引用格式：李忠勤, 杨业菲, 刘博文, 等. 基于天山冰川站冰川模拟平台的新疆冰川及其径流模拟预估. 中国科学院院刊, 2026, 41(4): 829-845, doi: 10.3724/j.issn.1000-3045.20260402005.
Li Z Q, Yang Y F, Liu B W, et al. Simulation and projection of glaciers and their runoff in Xinjiang based on TGSGS. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2026, 41(4): 829-845, doi: 10.3724/j.issn.1000-3045.20260402005. (in Chinese)

基于天山冰川站冰川模拟平台的新疆冰川及其径流模拟预估

李忠勤[1,2,3*] 杨业菲[1,2] 刘博文[3] 李慧林[1] 詹泽鑫[1,2] 王飞腾[1,2,3] 徐春海[1] 赵卫博[1,2]

1 中国科学院西北生态环境资源研究院 新疆天山冰川国家野外科学观测研究站 兰州 730000
2 中国科学院大学 北京 100049
3 石河子大学 城市与环境学院 石河子 832003

摘要 冰川是地球上的重要淡水资源。气候变化引发冰川消融加剧，造成海平面上升、水循环、水资源和生态环境的链式变化是国际气候变化研究领域关注的焦点之一。冰川是寒冷地区由降雪形成的流变的巨大冰体，由于冰川本身的物理特性及边界条件的复杂性，通过物理模型对冰川变化模拟成为世界性难题。在中国科学院野外站网络重点科技基础设施建设项目的支持下，中国科学院天山冰川观测试验站（新疆天山冰川国家野外科学观测研究站）于2025年建成天山冰川站冰川模拟平台（TGSGS）。文章对TGSGS及其已取得的成果进行了系统性阐述：TGSGS具有先进的冰川变化物理机制表征与多尺度集成策略，并与基于地基三维激光扫描（TLS）技术的参照冰川观测网络、冰雪消融关键过程研究低温实验室、TGSGS数据库有机结合，成为冰川及其水资源研究领域的“国之重器”。新疆冰川水资源关系到区域水安全、西部大开发及“一带一路”倡议，TGSGS实行边建边运行机制，已支撑了多项国家重大任务，完成了对新疆五大主要水系（额尔齐斯河流域、准噶尔内流区、伊犁河流域、吐鲁番—哈密内流区和塔里木内流区）的冰川及其径流变化和潜力的模拟评估。

关键词 冰川，冰川物质平衡，冰川动力学，地基三维激光扫描

DOI 10.3724/j.issn.1000-3045.20260402005
CSTR 32128.14.CASbulletin.20260402005

*通信作者

资助项目：中国科学院野外站网络重点科技基础设施建设项目（KFJ-SW-YW027），第三次新疆综合科学考察（2023XJKK0101、2022XJKK0101），第二次青藏高原综合科学考察研究（2019QZKK0201）
修改稿收到日期：2026年4月9日

1 天山冰川站冰川模拟平台（TGSGS）建设的目的和意义

冰川是寒冷地区由降雪形成的流变的巨大冰体，是地球上重要的淡水资源。气候变化加速冰川消融变化，进而引发海平面上升、水循环变化和水资源危机等连锁效应，成为国际气候变化研究的焦点。在亚洲中部干旱区，尤其是我国西北地区，水是制约经济社会发展的瓶颈，冰川在该区水资源体系中具有重要地位。冰川变化直接关系到区域水安全、西部大开发及共建“一带一路”。建设天山冰川站冰川模拟平台（Tianshan Glaciological Station Glacier Simulator，TGSGS），旨在解决冰川及其水资源变化模拟难题，满足国家科技迫切需求。

冰川变化包括冰川物质平衡变化和几何形态变化2个过程。物质平衡过程受控于冰川区的物质和能量输送，因而通过冰面物质-能量方程可以建立物质平衡与气象要素之间的定量关系，即能量-物质平衡模型，以此模拟冰川物质平衡变化过程。冰川几何形态（面积、长度、体积/厚度等）的变化取决于冰川的物质平衡变化和冰川的流变过程，冰流模型被用来模拟这一过程。冰川是具有弹性、黏性及塑性形变特征（与冰温有关）的流变体，流动是冰川有别于其他冰体最重要的特征之一。流动改变了冰川物质的分布和冰川水热及边界条件，极大增加了冰川研究的复杂性。由重力驱动的全分量冰流模型（FSIFM）包含了多个物理方程或几何方程[1]，15个偏微分方程求解15个未知量，6个应力分量、6个应变率分量及3个速度分量，利用连续性方程求解冰川厚度变化[1,2]。

除了采用复杂的冰流模型外，模拟冰川变化时还需考虑4个关键问题。① 冰川内部能量-物质变化；② 当冰川底部温度达到压熔点时发生消融，融水润滑使冰川底部相对于基岩产生滑动，超出了冰川蠕变范畴，需引入滑动模块进行模拟；若底部存在冰碛物沉积层，其变形亦须通过相应模块进行模拟；③ 冰川模型参数众多，获取途径包括野外观测、采用他人研究参数及开展室内外控制试验，因此需构建系统化参数获取方案[1]；④ 模型结果的验证高度困难。用于验证的冰川物质平衡及几何形态变化观测资料不仅稀缺，而且难以获取。

由于冰流模型的构建涉及复杂的物理过程与多元偏微分方程的数值求解，需要借助物理学和应用数学领域的最新方法，并对计算硬件提出很高的算力要求。同时，模型所需的参数与用于验证的数据往往难以获取，掌握相关技术的研究机构和专家在国内外均十分有限。因此，冰川变化的模拟预测成为兼具高度学术挑战性和显著国际影响力的科学难题。

TGSGS的建设目标是依托中国科学院大型科研设施建设优势，通过三大平台建设，将模拟、观测与实验有机结合，系统性突破冰川变化模拟与预测中的多重瓶颈，力争达到国际领先水平。该平台在国内尚属首创，国际上亦尚未形成同等程度的集成研究体系。TGSGS的建成，不仅成为中国科学院天山冰川观测试验站（以下简称“天山冰川站”）的“镇站之宝”，也为冰川水资源研究领域增添了一枚“国之重器”。

2 建设难点与解决方案/技术创新

2.1 精细化模拟，约束和优化大尺度模拟

TGSGS配置了多层次的物理模型以实现多分辨率冰川模拟。在物质平衡模拟方面，既包括全分量能量-物质平衡模型（如COSIMA、COSIPY[4,5]），也包括不同简化程度的模型，如简化能量-物质平衡模型（SEMBM）和度日模型（DDM）；在冰川几何形态模拟方面，既有全分量冰流模型（FSIFM），也有简化冰流模型，如高阶冰流模型（HOIFM）和浅冰近似模型（SIA）。该架构允许从精细到简化的多层次表征冰川的物质平衡与动力学响应，从而识别并显著降低由模型简化引入的不确定性。相比之下，近年来国际上发

展的冰川演化模型多采用简化方案。例如，Huss等[8]提出的全球冰川演化模型（GloGEM）以DDM模拟表面物质平衡，并用质量再分布曲线模型（MRCM）描述冰川流变；在2019年形成较为成熟框架的全球开源冰川模型（OGGM）[9]同样采用DDM，流变过程模拟仍然采用SIA；Python冰川演化模型PyGEM[10]也基于DDM与MRCM。与这些大尺度简化模型相比，TGSGS具备更为精细和复杂的物理表征，但也对观测资料和计算资源提出更高要求。为兼顾高精度与大尺度模拟，TGSGS采取多尺度集成策略：一方面与大尺度模型对接，扩展到区域乃至全球的模拟能力；另一方面利用平台上的精细物质平衡与冰川流变模拟，对典型冰川开展高精度研究，并将其结果作为大尺度模型的约束与优化依据，以提升大尺度冰川变化模拟的可靠性与可信度。

2.2 模型参数和模拟结果多重校准验证

冰川变化模型的参数校准与模拟结果验证主要依赖于冰川物质平衡和几何形态的长期观测序列，但相关资料极为匮乏，导致对模拟结果的独立验证成为全球性难题。TGSGS通过建立基于地基三维激光扫描（TLS）技术的参照冰川观测网络，并整合汇聚到TGSGS数据库中的多类型、多源、不同时间和空间尺度的观测资料，为模型参数校准与结果验证提供了丰富的数据支撑。尽管以瑞士冰川监测网络（GLAMOS）等项目为代表的国际研究已利用TLS获取了高精度的物质平衡数据[11]，但尚未建成系统性的观测网络。

在对冰川-流域水文模型进行参数校准与验证时，TGSGS一方面依托经过验证的冰川径流模拟结果，另一方面以流域水文观测资料进行复核。所用水文数据既包括天山冰川站的长期监测与汇编数据集，也来自与水利等部门长期合作中积累的观测资料。

此外，TGSGS还依托冰雪消融关键过程研究实验室，从物理机理层面对模型的关键参数化方案进行验证与优化。近年来，以瑞士联邦理工学院（ETH）Matthias Huss团队在实验室开展冰川消融过程模拟为代表的研究表明，在受控条件下开展冰雪消融试验，是约束表面反照率、降水热力效应等过程参数化的有效途径。在国内建立低温实验室并开展冰雪消融关键过程模拟研究，尚属首次。

