

## 川藏铁路雅安至林芝段重大工程水文地质问题

许 模, 蒋良文, 李 潇, 漆继红, 张 强, 李 晓

### Major engineering hydrogeological problems along the Ya'an-Linzhi section of the Sichuan-Tibet Railway

XU Mo, JIANG Liangwen, LI Xiao, QI Jihong, ZHANG Qiang, and LI Xiao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202103101>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 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

#### 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

#### 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

#### 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

#### 基于多源数据的弱透水层水文地质参数反演研究

Research on hydrogeological parameter inversion of an aquitard based on multi-source data: A case study of a silt layer in the Hohhot Basin

石鸿蕾, 郝奇琛, 邵景力, 崔亚莉, 张秋兰 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 1-7

#### 郑万高铁宜万段边坡危岩崩落破坏特征

Caving failure characteristic of slope rockfall on Yiwan section of the Zhengzhou-Wanzhou high-speed railway

黄海宁, 巨能攀, 黄健, 张成强 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 164-172



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202103101

# 川藏铁路雅安至林芝段重大工程水文地质问题

许模<sup>1</sup>, 蒋良文<sup>2</sup>, 李潇<sup>1</sup>, 漆继红<sup>1</sup>, 张强<sup>1</sup>, 李晓<sup>1</sup>

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059;

2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031)

**摘要:** 川藏铁路位于大陆碰撞造山带, 特殊的地质构造背景下, 铁路沿线水文地质条件极为复杂, 严重制约着川藏铁路规划建设及安全运营。为降低川藏铁路沿线重大工程水文地质灾害风险, 从工程水文地质角度出发, 结合基础地质和工程地质研究成果, 阐述了川藏铁路雅安至林芝段重大工程水文地质问题, 并提出下一步研究建议。研究表明: 川藏铁路雅安至林芝段可能遭遇隧道高水压及涌突水问题、隧道高温热害问题、隧道排水影响生态环境3个重大工程水文地质问题; 沿线发育多条区域性断裂带, 控制着地层展布、水热活动和成矿带分布以及地下水循环演化, 导致穿越断裂带的深埋长大隧道高压涌突水、高温热害及高矿化水等问题较为突出。沿线重大工程水文地质问题下一步研究工作主要为: 开展高精度、多尺度的水文地质调查, 把握重大问题的发育规律和致灾机制, 构建精细的预测评价体系和主、被动相结合的灾害防控体系。

**关键词:** 川藏铁路; 工程水文地质问题; 高压涌突水; 高温热害; 生态环境效应

中图分类号: P641.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)05-0013-10

## Major engineering hydrogeological problems along the Ya'an-Linzhi section of the Sichuan-Tibet Railway

XU Mo<sup>1</sup>, JIANG Liangwen<sup>2</sup>, LI Xiao<sup>1</sup>, QI Jihong<sup>1</sup>, ZHANG Qiang<sup>1</sup>, LI Xiao<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geological Disaster Prevention and Geological Environmental Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. China Railway Eryuan Engineering Group Co.

Ltd., Chengdu, Sichuan 610031, China)

**Abstract:** The Sichuan-Tibet Railway is located in the continental collision orogenic belt. Under the special geological structure background, the hydrogeological conditions along the railway are extremely complicated, which seriously restricts the planning and construction and safe operation of the Sichuan-Tibet Railway. To reduce the risk of major engineering hydrogeological disaster, and from the perspective of engineering hydrogeology, by combining the research results of basic geology and engineering geology, this paper expounds the major engineering hydrogeological problems along the Ya'an-Lingchi Section and puts forward suggestions for further research. The results show that the Ya'an-Lingchi section of the Sichuan-Tibet Railway may encounter three major engineering hydrogeological problems, namely, high water pressure and water inrush, high-temperature heat-damage of the tunnel, and the impact of tunnel drainage on ecological environment. Several regional fault zones developed along the railway may control the distribution of strata, hydrothermal activities and mineral resources and the circulation and evolution of groundwater, leading to prominent problems such as high-pressure water inrush, high-temperature heat-damage and groundwater drainage with high TDS in deep and long tunnels through the fault zone. The next step of the research on major engineering hydrogeological problems along the Sichuan-

收稿日期: 2021-03-21; 修订日期: 2021-05-14

基金项目: 四川省科技厅重点研发项目(2019YFG0460); 中国中铁科研项目(2018-重点-49)

第一作者: 许模(1963-), 男, 博士, 教授, 主要从事水文地质工程地质教学与科研工作。E-mail: xm@cdu.edu.cn

Tibet Railway is mainly to carry out high-precision and multi-scale hydrogeological survey, grasp the development rules and disaster-causing mechanisms of the major problems, and build a fine prediction and evaluation system and an active and passive disaster prevention and control system.

