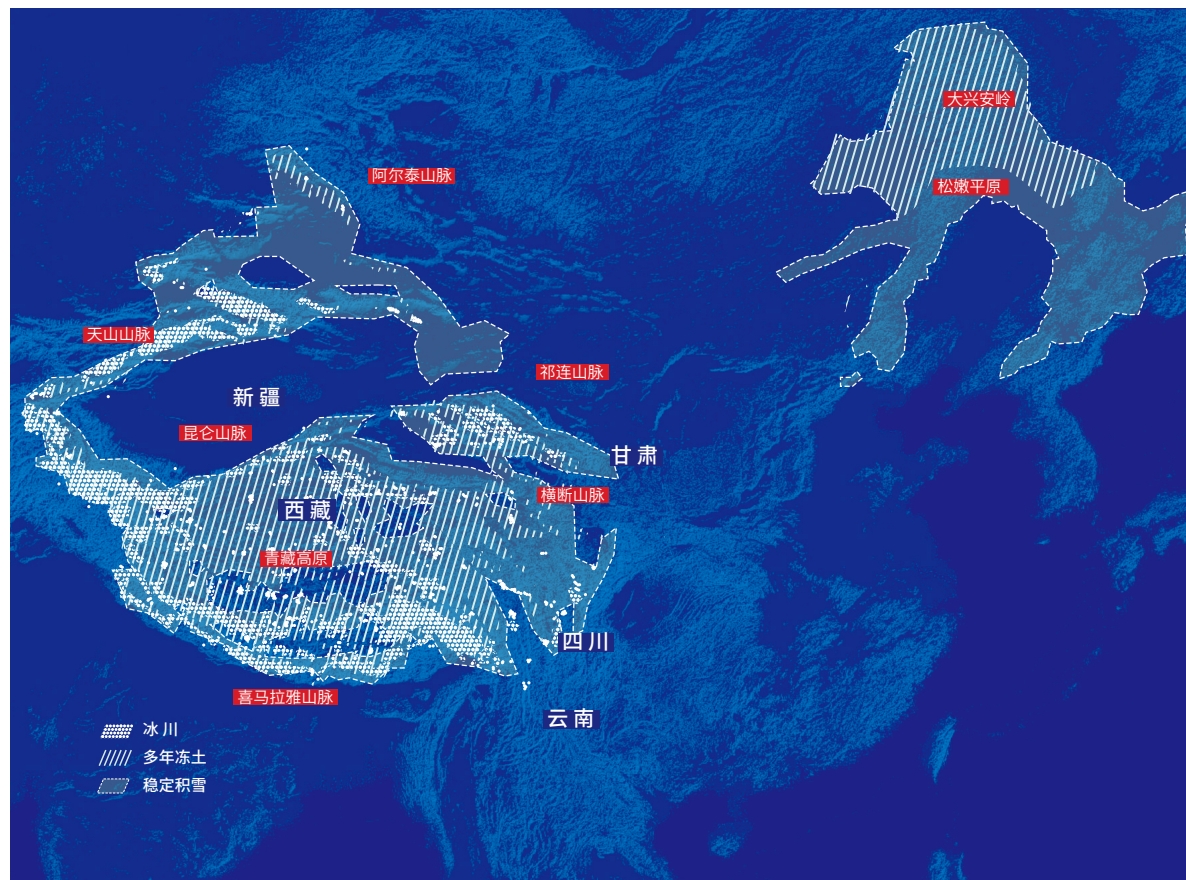
① Space and Earth Monitoring-Ice-Overview, EESA https://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Space_for_our_climate/Overview

② 刘时银,姚晓军,郭万钦等,2015,基于第二次冰川编目的中国冰川现状,地理学报,70(1):3-16

③ 王宗太,苏宏超,2003,世界和中国的冰川分布及其水资源意义,冰川冻土,25(5):498-503

中国冰冻圈大部分处于中、低纬度地区,对气候变化非常敏感,具有对气候变化提前预警作用和放大作用。中国冰冻圈也是集高寒、干旱、高湿、巨灾等特征共存的特殊环境区。被誉为“世界第三极”的青藏高原是全球气候变暖最强烈的区域,变暖幅度远大于其他地区。气候变化影响下中国冰冻圈的未来变化势必对中国西部及周边地区生态与环境安全和水资源持续利用产生广泛和深刻的影响。

冰川在西北干旱区被喻为固体水库、绿洲摇篮,是维持生产、生活的主要水资源之一,影响着下游十几亿人的生存安全。中国境内冰储量约 $4.3\sim 4.7\times 10^3\text{km}^3$ ^①,折合水量约为38700~42300亿 m^3 ,相当于4条长江以固态形式储存于西部高山,中国西部年平均冰川融水量为 $629.56\times 10^8\text{m}^3$ ^②,占中国2016年全国水资源总供给量的 $1/10$ ^③。在西北内陆干旱区,冰川融水的重要性尤其突出。冰川和积雪的冻融变化调节着西部的江河径流。正是由于冰川和积雪的存在,才使得中国深居内陆腹地的干旱区形成了许多人类赖以生存的绿洲。这种冰川积雪-绿洲景观及其相关的水文和生态系统稳定和持续存在的核心是冰雪,没有冰雪就没有绿洲,也就没有在那里千百年来生息的人民。



中国冰冻圈分布示意图

① 刘时银,姚晓军,郭万钦等,2015,基于第二次冰川编目的中国冰川现状,地理学报,70(1): 3-16

② 冰冻圈科学国家重点实验室2015年科研进展 <http://www.skllcs.ac.cn/kxjz/1056.html>

③ 中华人民共和国水利部,2016年中国水资源公报. url:http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/201707/t20170711_955305.html,2016年中国水资源供给总量为 $6040.2\times 10^8\text{m}^3$ 。

#01

气候变化下 失稳的中国冰川

高亚洲(HIGH MOUNTAIN ASIA)泛指青藏高原、帕米尔高原、天山和阿尔泰山等山系,是除极地之外最大的冰川发育区,冰川面积约占全球冰川面积的1/6^①。高亚洲区域冰川面积中46.2%集中于中国境内^②。

依据冰川发育的气候条件,中国现代冰川可以划分为海洋型冰川、亚大陆型冰川和极大陆型冰川^③。亚大陆型冰川主要分布在阿尔泰山、天山、祁连山东中段、昆仑山东段、唐古拉山东段、念青唐古拉山西段、冈底斯山部分、喜马拉雅山中西段北坡和喀喇昆仑山北坡,占中国冰川总面积的46%。极大陆型冰川分布于中国昆仑山中西段、羌塘高原、帕米尔高原东部、唐古拉山西部、冈底斯西段和祁连山的西部占中国冰川总面积的32%。海洋型冰川主要分布在藏东南和川西滇西北地区,包括喜马拉雅山东段、念青唐古拉山东中段和整个横断山系,占中国现代冰川总面积的22%^④。

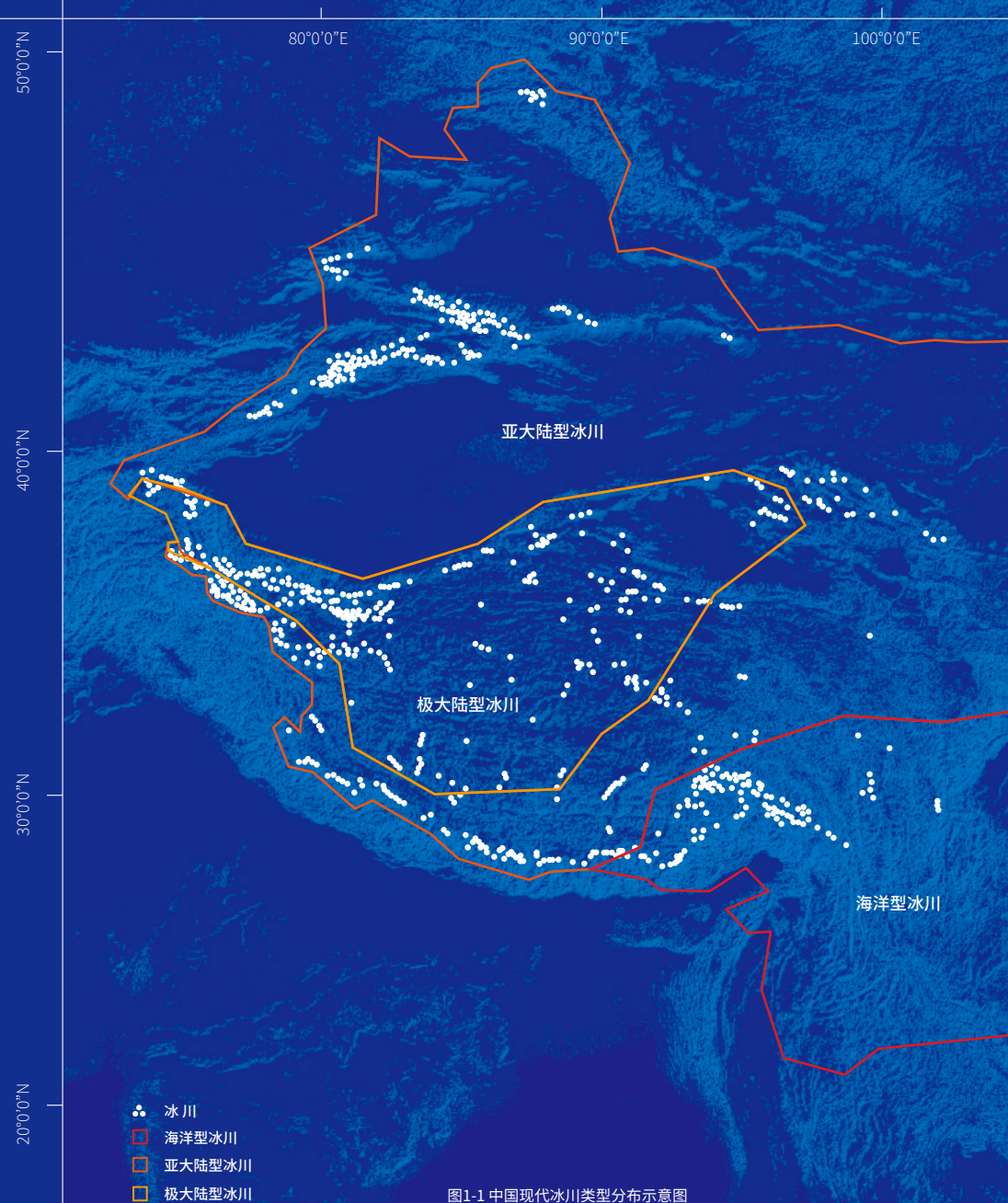


图1-1 中国现代冰川类型分布示意图

① 刘时银,张勇,刘巧等.2017 气候变化对冰川影响与风险研究[M].北京:科学出版社,2017. p.1
② 王宗太,苏宏超,2003,世界和中国的冰川分布及其水资源意义,冰川冻土,25(5): 498-503
③ 施雅风等,2000,中国冰川与环境——现在、过去与未来[M],北京:科学出版社,2000: 12-16
④ 伍光和,沈永平,2007,中国冰川旅游资源及其开发,冰川冻土,29(4): 664-667

随着气候变化影响日益加剧,气温升高,降水变化,极端天气气候事件频率和强度增加,导致中国高山与高原冰川发育区冰川持续退缩。中国冰川发育区所处海拔高度是气候升温速率最大的区域,也是极端高温和极端降水强度和频率最大的区域。冰川表面反照率下降导致冰川吸收更多热辐射,增加冰川温度,加速消融。冰川融水下渗,冰川温度的升高使得冰川对气候变化和地形地貌的影响反应敏感,并进一步导致冰川底部滑动和内部结构发生急剧变化。冰川稳定性结构失衡,使得较小的气候变化和冰川运动过程改变下冰川就会失去稳定性,发生冰崩或冰川跃动等冰川灾害。同时随着冰川消融的急剧增加,冰川洪水发生的频率和强度加大,冰川灾害的破坏性加剧。**气候变化下中国冰川面临失稳危险,冰川灾害风险将在未来急剧增加!**

