DOI:10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202511090148

雅鲁藏布江下游主要不良地质条件与重大工程地质问题

薛翊国[1,2,*]，渠敬凯[1,2]，彭建兵[1,2]，王怀兵[1,2]，刘新宇[1,2]，段进睿[1,2]，曲子鸣[1,2]，王 博[1,2]，贾侠敏[1,2]，韩昭帝[1,2]，张涵铭[1,2]，雍 禾[1,2]

（1. 中国地质大学（北京）工程技术学院，北京 100083；2. 深部探测与成像全国重点实验室，北京 100083）

摘要：雅鲁藏布江下游开发建设对促进我国边疆地区经济发展、国家的能源结构优化以及国际间经济合作等方面具有重要的战略意义，然而其地处全球构造活动最为强烈的喜马拉雅东构造结，地质条件恶劣，工程地质问题复杂，给现代工程地质的理论体系与技术方法带来了前所未有的挑战。立足于地球系统科学的宏观视角，基于大量文献调研深度解析雅鲁藏布江下游区域主要不良地质条件以及潜在的重大工程地质问题，并为未来重大工程建设提供研究建议。研究表明：雅鲁藏布江下游主要不良地质条件表现为“内外动力耦合、多重因素叠加、空间变异显著”的系统性特征，具有“五高”（高落差、高地震烈度、高地应力、高渗透压、高地温）、“四强”（构造作用强、断裂活动强、冰川及冻土退化强）、“两特殊”（特殊的岩土体、隐伏溶洞）等突出特点。在高山峡谷地形、复杂构造及气候等多因素叠加下极易诱发崩塌、滑坡与泥石流等地质灾害，具有“突发性、链生性、强破坏性”的特征，深埋隧道在复杂应力场、渗流场与温度场等多物理场强耦合作用下面临软岩大变形、突水突泥以及岩爆等重大工程地质问题，严重制约工程建设与运营安全。因此，未来研究应着眼于阐明多场耦合致灾机理、多维度监测预警和强韧协同治理等重大科学问题，保障雅鲁藏布江下游重大工程安全高效实施；研究成果可为该类世界级复杂工程的地质安全保障提供科学依据。

关键词：雅鲁藏布江；不良地质条件；工程地质问题；地质灾害；深埋隧道

中图分类号：P642；TU45 **文献标志码：**A **文章编号：**1000-8527(2026)01-0001-30

Main Unfavorable Geological Conditions and Gigantic Engineering Geological Problems of the Lower Reaches of the Yarlung Zangbo River

XUE Yiguo[1,2,*], QU Jingkai[1,2], PENG Jianbing[1,2], WANG Huaibing[1,2], LIU Xinyu[1,2], DUAN Jinrui[1,2], QU Ziming[1,2], WANG Bo[1,2], JIA Xiamin[1,2], HAN Zhaodi[1,2], ZHANG Hanming[1,2], YONG He[1,2]

(1. *School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing* 100083, *China*; 2. *State Key Laboratory of Deep Earth Exploration and Imaging, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: The development and construction of the lower reaches of the Yarlung Zangbo River hold significant strategic importance for promoting economic growth in border regions, optimizing the national energy structure, and enhancing international economic cooperation. However, this area is located within the eastern Himalayan tectonic belt, one of the most seismically active regions in the world, facing exceptionally harsh geological con-

收稿日期：2025-11-09；**修回日期：**2025-12-29；**编辑：**戚开静。

基金项目：国家自然科学基金项目（U2468221，42577198）。

作者简介：薛翊国，男，教授、博士生导师，1976年出生，地质工程专业，主要从事工程地质和隧道地质灾害超前预报与治理方面的教学与研究工作。Email：xueyiguo@cugb. edu. cn。

引用格式：薛翊国，渠敬凯，彭建兵，等. 雅鲁藏布江下游主要不良地质条件与重大工程地质问题［J］. 现代地质，2026，40（1）：1-30. DOI：10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202511090148.

XUE Yiguo, QU Jingkai, PENG Jianbing, et al. Main Unfavorable Geological Conditions and Gigantic Engineering Geological Problems of the Lower Reaches of the Yarlung Zangbo River［J］. GEOSCIENCE, 2026, 40（1）: 1-30. DOI: 10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202511090148.

ditions and complex engineering geological challenges that are rare on a global scale. This study adopts a macro perspective grounded in earth system science and conducts an in-depth analysis of the region's major adverse geological conditions and potential significant geotechnical issues based on extensive literature research. It also provides recommendations for future large-scale engineering projects. The findings reveal that the adverse geological conditions in this region exhibit systematic characteristics, including "coupling of internal and external dynamics, overlay of multiple factors, and significant spatial variability". Notably, these conditions are marked by "five highs" (high elevation difference, high seismic intensity, high tectonic stress, high permeability, and high ground temperature), "four strengths" (intense tectonic activity, strong fault activity, and substantial glacial and permafrost degradation), and "two specials" (unique geological formations and concealed dissolution cavities). The interplay of mountainous terrain, intricate geological structures, and climatic factors renders the region highly susceptible to various geological disasters, such as collapses, landslides, and debris flows, characterized by their "suddenness, chain reactions, and high destructiveness". Deeply buried tunnels face complex engineering geological problems under the strong coupling of stress fields, seepage fields, and thermal fields, including large deformations in soft rock, water and mud inrushes, and rock bursts, all of which severely constrain construction and operational safety. Therefore, future research should focus on elucidating the mechanisms of disaster induced by multi-field coupling, establishing multi-dimensional monitoring and early warning systems, and developing robust and synergistic governance frameworks. This will ensure the safe and efficient implementation of gigantic engineering projects in the lower reaches of the Yarlung Zangbo River. The research outcomes will provide a scientific basis for the geological safety assurance of such world-class complex engineering projects.

Key words: Yarlung Zangbo River; unfavorable geological condition; engineering geological problem; geological disaster; deep-buried tunnel

0 引 言

2025 年 7 月 19 日，雅鲁藏布江下游水电工程开工仪式在西藏自治区林芝市举行，这标志着我国重大工程建设正在稳步推进，也是推动西部大开发，实现西部经济大发展的重要举措[1-2]。一系列的工程建设将为我国加快构建新发展格局、推动高质量发展发挥积极作用，对深入推进“双碳”目标、应对全球气候变化具有重大意义[3]。西部重大工程的持续推进不仅大幅提升我国西部资源的开发利用程度，还将为保障能源安全、加快能源转型和促进区域经济发展等方面带来深远影响[4]。

雅鲁藏布江下游地区位于喜马拉雅东构造结，是喜马拉雅造山带向东延伸的末端，其构造组成复杂，从北至南依次为拉萨地体、雅鲁藏布江缝合带和喜马拉雅地体三个构造单元[5]。该地区是多种地质作用特别活跃和强烈的区域，表现为极高的构造应力值、极快的地壳隆升、极强的剥蚀速率及极为显著的新生代变质与深熔作用[6]。作为印度与欧亚两大板块陆-陆碰撞造山的前沿地带，该区域的板块界限、构造格架和地貌水系均呈现急剧的转折形态，相关的地球动力学问题已成为全球地球科学研究的热点[7]。因此，在雅鲁藏布江下游地区开展大型工程建设，将面临复杂的地质安全风险。

雅鲁藏布江下游包括帕隆藏布和易贡藏布两大支流，地形复杂多变，地势起伏较大，高程在 500～7782 m，受构造控制明显，走向总体顺构造线展布[8]。研究区属藏东南高山峡谷地貌，山势陡峻，沟谷纵横，高山、极高山地貌主要位于海拔 3500 m 以上区域，现代冰川与古冰碛物十分发育（图 1）。研究区气候类型主要为高原亚热带湿润季风气候和高原温带半湿润季风气候，降雨量在 800～2350 mm 之间，最大可达 4500 mm（图 2）。复杂地形地貌与充沛降水的耦合作用，为崩塌、滑坡、泥石流以及链生地质灾害的形成提供了有利条件，从而对下游一系列重大工程的规划与建设构成潜在的安全威胁。

雅鲁藏布江下游地区岩性复杂多样，区域上

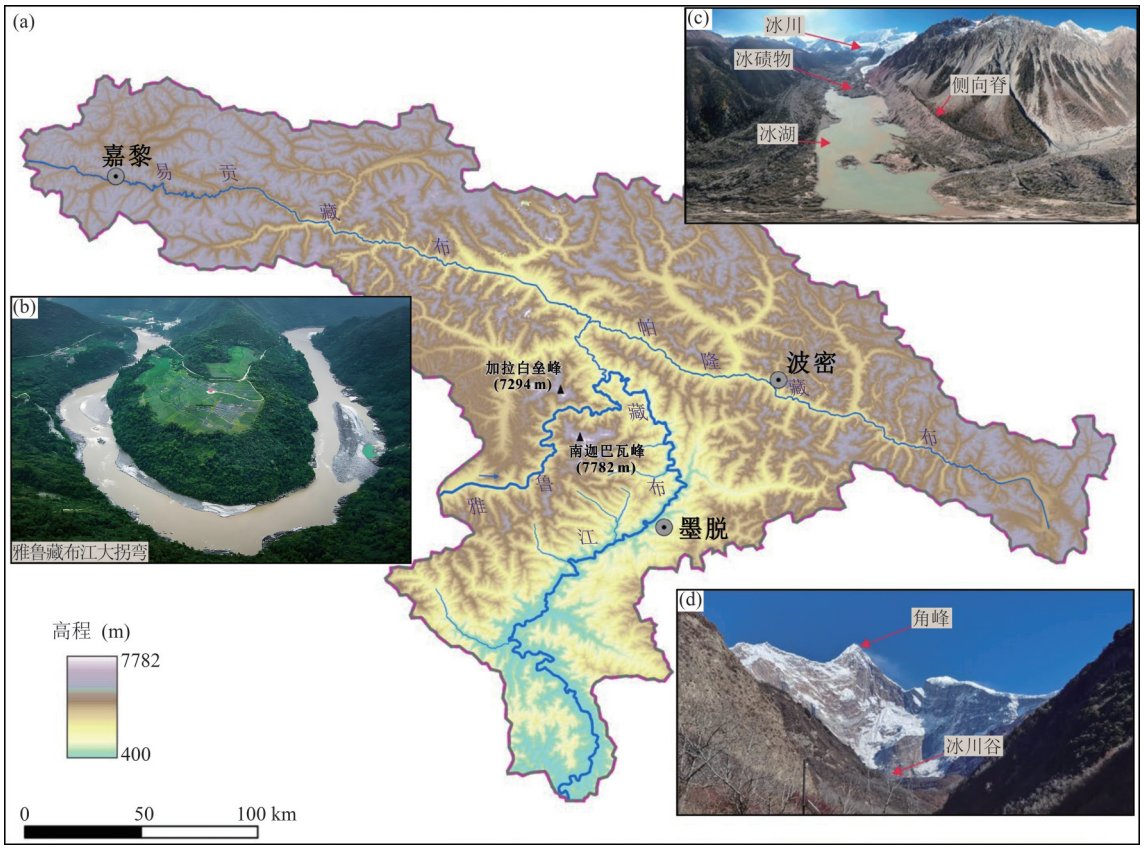


图 1　雅鲁藏布江下游地形地貌图（据张田田 [8] 修改）

Fig. 1　Topographic and geomorphic map of the lower reaches of the Yarlung Zangbo River （modified by Zhang [8] ）

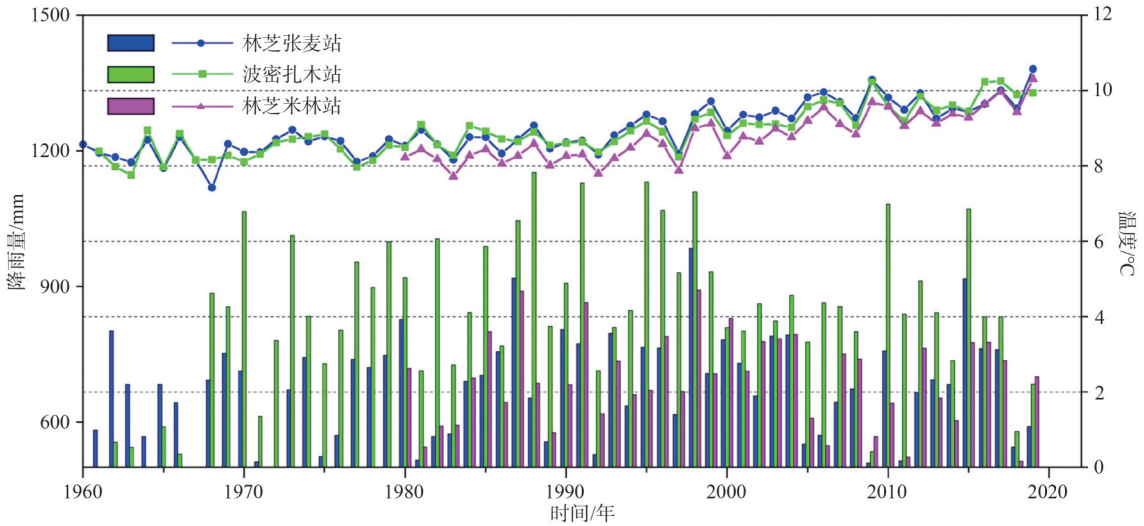


图 2　雅鲁藏布江下游年平均降水量和平均气温变化趋势（数据来源于中国气象局）[8]

Fig. 2　Trends in annual average precipitation and average temperature in the lower reaches of the Yarlung Zangbo River （data from China Meteorological Administration）[8]

包括念青唐古拉群、冈底斯岛弧带、察隅岩浆带以及前震旦纪地层，区域内南迦巴瓦变质体以及雅鲁藏布江缝合带混杂岩带十分发育，在复杂的岩石组成和不同期次、不同构造层次的叠加变形下，岩石破碎，蚀变岩发育，构造片理化强烈，岩性结构在纵向上、横向上变化剧烈，岩质总体较软，导致松动山体极为发育 [7]。与此同时，第四系冰碛物也是研究区重要的致灾地层，主要为冰川堆积和冰水堆积，分布于冰舌前缘及沟谷两侧，具有“厚层-粗粒-松散-富集”的综合特征 [9]。

随着雅鲁藏布江下游一系列工程建设的陆续展开，未来深埋长隧道和水库将会成为研究区内极其重要的构筑物[10]。然而，由于地处喜马拉雅东构造结，构造活动强烈，地震频发，极端气候显著，导致研究区活动断裂带、特殊岩体、高地应力、高渗透压、高地温、冰川及冻土和隐伏溶洞广泛发育，在未来工程建设与运营过程中将会面临巨大的工程地质挑战。崩塌、滑坡、泥石流以及高位远程滑坡等库岸工程地质问题和软岩大变形、突水突泥、岩爆以及塌方等深埋隧道工程地质问题，为雅鲁藏布江下游重大工程施工设计提出前所未有的科学技术挑战。

目前，不少学者已对雅鲁藏布江下游主要不良地质条件与工程地质问题开展了一定的研究工作，并取得了相关的成果。李志威等[11]通过野外调查分析认为河床结构的消能作用对维持边坡稳定性起至关重要作用，并针对梯级高坝和引水隧洞的两种水电开发方案进行分析，认为修建引水隧洞将会降低对边坡稳定性产生的不利影响，可将水电工程的不利影响减少到最小。李滨等[9]对喜马拉雅东构造结工程选址面临的地质安全挑战进行了分析，提出了工程选址的“区域地质演化与工程地质问题”“活动断裂及工程安全风险”“复杂地应力场及工程灾变风险”“流域性地质灾害链工程风险”和“东构造结工程选址理论方法”共5个方面研究方向，为完善工程选址风险评价与防控方法提供思路。

雅鲁藏布江下游地处青藏高原东南缘，是我国地质灾害最为活跃和强烈的地区之一，崩塌、滑坡与泥石流等灾害频发，百米级高陡边坡在地震或强降雨等极端条件下，易发生大规模的集中性失稳，进而演化为特大型滑坡或滑坡群，并时常引发江道堵塞，已成为全球范围内地质灾害发生频率最高的区域之一[12-13]。王盈等[14]通过对藏东南地区地质灾害空间分布的调查，查明雅鲁藏布江下游区域共发育603处地质灾害点，其中泥石流灾害最为发育，共计306处，还包括176处滑坡和121处崩塌。这些灾害点的空间分布呈现显著的非均衡性与分段聚集特征，主要集中于雅鲁藏布江流域的北段，除此之外该区域仍广泛分布着大量潜在的重大地质安全隐患点[15]。雅鲁藏布江下游也是高位远程地质灾害的高易发区，殷跃平和高少华[16]通过对高位远程链动力学的研究，认为其具有冰/岩崩—碎屑流—泥石流—堰塞坝—堰塞湖溃决山洪—侧蚀次生滑坡链动过程，而未来随着蓄水量的增加，地质灾害诱发的一系列工程地质问题将会更加凸显。

深埋隧道作为雅鲁藏布江下游工程建设的主要组成部分，也是进军深部空间的主要工程地质挑战[17]。“高应力、高渗压、高地温”极复杂地质条件和极强构造活动区等极端条件，致使隧道在建造过程中面临着软岩大变形、岩爆以及突水突泥等重大工程问题，成为制约深地工程建设运维的瓶颈[18]。王喜华等[19]对雅鲁藏布江峡谷段隧道实地调查表明，区域内围岩受地质构造影响严重，节理裂隙发育，岩体破碎，易发生隧道大变形和突水突泥等灾害。严健等[20]通过对雅鲁藏布江缝合带深埋隧道高地温、高地应力条件的分析，认为大地热流和局部熔融体埋深是导致区域内深埋长大隧道群岩爆的主要原因。秦向辉等[21]利用水压致裂法地应力数据，研究了东构造结北缘地应力场特征，结果显示最大、最小水平主应力随深度增加梯度分别为2.49 MPa/100 m和1.61 MPa/100 m，并且现今地应力水平未达到极限状态，未来应力将进一步积累。

雅鲁藏布江下游重大工程开发面临极其困难的地质条件和工程问题，迫切需要在各个层面进行系统研究。然而，目前关于板块动力运移特征及其对重大工程灾害的影响、多因素耦合作用下高山峡谷地质灾害的形成机制以及复杂地质构造条件诱发重大工程地质问题方面的研究仍不够深入；因此，本文基于大量文献调研，对雅鲁藏布江下游主要不良地质条件与重大工程地质问题进行全面分析与阐述，结合现有研究成果为潜在工程问题提出防控建议，旨在为未来雅鲁藏布江下游重大工程安全施工与运营提供思路。

1 区域不良地质条件

雅鲁藏布江下游位于印度板块和欧亚板块碰撞的前缘地带，新构造运动活跃，岩性条件复杂且发育隐伏溶洞，地应力场集中，断裂带沿线地热资源丰富，峡谷两岸地势起伏大，高山分布众多，河谷深切冰川及冻土等地质现象广泛发育，这些地质条件可能未来将会对重大工程建设和运营带来重大影响。

1.1　构造活跃

雅鲁藏布江下游地区位于印度板块和欧亚板块构造边界带，地壳运动极为强烈，频繁的应力场调整构成地质灾害的潜在风险[22-25]。区域内密集分布的活动断裂带，既破坏了地壳结构的完整性，又控制了地震活动的频发。其中雅鲁藏布江断裂、嘉黎断裂、东久—米林断裂及墨脱断裂等主干断裂带，规模宏大且活动性强，对工程的建设与运营构成严重威胁，此类断裂易诱发地震、地表位错等地质灾害，直接危及工程的稳定性与安全性[26-30]。