**Keywords:** Sichuan-Tibet Railway; engineering hydrogeological problem; high-pressure water inrush; high-temperature heat-damage; ecological environment effect

规划建设中的川藏铁路东起四川成都,经雅安、康定、昌都、林芝、山南一路西行,最终抵达西藏拉萨。其间横跨三江流域,贯穿横断山脉,尔后经喜马拉雅东构造结,延伸至青藏高原腹地。在地形高差和地貌格局制约下,川藏铁路主要以隧道形式穿越高山峡谷区,其中雅安至林芝段长度大于 20 km 的深埋长大隧道 16 座,最大隧道埋深约 2 100 m。川藏铁路由我国第二阶梯过渡至第一阶梯,东段连接成都枢纽,可通往西南及中东部地区,西段经既有的青藏铁路和规划的新藏铁路,可通往西北地区,是继青藏铁路后又一进出青藏高原的天路工程。长期以来,恶劣的气候条件和复杂的地质环境造成青藏高原地区交通十分不便、经济相对落后,因此川藏铁路建设不仅是破解藏区交通瓶颈的重要举措,也是促进藏区经济发展的迫切需求,更是藏区长治久安的国防通道,对于国家政治、经济和战略部署意义重大而深远<sup>[1-3]</sup>。

由于特提斯构造演化以及青藏高原隆升,川藏铁路是全球地质构造最复杂、施工条件最艰险的铁路工程<sup>[4]</sup>。沿线地质环境极为恶劣,集气候差异大、地形地貌多变、新构造活动强烈、中强地震频发、各尺度断裂交错于一体,孕育了高寒、高陡、高地震烈度、高地应力、高地温、高水压和大规模涌突水等复杂的地质环境条件,无疑为铁路工程设计、建设和后期安全运营带来巨大挑战和科学难题。

迄今为止,针对川藏铁路沿线关键地质问题,国内学者分别从内、外动力作用效应两方面,对沿线崩塌、滑坡、泥石流等浅表层地质灾害和高地应力、高地温、软岩大变形、岩爆、活动断层等地球深部重大灾害开展了大量调查研究工作<sup>[1,5-8]</sup>。现有成果从不同角度对沿线主要工程地质问题进行了阐述,但关于高温热水、岩溶涌突水等水文地质问题仍缺乏系统、全面地认识。本文基于已有研究成果,结合 2018—2020 年多次现场调查和室内分析,进一步深入、系统地研究和探索川藏铁路雅安至林芝段工程沿线主要水文地质问题并提出合理的研究建议。本文旨在全面地认识川藏铁路沿线主要水文地质问题,为川藏铁

路工程规划、线路优化以及安全施工、安全运营提供科学依据和技术支撑。

## 1 区域地质背景

### 1.1 地形地貌

欧亚板块和印度板块的持续碰撞塑造了青藏高原及周缘复杂的地形地貌特征,其后期演化受新构造运动、区域气候和岩体特征等因素制约,造就了由四川盆地跃升至拉萨盆地独特的地形地貌格局<sup>[9]</sup>。

川藏铁路沿线总体地势西高东低,具有高海拔、大高差的特点。沿线涉及四川盆地、川西高山峡谷区、藏东南横断山高山峡谷等 5 个地貌单元,穿越沙鲁里山、芒康山、伯舒拉岭、色季拉山等 8 座高山,跨越大渡河、金沙江、澜沧江、怒江、雅鲁藏布江等 7 条大江大河。

### 1.2 地质构造

川藏铁路位于板块碰撞造山带,是世界上构造格局最复杂、构造运动最活跃的地区。沿线横跨三江造山系、喜马拉雅—冈底斯造山系等 4 个一级构造单元以及金沙江缝合带、雅鲁藏布江缝合带等 4 大板块缝合带<sup>[10]</sup>;大角度穿越 7 条蛇绿混杂岩带或俯冲增生杂岩带,同时还穿越第四纪以来具有明显活动性的数十条深大活动断裂及其伴生的次级断裂。

### 1.3 地层岩性

川藏铁路沿线及邻区地层发育齐全,除寒武系外,第四系至震旦系均有分布。区域内沉积岩分布最广,喜山期和燕山期岩浆岩侵入其中。地层展布受地质构造控制作用明显,其走向与区域性深大断裂走向大体一致。