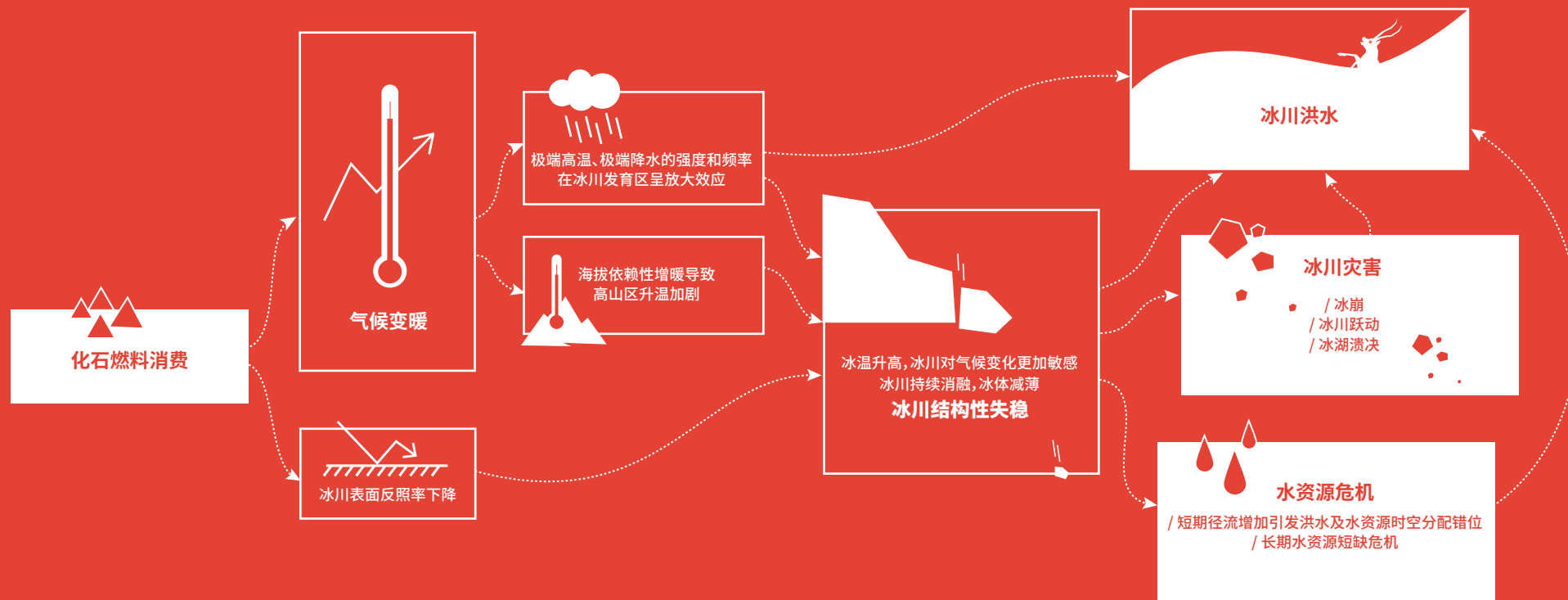


图1-2 气候变化下中国冰川面临失稳危机

中国山地冰川发育区的气候变化事实

气候变化导致高山区升温加剧

过去50年，青藏高原地区经历着一个暖温化的过程，尤其自1990年以来，这一暖化趋势变得尤为明显。青藏高原生态环境评估表明，青藏高原的温度变化整体呈波动上升趋势，20世纪以来青藏高原气候快速变暖，近50年来其变暖速率超过全球同期平均升温率的2倍，达到每10年0.3~0.4°C，是过去2000年中最温暖的时段^①。

高原的增温趋势与海拔高度密切相关，随着海拔的升高，增温速度也在增加，高山环境比低海拔环境经历的温度变化更快。海拔依赖性的变暖加快了山区生态系统、冰冻圈系统、水文情势和生物多样性的变化速率。在1961-2010年间，高原不同海拔带上的气象站点平均年温度增长率表现出较为明显的差异。在高原底部、中部及顶部，平均年均温增长率分别0.24，0.31和0.35°C/10年，即高原顶部升温最快，其次为中部，而高原的底部增温最慢。在近30年的增温率中发现，这一速度分别变为0.49，0.5和0.55°C/10年，而在近20年的统计中则变为0.644，0.637及0.557°C/10年^②。

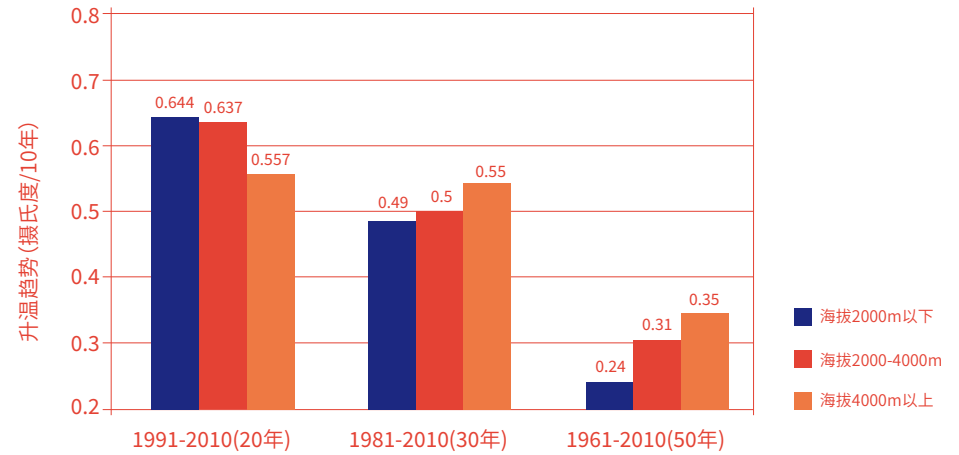


图1-3 青藏高原及周边地区不同海拔高度带20, 30, 和50年间升温趋势
根据Wei & Fang (2013) 数据改绘

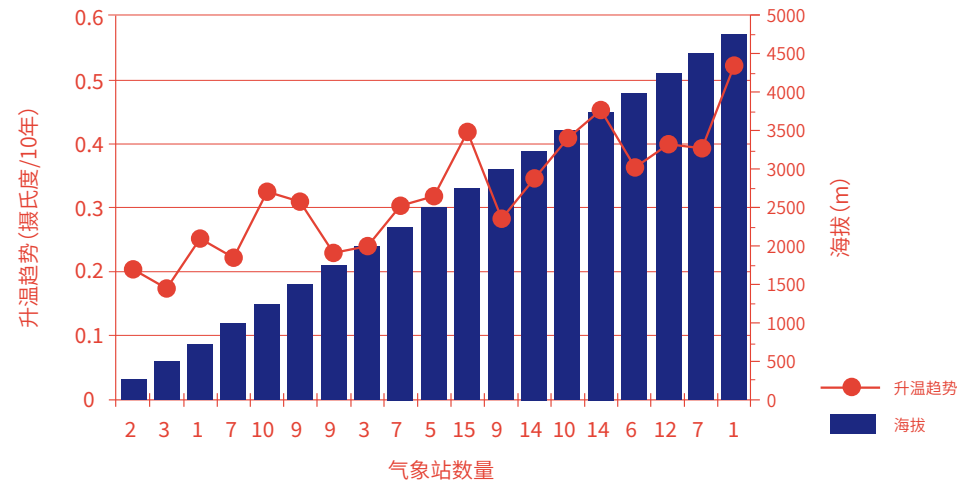


图1-4 青藏高原及周边地区1961-2010年间按250m海拔高度划分统计的各个海拔带上的温度变化率，横轴数字代表该海拔高度带上的气象站数量。
根据Wei & Fang (2013) 数据改绘

① 陈德亮, 徐柏青, 姚檀栋等, 2015, 青藏高原环境变化科学评估: 过去、现在与未来, 科学通报, 60(32):3025-3035

② Wei, YQ, Fang, YP, 2013, Spatio-temporal characteristics of global warming in the Tibetan Plateau during the last 50 years based on a generalised temperature zone- elevation model, PLoS ONE 8(4): e60044. doi:10.1371/journal.pone.0060044

极端天气气候事件在高山区增加

气候变化变率的不断加大导致极端天气气候事件,如热浪、洪水、干旱和暴风雨等,发生频率和强度在最近几十年呈现出增加趋势。极端天气气候事件产生了严重的社会和经济影响,其社会经济成本急剧增加。《IPCC全球升温1.5°C特别报告》指出,全球变暖2°C与全球变暖1.5°C情境相比,极端天气气候事件,例如极端高温,强降水等,发生频率、强度和量级都将显著增加(高信度)^①。

青藏高原是对气候变化响应敏感性强,变化幅度大的典型区域。极端天气气候变化是青藏高原生态、环境变化的重要驱动因素之一。过去几十年的数据显示,青藏高原气温增暖幅度明显大于全国平均值。高原绝大部分地区极端高温事件频次显著上升、极端低温事件频次显著下降,并伴随有风速和地表感热加热等气候要素的显著变化。极端高温热浪和暴雨过程将加剧山区冰川积雪的融化和冰雪冲刷,加速冰雪消融,进而导致消融型洪水和加剧暴雨型洪水等灾害的发生。

青藏高原地区98个气象观测站点1960-2012年53年间的气温实测记录显示^②,青藏高原整体各极端温度指数均呈上升特征,并普遍表现为升温现象。近53年来最低气温的极小值上升幅度为4°C左右,明显高于其他极值指数的上升速率,证明青藏高原地区温度上升的冷暖不对称性。最低温度Tmin对青藏高原气候变暖的贡献大于最高温度Tmax。青藏高原这种温度突变主要集中在20世纪后期。

伴随气温升高,青藏高原的平均降水和极端降水均呈现出显著增加的趋势。其中极端降水指数在青藏高原地区变化最为显著。研究显示^③,未来极端强降水对气温升高的敏感性最高,意味着极端降水对增温的响应将比当代更强,指数变化更为显著。CMIP5^④模拟结果表明在RCP^⑤4.5情景下中国大陆地区气温每升高1°C,强降水量(R95P)将增加11.9%,极端强降水量(R99P)将增加21.6%。RCP8.5情景下,气温每升高1°C,R95P和R99P将分别增加11.0%和22.4%。随着中国区域气温的升高,平均降水和极端降水均呈现一致增加的趋势。极端指数R95P和R99P对增暖的响应均在青藏高原地区最为敏感。

CMIP5耦合模式RCP2.6、RCP4.5和RCP8.5情景预估结果表明^⑥,当全球升温2°C时,青藏高原在三种情景下升温分别为2.99°C,3.22°C和3.28°C,年降水量分别增加8.35%、7.16%和7.63%。相对于气候基准年(1890-1900),在全球变暖2°C情景下,青藏高原霜冻日数平均减少18天,暖夜、暖昼日数平均增加12天和21天,中雨日数平均增多20天。青海西北部和西藏山南一带,强降水量距平增多幅度在44.5~59.5%之间。

在高海拔地区极端天气气候事件的指标大部分随着升温增强而增强,随着海拔升高也呈现频次与幅度(强度)增加。这样的结果将导致中国冰冻圈经受更大压力,稳定性失衡,极端事件的脉冲作用在冰冻圈放大,进而引发冰冻圈自然灾害频发,并且强度越来越大。

① IPCC, 2018, Summary for Policymakers, Global Warming of 1.5°C.