1.1.1　板块作用强烈

雅鲁藏布江下游处于印度板块向欧亚板块俯冲与楔入的前缘地带[31-34]，是全球构造活动最为强烈、地貌演化最为显著的地区之一[35-36]。该区域构造上隶属于喜马拉雅造山带东构造结的核心部分[37]，自北向南可划分为南迦巴瓦、桑和阿萨姆三个次级构造结（图3）。其东、西、北三侧分别受一系列大型韧性剪切带围限，整体构成一个向北东倾伏的复式背形穹窿构造[38-40]。具体而言，东边界主要受左旋走滑性质的东久—米林断裂控制，西边界以右旋走滑性质的阿尼桥—墨脱断裂为界，北侧则主要受嘉黎右旋走滑断裂带限定。喜马拉雅造山带东构造结可进一步划分为三大地质构造单元：外部为拉萨地体及其中广泛侵入的冈底斯岩弧岩浆岩；内部为南迦巴瓦变质体；二者之间为雅鲁藏布江缝合带[41]。南迦巴瓦变质体位于呈倒“U”形展布的雅鲁藏布江缝合带内侧，而冈底斯—拉萨地块分布于其外围，整体构成复式背形构造[42]。在复式背形构造的东西两侧分别发育墨脱右行剪切带和东久—米林左行剪切带，北侧则以嘉黎断裂为界。在该区域诸多断裂系统中，雅鲁藏布江缝合带和嘉黎断裂带为两条最主要的区域性断裂。雅鲁藏布江缝合带作为印度板块与欧亚板块的构造分界线，记录了从新特提斯洋俯冲、印度—亚洲大陆碰撞到青藏高原汇聚边缘形成的完整构造演化序列[43-44]。嘉黎断裂带位于拉萨地块内部，处于雅鲁藏布江缝合带与班公错—怒江燕山期缝合带之间，具有显著的右行走滑特征，对该区域的构造格架与地块运动具有重要控制作用[45-46]。

1.1.2　活动断裂带密集

雅鲁藏布江下游地区活动断裂密集发育，包括雅鲁藏布江断裂、嘉黎断裂、东久—米林断裂和墨脱断裂，其断裂属性、规模、活动时间、活动强度具有明显差异（图4）。这些断裂往往控制了区内山脉的发育和走向。这些断裂带的叠加效应使得墨脱地区成为地质灾害的高发区，对工程建设提出了严峻挑战。

（1）雅鲁藏布江断裂。

雅鲁藏布江断裂作为该区域的重要构造，其活动性对河谷形态及周边地质环境产生了深远影响[47]。雅鲁藏布江断裂带总体呈东西向，在米林附近转为东北向，倾向南，具有逆冲性质。该断裂带主要由南、中、北三条平行断裂组成，呈“S”形展布，经历了始新世末、中新世末和更新世三个逆冲发展阶段，并表现出挤压逆冲作用与伸展裂陷作用相互交替的活动趋势。

（2）嘉黎断裂。

嘉黎断裂以其复杂的走滑运动特征而闻名，其活动不仅改变了局部地应力场，还显著影响了周边河流的侵蚀与堆积过程。嘉黎断裂位于嘉黎至察隅之间，是“喀喇昆仑—嘉黎剪切带”最东端的一条重要断裂[29]。该断裂属于晚第四纪强烈活动的断裂类型，其活动性质在不同构造位置表现出明显差异，具有显著的构造活动分段性。以东构造结为界，嘉黎断裂可分为三段：东构造结西北的那曲—嘉黎段为西段，东构造结顶端的易贡—通麦段为中段，东构造结东南的波密至察隅段为东南段。西段以右旋走滑为主，伴随挤压运动，断层地貌特征显著，可见断层崖、水系错动、坡中谷、断头沟等地貌现象。中段表现为弱右旋挤压运动，断裂结构较为单一，地貌上呈现一系列垭口，分布于易贡藏布河谷半坡位置，断裂两侧夷平面和河曲的位错不明显。东南段则分为南北两支：北支主要沿帕隆藏布西南侧展布，经然乌湖南侧，穿过古玉乡并向东南延伸，晚第四纪活动较弱。南支断裂在过通麦后继续向东南方向延伸，经过嘎隆拉，沿贡日嘎布曲展布，晚第四纪活动较强，表现为左旋走滑运动。

（3）东久—米林断裂。

东久—米林断裂作为南迦巴瓦变质体的西边界，分布于米林、鲁朗、通麦沿线，总体呈东北走向，倾向东南[48]。东久—米林断裂属于新生走滑构造带，该断裂带的活动导致区域内地形起伏加剧，形成了多级夷平面与深切峡谷并存的地貌景观。该断裂带由两条大致平行的次级断裂组成，

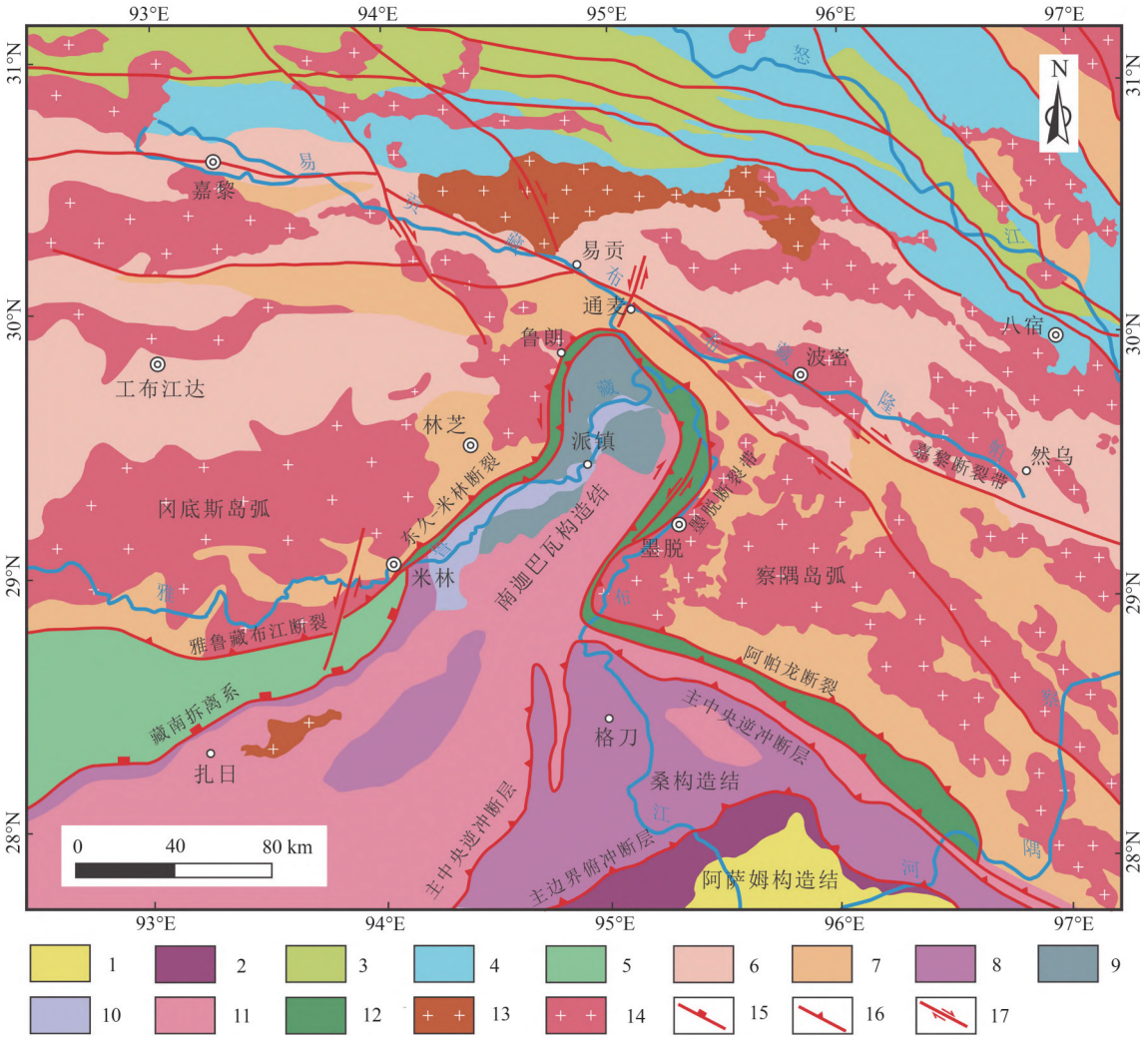


图3 雅鲁藏布江大拐弯地区区域地质背景[36]

Fig. 3 Regional geological background of the major bend area of the Yarlung Zangbo River[36]

1. 第四系冲洪积物;2. 新近系;3. 白垩系;4. 三叠系—侏罗系;5. 三叠系;6. 古生界;7. 前寒武系片麻岩;8. 新元古界;9. 直白片麻岩;10. 派乡片麻岩;11. 南迦巴瓦岩群;12. 雅鲁藏布江缝合带;13. 古近纪花岗岩;14. 侏罗纪—白垩花岗岩;15. 正断层;16. 逆断层;17. 走滑断层

根据变形性质的差异性，该断裂带自北向南可进一步划分为三段：拉月—帕隆乡段、鲁朗—拉月段及嘎马—米林段。拉月—帕隆乡段位于雅鲁藏布江大拐弯缝合带北端，由向北凸出、向北陡倾，倾角50°~70°的弧形面理带构成，外侧为念青唐古拉岩群，内侧为南迦巴瓦岩群。在大拐弯缝合带处，带内岩石经历了强烈的糜棱岩化。该段断裂具有韧性逆冲（兼挤压转换）性质。鲁朗—拉月段的走向由北段的东北向渐变为南段的南北向，倾向南东东至东，倾角70°~80°。断裂带内岩石强烈糜棱岩化，以角闪岩相变质为主，间杂低绿片岩相，具有左行走滑性质。嘎马—米林段的走向为30°~50°，倾向西北或东南，倾角60°~75°，具有左行伸展转换剪切性质。

（4）墨脱断裂。

墨脱断裂作为喜马拉雅山地震带的关键构造，其持续活动不仅频繁引发地震事件，还通过地震波的传播对周边岩体造成累积性损伤，进一步加剧了工程区域的稳定性问题。墨脱断裂带位于南迦巴瓦变质体的东部边界，从波密一带向西南延伸，大致沿达木至都登的雅鲁藏布江大峡谷展布，南侧与阿波尔山断裂斜接或重接[49-50]。该断裂带由多条次级断层斜列组成，沿断裂带普遍发育断层槽谷、跌水、山脊和水系位错等地质现象，是一条典型的走滑构造带。墨脱断裂带自南至北可分为三部分：东北走向的阿尼桥—希让

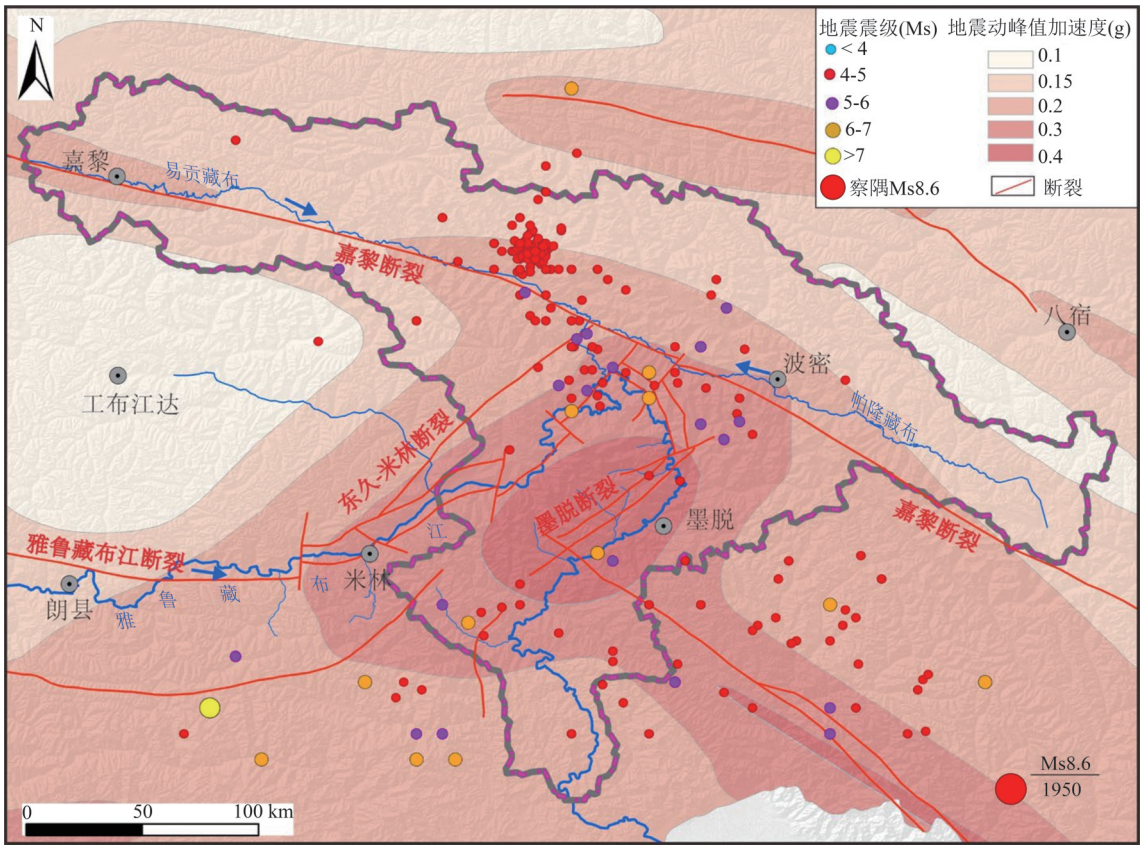


图 4　研究区周边断裂及地震分布（据张田田[8]修改）

Fig. 4　Faults and earthquake distribution in the study area and surrounding areas [8]

段，近南北向的旁辛—达木段，以及北北西向的甘登—加拉萨段。阿尼桥—希让段位于墨脱断裂带的最南端，总体走向为东北—西南向，倾向东南，倾角 50°～70°，局部较缓，是一条兼具右行和拉张性质的剪切带。旁辛—达木段是墨脱剪切带最宽的部位，近南北走向，具有右行走滑性质。甘登—加拉萨段大致走向为 300°～345°，倾向东北，倾角 60°～75°，是一条兼具右行和逆冲运动的剪切带。

综上所述，区域内各断裂带独特的活动特征与空间分布，不仅塑造了区域复杂的地貌格局，更对雅鲁藏布江下游重大工程选址、工程体稳定性评估及抗震设计提出了多维度挑战。墨脱断裂带中阿尼桥—希让段的拉张性质、旁辛—达木段的强走滑活动以及甘登—加拉萨段的逆冲作用可能会导致边坡失稳、坝基破坏以及洞室围岩失稳等灾害。这些断裂带的交互作用还可能形成地震波的放大效应，加剧工程区域的地震响应。此外，断裂带周边普遍发育的断层破碎带与影响带，其岩体完整性差、渗透性强，可能引发库区渗漏或坝基抗滑稳定性下降问题。

1.1.3　地震活动频发

雅鲁藏布江下游地区构造背景复杂，地震活动频繁且强烈，区域地震活动与板块碰撞密切相关，印度板块向欧亚板块的俯冲楔入最前缘被多条活动断裂限定[51]。历史地震记录表明，雅鲁藏布江下游曾发生多次大规模地震，如 1950 年察隅 *M*s 8.6 级地震，其破坏力巨大，造成近 4000 人死亡，震中察隅县城烈度达 11.0 级，雅鲁藏布江被截成四段[52]。2017 年米林 *M*s 6.9 级地震，最大烈度为 8 级，影响面积约 310 km^2，造成约 12000 多人受灾，3000 栋房屋受损，雅鲁藏布江多处被堵塞[53]。除高震级地震外，该地区中强地震活动也较为频繁，如 2019 年墨脱 *M*s 6.3 级地震[54]、2020 年丁青 *M*s 5.1 级地震[55]等，这些地震虽震级相对较低，但对当地居民生活和基础设施仍造成一定影响，还极易引发滑坡、泥石流等次生地质灾害。

研究表明，雅鲁藏布江下游地区的滑坡主要沿活动断裂带分布，强震区滑坡密度明显增高[56]。同时，雅鲁藏布江河谷在地质历史上因多次地震导致河谷地貌发生变化[42]。雅鲁藏布江下游地区地震活动在时间和空间上表现出一定的不

均匀性，在时间上地震活动存在一定的活跃期和平静期交替现象，在空间上地震多集中在构造活动强烈的区域，如活动断裂带附近，而在构造相对稳定的区域地震活动则相对较少[57-58]。因此，雅鲁藏布江下游地区地震活动表现出显著的时空不均匀性，中强地震活动频繁且破坏性巨大，极易诱发大规模的次生灾害。这些特征使得该地区地震灾害风险较高，对当地的地质环境、工程建设和居民生活带来了巨大挑战，也对该地区的地震监测、预警和灾害防治工作提出了更高要求。

1.2 特殊岩体

雅鲁藏布江下游从西向东穿越了喜马拉雅造山带东段、雅鲁藏布江缝合带东延部分、藏南拆离系、冈底斯—念青唐古拉地块东南缘以及南迦巴瓦构造等复杂地质构造单元[42]，形成以元古代高级变质岩、古生代沉积盖层（碳酸岩夹砂泥质岩、页岩）、中生代浊积岩、花岗岩、英安质岩为主的特殊岩体组合[59]。这些岩体广泛分布于深切峡谷、高位斜坡和断裂带内，几乎涵盖了易发生软岩大变形、硬岩应力破裂及复合型岩体失稳的全部岩性条件[60]。作为印度板块与欧亚板块碰撞的关键边界，其东段构造活动性强烈，地应力环境极为复杂，具有高地应力背景和高应变速率特征[19]。该区域软岩大变形问题显著，尤其在深埋隧道工程中，片岩、千枚岩、绿泥石化蚀变岩等低强度岩体在高地应力作用下持续蠕变，导致TBM卡机、围岩收敛和支护结构失效[61-62]。同时，区域性地温梯度较高，地下水系统发达，深埋工程面临显著的热-水-力耦合作用环境。高温环境虽在一定程度上抑制岩石瞬态蠕变速率，但高孔隙水压会显著促进蠕变应变积累，大幅提高岩体长期变形风险[63]。

相较于传统岩石工程背景，雅鲁藏布江下游地区岩体变形机制更具特殊性与复杂性。强烈构造挤压、高地温、高渗透压力、频繁动力扰动共同构成极端多场耦合环境，软岩大变形行为表现出较强的时间依赖性、显著的非线性及各向异性特征[64]。目前，针对该区域特殊岩体的研究仍处于初步阶段，尤其是强构造带内复理石与糜棱岩的力学行为、缝合带挤压转换机制与硐室响应规律、深大断裂带岩体破裂扩展与变形协同机制等方面认知仍十分有限，相应的灾害预测理论与控制技术研究也较为薄弱，亟须开展系统性的地质力学与多场耦合模型研究。

1.3 高地应力

雅鲁藏布江下游区域受印度—欧亚两大板块持续挤压作用，构造残余应力长期显著积聚，形成以水平构造残余应力为主导的极端高地应力环境，成为全球范围内水平构造应力集中现象最突出的区域之一[21]。Harihar等[65]对尼泊尔喜马拉雅地区的震源机制解显示，NEE向主压应力方向（60°～70°）与雅鲁藏布江下游实测结果高度一致。而在早期地应力研究中，曹忠权等[66]利用水压致裂法对雅鲁藏布江断裂带沿线地应力场长期演化特征展开研究，测算得出在133～296 m埋深范围内，最大水平主应力为9.51～13.59 MPa，最小水平主应力为5.75～10.31 MPa，垂直应力为3.6～8.0 MPa。该地区地应力分布呈现显著的垂向分带特征，埋深< 500 m时地应力为自重应力主导，最大主应力范围在10～20 MPa之间；埋深位于500～1000 m之间时应力类型为构造-自重耦合，最大主应力范围在20～35 MPa之间；埋深> 1000 m时，应力类型完全过渡为深部构造应力主导，最大主应力范围在60～120 MPa之间，且构造应力贡献率超过70%。这一垂向分带规律为深埋隧道工程的分层设计与支护方案优化提供了关键依据（图5）。