第四系至古近系地层主要分布于断陷盆地、河流阶地内,岩性以冲洪积、冰碛物、湖相为主。白垩系至三叠系地层呈长条状或片状出露于喜马拉雅东构造结以东。其余沉积岩类地层主要分布于东构造结以西。变质岩以板岩、片麻岩和大理岩为主,分布于元古宇地层中。花岗岩、闪长岩等岩浆岩主要出露于康定、理塘至巴塘以及昌都以西地区。

#### 1.4 水文地质条件

川藏铁路沿线含水岩组类型多样,大致划分为第四系松散堆积层含水岩组,泥岩、砂岩、灰岩等沉积岩类含水岩组,板岩、千枚岩、片麻岩等变质岩类含水岩组;花岗岩、闪长岩等岩浆岩类含水岩组。各含水岩组富水性差异较大,其中灰岩和白云岩含水岩组富水性中等-强,花岗岩含水岩组富水性强弱取决于长大裂隙的发育程度。

川藏铁路沿线所涉及的水文地质结构极其复杂,根据沿线地层岩性和构造,将其划分为4类:第四系松散堆积层含水结构、岩溶含水结构、硬质岩类裂隙含水结构以及断裂带含水结构。特别地,区域性深大断裂与不同岩性的含水结构组合,形成以断裂-岩溶和断裂-硬质岩类为主的特殊断裂带含水结构。

不同含水结构类型具有各自的地下水流动特征,从而形成多个地下水系统。川藏铁路沿线的典型地下水系统包括浅表地下水系统和区域性热水系统。补给来源以大气降水为主,加之高海拔地区的融雪水和冰蚀湖水通过断裂或溶蚀裂隙下渗补给,构成“冰-水”双源补给;径流特征受含水结构控制,浅表地下水系统大多表现为就近补给、就近排泄,区域性热水系统则表现为深循环、长距离径流排泄;排泄方式主要以泉的形式集中出露于地势低洼处或分散排泄于河流溪沟中。

## 2 重大工程水文地质问题

在区域大地构造背景下,铁路沿线显著起伏的地形,加之混杂的地层岩性和强烈的构造活动,致使沿线水文地质条件极为复杂,深埋长大隧道高水压、岩溶涌突水、高温热害、隧道排水对生态环境影响等问题十分突出,威胁着川藏铁路的规划建设和安全运营。

### 2.1 隧道高水压及涌突水问题

在隧道深埋条件下,特殊的储水构造如断裂带储水构造、中-缓倾角单斜地层储水构造以及向斜储水构造,易于造成较严重的隧道高压突水突泥、衬砌渗漏水等事故,从而影响隧道施工运营安全。例如,位于高海拔地区的新疆精伊铁路北天山隧道,最大涌水量达 $0.46\text{ m}^3/\text{s}$ ,水压达到 $3\text{ MPa}$ <sup>[11]</sup>;雅砻江锦屏二级水电站一平硐涌水量达 $0.61\text{ m}^3/\text{s}$ ,水压高达 $5\text{ MPa}$ <sup>[12]</sup>。

钻孔资料显示,川藏铁路宝灵山隧道、康定隧道、折多山隧道、莫西隧道、色季拉山隧道中有12个钻孔具有承压性质。同时,G318理塘隧道和康定过境段公

路工程的钻孔也揭示了承压水(图1)。由此可见,川藏铁路深埋长大隧道高水压问题不容小觑。铁路沿线山高涧深,水文地质条件复杂,深埋长大隧道在穿越上述储水构造时,尤其是在区域性深大断裂与富水性强的可溶岩、花岗岩等含水岩组相结合部位,无疑将面临较大的涌突水风险,且具有涌水量大、水头压力高的特点。根据川藏铁路雅安至林芝段水文地质条件,结合隧道高水压问题的影响因素,对沿线深埋长大隧道的高水压形成条件和风险等级进行梳理和判断,其结果见表1。



图1 川藏铁路沿线典型钻孔自流现象  
Fig. 1 Typical artesian borehole along the Sichuan-Tibet Railway

川藏铁路沿线各尺度断裂发育,且存在多个可溶岩分布区,因此断裂带与可溶岩组合地区的构造岩溶高压涌突水问题是川藏铁路修建过程中最常见的重大水文地质灾害之一。

根据川藏铁路雅安—林芝段水文地质调查结果,识别出雅安—康定段、理塘—巴塘段(金沙江东岸段)、贡觉—昌都段(澜沧江东岸段)、昌都—洛隆段以及洛隆—波密段5大岩溶分布区(图2)。沿线可溶岩地层走向与控制性断裂走向一致,呈条带状展布,主要出露震旦系、志留系、泥盆系、石炭系和三叠系可溶岩地层。其中,金沙江东岸巴塘—理塘可溶岩分布最广,岩溶泉数量最多,且沿线大于 $100\text{ L/s}$ 的岩溶大泉多集中于此。

