

川藏铁路廊道关键水工环地质问题：现状与发展方向

张永双, 郭长宝, 李向全, 毕俊攀, 马剑飞, 刘 峰

Key problems on hydro-engineering-environmental geology along the Sichuan-Tibet Railway corridor: Current status and development direction

ZHANG Yongshuang, GUO Changbao, LI Xiangquan, BI Junbo, MA Jianfei, and LIU Feng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202104001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

地质灾害隐患和水文地质环境地质调查计划进展

Achievements of the program of geological investigation on geo-hazards and hydrogeology and environmental geology

李文鹏 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 1-1

从核心期刊评价指标分析如何提升期刊影响力——以《水文地质工程地质》为例

An analysis on the evaluation indexes of core journal and its improving effect on journal influence: a case study of Hydrogeology & Engineering Geology

汪美华, 范宏喜, 张若琳 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 169-169

滚石冲击下棚洞破坏动力响应分析及改进对策——以川藏公路（安久拉山南麓）门式棚洞为例

Dynamic response analyses and improvement countermeasures of shed-tunnel destruction under rolling stone impact: a case study of the shed-tunnel in the southern foot of the Anjiula Mountain on the Sichuan-Tibet Highway

袁博, 祝介旺 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 57-66

川藏公路102滑坡后缘平台物质特征及其形成机制新思考

New thoughts on the material characteristics and formation mechanism of the platform at the back edge of the 102 Landslide on the Sichuan-Tibet Highway

杨德宏, 武博强, 黄勇, 陈兴强 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 133-140

四川巴中市滑坡灾害与降雨雨型关系探讨

A discussion of the relationship between landslide disaster and rainfall types in Bazhong of Sichuan

张勇, 温智, 程英建 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 178-182

雄安多要素城市地质标准体系研究

A study of the multi-factor urban geology standard system in Xiongan New Area

林良俊, 韩博, 马震, 张曦, 李红英, 夏雨波, 郭旭, 裴艳东, 李海涛, 李洪强, 王雨山 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 152-156



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202104001

川藏铁路廊道关键水工环地质问题：现状与发展方向

张永双^{1,2}, 郭长宝³, 李向全^{1,2}, 毕俊攀^{1,2}, 马剑飞^{1,2}, 刘 峰^{1,2}

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 2. 中国地质调查局
第四纪年代学与水文环境演变重点实验室, 河北 石家庄 050061;
3. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

摘要：川藏铁路是我国正在建设的世纪工程, 复杂的地质演化史导致铁路廊道地质环境差异大, 水文地质、工程地质和环境地质问题复杂多变, 在工程施工及今后运营中值得高度关注。在简要回顾川藏铁路廊道以往地质工作的基础上, 阐述了铁路建设面临的水工环地质问题, 包括高原构造岩溶高压突涌水、断裂带基岩裂隙高压突水突泥、高温热水热害等水文地质问题, 活动断裂断错与强震灾害、高地应力与深埋隧道岩爆和大变形、特殊岩土体的不良工程特性与灾害效应、高位远程滑坡灾害链等工程地质问题, 含煤地层和热液矿床酸性水腐蚀性、湿地生态退化演替、铁路建设与敏感生态环境的互馈效应等环境地质问题。提出了今后值得深入研究的关键科学技术问题: 水文地质方面包括高原岩溶发育层序规律与构造岩溶蓄水构造类型、深埋隧道突水突泥的孕灾致灾模式与预测方法、活动断裂控热机制与地下热水循环模式、高温热害风险识别及地热资源化技术等问题; 工程地质与地质灾害方面包括活动断裂的精细特征与工程断错效应、复杂地质构造区深部构造应力场特征、构造混杂岩带工程地质特性与灾害效应、水-力-热多场耦合作用下深埋隧道围岩稳定性与灾害效应、内外动力耦合作用下的高位远程滑坡机理及风险防控技术等问题; 环境地质方面包括高原多源水转化循环机制与生态脆弱区生态需水量控制技术、隧道建设的水文生态环境效应、生态地质环境监测评价与保护关键技术、全球气候变暖的地质生态环境效应等问题。从公益性地质调查和商业性工程勘察相结合的角度, 提出了地质调查是基础、科技攻关是关键、灾害隐患监测与工程治理协调推进的应对策略, 为国家重大工程规划区的水工环地质工作发展方向提供了参考建议。

关键词：川藏铁路; 水文地质; 工程地质; 环境地质; 地质灾害

中图分类号: P641; P642

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)05-0001-12

Key problems on hydro-engineering-environmental geology along the Sichuan-Tibet Railway corridor: Current status and development direction

ZHANG Yongshuang^{1,2}, GUO Changbao³, LI Xiangquan^{1,2}, BI Junbo^{1,2}, MA Jianfei^{1,2}, LIU Feng^{1,2}

(1. *Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050061, China*; 2. *Key Laboratory of Quaternary Chronology and Hydro-Environmental Evolution, China Geological Survey, Shijiazhuang, Hebei 050061, China*; 3. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China*)

Abstract: The Sichuan-Tibet Railway is a century project under construction. The complex geological evolution history has led to large differences in geo-environmental conditions along the railway. Hydrogeological, engineering geological, and environmental geological problems are complex and changeable, which deserves great attention in engineering construction and future operations. Based on a brief review of the past geological work on the Sichuan-Tibet Railway corridor, the hydro-engineering-environmental geological problems that may be faced

收稿日期: 2021-04-01; 修订日期: 2021-05-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41941017; 41731287); 中国地质调查局地质调查专项项目(20190505)

第一作者: 张永双(1968-), 男, 博士, 研究员, 主要从事工程地质与地质灾害研究。E-mail: zhys100@sohu.com

during the railway construction have been described. The hydrogeological problems include 1) high-pressure water inrush from plateau tectonic karst, 2) high-pressure water inrush and mud outburst from faulted bedrock fissures, 3) high-temperature hot water thermal damage. The engineering geological problems include 1) active faults and strong earthquake disasters, 2) high in-situ stress and rock burst or large deformation in deep tunnel, 3) problem rocks or soils and their disaster effects, 4) high-position landslide disaster chain. The environmental geological problems include 1) acidic water corrosiveness from coal-bearing strata and hydrothermal deposits, 2) wetland ecological degradation, 3) interaction effects between the railway construction and the sensitive ecological environment. In the meanwhile, key scientific and technological issues, which should be deeply studied in the future, are put forward. In terms of hydrogeology, such as 1) sequence law of plateau karst development and types of tectonic karst water storage structures, 2) disaster-generating models and prediction methods of water and mud bursts in deep-buried tunnels, 3) active fault control mechanisms and geothermal water circulation models, 4) identification of high-temperature heat hazard risk and geothermal resources utilization technology. In terms of engineering geology and geohazard, such as 1) investigation of fine features of active faults and related engineering fault effects, 2) development features of deep tectonic stress fields in complex geological structures, 3) engineering geological properties of tectonic mélange belts and related disaster effects, 4) surrounding rock stability and disaster effects of deep-buried tunnel under water-mechanical-thermal multi-field coupling condition, 5) mechanisms of high-position run-out landslide and risk control technology under internal and external dynamic coupling. In terms of environmental geology, such as 1) mechanisms of plateau multi-source water conversion cycle and the technology of ecological water demand control in the ecologically fragile area, 2) hydro-ecological environmental effect of tunnel construction, 3) key technology of ecological geological environment monitoring, evaluation and protection, 4) geo-ecological environmental effect of global climate warming, etc. From the view of combining non-profit geological surveys and commercial engineering surveys, a response strategy has been proposed that geological surveys are the foundation, scientific and technological research is the key, and the monitoring of potential hazards and engineering control should be promoted, which provides suggestions on developing direction for hydro-engineering-environmental geology work on major project planning areas.

