



环境百科

气候变化影响下的亚洲高山冰川

作者:

马丁·梅内戈 (MENEGOZ Martin), 法国国家科学研究中心 (CNRS) 研究员, 格勒诺布尔-阿尔卑斯大学 (UGA) 环境地球科学研究所 (IGE)

范妮·布吕内 (BRUN Fanny), 法国发展研究所 (IRD) 研究员, 格勒诺布尔-阿尔卑斯大学 (UGA) 环境地球科学研究所 (IGE)

帕特里克·瓦尼翁 (WAGNON Patrick), 法国发展研究所 (IRD) 研究主任, 格勒诺布尔-阿尔卑斯大学 (UGA) 环境地球科学研究所 (IGE)



封面图片: 马丁·梅内戈 (Martin Ménégoz) 在珠穆朗玛峰前的梅拉冰川海拔 6350 米处, 挖掘雪坑以测量积雪积累量。[图片来源: © Patrick Wagnon]

青藏高原平均海拔超过 4000 米, 不仅是世界海拔最高的高原, 也是面积最广阔的高原, 其总面积约为法国的五倍。这片辽阔的地方被全球最高峻的山脉环绕, 作为一道巨大的天然屏障, 对气候变化产生着深远影响。高原生态环境脆弱, 也对当前全球经历的气候变化尤为敏感。该地区气候正经历怎样的演变? 未来这

种演变会加速吗？这种演变将对本地区冰川产生何种即时及未来数十年的影响？
又会对下游居民生活造成什么后果？本文将尝试对这些问题作出解答。

目录

1. 亚洲高山区的地理特征	4
2. 亚洲高山区过去与未来的气候	5
2.1 中纬度大气环流与季风系统	5
2.2 气候趋势与变暖	7
2.3 未来气候预估	9
3. 亚洲冰川与气候	11
3.1 亚洲高山冰川的地理分布与形态特征	11
3.2 冰川演变的区域差异性	12
3.3 冰川物质平衡对气候响应的区域差异性	16
3.4 亚洲高山区冰川的未来前景	17
3.5 对人类社会的影响	18
3.5.1 对水资源的影响	18
3.5.2 冰川成因的自然风险	20
4. 核心要点总结	20
参考资料及说明	21

1. 亚洲高山区的地理特征

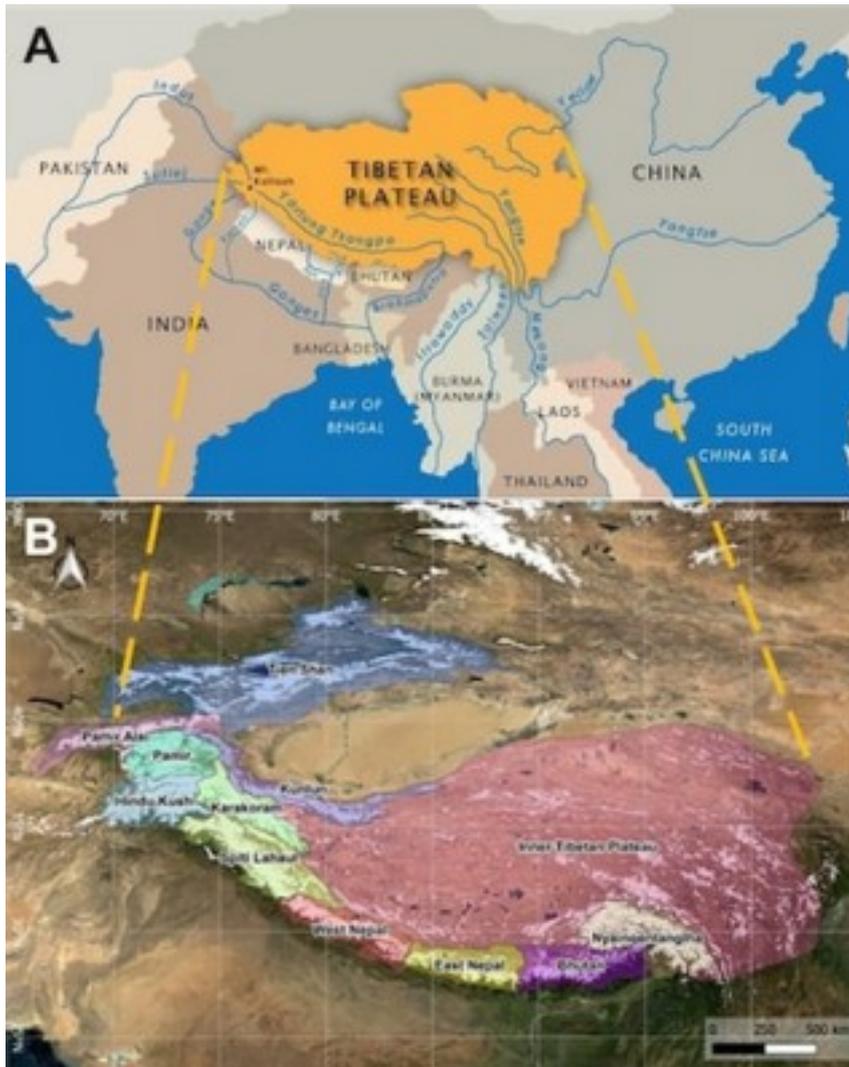


图 1. 青藏高原示意图 A. 青藏高原在亚洲地图中的位置。[来源：基于知识共享许可协议（CC BY 4.0）的地图改编] B. 基于合成影像（MODIS，<https://modis.gsfc.nasa.gov/>）显示的青藏高原周边山脉分布，白色区域为积雪覆盖范围。[来源：© Jean Baptiste Barré]

亚洲高山区（HMA）北起天山山脉，西至兴都库什山脉，南抵喜马拉雅山脉，东接横断山区，范围覆盖喀喇昆仑山脉、帕米尔-阿莱山脉及昆仑山脉等主要山系。这片高海拔山区环绕着世界海拔最高、面积最广的青藏高原。青藏高原平均海拔约 4000 米，面积约 250 万平方公里，相当于法国国土面积的近五倍（图 1）。青藏高原与亚洲高山区构成的整体常被称作亚洲的“水塔”或“第三极”[1]。

- 亚洲高山区拥有极地以外规模最大的冰雪覆盖区，其境内山脉（部分海拔超过 8000 米）通过地形抬升作用形成丰沛降水。

- 该区域分布着 95,536 条冰川，总面积约为 $97,605 \pm 7,935$ 平方公里（图 2）[2]。

冰川与积雪的消融为雅鲁藏布江、恒河、印度河、长江、黄河、萨尔温江及湄公河等亚洲主要河流提供了径流补给，维系着下游超过 14 亿人口的水资源供给[3]。与此同时，下游人口持续快速增长，工农业活动也呈现显著扩张趋势。



图 2. 在海拔 6350 米的梅拉峰附近（距峰顶不远处）架设自动气象站，背景为云层中显现的珠穆朗玛峰。[图片来源：© Patrick Wagnon]