3 TGSGS组成、功能与特点

TGSGS包括3部分：① TGS冰川模拟平台；② 基于TLS技术的参照冰川观测网络；③ 冰雪消融关键过程研究低温实验室。TGSGS整体架构见图1。

3.1 TGS冰川模拟平台

TGS冰川模拟平台是TGSGS的核心模拟研究平台，主要功能包括数据接收、模拟预测与成果展示等，由冰川模拟平台和冰川-水文模拟平台2部分组成。

（1）冰川模拟平台。平台集成了全分量能量-物质平衡模型（如COSIMA、COSIPY等）、简化能量-物质平衡模型（SEMBM）及度日模型（DDM）等，用于多精度冰川物质平衡的模拟计算。同时集成了全分量冰流模型（FSIFM）、高阶冰流模型（HOIFM）和浅冰近似冰流模型（SIA）等，用以多精度冰川几何形态演变模拟。该平台还可运行当前国际主流的大尺度冰川演化模型（如OGGM、PyGEM、GloGEM等），并通过对输入数据与模型参数进行属地化处理，实现区域尺度的冰川变化模拟与预测，涵盖冰川厚度与储量等关键指标的研究[6]。

（2）冰川-水文模拟平台。冰川模型与水文模型对接或耦合平台，一方面，可将2类模型耦合运行，实现“气候变化—冰川变化—水文过程”全链条的模拟预估；另一方面，冰川模型的输出可作为水文模型的输入或用于水文模拟结果的验证。常用的水文模型如水文平衡模型（HBV）、土壤与水资源评估模型（SWAT）、可变入渗能力模型（VIC）等均可在该平台

上运行。

TGSGS数据库为支撑TGS冰川模拟平台运行而专门构建，汇集了用于模型输入、参数校准与结果验证的多源、多尺度观测与模拟数据。数据类型涵盖冰川、气象与水文观测资料（时间覆盖可达70余年）、国内外先进模式模拟成果与再分析产品（如冰川物质平衡、几何形态演变及再分析气象数据集等），以及多期冰川编目数据集（如CGI-1、CGI-2、CGI-XJ2020等）。

3.2 基于TLS技术的参照冰川观测网络

基于TLS技术的参照冰川观测网络，为TGS冰川模拟平台提供关键地面验证数据，并以参照冰川为基准，系统性揭示不同区域冰川物质平衡的时空演变。冰川学理论表明，同一气候区内冰川物质平衡的波动具有共性，而不同区域之间存在显著差异。因此，国际上通常通过在不同地区设置参照冰川，对少数典型冰川开展长期系统观测，代表该区冰川物质平衡的变化特征。全球已有40余条冰川被指定为参照冰川，其中天山乌鲁木齐河源1号冰川为中国的参照冰川[3]。借鉴此做法，TGSGS在西北干旱区的6个主要区域选取5条代表性冰川，构建参照冰川观测网络。在现有的物质平衡、几何形态、气象和水文等观测体系基础上，引入TLS技术，实施冰川物质平衡、表面流速等要素的高精度一体化监测。所用Riegl VZ-6000超远程地基激光扫描仪可在6 km量程内获取精度优于2 cm（单次测量精度15 mm）的高密度点云，用于生成高分辨率冰川数字高程模型（DEM），并通过多期DEM差分精确反演冰川表面高程与体积变化，从而准确估算物质平衡与几何变化[7]。观测采用长期连续监测与短期强化观测相结合的模式，长期监测对参照冰川进行定期高精度测量以构建连续时间序列，揭示变化趋势与区域特征；短期强化观测则扩大覆盖范围并对重点冰川进行补测，以支撑区域性模拟研究。所有观测数据均汇入TGSGS数据库。

3.3 冰雪消融关键过程研究低温实验室

该实验室主要是在可控环境下模拟冰雪消融的关键过程，为验证或改进冰川模型参数化方案提供数据支撑。实验室配备智能温控系统、环境变量模拟系统、造雪制冰系统、消融模拟实验系统及同步监测系统等，通过控制温度、湿度、短波辐射、降水等关键环境参数，准确再现特定条件下的冰川消融过程，并自动监测反照率、雪层参数（粒径、密度、硬度、含水率、温度等）、冰体参数（温度、粗糙度等）、表面特征（杂质覆盖面积、浓度、厚度、粗糙度、灰度等）及消融参数（冰雪厚度变化、含水率等）的变化。基于此低温冰雪消融实验，可定量分析各种参数变化对消融的影响，从而验证和改良模型参数化方案，提高物质平衡模拟的精度。

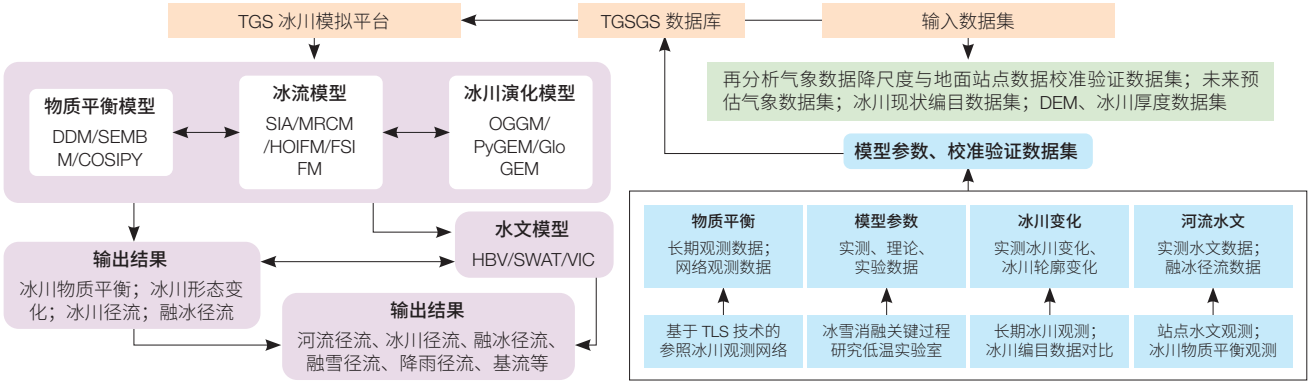


图1　天山冰川站冰川模拟平台（TGSGS）整体架构

Figure 1　TGSGS architecture

3.4 平台完成情况

TGSGS建设由中国科学院野外站重点科技基础设施项目“山地冰川物质平衡和动力学监测模拟平台”支持，2025年完成建设。具体包括：① 在天山冰川站建设主平台1个，在阿尔泰山站建设分平台1个；② 在天山（乌鲁木齐河源1号冰川、托木尔峰科其喀尔冰川）、阿尔泰山（拉斯特河源3号冰川）、帕米尔高原（慕士塔格峰16号冰川）和祁连山（扎子沟29号冰川）建成5座25 m综合观测塔，形成参照冰川观测网络。冰雪消融关键过程研究实验室建设拟纳入冰冻圈科学与冻土工程全国重点实验室的建设任务。基于TLS技术的参照冰川观测持续开展，并根据研究需要在其他多条冰川上开展了补充观测，已积累大量资料。为满足国家重大科研任务和紧迫需求，项目采取边建边运行模式，建设、观测、数据汇集与模拟计算同时推进。

4 科学目标与学科支撑作用

TGSGS的核心科学目标是解决冰川及其水资源变化的精细化模拟与预估这一国际性难题，实现模型参数与模拟结果的多重校准与验证，以产出可靠的研究成果。通过TGSGS，可以实现“气候变化—冰川响应—水文过程变化”全链条模拟研究，推动中国冰川及水资源研究迈上新台阶。

*功能方面，*TGSGS不仅能够开展区域尺度的模拟，还具备开展全球尺度冰川与极地冰盖的模拟，并集成了数据积累与成果展示等功能。基于TLS技术构建的参照冰川观测网络主要覆盖我国西部干旱区，先期解决的是干旱区相关科学问题。随着观测网络与TGSGS数据库的不断扩展，其大尺度模拟与应用潜力将愈加显现。

*在对学科发展支撑方面，*TGSGS的建设为国际冰川学前沿研究提供了有力支撑，促进了冰川学与水文学、大气科学、遥感及数值模拟等领域的深度融合，构建了综合性研究体系，推动了学科协同发展。

*在满足国家重大需求和承担重大科技任务支撑方面，*平台运行以来，为探索中国西部干旱区冰川与水资源演化规律、评估冰川变化对区域水安全的影响提供了科学支撑，并为干旱区水资源管理与可持续发展提供了决策依据；同时，在支持西部大开发和共建“一带一路”相关科技需求方面发挥了积极作用，有力支撑了第三次新疆综合科学考察、第二次青藏高原综合科学考察研究等国家与地方重大任务。

5 基于TGSGS的新疆冰川及其径流模拟预估、潜力分析

5.1 研究背景

基于TGSGS的首项重要成果是承担国家和地方多项重大任务，开展对新疆五大主要水系冰川及其径流变化的系统研究。新疆位于我国西北内陆，属于亚洲中部干旱区，水资源是制约经济社会发展的瓶颈，且高度依赖冰雪融水，对气候变化敏感[12]。过去40年间，冰川加速消融引发了水资源供给、水文过程和生态环境的连锁变化，引起政府与公众的高度关注，迫切期待借助TGSGS这一“国之重器”对新疆冰川及其径流变化进行模拟与预测，对未来冰川径流的供水潜力进行评估，进而为新疆地区的水安全保障与可持续发展提供科学决策依据。

新疆五大水系（流域）包括额尔齐斯河流域（5A2）、准噶尔内流区（5Y7）、伊犁河流域（5X0）、吐鲁番—哈密内流区（5Y8）和塔里木内流区（5Y6）（图2），是新疆人类社会活动和生态环境保护的集中区域。目前新疆共发育冰川24 202条，面积23 629.28 km^2，冰川储量1 608.94 km^3。五大水系中的冰川数量、面积、体积分别占新疆冰川总量的90.1%、93.06%、93.67%[13]。