Keywords: Sichuan-Tibet Railway; hydrogeology; engineering geology; environmental geology; geohazard

川藏铁路是我国区域重大交通战略工程,东起四川省成都市,向西经雅安、康定、昌都、林芝、山南到拉萨,全长 1 543 km。复杂的地质演化历史导致铁路廊道地质环境条件差异大,水文地质、工程地质和环境地质问题复杂多变,故川藏铁路建设采取了总体规划、分段实施的思路。成都—雅安段于 2018 年 12 月通车,拉萨—林芝段于 2021 年 6 月通车。雅安—林芝段于 2020 年 9 月批复实施,该段长 1 008.45 km,穿越 8 座 4 000 m 以上的高山,跨过 7 条大江大河,桥隧占比达 95.8%,长度超过 15 km 的隧道 20 座,成为世界上最难修建的铁路^[1]。

川藏铁路穿越的青藏高原东部是世界上地质条件最复杂、构造活动最强烈的地区。高原快速隆升导致河流下切作用增强,形成高山峡谷地貌。铁路沿线历史上曾多次发生强震,康定—道孚和波密—林芝两个地区的地震动峰值加速度达到或接近 0.3 g,部分地

段超过 0.4 g(图 1)。

长期以来,国内外学者对青藏高原的地质研究积淀较厚,但在工程建设领域仍有很多地质问题尚未认知,甚至以往从未遇到。近十余年来,围绕川藏铁路建设,大批科研和工程技术人员开展了卓有成效的工作,对川藏铁路建设的地质安全风险有了总体认识^[2-4],但仍有不少问题需要从地球系统科学视角进一步探索。本文试图结合川藏铁路前期工作进展,剖析工程建设及运营中面临的关键水工环地质问题,并从公益性地质调查和工程建设地质工作的角度提出相关对策建议,期望对水工环地质学科发展有一定促进作用。

1 川藏铁路廊道地质工作的简要回顾

川藏铁路的规划建设经历了百年历程。早在民国初年,孙中山先生就提出“川藏铁路事关中国国家安危存亡”。新中国成立以来,在 20 世纪 50 年代,原

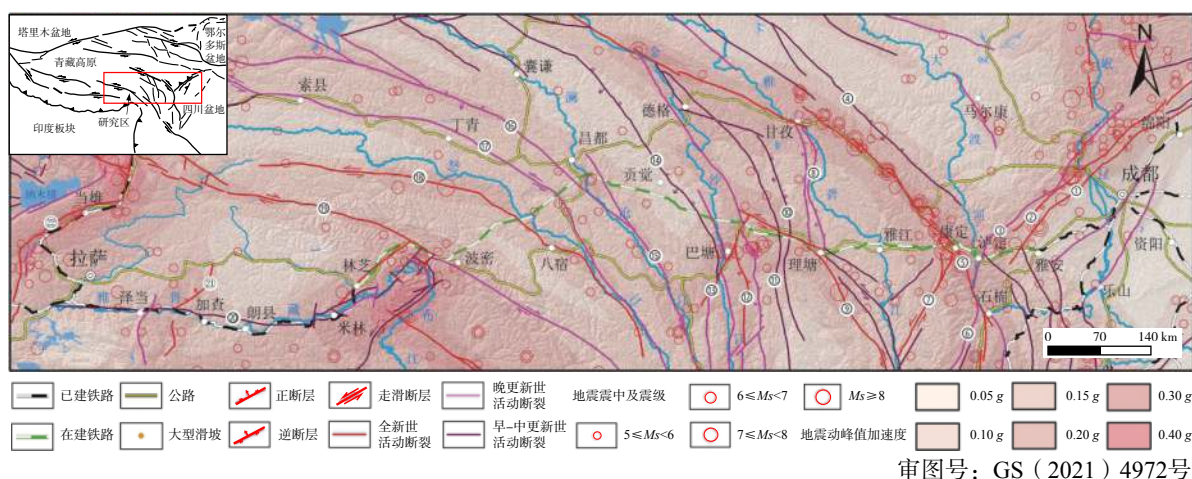


图1 川藏铁路廊道地质背景图

Fig. 1 Geological background of Sichuan-Tibet traffic corridor

注: ① 龙门山前山断裂; ② 龙门山中央断裂; ③ 龙门山后山断裂; ④ 玉科断裂; ⑤ 鲜水河断裂; ⑥ 小金河断裂; ⑦ 玉农希断裂; ⑧ 甘孜—理塘断裂; ⑨ 理塘—德巫断裂; ⑩ 赠科—硕曲断裂; ⑪ 德格—乡城断裂; ⑫ 金沙江断裂带; ⑬ 巴塘断裂; ⑭ 字嘎寺—德钦断裂; ⑮ 澜沧江断裂; ⑯ 巴青—类乌齐断裂; ⑰ 怒江断裂; ⑱ 边坝—洛隆断裂; ⑲ 嘉黎断裂; ⑳ 雅鲁藏布江断裂; ㉑ 错那—沃卡断裂; ㉒ 亚东—谷露断裂。

铁道部第二勘察设计院开始对川藏铁路开展前期勘察和专题研究工作, 20 世纪 90 年代进入初步选线阶段。1997 年 10 月原铁道部计划司召开进藏铁路方案研讨会, 确定了滇藏铁路和青藏铁路作为进藏铁路的两大方案^[5], 川藏铁路处于暂缓状态。在 2011 年 3 月通过的“十二五”规划纲要中, 再次提出研究建设川藏铁路。2014 年 12 月, 川藏铁路成都—雅安段开工建设、拉萨—林芝段控制性工程开工建设。2020 年 9 月国家发展改革委批复同意建设川藏铁路雅安—林芝段, 标志着这一重大工程正式进入全面实施阶段。2020 年 11 月 8 日, 川藏铁路雅安—林芝段开工建设。

1.1 区域地质调查工作

川藏铁路相关的地质工作与青藏高原的基础地质研究割离不开, 最早可追溯到 19 世纪末 20 世纪初^[6]。系统的地质调查工作始于 20 世纪 50 年代, 陆续开展了 1:100 万和 1:20 万区域地质、矿产地质调查; 1980 年, 原地质矿产部青藏高原综合地质调查大队会同有关地矿局, 在分析已有资料和综合研究的基础上, 编制出版了青藏高原及邻区 1:150 万地质图。20 世纪 90 年代, 铁路沿线 1:20 万地质图相继出版, 但由于青藏高原气候环境差、工作条件艰苦, 地质调查和勘测程度普遍较低。自 2000 年开始, 中国地质调查局组织实施青藏高原空白区 1:25 万区域地质调查计划, 截至 2014 年, 青藏高原 1:25 万地质图幅全部完成出版, 对青藏高原的地质认识不断提高。2018 年以来, 川藏铁路沿线 1:5 万地质调查工作加快推进,

预计 2021 年全面完成铁路沿线带状地质图, 将为铁路设计和建设提供重要的基础地质支撑。

1.2 水工环地质调查工作

川藏铁路廊道部署了一系列公益性水工环地质工作, 但总体工作程度较低。相较而言, 水文地质调查比较系统, 工程地质工作以地质灾害调查为主, 环境地质工作以专题性调查为主。

在水文地质方面, 二十世纪七八十年代起开展了区域水文地质普查工作, 初步查明了区域水文地质条件。川西地区水文地质调查精度为 1:50 万^[7-9], 藏东地区水文地质调查精度仅为 1:100 万^[10-11]。有关的成果主要涉及岩溶水、断裂带水和地下热水(高温热害)。理塘—义墩幅、康定—宝兴幅等 1:50 万水文地质调查报告论述了区内岩溶地貌基本特征、岩溶含水层分布及富水性。此外, 崔之久^[12]、朱学稳^[13]、张之淦^[14]研究了上新世以前形成的古岩溶地貌特征及现代冰川作用对岩溶发育的影响。张恒等^[15]分析了活动构造带对热水形成的控制作用。李晓等^[16]和张春潮等^[17]利用水化学及同位素方法, 研究了康定、察雅地下热水的补给来源和循环深度, 分析了地下热水成因。总体上, 川藏铁路廊道水文地质调查和研究程度偏低, 基岩水文地质工作程度更低。