当前的**气候变化**以及强烈的**区域性人为压力**（尤其导致严重的空气与水体污染），构成了重大的社会-环境挑战。这些挑战促使科学家对亚洲高山地区的气候、积雪冰川及完整水文循环开展系统研究（图 3）。除了在这些偏远山区获取常具挑战性的观测数据外，模型模拟已成为研究中被广泛使用的研究手段。本文旨在阐述当前用于理解亚洲高山区气候与冰冻圈演变过程的科学方法体系。

2. 亚洲高山区过去与未来的气候

2.1 中纬度大气环流与季风系统

亚洲高原地处中纬度大气环流、亚洲季风与青藏大陆性气候的交汇地带（图 3），这解释了亚洲高原为何难以实现可靠的天气预报，也说明了准确量化当前气候变化对区域及局地影响的困难所在。

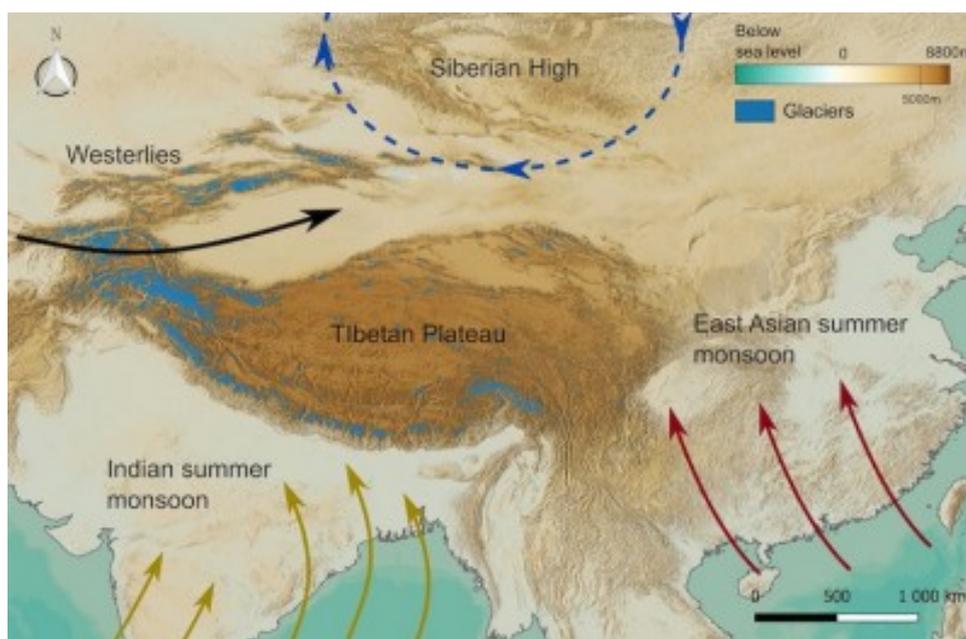


图 3. 亚洲高山区地形与冰川分布（蓝色区域表示冰川覆盖）。图中标注了主要大气环流特征，特别是西风带以及两个主要季风系统，分别是主要活跃于夏季的南亚季风（印度季风）和东亚季风。[来源：© Jean Baptiste Barré]

在中纬度地区，大气变化在年代际、年际及日尺度上均尤为显著，冬季表现最为突出。

- 这种混沌特性使得制作超过数日的高质量天气预报极为困难。
- 由于变率极高，这些区域的季节性大气预测同样面临挑战，而热带地区在此类时间尺度上的变率特征相对不明显。
- 为凸显中纬度地区的气候趋势，必须基于长期数据才能在高自然变率背景中提取显著信号。

西风环流将来自大西洋、地中海和里海的水汽向东输送，在亚洲西北部的高山地区（尤其是喀喇昆仑山脉和兴都库什山脉）形成大量降水，这些区域具有典型的中纬度气候特征。在东南部，即喜马拉雅山脉的中段和东段，全年约四分之三的降水由夏季亚洲季风带来[4]。亚洲季风主要分为两个系统：南亚季风（印度季风）和东亚季风（图 3）。这些季风在夏季影响印度次大陆及东南亚地区，影响范围在每年 6 月至 9 月的漫长时段内由南向北逐步推移。

受其特殊地形影响，亚洲高山区在全球和区域尺度的大气环流中起着关键作用。它影响着整个北半球尺度的大气波动，既改变高空急流的位置（高空急流位

于对流层[5]与平流层[6]交界处的高速气流带），也影响自西向东传播的低压槽路径（见图3）。

亚洲季风主要由海陆间的温度差异触发。亚洲高山区亦通过两种机制在季风触发过程中发挥作用，促进暖湿空气从海洋区域向季风影响区输送：

- **热力效应：**夏季太阳辐射增强，青藏高原吸收过剩能量导致温度上升，使高层大气受热，形成类似“气泵”的机制，抽吸来自更南侧热带区域的空气（见图3中季风气流的示意）；
- **动力效应：**亚洲高山区及青藏高原的地形迫使西风气流发生偏转，这可能通过罗斯贝波[7]的生成促进气旋与反气旋的形成。这些环流系统进而可能触发对南方暖湿空气的抽吸作用。山脉导致的大气流场垂直偏转同样有利于对流过程发展，从而增强季风机制，并加剧喜马拉雅山脉南翼的降水形成；而青藏高原原因受喜马拉雅地形屏障阻挡湿空气输送，全年保持干燥状态。

2.2 气候趋势与变暖

与全球大气变化趋势一致，自前工业化时期（约1850年）以来，亚洲高山区大气已观测到变暖趋势，近几十年来这一趋势持续加剧。这一变暖现象在空间分布和季节特征上均呈现差异性。然而，由于亚高山区**观测数据有限**，准确量化变暖程度仍存在困难，这个问题同样影响着降水和冰川积雪监测研究。通过应用**大气环流模式**（GCMs），我们得以估算过去无观测数据时期的气候变化，并开展未来气候预估。大气环流模式还能模拟气候演变过程及其对人类活动排放的温室气体与气溶胶颗粒的响应。

据估算，亚洲高山区观测到的变暖现象是多种强迫因子共同作用的结果[8]：

(i) 温室气体强迫——增温效应在全球尺度上相对均匀；**(ii) 气溶胶强迫**——与颗粒物污染相关，主要作用于区域尺度气候。气溶胶可分为不同类型：

- **吸收性气溶胶**（如黑碳）：通过加热大气以及在雪冰表面沉降降低反照率，加速消融过程；
- **太阳辐射散射性颗粒**（如硫酸盐）：通过阻挡太阳辐射产生冷却效应。