5.2 数据与方法

*气象数据输入包括历史和未来数据。*历史资料采

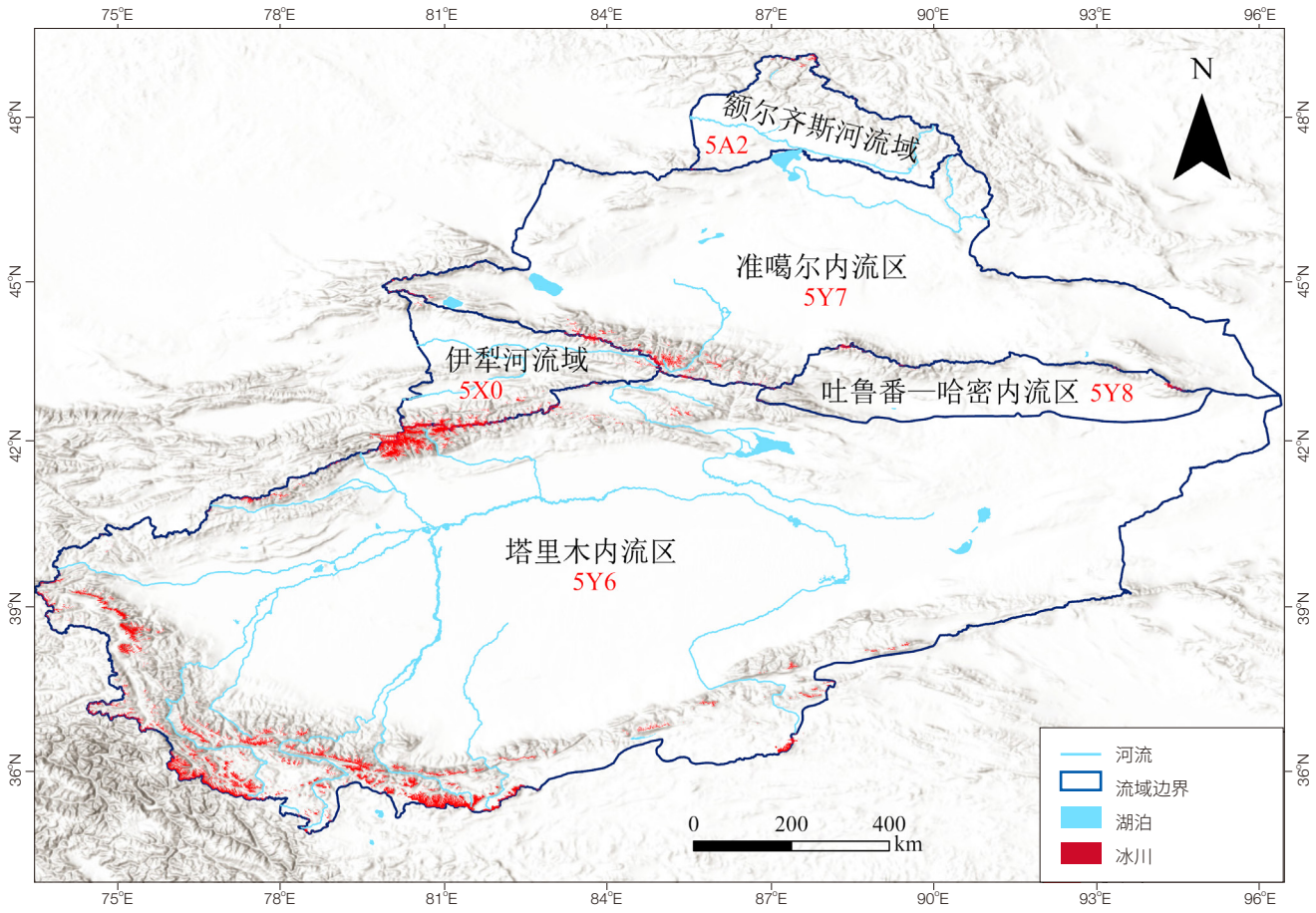


图2　新疆五大水系（流域）冰川分布及流域编号

Figure 2　Distribution of glaciers in Xinjiang's five major river basins with basin numbers

用中国高分辨率（0.01°、日值）气温降水格网数据集（1961—2019年）[14]，降尺度后经基于TGSGS数据库实测数据的偏差校正后用于模拟。未来情景采用中国区域CMIP6降尺度数据集（1979—2100年）[15]。冰川边界采用新疆冰川编目2020（CGI-XJ2020）[13]。冰川物质平衡数据包括国际模拟数据、传统花杆/雪坑法和基于TLS技术的测量数据（图3），用于每条冰川物质平衡模拟结果的验证。数据均源自TGSGS数据库。

*研究方法与流程。*基于TGSGS面向新疆区域，构建耦合冰川物质平衡模型与冰流模型的区域化模拟体系。以2020年为现状基准年，采用全分布式DDM模型计算物质平衡，并以此驱动嵌套于TGS冰川模拟平台的OGGM模型模拟不同气候情景下的冰川（面积、储量等）与径流变化。使用实测物质平衡数据，通过遗传算法对模型参数进行优化校准，并基于各区域参照冰川的连续观测序列开展分区验证，得到可靠模拟结果。本研究中，融冰径流指由冰川冰体消融产生的径流，当冰川物质平衡为负时，融冰径流等于物质平衡值（即损失量）。冰川径流则指冰川范围内产生的所有径流总和，包括融冰径流、冰川表面积雪融化产生的融雪径流及降雨径流。

5.3 额尔齐斯河流域

5.3.1 模拟预估结果

中国境内的额尔齐斯河段包括卡依尔特斯河、喀拉额尔齐斯河、克兰河、布尔津河和哈巴河5条支流，其中布尔津河的径流量最大、冰川最为集中（其中冰川面积约占总流域冰川面积的93.4%）。因此，研究布尔津河的冰川径流即可掌握整个额尔齐斯河流域的冰

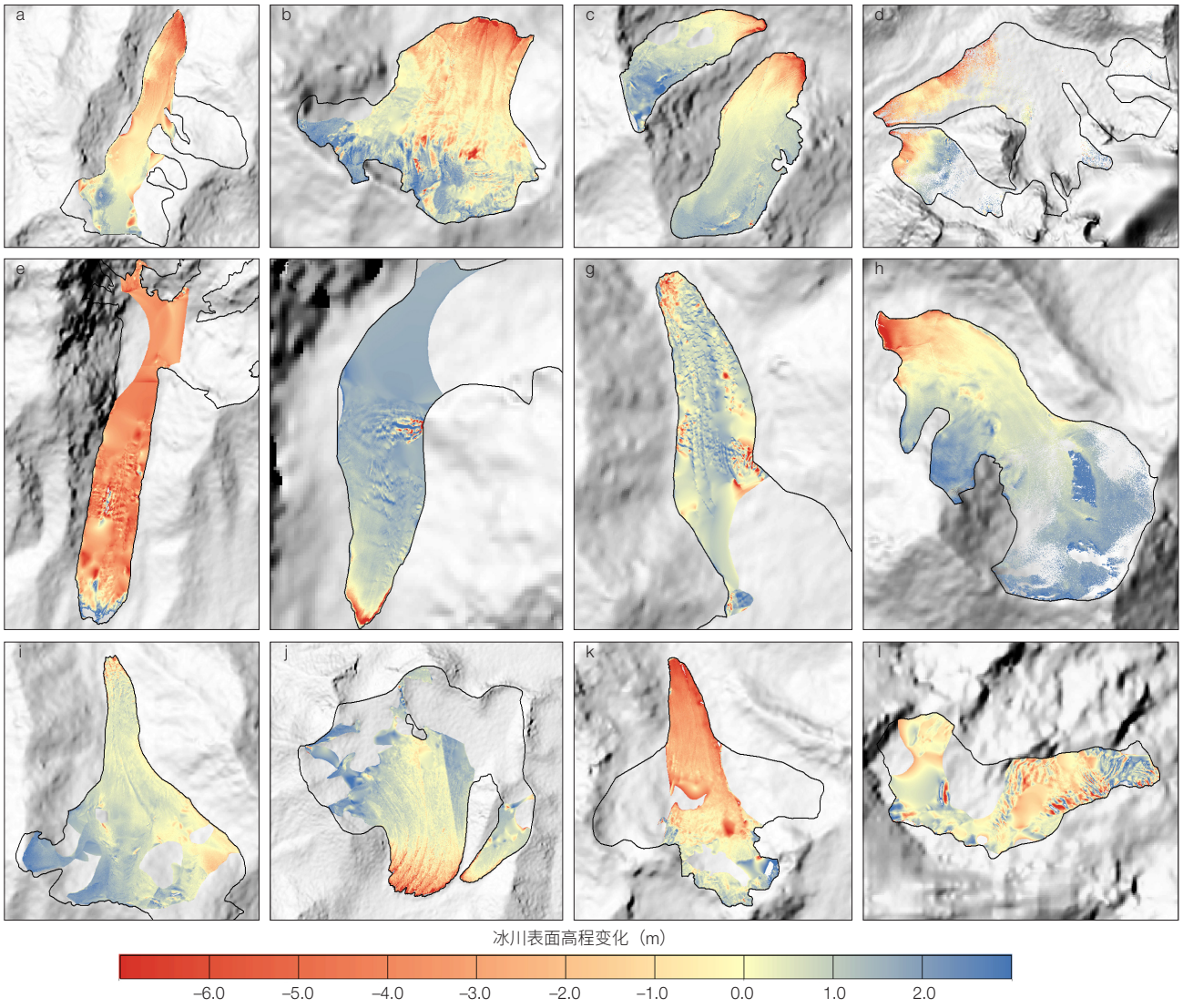


图3　基于TLS技术的冰川表面高程年变化观测结果

Figure 3　Annual glacier surface elevation changes based on TLS measurements

（a）木斯岛冰川；（b）哈希勒根51号冰川；（c）乌鲁木齐河源1号冰川；（d）扇形分流冰川；（e）青冰滩72号冰川；（f）榆树沟6号冰川；（g）老虎沟12号冰川；（h）四工河4号冰川；（i）七一冰川；（j）冬克玛底冰川；（k）帕隆94号冰川；（l）白水河1号冰川