从区域动力学背景来看，刘勇[38]基于GPS地壳运动检测与内外动力耦合理论研究发现青藏高原整体以30～40 mm/a的速度沿北偏东约50°方向移动，板块挤压作用下区域地应力持续攀升。雅鲁藏布江下游深切峡谷（相对高差> 2000 m）的强烈下切卸荷，引发谷坡岩体应力重分布，岸坡浅表部（0～300 m）应力增幅可达到原始值的1.4～1.8倍，形成“深部高构造应力-浅表高卸荷应力”的双重应力环境。东构造区域地壳缩短速率较高，进一步促使地应力梯度升至3.2～3.8 MPa/100 m（埋深1000 m），远超一般山区的平均水平。张斌等[67]同样采取水压致裂法对墨脱地区开展了地应力测量，结果显示墨脱关键构造区西让地应力孔61.43～121.34 m测试段的最大水平主应力值为3.05～14.50 MPa，最小水平主应力值为2.16～9.87 MPa，垂向主应力值为1.63～3.31 MPa，其主应力值随着深度增加有逐渐增大的趋势，最大主应力方位角分别为NE 79.6°和NE 70.5°，即最大水平主应力优势方向为北东东向。整体上雅鲁藏布江缝合带断裂构造作用活跃，错动、挤压变

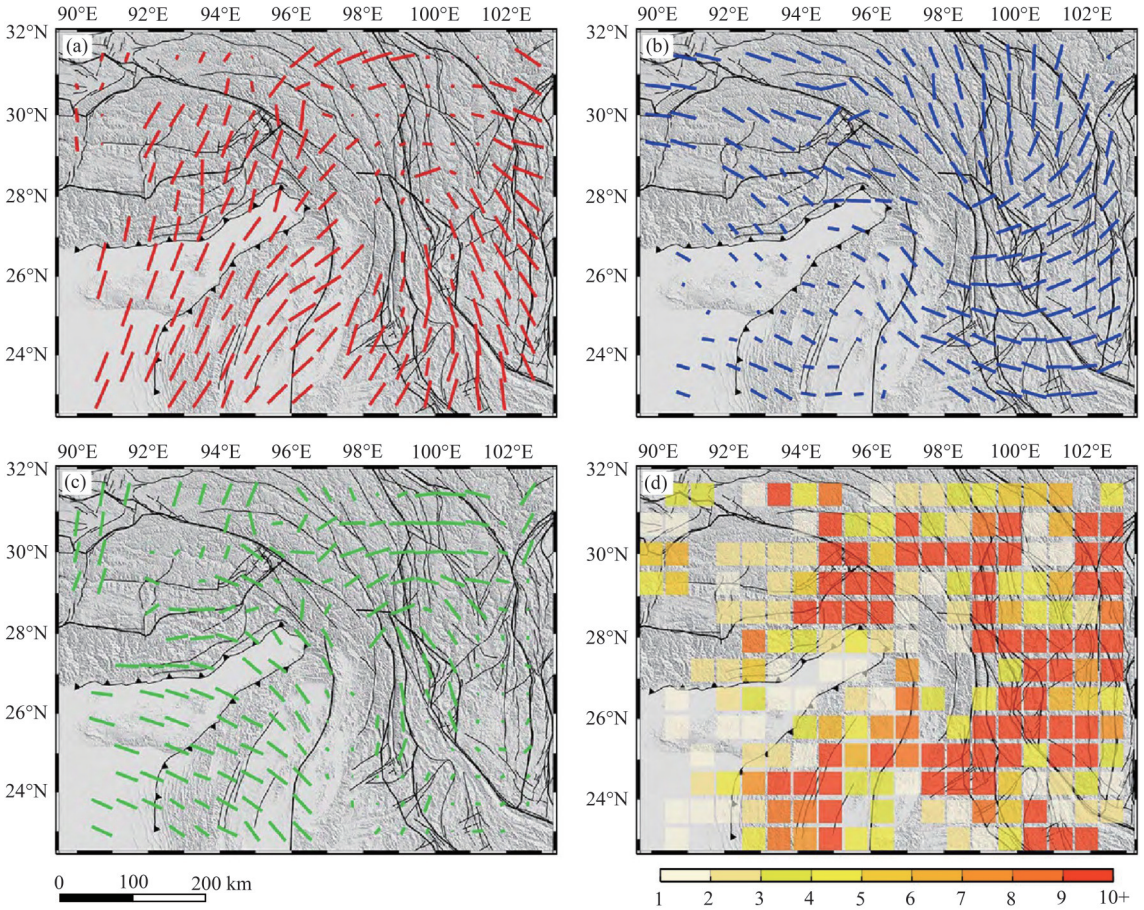


图 5　喜马拉雅东构造结及周缘地区应力场[68]

Fig. 5　Stress field of the eastern Himalayan tectonic knot and its surrounding areas[68]

(a)最大主压应力轴;(b)中间应力轴;(c)最小主压应力轴;(d)不同网格反演应力所用到的震源机制的数量

形强烈，在工程响应方面，邵战涛等[69]在藏木水电站坝的工程研究中提到坝基混凝土受拉应力影响损伤相对明显，且坝体右岸地应力最大值高于左岸，证实水平构造应力是控制坝基长期稳定性的核心因素，也凸显出研究区内高地应力对工程结构安全的潜在威胁。

1.4　高渗透压

雅鲁藏布江下游气候主要受中纬度西风和南亚季风的影响，降水充沛，短时强降水集中，是我国降水最为丰富的区域之一，独特的气候条件为其提供了丰富的水源补给[70-71]。同时，受印度板块与欧亚板块的挤压碰撞作用，形成了密集的断层、剪切带及褶皱构造，是地下水、泥砂等混合体耦合演化的运输转移通道[72]。在水源条件方面，张仪辉等[71]发现雅鲁藏布江流域年降水量在436.0～691.7 mm之间波动变化，且整体呈2.5 mm/a的显著上升趋势。在印度洋暖湿气流的持续影响下，下游地区降水强度大、持续时间长，使地表水及浅层地下水得以长期补给深部含水系统，为深部地下水压力的不断累积提供了必要前提[73]。从构造与地层方面看，雅鲁藏布江下游断层、剪切带及褶皱构造密集发育，既为地下水向深部运移提供了有效通道，也在不同构造层位形成了相对独立的含水-隔水组合[74]。同时，深部灰岩和白云岩等可溶性岩层易形成岩溶裂隙、管道及地下暗河系统，具备较强的储水能力，为地下水在深部循环积聚创造了极为有利的条件[75]。在深埋隧道工程中，这种活跃的水文地质系统在巨大的地应力环境下被强烈压缩，但由于隔水边界的存在，水体难以自由逸散，最终形成极高的孔隙水压力[76]。

因此，雅鲁藏布江下游区域高渗透压环境的形成，是充沛的水源补给、发育的导水构造与深部良好的地层密封条件等多因素耦合作用的结果。这种高渗压条件极大地降低了围岩的稳定性，不仅加剧了岩体的软化效应，削弱了结构面的有效

应力和抗剪强度，更在开挖卸荷过程中产生巨大的水力梯度，极易引发掌子面突泥涌水等灾害性事故，对深部地下工程的施工与运营安全构成严峻挑战[77-80]。

1.5 高地温

雅鲁藏布江下游区地处印度板块与欧亚板块碰撞前缘带附近，为岩浆活动和深部热源上涌创造了有利条件，形成了地热异常区[81]。雅鲁藏布江下游峡谷水热活动带包括林芝、波密、墨脱地热区，总体特征为水热活动分布明显受北西至南东向断裂的控制，水热区多集中在雅鲁藏布江中心大拐弯向北东方向突出的顶端一带，构造应力非常集中，断裂非常复杂[82]。林芝市札曲地热区位于雅鲁藏布江左岸，温度约85 ℃，而在阿斯登地热区温度最高可达94 ℃。波密县已探明温泉、沸泉等12处，紧靠雅鲁藏布江左岸，沿川藏公路两侧呈北东至南西向分布，地热显示非常强烈，有喷气孔、沸泉、地面冒汽等，温度达到95.5 ℃。下游墨脱一带温泉也发育较多，且均属中高温热泉，温泉最高温度68 ℃[83]。依据雅鲁藏布江下游区域地貌特征来看，未来工程多以长距离、大埋深引水隧洞群为主要构筑物，部分隧洞最大埋深超过2000 m，当隧道埋深过大时将无法避免穿越高地温地段。在高地温的影响下，隧洞围岩内部温度场发生变化，产生显著的热应力与初始应力场的叠加影响了围岩的稳定，将会对深埋隧道工程建设形成重大影响[84]。

1.6 冰川及冻土

雅鲁藏布江流域属于典型的高原寒区，海拔在4000 m以上，是全球海拔最高的国际河流之一[85]。流域水文过程具有显著的寒区特征，下游广泛分布冰川、季节性冻土和多年冻土，其中多年冻土面积比例尤为突出[86-87]（图6）。然而，随着气候持续变暖，冰川退缩和冻土退化现象日趋显著[88-89]。因此，众多学者针对冰川和季节性冻土变化对径流的演变规律开展了大量的研究。Meng等[90]认为，近30年来雅鲁藏布江流域冰川储量的下降速率明显加快，冰川消退趋势十分突出。与此同时，杨大文等[91]认为雅鲁藏布江下游径流量的增加很大程度上得益于冰川融水的补给，而冰川资源的削减也意味着区域水储量的长期下降，是未来下游径流演变的关键驱动因子，也将导致多年冻土面积的持续减少。同时，伴随着气温升高加快了冻土融化，土壤含水状况和地下水补给格局将会改变，导致径流形成过程更加复杂化，使得库区崩塌、滑坡、泥石流及其链生灾害发育风险急剧增加。



图6 帕隆藏布南岸米堆冰川[95]

Fig. 6 Meitai glacier on the south bank of the Parongtang River[95]

江科[92]基于SPHY（Spatial Processes in Hydrology）模型对径流组成进行了分析，预测结果显示，到21世纪中叶，雅鲁藏布江流域总径流可能增加约15 %，其中融冰径流上升约11 %，显示冰川消融在径流增加中占据重要地位。Xuan等[93]则利用半分布式水文模型SWAT探讨了未来径流的空间差异性，结果表明，在2069—2099年间，奴各沙和奴下水文站的总径流可能出现下降，而羊村水文站则更可能表现为增加趋势。这表明未来不同区域径流演变将呈现显著的不均衡性。刘剑等[94]通过对1956—2000年径流资料的研究进一步印证了这一趋势，指出流域气温持续上升直接导致冰川融水量增加，并增强了对径流的补给作用。综合已有研究成果可以看出，雅鲁藏布江流域的融冰径流呈逐年增长趋势，这为流域内能源工程的开发与运营带来了积极影响。然而，冰川与冻土加速消融也导致库区泥沙输入量显著增加，并干扰下游水循环过程，由此可能引发一系列生态问题，成为工程运营面临的重要挑战。

1.7 隐伏溶洞

隐伏溶洞通常发育在石灰岩、白云岩等可溶性岩层中，在地壳运动过程中产生裂隙、断层、节理等构造薄弱带，为地下水提供渗透通道。雅鲁藏布江下游区域构造发育，地层以花岗岩、片麻岩为主，但局部分布碳酸盐岩，存在隐伏喀斯特溶洞。目前，学者针对研究区内喀斯特溶洞相

关研究较少，郑锡澜和常承法[96]通过对雅鲁藏布江大拐弯地区地质构造特征的野外实际调查表明，墨脱断裂带以北地区出露的岩层中含灰岩夹层以及在鲁希特河弯地区存在钙质夹层；Dian[97]以西藏山坡石灰岩尖峰为研究对象进行形态学分析，并与西南地区喀斯特山坡热带塔和锥体进行比较，认为西藏喀斯特地貌是冰缘条件下由强物理风化作用形成的。因此，雅鲁藏布江下游深埋隧道工程建设时可能会面临突水涌泥、岩溶塌陷、软岩大变形以及TBM卡机等多灾种并发的工程地质问题，严重威胁工程安全并导致巨大的经济损失。

1.8　小结

综上所述，雅鲁藏布江下游区域地质构造复杂，不良地质广泛发育，表现为“内外动力耦合、多重因素叠加、空间变异显著”的系统性特征，具体可总结为“五高”（高落差、高地震烈度、高地应力、高渗透压、高地温）、“四强”（构造作用强、断裂活动强、冰川及冻土退化强），“两特殊”（特殊的岩土体、隐伏溶洞）十余种突出特点。高地应力与高地震烈度，直接威胁着坝体、边坡及大型地下洞室群的结构稳定性，高渗透压与高地温的叠加作用极易诱发隧道突水突泥、高温热害等事故，也对混凝土、灌浆等工程材料的长期耐久性提出了严峻挑战，冰川与冻土对气候变化的敏感响应，将会成为水库蓄水安全和岸坡稳定的重大威胁。因此，亟须深入揭示区域多圈层耦合作用机理，厘清多场耦合作用下的深部岩体力学行为与灾变规律，研发能够在复杂环境下保障工程安全的智慧监测体系与新型韧性材料，从而为雅鲁藏布江下游重大工程的安全建设与长期运营提供坚实的科学支撑。

2　库岸工程地质问题

在构造运动、强震、气候变化及岩性条件的耦合影响下，雅鲁藏布江下游地区形成了地质灾害高风险地区，涵盖了包括崩塌、滑坡、泥石流等常见边坡问题，也囊括了冻土边坡破坏、冰川跃动、冰湖溃决等高海拔地区的灾害类型，同时未来可能会诱发库区坝体失稳及诱发地震等地质工程问题。在内动力地质作用的强烈驱动下，库岸工程地质问题具有形成机制复杂、分布范围广、发育规模大、发育频繁、危害强及治理难等特点，严重影响雅鲁藏布江下游重大工程的施工和运营安全。

2.1　崩塌

崩塌地质灾害具有多种破坏形式，岩体结构、岩性和地质构造等是控制崩塌形成的主要因素，地形地貌、人类工程活动、降雨和地震等是诱发崩塌失稳的外部条件[98]。雅鲁藏布江下游地区具有“高陡、高寒、高烈度、高应力”的地质环境特点，加之地质构造背景复杂，新构造运动强烈，近代地震活动频繁，崩塌滑坡现象十分活跃[36, 99-100]。同时，雅鲁藏布江大峡谷存在高山冰川垂向落差大的特点，随着气候变暖等因素的影响，冰川的冻融循环和冰川面积的减少等会显著削弱岩体结构，增大了崩塌灾害发生的可能[101-103]。

除此之外，研究区崩塌灾害具有高位冰-岩崩的特点，并且具有显著的链式灾害效应[104-105]。2018年10月17日5时，西藏林芝市雅鲁藏布江左岸色东普沟上游发生冰崩岩崩，冲击下部的早期崩坡积物和冰碛物，形成滑坡-碎屑流进入雅鲁藏布江，堵江堰塞约56 h后自然漫顶泄流，整个过程形成崩滑—碎屑流—堰塞湖—溃决洪水灾害链[106]（图7）。刘勇[38]通过对雅鲁藏布江中游贡嘎—加查河段139处崩塌灾害的现场实测与遥感解译分析成灾机制进行研究，结果表明崩塌灾害主要发育于冻蚀、侵蚀高山地貌区。刚刚提上日程的雅鲁藏布江下游水电工程建设所在区域属于地质活动频繁，断裂带密集区，各类地质灾害频发[96, 107-109]。而水电工程建设过程中，由于大量人工水体以及厂房开挖形成大量高陡边坡，导致岩体卸荷作用强烈，岩体完整性下降，增大了崩塌地质灾害发生的风险[110-111]。因此，高山冰川、地震活动、断裂带活动和人类工程等因素控制着崩塌灾害的时空分布特征，而崩塌所引起的链式灾害效应也对水电工程建设和运营安全产生威胁。

2.2　滑坡

雅鲁藏布江下游作为全球地壳运动和外动力

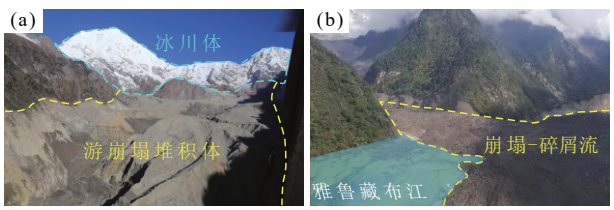


图7　色东普崩滑-碎屑流堵塞雅鲁藏布江[106]

Fig. 7　Landslide-debris dam that blocked the Yarlung Zangbo River[106]

地质作用最为强烈的区域之一，受构造抬升与强烈剥蚀的共同作用，地表快速隆升并深切割，峡谷两岸坡度普遍陡峭，多在30°～60°之间，局部河段甚至达到70°～80°，积聚了巨大的崩塌与滑坡势能[11]。野外调查和遥感解译结果表明，仅雅鲁藏布江大拐弯地区就分布有多处滑坡，这些滑坡多集中在雅鲁藏布江缝合带及主要河谷地段，沿雅鲁藏布江、帕隆藏布江等河段呈带状展布，显示出明显的地貌与构造控制特征[15, 112]（图8）。

在自然因素中，河流侵蚀与构造活动是滑坡形成与演化的核心驱动力。雅鲁藏布江下游降雨丰沛，径流量大，强烈的河床下切和侧蚀作用不断削弱边坡稳定性，而区域抬升速率高达5～10 mm/a，使得河谷地形持续陡化，滑坡与崩塌势能不断积聚[113-114]。历史事件显示，河流侵蚀与强降雨常诱发特大型滑坡灾害[39, 115-116]。例如，易贡藏布流域在1900年和2000年两次发生大规模崩滑，后者形成体积约3×10^8 m^{3}的天然堰塞坝，导致严重的次生灾害，典型地反映了河流过程对滑坡孕育的关键作用[117]。另一方面，活动断裂和地震事件对滑坡的分布与稳定性具有重要影响。断裂带岩体破碎、节理裂隙密集，提供了滑坡发育的物质基础；强震事件则常在短时内触发成群滑坡，成为区域地表剥蚀与地貌演化的重要机制[109]。1950年察隅*Ms* 8.6级地震曾诱发体积达4.7×10^{10} m^{3}的滑坡堆积物，2017年林芝米林地震也触发了1127处滑坡，侵蚀面积超过47 km^2，其规模远超青藏高原其他同类地震滑坡案例[118]。由此可见，雅鲁藏布江下游滑坡的孕育与演化，是构造抬升、河流侵蚀与地震触发等多种自然过程长期耦合作用的结果，其灾害风险不仅深刻影响区域地貌演变，也直接威胁该区域人类活动与重大工程安全。

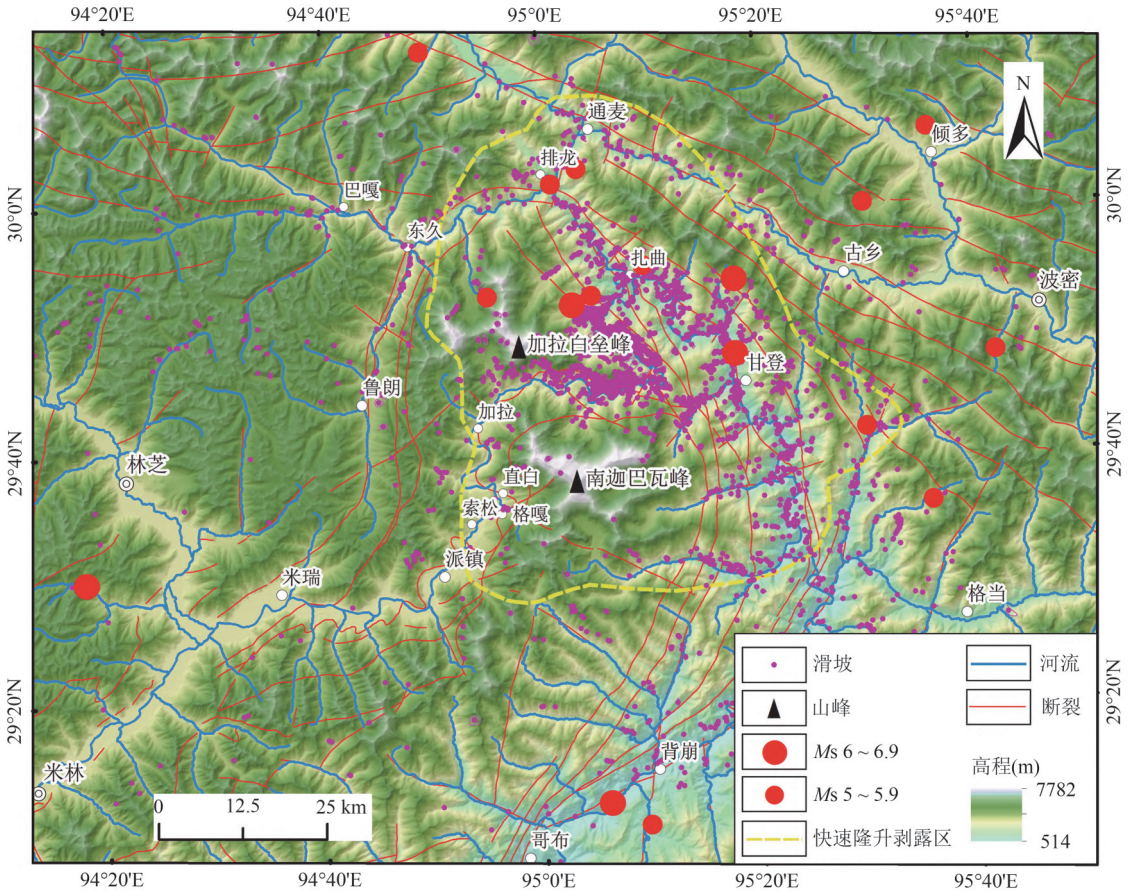


图8 雅鲁藏布江大拐弯地区滑坡分布[36]