尽管这些强迫因子的作用方向不尽相同，但效应总和仍导致增温趋势，**区域气候差异部分与气溶胶分布特征存在关联**。

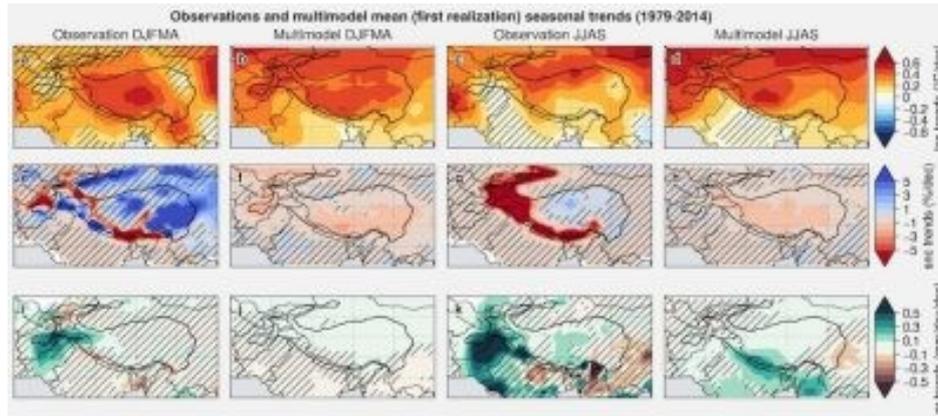


图 4. 1979-2014 年间亚洲高山区冬季 (DJFMA; a, e, i) 与季风期 (JJAS; c, g, k) 的观测温度 (a-d, CRU 数据[10])、积雪覆盖率 (e-h, NOAA CDR[11]) 及降水量 (i-l, APHRODITE[12]) 变化趋势, 并与 CMIP6 多模式集合平均结果 (DJFMA; b, f, j 及 JJAS; d, h, l) 对比。阴影区域表示趋势不显著的区域 (p 值 > 0.05)。 [图片来源: © Lalande et al [9], 本文采用知识共享许可协议 (CC BY-NC 4.0) 发布]

图 4 展示了亚洲高山区及青藏高原的温度变化情况[9]、[10]、[11]、[12]。该结果基于观测数据产品与大气环流模式估算得出, 分别针对 (i) 冬季时段 (12 月-1 月-2 月-3 月-4 月: DJFMA) 与 (ii) 季风期 (6 月-7 月-8 月-9 月: JJAS) 进行分析。

- 在 1979-2014 年间, 观测到温和的增温趋势: 印度次大陆平原地区的升温速率约为每十年 0.1°C , 而北部及高海拔地区增温更为显著, 部分区域每十年升温幅度超过 0.5°C (图 4)。
- 积雪覆盖范围在冬季呈现空间差异趋势, 夏季则普遍减少 (图 4 e-g); 多模式平均结果 (图 4 f-h) 显示的趋势弱于观测值。
- 该区域西部降水量总体增加, 东部趋于干旱, 这一特征在夏季比冬季更为明显 (图 4 i-k), 而模型模拟的变幅较为和缓 (图 4 j-l)。

多模式集合平均结果显示的降水与积雪范围趋势弱于观测值, **这并不能说明模型存在缺陷**。这一差异也可能反映了地区强烈的年际至年代际变率, 这种与气候系统混沌特性相关的自然变率, 可能在数十年时间尺度上产生与人为趋势量级相当甚至更大的变化趋势。通过对多个模型输出结果进行平均, 可以平滑这种混沌变率, 从而凸显气候对温室气体和气溶胶的强迫响应。

尽管温度上升具有普遍性和显著性，降水与积雪的变化则呈现更复杂的空间差异性，这源于多种过程的相互作用。例如，积雪消融可能被冬季降水增加所带来的地表积雪积累所抵消。此外，温度上升通常导致水文循环增强，进而引发更多降水，但这一过程可能受大气环流变化的调节，而后者本身又关联着气候对人为强迫或自然变率的响应。

亚洲高山区气候变化还表现为极端事件（如极端降雨强度或热浪）更加频繁剧烈。同时，该变化正导致多年冻土消融与冰川退缩（详见第 3 节）。

2.3 未来气候预估

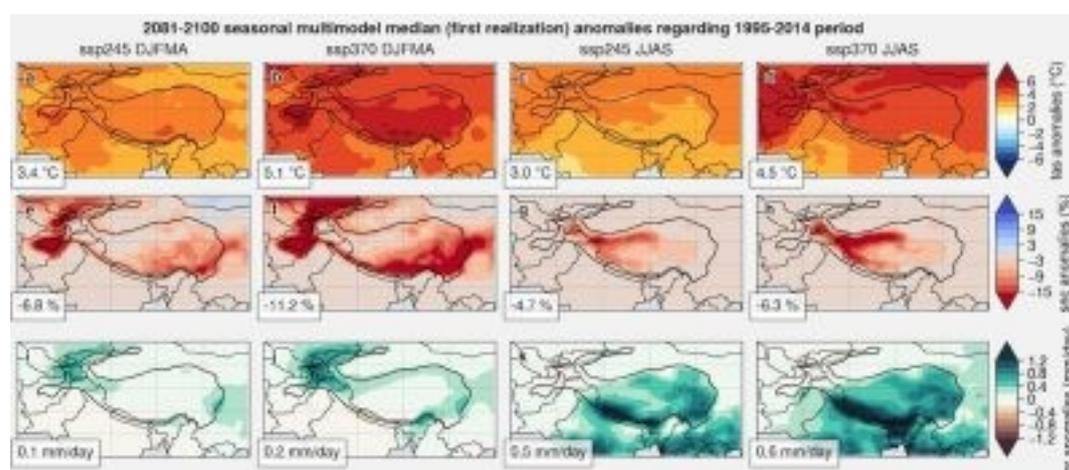


图 5. 在 SSP2-4.5 与 SSP3-7.0 情景下，2081-2100 年与 1995-2014 年两个时期气温（a-d）、积雪覆盖（e-h）及降水量（i-l）的模拟中位数差异。黑色轮廓线标示亚洲高山区（海拔>2500 米），其平均趋势展现在左下角方框内。研究共采用 10 个模型。[图片来源：© Lalande et al, [9]，本文采用知识共享许可协议（CC BY-NC 4.0）发布]

目前，我们已有一套涵盖历史时期（1850-2014 年）的气候模拟数据，以及基于排放情景推演至 2100 年的未来气候预估。这些情景称为**共享社会经济路径（SSPs）**，其设定依据包括：（i）国家间合作或竞争的程度，以及（ii）根据本世纪末对流层顶辐射强迫值（估算范围为 1.6 至 8.5 W/m²）确定的辐射扰动水平。

在这些情景中，图 6 展示了 SSP2-4.5（减排情景）和 SSP3-7.0（高排放情景）下，2081-2100 年与 1995-2014 年间气温、降水和积雪覆盖的模型模拟中位数差异[13]。

模型结果表明，过去与未来变化趋势存在一定相似性（图 4 与图 5），但预估结果中的局地变化更为显著，局部区域可能达到：(i) 气温上升超过 6°C，(ii) 积雪面积减少 15%，(iii) 日降水量增加 1.2 毫米。