在工程地质和地质灾害方面, 为最大限度降低地质灾害对公众生命和财产的危害, 20 世纪 90 年代以来, 国家和地方陆续部署开展了以县域为单元的 1:10 万地质灾害调查与区划, 初步查明了全国地质

灾害分布特征^[18]。2010 年以后,中国地质调查局和地方政府组织实施了部分县域 1:5 万地质灾害调查,进一步查明了县域内地质灾害发育特征和分布规律。2014 年以后,在川藏铁路沿线及邻区组织开展以图幅为单元的 1:5 万地质灾害调查工作,但尚未实现全覆盖。

对于环境地质的界定,有不同的认识。2010 年以来,铁路沿线部分地区(昌都县、芒康县、乃东县、洛隆县、林芝县)开展的 1:5 万环境地质调查属于广义的水工环综合调查。不少研究者对川藏铁路从施工到运营面临的诸多环境地质问题给予了高度关注,例如,隧道工程对地下水环境会造成一定影响,主要表现在地下水疏排对植被和湿地生态环境、居民生产生活用水的影响以及地下热水、成矿带地下水疏排对受纳水体的影响等^[19]。随着研究的不断深入,环境地质工作将逐渐扩展到生态环境和生态保护修复领域。

1.3 专项地质调查和研究工作

原铁道部第二勘察设计院在 20 世纪 60 年代就开始了川藏铁路的地质考察工作,并编制完成《川藏高原铁路考察报告》等,2000 年以后开展了鲜水河方案、新龙方案和巴塘方案、波密/通麦方案的比选,2017 年完成了《川藏铁路昌都至林芝段预可行性研究》。2018 年 10 月起,根据国铁集团(原中国铁路总公司)的统一部署,相关铁路勘察设计单位围绕铁路选线、勘察设计和施工中可能面临的问题,开展了较为系统的地质勘察工作,完成全线 1:5 万遥感解译、工程地质测绘和重点地段 1:2000~1:10 000 测绘,在重点地段部署了航空物探、地面物探、钻探、地应力测量和综合测井等工作,并与国内有关地质勘查单位、科研院所、高等院校等合作开展了活动断裂、地质灾害、高地应力(岩爆和大变形)、高地温和高温热水、岩溶及断裂带涌突水等专题研究,于 2019 年 6 月完成了可行性研究,2020 年 6 月完成加深地质工作,为铁路工程可研报批、建设施工积累了大量地质资料。

自 2008 年以来,中国地质调查局在西南地区部署了一系列与国家重大工程相关的专项地质调查工作,特别是 2013—2015 年组织开展了川藏铁路沿线活动断裂调查与地质灾害效应评价^[20],2018 年以来组织开展了川藏铁路全线 1:5 万区域地质、地质灾害、水文地质与地热地质调查等,初步查明了铁路沿线及邻区地层岩性与地质构造、活动断裂发育特征与地壳稳定性、工程地质与地质灾害、水文地质与地热地质等特征,先后提交了《川藏铁路推荐线路方案地质咨询报

告》(2019)和《川藏铁路建设地质安全风险评价报告》(2020),为川藏铁路规划建设提供了有力支撑。

2020 年国家自然科学基金委专门启动了“川藏铁路重大基础科学问题”专项,围绕高原东部深部物质结构构造及动力演化过程、高原峡谷区内外动力耦合致灾机理、深埋超长隧道工程灾变机制、铁路重大灾害风险识别与预测等问题开展研究。国家科学技术部与国铁集团联合,针对川藏铁路建设面临的地质安全风险、工程技术风险和生态环境风险,策划并拟于 2021 年实施相应的重点研发工作。此外,部分工程建设单位针对具体工程问题开展了一系列技术攻关^[21]。

专项地质调查工作进一步明晰了川藏铁路建设面临的地质安全风险,明确提出区域活动断裂、地质灾害与高边坡、高地应力与隧道岩爆和大变形、隧道高温热害与涌水突泥等是制约铁路建设的关键地质问题。

2 铁路建设面临的水工环地质问题

2.1 主要水文地质问题

(1) 高原构造岩溶高压突涌水问题

青藏高原复杂的地质构造条件造就了川藏铁路廊道独特的高原构造岩溶类型,极易发生隧道高压突涌水灾害,直接影响铁路安全施工。调查分析表明,铁路全线共分布 75 套碳酸盐岩地层(图 2),时代贯穿震旦纪至三叠纪,岩性以灰岩、白云岩和大理岩为主,岩溶分布明显受鲜水河断裂带、金沙江断裂带、澜沧江断裂带、怒江断裂带、嘉黎断裂带等区域性构造带控制,主要分布于二郎山—康定、巴塘—罗麦、贡觉—昌都、邦达—康玉、多吉—鲁朗等 5 个主要区段,涉及的主要隧道有莫西、格聂山、东达山、红拉山、芒康山、果拉山、夏里、康玉、易贡和多吉等隧道。

川藏铁路廊道构造岩溶具有以下基本特征:①岩溶洞穴沿断裂、褶皱构造线分布,70% 的岩溶洞穴发育在构造影响带内;②岩溶水存在高位稳定补给源,海拔 5 000 m 左右的冰蚀台塬区广泛发育溶蚀洼地、落水洞等,成为地下水高位补给区;③区域构造控制岩溶水主径流带发育,地下水经构造岩溶发育带,呈管道流向下游径流,以岩溶大泉形式集中排泄,泉流量可达 100~40 000 m³/d;④岩溶地下水径流途径一般较长,可以穿越若干地表次级流域单元,最远常达数十公里;⑤地下水循环深度大,补给区与排泄区高差多在 1 000 m 以上,常导致水温和水压都偏高。

(2) 断裂带基岩裂隙高压突水突泥问题

大型断裂带地下水同样具有高位补给、远程运

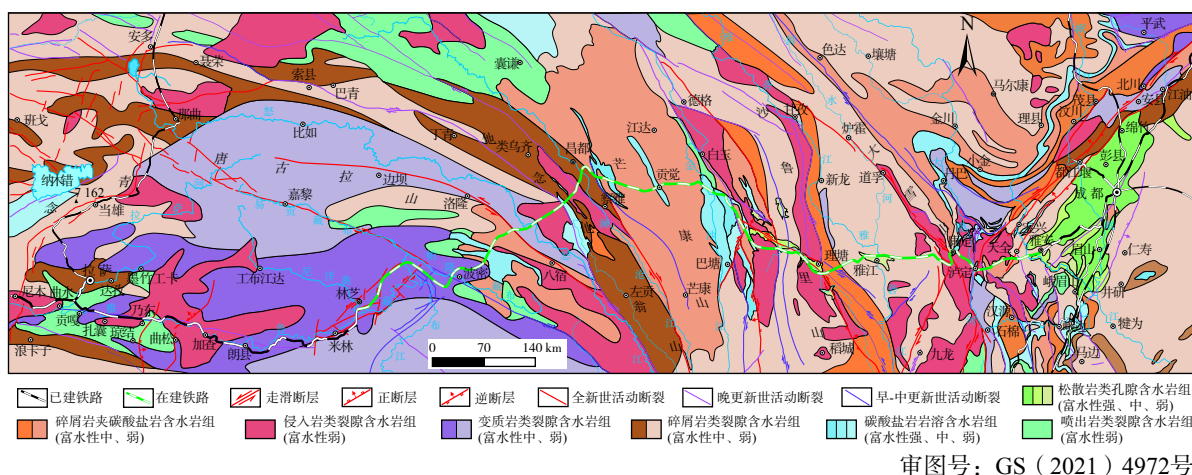


图 2 川藏铁路廊道区域水文地质简图

Fig. 2 Sketch map of regional hydrogeology along the Sichuan-Tibet Railway corridor