② 周玉科,高琪,范俊甫,2017,基于极端气温指数的青藏高原年际升温及不对称特征研究,地理与地理信息科学,33(6): 64-71

③ 吴佳,周波涛,徐影,2015,中国平均降水和极端降水对气候变暖的响应:CMIP5模式模拟评估和预估,地球物理学报,58(9): 3048-3060

④ CMIP5为世界气候研究计划(World Climate Research Programme,WCRP)组织的第5次耦合模式比较计划(Phase 5 of Coupled Model Intercomparison Project,CMIP5)为IPCC第5次评估报告提供数据支持。

⑤ RCPs(Representative Concentration Pathways)是在2014年IPCC第5次评估报告中发布的未来情景模式,包括RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0和RCP8.5共4种排放情景,分别代表低、中(RCP4.5和RCP6.0)、高3种温室气体排放强度。RCP情景模式预估了未来100年甚至更长时间的温室气体浓度。

⑥ 李红梅,李林,2015,2°C全球变暖背景下青藏高原平均气候和极端气候事件变化,气候变化研究进展,11(3): 157-164

中国冰川变化 对气候变化的响应

在气候变暖、气温升高的驱动下，自20世纪90年代以来中国冰川呈现出全面、加速退缩的趋势。与20世纪50年代相比，中国冰川有82.2%处在退缩状态^①，总面积缩小了约18%^②。与大型冰川相比，面积小于1km²的小冰川对气候变化的响应程度更加显著。这意味着在未来几十年，占中国冰川总数80%以上的面积小于1km²的小冰川将面临消失风险，中国冰川数量将急剧减少^③。

不同类型冰川对气候变化的响应

在气候变暖的影响下，中国冰川整体呈现退缩的趋势，但是其动态变化存在明显的空间差异。两次冰川编目数据对比发现，近50年来，在季风环流控制的喜马拉雅山等地区，冰川退缩最为强烈，物质平衡亏损幅度最大；青藏高原中部和北部的冰川相对比较稳定，退缩量较小；高原周边地区冰川退缩量较大。若以三种类型冰川来看，海洋型冰川退缩幅度最大，其次为亚大陆型冰川，极大陆型冰川退缩量最小。青藏高原东南部海洋型冰川的退缩幅度远大于青藏高原西部的极大陆型冰川^④。



① 刘时银,丁永建,李晶等,2006,中国西部冰川对近期气候变暖的响应,第四纪研究,26(5): 762-771
 ② 《中国第二次冰川编目》新闻发布会在京召开 http://www.cas.cn/yx/201412/t20141218_4278298.shtml
 ③ 姚植栋,秦大河,沈永平等,2013,青藏高原冰冻圈变化及其对区域水循环和生态条件的影响,自然杂志,35(3): 179-186
 ④ 陈虹举,杨建平,谭春萍,2017,中国冰川变化对气候变化的响应程度研究,冰川冻土,39(1): 16-23

图1-5 两次冰川编目间(1950-2010)各山系/高原冰川变化示意图

气候变化背景下冰川加速消融机理

随着气候变暖,冰川对温度变化的响应最为敏感,20世纪90年代伊始全球冰川呈现出加速融化的趋势。冰川的消融将进一步产生反馈连锁反应影响到全球气候,加速全球增温过程,使海面上升,引发区域淹没、冰雪灾害、冰川洪水自然灾害等,威胁着人类居住的环境安全,并可能改变着许多动植物种群的习性和生境。气候变化对冰川的影响首先体现在冰川物质平衡及其径流变化。冰川的加速退缩在中国西北部表现为冰川融水径流剧增,面积缩小,末端后退,雪线升高,许多小冰川已接近消亡的边缘。

● 气温升高是冰川加速消融的重要原因

气温和降水是影响冰川物质收入与支出的重要参量,而物质平衡的变化是导致冰川变化的基础,它也是联系气候和冰川变化的中间环节。中国大多数山地冰川的积累和消融同时发生在夏季,纯消融量的变化与夏季气温有直接的联系。冰川消融量是温度的函数^①。以天山1号为例,基于1958/1959年~2008/2009年数据分析发现,冰川的纯消融量与夏季平均气温间存在良好的线性关系,夏季气温的升高加速了天山1号冰川的消融强度和速率,致使冰川体积减小。

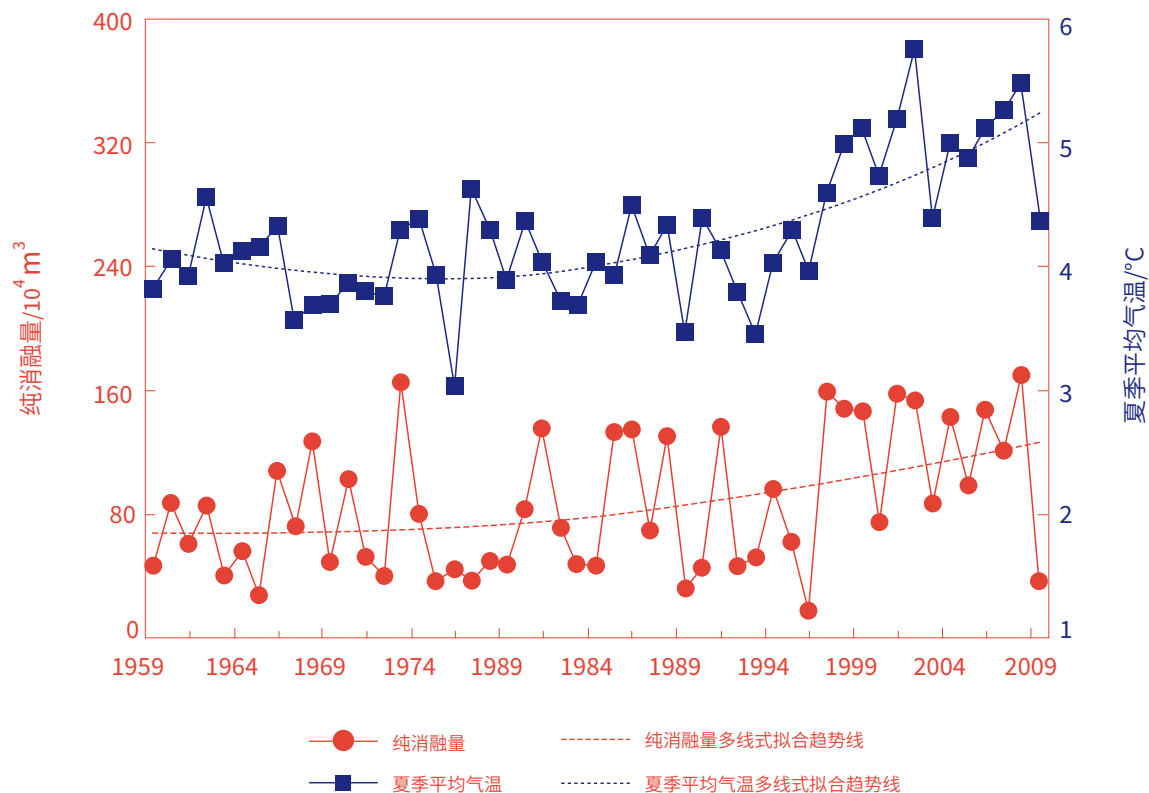


图1-6 天山1号冰川纯消融量与夏季平均气温间的关系
根据张国飞等(2012)数据改绘

^① 张国飞,李忠勤,王文彬等,2012,天山乌鲁木齐河源1号冰川1959-2009年物质平衡变化过程及特征研究,冰川冻土,34(6): 1301-1310

● 冰温增加导致冰川对气候变化更加敏感

冰温与气温之间是一种动态的平衡,冰温的上升是气温在各个季节升高的结果。冰川整体温度由冰川区年平均气温决定,冰川温度的高低指示着冰川冷储的多少,决定了冰川对气温变化的敏感性。气温的持续上升,会造成冰川冷储减少,致使冰川对气候变暖的敏感性增强。同样幅度的气温升高,会引起更多的物质亏损。气温的稍许增加,便会造成消融的非线性加速增加。

海洋型冰川对气候变暖的响应比大陆型冰川强烈的多,一个主要原因是海洋型冰川具有较高的冰川温度。在气候变暖背景下,冰川温度不断升高,其敏感性也随之不断增强。可以推测,当敏感性达到某一程度时,即便气温有小的增量,也会造成剧烈的消融。