Fig. 8 Distribution of landslides in the great bend area of the Yarlung Zangbo River[36]

高位远程滑坡作为一种特殊的重力地质灾害类型，通常发生在高山峡谷地带，其基本特征是起源于高海拔陡坡，物质在失稳后能够以高速长距离运动，并在下滑过程中形成复杂的灾害链，与一般滑坡相比，高位远程滑坡的显著特征在于“高位起源、远程运移、灾害链放大”[119]。其滑源

区多分布于植被茂密的数百米高山坡，或数千米高的积雪山地，崩塌后的物质在重力势能作用下高速下滑，常伴随碎裂化和流体化过程，使得运动距离远超传统滑坡[16]（图9）。近年来，随着气候变暖、构造活动频繁以及人类工程干扰的叠加，高位远程滑坡已成为青藏高原及其周缘的突出地质灾害问题。其中，雅鲁藏布江下游地区因地壳运动剧烈、地形条件特殊和冰川广布，被认为是全球高位远程滑坡最为密集和典型的区域之一[8]。

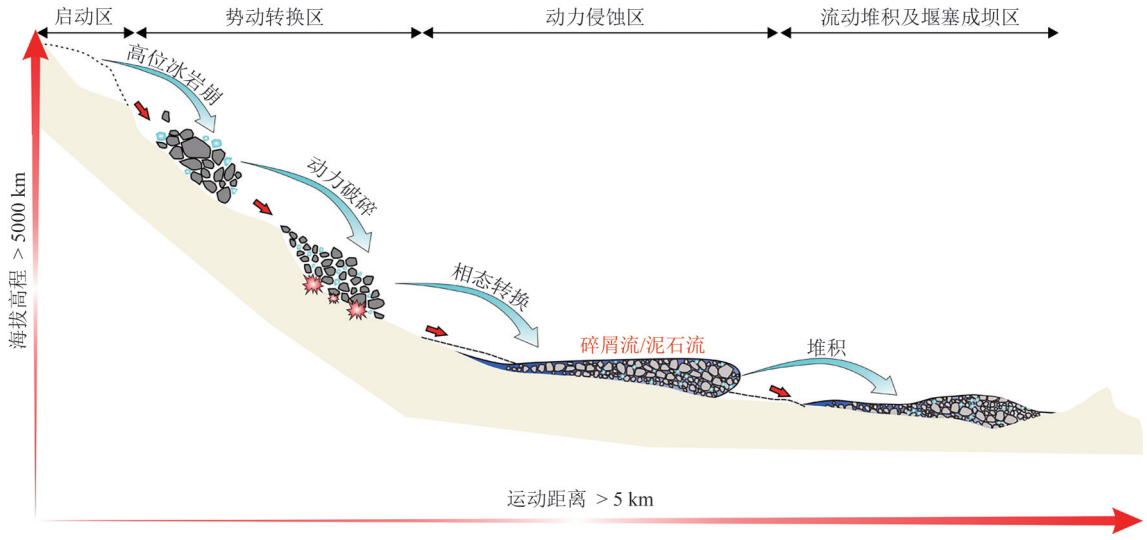


图9　超高位超远程地质灾害链动过程划分[8]

Fig. 9　Chain movement process division of ultra-high altitude and ultra-long runout geohazards[8]

雅鲁藏布江流域的冰岩崩、冰雪-岩石复合滑坡和大型崩塌均属于这一类型。雅鲁藏布江下游地区高位远程滑坡的孕育与触发机制，是多种内外动力因素综合作用的结果。首先，气候变暖是其长期背景，冰川退缩和消融导致冰-岩界面摩擦力下降，加之频繁的冻融循环，使坡体稳定性显著削弱[120]。例如，2018年色东普流域连续发生两次大规模冰岩崩，直接堵塞雅鲁藏布江主河道，引发堰塞湖灾害[121]；2023年再度发生的冰崩泥石流事件使河道阻塞超过8 h，充分展示了高位远程滑坡的高速性和灾害链效应[122]。其次，构造活动强烈，特别是区域内频发的中强震，可通过震动破坏岩体与冰体结构，直接诱发大规模远程滑坡[123]。在2017年米林地震后，色东普地区的滑坡和冰崩数量明显增加，表明地震与冰川不稳定之间存在密切联系[124]。此外，雅鲁藏布江深切峡谷的地貌格局为物质的快速远程下滑提供了天然通道，而丰沛降水与冰川融水的渗入则持续削弱坡体强度，增加了整体失稳的可能性[125]。这些因素的叠加作用，使得该流域成为全球高位远程滑坡的典型高风险区。

总体而言，随着雅鲁藏布江流域工程建设的推进，人类活动逐渐成为影响滑坡发育的重要外部因素。大规模的工程建设往往扰动峡谷河床及周缘稳定结构，改变河流能量与河床消能之间的微弱平衡，从而增加边坡失稳风险[11]。在未来拟建水电工程运行阶段，库水浸泡将改变边坡涉水前缘的饱和状态，导致内部岩土体软化或泥化，降低力学强度。同时，库区水位的周期性波动对岸坡稳定性影响显著，尤其在初次蓄水或水位急剧下降时，更易诱发滑坡[126]。库岸滑坡一旦发生，不仅可能导致滑体大规模入库，还会引发强烈涌浪，对大坝和下游区域造成严重威胁。涌浪在传播过程中对坝体产生高能冲击，极端情况下甚至可能导致漫顶或溃坝，从而引发灾难性洪水[127]（图10）。与此同时，冰岩崩—堰塞湖—洪水—泥石流的灾害链效应尤为突出，呈现出灾害放大和风险叠加的特征，对区域生态安全和重大工程建设构成了持续威胁。因此，在流域开发与运行过程中，必须充分考虑水库滑坡的潜在风险，加强地质环境评价与监测预警体系建设，提升风险管理水平，以实现水电开发与生态环境安全的协调统一。

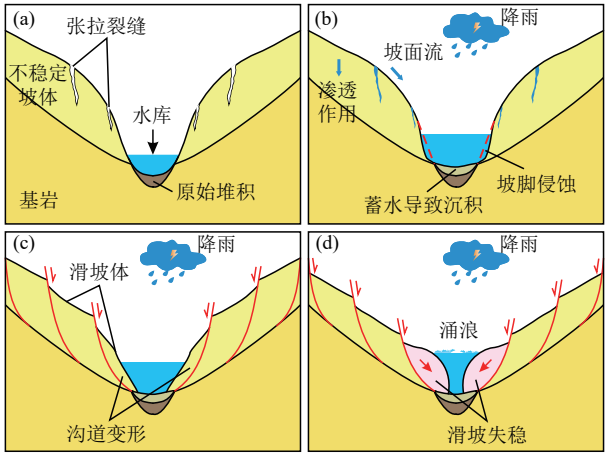


图 10 库岸滑坡诱发水库涌浪形成机理[128]

Fig. 10 Formation mechanism of reservoir surges induced by bank slope landslides[128]

2.3 泥石流

雅鲁藏布江大拐弯地处雅鲁藏布江中下游分界点，构造运动活跃、岩体较为破碎、地形条件复杂，是中国泥石流灾害最为发育的活动带之一[24, 129-130]。雅鲁藏布江大拐弯地区属高原温带半湿润季风气候区，气候较为干燥，降水充沛，年均降水量 640 mm[25, 131]，构造快速隆升加之充沛的降水，使得该地区的冰川活动较为活跃，同时为泥石流活动提供了水力条件与固体物质[132]。

从泥石流发育历史来看，雅鲁藏布江流域中下游段曾发生过多次大规模泥石流-堵江灾害，并造成重大损失和人员伤亡，如 1950 年和 1968 年暴发的则隆弄冰川泥石流两度摧毁直白村，并短时间堵塞雅鲁藏布江[133]；1953 年暴发的古乡沟泥石流直接摧毁了古乡村，并阻断雅鲁藏布江支流的帕隆藏布江，形成堰塞湖[134]；2007 年天摩沟泥石流导致 8 人死亡，9 人受伤，阻断帕隆藏布江 1 h 后自然溃决[135]；2018 年色东普沟两度暴发泥石流灾害，堵塞雅鲁藏布江时间分别长达 56 h 和 48 h[124, 136]。近年来，随着全球气温上升，高原地区冰川消融速度加快，泥石流发育频率也将会越来越高，亟须开展雅鲁藏布江流域下游泥石流预测与防治相关研究[137]。

随着雅鲁藏布江流域工程建设的稳步推进，目前学者对于研究区泥石流成因机制及其危害性等方面的研究已经取得了一定的研究成果。在泥石流成因机制研究方面，童立强等[138]和李壮[37]等采用多源遥感技术手段对雅鲁藏布江下游色东普沟的历次碎屑泥石流堵江事件进行总结，初步探讨了色东普沟频繁发生碎屑泥石流的原因；胡桂胜等[139]则从地形地貌、物源、水源及气温等方面分析了雅鲁藏布江流域中下游段泥石流灾害的形成条件；高波等[140]通过对帕隆藏布流域天摩沟流域泥石流形成机制的研究表明，区域内泥石流具有冰川泥石流和降雨泥石流的特征，冰碛物和崩滑物质为泥石流的主要物源。在泥石流发育演化特征以及危险性评估方面，李翠平等[141]基于光释光和 ^{14}C 测年等方法，对泥石流堵江与堰塞湖演化规律进行了分析。常鸣等[142]基于流域高差、物源量等基本参数，建立了雅鲁藏布江中游段泥石流危险范围预测模型；黄艳婷等[143]采用层次分析法对藏东南地区泥石流危险性进行了评估；龚凌枫等[144]以雅鲁藏布江大拐弯附近蹦嘎沟泥石流为例，采用地面调查、钻孔及 ^{14}C 测年等方法，研究泥石流形成年代序列、堆积深度、冲出范围等特征，厘清了该区域全新世以来泥石流活动性特征；赵聪等[145]以雅鲁藏布江大拐弯入口段南岸的派巴沟和曲鲁沟为研究对象，通过对泥石流物源发育分布特征、泥沙输移特征、活动历史演化特征研究，认为该区域近年来物源量增幅较大，未来泥石流易发性较高。因此，未来随着重大工程的建设与运营，库区泥石流灾害将会进一步加剧（图 11）。

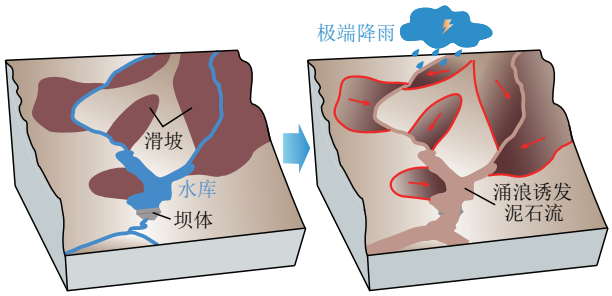


图 11 库区蓄水诱发泥石流[128]

Fig. 11 Mudslide caused by water storage in the reservoir area[128]

2.4 冰川跃动和冰湖溃决

雅鲁藏布江是中国境内最长的高原河流，发源于西藏自治区。其流域落差巨大，加之径流量充沛，使其成为全球水能资源最为丰富的河流之一[146-147]。研究区新构造运动极为频繁，地壳强烈抬升，地层褶皱及断裂发育，使得地形起伏剧烈，河流深切作用显著[148-150]。在这种独特的地质构造背景和强烈的气候作用下，区域内滑坡、冰川跃动、冰湖溃决等地质灾害频繁发生[151]（图 12）。

例如，1950 年墨脱大地震引发大规模冰川崩塌，导致下游派镇百余人遇难[133, 152]；2000 年 4 月 9 日，林芝扎木弄沟发生特大滑坡，阻塞易贡藏布河，随后的堰塞湖溃决引发严重洪水，冲毁沿岸道路与村落[153]；2018 年 10 月，色东普流域发生了两次冰川崩塌灾害，在峡谷内形成一个总体积约为 3×10^7 m^3 的大坝，决堤后洪水暴发对下游城镇和基础设施造成了严重破坏，并形成了雅鲁藏布江的狭窄河道，随后又在 2021 年 3 月和 8 月再次发生并堵塞雅鲁藏布江的碎屑流，上游淹没区长约 15 km，未造成人员伤亡[154]（图 12）。

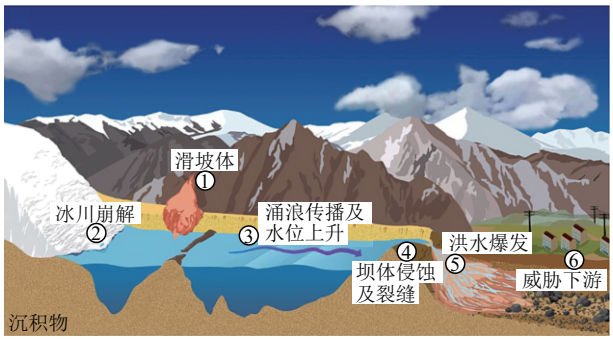


图 12　冰湖溃决诱发地质灾害链[155]

Fig. 12　Geohazard chain triggered by the outburst of an ice lake[155]

近年来，大量沉积学和地貌学证据显示，自晚更新世以来，雅鲁藏布江流域曾多次发生大规模的溃决洪水事件[156-159]。这类灾害不仅重塑了区域地貌，也对河流格局演化产生深远影响。相关研究表明，全球其他地区亦存在类似的灾害过程。Alho 等[160] 通过对北美密苏拉洪水的研究估算其洪峰流量高达 1.7×10^7 m^3/s，显示了溃决洪水的巨大能量。亚洲阿尔泰山区的库雷（Kuray）洪水，同样因冰川堵塞楚家河形成堰塞湖并溃决，经 Carling 等计算，其洪峰流量亦达到了 10^7 m^3/s 量级[161]。Dai[162] 等利用经验公式成功估算了康定—泸定地区大渡河堰塞湖溃决时的洪峰流量。Liu[163] 等则根据堰塞湖的蓄水量，成功推算出易贡与叠溪两次典型溃决事件的洪峰规模，为后续相关研究提供了理论支撑。总体而言，雅鲁藏布江流域在特殊的构造地质与气候环境作用下，频繁发生滑坡、冰湖溃决及堰塞坝破坏等灾害事件。以上研究成果为本区域冰川跃动、冰湖堰塞和溃决洪水机理、洪水规模估算方法及灾害防控提供了重要的自然案例。

2.5　坝体失稳

雅鲁藏布江下游地区具有构造应力强、水量不稳定、冻融作用强烈的特点，多因素耦合效应下形成了具有鲜明区域特色的建筑体破坏模式，使得未来重大工程的坝体失稳风险显著增加。根据现有学者的相关研究，主要会形成四类典型坝体破坏模式：（1）涌浪超载型破坏，1963 年瓦伊昂大坝，库岸大规模滑体高速入水时动能转化为水体势能，形成超高涌浪，破坏力表现为越顶溢流，涌浪高度达到坝体 1.5 ~ 2.0 倍，冲击压力峰值达静水压 3 ~ 5 倍（实测达到 5.7 MPa），最大滑速达到 30 m/s，导致防渗体开裂，最终工程破坏表现为拱坝未垮，随后 Fuminori Kato 等[164] 通过模型试验揭示了这类坝体的破坏特征（图 13）。（2）地震–液化型破坏，2008 年 5 月 12 日发生的四川省汶川县地震，紫坪铺水电站坝体因该地震出现坝基液化，因坝基砂层未充分压实，地震动触发孔隙水压骤升，抗剪强度短时间内归零，最终导致坝体下沉超过 70 cm 并向下游移动了 18 cm，顶部护板与护栏损毁，装机容量为 700 兆瓦的水电站设施同样受到损害，裂缝长度 > 100 m[165]。（3）渗透侵蚀型破坏，库水长期浸泡使坝体心墙黏土颗粒软化，孔隙水压力升高导致心墙原生微裂缝扩展，当水力梯度超过临界值时，诱发管涌现象，使坝体渗透系数骤增 100 倍以上，进而引发坝体渗漏失稳[166]。（4）浸顶溢流型破坏，该破坏形式涉及水力侵蚀、土体失稳与应力–渗流多场耦合作用，如 1975 年河南驻马店板桥水库溢流溃决，板桥水库溃决来源于极端洪水导致的溢流溃决，18 万人在该次事故中受到极端影响，58 座小型水库垮坝[167]。

2.6　水库地震

水库诱发地震是人类开发水力资源工程活动中出现的地震现象。自 20 世纪 30 年代以来，全世界相继有近 150 多座水库发生了水库诱发地震事件，有 37 座发生在中国，其中更是有 4 座发生了大于 *Ms* 6.0 级的强烈地震，造成较为严重的经济损失和人员伤亡[168-169]。由于水库的建成以及后续的投入使用，库区周边地区地震活动性不断增强，由于水库地震有着震源浅的特点，因此它会比相同震级的天然地震造成的破坏更大，不光会出现一系列如泥石流、山洪等次生灾害，危害人民群众生命安全，还会对大坝本身结构带来不利的影

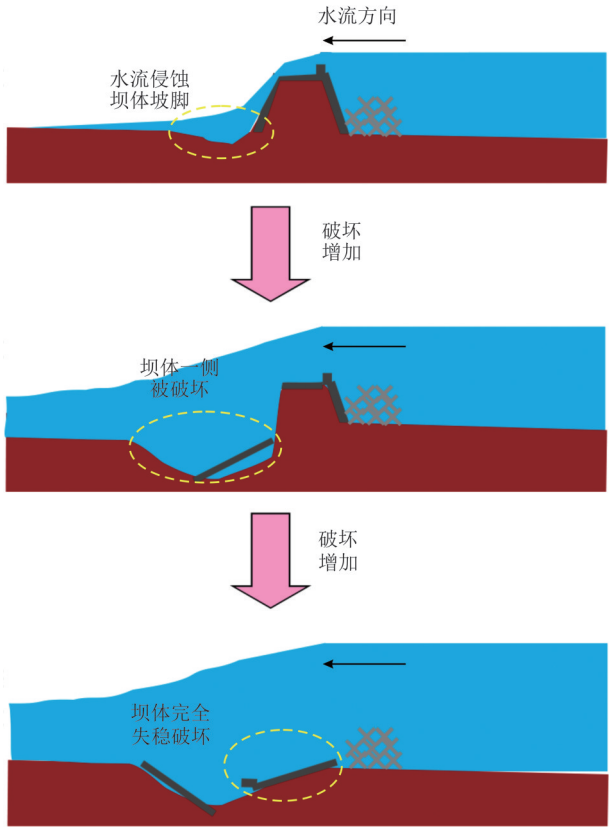


图 13 涌浪超载型大坝破坏机理[164]

Fig. 13 Failure mechanism of overloaded wave-type dam[164]