移、水动力条件强劲和压高量大的特点。沿大型断裂带地下水不断接受冰川融雪补给、地表水渗漏补给、上覆第四系孔隙水补给以及基岩风化裂隙水补给,以致下游表现为水量充沛、高水头的水力性质。川藏铁路穿越多条区域性活动断裂带,次级断裂及牵引褶皱普遍发育,断裂带穿越花岗岩、火山岩、砂岩和板岩等硬质岩区段,岩石破碎,断裂破碎带胶结差,为地下水提供了良好的赋存场所和运移通道。例如,金沙江断裂带阔达曲一带泉流量可达 78.72 L/s,卡孜拉山断裂带水平钻孔单孔涌水量达 50 L/s。

(3) 高温热水热害问题

川藏铁路廊道位于地中海—南亚地热异常带,其大地热流值由东向西逐渐变大,变化范围 60~127 mW/m²,平均值 76.3 mW/m²,高于全球陆区平均值 61.2 mW/m²,属于大地热流高异常区。雅安—林芝段

穿越 6 条大型地热活跃带,与区域性活动断裂带密切相关。①鲜水河地热带主要受鲜水河断裂带控制,温泉出露较多,多高于 60℃,如康定榆林宫耶姆擦沸泉高达 85℃。②甘孜—理塘地热带主要受甘孜—理塘活动断裂控制,出露温泉最多,54.8% 的温泉高于 40℃,甘孜县拖把乡温泉高达 89℃。③金沙江地热带主要受巴塘断裂控制,巴塘段地温高、沸泉多、水活动强烈,其中杠日隆沸泉高达 97℃。④澜沧江地热带受澜沧江断裂带控制,呈西北—东南向带状展布,属于中低温地热异常区,出露温泉一般低于 40℃,区域热害程度相对较弱。⑤怒江—八宿地热带受怒江断裂控制,出露温泉大多 40~60℃。⑥嘉黎—察隅地热带主要受嘉黎—察隅断裂带和雅鲁藏布江断裂带控制,在断裂交汇处形成地热异常区,出露温泉多高于 60℃,其中通麦镇热泉达 92℃(图 3)。

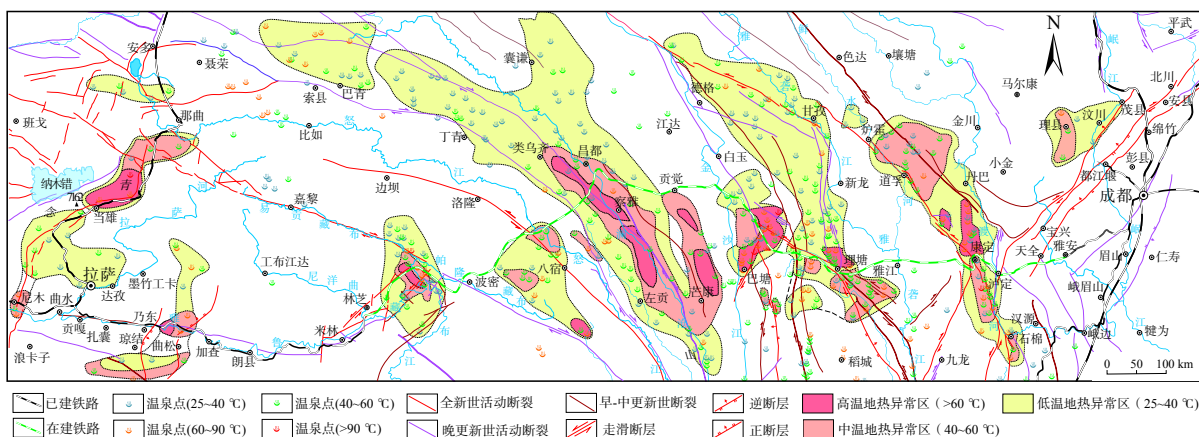


图 3 川藏铁路廊道地热异常区分布图

Fig. 3 Distribution of geothermal anomalous areas along the Sichuan-Tibet Railway corridor

受高温热害影响,铁路隧道建设存在高压热水、高温岩体、热水侵蚀等热害问题,对康定隧道、折多山隧道、拉月隧道等深埋隧道施工安全构成严重威胁。拉萨—林芝段桑珠岭隧道在建设过程中遇到了严重高温热害问题,隧道内岩温最高达 89.9℃,洞内温度最高达 56℃,是目前国内铁路隧道修建中遇到的最高岩温隧道^[22]。

2.2 主要工程地质问题

青藏高原东缘内外动力地质作用强烈交织与转化,不仅是新构造活动带、差异隆升和深切峡谷分布区,而且是特殊不良地质体的集中发育区。潘桂棠等^[23]认为川藏铁路雅安—林芝段穿越 7 条混杂岩带,伴随中新世以来高原强烈隆升均转化为活动构造带、地热活跃带和地质灾害频发带。因此,川藏铁路建设面临多种复杂工程地质问题。

(1) 活动断裂断错与强震灾害

川藏铁路廊道晚更新世以来的活动断裂极为发育、规模巨大且活动性强。研究表明,川藏铁路穿越龙门山断裂带、鲜水河断裂带、玉农希断裂带、理塘—德巫断裂带、巴塘断裂带、澜沧江断裂带(巴青—一类乌齐断裂)、怒江断裂带(羊达—亚许断裂、邦达断裂)、边坝—洛隆断裂带、嘉黎—察隅断裂带和鲁朗—易贡断裂带等 10 余条全新世活动断裂带^[24],以及大渡河断裂带、金沙江断裂带、香堆—洛尼断裂带等 3 条晚更新世活动断裂带(图 1),每条活动断裂带又包含多条次级断裂,如铁路穿越鲜水河断裂带的雅拉河断裂、色拉哈—康定断裂、折多塘断裂和木格措南断裂等 4 条次级断裂^[25],故对铁路具有危害性的活动断裂达 40 余条。活动断裂不仅可直接造成工程断错,而且断裂活动诱发的强震和斜坡地质灾害^[26],严重威胁铁路安全。

(2) 高地应力与深埋隧道岩爆和大变形

受板块构造挤压作用以及块体内部构造活动等因素影响,铁路廊道处于水平构造应力为主导的复杂地应力环境^[27-28],具有应力值高、方向多变等特点。川藏铁路雅安—康定段、拉萨—林芝段最大水平主应力的梯度分别为 7.1 MPa/100 m、5.7 MPa/100 m^[24],高于青藏地块背景值 2.9 MPa/100 m。雅安—康定段高尔寺山隧道实测最大主应力值达 74.4 MPa^[3],在郭达山钻探岩心中出现饼状岩心(图 4),最大水平主应力方向以 NWW—NW 向为主。拉萨—林芝段色季拉山隧道实测最大主应力值达 76 MPa^[3],最大水平主应力方向以近 NS—NNE 向为主。康定—林芝段区域构造

应力场最大水平主应力方向由 NW 向 NNE 偏转,铁路线与区域最大水平主应力方向夹角在 5°~45°之间。



图 4 郭达山隧道钻孔饼状岩心发育特征

Fig. 4 Characteristics of the pie-shaped core of a borehole in the Guodashan tunnel