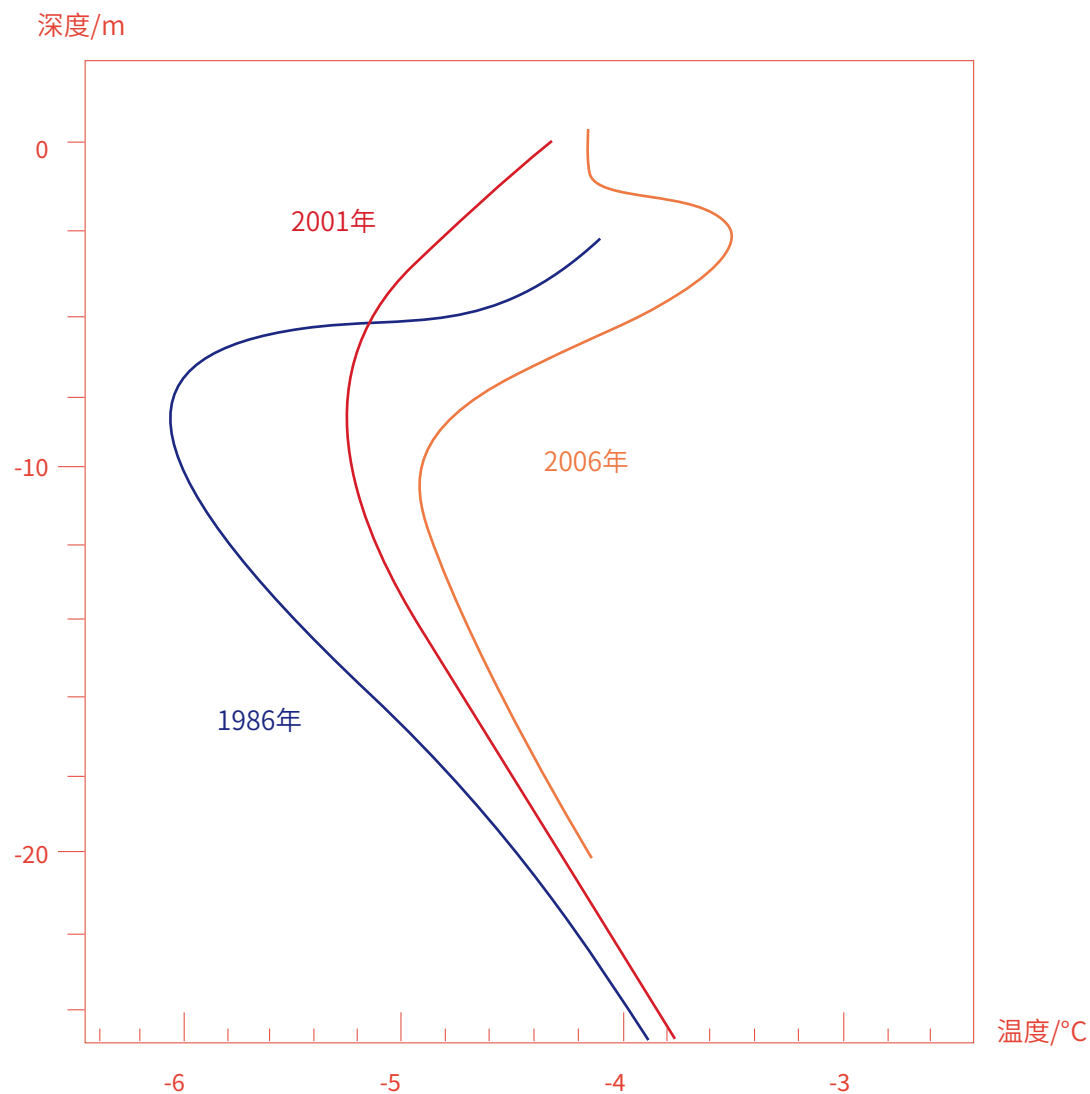


图1-7 天山1号冰川3840m处1986、2001和2006年的冰温剖面比较
根据Li ZQ et al (2008) 数据改绘^①

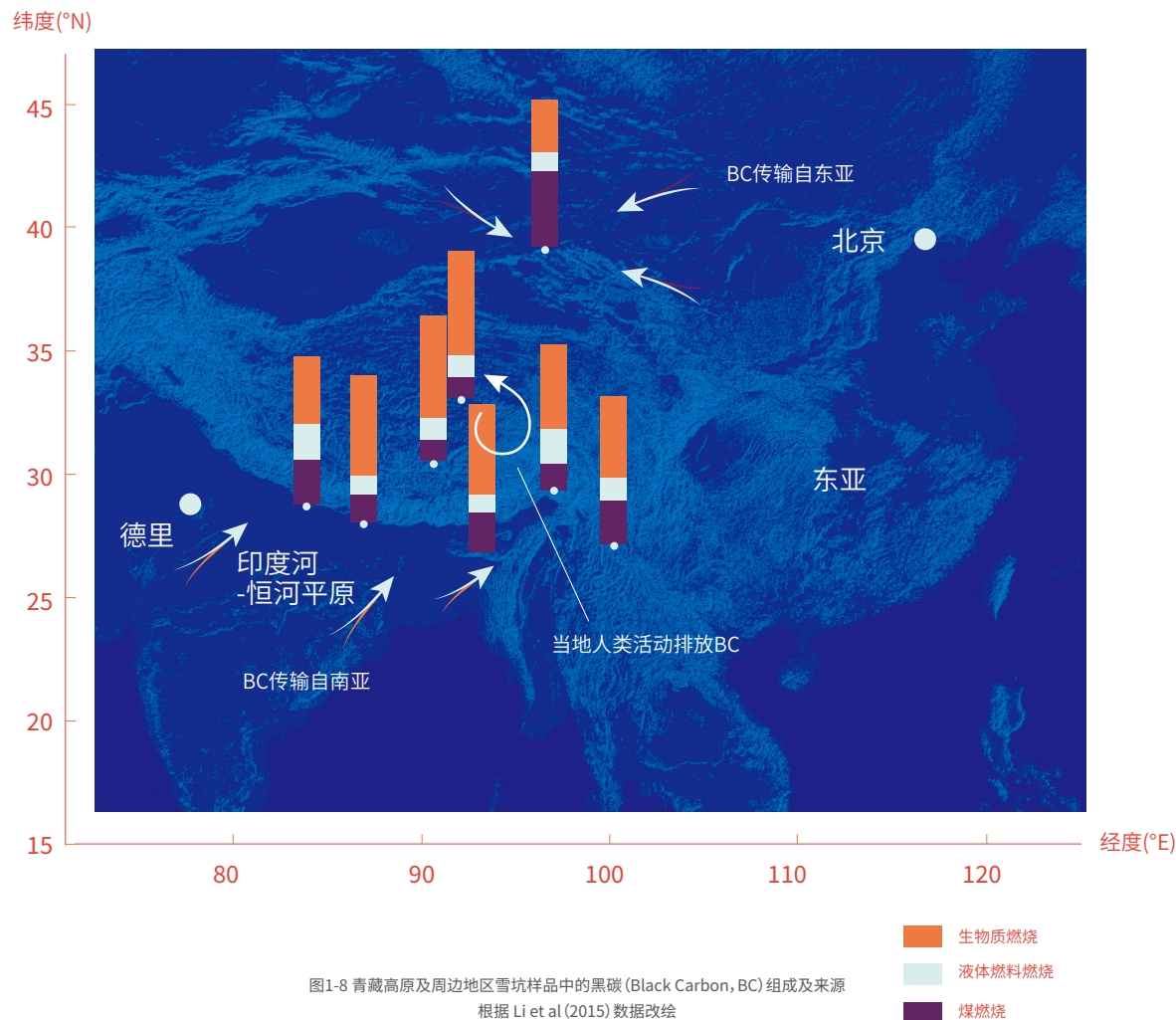
^① Li ZQ, Shen YP, Li, HL, 2008, Response of the melting Urumqi Glacier No.1 in eastern Tianshan to climate change, Advances in climate change research, 4(Suppl.): 67-72

● 冰川表面粉尘提高冰川对辐射的吸收

在冰川表面热量平衡中,冰川表面接收热量的一半以上来自净辐射,其余来自感热等。净辐射的大小很大程度上取决于冰川表面反射率大小。近几十年来,随着气温升高,积累区粒雪性质发生了变化,除了粒雪厚度变薄以外,雪层内具有较高反射率的细粒雪减少,杂质含量高,反射率低的粗粒雪增加,造成积累区反射率整体下降。在消融区,由于冰川表面含有大量融水传输的粉尘颗粒,随着温度的升高,表面附着的微生物大量繁衍,使得冰面颜色大大加深。与此同时,由于气温升高,消融区面积扩大,新降雪很快融化,降低了冰川反射率,增大了净辐射的吸收,从而成为冰川加速消融的原因之一。

冰川表面的粉尘颗粒物有利于辐射能量的吸收。黑碳颗粒物则是冰川表面粉尘颗粒物的重要组成部分之一。黑碳是由生物质和化石燃料燃烧形成的悬浮粒子。黑碳气溶胶沉降在冰雪表面产生的辐射强迫可加速冰雪消融,并改变陆面反照率,影响陆面辐射平衡,进一步加速冰雪消融。中国西部雪冰黑碳的平均浓度为 63ng/g ,高于北半球其他地区的实测结果,产生的平均辐射强迫为 $(+4.0\pm 2.0)\text{W/m}^2$ ^①。黑碳-雪冰辐射效应可导致近地面增温 $0.1\text{-}1.5$ 摄氏度,雪水当量减少 $5\sim 25\text{mm}$ ^②。

全球黑碳排放清单显示,中国西部地区自身的黑碳排放微弱。而南亚排放的黑碳经季风输送,可爬升并沉降于喜马拉雅山脉的冰雪上,甚至进入青藏高原腹地。青藏高原北部黑碳的主要构成是化石燃料燃烧产物($66\pm 16\%$),来自于中国西北地区的人类活动排放^③。



① 明镜, 效存德, 杜振彩等, 2009, 中国西部雪冰中的黑碳及其辐射强迫, 气候变化研究进展, 5(6): 328-335
② Ji ZM, 2016, Modeling black carbon and its potential radiative effects over the Tibetan Plateau, Advances in climate change research, 7: 139-144
③ Li CL, Bosch C, Kang, SC et al., 2015, Sources of black carbon to the Himalayan-Tibetan Plateau glaciers, Nature communications, 7:12574

#02

中国冰川变化影响

冰川消融的加速将加剧水资源危机

青藏高原冰川自20世纪90年代以来呈全面、加速退缩趋势，融水在逐年增加。1961-2006年间全国年平均冰川融水径流量为630亿m³，其中，1960年代为518亿m³，1970年代为591亿m³，1980年代为615亿m³，1990年代为每年695亿m³，2001-2006年年平均冰川融水径流量为795亿m³^①。近50年间中国冰川融水径流增长高达53.5%^①。冰川变化引发的水资源时空分布和水循环过程的变化，无疑将给中国西部，尤其是寒区的社会经济发展带来深刻影响。

从短期来看，冰川融水的季节性变化将导致水资源时空分布变化和灾害风险的上升。在山地流域，较高的气温加速了春季融雪的速率，缩短了降雪季节的时间，导致更快、更早期和更大的春季径流。冰雪消融产流时间的提前，将导致洪峰在春季提前到来，冲毁渠系、水库，更将导致夏季需要灌溉时水资源短缺^②。中国西部寒区旱区依赖冰川融水形成的绿洲经济将受到巨大的挑战。

从长期来看，冰川融水径流的增加并不可持续，当冰川融水达到峰值(PEAK WATER)后，剩余的冰川容量将不能维持径流的增加，冰川融水将急剧减少，冰川下游的人类生存将面临更加严峻的水资源短缺风险。在2°C情境下，大多数中国冰川融水径流将在2040-2070达到峰值，随后将快速衰减，对冰川下游水资源供给造成严重影响^③。

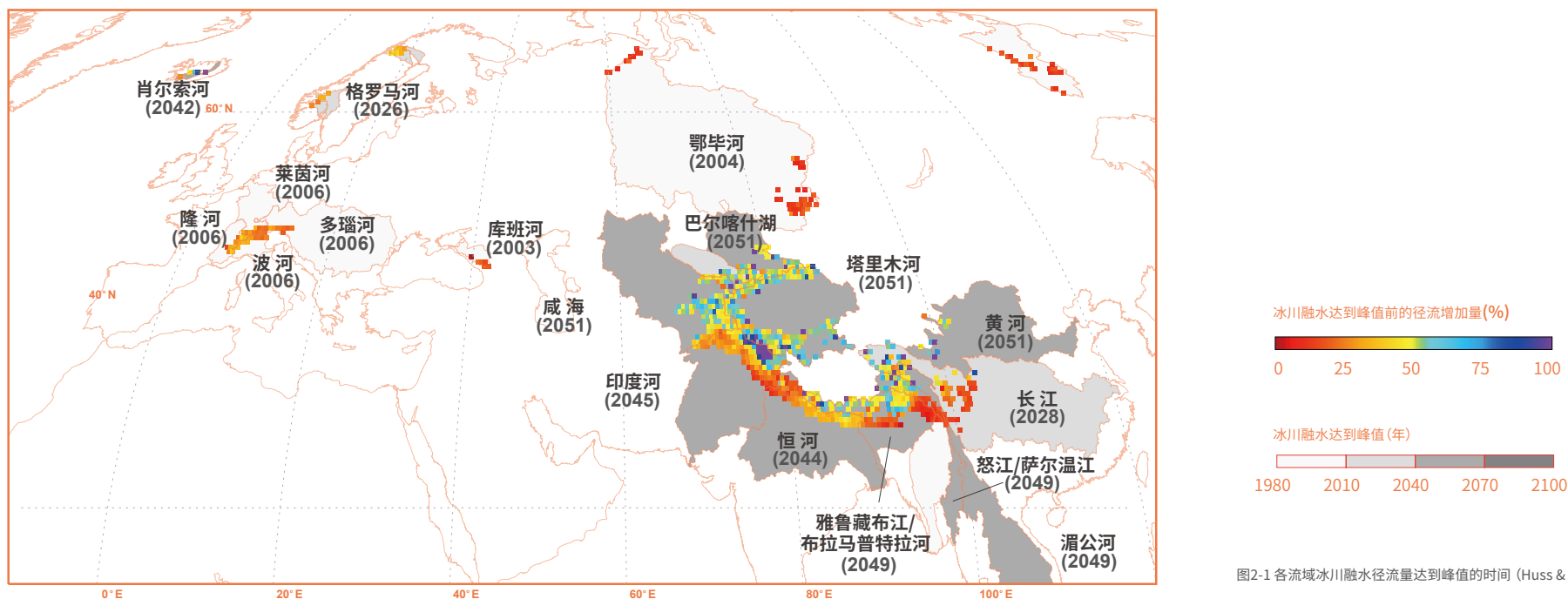


图2-1 各流域冰川融水径流量达到峰值的时间 (Huss & Hock, 2018)

① 丁永建等, 2017, 寒区水文导论 [M], 北京: 科学出版社, 2017年7月 p124
② 沈永平, 王国亚, 魏文寿等, 2009, 冰雪灾害, 北京: 气象出版社, 2009年10月 137-139
③ Huss, M., Hock, R., 2018, Global-scale hydrological response to future glacier mass loss, Nature Climate Change, 8:135-140

案例 I

阿克苏流域冰川加速消融 对河流的补给作用及对绿洲经济的影响

阿克苏河流域冰川消融对河流补给作用

阿克苏河是塔里木河最大的一条源流,对塔里木河干流水量的补给量占73.2%。阿克苏河是天山南坡净流量最大的河流,流域面积 $5.14 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^①。库马拉克河和托什干河是阿克苏河的两大大支流。台兰河是阿克苏河中下游汇入的一条支流。