在整个亚洲高山区尺度上，模拟结果显示 2081-2100 年相对于 1995-2014 年的气温升幅中位数预计为：

- 在 SSP1-2.6 情景下升温+1.9 [+1.2 至+2.7] °C；
- 在 SSP5-8.5 情景下升温+6.5 [+4.9 至+9.0] °C。

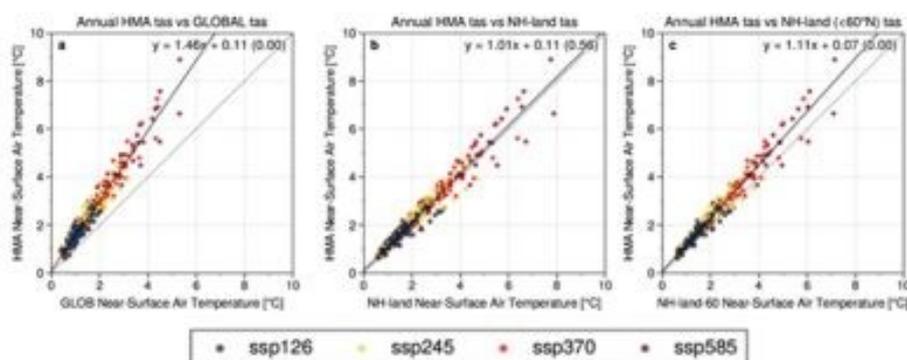


图 6. 亚洲高山区平均气温与全球平均气温 (a)、北半球陆表平均气温 (b) 以及 60°N 以南陆表平均气温 (c) 的函数关系。数据点颜色对应不同排放情景。[图片来源：© Lalande et al[9]，本文采用知识共享许可协议 (CC BY-NC 4.0) 发布]

这种普遍增温趋势与以下变化相关联：

- 积雪范围相对减少幅度在-9.4 [-16.4 至-5.0]%到-32.2 [-49.1 至-25.0]%之间；
- 到本世纪末，降水量相对增幅在+8.5 [+4.8 至+18.2]%到+24.9 [+14.4 至+48.1]%之间（对应不同情景）。

模拟结果显示，亚洲高山区的增温速率比全球平均增温速率高出 46%（图 6a）。这种放大效应主要源于陆表与海洋的增温差异，其中海洋因较高的热惯性导致升温速度较慢。

然而，亚洲高山区的升温幅度仍比北半球除北极外的其他陆表区域高出 11%（图 6c）。这种区域放大效应部分与冰冻圈退缩有关，随着冰雪消融，反照率较低的深色地表暴露，吸收更多太阳辐射能量[14]。模型还表明，全球平均增温与亚洲高山区模拟增温之间存在准线性关系（图 6）。

这一结果通过观测与模型验证具有稳健性，表明亚洲高山区未来百年气候演变极大程度取决于全球平均温度变化，也取决于全球范围内限制温室气体排放的政策决策。

3. 亚洲冰川与气候

3.1 亚洲高山冰川的地理分布与形态特征

冰川的分布及其形态特征深受**地形与主导气候模式**的共同制约。地形决定了冰川形成的海拔上限，而气候则严格控制着冰川可能延伸的海拔下限。这本质上反映了两类过程的竞争关系：

- **积累过程**（以降雪形式为主的固态降水）；
- **消融过程**（以融化为主，对于湖端冰川还包括升华或崩解作用）

这两类过程的平衡状态最终由气候条件调控。

要理解亚洲高山区冰川的地理分布，我们可以借助一个关键变量——**物质平衡线高度**（英文缩写 ELA）。它代表冰川积累量与消融量达到精确补偿的海拔高度。该高度每年都会变化：若消融过程占主导，平衡线海拔上升；反之则下降。实证研究表明，与冰川稳定状态相对应的平衡线高度大致等于该冰川的中位海拔 [15]。

对亚洲高山区冰川物质平衡线高度的测绘显示，冰川分布海拔因地理位置差异而显著不同（图 7） [16]：

- 位于西部和西北部（天山、帕米尔、兴都库什、喀喇昆仑山脉）的冰川具有较低的物质平衡线高度，介于海拔 4000 至 5000 米之间[17]。
- 位于更南部（喜马拉雅中段、念青唐古拉山）或青藏高原内部及昆仑山脉的冰川，其物质平衡线高度超过海拔 5000 米，甚至可达 6000 米。

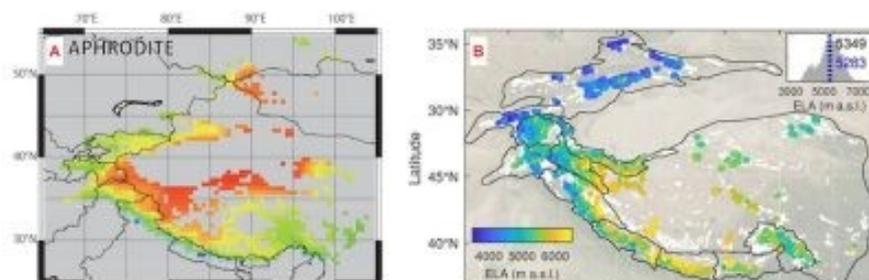


图 7. A 年降水量分布图（单位：毫米/年），数据来源于 APHRODITE（亚洲降水—高分辨率观测数据集成评估计划：基于地面观测网络生成的格点化降水产品）[图片来源：采用知识共享署名 3.0 许可协议发布]；**B 亚洲高山区冰川物质平衡线高度分布图** [17]。[图片来源：本文采用知识共享许可协议（CC BY-NC 4.0）发布]

物质平衡线高度的空间分布与年降水量格局高度吻合（图 7）。这在一定程度上是因为降水在积累过程中起着重要作用，在降水丰沛的区域，冰川能获得大量积雪补充，冰舌可延伸至较低海拔；反之，在干燥的大陆性气候区，冰川发育局限于高海拔地带。

除气候因素外，其他形态特征也会影响冰川分布。例如**坡度**：陡峭地形可能引发雪崩，从而改变积雪积累模式；又如表碛覆盖。

近年来，表碛覆盖特征受到广泛研究。亚洲高山区许多冰川表面都覆盖着粒径从亚毫米到数米不等的岩屑碎屑。通过卫星观测数据，现已绘制出全区冰川表碛覆盖分布图。赫里德（Herreid）与佩利乔蒂（Pellicciotti）[18]估算表明，表碛覆盖的冰川占比分别为 14%（西部山区）和 19%（东部山区）。

表碛覆盖越厚，冰川冰舌往往延伸至更低海拔，这很可能是因为岩屑的隔热效应抑制了消融过程[19]。因此，岩屑覆盖会在局地 and 区域尺度上调节冰川分布规律。坡度、坡向等其他形态因素同样会产生此类调节作用。

3.2 冰川演变的区域差异性



图 8. 在海拔 5800 米的梅拉冰川上布设积累量观测桩，并洒布蓝色矿物粉末以标记参照层位，将于次年通过手动钻取冰芯识别已标记的参照层位。[来源：© Patrick Wagnon]