(a) Muz Taw Glacier; (b) Haxilegen Glacier No.51; (c) Urumqi Glacier No.1; (d) Fan-shaped Diffluence Glacier; (e) Qingbingtan Glacier No.72; (f) Yushugou Glacier No.6; (g) Laohugou Glacier No.12; (h) Sigonghe Glacier No.4; (i) Qiyi Glacier; (j) Dongkemadi Glacier; (k) Palong Glacier No.94; (l) Baishui River Glacier No.1

川径流特征。根据CGI-XJ2020[13]，2020年布尔津河冰川覆盖率4%，冰川条数203条，面积144.17 km^2，单条冰川平均面积为0.71 km^2。基于TGSGS，以2020年为现状年，对布尔津河流域冰川模拟预估结果显示（图4），未来冰川面积前期减小速率相对平缓，冰川体积则呈快速下降趋势；2035年后，面积减缩明显加快，且SSP245与SSP585差异逐步显现，SSP585情景下面积与体积衰减速率更高。至2100年，SSP245情景下面积和体积分别降至2020年的9.9%和3.4%，SSP585情景下分别降至2.2%和0.8%，接近消融殆尽。

冰川径流的模拟预估显示（图5），现阶段布尔津河的冰川径流约为1.8×10^8 m^3，若以多年平均年径

流量 42×10^8 m^3 计[16]，冰川径流占河流径流的 4.3%。SSP245 情景下，冰川径流拐点预计出现在 2040 年前后，峰值约为 2.5×10^8 m^3；对应冰川面积较 2020 年减少 12.5%，体积减小 37.6%。SSP585 情景下，拐点预计提前至 2038 年左右，峰值约为 2.8×10^8 m^3；对应面积与体积分别减少 12% 和 37.3%。拐点之后，冰川径流进入快速衰减阶段，至 2100 年，SSP245 与 SSP585 情景下冰川径流分别降至约 16×10^6 m^3 与 8×10^6 m^3。

5.3.2 冰川径流潜力分析

额尔齐斯河流域冰川数量少，面积小，由于海拔低，对气候变化敏感。过去 60 年间冰川面积减小了 45.2%，未来小冰川会很快消融殆尽。但由于冰川径流对河流的贡献少，冰川的消失不会对河流产生大的影响。该流域也存在几条大冰川，主要集中在中俄蒙三国边界的友谊峰（海拔 4 374 m）周围。这一区域共有冰川 93 条，面积 164.07 km^2。其中，中国境内 48 条，面积 67.64 km^2，最大的冰川为喀纳斯冰川，2022 年面积 25.46 km^2。研究表明，这一区域冰川不会很快消失，具有一定产流潜力。额尔齐斯河冰川径流的基本特征如变化、拐点等，主要由这一区域的冰川决定。布尔津河的冰川径流预计 2030 年起进入高值阶段，达到峰值后出现拐点，至 2055 年后高值期结束，开始快速衰减。不同温升情景对布尔津河冰川径流的影响不大（图 5），表明即便是气温有更大的上升，也不会产生更多的融水，说明布尔津河冰川的产流潜力已充分发挥。额尔齐斯河其他流域，如哈巴河、喀拉额尔齐斯河、喀依尔特河、科布多河等冰川分布较少，冰川消失不会对河流径流总量造成太大影响。额河上游以融雪径流为主，冰川径流占比不大，所以应重点考虑积雪消融的影响，尤其是积雪消融导致的春汛提前和雪融性洪水灾害的影响。另外，这一地区吉木乃县诸小河水系在萨吾尔山分布有 11 条冰川，总面积 8.5 km^2，预估到 2090 年大多消失，仅剩下木斯岛冰川。吉木乃县属资源性缺水地区，随着冰川消融加剧和消失，诸小河河流径流还会进一步减少，波动加剧，夏季洪灾风险增大，水资源形势会更加恶化，可持续发展有赖于跨流域调水。

5.4 准噶尔内流水系

5.4.1 模拟预估结果

准噶尔盆地孕育了新疆的经济与文化中心，其水资源主要依赖盆地内河流水系，而冰川融水是其中的重要组成部分。2020 年盆地共发育冰川 3 171 条，面积 1 645.03 km^2，单条冰川平均面积约为 0.52 km^2。冰川模拟预估结果表明（图 6），盆地冰川面积和体积退缩较快，且在高排放情景下更为显著。至 2100 年，SSP585 情景下冰川基本消融殆尽，面积仅剩 2020 年

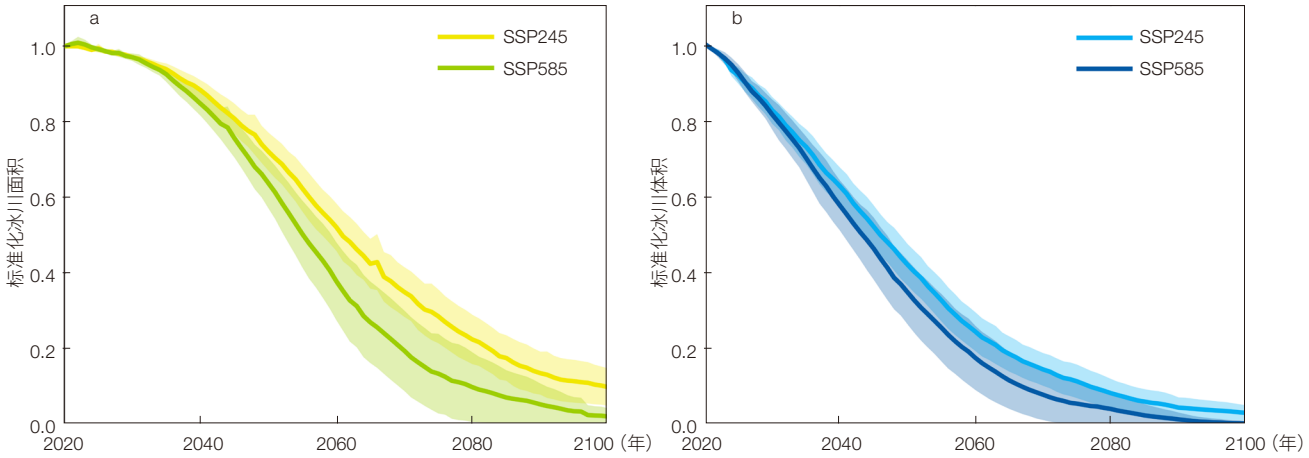


图 4 布尔津河流域 2020—2100 年冰川面积（a）和体积（b）变化模拟预估

Figure 4 Projections of glacier area (a) and volume (b) changes in Burqin river basin from 2020 to 2100

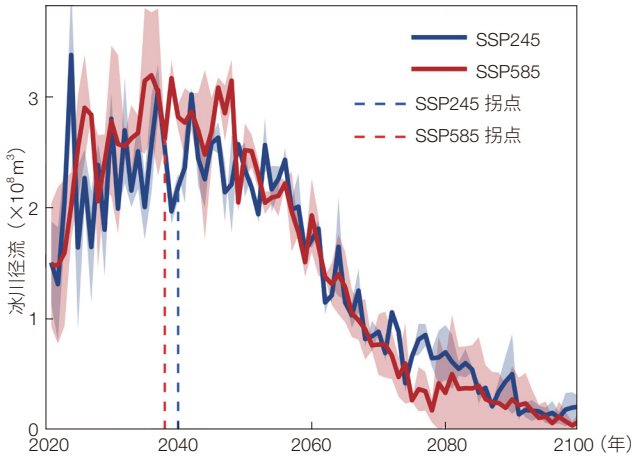


图 5　布尔津河流域 2020—2100 年冰川径流变化模拟预估

Figure 5　Projection of glacial runoff changes in Burqin river from 2020 to 2100

的 0.6%，体积降至 0.2%；SSP245 情景下，冰川面积与体积分别降至 8.1% 和 2.7%。

冰川径流的模拟预估结果显示（图 7），现阶段准噶尔内流水系多年平均冰川径流约为 16.96×10^8 m³，若总量以 102.6×10^8 m³ 计（《2022 年新疆维吾尔自治区水资源公报》），冰川径流约占 16.5%。在 SSP245 情景下，冰川径流拐点将出现在 2030—2035 年前后，峰值约为 23×10^8 m³；对应冰川面积与体积较 2020 年分别减少 8.4% 和 28.7%。这一结果与 Zhao 等[18]同样采用 OGGM 模型得到的结果（2032 年）较为接近。在 SSP585 情景下，拐点预计略晚，为 2038—2040 年前后，但峰值更高，约为 25×10^8 m³；对应冰川面积和体积分别减少 12.9% 和 35.2%。拐点之后，冰川径流进入快速衰减阶段，且 SSP585 情景下降幅度更大。至 2100 年，SSP245 与 SSP585 情景下冰川径流分别降至约 1.9×10^8 m³ 和 0.19×10^8 m³。