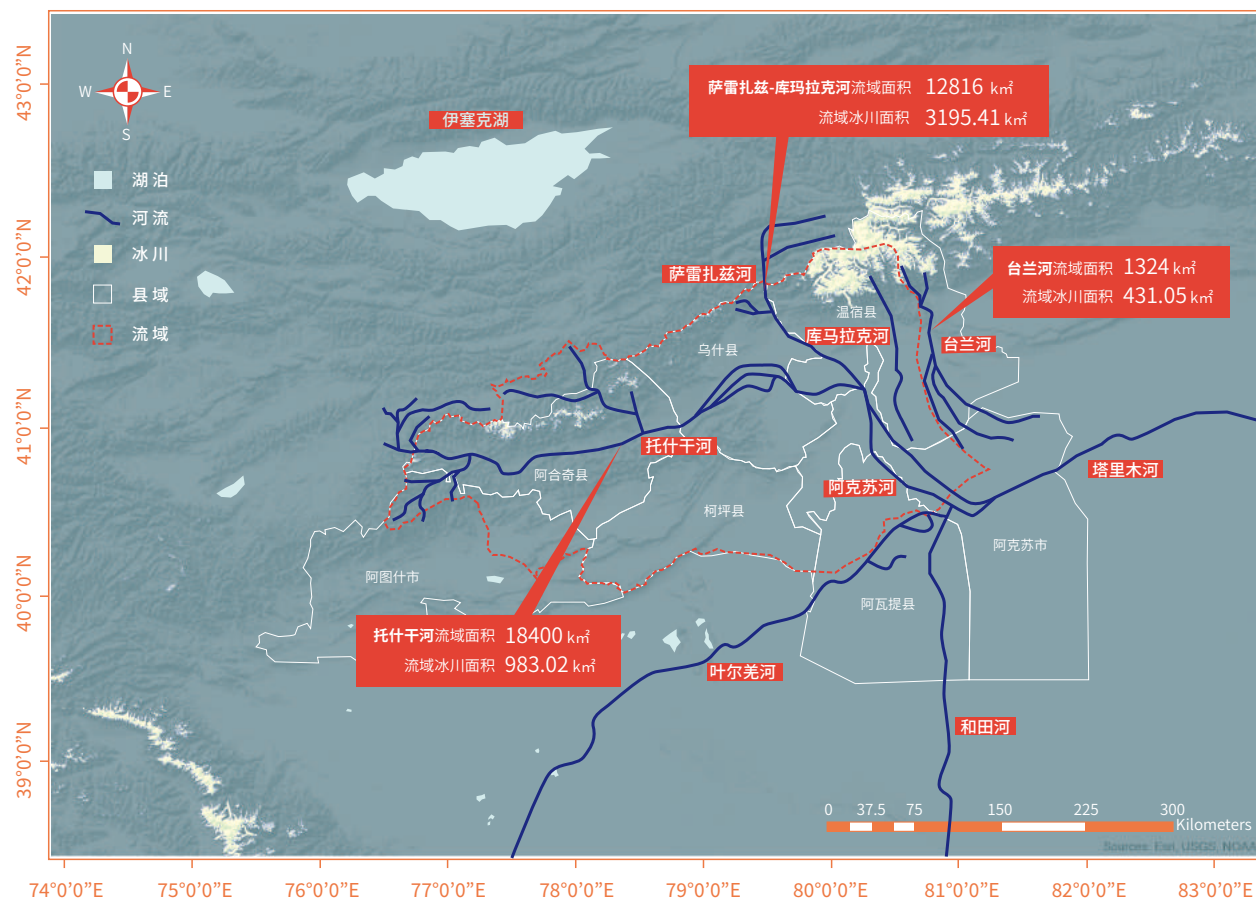


图2-2 阿克苏河流域示意图

① 王国亚,沈永平,苏宏超,2008,1956-2006年阿克苏河径流变化及其对区域水资源安全的可能影响,冰川冻土,30(4): 562-568

库马拉克河与台兰河都是以冰川融水补给为主的河流，冰川融水分别占到其总径流的52.4%和69.7%^①。库马拉克河流域冰川覆盖面积3195.41km²，冰川融水变化对流域水资源量的影响非常明显，通过1957年至2006年流域站点观测数据分析发现^②，库马拉克河流域平均年径流量为48.64×10⁸m³，径流在1993年后急剧增加，1994至2006年的平均年径流量比1957-1993年年均增加了10.56×10⁸m³，即增加了23.6%。在过去50年由于气温升高引起的冰川净消融额外补给河流的径流量达309.47×10⁸m³，相当于每年径流增加达6.19×10⁸m³，约为年径流量的13%。随着气候变暖，虽然降水量增加，但冰川对气温的敏感性更大，冰川消融量加快，冰川融水量持续增加。

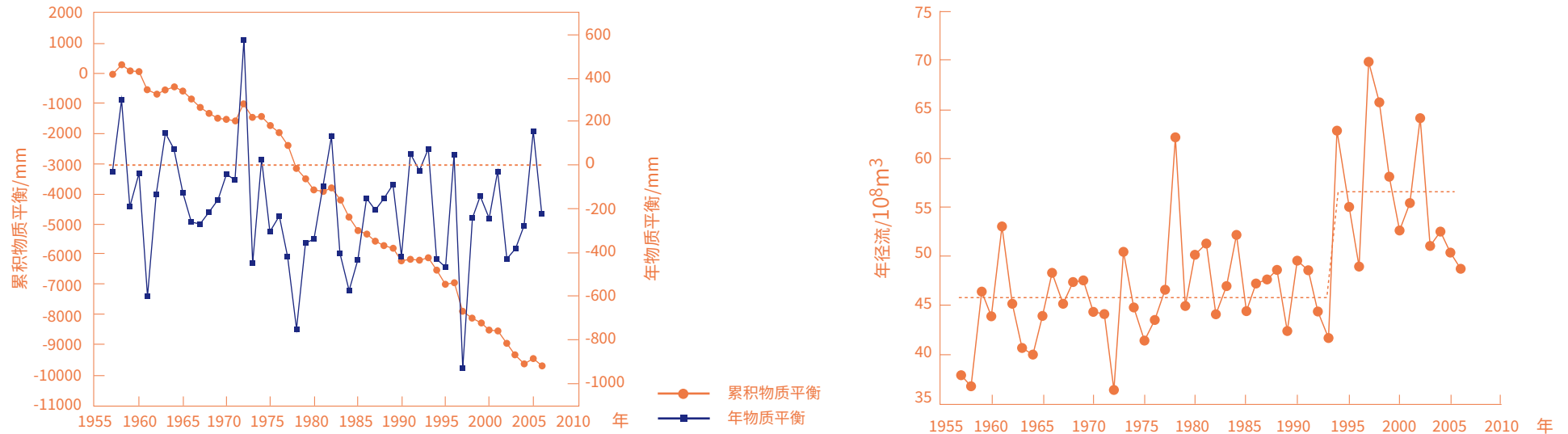


图2-3&4 1957-2006库马拉克河流域平均冰川物质平衡变化及年径流变化
根据沈永平等(2009)数据改绘

库马拉克河流域的平均年径流量在1993年后急剧增加，年最大洪峰流量也相应发生变化，1994-2006年与1957-1993年的平均年最大洪峰流量比较增加37%，且大部分超出警戒和危险流量。随着气温的变暖，冰川减薄后退，冰湖库容增加，洪水总量逐年增大。1932-2008年的67年内发生溃决突发性洪水62次，其频率达92.5%以上；在1980年代以来的高温期表现出每年甚至一年两次溃决的势头，而且洪峰流量与总洪水量均呈增加的趋势^③。

① 王国亚, 沈永平, 苏宏超, 2008, 1956-2006年阿克苏河径流变化及其对区域水资源安全的可能影响, 冰川冻土, 30(4): 562-568
② 沈永平, 王国亚, 丁永建等, 2009, 1957-2006年天山萨雷扎兹-库马拉克河流域冰川物质平衡变化及其对河流水资源的影响, 冰川冻土, 31(5): 792-800
③ 沈永平, 苏宏超, 王国亚等, 2013, 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(II): 灾害效应, 冰川冻土, 35(6): 1355-1370

依赖冰川融水的阿克苏河流域绿洲经济

阿克苏地区包括阿拉尔市、阿克苏市和柯坪县等9个行政单位。截至2016年底，阿克苏地区共有人口250.83万人，国民经济绿洲经济发展以第一产业为主，灌溉农业发展迅速，主要作物类型是棉花、小麦、玉米等。绿洲灌溉作物的种植与流域水资源补给与分配密切相关。

自1980年以来，阿克苏河流域绿洲面积不断扩大，依据MODIS NDVI数据分析得到2000年-2018年阿克苏河流域植被覆盖面积由10976.13km²增加到13065.00km²(见图①)，增长19.03%，耗水量快速增加。阿克苏河流域冰川融水对径流补给的快速增长使得这一区域绿洲经济快速发展成为可能。

然而这一快速增长趋势并不可持续。依据《新疆自治区统计年鉴-2017》^②，2016年阿克苏地区水资源总量为62.74亿m³，人均水资源占有量为2364m³/人，而2016年全年阿克苏地区用水总量达到108.48亿m³，超额用水占全年水资源总量72.9%。2017年阿克苏地区一产用水达到105.77亿m³，占比97.5%，人均用水4253m³/人，为全年人均水资源占有量的1.73倍。这一发展态势将导致该流域内人口、城市和产业的快速增长面临气候变化下冰川加速消退引发的水资源短缺威胁。

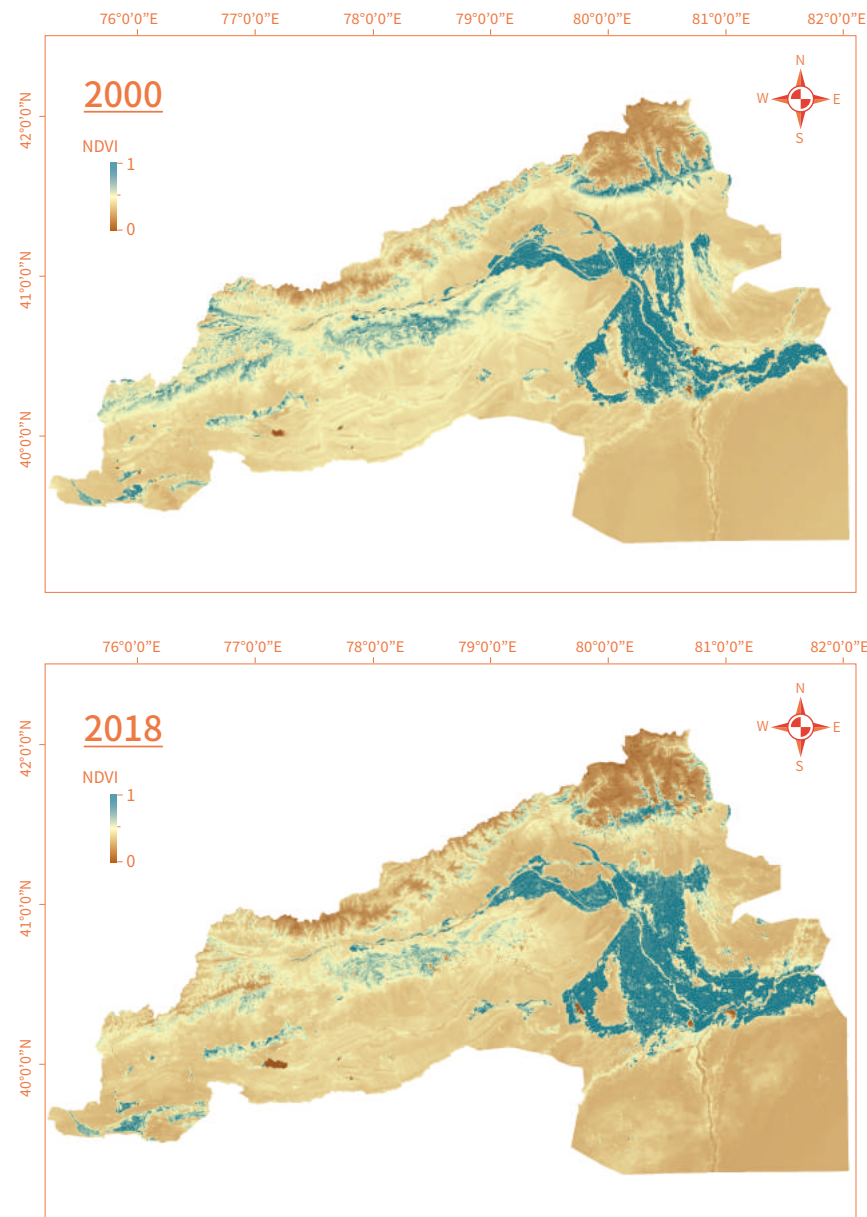


图2-5 2000和2018年夏季同期阿克苏地区NDVI指数对比

① 绿色和平依据2000年及2018年夏季MODIS NDVI数据分析得出
② 新疆统计年鉴委员会. 2017. 新疆统计年鉴-2017. 北京: 中国统计出版社

案例 II

天山1号冰川变化 及对乌鲁木齐市社会经济影响

乌鲁木齐河流域概况

乌鲁木齐河流域位于天山北坡中段,准噶尔盆地南缘,属于典型的大陆型气候区。研究表明^①乌鲁木齐河流域年内径流中,26.7%来自于冰川融水补给,说明乌鲁木齐河是一条典型融冰水补给的河流,气温的变化会对径流具有显著的影响。乌鲁木齐河是乌鲁木齐市主要供水水源。47年来供水合计达120.73亿m³,多年平均供水量为2.64亿m³^②。乌鲁木齐60%以上的生活供水任务由乌拉泊水库承担,而天山1号的冰雪融水占水库总水量的60%^③。

乌鲁木齐河冰川变化及预测

1964年乌鲁木齐河流域共有冰川155条,面积48.04km²,至1992年面积减少了13.8%^④。据天山1号冰川长期观测结果分析,乌鲁木齐河源区径流增加的70%来自于冰川加速消融补给^⑤。根据1号冰川的物质平衡数据推算1959-2009年1号冰川的冰储量亏损达-2402.6×10⁴m³,即51年来1号冰川消融掉了其储量的22.4%,至少提供了2520.8×10⁴m³融水径流量^⑥。

天山1号冰川自1959年观测以来一直处于退缩趋势。历史数据表明^⑦,1964年天山1号面积为1.94km²。自1986年起冰川强烈退缩,导致天山1号冰川末端在1993年发生分离,成为东、西两支独立的冰川。1992年测算面积减小至1.83km²,2001年冰川面积1.71km²。2011年以后,整个冰川处于净损失状态。绿色和平通过Sentinel2卫星影像解译分析得出2018年天山1号冰川面积减小至1.51km²,较1964年面积减小了22.2%。