为分析亚洲高山区各区域冰川近期变化，需要重点关注**物质平衡**，此项关键指标与气候直接相关（图 8）。阿扎姆（Azam）等人[20]系统收集、校核并整合了喜马拉雅和喀喇昆仑地区所有已有的现场及卫星观测数据。目前仅有 24 条冰川开展过现场物质平衡观测，这些观测通常不连续、质量参差不齐，且历时较短。最早观测始于 1974 年。在亚洲高山区西北部（帕米尔和天山），苏联时期曾对许多冰川开展过系统监测。目前已有项目计划重启这些观测，但 1990 年代至 2000 年代初的数据空白仍需通过间接观测手段填补[21]。

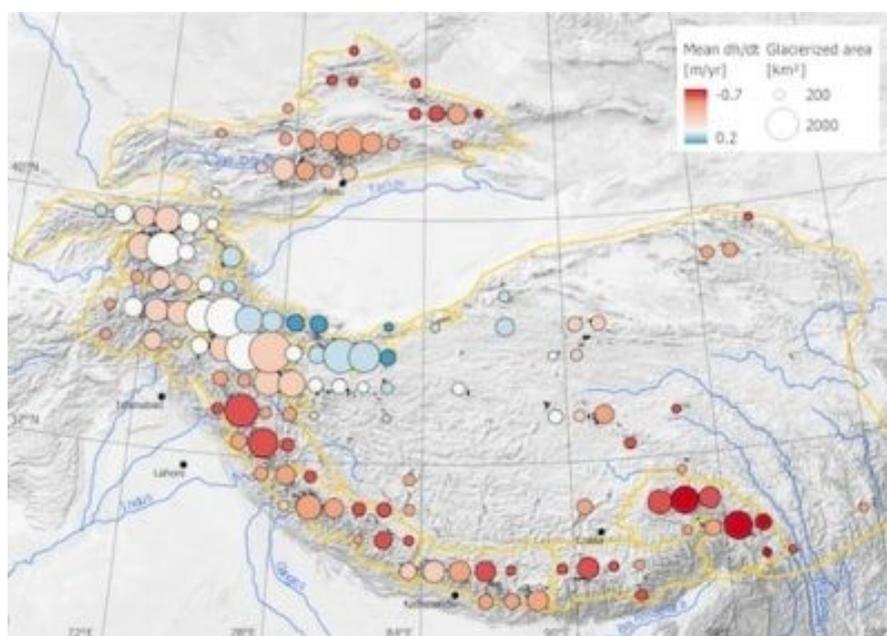


图 9. 亚洲高山区冰川厚度变化分布图。圆圈大小代表每个 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 格点内的冰川面积，颜色表示 2000-2016 年期间冰川厚度变化速率。[图片来源：改编自 Brun 等人[23]的图表]

值得庆幸的是，随着太空时代的到来，通过**大地测量法**使得对亚洲高山区冰川物质变化的量化成为可能：自 2000 年代以来已实现全面量化[22]，而 1960 年代以来的数据虽不完整但仍具参考价值[23]（图 9）：

- 最新研究[24]表明，2000 年至 2019 年间亚洲高山区冰川物质损失速率为 -0.22 ± 0.05 米水当量/年，约为同期极地以外全球冰川平均损失速率的一半。

- 南亚区域存在显著空间差异：西部区域物质平衡(-0.14 ± 0.05 米水当量/年)的负值程度小于东部区域 (-0.47 ± 0.05 米水当量/年)
- 亚洲高山区其他区域的物质平衡值为 -0.20 ± 0.05 米水当量/年，但该数值掩盖了区域内强烈的空间异质性。
- 此外，这些区域的物质损失在近二十年间呈现加剧趋势，2015-2019 年期间的损失量约为 2000-2004 年间的两倍。
- 通过系统处理卫星影像，已实现 2000-2018 年间整个亚洲高山区极高空间分辨率的物质平衡量化[25]，并获得了 12 个子区域的精确数据（图 10）。
- 喜马拉雅山脉全境冰川物质损失显著，中东南部损失最大（2000-2018 年间达 -0.55 ± 0.13 米水当量/年）。
- 与此相反，喀喇昆仑山脉冰川基本保持稳定（2000-2018 年间为 -0.04 ± 0.04 米水当量/年）。这种全球罕见的冰川稳定性现象被称为“喀喇昆仑异常”[26]，已持续观测 15 年。实际上异常核心区位于喀喇昆仑东北部毗邻的西昆仑地区，该处冰川甚至呈现轻微物质积累（2000-2018 年间为 $+0.04 \pm 0.04$ 米水当量/年）。



图 10. 在印度北部的乔塔·希格里冰川使用手持冰芯钻进行积累量测量。[图片来源：© Patrick Wagnon]

借助 1960 年代解密的间谍卫星影像，同类研究得以开展，但其精度较低且仅覆盖有限区域。自 2000 年以来观测到的区域差异性其实早在 1960 年代就已存在，只是近二十年冰川物质损失速度较前几十年有所加剧[10]。

目前我们尚未完全掌握喀喇昆仑冰川这种特殊行为的所有解释要素，但某些可能的解释开始浮现：

- 一方面，这些冰川具有与该地区极端地形相关的特殊形态，普遍存在显著的表碛覆盖和强烈的雪崩活动，这些因素有利于抑制消融。
- 另一方面，年际冬夏季降水量增加，同时夏季平均气温及最低气温呈下降趋势。

为解释这些气候趋势，学界提出不同假说：从携带降水的西风环流路径变化[27]（核心影响区较几十年前更集中于喀喇昆仑），到区域尺度水文循环增强（可能源于喀喇昆仑东北部塔里木盆地灌溉农业的发展）[28]。喀喇昆仑异常现象至少自 1970 年代持续至今[10]，但当前迹象显示喀喇昆仑异常可能正逐渐消退[11]。



图 11. 安装在梅拉冰川上的气象站，前方为昌兰峰（7310 米）和马卡鲁峰（8463 米，左侧）。[来源：© Patrick Wagnon]

尽管卫星影像为 2000 年以来亚洲乃至全球高山区的冰川体积变化量化带来了革命性进展，但时空分辨率仍不足以捕捉物质平衡的**年际或季节尺度波动**。到

目前为止，只有**实地冰川监测**能实现这类精细观测。野外监测的冰川需精心选择以代表不同气候带，并常配合连续气象观测，以解析控制冰雪积累与消融的物理过程，评估其对气候因子的敏感性。

例如位于印度喜马偕尔邦的乔塔·希格里冰川（图 10），以及距珠穆朗玛峰不远的梅拉冰川（图 11），二者分别于 2002 年和 2007 年启动的物质平衡观测序列，是目前喜马拉雅地区及尼泊尔境内历时最长的连续监测。中亚及天山地区（如哈萨克斯坦和中国）也有冰川监测项目，其中图尤克苏冰川和乌鲁木齐河源 1 号冰川分别自 1957 年和 1959 年持续观测至今。中国科研团队还在西藏开展多项冰川物质平衡与表面能量平衡的长期高质量监测，如扎当冰川、帕隆冰川、24K 冰川等。值得注意的是，喀喇昆仑地区至今尚未建立系统的冰川监测体系。此类监测需要长期的人力与资金投入，尤其在偏远高海拔区域，冰川难以抵达或坡度过陡，更增加了观测难度。