响，从而带来一系列的隐患[170]。

水库地震的形成是一个极其复杂的物理过程，国内外学者普遍认为水库地震的产生主要与库水重力荷载作用、孔隙水渗透扩散作用以及库水的浸润弱化作用有关[171]（图 14）。按地震的响应时间来分，Simpson 等[172]将水库地震分为快速响应型地震、滞后响应型两种，其中快速响应型地震是蓄水后不久就发生的地震，其震级一般不超过 *Ms* 4.0级，主要发生在水库附近的区域[173]；而滞后响应型地震则多发生在水库蓄水很长一段时间之后，其震级相对于快速响应型地震来说较大，可以发生在远离水库的区域[174]。按地震序列类型分，丁原章等[170]将水库地震分为震群型以及前震-主震-余震型，震群型水库地震常发生在蓄水后不久的一段时间，其地震事件数量多且集中，震级小，震源浅，存在地震活跃期[175]；前震-主震-余震型则有较为明显的前震期，在持续数月甚至数年的前震期后，主震和持续衰减的余震将陆续出现，其中前震一般震级较低，主震震级最大[170, 176]。与此同时，按照区域地质环境以及发震原因分，可将水库地震分为构造型水库地震、裂隙型水库地震以及岩溶型水库地震[177]。未来，随着雅鲁藏布江下游水电工程蓄水量的增加，加上水库诱发地震的复杂性及其诱发环境呈现出的多样性，研究区发育地震的概率将会增加，加强水库地震监测系统建设和监测数据的分析处理是保障水电工程长期安全稳定运营的关键。

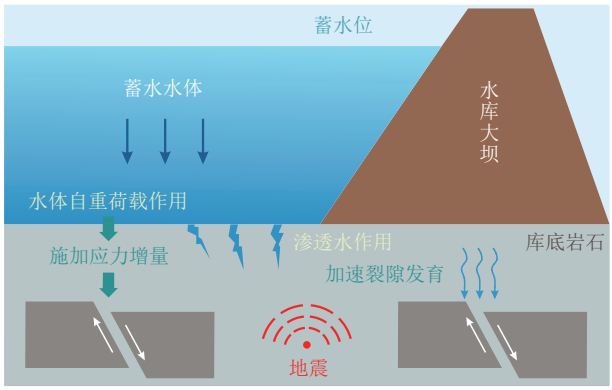


图 14 水库蓄水诱发地震机制[171]

Fig. 14 Earthquakes induced by reservoir water storage[171]

2.7 小结

总而言之，库岸作为雅鲁藏布江下游工程建设的重要组成部分，其地质问题复杂多样，直接关系到未来工程的安全与稳定。研究区受高山峡谷地形、复杂构造及气候等多重因素影响，极易诱发崩塌、滑坡、泥石流、高位远程滑坡、冰川运动与冰湖溃决、坝体失稳及水库地震等多种地质灾害。通过对研究区沿岸地质灾害的文献调研，灾害发育具有“突发性、链生性、强破坏性”的特征，给重大工程建设和运营带来严峻挑战。未来，亟须围绕库岸重大地质灾害，研发“空-天-地-隧”一体化的广域协同监测技术体系，构建一个多尺度、全覆盖的立体感知网络，探索基于大数据与人工智能的灾害链过程风险识别与智慧预警方法，建立一个能够融合多源信息、实现风险动态评估、灾害预警信息发布的智慧决策平台，为库区安全提供科技保障。

3 深埋隧道工程地质问题

喜马拉雅山脉是印度板块和亚欧板块碰撞挤压的产物，构造运动活跃，地震频发，地质条件极为复杂。雅鲁藏布江下游深埋隧道工程地应力值高、地下水渗透压力大与断裂带活动性强的特点，同时地震、高地温和冻土等不良地质极其发育，在隧道施工过程中极易出现软大变形、突水

突泥、岩爆、塌方冒顶、衬砌结构剪切错断、冻害及热害等工程地质问题。

3.1　软岩大变形

软岩大变形灾害区别于常规变形灾害的主要特征为变形量大、变形速率高，并常伴有初期支护开裂、掉块及钢架扭曲剪断等现象，严重时可导致初期支护失效、洞室坍塌，甚至造成二次衬砌混凝土开裂、压溃等现象[178]。在深埋隧道中，围岩径向应力与埋深呈正相关关系，随着应力的重新分布，若围岩应力超出岩体承载强度，围岩应力不断向深部转移，并不断向洞室内部变形卸荷（图15）[179]。国内外学者针对深埋隧道软岩大变形工程灾害开展了大量孕灾理论、发生演化机理等方面的理论、模拟及试验研究，研究结果表明：深埋隧道软岩大变形与其赋存环境、岩体性质及力学机制紧密相关，相关研究成果可广泛应用于深埋隧道软岩大变形防控与治理[180-182]。

雅鲁藏布江下游构造活动异常强烈，断裂带密集发育，且软岩分布广泛，而拟建的隧道工程普遍面临高埋深、高地应力、高渗透压以及高地震烈度等极端复杂的特殊工程条件，未来可能会诱发隧道偏压、拱顶沉降、地板隆起以及拱架变形等灾害。在高地应力条件下，隧道开挖会引起围岩应力快速释放，洞周岩体进入强非线性变形阶段，微裂隙大量萌生并扩展，围岩剪切滑移、剪胀扩容及层间错动现象尤为突出，围岩变形破坏以塑性流动挤出为主[179, 183-185]。与此同时，构造破碎带和层理裂隙为地下水运移提供了通道，在高渗透压条件下，地下水沿开挖卸荷诱发的裂隙迅速渗入，软岩中广泛发育的伊利石、蒙脱石等黏土矿物遇水后发生显著软化与膨胀，进一步削弱岩体强度并促进裂隙扩展，形成隧道的膨胀性变形[186-187]。

综上所述，在多场耦合作用下，雅鲁藏布江下游深埋隧道软岩极易形成以应力卸荷为诱因、结构损伤为核心、渗流作用为催化、围岩强度劣化为放大机制的“卸荷—损伤—渗流—劣化”循环灾变体系，导致围岩持续扩容、蠕变与膨胀协同发展，最终演化为难以控制的大变形灾害。这一过程不仅对传统开挖方式和支护设计的适用范围带来了挑战，也对隧道预报预警、围岩加固及长效控制提出了更高要求。

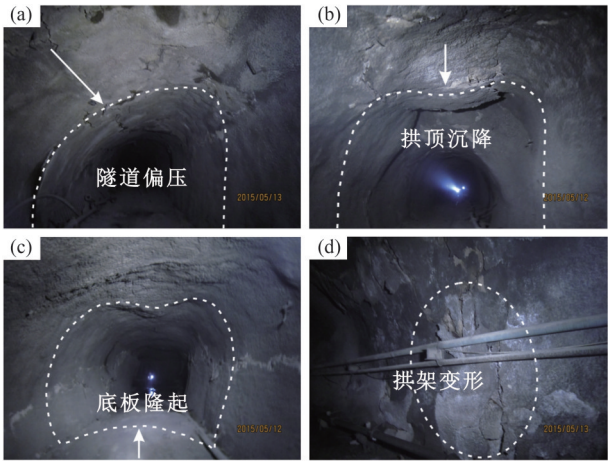


图15　深埋隧道软岩大变形[188]

Fig. 15　Large deformation of soft rock in tunnels[188]

3.2　突水突泥

突水突泥是指在隧道及地下工程开挖过程中，受渗透压、应力及动力扰动等多因素作用，岩体裂隙萌生、扩展、贯通形成突水优势通道，赋存于一定地质构造中的水或泥水混合物在水压势能驱使下，以高流速、大流量的形式突然涌入隧道的一种地质现象，其具有发生频率高、破坏性强的特点，是一种严重制约工程建设的地质灾害[189-190]（图16）。目前国内外学者对活动断裂带条件下地下工程施工开展了大量研究，主要集中在超前探测、灾害演化机制和灾害防控等方面[191-192]。断层可以根据含水特性分为富水断层，导水断层和阻水断层[193-194]。当工程穿越富水断层时，由于断层带内地下水富集且岩体破碎松散，易在开挖扰动下形成贯通的突水突泥通道，从而直接引发突水突泥灾害；当穿越导水断层时，若该断层与外部含水层连通，则构成完整的地下水补给路径，含水层中的水体在高水压作用下涌入引水隧洞等工程内部，导致突水灾害发生；当工程穿越阻水断层时，虽然断层本身并不导水，但是随着开挖扰动作用增强，断层泥在渗流作用下发生移动，形成贯通的突水突泥通道，造成突水突泥灾害[195]。

与此同时，雅鲁藏布江地区属于地震高发区：1985年墨脱发生*Ms* 8.5级大地震，随后的2017年林芝发生*Ms* 6.9级地震，都产生地震裂缝并伴随地震隆起和洼地[124, 196-197]。为此，何川等[198]利用振动台模型试验研究了隧道在地震条件下的动力响应问题，认为处于断层破碎带中的围岩在地震作用下表现出强烈的不稳定性，易产生错动与

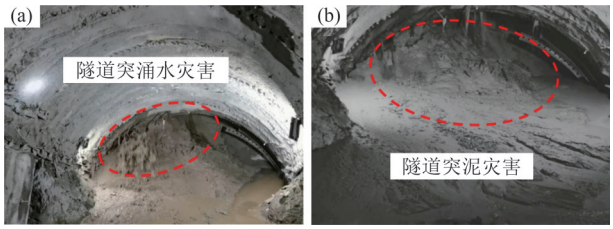


图 16 隧道突水突泥灾害[200]

Fig. 16 Water and mud gushing in the tunnel[200]

错台，形成显著的不连续变形，进而容易诱发衬砌结构剪切开裂。地下水通过衬砌开裂处进入引水隧洞内部，造成了突水突泥灾害的发生。

除了断裂和地震会诱发隧道突水突泥灾害外，在高地应力、高渗透压和高地温多场耦合作用条件下围岩物理力学特性发生改变也会促进此类灾害的发生，对工程建设同样会产生不同程度的威胁[199]。因此，雅鲁藏布江下游工程建设过程中的突水突泥灾害发生机制不同于其他突水案例，呈现出多威胁、突发性强、演化机制复杂等特点，给突水突泥灾害的预测、预警与防控提供了新的研究方向。在雅鲁藏布江下游地区，未来重大工程存在向深部发展的特点，在施工建设过程中常遇到高地应力、高地温和高渗透压等复杂地质环境，极易导致突水突泥灾害的发生。

3.3 岩爆

岩爆是高地应力地下工程开挖卸荷过程中，围岩弹性应变能快速释放引发岩石块（片）崩裂飞溅的脆性破坏现象，其突发性与高强度冲击特性对施工人员安全与设备完好构成威胁（图 17）。从岩爆空间分布规律分析，其发育特征受埋深、岩体结构、地应力方向多重因素控制，呈现明显的分异规律。尹建勋[201]在盆因拉隧道（埋深>200 m）施工监测发现，该过程中出现的岩爆以弱岩爆为主，表现为围岩表面片状剥落无明显弹射现象；进一步的邓伟等[202]在甘姆齐克隧道中发现埋深达到750 m时岩爆频率跃升，进一步说明岩爆由岩体埋深控制。

岩爆按孕育机制可以分为应变型岩爆、应变–结构面滑移型岩爆、断裂滑移型岩爆[204]。由于雅鲁藏布江流域构造作用强、岩性条件复杂的特性，发育有多类型的岩爆。严健[20]等研究了拉林段桑珠岭隧道以及巴玉隧道的岩爆特征及与高地应力的关系，研究结果表明，桑珠岭隧道处岩爆存在阶梯状爆坑，大多沿结构面滑移，对周围围岩影响深度在2.0～3.5 m。；巴玉隧道围岩以花岗岩为

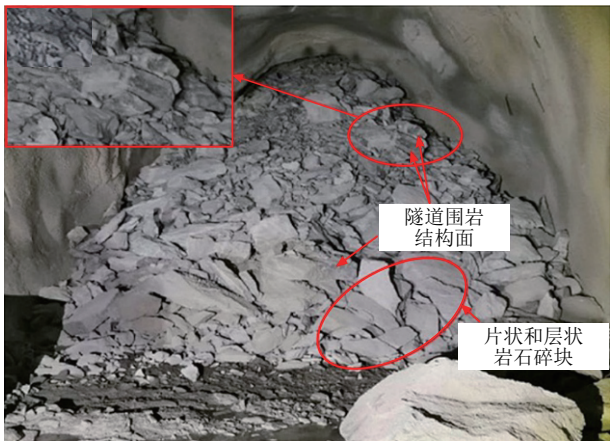


图 17 深埋隧道岩爆特征[203]

Fig. 17 Characteristics of rockburst in deep tunnels[203]

主，高弹性应变能储存能力较强使其易发生结构面控制型岩爆，属于高地应力隧道，最大埋深为2080 m，受竖向应力影响较大，在开挖扰动下拱顶和拱肩处岩爆发生频次非常高。闫苏涛[205]通过对拉林铁路岗木拉山隧道现场岩爆的研究，认为岩爆与埋深有极强的相关性，发生的概率和位置受结构面控制，具有明显的时间效应，表现为结构面张裂、岩块剪切、失稳破坏等。王喜华[206-207]通过对拉日铁路盆因拉隧道岩爆特征分析，认为研究区发生岩爆的临界深度为325 m，实际发生岩爆的最小深度为300 m，花岗岩具有轻微—中等岩爆倾向；片麻岩具有中—强岩爆倾向，局部具有轻微岩爆倾向；闪长岩具有强岩爆倾向，局部具有轻微—中等岩爆倾向。雅鲁藏布江下游受印度板块俯冲挤压，形成全球罕见的超高水平构造应力场，且区域内深埋隧道围岩以花岗岩、玄武岩、片麻岩等高硬度岩石为主，高地应力与硬岩的耦合作用使该区域深埋隧道在未来重大工程施工过程中不可避免面临岩爆灾害问题。

3.4 塌方

塌方形成的机制并非单一强度破坏，而是流固耦合—结构面复活—应力再分配的多阶段演化，隧道施工中塌方事故可以归为围岩失稳、结构失效和环境失调所引起的安全事故，而地质条件和隧道埋深是隧道塌方的主要影响因素[208-210]（图 18）。国内外学者针对隧道塌方的预测与防治已进行了相关的研究，以直流电三维反演与地震/瞬变电磁组合等综合超前地质预报识别高渗透异常体[211]；以帷幕，深孔与管棚等组合预加固提升掌子面与待挖区整体性；掘进期注重短进尺、弱

爆破与及时闭合初期支护，并通过分级排水与分压泄水用于抑制孔压峰值，减少渗流通道的形成与扩展[212-213]。但是，在强水、强震以及强构造的复合场景下，动力扰动下的裂隙扩展与不连续面贯通仍可能导致现有处治体系性能衰减，对施工期与震后阶段的持续监测仍需进一步完善[214-215]。

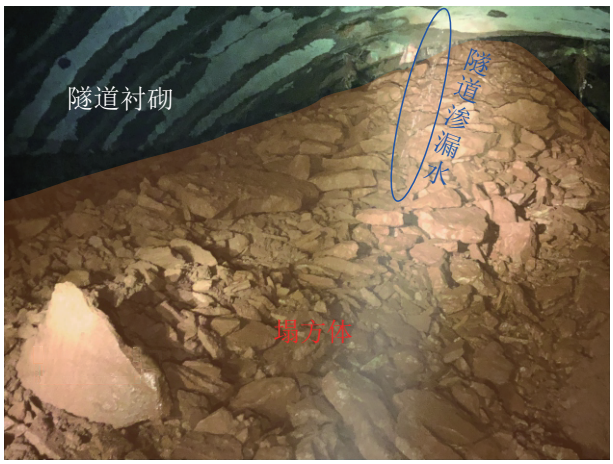


图 18　深埋隧道塌方[216]

Fig. 18　Collapse of deep tunnel[216]

雅鲁藏布江下游一带构造作用强烈、切割深、坡陡谷窄，第四纪至今的强降雨与河谷侧蚀造成断层破碎带大面积裸露，地形高差大，地下水赋存条件与渗流边界均呈强非稳态。这种复合地质条件未来使得隧道穿越富水断层破碎带时，围岩有效应力迅速下降，拱肩与掌子面首先进入不稳定状态，随开挖推进表现为掉块、拱部松动和局部塌方。

3.5　衬砌结构剪切错断

深埋隧道跨越活动断裂时，错断位移对衬砌内力与变形的影响具有显著的几何敏感性：正断层条件下，衬砌张压效应明显，拱顶与拱腰区域易发生拉裂与压剪复合破坏[217]；逆断层条件下，上盘推覆作用导致衬砌受力不均，拱脚和仰拱承受强烈的压应力集中[218]；走滑断层则以水平剪切和洞身整体侧移为主，导致衬砌环向开裂和横向收敛突出[219]（图 19）。目前，对于衬砌错动研究的设计思路逐渐由单纯加固转变为柔性化与韧性化。节段化衬砌、铰接衬砌和减错层等构造措施使大位移转化为节段间的转动与相对滑移，损伤更易被限制在局部，衬砌本体以微裂缝为主、整体性得以保持，受损长度明显缩短。与传统厚衬砌相比，这种构造可降低峰值应变，缩短损伤范围，并提高结构的延性与可修复性[220-221]。尽管如此，现有试验与数值模拟多采用理想边界并简化地层条件，对断裂破碎带宽度、边界过渡性质与地下水参与的综合影响考虑不足。对于减错与铰接构造的长期性能证据有限，在强震与多次错动叠加条件下的耐久性验证不足，工程设计面对断层核心区与宽破碎带仍遵循“能避尽避”原则[222]。然而，雅鲁藏布江下游处于雅鲁藏布江断裂带及其分支、嘉黎—察隅等活动构造的交汇影响区，右/左旋走滑挤压复合活动显著，在强震与强构造的复合场景下，剪切错断仍是深埋隧道建设中亟待突破的关键问题。

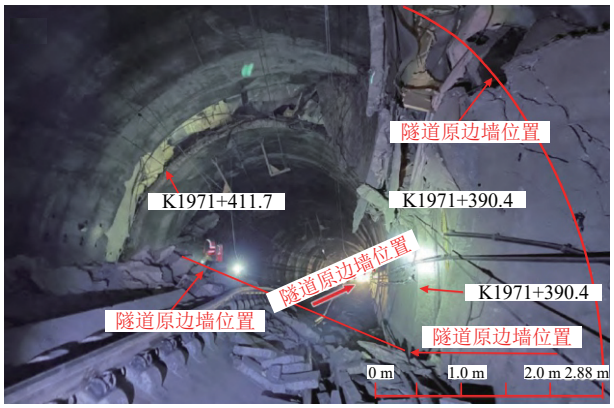


图 19　大梁隧道衬砌错台垮塌[223]

Fig. 19　Collapse of lining step-fault in Daliang Tunnel[223]

3.6　冻害及热害

雅鲁藏布江下游地区隧道建设与运维也面临着严峻的冻害挑战，主要表现为衬砌挂冰、结构冻胀开裂、排水系统冻结堵塞等病害，严重影响结构的耐久性[224-226]。冻害的产生根源在于低温环境与水的耦合作用。隧道温度场是冻害研究的关键边界条件，其分布规律受隧道长度、坡型、洞口高差及外部气候等多重因子的复杂影响，呈现出每个隧洞不同的特点[227-228]。寒区隧道冻害防治技术遵循“治水”和“控温”两大原则。“治水”旨在通过注浆堵水与设置中心深埋水沟、防寒泄水洞等措施，保障排水通畅[229]。“控温”则通过被动保温与主动加热相结合的方式实现。传统被动保温主要是在衬砌与初支间铺设块状聚氨酯保温板，但存在施工质量难控、易形成空隙等缺陷[230]。为解决这些问题，喷涂式聚氨酯等新型保温材料被研发出来，能与防水板更紧密贴合，提升了保温效果与施工效率[231]。在主动防治与整治技术方面，利用地源热泵的地热技术[232]、抑制冷风贯入的洞口空气幕技术[233]以及针对既有病害