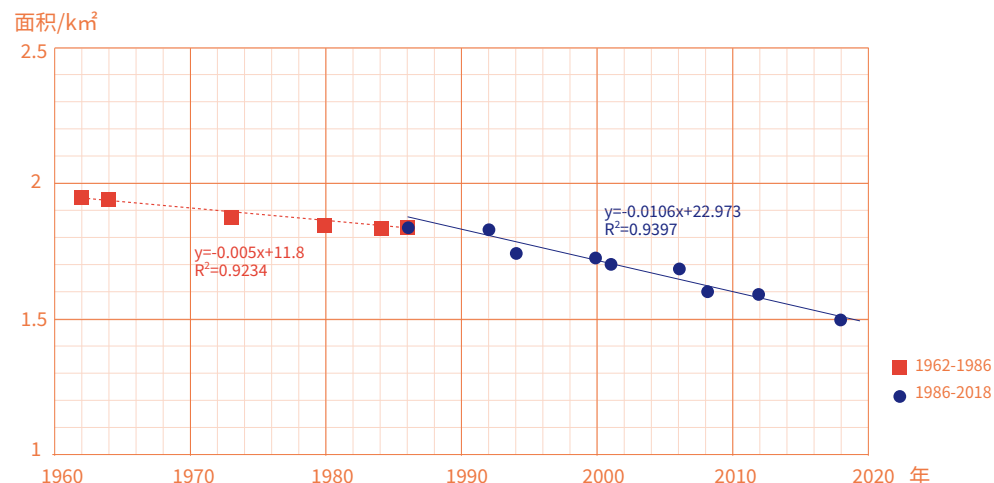


图2-6 1960-2018年天山一号冰川面积变化及退缩速率
1986年后,冰川退缩速率显著加快。1962-1986年减小速率为0.005km²/a,1986-2018年为0.0106km²/a。
1986-2018年冰川面积退缩速率增加至上一时间段的二倍。
历史数据:李开明,陈世峰,康玲芬等,2018;2018年最新数据:绿色和平

① 孙从建,陈伟,2017,天山山区典型内陆河流域径流组分特征分析,干旱区地理,40(1): 37-44。
② 张润杰,2007,乌鲁木齐河供水存在问题与对策,节水灌溉,10:50-53
③ 乌鲁木齐乌拉泊水库蓄水量较同期下降1000万立方米,乌鲁木齐晚报,2017.5.3 <https://share.iclient.lifeng.com/shareNews?aid=122097230>
④ 蓝永超,沈永平,吴素芬等,2007,近50年来新疆天山南北坡典型流域冰川与冰川水资源的变化,干旱区资源与环境,21(11):1-8
⑤ 秦大河,周波涛,效存德,2014,冰冻圈变化及其对中国气候的影响,气象学报,72(5): 869-879
⑥ 张国飞,李忠勤,王文彬等,2012,天山乌鲁木齐河源1号冰川1959-2009年物质平衡变化过程及特征研究,冰川冻土,34(6): 1301-1308
⑦ 姚红兵,李忠勤,王璞玉等,2015,近50a天山乌鲁木齐河源1号冰川变化分析,干旱区研究,32(3), 442-447。

依据李忠勤等的预测^①，在BAU情境下天山1号冰川将在未来50-90年内加速消融乃至消失。冰川融水径流将在2050年左右达到峰值，而在急速升温的大西沟升温情景(DXG2)^②下，融水径流将在2030年达到峰值随后冰川径流将快速减少，到本世纪末，天山1号冰川将完全消失，对下游流域造成严重的水资源危机。

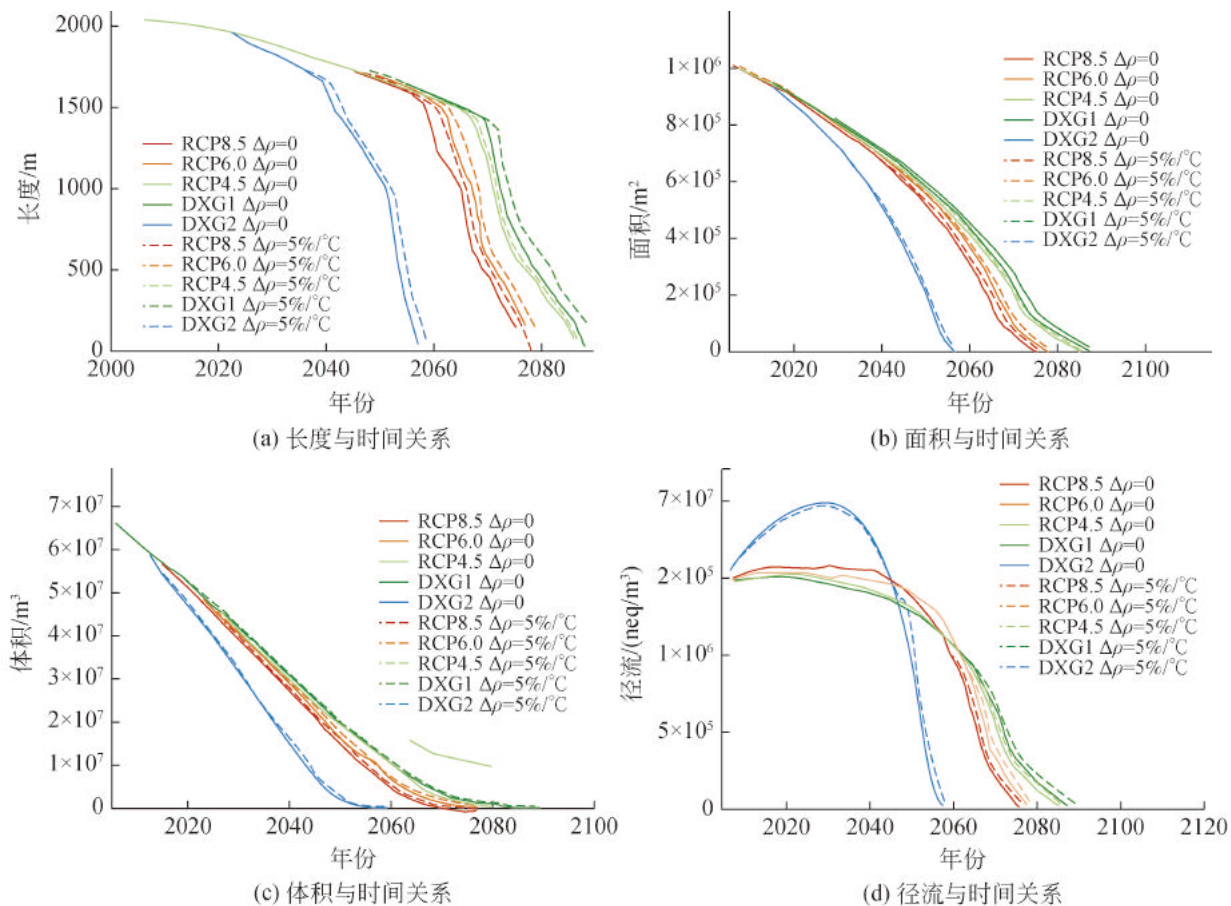


图2-7 天山1号冰川不同气候情景下长度、面积、体积和冰川径流未来变化(李忠勤等, 2018)

① 李忠勤等, 2018, 山地冰川物质平衡和动力过程模拟, (冰冻圈变化及其影响研究 / 丁永建, 效存德主编) 北京: 科学出版社, 2018, 9
 ② 根据冰川附近的大西沟气象站 1980-2004 年实测气温资料外延构建的升温情景。

冰川灾害风险剧增

西北干旱区冰川、积雪广泛分布,在其融水补给河川径流的同时,也常伴有冰川洪水、融雪洪水、冰湖突发洪水、冰川泥石流、冰雪崩和风吹雪等冰雪灾害发生。随着全球气候变暖,尤其是从1987年开始的气候由暖干向暖湿的转型,中国西北地区冰川退缩加剧,融水量增大,冰川洪水和冰川泥石流灾害随着冰川融水径流的增加而增多;而融雪洪水、雪崩和风吹雪随着气候变化引起的冬季积雪增加和气温升高,其灾害强度在增强;冰崩灾害随着气温升高引起的高山冰体崩解而呈增加趋势。在青藏高原已观测到近十几年来在气候变化影响下冰雪灾害发生的频次和强度有增加的趋势,并可能形成若干新的灾害点。

冰湖增加和冰湖溃决洪水的潜在威胁增加

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,中国的冰湖主要分布在西藏念青唐古拉山和喜马拉雅山地区。在气候变化驱动下,这些区域冰川的冰雪融水不断增加,加大了湖泊的补给源导致冰湖溃决的风险增大。

● 喜马拉雅山区冰川湖泊快速扩张

喜马拉雅是世界上最高的山脉,是大量冰川和冰川湖的家园。在过去的几十年中,该地区的冰湖溃决洪水(GLOFs)造成了灾难性的破坏和死亡。最近的变暖导致了冰川湖的剧烈变化,并增加了喜马拉雅潜在的GLOFs风险。

喜马拉雅冰川湖从1990到2015年,总数增加了401个,总面积扩大了56.4km²,增加约14.1%。在高海拔地区发现了许多冰川湖泊,特别是由于冰川退缩而形成的新前冰川湖泊。在2015年,总共有118个冰湖泊被确定为迅速扩张的湖泊,其分布与喜马拉雅山发生的历史冰湖溃决洪水事件高度一致^①。