5.4.2　冰川径流潜力分析

准噶尔内流水系由诸多散流河流构成，不同流域冰川面积与冰川覆盖度差异显著，导致冰川径流的贡献具有明显空间异质性。事实上，冰川平均面积较小的河流拐点多已出现或即将出现，冰川径流处于快速下降阶段。冰川平均面积较大的河流拐点相对滞后，多集中在 2035—2040 年前后，且高的温升情景带来了更高峰值水量，但拐点过后，会更快速衰减（图 7），表明气温升高条件下，尽管有冰川径流增长，但也透支了冰川固体冰储量，说明冰川供水潜力总体不足。具体来看，天山北麓河流可分 2 类：① 包含博格达山北坡诸小河、乌鲁木齐河、头屯河、三屯河、塔西河、精河等，流域内以面积小于 1 km² 的小冰川为主，个别冰川面积达到 2—5 km²，冰川融水占径流量 3%—23%；② 玛纳斯河、霍尔果斯河、安集海河、四棵树河等，流域内分布有许多面积 5 km² 以上的较大冰川，

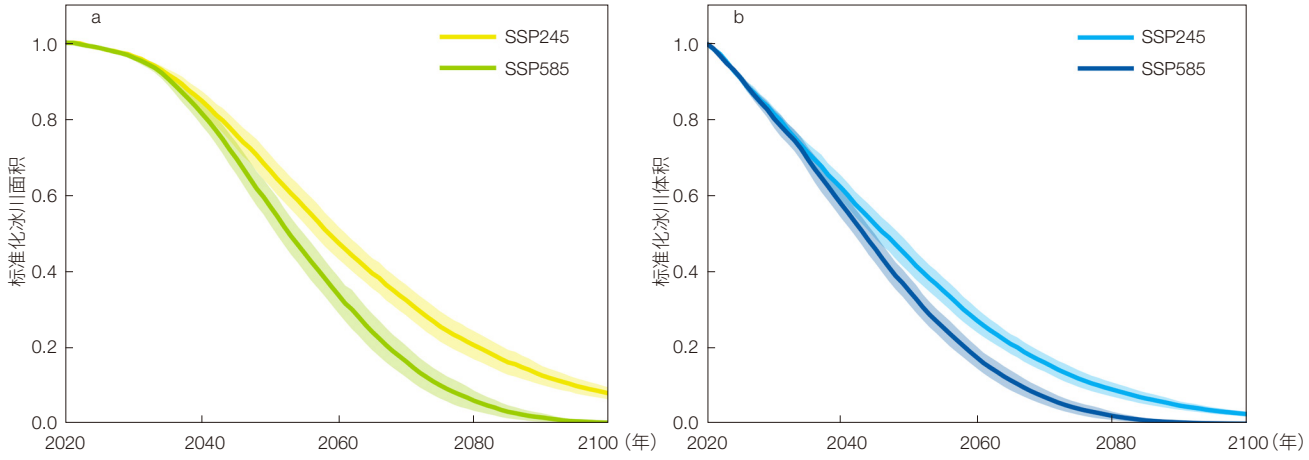


图 6　准噶尔内流水系 2020—2100 年冰川面积（a）和体积（b）变化模拟预估

Figure 6　Projections of glacier area (a) and volume (b) changes in Junggar inland river system from 2020 to 2100

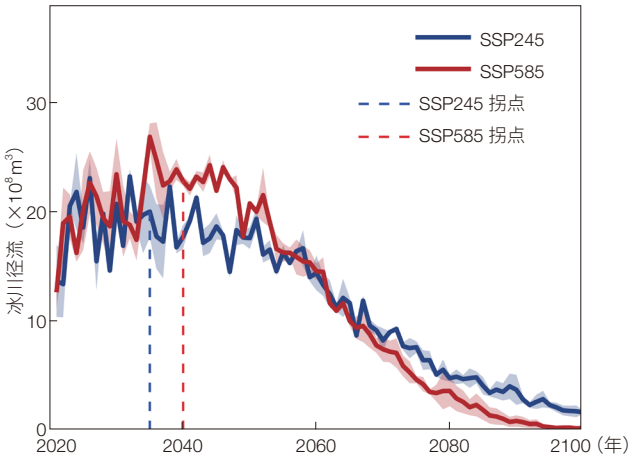


图 7　准噶尔内流水系 2020—2100 年冰川径流变化模拟预估

Figure 7　Projection of glacial runoff changes in Junggar inland river system from 2020 to 2100

冰川融水占到径流量的 30%—50%。第一类小冰川补给河流，拐点已过或正处于临界状态，或将在 2030 年前达到拐点。大冰川补给河流，目前冰川消融正旺，拐点将出现在 2035—2040 年，之后冰川径流快速下降，对河流的补给和调节作用将会快速减弱。总之，在降水和冰川消融双重增加影响下，虽然准噶尔内流水系近年来的水资源量总体是增加的，但潜力不足，未来缺水状况可能加剧。

5.5 伊犁河流域

5.5.1 模拟预估结果

伊犁河是一条冰川补给跨境河流，最终汇入巴尔喀什湖。伊犁河流域 2020 年共发育冰川 2 177 条，面积 1 433.19 km^2，单条冰川平均面积 0.66 km^2。冰川模拟预估结果表明（图 8），2035 年之后，SSP245 与 SSP585 情景下的冰川变化差异逐步显现。至 2100 年，SSP245 情景下冰川面积和体积分别降至 2020 年的 15.4% 和 10.2%；SSP585 情景下分别降至 4.6% 和 2.1%。

冰川径流的模拟预估显示（图 9），目前伊犁河冰川径流量约为 20×10^8 m^3，以流域多年平均年总径流量 115×10^8 m^3 计[16]，冰川径流占比为 17.4%。未来 SSP245 情景下冰川径流拐点预计出现在 2035 年前后，径流峰值约为 21×10^8 m^3，对应冰川面积和体积较 2020 年分别减少 6.2% 和 26.4%。SSP585 情景下拐点预计出现在 2040 年前后，峰值约为 30×10^8 m^3，对应冰川面积与体积分别减少 13.6% 和 36.1%。拐点之后，这 2 种情景下冰川径流均进入快速衰减阶段，至 2100 年降至约 1.25×10^8 m^3。

5.5.2 冰川径流潜力分析

伊犁河流域冰川数量和面积在全疆占有一定比

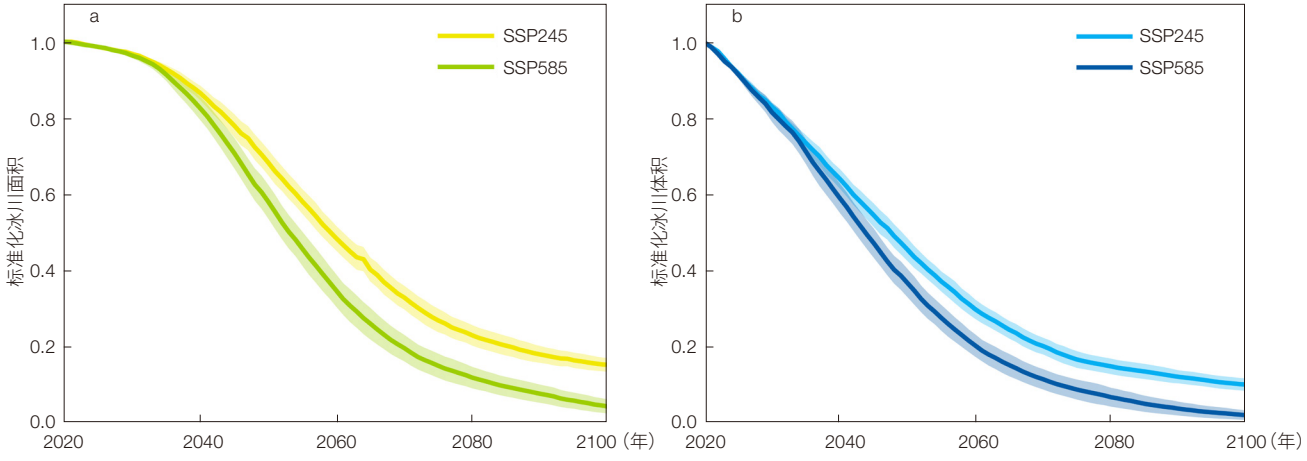


图 8　伊犁河流域 2020—2100 年冰川面积（a）和体积（b）变化模拟预估

Figure 8　Projections of glacier area (a) and volume (b) changes in Ili river basin from 2020 to 2100

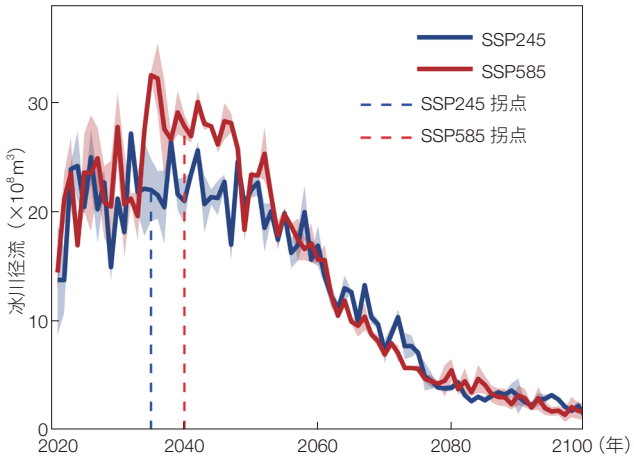


图 9　伊犁河流域2020—2100年冰川径流变化模拟预估

Figure 9　Projection of glacial runoff changes in Ili river basin from 2020 to 2100