的电加热系统[234]等新技术正得到探索与应用，为寒区隧道冻害的系统性防治提供了新的方向。

雅鲁藏布江下游地区的川藏铁路桑珠岭隧道在埋深1500 m处实测岩温高达89.6 ℃、巴玉隧道实测最高地温为48.5 ℃[21]，拉萨—日喀则铁路吉沃西嘎隧道最高温度为57 ℃[235]，未来研究区深埋隧洞遭遇严重热害问题的风险极高。高地温热害对隧道工程，特别是深埋长隧道的建设与长期运营构成严重威胁，主要体现在以下几个方面：（1）改变围岩力学性质，增加地质灾害风险。高温能够改变围岩的物理力学性质，如使硬岩软化，降低其强度和弹性模量，同时增加岩石的塑性。这种变化可能改变岩爆的孕育机制或加剧软岩的大变形，使得地质灾害的预测和防控比常温环境下更为复杂和困难[236-238]。（2）产生温度应力，威胁结构耐久性。隧道开挖后，高温围岩与洞内的低温环境形成巨大温差，在围岩和衬砌结构中产生显著的温度应力。这种附加应力与高地应力叠加，极易导致初期支护和二衬混凝土产生温度裂缝，为高压水渗透提供通道，进而引发钢筋锈蚀、混凝土劣化等问题，严重威胁工程结构的安全性和长期耐久性[239]。（3）加速材料疲劳劣化，缩短服役寿命。雅鲁藏布江下游地区海拔高、气候寒冷，未来工程运营期间，隧洞内部与外部围岩的巨大温差将长期存在，会加速衬砌材料疲劳劣化，对工程的全寿命周期安全运营构成潜在威胁[240]。

3.7 小结

雅鲁藏布江下游重大工程深埋隧道未来所面临的如软岩大变形、突水突泥、岩爆、衬砌剪切等一系列工程地质问题，其本质是应力场、渗流场、温度场等多物理场强耦合作用下的复杂动力学问题。未来应重点研究高应力-高水压-高地温等多物理场耦合作用下岩体的本构关系与破坏准则，从根本上分析岩体劣化—灾变全过程演化机理。与此同时，构建融合超前钻探、随钻探测、微震监测和点云数据采集等联合探测预警体系，并研发能够主动适应深埋隧道大变形、高效吸能和耗能的新型衬砌材料与支护结构，保障深埋隧道工程的建设与运营安全。

4 对策与建议

针对雅鲁藏布江下游工程开发主要不良地质条件与重大工程地质问题研究现状以及所存在的不足，本文就以下问题提出了对策和建议：（1）雅鲁藏布江下游区域构造运动及灾害发育特征；（2）雅鲁藏布江下游重大工程深埋隧道多场耦合孕灾机制；（3）雅鲁藏布江下游重大工程地质问题智慧监测预警体系；（4）雅鲁藏布江下游重大工程深埋隧道强韧协同治理体系。

4.1 雅鲁藏布江下游区域构造运动及灾害发育特征

雅鲁藏布江下游位于印度板块与欧亚板块碰撞挤压的构造转换关键区域——喜马拉雅东构造结，是全球地壳运动最为强烈、内生地质作用最为活跃的地区之一，极其复杂的地质背景决定了重大工程建设与运营将面临巨大的挑战。因此，亟须厘清研究区内构造运动与灾害发育特征，保障重大工程的安全。

（1）对于研究区内的深大断裂的现今活动速率、闭锁与蠕滑特征、应变能积累与释放规律等关键问题，综合利用InSAR与HeliTEM等新型构造研究手段，结合微震监测与震源机制解分析，精细刻画工程区的现今三维地壳形变场和应变率场时空分布特征，揭示研究区内活动断裂的运动学行为，厘定地震潜势与危险区段，为工程区的地震危险性评价和抗震设计提供关键约束。

（2）东构造结快速隆升—剥蚀过程，造就了研究区内极高的地应力环境，高地应力是深埋长隧洞等工程结构稳定性的主要影响因素。采用深地震反射剖面、大地电磁测深等地球物理探测技术，查明雅鲁藏布江下游地区深部构造格架；结合系统的地应力测试与数值模拟技术，揭示高地应力场的形成机制，厘清其分布规律及其与主要断裂构造的内在联系，为深埋引水隧道岩爆、大变形等风险预测与防控提供科学依据。

（3）强烈的构造抬升与河流下切塑造了高山峡谷地貌，为滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害的孕育提供了有利的地形条件，强震和极端降雨事件则成为这些灾害的主要触发因素。因此，厘清“地震—滑坡—堵江—溃决洪水”、“冰川/冻土退化—冰湖溃决—泥石流”等典型灾害链的发育特征，深入研究区域内重大地质灾害链的触发机制、运动转化过程和时空演化模式，揭示其在未来重大工程建设期和运营期的活动规律与潜在风险。研发能够模拟多物理过程、多介质转换的地质灾害动力学模型，实现对灾害链全过程的动态反演，

定量评估其影响范围和致灾强度。

4.2　雅鲁藏布江下游重大工程深埋隧道多场耦合孕灾机制

雅鲁藏布江下游深埋隧道群具有埋深超大、距离超长、地质条件极其复杂的特点，未来隧道可能面临的软岩大变形、突水突泥、岩爆、冻热害等重大工程地质问题。然而，这些灾害的发生并非由单一因素主导，而是活动构造、特殊岩体、高地应力、高渗透压、高地温、隐伏溶洞以及工程开挖扰动场等多物理场强烈耦合、相互作用的宏观灾变行为，开展多场耦合孕灾机制的相关研究：

（1）针对研究区“高地震烈度、高地应力、高渗透压、高地温”特征，研发能够施加循环动载、高温、高渗透压、高应力的真三轴岩石力学试验仪器，开展岩石在多场耦合路径下的变形、强度及渗透特性试验，利用机器学习算法深度挖掘试验中声发射、红外监测与应力-应变曲线的非线性关联，创建基于大数据驱动的岩石损伤演化智能判别模型；建立能够统一描述岩爆的能量脆性破坏与软岩大变形的塑性流变行为、并能计入温度效应和孔隙水压力影响的弹塑性本构模型，揭示岩爆与大变形在不同耦合条件下的灾变阈值；开展考虑初始高应力和高水压的围岩动力学研究，结合试验与数值模拟厘清强震作用下围岩的动力疲劳损伤、孔隙压力动态响应以及长期稳定性的演化规律。

（2）聚焦隧道穿越的活动断裂带，分析断层泥、构造角砾等填充介质的矿物成分、颗粒级配、渗透特性以及在高围压和水压下的压缩、蠕变和强度特性；引入计算流体力学与离散元耦合技术，建立能够精细描述断裂带内部结构的非均质流-固耦合数值模型，模拟隧道开挖揭露断裂带时掌子面前方高压水的释放路径、孔隙压力的时空演化以及围岩—填充介质的渐进破坏过程，揭示隧道从稳定渗流到“管涌—液化—整体失稳”的灾变演化过程。

（3）采用钻探、地球物理勘探和水文地球化学分析等方法，厘清隧道沿线的地温梯度、热流场以及受断裂构造控制的地下水对流换热模式；建立考虑热—流—固耦合作用的隧洞长期性能演化模型，分析温度变化引起的热应力及其与地应力、水压力的叠加效应，并以此评估混凝土衬砌、锚杆等支护材料在长期高温、高湿和化学侵蚀环境下的性能劣化规律，为深埋隧道长期运营提供科学依据。

4.3　雅鲁藏布江下游重大工程地质问题智慧监测预警体系

面对未来雅鲁藏布江下游工程区内多类型工程地质问题隐蔽性强、影响范围广、链式效应显著的严峻挑战，传统的“单点式”与“被动式”监测手段已远不能满足工程安全保障的需求，创新传统监测预警模式，为实现对重大工程地质问题的“早识别、快预判、准预警”的智能感知。因此，未来应将研究核心聚焦于“数据感知-多源融合-智能预警”等新兴技术领域，构建重大工程地质问题多维、动态、智能的“智慧”监测预警体系。

（1）“空-天-地-隧”一体化协同监测系统。

空-天-地-隧立体化监测技术在地质灾害防治工作中发挥着举足轻重的作用，但对于高海拔地区条件下的多源数据协同探测技术及复杂地质条件下的不良地质风险动态识别预警方法仍处于探索阶段，无法为高海拔地区重大工程建设提供地质保障。开展“星载航天遥感+机载航空探测+地面矩阵监测+隧道物理探测”的联合探测技术在高海拔环境下的协同工作机制研究，建立区域地质信息全要素探测可靠性评估理论架构，构建“空-天-地-隧”一体化多源立体探测技术体系，精准获取雅鲁藏布江下游区域关键地质数据，可为地质灾害防治工作提供有效的数据支撑（图 20）。

（2）多源监测数据融合与风险预测。

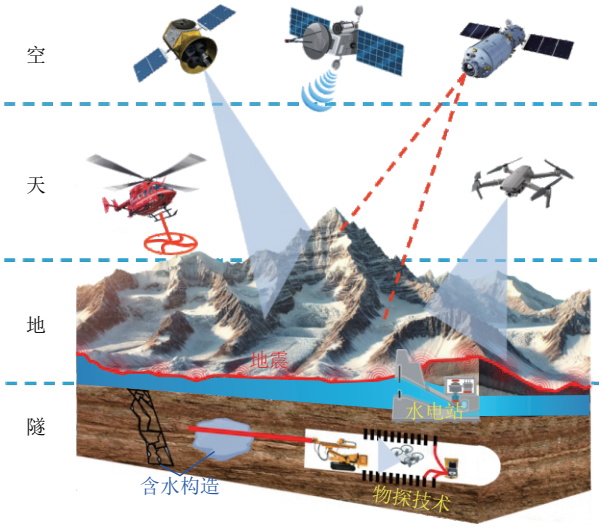


图 20　“空-天-地-隧”一体化协同监测系统

Fig. 20　Integrated air-space-ground-tunnel collaborative monitoring and early warning system

针对当前空间地理信息、多源遥感、无人机航测以及三维激光扫描等多源监测数据融合处理难题，研究多源数据无量纲处理与归一化方法，提出数据空间采样率和分辨率统一的处理方法，基于数据降维与特征提取方法构建多源数据融合算法，实现雅鲁藏布江下游研究区范围内多源监测数据融合。在数据融合的基础上，利用机器学习与深度学习等人工智能算法，明确雅鲁藏布江下游监测数据与灾害诱发因素之间的复杂非线性关系，构建基于AI大数据分析框架下的灾害发生时间、空间和规模的动态智能分析模型，形成区域地质风险的“数字孪生”。

（3）工程地质问题智能预警与辅助决策平台。

基于不良地质风险预测结果，明确雅鲁藏布江下游各类工程地质问题预警指标警度赋值方法，划分安全风险阶段性预警指标值和结构健康状态等级，实现工程健康状态科学厘定，以此为基础建立集成化智能预警云平台整体运行架构融合5G通讯、大数据、云计算、BIM与机器视觉等智能技术，形成地下工程结构健康状态集成化智能预警云平台。以三维图形技术、仿真技术和显示技术为手段，构建雅鲁藏布江下游区域VR基础场景，建立高风险不良地质VR可视化平台，并当监测数据触发预警时，利用平台向现场施工人员远程推送避灾路线与加固处理建议，实现指挥调度的一体化与智能化。

4.4 雅鲁藏布江下游重大工程深埋隧道强韧协同治理体系

深埋隧道是雅鲁藏布江下游重大工程最关键的构筑物，又地处喜马拉雅东构造结区，跨越雅鲁藏布江缝合带和全新世活动的断裂带，地质构造极为复杂，地震烈度高，隧洞沿线岩性差异大，地应力极高且应力场异常多变。高地应力、高地震烈度、开挖等多源扰动及其叠加作用下，潜在的强动力响应变形破坏、大体积塌方、大深度开裂、大范围错断等风险，是未来深埋隧道建设面临的关键工程难题和重大挑战。

（1）针对隧道未来建设与运营期面临的由高地应力主导的软岩大变形、突水突泥、塌方与岩爆等工程地质问题的挑战，建立以能量调控为核心的高强高韧支护技术体系。当前应聚焦于在动力冲击下能够通过大变形、相变或内部摩擦等方式高效消能的新型材料研发，如高分子聚合物、形状记忆合金等；突破传统水泥基材料的耐久性瓶颈，研发适用于岩土体致灾地质基因且兼具高强度、高韧性、自修复与绿色环保的新型注浆材料，如纳米复合注浆材料、围岩损伤自修复材料等，提出“能量消减–锚材创新–浆体优化”的韧性支护设计方法，从根本上提升隧道抵抗强动力灾害的能力。

（2）为应对雅鲁藏布江下游重大工程深埋隧道动力灾害支护结构设计要求，亟须攻克隔震与减震技术和抗错动新型韧性结构等方面的技术难题。未来可考虑研发融合柔性混凝土和微生物自修复技术的控渗新材料，创新适用于高烈度地震区深埋减震抑裂的夹层材料，基于支护结构与围岩相互作用的时空效应优选主动支护构件，形成深埋引水隧道抗渗–抑裂–增韧的新型复合减震结构；为进一步提升隧道跨越活动断裂带的抗错断性能，提出基于新型高强高韧板材的抗米级错动隧洞衬砌新型结构，优化设计考虑高内外水压力、高地应力及洞群效应等复杂条件的抗错断结构，建立适用于深埋隧道跨活动断裂的韧性防控技术。

（3）针对雅鲁藏布江下游重大工程区“五高、四强和两特殊”的极端作业环境，传统人工作业面临极大的安全风险与效率瓶颈，研发具有高度自主性的无人化施工装备，实现高风险工序的“机器代人”。攻克具备自主掘进、自主纠偏与智能灾害预警功能的TBM掘进机，研发自动化喷浆机器人、智能锚杆作业台车及洞内自动化运输系统，通过远程控制中心实现对施工现场的无人化操作，极大降低高风险地段的人员伤亡风险，推动隧道施工“零风险”。

5 结论与展望

本文针对雅鲁藏布江下游未来重大工程建设面临的不良地质条件、库岸及深埋隧道工程地质问题，结合大量文献对国内外研究现状进行了深入思考与系统梳理，阐明了研究区内活动断裂、地震、特殊岩体、高地应力、高渗透压、高地温、冰川冻土以及隐伏溶洞等多种不良地质的发育特征，深入分析了雅鲁藏布江下游重大工程未来建设面临的工程地质问题，并针对多种工程地质问题提出了相应的建议。具体结论如下：

（1）雅鲁藏布江下游不良地质条件表现为“内外动力耦合、多重因素叠加、空间变异显著”

的系统性特征，具有“五高”（高落差、高地震烈度、高地应力、高渗透压、高地温）、“四强”（构造作用强、断裂活动强、冰川及冻土退化强），“两特殊”（特殊的岩土体、隐伏溶洞）的突出特点。强烈的地壳活动与构造变形不仅累积了可触发岩体工程灾变与孕育高地应力场的巨大能量，其伴生的活动断裂系统更构成了高压流体与地热交换的优势通道，形成了“热–流–固”耦合的极复杂岩石力学物理场。与此同时，研究区高速构造抬升与急剧的冰川及冻融作用，致使区域岩体遭受着多层次累积损伤并处于临界失稳状态。然而，现有研究多是针对单一地质要素孕灾特征的分析与描述，在解析区域构造运动特征、阐明多类型地质灾害发育规律和揭示多物理场耦合孕灾机制等方面，仍处于理论探索的初步阶段。因此，亟须开展多尺度的板块运动、构造活动与灾害诱发机制研究，建立板块运动特征与区域构造活动的非线性对应关系，明确区域构造稳定性与动力驱动重大灾害之间的关联，揭示重大工程灾变的发育规律与成生机制，为重大灾害风险防控提供有效对策与工程措施。

（2）雅鲁藏布江下游重大工程面临的崩塌、滑坡、泥石流、高位远程滑坡、冰川跃动、冰湖溃决、坝体失稳以及水库地震等工程地质问题具有“突发性、链生性、强破坏性”的特征，呈现为一种以“过程级联与链生放大效应”为主导的系统性风险。以高位远程滑坡和冰湖溃决为代表的极端动力灾害，其本质是高势能地质体在瞬时触发下的非平衡态、高能量、大变形的剧烈动力学过程；库区单一灾害往往会诱发一系列的地质灾害问题，如典型的“滑坡–涌浪–堵江–溃决”等灾害链效应；水库诱发地震和库岸长期稳定究其根本是工程–环境交互问题，而重大工程作为一个典型的“人–地”耦合系统，其建设与运营本身就是对区域地质环境的巨大扰动。然而，当前阶段的理论模型和解析手段都难以完全、精准地预判区域库岸地质灾害的灾变行为，当前“大规模、长周期、多方位”的原位与实时监测是直接保障工程安全的根本性方法，也是在目前理论认知尚不完备的条件下能够捕捉极端动力过程与灾害链前兆信息的监测手段，探究“数据感知–多源融合–智能预警”等新兴监测与人工智能相结合，构建工程地质问题“多维、动态、智能”的监测预警体系，可为重大工程安全提供坚实和可靠的保障。

（3）雅鲁藏布江下游深埋隧道软岩大变形、突水突泥、岩爆、塌方、衬砌结构剪切错断、冻害及热害等工程地质问题，具有“耦合衍生性、灾变突发性、空间变异性、劣化长期性”的特点，其核心是多物理场强耦合作用下的复杂动力学问题。软岩大变形与岩爆作为高地应力以不同形式对隧道进行破坏，临界阈值与风险防控尚未明晰；突水突泥作为复杂地质构造与高渗透压等自然因素相互作用结果的产物，隔水岩体厚度极难精准预测；而隧道穿越活动断裂产生的衬砌结构剪切错断则是宏观构造运动诱发的工程结构病害，现有支护结构无法有效保障隧道长期稳定；冻害及热害则是环境相互制约工程的典型代表，无法保障适宜的施工环境和隧道耐久性。因此，在未来雅鲁藏布江下游深埋隧道建设中必须实现“被动防御”向“动态预警与智能调控”的思路转变，聚焦高应力、高水压和高地温等多物理场耦合作用下岩体的本构关系及破坏准则，破解岩体劣化与灾变的全过程演化机制不清的难题，并构建涵盖超前钻探、随钻探测、微震监测和点云数据采集相结合的综合探测预警系统，研发适应深埋隧道大变形、衬砌结构剪切错断、冻害及热害的高强–高韧衬砌自修复材料和新型支护结构，确保深埋隧道建设安全与长期稳定运行。

（4）根据雅鲁藏布江下游主要不良地质条件与工程地质问题以及现有研究的不足，未来研究重点应包括以下几个方面：① 雅鲁藏布江下游区域构造运动及灾害发育特征；② 雅鲁藏布江下游深埋隧道多场耦合孕灾机制；③ 雅鲁藏布江下游区域工程地质问题智慧监测预警体系；④ 雅鲁藏布江下游深埋隧道强韧协同治理体系。

雅鲁藏布江下游开发建设不仅是中国兑现“双碳”承诺的“零碳航母”，更是富民兴藏的“经济引擎”和边疆治理的“压舱基石”。纵观全球水电工程建设发展史，在近150年的时间里，水力发电成为如今全球能源结构中的重要支柱，未来雅鲁藏布江下游一系列重大工程的成功将势必成为人类工程建设史上的又一个重要里程碑，也是中国继续引领世界工程地质发展的重要标志。