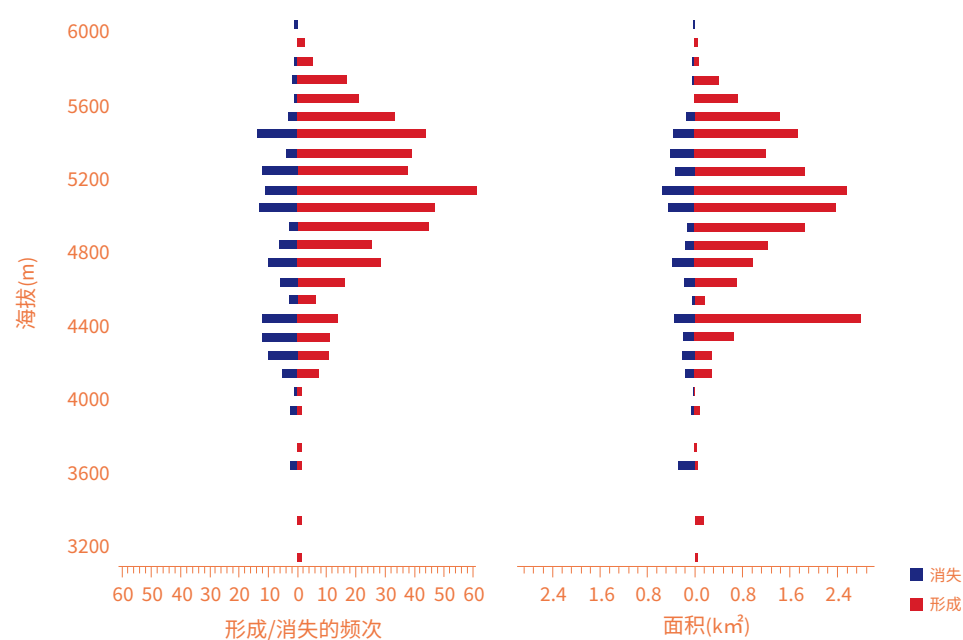


图2-8 喜马拉雅地区1990-2015年间新形成的和新消失的冰川湖海拔分布及面积统计
根据Nie et al (2017) 数据改绘

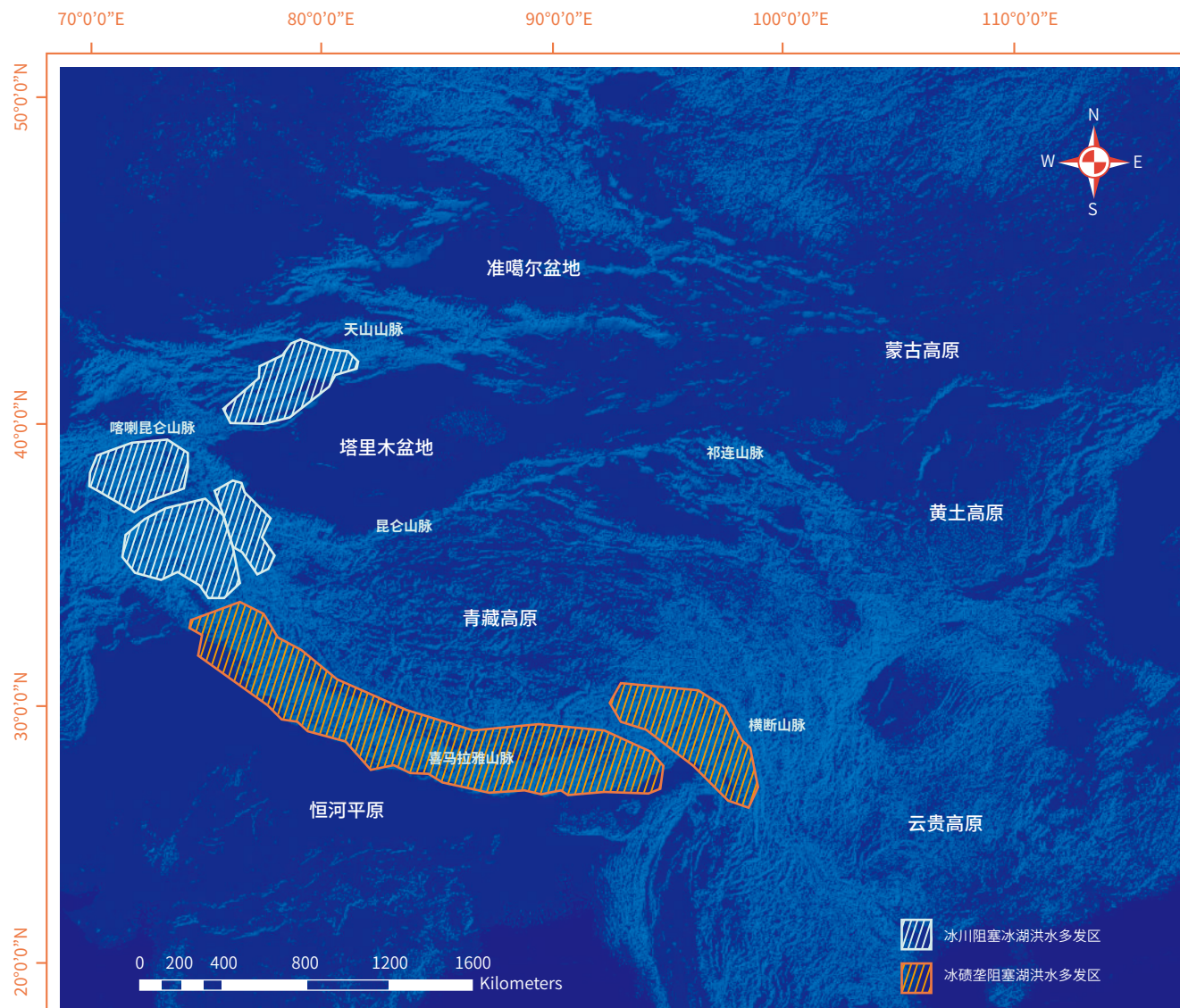
① Nie, Y., Sheng, YW, Liu, Q., et al., 2017, A regional-scale assessment of Himalayan glacial lake changes using satellite observations from 1990 to 2015, Remote sensing of environment, 189: 1-13

● 气温和降水增加显著有利于冰湖溃决

随着气温升高、冰川融水增加、降雨量增加、高温、强降雨等极端天气条件增多,造成冰湖溃决及伴生的泥石流灾害的可能性急剧增大。在中国冰川阻塞湖溃决洪水主要分布于新疆叶尔羌河上游的克勒青河谷和阿克苏河上游的库马拉克河谷,冰碛阻塞湖溃决洪水(或泥石流)集中分布于喜马拉雅山中段和念青唐古拉山东段。这种突发性洪水起涨快,涨率大,洪峰高,洪量小,洪水时间短促。

引起冰湖溃决的主要因素取决于降水、温度、地形条件、海拔高度等多种因素的共同作用。而全球气候变暖所导致的冰川消融是引起冰湖溃决洪水的核心原因。随着气候变化的趋势不断增加,冰川和湖泊对人为气候变暖的反应更加活跃,可以预计,在21世纪GLOFs发生率将大幅增加。

图2-9 高亚洲地区冰冻圈冰湖溃决洪水灾害分布图



案例 III

叶尔羌河上游冰湖溃决性洪水灾害

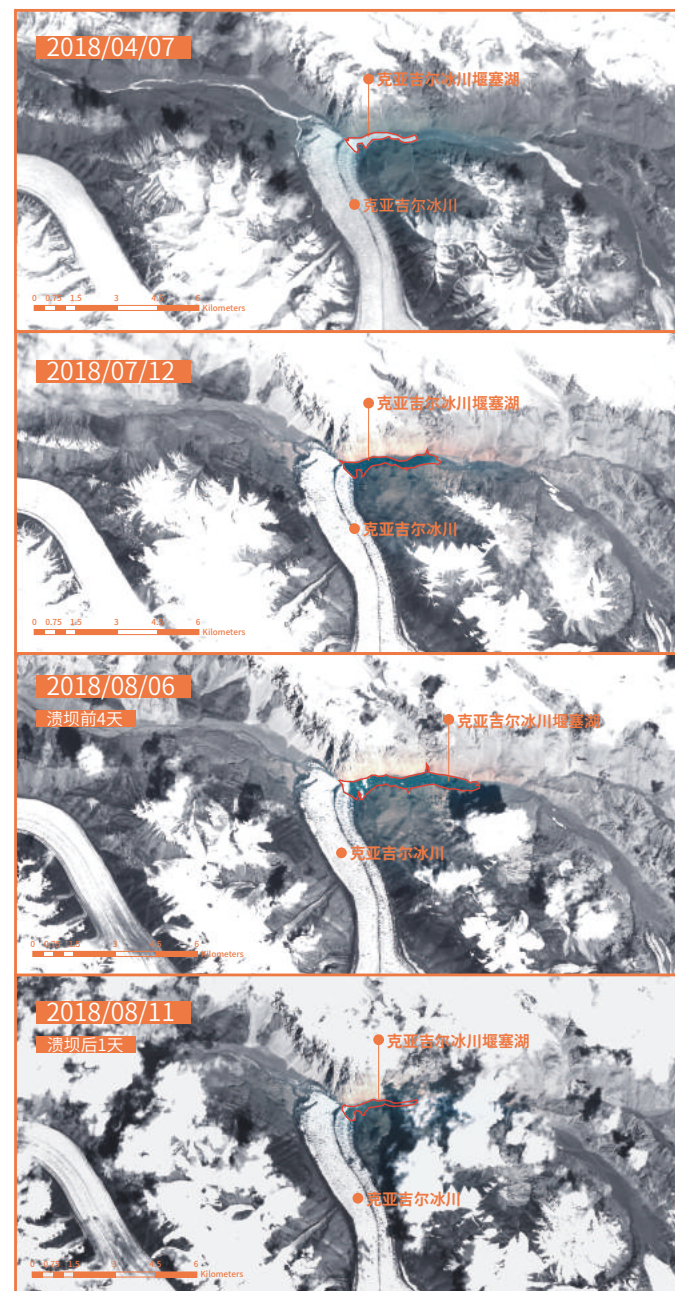
叶尔羌河上游冰湖溃决性洪水成因

克勒青河是叶尔羌河干流山区上段,位于冰川集中分布的高山区。克勒青流域的冰川面积占叶尔羌流域内冰川总面积的45.7%,控制年径流量40.37亿 m^3 。在气候变化背景下,叶尔羌河流域冰川由正平衡转为负平衡,冰川呈现加速退化和变化态势。两次冰川编目期间克勒青河流域冰川因退缩分裂,条数在两次编目期间由557条增加至572条,总面积减小299.36 km^2 ^①。克亚吉尔冰川及特拉木坎力冰川跃动前进,阻塞克勒青河,分别形成克亚吉尔和特拉木坎力堰塞湖,在特定的水力学条件下堰塞湖溃决,湖水以高水头下泄,是叶尔羌河上游形成冰湖溃决性洪水的直接原因。冰川湖溃决引发突发性洪水,是叶尔羌河各类洪水中洪峰最高、危害最大的洪水。^②

2018年8月叶尔羌河上游冰湖溃决事件

2018年7月以来新疆大部分地区持续高温,冰雪消融强烈,克勒青河上游的克亚吉尔冰川堰塞湖面积、容量不断扩大。7月24日,堰塞湖水体体积达到3000万 m^3 左右,预计溃决后下游库鲁克栏干水文站流量将达到2000 m^3/s 以上^③。8月5日以来,新疆大部分地区出现持续高温天气。南疆塔里木盆地大部37 $^{\circ}C$ 以上,部分区域达40 $^{\circ}C$ 以上。高山冰雪快速融化,挡住堰塞湖的“冰坝”自身因升温而融化。8月10日凌晨,克亚吉尔冰川堰塞湖溃决。溃决时冰川湖储水量已经达到6000万 m^3 。溃决时,有3500万 m^3 ^④洪水倾泻而下,喀什地区叶尔羌河库鲁克栏干站2018年8月10日19时流量达到1570 m^3/s ,超警戒流量370 m^3/s (警戒流量为1200 m^3/s)。

图2-10 Sentinel 2 卫星影像显示叶尔羌冰湖溃决前后变化



① 冯童,刘时银,许君利等. 2015. 1968-2009年叶尔羌河流域冰川变化——基于第一、二次中国冰川编目数据,冰川冻土, 37(1):1-13
② 牛竞飞,刘景时,王迪等. 2011. 2009年喀喇昆仑山叶尔羌河冰川阻塞湖及冰川跃动监测. 山地学报, 29(3), 276-282.
③ 自治区防办安排部署格爾吉亞冰川堰塞湖溃坝应对措施,新疆塔里木河流域喀什管理局,2018.7.25 <http://www.tahe.gov.cn/Item/30141.aspx>
④ 昆仑山突发融雪性洪水,央视网新闻,2018.8.12 <http://news.cctv.com/2018/08/12/ARTIq6liDdxNmQG1PhjBWTmQ180812.shtml>

冰崩和跃动冰川危害的增加

全球气候变暖趋势日益严峻是引发冰崩灾害的深层原因。气候变暖在冰川发育区的影响,主要体现在“增暖变湿”,“增暖”会引起冰川融化,在冰川表面形成更多的断裂;“变湿”则是会加剧冰川的物质积累,使得冰川运动速度加快。冰崩或雪崩发生后,崩塌的固态水在运动过程中摩擦受热而迅速转化为液态水冲蚀沟床和岸坡;或者直接崩入冰湖导致湖水溢坝或冰湖溃决,进而引发泥石流灾害,泥石流在运动途中或出山口后发生堆积,形成灾害链。

● 冰崩灾害增加

近年来高亚洲地区气温明显升高,冰川活动逐渐活跃。发生冰崩地区的高山坡度较大,气候变化引发冰体更易脆裂和断裂,冰崩的可能性和危险性随之增加。在全球气候变化的背景下,冰崩灾害极有可能成为人类面临的新常态。

案例 VI

雅鲁藏布江流域 加拉白垒峰冰崩及次生灾害

雅鲁藏布江大峡谷拐弯处的左岸，加拉白垒峰上分布有16条冰川。2017年11月18日，加拉白垒峰附近曾发生6.9级地震，震后冰川附近的陡坡上堆积了大量结构松散的冰碛物，形成了利于冰川泥石流发生的重要物质条件。

2018年秋季，当地降水比往年同期多50%以上，且为持续降水，气温也较高，导致16条冰川中的两条发生冰崩^①。冰崩引发冰川泥石流和山体滑坡，约540万m³的冰川泥石流加混冰碛物滑坡物质从冰川末端下冲出沟谷^②，形成堰塞坝，于10月17日凌晨将雅鲁藏布江主河道截断形成堰塞湖。19日上午9时，堰塞湖库容达到5.5亿m³，每小时水位上涨0.6m^③。19日13:30分，上游水位超过堰塞体自然过流，18:10下泄流量约1.9万m³/s^④。此次冰崩引发的冰川泥石流、冰川堰塞湖及堰塞湖泄洪系列灾害造成约6600人受灾，16000余人受影响，疏散撤离沿江居民共7100余人^⑤。



图2-11 2018年10月19日雅鲁藏布江堰塞湖现场图，图片来自新华社



图2-12 雅鲁藏布江上游冰川堰塞湖位置示意图

图源:google map 3D view

① 雅鲁藏布江山体滑坡原因何在?中国气象报,2018.10.26 http://www.cma.gov.cn/kppd/kppdsytj/201810/t20181026_481723.html
② 雅鲁藏布江堰塞湖蓄水量已达3亿立方米左右,中国之声,2018.10.18 <http://www.chinanews.com/gn/2018/10-18/8653169.shtml>
③ 西藏雅江堰塞湖蓄水量超5亿方,新华网,2018.10.19 http://www.xinhuanet.com/photo/2018-10/19/c_1123585885.htm
④ 雅鲁藏布江堰塞体出现过流上游监测站水位已下降8.7米,新华网,2018.10.19 <https://news.china.com/domesticgd/10000159/20181019/34209632.html>
⑤ 雅鲁藏布江堰塞湖抢险救援工作有序开展,新华网,2018.10.19 http://www.xinhuanet.com/local/2018-10/19/c_1123586015.htm