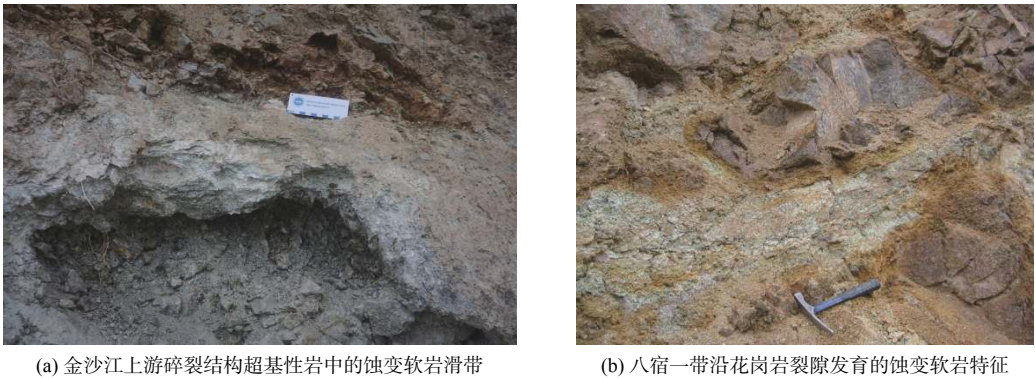
川藏铁路拟规划新建隧道 72 座,总长 838.2 km,最长隧道达 40 km 以上,埋深达 2000 m 以上。高地应力对铁路建设的突出影响表现为深埋隧道围岩岩爆和大变形,如 2014 年 12 月开工建设的拉萨—林芝段桑珠岭隧道全长 16.5 km,岩爆段长达 9.5 km,施工中共发生 16 000 多次岩爆,严重影响隧道建设安全。对于软质围岩,易导致大变形,如拉萨—林芝段藏噶隧道 DK169+025—DK169+090 附近,从 2017 年 4 月 25 日开始出现变形,至 2017 年 9 月 6 日累计最大变形量达 1.5 m,初期支护钢架被剪断,严重影响了隧道施工安全。

(3) 特殊岩土体的不良工程特性与灾害效应

川藏铁路廊道地层岩性复杂,其穿越的雅鲁藏布江蛇绿混杂岩带、嘉黎—帕龙藏布蛇绿混杂岩带、怒江俯冲增生杂岩带、澜沧江增生杂岩带、金沙江增生杂岩带、甘孜—理塘增生杂岩带及炉霍—康定蛇绿混杂岩带等,宽度从几十米到几十公里不等,混杂岩带内的岩体具有结构复杂、空间变化快、易蚀变、力学性质差异大等特点(图 5),是隧道和边坡工程可能遇到的特殊岩体^[29]。特别是黏土化蚀变软岩易诱发隧道大变形和边坡失稳,由于以往研究程度低,值得格外关注。

(4) 高位远程滑坡灾害链

川藏铁路廊道高位远程地质灾害及灾害链极为发育且典型^[30-31],主要分布在大江大河两侧,如易贡滑坡^[32-33]、白格滑坡^[34],具有隐蔽性、突发性、链生性和巨大危害性,对铁路大桥和隧道进出口工程施工和安全运营构成严重威胁。铁路在穿越区域性活动断裂带时,也面临大型-巨型高位远程滑坡灾害链。此外,遥感调查揭示铁路两侧各 30 km 范围发育冰崩灾害链 66 处,其中 11 处冰湖溃决和 4 处堵溃链式灾害



(a) 金沙江上游碎裂结构超基性岩中的蚀变软岩滑带 (b) 八宿一带沿花岗岩裂隙发育的蚀变软岩特征

图 5 构造混杂岩带中的黏土化蚀变软岩发育特征

Fig. 5 Development characteristics of clay-altered soft rock in structural mélange

主要分布在帕隆藏布流域、易贡藏布流域等冰川冰湖集中发育区,对波堆藏布特大桥、波密车站、东久曲特大桥和易贡藏布大桥等可能构成潜在危害。

2.3 主要环境地质问题

我国科研工作者对环境地质问题的认识不断向广义延伸,逐渐扩展到了生态地质、生态环境等方面。随着川藏铁路规划建设全面启动,应重点关注以下环境地质问题。

- (1)含煤地层和热液矿床酸性水腐蚀问题
- 川藏铁路穿越 9 套石炭纪、二叠纪、三叠纪和白

垩纪含煤地层,其中硫化物在水的侵蚀作用下,易氧化水解形成酸性水,腐蚀铁路设施。在地表析出的盐类沉淀物除了泻盐($MgSO_4 \cdot 7H_2O$)和石膏($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)外,多为成分和性质非常复杂的矾类沉淀物。1 : 10 水提取液的 pH 值除个别样品呈弱碱性外,含镁叶绿矾、叶绿矾、黄钾铁矾等硫酸盐沉淀物均呈强酸性,加之这些沉淀物富含结晶水,因此具有强溶解性、强膨胀性、强腐蚀性(表 1)。此外,铁路廊道还分布一些热液矿床,在矿床氧化带表面或地下水溢出带周边,也易形成酸性水,可能对工程造成潜在危害^[35]。

表 1 八宿-然乌一带盐类沉淀物矿物成分及工程评价

Table 1 Mineral composition and engineering evaluation of salt deposits in Basu-Ranwu region

沉积物特征	XRD法矿物成分鉴定		1 : 10水提取液				工程评价		
	盐类矿物	非盐类矿物	颜色	pH值	SO ₄ ²⁻	易溶盐	溶解性	腐蚀性	盐胀性
煤系地层白色松软絮状物	泻盐、石膏	石英、伊利石、高岭石	无色	8.32	13.91	23.96	强	强	强
黄绿色皮壳状、瘤状沉淀物	镁叶绿矾、叶绿矾	石英	玫瑰红	2.06	35.78	69.98	强	强	—
硫化矿氧化带灰白色絮状物	泻盐、石膏	石英、伊利石、高岭石	无色	4.25	22.74	35.97	强	强	强
灰绿色半硬质瘤状物	镁叶绿矾、石膏、叶绿矾	石英	玫瑰红	2.20	29.56	59.83	强	强	强

注: (1)SO₄²⁻含量采用BaSO₄重量法测定; (2)SO₄²⁻和易溶盐的单位为g/100 g; (3)工程评价中溶解性大小依据1 : 10水提液含盐量(g/100 g), 腐蚀性评价依据国家标准(GB 50021—2001)土中SO₄²⁻含量和pH值大小, 盐胀性主要根据盐类矿物结晶水数量判别。

(2)湿地生态退化演替问题

受南北向高大山系和东亚季风及印度季风气候控制,青藏高原东缘水文与环境系统地域差异显著。在气候变化及人类活动共同影响下,植被涵养水源、保持水土的功能发生改变,生态退化加剧了生态-水文-岩土之间关系的快速变化。例如,毛垭坝盆地是典型的高寒生态草原区,受大气降水、地表水和地下水等多源水支撑维系,理塘河从盆地中部穿过,多年平均径流量 $13.29 \times 10^8 \text{ m}^3$,河水渗漏补给盆地第四系孔隙水。盆地西侧的碳酸盐岩裂隙岩溶水以大泉形式向盆地排泄,也是重要的补给水源。铁路建设可能影

响盆地多源水转化,制约草原生态系统健康发展。

(3)铁路建设与敏感生态环境的互馈效应

铁路施工对生态环境的影响主要是破坏植被、改变含水层结构、扰动破坏地形地貌等,具体表现在: ①施工中的隧道突涌水可能引发浅层地下水及地表水枯竭,降低地下水位,加速水循环及水文地球化学过程,影响地表植被和山地冰川赋存状态; ②严重扰动含水层结构和破坏地形地貌,加剧水土流失,甚至引发地面塌陷等^[36]; ③大量弃渣可能进入江河湖库,某些渣场选址或处置不当,还会诱发滑坡泥石流等次生灾害。因此,如何全面掌握超长建设周期铁路廊道

生态水文变化及水土流失状况是生态保护的关键^[37]。

3 值得关注的关键科学技术问题

重大工程建设的成败在于能否及时发现问题,而解决问题的关键在于查清可能发生问题的成因和规律。针对川藏铁路建设中面临的水工环地质问题,需要深入研究以下关键科学技术难题。