参考文献：

[1] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 李强出席雅鲁藏布江

下游水电工程开工仪式并宣布工程开工[EB/OL]. [2025-07-19]. http://www.scio.gov.cn/yw/lq_/202507/t20250719_922661.html.
[2] 苏小庆,王颂吉. 进一步推动新时代西部大开发形成新格局[J]. 党课参考,2025(7):24-37.
[3] 新华社记者. 创新驱动融合赋能开拓西部高质量发展新格局[N]. 新华每日电讯,2025-11-07(001).
[4] 三大工程发力2万亿西部基建大爆发[J]. 建设机械技术与管理,2025,38(5):4-5.
[5] 许志琴,蔡志慧,张泽明,等. 喜马拉雅东构造结——南迦巴瓦构造及组构运动学[J]. 岩石学报,2008,24(7):1463-1476.
[6] 姜枚,彭淼,王有学,等. 喜马拉雅东构造结岩石圈板片深俯冲的地球物理证据[J]. 岩石学报,2012,28(6):1755-1764.
[7] 李滨,殷跃平,谭成轩,等. 喜马拉雅东构造结工程选址面临的地质安全挑战[J]. 地质力学学报,2022,28(6):907-918.
[8] 张田田. 雅鲁藏布大峡谷超高位超远程地质灾害动力学特征研究[D]. 北京:中国地质科学院,2024.
[9] YANG A, WANG H, LIU W, et al. Two megafloods in the middle reach of Yarlung Tsangpo River since Last-glacial period: Evidence from giant bars [J]. Global and Planetary Change, 2022, 208: 103726.
[10] 小科. "天河"上的超级充电宝——雅鲁藏布江水电站大揭秘[J]. 军事文摘,2025(20):36-39.
[11] 李志威,王兆印,余国安,等. 雅鲁藏布大峡谷水电开发对边坡稳定性的影响[J]. 山地学报,2015,33(3):331-338.
[12] 彭建兵,崔鹏,庄建琦. 川藏铁路对工程地质提出的挑战[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(12):2377-2389.
[13] 张永双,任三绍,郭长宝,等. 青藏高原东缘高位崩滑灾害多动力多期次演化特征[J]. 沉积与特提斯地质,2022,42(2):310-318.
[14] 王盈,金家梁,袁仁茂. 藏东南地区地质灾害空间分布及影响因素分析[J]. 地震研究,2019,42(3):428-437, 456.
[15] 杜国梁. 喜马拉雅东构造结地区滑坡发育特征及危险性评价[D]. 北京: 中国地质科学院, 2017.
[16] 殷跃平, 高少华. 高位远程地质灾害研究:回顾与展望[J]. 中国地质灾害与防治学报,2024, 35(1):1-18.
[17] 谢和平,张茹,张泽天,等. 深地科学与深地工程技术探索与思考[J]. 煤炭学报, 2023, 48(11):3959-3978.
[18] 张世殊. 水利水电深部工程地质勘察技术现状与发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2025, 44(6):1377-1404.
[19] 王喜华,赵志明,尹建勋,等. 雅鲁藏布江盆因拉隧道主要工程地质问题[J]. 四川地质学报,2014,34(3):408-412.
[20] 严健,何川,汪波,等. 雅鲁藏布江缝合带深埋长大隧道群岩爆孕育及特征[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(4):769-781.
[21] 秦向辉,陈群策,孟文,等. 喜马拉雅东构造结北缘通麦—波密段现今地应力场特征研究[J]. 地质学报,2023,97(7):2126-2140.
[22] 薛翊国,孔凡猛,杨为民,等. 川藏铁路沿线主要不良地质条件与工程地质问题[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(3):445-468.
[23] 单菊萍. 基于DEM的雅鲁藏布江河流地貌特征的研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京),2007.
[24] 马鑫,付雷,李铁锋,等. 喜马拉雅东构造结地区地热成因分析[J]. 现代地质,2021,35(1):209-219.
[25] 康文君,徐锡伟,于贵华,等. 南迦巴瓦峰第四纪隆升期次划分的热年代学证据[J]. 地球物理学报,2016,59(5):1753-1761.
[26] 莫宣学,董国臣,赵志丹,等. 西藏冈底斯带花岗岩的时空分布特征及地壳生长演化信息[J]. 高校地质学报,2005, 11(3):281-290.
[27] 侯增谦,莫宣学,杨志明,等. 青藏高原碰撞造山带成矿作用:构造背景、时空分布和主要类型[J]. 中国地质,2006, 54(2):340-351.
[28] 邵翠茹,尤惠川,曹忠权,等. 雅鲁藏布大峡谷地区构造和地震活动特征[J]. 震灾防御技术,2008, 3(4):398-412.
[29] 宋键,唐方头,邓志辉,等. 喜马拉雅东构造结周边地区主要断裂现今运动特征与数值模拟研究[J]. 地球物理学报,2011,54(6):1536-1548.
[30] 周斌,薛世峰,邓志辉,等. 水库诱发地震时空演化与库水加卸载及渗透过程的关系——以紫坪铺水库为例[J]. 地球物理学报,2010,53(11):2651-2670.
[31] 张进江,季建清,钟大赉,等. 东喜马拉雅南迦巴瓦构造结的构造格局及形成过程探讨[J]. 中国科学(D辑:地球科学),2003(4):373-383.
[32] 赵超英,刘晓杰,高杨,等. 基于SAR/In SAR技术的雅鲁藏布江下游高位地质灾害早期识别[J]. 地质力学学报,2022,28(6):981-994.
[33] 邓起东,张培震,冉勇康,等. 中国活动构造与地震活动[J]. 地学前缘,2003(S1):66-73.
[34] 李海东. 雅鲁藏布江流域风沙化土地遥感监测与植被恢复研究[D]. 南京:南京林业大学,2012.
[35] 郑来林,金振民,潘桂棠,等. 东喜马拉雅南迦巴瓦地区区域地质特征及构造演化[J]. 地质学报,2004(6):744-751, 882.
[36] 杜国梁,邹玲,杨志华,等. 雅鲁藏布江大拐弯地区滑坡发育分布特征及其对地貌演化的响应[J]. 地质学报,2024,98(10):3062-3076.
[37] 李壮,李滨,高杨,等. 雅鲁藏布江下游色东普沟高位地质灾害发育特征遥感解译[J]. 中国地质灾害与防治学报,2021,32(3):33-41.
[38] 刘勇. 内外动力耦合下雅鲁藏布江贡嘎-加查河段的成灾机制研究[D]. 成都:成都理工大学,2021.
[39] 刘宇平, MONTGOMERY D R, HALLET B,等. 西藏东南雅鲁藏布大峡谷入口处第四纪多次冰川阻江事件[J]. 第四纪研究,2006, 49(1):52-62.
[40] 丁林,钟大赉. 印度与欧亚板块碰撞以来东喜马拉雅构造结的演化[J]. 地质科学,2013,48(2):317-333.
[41] 王猛,刘焰,何延波,等. 喜马拉雅山脉的地质地貌特征:来自SRTM数字高程模型和降水量数据的约束[J]. 地质科学,2008,47(3):603-622.
[42] 祝嵩. 雅鲁藏布江河谷地貌与地质环境演化[D]. 北京:中国地质科学院,2012.
[43] ZHU D, WANG Q, ZHAO Z. Constraining quantitatively the

timing and process of continent-continent collision using magmatic record: Method and exam-ples [J]. Science China Earth Sciences, 2017. 60(6): 1040-1056.

[44] 彭小龙,王道永. 雅鲁藏布江断裂带活动构造特征与活动性分析[J]. 长江大学学报,2013,10(26):41-44.

[45] 哈广浩,吴中海,何林. 藏南邛多江地堑的晚新生代沉积地层及对南北向裂谷形成时代的初步限定[J]. 地质学报,2018,92(10):2051-2067.

[46] 吴章明,申屠炳明,曹忠权,等. 西藏格林错断层带的基本特征[J]. 地震地质,1992(1):41-46, 101.

[47] 朱菲菲. 雅鲁藏布江中游谢通门南北向活动断裂带特征及工程效应研究[D]. 成都:成都理工大学,2008.

[48] 常小鹏,张翔. 西藏东久—米林断裂南北界断裂空间展布特征[J]. 地质论评,2023,69(S1):67-68.

[49] 王晓楠,唐方头,邵翠茹. 南迦巴瓦构造结周边地区主要断裂现今运动特征[J]. 震灾防御技术,2018,13(2):267-275.

[50] 陶鑫鑫. 东构造结区域断裂运动对滑坡灾害发育影响研究[D]. 成都:成都理工大学,2023.

[51] 孙炜锋,黄火林,孙东生,等. 雅鲁藏布江断裂带东段现今地应力测量与断层活动性分析[J]. 岩土力学,2024,45(4):1129-1141.

[52] 詹慧丽,白玲,陈治文. 1950年西藏墨脱—察隅8.6级地震震源参数、发震构造及周边地震活动性[J]. 地球与行星物理论评(中英文),2023,54(1):44-55.

[53] 李浩文,贺凯,李滨,等. 雅鲁藏布大峡谷强震地震动地形放大效应:以2017年米林MS6.9地震为例[J/OL]. 地质学报:1-13 [2025-09-10]. DOI: 10.19762/j. cnki. dizhixuebao. 2024558.

[54] 李国辉,白玲,丁林,等. 2019年西藏墨脱MS6.3地震震源参数及其构造意义[J]. 地球物理学报,2020,63(3):1214-1223.

[55] 次吉卓玛,次仁多吉,益西拉姆,等. 2020年西藏丁青M5.1地震浅析[J]. 西藏科技,2021(9):55-58.

[56] 郭纪盛. 浅谈雅鲁藏布江流域地震分布特征及区域稳定性[J]. 科技与创新,2018(15):44-46, 51.

[57] 张浪平,邵志刚,晏锐. 藏东南及周边地区地震活动特征研究[J]. 地震,2011,31(3):9-18.

[58] 胡祎石. 雅鲁藏布江下游地区大震运动学震源地震动模拟[D]. 南昌:南昌航空大学,2024.

[59] 李晓峰,王萍,王慧颖,等. 雅鲁藏布江大拐弯地区河流地貌参数揭示的地质构造意义[J]. 第四纪研究,2018,38(1):183-192.

[60] 雅鲁藏布江下游水电工程开工面临多项关键技术挑战[J]. 隧道建设(中英文),2025,45(7):1316.

[61] 张敏,张广泽,蒋良文,等. 川藏铁路雅鲁藏布江缝合带地质选线研究[J]. 资源信息与工程,2019,34(1):164-166.

[62] FU K, QIU D, XUE Y, et al. TBM tunneling strata automatic identification and working conditions decision support[J]. Automation in Construction: An International Research Journal, 2024,163:23.

[63] 鄢天柱,丁一聪,刘宏. 雅鲁藏布江流域某机场跑道地下水渗流场分析[J]. 中国水运,2022(7):118-121.

[64] 武魏楠. 雅鲁藏布江下游水电工程开工:中国万亿元级清洁能源战略启幕[J]. 能源,2025(7):68-69.

[65] PAUDYAL H, SINGH H N, SHANKER D, et al. Stress pattern in two seismogenic sources in Nepal-Himalaya and its vicinity[J]. Acta Geophysica, 2008, 56(2):313-323.

[66] 曹忠权,谢平,金花,等. 雅鲁藏布江断裂带附近地应力场的变化特征[J]. 地球物理学进展,2003, 18(1):167-172.

[67] 张斌,孙尧,马秀敏,等. 东构造结墨脱关键区域地应力场特征及其构造稳定性分析[J]. 地质力学学报,2023,29(3):388-401.

[68] 邵战涛,朱岳明,强晟,等. 高寒地区混凝土重力坝温控防裂研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2008, 30(1):6-8.

[69] 陈平光,何骁慧,徐树峰,等. 喜马拉雅东构造结地震精定位及其区域应力场研究[J]. 地球与行星物理论评(中英文),2023,54(6):667-683.

[70] 姜瑶,夏梓皓,熊吕阳,等. 雅鲁藏布江流域水循环要素时空演变及径流驱动因素[J/OL]. 水土保持学报. https://doi. org/10. 13870/j. cnki. stbcxb. 2026. 01. 013, 2026,40(1).

[71] 张仪辉,刘昌明,梁康,等. 雅鲁藏布江流域降水时空变化特征[J]. 地理学报,2022,77(3):603-618.

[72] 雷俊峰. 拉日铁路雅江峡谷地质特征及选线原则[J]. 地下水,2014,36(1):158-160.

[73] 杨浩,崔春光,王晓芳,等. 气候变暖背景下雅鲁藏布江流域降水变化研究进展[J]. 暴雨灾害,2019,38(6):565-575.

[74] 李利平,李术才. 深埋硬岩隧道特大体量岩溶水体突出的灾变机制[C]//中国岩石力学与工程学会工程安全与防护分会. 第2届全国工程安全与防护学术会议论文集(上册). 济南:山东大学岩土与结构工程研究中心,2010:99-105.

[75] WU G, CHEN W, YUAN J, et al. Formation mechanisms of water inrush and mud burst in a migmatite tunnel: a case study in China [J]. Journal of Mountain Science, 2017, 14 (1): 188-195.

[76] BAYATI M, HAMIDI J K. A case study on TBM tunnelling in fault zones and lessons learned from ground improvement [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 63: 162-170.

[77] 李术才,王康,李利平,等. 岩溶隧道突水灾害形成机理及发展趋势[J]. 力学学报,2017,49(1):22-30.

[78] 陈兴周,白亚妮,陈莉丽,等. 高渗压与循环加卸载环境下开挖卸荷岩体力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2024,46(4):737-745.

[79] 林志南,冯世宏,王家全,等. 高应力和高渗压下粗糙单裂隙非线性渗透行为试验研究[J]. 土木工程学报,2024,57(12):92-103, 131.

[80] 刘涛影,曹平,章立峰,等. 高渗压条件下压剪岩石裂纹断裂损伤演化机制研究[J]. 岩土力学,2012,33(6):1801-1808.

[81] 肖序常,万子益,李光岑,等. 雅鲁藏布江缝合带及其邻区构造演化[J]. 地质学报,1983, 40(2):205-212.

[82] 袁广祥,尚彦军,林达明. 帕隆藏布流域堆积体边坡的工程地质特征及稳定性评价[J]. 工程地质学报,2009,17(2):188-194.

[83] 孙凤环,王培清. 藏东南地区地热资源浅析[J]. 中国农村水

利水电,1998(1):38-40.
[84] ZHANG Z, WANG S, YIN H, et al. Fracture seepage and the temperature field distribution of rocks surrounding high-temperature tunnels: a numerical analysis[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2022,8(4):1-10.
[85] 刘天仇. 雅鲁藏布江水文特征[J]. 地理学报,1999(S1):157-164.
[86] ZOU D, ZHAO L, SHENG Y, et al. A new map of permafrost distribution on the Tibetan Plateau[J]. The Cryosphere, 2017, 11(6):2527-2542.
[87] WANG T, YANG D, QlN Y, et al. Historical and future changes of frozen ground in the upper Yellow River Basin[J]. Global and Planetary Change,2018,12:199-211.
[88] CHEN X, LONG D, HONG Y, et al. lmproved modeling of snow and glacier melting by a progressive two-stage calibration strategy with GRACE and multisource data: How snow and glacier meltwater contributes to the runoff of the Upper Brahmaputra River basin[J]. Water Resources Research, 2017. 53(3): 2431-2466.
[89] 姚檀栋,姚治君. 青藏高原冰川退缩对河水径流的影响[J]. 自然杂志,2010,32(1):4-8.
[90] MENG F, SU F, LI Y, et al. Changes in Terrestrial water storage during2003-2014 and possible causes in Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019,124(6):2909-2931.
[91] 杨大文,王宇涵,唐莉华,等. 雅鲁藏布江上游径流变化及影响因素分析[J]. 水力发电学报,2023,42(3):41-49.
[92] 江科. 雅鲁藏布江流域径流组成及其对气候变化的响应[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
[93] XUAN W, XU Y P, FU Q, et al. Hydrological responses to climate change in Yarlung Zangbo River basin, Southwest China[J]. Journal of Hydrology, 2021, 597:125761.
[94] 刘剑,姚治君,陈传友. 雅鲁藏布江径流变化趋势及原因分析[J]. 自然资源学报,2007, 22(3):471-477.
[95] 阿丽. 米堆:绝美的藏地"雪国"[J]. 劳动保障世界,2019(19):72-73.
[96] 郑锡澜,常承法. 雅鲁藏布江下游地区地质构造特征[J]. 地质科学,1979(2):116-126, 191-193.
[97] DIAN Z. A morphological analysis of Tibetan limestone pinnacles: Are they remnants of tropical karst towers and cones?[J]. Geomorphology, 1996, 15(1):79-91.
[98] 王延平. 崩塌灾害变形破坏机理与监测预警研究[D]. 成都:成都理工大学,2016.
[99] 齐畅, 吴瑞安, 马海善, 等. 西藏庞村古滑坡发育特征与危险性评价[J]. 地质通报, 2025: 44(2/3): 340-352.
[100] 刘元林,邓江红,郭盼盼. 雅鲁藏布江中游崩塌滑坡地质灾害与防治[J]. 地质学报,2013,87(S1):297.
[101] YAO T, XUE Y, CHEN D, et al. 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[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2019,100(3):423-444.
[102] JIA H, CHEN F, PAN D. Disaster Chain Analysis of Avalanche and Landslide and the River Blocking Dam of the Yarlung Zangbo River in Milin County of Tibet on 17 and 29 October 2018[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(23): 4707.
[103] CHEN C, ZHANG L M, XIAO T, et al. Barrier lake bursting and flood routing in the Yarlung Tsangpo Grand Canyon in October 2018[J]. Journal of Hydrology, 2020, 583:124603.
[104] 黄勇. 高寒山区岩体冻融力学行为及崩塌机制研究[D]. 成都:成都理工大学,2012.
[105] 高少华,殷跃平,李滨,等. 雅鲁藏布江大峡谷则隆弄高位冰岩崩灾害链动力学特征[J]. 工程地质学报,2024,32(3):996-1009.
[106] 刘传正,吕杰堂,童立强,等. 雅鲁藏布江色东普沟崩滑-碎屑流堵江灾害初步研究[J]. 中国地质,2019,46(2):219-234.
[107] 陈国超, 张晓飞, 裴先治, 等. 雅鲁藏布江中段日喀则地区却顶布—路曲地幔橄榄岩岩石地球化学特征、成因及其地质意义[J]. 地学前缘, 2024, 31(3): 1-19.
[108] 刘江涛,徐宗学,赵焕,等. 1973—2016年雅鲁藏布江流域极端降水事件时空变化特征[J]. 山地学报,2018,36(5):750-764.
[109] HU G, XIA X, TIAN S, et al. Spatial patterns and influencing factors of debris flows in the middle Yarlung Zangbo River on the Tibetan Plateau[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2025,84(4):179.
[110] 祁生文,李永超,刘春玲,等. 横断山区水电工程扰动灾害及风险分析[J]. 工程地质学报,2024,32(3):729-759.
[111] 杨友刚,雷世兵. 青藏高原易贡藏布流域水电开发重大工程地质问题及对策[J]. 工程地质学报,2024,32(5):1759-1770.
[112] 郭佳宁,山克强,程捷. 藏东南地区滑坡发育规律分析[J]. 资源与产业,2009,11(2):132-139.
[113] GAO D. Expeditionary studies on the moisture passage of the Yarlung Zangbo River[J]. Chinese Journal of Natural Medicines,2008, 30:301-303.
[114] 丁林,钟大赉,潘裕生,等. 东喜马拉雅构造结上新世以来快速抬升的裂变径迹证据[J]. 科学通报,1995(16):1497-1500.
[115] 孙靖宜,杨金,吴永宁,等. 藏南地区桑谷沟冰川泥石流形变历史分析和运动过程模拟[J]. 地质科技通报,2025,44(2):355-367.
[116] 蒋忠信. 西藏帕隆藏布河谷崩塌滑坡、泥石流的分布规律[J]. 地理研究,2002(4):495-503.
[117] 吕杰堂,王治华,周成虎. 西藏易贡大滑坡成因探讨[J]. 地球科学,2003(1):107-110.
[118] FAN X, SCARINGI G, XU Q, et al. Coseismic landslides triggered by the 8th August 2017 Ms 7.0 Jiuzhaigou earthquake (Sichuan, China): factors controlling their spatial distribution and implications for the seismogenic blind fault identification[J]. Landslides,2018,15(5):967-983.

[119] YIN Y, LI B, GAO Y, et al. Geostructures, dynamics and risk mitigation of high-altitude and long-runout rockslides[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 15(1): 66-101.

[120] TANG M, XU Q, WANG L, et al. Hidden dangers of ice avalanches and glacier lake outburst floods on the Tibetan Plateau: identification, inventory, and distribution[J]. Landslides, 2023, 20(12): 2563-2581.

[121] 李昆仲,张明哲,邢爱国. 雅鲁藏布江色东普沟崩滑-碎屑流过程模拟及运动特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021,32(1):18-27.

[122] DENG Y, GAO Q, WANG X, et al. A large-scale rock avalanche-debris flow cascading hazard in the Sedongpu catchment, southeastern Tibetan Plateau [J]. Landslides, 2025, 22(1): 109-120.

[123] GUO R, JIANG L, XU Z, et al. Seismic and hydrological triggers for a complex cascading geohazard of the Tianmo Gully in the southeastern Tibetan Plateau [J]. Engineering Geology, 2023, 324: 107269.

[124] GAO H, YIN Y, LI B, et al. Geomorphic evolution of the Sedongpu Basin after catastrophic ice and rock avalanches triggered by the 2017 Ms6. 9 Milin earthquake in the Yarlung Zangbo River area, China[J]. Landslides, 2023, 20(11): 2327-2341.