● 冰川跃动频繁

冰川跃动是一种特殊的冰川运动现象。冰川在数天或数年内以超出正常运动速度数十倍甚至数百倍以上的速度快速前进。冰川跃动常发生在冰川消融区,是一种稳定期与跃动期相互交替的周期性运动。跃动冰川在数月或数年内大幅度前进,容易引发溃决洪水、滑坡、泥石流等突发灾害事件,将当地的树木、建筑和道路冲毁,给当地人民的生命、财产安全带来难以预计的损害。

中国冰川跃动主要发生于喀喇昆仑山、喜马拉雅山和藏东南地区。喀喇昆仑山地区的冰川在90年代末期曾出现广泛的冰川扩张现象,表现为从冰川冰体由高海拔向低海拔部位滑动。冰川表面运动速度的提取结果显示^①,该地区冰川非常活跃,末端前进速度可达数百米每年。近年来喀喇昆仑山地区冰川末端的异常活动现象使得多处冰川末端形成冰川阻塞湖,容易溃决导致洪水,对下游居民的生命财产造成危害。

对中国喀喇昆仑山冰川分析结果显示^②,自1978年以来,喀喇昆仑山有27处冰川末端在短时间内发生过快速前进。分析各个时段冰川跃动的次数可知,1978-1991年有2处冰川末端发生跃动,1991-2001年有9处冰川末端发生跃动,而2001-2015有16处冰川末端发生跃动。2001-2015年冰川跃动的次数可达1978-1991年的8倍。1978-1991、1991-2001、2001-2005年前进冰川面积增量分别为1.2、1.81、9.21km²,前进冰川的面积增量持续增大。这说明近40年来研究区冰川跃动的频率和变化幅度逐渐增高。

^① 许艾文,杨太保,王聪强等,2016,1978-2015年喀喇昆仑山克勒青河流域冰川变化的遥感监测,地理科学进展,35(7): 878-888

^② ibid

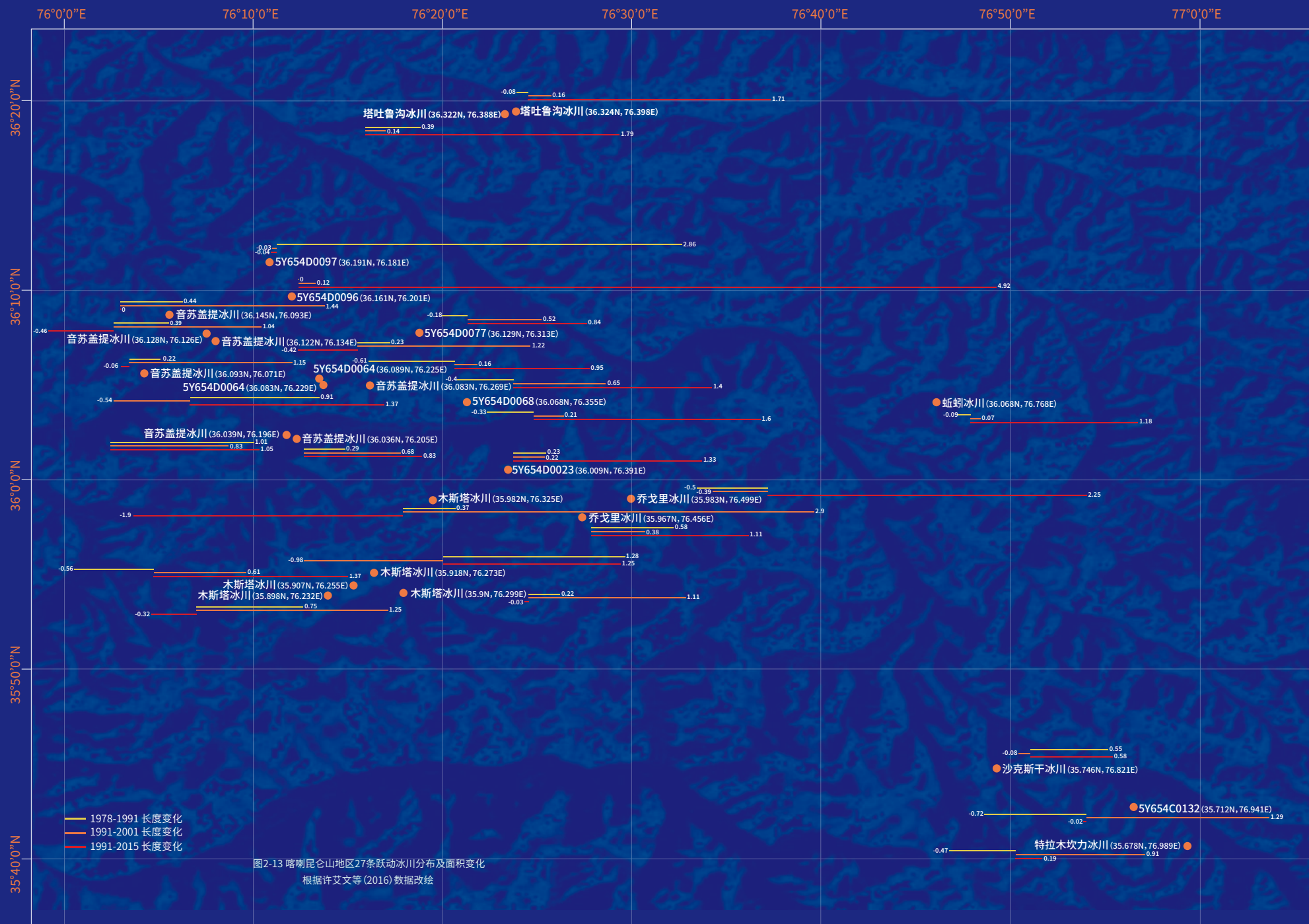


图2-13 喀喇昆仑山地区27条活跃冰川分布及面积变化
根据许艾文等 (2016) 数据改绘

结语

随着气候变化影响不断加剧,中国冰川
已经面临失稳危机!
随之而来的将是日趋严峻的水资源危机
和不断加剧的冰川灾害!



参考文献

- 陈德亮, 徐柏青, 姚檀栋等. 2015. 青藏高原环境变化科学评估: 过去、现在与未来. 科学通报, 60(32), 3025-3035.
- 陈虹举, 杨建平, 谭春萍. 2017. 中国冰川变化对气候变化的响应程度研究. 冰川冻土, 39(1), 16-23.
- 丁永建. 2017. 寒区水文导论. 北京: 科学出版社.
- 杜文涛, 秦翔, 刘宇硕等. 2008. 1958-2005年祁连山老虎沟12号冰川变化特征研究. 冰川冻土, 30(3), 373-379.
- 冯童, 刘时银, 许君利等. 2015. 1968-2009年叶尔羌河流域冰川变化——基于第一、二次中国冰川编目数据. 冰川冻土, 37(1), 1-13.
- 蓝永超, 沈永平, 吴素芬等. 2007. 近50年来新疆天山南北坡典型流域冰川与冰川水资源的变化. 干旱区资源与环境, 21(11), 1-8.
- 李红梅, 李林. 2015. 2°C全球变暖背景下青藏高原平均气候和极端气候事件变化. 气候变化研究进展, 11(3), 157-164.
- 李开明, 陈世峰, 康玲芬等. 2018. 中国大陆型冰川和海洋型冰川变化比较分析——以天山乌鲁木齐河源1号冰川和玉龙雪山白水河1号冰川为例. 干旱区研究, 35(1), 12-19.
- 刘时银等, 中国第二次冰川编目数据集(版本1.0). 寒区寒区科学数据中心, 2014
- 刘时银, 丁永建, 李晶等. 2006. 中国西部冰川对近期气候变暖的响应. 第四纪研究, 26(5), 762-771.
- 刘时银, 姚晓军, 郭万钦等. 2015. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状. 地理学报, 70(1), 3-16.
- 刘时银, 张勇, 刘巧等. 2017. 气候变化影响与风险: 气候变化对冰川影响与风险研究. 北京: 科学出版社.
- 明镜, 效存德, 杜振彩等. 2009. 中国西部雪冰中的黑碳及其辐射强迫. 气候变化研究进展, 5(6), 328-335.
- 牛竞飞, 刘景时, 王迪等. 2011. 2009年喀喇昆仑山叶尔羌河冰川阻塞湖及冰川跃动监测. 山地学报, 29(3), 276-282.
- 秦大河, 周波涛, 效存德. 2014. 冰冻圈变化及其对中国气候的影响. 气象学报, 72(5), 869-879.
- 沈永平, 苏宏超, 王国亚等. 2013. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(II) 灾害效应. 冰川冻土, 35(6), 1355-1370.
- 沈永平, 王国亚, 丁永建等. 2009. 1957-2006年天山萨雷扎兹-库马拉克河流域冰川物质平衡变化及其对河流水资源的影响. 冰川冻土, 31(5), 792-800.
- 沈永平, 王国亚, 魏文寿等. 2009. 冰雪灾害. 北京: 气象出版社.
- 施雅风. 2000. 中国冰川与环境——现在、过去与未来. 北京: 科学出版社.
- 孙从建, 陈伟. 2017. 天山山区典型内陆河流域径流组分特征分析. 干旱区地理, 40(1), 37-44.
- 王国亚, 沈永平, 苏宏超等. 2008. 1956-2006年阿克苏河径流变化及其对区域水资源安全的可能影响. 冰川冻土, 30(4), 562-568.
- 王宗太, 苏宏超. 2003. 世界和中国的冰川分布及其水资源意义. 冰川冻土, 25(5), 498-503.
- 吴佳, 周波涛, 徐影. 2015. 中国平均降水和极端降水对气候变暖的响应: CMIP5模式模拟评估和预估. 地球物理学报, 58(9), 3048-3060.
- 伍光和, 沈永平. 2007. 中国冰川旅游资源及其开发. 冰川冻土, 29(4), 664-667.
- 新疆统计年鉴委员会. 2017. 新疆统计年鉴-2017. 北京: 中国统计出版社.
- 姚红兵, 李忠勤, 王璞玉等. 2015. 近50a天山乌鲁木齐河源1号冰川变化分析. 干旱区研究, 32(3), 442-447.
- 姚檀栋, 秦大河, 沈永平等. 2013. 青藏高原冰冻圈变化及其对区域水循环和生态条件的影响. 自然杂志, 35(3), 179-186.
- 张国飞, 李忠勤, 王文彬等. 2012. 天山乌鲁木齐河源1号冰川1959-2009年物质平衡变化过程及特征研究. 冰川冻土, 34(6), 1301-1309.
- 张润杰. 2008. 乌鲁木齐河供水存在问题与对策. 节水灌溉, 10, 50, 53.
- 周玉科, 高琪, 范俊甫. 2017. 基于极端气温指数的青藏高原年际升温及不对称特征研究. 地理与地理信息科学, 33(6), 64-71.
- Huss, M., & Hock, R. 2018. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. Nature Climate Change, 8, 135-140.
- IPCC. 2018. Summary for Policymakers, Global Warming of 1.5°C. Incheon, South Korea.
- Ji, Z. 2016. Modeling black carbon and its potential radiative effects over the Tibetan Plateau. Advances in Climate Change Research, 7(3), 139-144.
- Li, C., Bosch, C., Kang, S., et al. 2015. Sources of black carbon to the Himalayan-Tibetan Plateau glaciers. Nature Communications, 7:12574.
- Li, Z., Shen, Y., Li, H., et al. 2008. Response of the melting Urumqi Glacier No.1 in eastern Tianshan to climate change. Advances in Climate Change Research, 4(Suppl.), 67-72.
- Nie, Y., Sheng, Y., Liu, Q., et al. 2017. A regional-scale assessment of Himalayan glacial lake changes using satellite observations from 1990 to 2015. Remote Sensing of Environment, 189, 1-13.
- Wei, Y., & Fang, Y. 2013. Spatio-temporal characteristics of global warming in the Tibetan Plateau during the last 50 years based on a generalised temperature zone - Elevation model. PLoS ONE, 8(4).

CLIMATE
WAKEUP
CALL!!!

冰冻圈告急