3.1 水文地质方面

(1)高原岩溶发育层序规律与构造岩溶蓄水构造类型

受多期快速隆升影响和圈层结构控制,高原岩溶发育呈现多期性,表现为发育高程、规模、结构与形态差异显著。地质构造类型、性质、岩性控制着岩溶的发育特征和空间分布规律,也影响着高原岩溶地下水补给、赋存及运移条件,形成不同结构形式的岩溶蓄水构造类型。因此,岩溶层序规律和蓄水构造类型研究可为有效预测突水灾害风险提供依据。

(2)深埋隧道突水突泥的孕灾致灾模式与预测方法

川藏铁路廊道大型断裂带、构造混杂岩带、岩溶、含煤和石膏的特殊岩层区,都是重大突水突泥灾害的易发区段。特别是构造岩溶水和断裂带水具有高位远程补给的特征,水动力条件强劲,水量大、水压高。只有准确把握隧址区地质结构、地下水动力条件及演变过程,才能构建切合实际的孕灾致灾模式、水害判识模型和定量预测方法。

(3)活动断裂控热机制与地下热水循环模式

前期研究表明,川藏铁路廊道高地温异常区空间分布明显受区域性活动断裂影响,活动断裂类型、性质和规模对高温岩体分布、热泉出露有明显的控制作用。深入研究活动断裂导热控热机制及地下热水循环特征,建立相应的地热系统成因模式,是川藏铁路热害防治的关键。

(4)高温热害风险识别及地热资源化技术

针对不同热害成因模式,建立深埋隧道高温热害风险识别指标体系和有效的预测评价方法,提出基于热害防治与地热资源化利用于一体的综合技术方案。

3.2 工程地质与地质灾害方面

(1)活动断裂的精细特征与工程断错效应

川藏铁路廊道区域性活动断裂带的空间特征已基本清晰,但部分断裂带的分支断裂特征和活动性因研究程度低而存在争议,需创新强烈侵蚀山区及基岩活动断裂的调查方法。此外,关于活动断裂的避让距

离也存在不同意见,例如《活动断层避让》(征求意见稿,2019)提出需避让晚更新世和全新世活动断层,而《铁路工程抗震设计规范》(GB 50111—2006)仅提出了避让全新世活动断裂。因此,亟需研究适用于高山峡谷区的活动断裂的工程断错效应及安全避让距离。

(2)复杂地质构造区深部构造应力场特征

川藏铁路跨越多个大地构造单元,构造应力场的特征受地质构造、地形地貌和测试方法等因素影响。已有实测结果表明,铁路廊道不同构造部位、不同埋深和不同地貌位置的地应力值离散性较大^[24,28]。因此,亟需基于关键构造部位深孔地应力测量、监测与数值模拟,揭示青藏高原东部构造应力场变化规律,解剖复杂地质条件下构造应力赋存特征及隧道开挖应力调整规律。

(3)构造混杂岩带工程地质特性与灾害效应

构造混杂岩带是川藏铁路建设的关键区带^[23],目前关于其工程地质特性的专门性研究较少,亟需研究混杂岩带高分辨率三维精细物质结构、空间变化特征及岩体力学性质演变规律,研究不同工程类型情景下的构造混杂岩带孕灾、灾变模式,提出量化的工程地质评价方法。

(4)水-力-热多场耦合作用下深埋隧道围岩稳定性与灾害效应

在水-力-热多场耦合作用下,岩石力学性质、变形破坏机制发生变化,隧道岩爆和大变形机理更为复杂,亟需研究川藏铁路廊道水热活动机制与断裂活动和地应力场的耦合灾变机理,研发深埋长大隧道地热能利用技术。

(5)内外动力耦合作用下的高位远程滑坡机理及风险防控技术

针对高原峡谷区高位远程滑坡灾害(链),亟需研究构造缝合带内外动力耦合作用下高位滑坡成灾机理以及复杂结构高陡岩质斜坡的灾变理论,建立川藏铁路廊道特大灾害链临界转化能量条件、物质条件及地形条件判别指标,突破链生灾害成链机制、远程效应及风险防控关键技术。

3.3 环境地质方面

(1)高原多源水转化循环机制与生态脆弱区生态需水量控制技术

高原高寒生态系统靠多源水支撑维系,高原暖湿化进程加剧和大型人类工程活动将会影响多源水转化循环机制,使维系高原湿地、草甸、森林的水源补给发生变化,造成生态系统退化。因此,亟需深入研

究高原多源水转化循环机制、生态需水量及其控制技术。

(2) 隧道建设的水文生态环境效应

川藏铁路位于国家“青藏高原生态屏障”的核心区域,生态环境脆弱、敏感而独特,铁路建设会在局部改变区域水文地质结构,引起地表水循环路径和地下水补径排条件的变化。亟需开展超长周期桥隧工程建设对高寒生态系统的影响研究,揭示生态-水文-灾害时空分布及耦合作用规律,建立工程施工对复杂敏感生态环境影响评估及生态环境修复综合技术。

(3) 生态地质环境监测评价与保护关键技术

工程胁迫下地质环境的改变对生态系统的影响非常明显。亟需从“隧道涌水突泥-含水层疏干破坏-地表水体干枯-高原植被退化”和“桥梁施工弃渣堆放-土地资源挖损压占-野生动物栖息地损毁”等方面,分析研究人类工程胁迫下地质环境改变对自然生态系统的影响机理,研发工程施工对生态地质环境影响监测与评估技术,以及工程胁迫下生态保护修复技术。

(4) 全球气候变暖的地质生态环境效应

全球性气候变暖对青藏高原地质环境造成了不可忽视的影响。近百年来,青藏高原气温变暖倾向率为全球平均值的 7~8 倍^[2],应高度关注高原气候变化驱动机制与极端气候预测、高原生态系统对气候变化的响应与适应机制、高原冰冻圈灾害对气候变化的响应机制与风险预测、气候变化引起的环境灾害防控等,及时掌握冰川、冰湖活动变化情况及可能对铁路的影响。

4 水工环地质工作的发展方向

川藏铁路廊道是我国基础设施建设和“一带一路”的重点区域,铁路建设面临的首要风险是地质安全风险。由于以往地质工作程度偏低,可能有一些重大地质风险尚未发现,或者对已发现风险的危害程度还难以做出准确判断。结合前人研究和作者长期从事青藏高原东缘工程地质研究的体会,从公益性地质调查和商业性工程勘察相结合的角度,提出以下工作建议。

4.1 坚持公益性地质调查与专项地质调查相结合,是提高地质认识的基础

公益性地质调查可围绕川藏铁路建设需求,加快提升地质调查程度与精度。例如,基于关键地段中-大比例尺基础地质调查,揭示铁路廊道不同地段工程问题差异性的地质背景;开展区域性活动断裂和高山峡谷区卸荷松动带的分布和变形破坏规律调查,建立高位滑坡、冰川/冰湖溃决型高势能泥石流的灾变机理

和早期识别模型。开展川藏铁路廊道水文地质和重要水源地调查,高度关注岩溶地质和突水突泥问题,评估可能产生的水源地枯竭、生态环境损毁和破坏。

专项地质调查工作着重开展主要活动断裂精细化调查、关键构造部位地应力测量和重要场区稳定性评价;在深大构造结合带、隧洞口、桥址等重点区域,可在详细地质填图的基础上开展工程勘察工作。由于高山峡谷区极其险峻,常规的地面调查、遥感调查、地球物理方法等难以有效达到目的,需探索新型的调查方法。

从长远考虑,要以川藏铁路建设为契机,探索建立服务国家重大工程(滇藏铁路、中尼铁路和雅鲁藏布江下游水电开发等)规划建设的前瞻性地质调查机制,推动传统的水工环地质调查向地质安全综合评价方向发展。通过综合集成地质调查、工程勘察等多源信息,构建重大工程地质安全风险评价方法和工作机制。既体现公益性地质调查支撑重大工程规划建设,又考虑工程建设运营对区域地质环境影响的调查和风险管控。