3.3 冰川物质平衡对气候响应的区域差异性

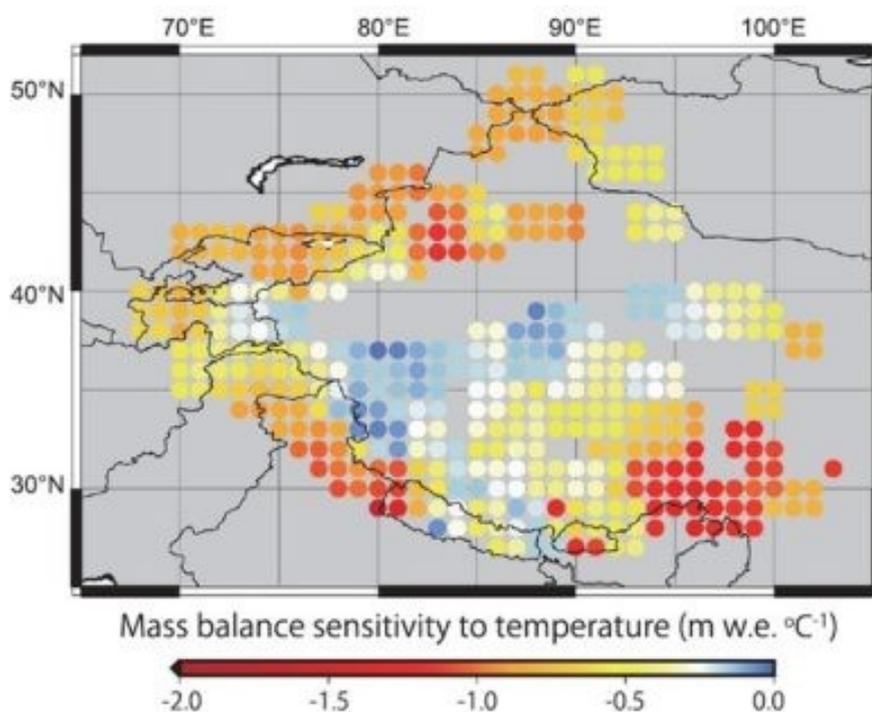


图 12. 亚洲高山区冰川物质平衡敏感性分布图 [图片来源: © Sakai 等人, 参考文献[30], 本文采用知识共享许可协议 (CC BY-NC 4.0) 发布]

许多研究试图解释亚洲高山区冰川当前物质平衡的异质性。不同区域冰川物质平衡差异显著，既与各地气候变化趋势不一致有关，也源于相同气候扰动下冰

川因其所在气候带不同而产生差异性响应。坂井（Sakai）与藤田（Fujita）[29]采用了一种创新方法：他们计算了在均一温度变化情景下冰川的响应强度，量化了冰川物质平衡对温度升高的敏感性。在亚洲高山区尺度上可见，对温度升高最敏感的冰川也正是物质损失最严重的冰川（图 12）。这表明冰川对气候变化的敏感性是需要重点考量的因素，因为它部分解释了亚洲高山区冰川物质平衡的区域性差异。

该研究显示，大陆性最强的冰川（如青藏高原内部，尤其是昆仑山脉的冰川）对温度升高的敏感性最低。但该方法也存在局限，无法解释降水增加导致的冰川物质积累现象。海洋性特征最显著的冰川（如念青唐古拉山脉的冰川）对温度升高最为敏感，该区域冰川物质损失也最为剧烈。

3.4 亚洲高山区冰川的未来前景

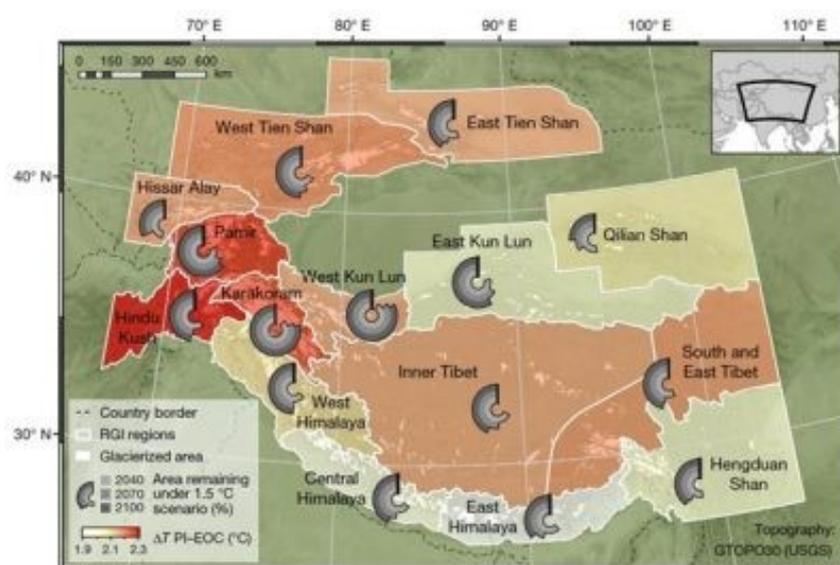


图 13. 升温 1.5°C 情景下的区域温度与冰川面积预估。地图显示在全球升温 1.5°C 情景下，参照冰川目录（RGI）划分的各亚区域，冰川区平均温度自前工业化时期（1851-1880 年）至本世纪末（2071-2100 年）的升高幅度。圆环图描绘了升温情景下三个时间节点各区域冰川面积的预估缩减比例。[图片来源：© Kraaijenbrink 等人，参考文献[30]]

在当前气候变化背景下，亚洲高山区冰川的未来前景这一问题极具现实意义。尤其在亚洲高山区，约 8 亿人口的部分饮用水、灌溉及水力发电依赖冰川融水。克拉因詹布林克（Kraaijenbrink）等人[30]开展了迄今最全面的研究，在预估亚

洲高山区冰川未来损失时，综合考虑了高海拔地区增温放大效应、表碛覆盖以及冰川表面湖泊发育等局地过程。

到 2100 年，依据不同气候情景，当前冰储量将损失三分之一至三分之二，且区域间差异显著。图 13 展示了全球升温控制在 1.5°C（遵循 2015 年《巴黎协定》目标）情景下亚洲高山区冰川的演变趋势。由于亚洲高山区属于高海拔大陆性地表，增温幅度被放大至 1.9-2.3°C（各亚区域不同），因此对冰川的影响呈现分化：

- 喜马拉雅山脉中段与东段：预计至 2100 年将损失三分之二的冰川面积。
- 喜马拉雅山脉西段：损失幅度约为一半。
- 喀喇昆仑山脉（拥有最大最厚冰川）如预期受影响最轻，但在全球升温不超过 1.5°C 情景下，仍可能损失约四分之一的冰川面积。