重，但以小冰川为主。目前冰川径流量约为 20×10^8 m^3，约占流域多年平均年总径流量的17.4%，具有一定的重要性。未来2025—2050年为冰川径流的丰水期，冰川消融增强，冰川径流处在高位波动，更高的温升情景使得更高处的冰融化，带来了更高的峰值水量。2055年之后在2种气候情景下均开始快速衰减。总体上看，由于冰川的平均面积小、变化快，对冰川径流的支撑不长久，供水潜力不足。冰川及其径流的变化对于冰川径流补给比例较少的河流如霍尔果斯河、巩乃斯河等影响不甚明显。而对于特克斯河、库克苏河、喀什河等冰川融水补给较大河流的影响是短期内径流量将持续增加，长期会有所减少。同时，随着气温升高，积雪消融期提前，将造成春季径流增加。未来冰川变化对伊犁河流域水量的影响有限，但对径流调节作用可能会有所减弱。

5.6 吐鲁番—哈密内流区

5.6.1 模拟预估结果

吐鲁番—哈密内流区由诸多散流水系构成，区域内共发育冰川354条，面积155.82 km^2，单条冰川平均面积仅有0.44 km^2。模拟预估结果表明（图10），冰川整体退缩较快，至2100年，SSP245情景下冰川面积和体积分别降至2020年的5.9%和2.5%；SSP585情景下则接近完全消融殆尽。

冰川径流预估结果显示（图11），现阶段冰川径流量约 2.7×10^8 m^3。冰川径流在不同子流中的占比差异较大，由于降水补给总体偏少，部分流域冰川径流占比在25%以上，个别河流可达40%以上。未来，在SSP245情景下，冰川径流的拐点已过，处在波动下降阶段。SSP585情景下，拐点预计出现在2035年前后，峰值约为 3×10^8 m^3，对应冰川面积和体积较2020年分别减少13.4%和41.3%。拐点之后，冰川径流快速衰减，至21世纪末，基本丧失。

5.6.2 冰川径流潜力分析

吐鲁番—哈密盆地属资源性缺水区，平原年降水量仅10—50 mm，河流径流主要依赖高山区冰川融水和降水补给，对气候变化高度敏感。区域内冰川数量少、总面积与单个冰川平均面积均偏小，总体处于加速消融期。无论气候情景如何，至2040年后冰川径流均将迅速衰减。由于多数冰川面积小、变化快，已退化为悬冰川，供水潜力严重不足。仅有少数流域（如庙尔沟、白杨河流域）分布有相对大的冰川，这些较大冰川在一定程度上主导流域的冰川径流特征，但其径流拐点亦将很快到来，之后同样将迅速衰减。实际上，冰川变化已对吐鲁番—哈密盆地河流产生明显影响，表现为径流量减少、流量波动加剧等。随着冰川进一步消退，其对河流的补给与调节作用将进一步减弱，导致径流量大幅下降并伴随更强的季节性和年际波动，断流发生的风险增加，同时局部洪水风险亦有上升趋势。总之，在当前冰川加速消融和不断消失背景下，该区水资源供给将持续恶化，未来将面临更加严重的水资源短缺与供需矛盾。

5.7 塔里木内流区

5.7.1 模拟预估结果

塔里木内流区2020年共发育冰川15 860条，面积18 594.24 km^2，单条冰川平均面积达1.17 km^2。模拟预估结果表明（图12），与其他水系相比，冰川面积

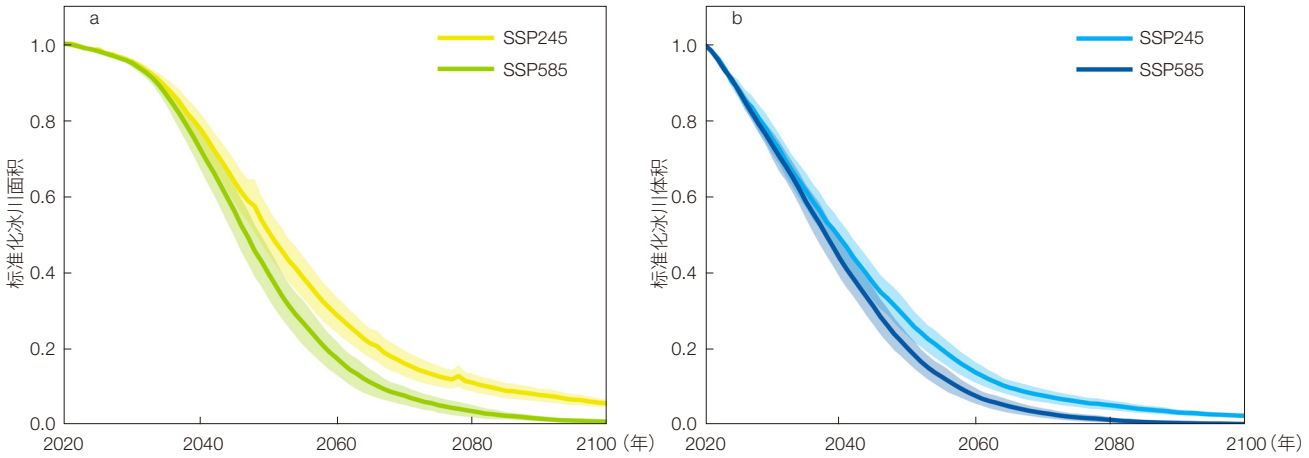


图 10　吐鲁番—哈密内流区 2020—2100 年冰川面积（a）和体积（b）变化模拟预估

Figure 10　Projections of glacier area (a) and volume (b) changes in Turpan – Hami inland basin from 2020 to 2100

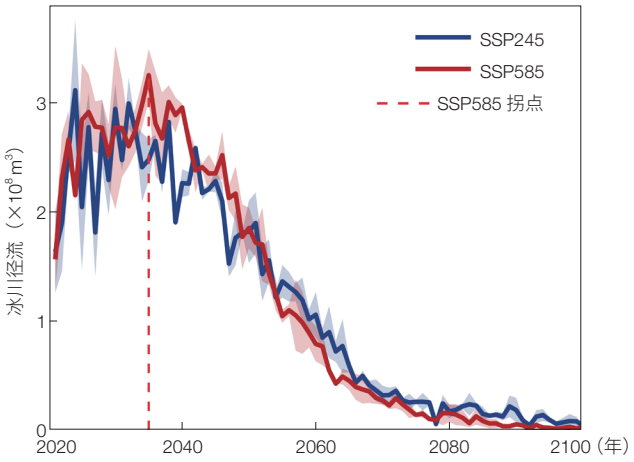


图 11　吐鲁番—哈密内流区 2020—2100 年冰川径流变化模拟预估

Figure 11　Projection of glacial runoff changes in Turpan – Hami inland basin from 2020 to 2100

和体积的退缩速率较慢，直到 2045 年后才开始出现加速退缩，并且在 SSP245 与 SSP585 情景下差异显著。到 2100 年，按 2 种情景预测，冰川面积分别降至原来的 75.8% 和 50.2%，冰川体积则分别降至 61.7% 和 35.7%。

冰川径流模拟预估结果显示（图 13），现阶段平均冰川径流约为 144.2×10^8 m^3，若塔里木内流区多年平均地表径流按 352.46×10^8 m^3 计（2022 新疆维吾尔自治区水资源公报），冰川径流约占塔里木内流区总径流的 41%。未来在 SSP245 和 SSP585 情景下冰川径流出现明显差异。SSP245 情景下，冰川径流的拐点将在 2067 年前后出现，径流峰值在 200×10^8 m^3 左右，相比 2020 年增加了 28.8%，届时冰川面积减小 11.9%，体积减小 21.9%，拐点之后冰川径流保持高位波动，持续至 2100 年后。而在 SSP585 情景下，冰川径流拐点预计将在 2080 年前后出现，径流峰值将达 266×10^8 m^3 左右，相比 2020 年增加 81.7%，届时冰川面积减少 32.1%，体积减小 46.7%。温升高的情景，冰川径流达到拐点的时间更晚，且流峰值更高。

国内外有多项涉及冰川径流拐点的研究。例如，Huss 等[19]在 SSP245 情景下给出塔里木内流区的拐点时间为 2051 年。Wimberly 等[17]通过多模式综合分析得到的拐点约为 2056 年。本研究对比分析发现，这些先前研究多数采用了更大的流域边界，将羌塘高原、祁连山或柴达木盆地的冰川纳入范围，所计入的冰川数量比本研究多出 5 000 条以上。而上述地区的冰川变化较快，因而会导致径流拐点时间被提前。也有采用与本研究基本相同边界的研究。例如，Rounce 等[10]基于 PyGEM 模型得到的拐点约在 2061 年前后，Zhao