4.2 坚持重点疑难地质问题科技攻关,是解决问题的关键

围绕迫切需要解决的关键地质科技问题,进一步明确重点攻关方向,解决重大灾害隐患防治的技术短板。加强多圈层相互作用的青藏高原构造演化理论研究,揭示高原隆升的地质灾害效应。开展活动构造区工程地质问题与探测技术研究,形成复杂艰险山区工程地质理论和技术体系。开展内外动力耦合作用下重大地质灾害过程研究,揭示青藏高原深部和地表灾变机理与演变趋势,提供精准化灾害风险预测方法与模型。针对高寒高海拔山区地质环境特点,研发岩土力学、地热、地应力等测试技术与装备,以及深埋隧道高温热害防控技术。

针对构造岩溶、断裂带高压突水突泥、超高温热水热害问题,开展高原山区水循环与水动力条件演化机理研究,建立隧道突水水源识别、导水-突水通道示踪预测模型;突破复杂构造山区地表水与地下水转化机理,攻克深埋隧道高压突水突泥风险预测和超前预报技术,以及水文地质空-天-地立体化综合勘察技术。开展工程扰动条件下山体结构变化及其水动力响应机制研究,推演重大工程区地表生态水文演变过程,支撑铁路廊道生态保护修复。加强工程影响区生态风险评估研究,提出大型弃渣场地工程防护、植被恢复等立体综合防控技术。

4.3 坚持灾害隐患监测与工程治理协调推进,是保障工程安全的长效机制

工程治理具有“短平快”的功效,在我国西部山区已有较成熟的经验,但往往成本过高,因此灾害隐患监测成为保障工程安全的重要内容。在川藏铁路廊道,很有必要按照轻重缓急,逐步建立基于大数据、云计算和人工智能技术的自然资源监测平台与观测网,例如高精度 GPS 监测网、水文地质与地温观测网、地应力监测网、典型地质灾害隐患监测站等,形成服务重大工程安全的监测预警网络。同时,尽快构建川藏铁路生态保护监测和综合决策系统,研究隧道地下水排放影响及防控技术,降低施工排水和水文地质结构变化可能产生的生态风险。

5 结语

川藏铁路是我国战略性世纪工程,是世界上地质条件最复杂、施工难度最大的铁路工程,面临的重大工程地质问题前所未有。围绕川藏铁路全生命周期安全需求,系统开展地质调查和研究,精准判识地质安全风险,成为保障高起点高质量高标准建设川藏铁路的关键。

为更好地服务国家重大工程规划建设,提出了水工环地质工作的发展方向:坚持公益性地质调查与专项地质调查相结合,是提高地质认识的基础;坚持重点疑难问题科技攻关,是解决问题的关键;坚持灾害隐患监测与工程治理协调推进,是保障工程安全的长效机制。“十四五”期间,国家重大工程规划建设将持续推进,积极探索贯穿于工程选线、勘察、建设、运营全过程的关键技术,对未来青藏高原其他重大工程建设也具有极其重要的应用前景。

大量实践表明,从重大工程建设需求出发,建立关键科学问题协同攻关机制十分必要。建议通过多部门、多学科联合,实施青藏高原重大工程地质安全方面的大科学计划,可有效提升支撑服务重大工程建设和国土地质安全的科技创新能力和水平,不断推动水工环地质学科的发展。

致谢: 成文过程中,得到崔鹏院士、彭建兵院士、殷跃平研究员的指导,中国地质调查局相关直属单位和专家提供了大力支持,深表谢意!

参考文献 (References):

[1] LU C F, CAI C X. Challenges and countermeasures for construction safety during the Sichuan-Tibet Railway

Project[J]. *Engineering*, 2019, 5(5): 833 – 838.

- [2] 崔鹏, 苏凤环, 邹强, 等. 青藏高原山地灾害和气象灾害风险评估与减灾对策[J]. *科学通报*, 2015, 60(32): 3067 – 3077. [CUI Peng, SU Fenghuan, ZOU Qiang, et al. Risk assessment and disaster reduction strategies for mountainous and meteorological hazards in Tibetan Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60(32): 3067 – 3077. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 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. [PENG Jianbing, CUI Peng, ZHUANG Jianqi. Challenges to engineering geology of Sichuan-Tibet Railway[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(12): 2377 – 2389. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 殷跃平, 王文沛. 高位远程滑坡动力侵蚀犁切计算模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(8): 1513 – 1521. [YIN Yueping, WANG Wenpei. A dynamic erosion plowing model of long run-out landslides initialized at high locations[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(8): 1513 – 1521. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 卓宝熙. 遥感技术在工程建设中的实践与认识[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2012. [ZHUO Baoxi. Practice and understanding of remote sensing technology in engineering construction[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2012. (in Chinese)]
- [6] 潘桂棠, 王立全, 张万平, 等. 青藏高原及邻区大地构造图及说明书[M]. 北京: 地质出版社, 2013. [PAN Guitang, WANG Liquan, ZHANG Wanping, et al. Geotectonic map and instruction of the Qinghai-Tibet Plateau and adjacent areas[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004. (in Chinese)]
- [7] 林化岭. 四川省康定—宝兴地区 1/50 万区域水文地质普查报告[R]. 中国人民解放军 00931 部队, 1980. [LIN Hualing. 1/500 000 regional hydrogeological survey report of Kangding-Baoxing area, Sichuan Province[R]. 00931 Unit of the Chinese People's Liberation Army, 1980. (in Chinese)]
- [8] 刘益栋. 甘孜县-炉霍地区 1/50 万区域水文地质普查报告[R]. 中国人民解放军 00931 部队, 1983. [LIU Yidong. 1/500 000 regional hydrogeological survey report of Ganzi County-Luhuo area[R]. 00931 Unit of the Chinese People's Liberation Army, 1983. (in Chinese)]
- [9] 李前良. 理塘-义敦地区 1/50 万区域水文地质普查报告[R]. 中国人民解放军 00931 部队, 1983. [LI Qianliang. 1/500 000 regional hydrogeological survey