然而，根据当前温室气体排放轨迹，全球升温很可能远超 1.5°C 阈值，届时亚洲乃至全球尺度冰川的消融规模将更为严峻。

3.5 对人类社会的影响

3.5.1 对水资源的影响

伊默泽尔（Immerzeel）等人^[31]建立了一项名为水塔指数（WTI）的指标，该指数综合衡量了山区在水资源供给方面的重要性，以及下游人口与生态系统的依赖程度（或脆弱性）。在全球所有山脉中，位于亚洲高山区西北部的大河流域（印度河、阿姆河、塔里木河）被视为**最脆弱**的区域。这些河流的水源主要依赖冰川补给（夏季尤为显著），并滋养着人口密集、社会经济增长迅速的地区。

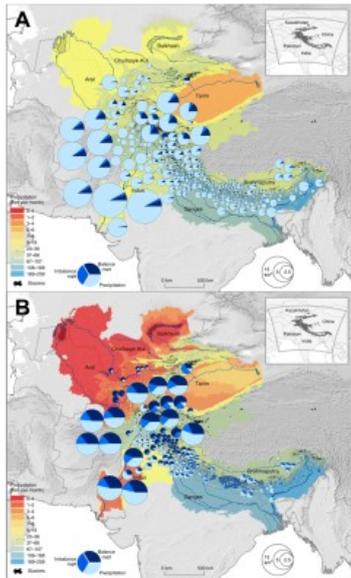


图 14. **A** 地图颜色表示平均年降水量。每个饼图对应一个水坝的汇水流域。饼图面积正比于流入该水坝的水量（单位：立方公里/月），蓝色渐变部分代表各水源的相对贡献：降雨（浅蓝）、冰川物质平衡变化（中蓝）及冰川上年积雪消融（深蓝）。**B** 下图图例与上图相同，但展示的是典型干旱条件下夏季月份的水源组成。[图片来源：© 改绘自 Pritchard，参考文献[3]]

因此，水资源压力十分严峻，尤其这些流域常跨越多个国家，地缘政治环境有时并不稳定。以印度河流域为例，尽管水源供给主要来自喀喇昆仑山脉的大面积冰川区，但用水需求仍在指数级增长，增长的原因是灌溉农业对维持高产至关重要且规模快速扩张，也由于水电需求持续上升（例如巴基斯坦正在建设巨型水坝）。随着亚洲高山区（除喀喇昆仑异常区外）普遍出现冰川退缩，冰川对大河径流的贡献比例正逐步增加。根据未来气候变化情景，**这一贡献将在 2030 至 2050 年左右达到峰值，随后因冰川储量显著减少而下降**。按区域和情景预测这一被称为“**峰值径流**”的关键节点，是制定适应性策略的核心挑战[32]。

普里查德（Pritchard）[3]特别关注了干旱时期亚洲高山区冰川的作用，干旱被认为是亚洲高山区上世纪最具破坏性的自然灾害：

- 冰川以固态形式长期储水（通常数十年以上），在夏季支撑河流基流。这一点在**夏季干旱的亚洲高山区尤为关键**；而对于受亚洲季风影响的区域（6-9 月冰川消融期季风带来大量降雨），冰川的调蓄作用相对减弱。

- 在正常年份，冰川融水对大河径流的贡献有限：季风区通常不足 1%，干旱区可达百分之几。但干旱期间该比例急剧上升，因为一方面降水低于平均值，另一方面高温往往加剧消融。

图 14 显示，在喜马拉雅西北部最干旱的区域，**冰川融水总贡献（包括冰川负物质平衡导致的冰体损失与冰川上年积雪消融）可超过 50%**。在冰川缩减、用水需求增加、干旱频发的背景下，水资源压力可能急剧升高，尤其在 9 月和 10 月，可用融水量或将大幅减少。

3.5.2 冰川成因的自然风险

冰湖溃决洪水通常指形成于冰川前缘、受新近冰碛物拦蓄的冰前湖突发性泄流，此类灾害现象往往突发且致死率高。自 1936 年以来，已记录 46 起灾难性溃决事件；1988 年后通过卫星观测又发现 15 起事件，已补充至灾害目录[33]。这些灾难性溃决多发生在**亚洲高山区东部**，东经 85°以西区域仅记录 5 起。

这种分布特征部分缘于西部冰川（尤其是喀喇昆仑地区）近年来退缩幅度较小，而东部冰川退缩显著。值得注意的是，尽管同期冰前湖面积大幅扩张，但过去三十年间灾难性冰湖溃决的频率并未增加。这表明冰前湖的形成扩张与潜在溃决风险之间并非简单的即时关联。然而，由于灾难性溃决属于小概率事件，现有研究仍缺乏长时间序列数据，需通过长期观测才能完善认知。随着亚洲高山区冰川持续消融，冰前湖将不断新生并扩张，溃决风险因而升高，尤其在当前尚未观测到此类事件的区域（如喀喇昆仑）[34]。

4. 核心要点总结

- 亚洲高山区西侧受**中纬度低压**系统影响，南侧受**季风环流**控制。这些高山环绕着气候极为干燥的青藏高原。
- 近几十年来亚洲高山区观测到的增温呈现**空间差异性**：西部和南部约为 0.1°C/十年，而青藏高原部分地区超过 0.5°C/十年。
- 亚洲高山区的**增温速率**比同纬度陆表平均快约 11%。根据温室气体排放情景，预计到 21 世纪末该区域相对于 1995-2014 年的平均升温幅度在+1.9°C 至 +6.5°C 之间。预估此升温水平将导致积雪面积相对减少 9.4%至 32.2%，降水量相对增加 8.5%至 24.9%

- 亚洲高山区拥有除冰盖外**全球最大的冰雪覆盖区**，目前总面积约 10 万平方公里。
- 借助**卫星观测**，我们已精确掌握 2000 年以来亚洲高山区冰川物质平衡的变化。2000-2019 年间，这些冰川的平均物质平衡为 -0.22 ± 0.05 米水当量/年，损失速率约为全球冰川平均值的二分之一
- 这一平均值背后存在强烈的区域差异：山脉东南部物质损失剧烈（2000-2018 年为 -0.55 ± 0.13 米水当量/年），而西北部略有积累（ $+0.04 \pm 0.04$ 米水当量/年）。这种**差异源于气候变量**（主要是温度与降水）的变化及冰川对其响应的空间异质性。
- 若全球升温在 2100 年前控制在 $+1.5^{\circ}\text{C}$ ，根据不同排放情景，**本世纪末将有三分之一至三分之二的冰川消失**。区域差异显著，山脉东南部的冰川最为脆弱。
- 水资源影响将尤为重大，主要出现在不受亚洲季风影响的区域（山脉西北部），干旱期间尤为严峻。
- 随着退缩冰川的冰碛物拦蓄形成更多冰前湖（尤其在山脉东南部），**突发性冰湖溃决洪水的风险持续上升**。

参考资料及说明

封面图片：马丁·梅内戈（Martin Ménégoz）在珠穆朗玛峰前的梅拉冰川海拔 6350 米处，挖掘雪坑以测量积雪积累量。[图片来源：© Patrick Wagnon]

[1] Immerzeel, et al (2010): “Climate Change Will Affect the Asian Water Towers”. Science. <https://doi.org/10.1126/science.1183188>.