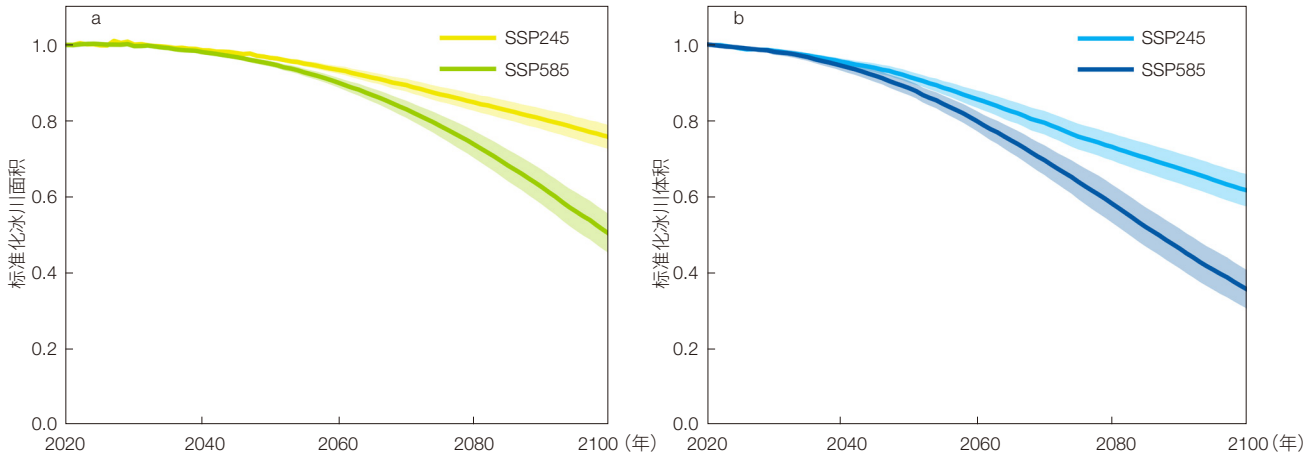


图 12　塔里木内流区 2020—2100 年冰川面积（a）和体积（b）变化模拟预估

Figure 12　Projections of glacier area (a) and volume (b) changes in Tarim river basin from 2020 to 2100

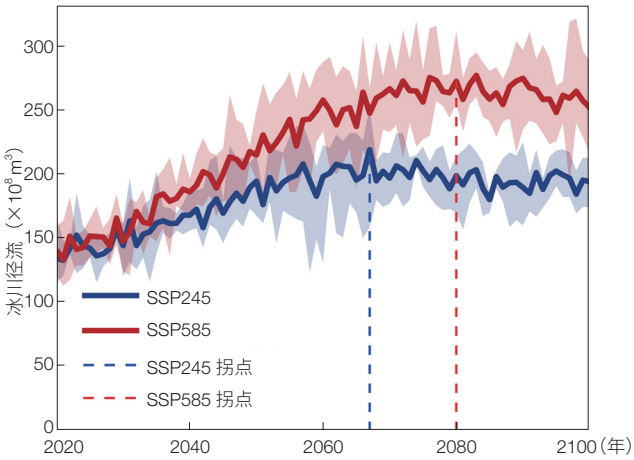


图 13　塔里木内流区 2020—2100 年冰川径流变化模拟预估

Figure 13　Projection of glacial runoff changes in Tarim river basin from 2020 to 2100

等[18]采用 OGGM 模型得到的结果为 2065 年，这些结果与本研究位于相近时间窗口。此外，多数研究以 CMIP6 输出作为重要气候驱动数据来源，但不同气候模式在高山区域对气温和降水的模拟存在显著差异。由于冰川主要分布在高海拔且观测站网稀疏的区域，气候模式在这些区域的表现难以充分验证和校准，从而放大了气候强迫的不确定性。这类不确定性在冰川模拟中可能被放大或转化，使得对流域冰川径流拐点时间的预测存在数年至数十年的差异[21]。本研究采用最新冰川编目数据 CGI-XJ2020，对塔里木内流区内冰川的空间分布、数量与面积进行了精确限定，从源头上减少了因样本范围不一致引起的系统性偏差。此外，TGSGS 模型引入了观测得到的冰川物质平衡数据作为约束与验证，提升了冰川物质平衡模拟的物理一致性与可检验性，同时利用山区实测气象资料对再分析气候数据进行了校准，有效降低了冰川消融速率估计的总体不确定性，进而提高了径流演变趋势判断的可靠性。因此，本研究估算的现阶段平均冰川径流约为 144.2×10^8 m^3，且在 SSP245 情景下径流拐点约为 2067 年的结论，相较于先前相关研究具有更高的可信度。

5.7.2　冰川径流潜力分析

基于冰川历史变化与未来情景预估、冰川径流总量及其在流域径流中的占比及径流拐点特征等多重指标综合分析，塔里木内流区冰川的产水潜力总体仍然很大，且目前处于冰川融水释放的上升阶段，融水尚未完全释放。按模拟结果，至 21 世纪 60 年代趋于稳定后，冰川径流在高位波动的态势可持续至 2100 年。在 SSP585 情景下，径流拐点相较 SSP245 情景出现时间更晚且峰值更高，主要因为更强的气温升高使更大范围、且更高海拔的冰川参与消融，从而产生更多径

流。总体来看，2050—2100年塔里木内流区呈相对偏丰的水量状态。

但需注意以下风险与不确定性。随着冰川末端持续后退，低海拔区域的产水将减少，而高海拔区域在气温升高下产水可能增加，导致融水径流对气温变化的敏感性增强。低温年份易诱发枯水与旱情，高温年份则可能引发洪涝。冰川消融产生的水量在年度内分配并不均匀，未来更可能以伴随高温事件的洪水形式出现。近年来全球高温热浪频发，热浪可通过延长融期和增强融速在短期内造成大规模冰川物质损失[20]，使径流出现非线性放大——在短时间内急剧上升并提前越过拐点，随后快速转入下降阶段。此外，关于高温与热浪诱发的融水量的精确计算、汇流过程和利用方式，目前在研究与水资源规划上仍存在明显空白，亟须开展针对性研究并在水利管理与应急调度中加以补充。

塔里木内流区由多个源流汇集而成，各源流的冰川分布与特征存在差异，导致冰川径流贡献率与拐点时点存在显著差异，因而各流域的产水潜力亦不相同。分析表明，在9条源流中，和田河与叶尔羌河的冰川径流量较大，21世纪末尚未出现明显拐点，其中和田河的冰川产流潜力最大。阿克苏河境外分布有较多冰川，与渭干河、克里雅河、喀什噶尔河、车尔臣河等相似，这些流域冰川径流量也较大，并在21世纪中后期出现拐点。随着温升情景加剧，拐点出现时间趋后且峰值更高。米兰河的冰川径流量较小，21世纪内变化不显著；开都河冰川稀少，径流量小，21世纪30—40年代达到峰值后总体呈下降波动，不同温升情景对其影响有限。鉴于塔里木内流区水资源体系对冰川融水高度依赖，一旦冰川大量退缩或消失，较新疆其他地区更易面临缺水风险和造成灾难性后果，因此必须在拐点出现后充分考虑并制定水安全应对措施。

5.8 新疆冰川径流总量推算

根据上述新疆五大主要水系冰川径流研究结果，本研究对现阶段全疆冰川径流量进行推算。杨针娘[21]曾基于冰川径流模数的估算方法，得到五大水系年均冰川径流总量为182.24×10^8 m^3，但由于使用的方法偏经验回归，所用参数为冰川消融缓慢的20世纪70—80年代所观测，因而对现阶段冰川径流的估算存在偏低。谢自楚[22]采用零平衡线与冰川面积变化之间的关系进行推算，得到的结果为208×10^8 m^3，但部分流域存在的偏差较大，如准噶尔内流水系，冰川径流高出大部分研究结果近2倍。高鑫[23]和刘国华[24]采用度日模型进行估算，分别得出191.05×10^8 m^{3}和223.35×10^8 m^{3}的计算结果，但由于实测物质平衡数据的缺乏，二者均采用其他方法代替物质平衡用以参数率定和验证，其中高鑫以雪线高度为主、冰川面积变化为辅进行参数率定，部分流域存在高估。刘国华[24]则完全依赖冰川面积变化，这种方法高度依赖冰川面积体积指数关系，对于面积变化显著的冰川可能造成用于率定的冰川体积变化量被高估，从而导致径流量被高估。

本研究基于TGSGS得到的年均总冰川径流量为185.7×10^8 m^3，这一结果通过物质平衡、冰川编目数据的多重验证，使用了最新CGI-XJ2020冰川边界，对冰川区再分析气象数据进行了实测校准验证，因而具有相对较小的不确定性。根据这一结果，对全疆冰川径流总量做一简单估算。根据CGI-XJ2020数据，本研究计算五大水系冰川径流时未覆盖的新疆境内冰川包括额尔齐斯河流域中非布尔津河流域的39条、科布多河流域的3条、印度河流域的957条、青藏高原内流区的1 055条和柴达木盆地的383条，总计2437条冰川，面积1 656.83 km^2，约占新疆冰川总面积的7%。若按照本研究所得到的平均单位冰川面积产流数值进行推算，保守估计这些未计入的冰川产生的年均冰川径流量约为14.0×10^8 m^3，由此估算出现阶段新疆年均总冰川径流量应为200×10^8 m^{3}以上。这一结果与李忠勤

等[12]在杨针娘模拟结果的基础上，结合对乌鲁木齐河源1号冰川长期观测得到的冰川产流系数的估算较为吻合。需要说明的是，冰川径流的年际波动较大，以上数值可视为多年平均值，且未包含新疆跨境河流流入或流出的冰川径流量。