- report of Litang-Yidun area[R]. 00931 Unit of the Chinese People's Liberation Army, 1983. (in Chinese)]
- [10] 李云贵,唐波,郭玉清,等. 昌都幅(H-47)1/100万区域水文地质普查报告[R]. 眉山:地矿部915水文工程地质队,1987. [LI Yungui, TANG Bo, GUO Yuqing, et al. 1/1 000 000 regional hydrogeological survey report of Chamdo Sheet(H-47)[R]. Meishan: 915 Hydrological Engineering Geology Team, Ministry of Geology and Mineral Resources, 1987. (in Chinese)]
- [11] 李云贵,王作堂,徐贵键. 拉萨幅(8-46)1/100万区域水文地质普查报告[R]. 眉山:地矿部915水文工程地质队,1990. [LI Yungui, WANG Zuotang, XU Guijian. 1/1 000 000 regional hydrogeological survey report of Lhasa Sheet (8-46)[R]. Meishan: 915 Hydrological Engineering Geology Team, Ministry of Geology and Mineral Resources, 1990. (in Chinese)]
- [12] 崔之久. 青藏高原的古岩溶[J]. 自然杂志, 1979,1(9): 24 - 25. [CUI Zhijiu. Ancient karst in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Nature Magazine, 1979,1(9): 24 - 25. (in Chinese)]
- [13] 朱学稳. 峰林喀斯特的性质及其发育和演化的新思考(2)[J]. 中国岩溶, 1991, 10(2): 137 - 150. [ZHU Xuewen. New considerations on the characteristics and evolution of the Fenglin karst (the second continuance)[J]. Carsologica Sinica, 1991, 10(2): 137 - 150. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 张之淦. 岩溶发生学——理论探索[M]. 桂林: 广西师范大学出版社, 2006. [ZHANG Zhigan. Origin of karst: theoretical works on karst[M]. Guilin: Guangxi Normal University Press, 2006. (in Chinese)]
- [15] 张恒,刘宗祥. 川西地区深部水文地质调查报告[R]. 贵阳: 贵州省地质环境监测总站, 2017. [ZHANG Heng, LIU Zongxiang. Deep hydrogeological survey report in Western Sichuan Region[R]. Guiyang: Guizhou Geological Environment Monitoring Institute, 2017. (in Chinese)]
- [16] 李晓,王金金,黄珣,等. 鲜水河断裂带康定至道孚段热水化学与同位素特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2018, 45(6): 733 - 745. [LI Xiao, WANG Jinjin, HUANG Xun, et al. Chemical and isotopic characteristics of hot water in the Kangding—Daofu section of Xianshuihe fault zone, Sichuan, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2018, 45(6): 733 - 745. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 张春潮,李向全,马剑飞,等. 基于水化学及稳定同位素的西藏察雅地下热水成因研究[J]. 现代地质, 2021, 35(1): 199 - 208. [ZHANG Chunchao, LI Xiangquan, MA Jianfei, et al. Formation model of geothermal water in Chaya of Tibet: Perspective from hydrochemistry and stable isotopes[J]. Geoscience, 2021, 35(1): 199 - 208. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 李媛,孟晖,董颖,等. 中国地质灾害类型及其特征——基于全国县市地质灾害调查成果分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(2): 29 - 34. [LI Yuan, MENG Hui, DONG Ying, et al. Main types and characteristics of geo-hazard in China: Based on the results of geo-hazard survey in 290 counties[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(2): 29 - 34. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 赵留辉. 川藏铁路昌都至林芝段对地下水环境的影响及对策[J]. 铁道建筑, 2020, 60(10): 155 - 158. [ZHAO Liuhui. Influence of Changdu-Linzhi section in Sichuan-Tibet Railway on groundwater environment and countermeasures[J]. Railway Engineering, 2020, 60(10): 155 - 158. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 郭长宝,张永双,杨志华,等. 川藏铁路沿线活动断裂与地质灾害效应调查研究[M]. 北京: 地质出版社, 2018. [GUO Changbao, ZHANG Yongshuang, YANG Zhihua, et al. Investigation and research on the active faults along the Sichuan-Tibet Railway and geological disaster[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2018. (in Chinese)]
- [21] 王栋,李天斌,蒋良文,等. 川藏铁路某超深埋隧道地应力特征及岩爆分析[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(4): 46 - 50. [WANG Dong, LI Tianbin, JIANG Liangwen, et al. Analysis of the stress characteristics and rock burst of ultra-deep buried tunnel in Sichuan-Tibet Railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(4): 46 - 50. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 何平,张广泽,强新刚. 川藏线桑珠岭隧道地下热水成因及选线研究[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(6): 10 - 13. [HE Ping, ZHANG Guangze, QIANG Xingang. Cause analysis of geothermal water and geological route selection research on the Sangzhuling tunnel of Sichuan-Tibet Railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(6): 10 - 13. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 潘桂棠,任飞,尹福光,等. 洋板块地质与川藏铁路工程地质关键区带[J]. 地球科学, 2020, 45(7): 2293 - 2304. [PAN Guitang, REN Fei, YIN Fuguang, et al. Key zones of Oceanic Plate geology and Sichuan-Tibet

- Railway Project[J]. *Earth Science*, 2020, 45(7): 2293 – 2304.]
- [24] 郭长宝, 吴瑞安, 蒋良文, 等. 川藏铁路雅安—林芝段典型地质灾害与工程地质问题[J]. *现代地质*, 2021, 35(1): 1 – 17. [GUO Changbao, WU Rui'an, JIANG Liangwen, et al. Typical geohazards and engineering geological problems along the Ya'an-Linzhi section of the Sichuan-Tibet Railway, China[J]. *Geoscience*, 2021, 35(1): 1 – 17. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 潘家伟, 李海兵, CHEVALIER Marie-Luce, 等. 鲜水河断裂带色拉哈—康定段新发现的活动断层: 木格措南断裂[J]. *地质学报*, 2020, 94(11): 3178 – 3188. [PAN Jiawei, LI Haibing, CHEVALIER M L, et al. A newly discovered active fault on the Selaha-Kangding segment along the SE Xianshuihe fault: the South Mugecuo fault[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(11): 3178 – 3188. (in Chinese with English abstract)]
- [26] ZHANG Y S, YAO X, YU K, et al. Late-Quaternary slip rate and seismic activity of the Xianshuihe fault zone in southwest China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2016, 90(2): 525 – 536.
- [27] MENG W, GUO C B, ZHANG Y S, et al. In situ stress measurements in the Lhasa terrane, Tibetan Plateau, China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2016, 90(6): 2022 – 2035.
- [28] 任洋, 王栋, 李天斌, 等. 川藏铁路雅安至新都桥段地应力特征及工程效应分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(1): 65 – 76. [REN Yang, WANG Dong, LI Tianbin, et al. In-situ geostress characteristics and engineering effect in Ya'an-Xinduqiao section of Sichuan-Tibet Railway[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(1): 65 – 76. (in Chinese with English abstract)]
- [29] ZHANG Y S, GUO C B, QU Y X, et al. Engineering geological properties of altered rocks and implications for railway construction in the Sanjiang orogenic belt, Southwest China[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2011, 70(1): 143 – 152.
- [30] 程谦恭, 王玉峰, 朱圻, 等. 高速远程滑坡超前冲击气浪动力学机理[J]. *山地学报*, 2011, 29(1): 70 – 80. [CHENG Qiangong, WANG Yufeng, ZHU Qi, et al. Dynamics of the airblasts generated by rock avalanches[J]. *Journal of Mountain Science*, 2011, 29(1): 70 – 80. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 张永双, 杜国梁, 郭长宝, 等. 川藏交通廊道典型高位滑坡地质力学模式[J]. *地质学报*, 2021, 95(3): 605 – 617. [ZHANG Yongshuang, DU Guoliang, GUO Changbao, et al. Research on typical geomechanical model of high-position landslides on the Sichuan-Tibet traffic corridor[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(3): 605 – 617. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 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, 27(4): 8 – 11. [YIN Yueping. Rapid huge landslide and hazard reduction of Yigong River in the Bomi, Tibet[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2000, 27(4): 8 – 11. (in Chinese with English abstract)]
- [33] GUO C B, MONTGOMERY D R, ZHANG Y S, et al. Evidence for repeated failure of the giant Yigong landslide on the edge of the Tibetan Plateau[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 1 – 7.
- [34] 王立朝, 温铭生, 冯振, 等. 中国西藏金沙江白格滑坡灾害研究[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(1): 1 – 9. [WANG Lichao, WEN Mingsheng, FENG Zhen, et al. Researches on the Baige landslide at Jinshajiang River, Tibet, China[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(1): 1 – 9. (in Chinese with English abstract)]
- [35] 张永双, 胡道功, 吴中海, 等. 滇藏铁路沿线地壳稳定性及重大工程地质问题[M]. 北京: 地质出版社, 2009. [ZHANG Yongshuang, HU Daogong, WU Zhonghai, et al. Crustal stability and major engineering geological problems along the Yunnan-Tibet Railway[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009. (in Chinese)]
- [36] 吕玉香, 蒋勇军, 王正雄, 等. 西南岩溶槽谷区隧道建设的水文生态环境效应研究进展[J]. *生态学报*, 2020, 40(6): 1851 – 1864. [LÜ Yuxiang, JIANG Yongjun, WANG Zhengxiong, et al. Review on the hydrology and the ecological and environmental effects of tunnel construction in the karst valley of Southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(6): 1851 – 1864. (in Chinese with English abstract)]
- [37] 许佑顶, 姚令侃. 川藏铁路沿线特殊环境地质问题的认识与思考[J]. *铁道工程学报*, 2017, 34(1): 1 – 5. [XU Youding, YAO Lingkan. Some cognitions and thinkings about the specific geo-environmental problems along the Sichuan-Tibet Railway[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2017, 34(1): 1 – 5. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 汪美华