[2] Shean, et al. (2020): “A Systematic, Regional Assessment of High Mountain Asia Glacier Mass Balance”. Frontiers in Earth Science. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00363>.

[3] Pritchard, (2019): ‘Asia’s shrinking glaciers protect large populations from drought stress’. Nature. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1240-1>.

[4] Bookhagen, and Burbank (2010): ‘Toward a Complete Himalayan Hydrological Budget: Spatiotemporal Distribution of Snowmelt and Rainfall and Their Impact on River Discharge’. Journal of Geophysical Research: Earth Surface 115, <https://doi.org/10.1029/2009JF001426>.

[5] 对流层是地球大气中位于地表与平流层之间的气层。其上界（对流层顶）的高度随纬度和季节变化，约在 8 至 15 公里之间。

- [6] 平流层是对流层之上、中间层之下的大气第二层。其上界（平流层顶）相对于地表的高度随地球纬度变化，介于 12 至 50 公里之间。
- [7] 罗斯贝波（或称行星波）是大气环流中的长波波动，其形成源于科里奥利力随纬度的变化，并可能受地形作用增强。
- [8] Xu, Y., Ramanathan, V., and Washington, W. M.: Observed high-altitude warming and snow cover retreat over Tibet and the Himalayas enhanced by black carbon aerosols, *Atmos. Chem. Phys.* 16, 1303-1315, <https://doi.org/10.5194/acp-16-1303-2016>, 2016.
- [9] Lalande, M., Ménégoz, M., Krinner, G., Naegeli, K., and Wunderle, S.: Climate change in the High Mountain Asia in CMIP6, *Earth Syst. Dynam.* 12, 1061-1098, <https://doi.org/10.5194/esd-12-1061-2021>, 2021
- [10] Harris, I., Osborn, T. J., Jones, P., and Lister, D.: Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset, *Scientific Data*, 7, 109, <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>, 2020.
- [11] Robinson, D. A., Estilow, T. W., and NOAA CDR Program: NOAA Climate Data Record (CDR) of Northern Hemisphere (NH) Snow Cover Extent (SCE), Version 1.[r01], NOAA National Centers for Environmental Information [data set], <https://doi.org/10.7289/V5N014G9>, 2012.
- [12] Yatagai, A., Kamiguchi, K., Arakawa, O., Hamada, A., Yasutomi, N., and Kitoh, A.: APHRODITE: Constructing a Long-Term Daily Gridded Precipitation Dataset for Asia Based on a Dense Network of Rain Gauges, *B. Am. Meteorol. Soc.* 93, 1401-1415, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00122.1>, 2012.
- [13] 在统计学中，中位数是将样本分为上下两半的数值。
- [14] 反照率（源自拉丁语 *albedo*，意为白色）是表面对光线的反射能力，即反射光通量与入射光通量的比值。
- [15] 冰川中位海拔是指恰好有 50%冰川表面位于其上的海拔高度。该值通常接近平均海拔，但受极高海拔小型冰面区域的影响较小。
- [16] Sakai, et al. (2015) “Climate regime of Asian glaciers revealed by GAMDAM glacier inventory.” *The Cryosphere*. <https://doi.org/10.5194/tc-9-865-2015>.
- [17] Miles, et al. (2021) “Health and sustainability of glaciers in High Mountain Asia.” *Nature Communications*, <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23073-4>.
- [18] Herreid, S. and Pellicciotti, F. (2020) “The state of rock debris covering Earth’s glaciers.” *Nature Geoscience*. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0615-0>.
- [19] Brun, et al. (2019) “Heterogeneous Influence of Glacier Morphology on the Mass Balance Variability in High Mountain Asia”. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. <https://doi.org/10.1029/2018JF004838>
- [20] Azam FM and 5 others (2018) Review of the status and mass changes of Himalayan-Karakoram glaciers. *Journal of Glaciology* 64(243), 61-74. doi: 10.1017/jog.2017.86
- [21] Hoelzle, et al. (2017): ‘Re-establishing glacier monitoring in Kyrgyzstan and Uzbekistan, Central Asia’. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*. <https://doi.org/10.5194/gi-6-397-2017>.
- [22] Brun, et al. (2017): ‘A spatially resolved estimate of High Mountain Asia glacier mass balances from 2000 to 2016’. *Nature Geoscience*. <https://doi.org/10.1038/ngeo2999>.

- [23] Zhou, et al. (2018). “Glacier mass balance in the Qinghai-Tibet Plateau and its surroundings from the mid-1970s to 2000 based on Hexagon KH-9 and SRTM DEMs.” *Remote Sensing of Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.03.020>.
- [24] Hugonnet, et al. (2021): ‘Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century’. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03436-z>.
- [25] Shean, et al. (2020): “A Systematic, Regional Assessment of High Mountain Asia Glacier Mass Balance.” *Frontiers in Earth Science*. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00363>.
- [26] Hewitt (2005). “The Karakoram anomaly? Glacier expansion and the ‘elevation effect’, Karakoram Himalaya”. *Mountain Research and Development*.
- [27] Forsythe et al. (2017). “Karakoram temperature and glacial melt driven by regional atmospheric circulation variability.” *Nature Climate Change*. <https://doi.org/10.1038/nclimate3361>.
- [28] De Kok, et al. (2018): ‘Irrigation as a Potential Driver for Anomalous Glacier Behavior in High Mountain Asia’. *Geophysical Research Letters*. <https://doi.org/10.1002/2017GL076158>.
- [29] Sakai, Akiko, and Koji Fujita (2017). “Contrasting glacier responses to recent climate change in high-mountain Asia”. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14256-5>.
- [30] Kraaijenbrink, et al. (2017). “Impact of a global temperature rise of 1.5 degrees Celsius on Asia glaciers.” *Nature*. <https://doi.org/10.1038/nature23878>.
- [31] Immerzeel, et al. (2020) “Importance and vulnerability of the world’s water towers”. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1822-y>.
- [32] Yao, et al. (2019) “Recent Third Pole’s Rapid Warming Accompanies Cryospheric Melt and Water Cycle Intensification and Interactions between Monsoon and Environment: Multidisciplinary Approach with Observations, Modeling, and Analysis.” *Bulletin of the American Meteorological Society*. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0057.1>.
- [33] Veh, et al. (2019): ‘Unchanged frequency of moraine-dammed glacial lake outburst floods in the Himalayas’. *Nature Climate Change*. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0437-5>.
- [34] Zheng, et al. (2021): ‘Increasing risk of glacial lake outburst floods from future Third Pole deglaciation’. *Nature Climate Change*. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01028-3>.