6 TGSGS发展规划与管理方式

（1）从区域模拟向流域尺度研究转变。干旱区冰川流域的径流由冰川消融、降雨降雪产流及地下水补给等组分混合而成，其中冰川径流同时承担补给与调节功能。冰川变化对河流径流的影响取决于冰川径流在河流总量中的比重，比重越高，其补给与调节作用越显著。TGSGS既可以将冰川模型（物质平衡与动力学）与水文模型耦合，亦可以将冰川模型作为水文模型中的冰川消融模块，以气象资料等为驱动，开展“气候变化—冰川变化—水文响应”的系统耦合模拟，从而定量评估冰川变化对径流的影响。未来将面向新疆主要流域开展逐河解析研究，为以河流为单位的水资源利用与精细化管理提供决策依据。

（2）深度融合流溪河模型等先进物理水文模型，并嵌入机器学习、物理信息神经网络（PINNs）等新一代人工智能技术，协同构建具有自学习、自优化能力的流域“冰川-水文数字孪生体”，形成“观测—分析—模拟—预测—决策”闭环的一体化支撑体系，实现对流域水循环全过程的动态镜像与精准复现，支撑未来气候情景下水资源演变的智能推演、风险预警与适应路径优化，为打造“可感知、可预演、可调控”的智慧水治理体系提供技术支撑。

（3）TGSGS实行“边建边运行”机制，已制定运行管理办法、数据共享条例及成果归属等规范性文件。平台面向冰川学、水文学、大气科学、地理学、生态学等相关领域的国内外专家开放，鼓励跨学科合作与数据共用。

致谢 衷心感谢多位院士、专家在天山冰川站冰川模拟平台项目立项和建设过程中给予的大力支持与宝贵意见和建议。感谢天山冰川站团队成员周平、牟建新、王芳龙、李清、陈建安等在基建中付出的辛勤努力与贡献。

参考文献

1 李忠勤. 山地冰川物质平衡和动力过程模拟. 北京: 科学出版社, 2019.
Li Z Q. Simulation of Mass Balance and Dynamic Processes in Mountain Glaciers. Beijing: Science Press, 2019. (in Chinese)

2 Cuffey K M, Paterson W S B. The Physics of Glaciers. Amsterdam: Butterworth-Heinemann/Elsevier, 2010.

3 李忠勤. 中国冰川定位观测研究50年——中国科学院天山冰川观测试验站建站50周年文集. 北京: 气象出版社, 2011.
Li Z Q. 50 Years of Glacier Monitoring and Research in China—Proceedings of the 50th Anniversary of the Tianshan Glaciological Station, Chinese Academy of Sciences. Beijing: China Meteorological Press, 2011. (in Chinese)

4 Huintjes E, Sauter T, Schröter B, et al. Evaluation of a coupled snow and energy balance model for Zhadang glacier, Qinghai-Xizang Plateau, using glaciological measurements and time-lapse photography. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 2015, 47(3): 573-590.

5 Thiel K, Arndt A, Wang P Y, et al. Modeling of mass balance variability and its impact on water discharge from the Urumqi glacier No. 1 catchment, Tian Shan, China. Water, 2020, 12(12): 3297.

6 Li H L, Ng F, Li Z Q, et al. An extended “perfect-plasticity” method for estimating ice thickness along the flow line of mountain glaciers. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2012, 117(F1): 2011JF002104.

7 Xu C H, Li Z Q, Li H L, et al. Long-range terrestrial laser scanning measurements of annual and intra-annual mass balances for Urumqi Glacier No. 1, eastern Tien Shan, China. The Cryosphere, 2019, 13(9): 2361-2383.

8 Huss M, Hock R. A new model for global glacier change and sea-level rise. Frontiers in Earth Science, 2015, 3: 54.

9 Maussion F, Butenko A, Champollion N, et al. The open global glacier model (OGGM) v1.1. Geoscientific Model Development, 2019, 12(3): 909-931.

10 Rounce D R, Hock R, Shean D E. Glacier mass change in High Mountain Asia through 2100 using the open-source Python glacier evolution model (PyGEM). Frontiers in Earth Science, 2020, 7: 331.

11 Fischer M, Huss M, Kummert M, et al. Application and validation of long-range terrestrial laser scanning to monitor the mass balance of very small glaciers in the Swiss Alps. The Cryosphere, 2016, 10(3): 1279-1295.

12 李忠勤, 李开明, 王林. 新疆冰川近期变化及其对水资源的影响研究. 第四纪研究, 2010, 30(1): 96-106.
Li Z Q, Li K M, Wang L. Study on recent glacier changes and their impact on water resources in Xinjiang, north western China. Quaternary Sciences, 2010, 30(1): 96-106. (in Chinese)

13 Li Z Q, Zhan Z X, Yang Y F, et al. The Chinese glacier inventory of Xinjiang in 2020 (CGI-XJ2020): Compilation, features and primary results. Research in Cold and Arid Regions, 2025, 17(5): 269-280.

14 Qin R Z, Zhao Z Y, Xu J, et al. HRLT: A high-resolution (1 d, 1 km) and long-term (1961-2019) gridded dataset for surface temperature and precipitation across China. Earth System Science Data, 2022, 14(11): 4793-4810.

15 Zhou J Y, Lu H, Yang K, et al. Projection of China's future runoff based on the CMIP6 mid-high warming scenarios. Science China Earth Sciences, 2023, 66(3): 528-546.

16 周聿超. 新疆河流水文水资源. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 1999.
Zhou Y C. Hydrological Water Resources of Rivers in Xinjiang. Urumqi: Xinjiang Science, Technology and Public Health Publishing House, 1999. (in Chinese)

17 Wimberly F, Ultee L, Schuster L, et al. Inter-model differences in 21st century glacier runoff for the world's major river basins. The Cryosphere, 2025, 19(4): 1491-1511.

18 Zhao H Y, Su B, Lei H J, et al. A new projection for glacier mass and runoff changes over High Mountain Asia. Science Bulletin, 2023, 68(1): 43-47.

19 Huss M, Hock R. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. Nature Climate Change, 2018, 8(2): 135-140.

20 Cremona A, Huss M, Landmann J M, et al. European heat waves 2022: Contribution to extreme glacier melt in Switzerland inferred from automated ablation readings. The Cryosphere, 2023, 17(5): 1895-1912.

21 杨针娘. 中国冰川水资源. 资源科学, 1987, 9(1): 46-55.
Yang Z N. Chinese glacial water resources. Resources Science, 1987, 9(1): 46-55. (in Chinese)

22 谢自楚, 王欣, 康尔泗, 等. 中国冰川径流的评估及其未来50a变化趋势预测. 冰川冻土, 2006, 28(4): 457-466.
Xie Z C, Wang X, Kang E S, et al. Glacial runoff in China: An evaluation and prediction for the future 50 years. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(4): 457-466. (in Chinese)

23 高鑫. 西部冰川融水变化及其对径流的影响. 北京: 中国科学院大学, 2010.
Gao X. Glacier Runoff Variation and Its Influence on River Runoff in Western China. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese)

24 刘国华. 基于新参数化方案度日因子模型的中国冰川径流变化研究. 北京: 中国科学院大学, 2021.
Liu G H. Study of Glacier Runoff Changes in China Based on A New Parametric Scheme of Degree-day Model. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021. (in Chinese)

（相关图片见封二）

Simulation and projection of glaciers and their runoff in Xinjiang based on TGSGS

LI Zhongqin[1,2,3*] YANG Yefei[1,2] LIU Bowen[3] LI Huilin[1] ZHAN Zexin[1,2] WANG Feiteng[1,2,3]
XU Chunhai[1] ZHAO Weibo[1,2]

（1 Xinjiang Tianshan Glacier National Field Observation and Research Station,
Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;
2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3 College of Urban and Environmental Sciences, Shihezi University, Shihezi 832003, China）

Abstract Glaciers are large flowing ice bodies formed from snowfall in cold regions. Due to the intrinsic physical properties of ice and the complexity of boundary conditions, physically based modelling of glacier change remains a global challenge. With support from the Chinese Academy of Sciences' key science infrastructure program for the field station, the Tianshan Glaciological Station completed the Tianshan Glacier Station Glacier Simulator (TGSGS) in 2025. TGSGS features advanced representations of the physical mechanisms driving glacier change and multi-scale ensemble strategy, and is integrated with a reference glacier observation network based on terrestrial laser scanning (TLS), a low-temperature laboratory for simulating key glacier ablation processes, and the TGSGS database, thereby constituting a strategic national facility for glacier hydrological research. The change in Xinjiang's glacier associated water security is closely linked to national western development and the Belt and Road Initiative. The primary goal of TGSGS is to support this significant and urgent scientific need. Based on TGSGS, the glacier and its runoff variations for Xinjiang's five major drainage systems have been simulated and projected, including the Irtysh river basin, the Junggar inland drainage system, the Ili river, the Turpan–Hami inland drainage, and the Tarim river basin.

Keywords glacier, glacier mass balance, glacier dynamics, terrestrial three-dimensional laser scanning

李忠勤 中国科学院西北生态环境资源研究院研究员，世界冰川监测服务处（WGMS）中国通讯员，中国冰冻圈科学学会（筹）冰川专业委员会主任。长期从事冰川学研究。E-mail: lizq@lzb.ac.cn

LI Zhongqin Ph.D., professor in Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences (CAS). He currently serves as Chinese National Correspondent of World Glacier Monitoring Service (WGMS) at Zurich University, Switzerland, and chair for Glaciology Committee of China Society of Cryospheric Science. His main research focuses on glaciology research. E-mail: lizq@lzb.ac.cn

■责任编辑：张帆

*Corresponding author