[125] ZHANG D, WANG J, QI L, et al. Initiation and movement of a rock avalanche in the Tibetan Plateau, China: insights from field observations and numerical simulations [J]. Landslides, 2022, 19(11): 2569-2591.

[126] SONG K, WANG F, YI Q, et al. Landslide deformation behavior influenced by water level fluctuations of the Three Gorges Reservoir (China)[J]. Engineering Geology, 2018, 247: 58-68.

[127] CHEN M, YANG X, QI S, et al. Deformation and stability analyses of a near-dam rocky slope and its potential landslide-generated wave threats [J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 2022, 55(2): qjegh2021-018.

[128] QU J, YANG W, XUE Y, et al. Formation analysis and hazard assessment of the landslide-debris flow disaster chain in small watersheds of the reservoir type [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2024, 83(12): 1-20.

[129] 刘奎,陈宣华,王德润,等,北山东南部早白垩世伸展构造变形:二维反射地震剖面解释与磷灰石裂变径迹测年的制约[J]. 地质力学学报,2024, 30(3):377-393.

[130] 苏培东,胥帅,梁宇,等. 米林地区冰川冰湖泥石流期次划分及其与构造活动的关系[J]. 工程地质学报,2025,33(2): 541-555.

[131] 马泽良,何治亮,罗开平,彭金宁,庄新兵,杨帆,刘栩. 青藏高原南羌塘坳陷白垩纪以来的隆升剥蚀历史——来自低温热年代学的约束[J]. 石油实验地质,2024,46(1):75-86.

[132] 翟毅飞. 藏东南地区冰川泥石流分布规律与规模频率特征研究[D]. 拉萨:西藏大学,2022.

[133] 张沛全,刘小汉. 雅鲁藏布江大拐弯入口段泥石流特征及应对措施[J]. 中国地质灾害与防治学报,2008(1):12-17.

[134] 詹聪聪. 古乡沟泥石流特征及预警分析研究[D]. 拉萨: 西藏大学,2022.

[135] 余忠水,德庆卓嘎,罗布次仁,等. 西藏波密县天摩沟"9·4"特大泥石流灾害成因初步分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2009,20(1):6-10.

[136] 吴中海, 2024. 青藏高原陆陆碰撞-挤出活动构造体系控震作用:以1990年以来强震活动为例. 地质力学学报, 30(2): 189-205.

[137] 蒋熹,王宁练,贺建桥,等. 中国西部山地冰川区地面风场特征及其局地天气气候意义[J]. 中国科学:地球科学,2025,55(8):2849-2861.

[138] 童立强,祁生文,安国英,等. 喜马拉雅山地区重大地质灾害遥感调查研究[J]. 工程地质学报,2019,27(3):496.

[139] 胡桂胜,陈宁生,邓明枫,等. 西藏林芝地区泥石流类型及形成条件分析[J]. 水土保持通报,2011,31(2):193-197, 221.

[140] 高波,张佳佳,王军朝,等. 西藏天摩沟泥石流形成机制与成灾特征[J]. 水文地质工程地质,2019,46(5):144-153.

[141] 李翠平,王萍,钱达,等. 雅鲁藏布江大峡谷入口河段最近两期古堰塞湖事件的年龄[J]. 地震地质,2015,37(4):1136-1146.

[142] 常鸣,唐川,苏永超,等. 雅鲁藏布江米林段泥石流堆积扇危险范围预测模型[J]. 工程地质学报,2012,20(6):971-978.

[143] 黄艳婷,郭永刚. 考虑降雨敏感度的泥石流危险性评价——以藏东南地区为例[J]. 中国地质灾害与防治学报,2023,34(1):129-138.

[144] 龚凌枫,张运达,铁永波,等. 雅鲁藏布江大拐弯典型泥石流全新世以来发育历史及活动特征[J]. 地质力学学报,2022, 28(6):1024-1034.

[145] 赵聪,梁京涛,铁永波,等. 西藏雅鲁藏布江峡谷特大巨型泥石流活动与泥沙输移特征研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,2024,35(4):45-55.

[146] 江平,张全发,李思悦. 雅鲁藏布江水化学演变规律[J]. 环境科学,2023,44(6):3165-3173.

[147] 刘丽红,王翱宇,陈宁生,等. 雅鲁藏布江下游沿河段滑坡崩塌空间分布特征及其主控因素[J]. 科学技术创新,2022, (17):131-134.

[148] 李翔. 雅鲁藏布江墨脱河段大型滑坡发育与新构造地貌演化关联性研究[D]. 成都: 成都理工大学,2019.

[149] 李金城. 拉日铁路雅鲁藏布江峡谷区线路方案比选研究[J]. 铁道勘察,2007(5):1-6.

[150] 辛聪聪. 基于DEM雅鲁藏布江东构造结河谷地貌及其地质环境效应研究[D]. 成都: 成都理工大学,2019.

[151] 王军,刘天仇,尹观. 西藏雅鲁藏布江中、下游地区大气降水同位素分布特征[J]. 地质地球化学,2000(1):63-67.

[152] 张佳佳,刘建康,高波,等. 藏东南嘎龙曲冰川泥石流的物源特征及其对扎墨公路的影响[J]. 地质力学学报,2018,24(1):106-115.

[153] 殷跃平. 西藏波密易贡高速巨型滑坡特征及减灾研究[J]. 水文地质工程地质,2000(4):8-11.

[154] ZHANG T, YIN Y, LI B, et al. Characteristics and dynamic analysis of the October 2018 long-runout disaster chains in the Yarlung Zangbo River downstream, Tibet, China [J]. Natural

Hazards,2022,113(3):1563-1582.
[155] MENGER P, XUEW, GUO Z, et al. Cascading hazards from two recent glacial lake outburst floods in the Nyainqêntanglha range, Tibetan Plateau [J]. Journal of Hydrology, 2023, 626 (PA):1-10.
[156] SHANG Y, YANG Z, Li L, et al. A super-large landslide in Tibet in 2000: background, occurrence, disaster, and origin [J]. Geomorphology,2003,54:225-243.
[157] MONTGOMERY D R, HALLET B, LIU Y, et al. Evidence for Holocene megafloods down the Tsangpo River gorge, southeastern Tibet[J]. Quaternary Research,2004,62(2):201-207.
[158] KORUP O. MONTGOMERY D R, Tibetan plateau river incision inhibited by glacial stabilization of the Tsangpo gorge. Nature,2008,455(7214):786-789.
[159] DELANEY K, EVANS S. The 2000 Yigong landslide (Tibetan Plateau), rockslide-dammed lake and outburst flood: Review, remote sensing analysis, and process modelling [J]. Geomorphology,2015,246:377-393.
[160] ALHO P, BAKER V R, SMITH L N. Paleohydraulic reconstruction of the largest Glacial Lake Missoula draining(s)[J]. Quaternary Science Reviews,2010,29(23/24):3067-3078.
[161] CARLING P. A, Herget, et al. Dynamic simulation of catastrophic late Pleistocene glacial-lake drainage, Altai Mountains, central Asia [J]. International Geology Review,2015,58 (14):1795-1817.
[162] DAI F, LEE C, DENG J, et al. The 1786 earthquake-triggered landslide dam and subsequent dam-break flood on the Dadu River, southwestern China [J]. Geomorphology,2005,65(3/4): 205-221.
[163] LIU W, CARLING P A, HU K, et al. Outburst floods in China: A review [J]. Earth-Science Reviews, 2019, 197: 102895.
[164] KATO F, SUWA Y, WATANABE K, et al. Mechanisms of coastal dike failure induced by the Great East Japan Earthquake Tsunami[J]. Coastal Engineering Proceedings,2012,1(33):1-9.
[165] 何海源. 由汶川地震应急处置与震损调查反思水电站应急管理的改进[C]//中国职业安全健康协会. 中国职业安全健康协会2009年学术年会论文集. 国家电力监管委员会安全监察中心,2009:92-96.
[166] 焦振华,李鹏. 陕北某水库坝肩渗透破坏原因分析[J]. 水利水电工程设计,2020,39(3):39-42.
[167] 王国安. 淮河"75·8"洪水垮坝的主要原因分析及经验教训[J]. 科技导报,2006(7):72-77.
[168] 夏其发. 水库诱发地震评价研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,2000(3):35-38.
[169] 杜瑶,余洋洋,土登次仁,等. 水库地震及其防范工作研究[J]. 中国减灾,2024, 34(17):54-55.
[170] 邹旭明. 溪洛渡水库蓄水对应力场及地震活动影响研究[D]. 南昌:南昌航空大学,2023.
[171] 丁原章. 水库诱发地震[M]. 北京: 地震出版社,1989.
[172] SIMPSON D W , LEITH W S , SCHOLZ C H . Two types of reservoir-induced seismicity [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1988, 78(6):2025-2040.
[173] 刘远征,马瑾,姜彤,等. 库水渗流与荷载对水库地震形成的影响分析[J]. 地震地质,2010,32(4):570-585.
[174] 常廷改,胡晓. 水库诱发地震研究进展[J]. 水利学报,2018, 49(9):1109-1122.
[175] 陈翰林. 锦屏一级水库孕震环境及发震机理研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所,2023.
[176] 朱家正. 水库蓄水引起的应力场变化及对构造活动影响的数值模拟研究[D]. 北京:中国地质科学院,2022.
[177] 陈厚群,徐泽平,李敏. 关于高坝大库与水库地震的问题[J]. 水力发电学报,2009,28(5):1-7.
[178] 田四明, 王伟, 唐国荣, 等. 川藏铁路隧道工程重大不良地质应对方案探讨[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(5): 697-712.
[179] 李磊,谭忠盛. 挤压性破碎软岩隧道大变形特征及机制研究[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(S1):3593-3603.
[180] WANG S, LI C, LIU Z, et al. Optimization of construction scheme and supporting technology for HJS soft rock tunnel[J]. International Journal of Mining Science and Technology,2014, 24(6):847-852.
[181] 康永水, 耿志, 刘泉声, 等. 我国软岩大变形灾害控制技术与方法研究进展[J]. 岩土力学,2022,43(8):2035-2059.
[182] QU J, XUE Y, KONG F, et al. Multi-scale analysis of the influence of red-bed lithological interface on tunnel deformation and instability[J]. Engineering Geology,2025:108314.
[183] 刘高,聂德新,韩文峰. 高应力软岩巷道围岩变形破坏研究[J]. 岩石力学与工程学报,2000(6):726-730.
[184] 韩常领,夏才初,徐晨. 软岩隧道挤压性大变形控制技术研究进展[J]. 地下空间与工程学报,2020,16(S1):492-505.
[185] 智佼,谢迪,范晋琰,等. 西部某强风化炭质板岩隧道变形力学机制及大变形控制方法研究[J]. 地质力学学报,2023,29 (5):648-661.
[186] 杨坚. 断层破碎区高地应力层状软岩隧道非对称大变形机制[J/OL]. 铁道建筑技术: 1-5[2025-09-20].
[187] 陈星,李建林,邓华锋,等. 卸荷蠕变条件下软硬相接岩层非协调变形规律研究[J]. 岩土力学,2023,44(1):303-316.
[188] LI G, MA F, GUO J, et al. Study on deformation failure mechanism and support technology of deep soft rock roadway[J]. Engineering Geology, 2020, 264: 105262.
[189] 王升,韦芹,李利平. 隧道突水突泥灾变机理研究现状及发展趋势[J]. 现代隧道技术,2025,62(4):15-25.
[190] XUE Y, KONG F, LI S, et al. Water and mud inrush hazard in underground engineering: Genesis, evolution and prevention [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 114:103987.
[191] 张庆艳, 陈卫忠, 袁敬强, 等. 断层破碎带突水突泥演化特征试验研究[J]. 岩土力学,2020,41(6):1911-1922, 1932.
[192] 李生杰,谢永利,朱小明. 高速公路乌鞘岭隧道穿越F4断层破碎带涌水塌方工程对策研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013,32(S2):3602-3609.
[193] ZHAO Y, LI P, TIAN S. Prevention and treatment technologies of railway tunnel water inrush and mud gushing in China[J].

Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering，2013，5(6)：468-477.

[194] ZAREI H R ，UROMEIHY A，SHARIFZADEH M . Evaluation of high local groundwater inflow to a rock tunnel by characterization of geological features[J]. Tunnelling & Underground Space Technology，2011，26(2)：364-373.

[195] 李术才，许振浩，黄鑫，等. 隧道突水突泥致灾构造分类、地质判识、孕灾模式与典型案例分析[J]. 岩石力学与工程学报，2018，37(5)：1041-1069.

[196] 刘玉海. 墨脱81/2级地震宏观震害及烈度特征的考证[J]. 地震研究，1985(5)：477-483.

[197] 朱家正，孙玉军，谢志远，等. 四川大岗山水库蓄水对2022年泸定MS 6.8地震及余震的影响[J]. 地质力学学报，2024，30(2)：363-376.

[198] 何川，李林，张景，等. 隧道穿越断层破碎带震害机理研究[J]. 岩土工程学报，2014，36(3)：427-434.

[199] LIU T，ZHANG C，LI W，et al. Face failure mechanism of fault tunnels under high-temperature and high-pressure conditions using the discrete element method[J]. Computers and Geotechnics，2025，179，107059-107059.

[200] LI X，ZHANG P，HE Z，et al. Identification of geological structure which Induced heavy water and mud inrush in tunnel excavation：A case study on Lingjiao tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research，2017：69203-69208.

[201] 尹建勋. 盆因拉隧道高地应力成因及岩爆防治措施研究[J]. 铁道建筑技术，2014(7)：65-70.

[202] 邓伟，刘成禹，李红军，等. 乌兹别克斯坦甘姆奇克隧道岩爆特点及其形成机制[J]. 隧道建设，2016，36(3)：275-281.

[203] CHENG T，HE M，LI H，et al. Effects of structural plane on rockburst in tunnel：A review based on published cases[J]. Engineering Geology，2025，356：108245-108245.

[204] 冯夏庭，肖亚勋，丰光亮，等. 岩爆孕育过程研究[J]. 岩石力学与工程学报，2019，38(4)：649-673.

[205] 闫苏涛. 岗木拉山隧道岩爆影响因素相关性研究[J]. 铁道建筑技术，2019(11)：10-13，32.

[206] 王喜华，赵志明，尹建勋，等. 雅鲁藏布江峡谷段盆因拉隧道岩爆预测[J]. 地球科学与环境学报，2013，35(2)：115-119.

[207] 王喜华. 雅鲁藏布江峡谷段某深埋隧道岩爆特征分析[J]. 水利与建筑工程学报，2016，14(6)：25-29.

[208] ZHONG Z，SHEN Z，QIAO H，et al. Mud inrush flow mechanisms：a case study in a water-rich fault tunnel (Yonglian Tunnel)[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment，2019，78：5743 - 5758.

[209] 汪成兵，朱合华. 隧道塌方机制及其影响因素离散元模拟[J]. 岩土工程学报，2008(3)：450-456.

[210] 张顶立. 隧道及地下工程的基本问题及其研究进展[J]. 力学学报，2017，49(1)：3-21.

[211] FAN H，LI L，CHEN G，et al. Analysis method of the water inrush and collapse in jointed rock mass tunnels：A case study[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements，2023，146：838 - 850.

[212] 刘斌，李术才，聂利超，等. 隧道含水构造直流电阻率法超前探测三维反演成像[J]. 岩土工程学报，2012，34(10)：1866-1876.

[213] FU K，XUE Y，QIU D，et al. Multi-channel fusion prediction of TBM tunneling thrust based on multimodal decomposition and reconstruction[J]. Tunnelling and Underground Space Technology，2026，167：107061.

[214] 杨建辉，沈恺，周杰，等. 穿越富水断层破碎带隧道塌方机理分析与预防[J]. 工程地质学报，2023，31(1)：248 - 257.

[215] 唐锐，李世琦，王俊，等. 富水断裂带隧道涌水突泥灾害机制及处治技术研究[J]. 地下空间与工程学报，2021，17(4)：1264-1272.

[216] 苗景川，肖鹏帅，洪富义，等. 大凉山深埋软弱围岩公路隧道塌方机理及处治措施[J]. 科学技术与工程，2023，23(30)：13143-13149.

[217] 汪振，钟紫蓝，赵密，等. 正断型断裂模拟及其对山岭隧道影响研究[J]. 岩土工程学报，2020，42(10)：1876-1884.

[218] 刘学增，王煦霖，等. 75°倾角正断层黏滑错动对公路隧道影响的模型试验研究[J]. 隧道建设，2023，43(4)：528-538.

[219] 刘学增，唐精，桑运龙，等. 逆断层黏滑错动对跨断层隧道影响机制的模型试验研究[J]. 隧道建设，2020，40(4)：481-489.

[220] 朱合华，禹海涛，韩福强，等. 穿越活动断层隧道抗震韧性设计理念与关键问题[J]. 中国公路学报，2023，36(8)：94-104.

[221] 王道远，崔光耀，袁金秀，等. 断裂黏滑错动下隧道减错措施作用效果模型试验研究[J]. 岩土工程学报，2022，44(5)：905-913.

[222] 杜修力，汪振，赵密，等. 穿越走滑断层的山岭隧道抗错断铰接设计试验研究[J]. 土木工程学报，2022，55(5)：97-106.

[223] 李国良，黄双林. 走滑型断裂破坏模式及隧道工程对策[J]. 铁道工程学报，2022，39(8)：18-23.

[224] 肖广智. 我国几类特殊地质条件铁路隧道修建问题与对策概述[J]. 隧道建设(中英文)，2019，39(11)：1748-1758.

[225] 田四明，王伟，杨昌宇，等. 中国铁路隧道40年发展与展望[J]. 隧道建设(中英文)，2021，41(11)：1903-1930.

[226] 万建国. 我国寒区山岭交通隧道防冻技术综述与研究展望[J]. 隧道建设(中英文)，2021，41(7)：1115-1131.

[227] 田四明，王伟，吕刚，等. 寒区隧道洞内温度场分布规律及防寒设计探讨[J]. 铁道标准设计，2022，66(12)：84-90.

[228] 郑泽福. 多因素耦合作用下寒区铁路隧道温度场演化规律研究[D]. 北京：中国铁道科学研究院，2022.

[229] 杨昌贤，马志富，卢学明，等. 寒区铁路隧道结构抗冻技术探讨[J]. 铁道工程学报，2019，36(12)：53-57.

[230] 徐湉源，郑泽福，马伟斌，等. 寒区铁路隧道排水系统冻结响应机制及其多相传热规律研究[R]. 北京：中国铁道科学研究院集团有限公司，2023.

[231] 马伟斌，郑泽福，徐湉源，等. 寒区铁路隧道抗防冻技术标准研究[R]. 北京：中国铁道科学研究院集团有限公司，2024.

[232] 张国柱，夏才初，马绪光，等. 寒区隧道地源热泵型供热系统岩土热响应试验[J]. 岩石力学与工程学报，2012，31(1)：99-105.

[233] 王仁远，朱永全，高焱，等. 寒区隧道洞口段空气幕保温理论

研究[J]. 铁道学报,2022,44(11):144-153.
[234] 邱军领,赖金星,张广龙,等. 季节性寒区隧道主动加热保温防冻方法及其试验[J]. 地下空间与工程学报,2017,13(4):982-987.
[235] 焦国锋. 拉萨—日喀则铁路吉沃西嘎隧道高地温预测[J]. 铁道建筑,2013(7):74-76.
[236] 吴星辉,蔡美峰,任奋华,等. 不同热处理作用下花岗岩纵波波速和导热能力的演化规律分析[J]. 岩石力学与工程学报,2022,41(3):457-467.
[237] 张毅,李皋,王希勇,等. 川西须家河组致密砂岩高温后微组构特征及对力学性能的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2021,40(11):2249-2259.
[238] 邵保平,成泽鹏,何水鑫,等. 高温后花岗岩渗透性及其演变规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2021,40(S1):2716-2723.
[239] 傅金阳,徐光阳,杨曾,等. 高地温隧道衬砌混凝土早期开裂机理及防控措施[J]. 铁道学报,2022,44(3):105-114.
[240] 李飞飞,姜海波,项鹏飞,等. 基于混凝土水化热效应的高地温水工隧洞衬砌结构温控防裂研究[J]. 隧道建设(中英文),2024,44(6):1262-1273.