在印度板块持续挤压作用下,不仅引起青藏高原的大幅度隆升,而且导致同一纬度空间及时间上的气候变化。川藏铁路穿越我国地形起伏变化最大的梯度带以及亚热带、温带、寒带3个生态环境气候带。在高原隆升和寒冷气候影响下,青藏高原现代岩溶发育较弱,并且各岩溶分布区的岩溶发育程度和地表岩

表 1 川藏铁路雅安—林芝段深埋长大隧道高水压形成条件及风险等级划分

Table 1 Formation conditions of high-water pressure in deep and long tunnels of the Ya'an-Linzi section of the Sichuan-Tibet Railway and classification of risk grade

储水构造类型	二级控制因素	高水压形成条件	高压涌突水风险等级	涉及隧道
断裂带	可溶岩地层	隧道深埋, 岩溶发育, 地下水补给条件良好, 富水性强, 断裂带附近经后期岩溶化改造更易形成贯通的集中性涌水通道, 造成大规模高压涌水	高	格聂山隧道、芒康山隧道
	花岗岩地层	隧道深埋, 花岗岩长大裂隙发育, 为良好的储水空间和导水通道, 与断裂带沟通使得地下水径流更畅通, 形成稳定的高压涌水	中等	康定隧道、德达隧道
单斜地层储水构造	中—缓倾角地层 含水层与隔水层互层	隧道深埋, 含水层补给范围大, 富水性相对较强, 在上覆下伏隔水层作用下, 含水层具有承压性, 裂隙发育部位易形成高压涌水	中等	高尔寺隧道、理塘隧道
向斜储水构造	-	隧道深埋, 集汇水条件良好, 水量较为丰富, 向斜转折端易形成高压涌水	中等	格聂山隧道、芒康山隧道

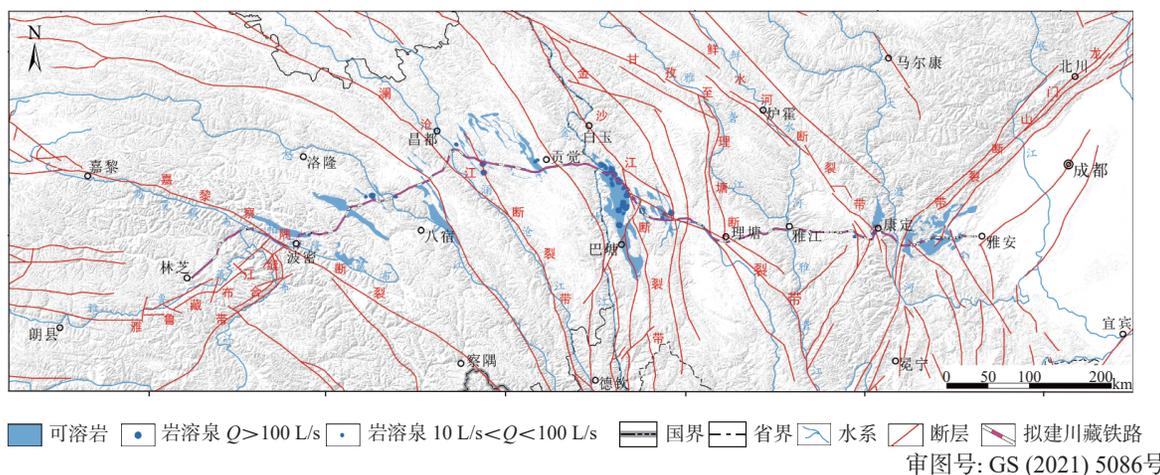


图 2 川藏铁路雅安—林芝段可溶岩地层及岩溶泉点分布图

Fig. 2 Spatial distribution of karstified strata and karst spring along the Ya'an-Linzi section of the Sichuan-Tibet Railway

溶形态差异明显。

川藏铁路穿越的深切峡谷区, 岩溶发育速率落后于高原隆升和河流切割速率, 导致岩溶发育具有垂向分带性<sup>[13]</sup>。在冰川改造作用下, 海拔 5 000 m 以上的剥蚀面, 常见长大竖向溶蚀裂隙发育的残余峰丛和冰蚀洼地等类岩溶地貌, 见图 3(a), 为岩溶水提供了良好的补给条件, 融雪水或冰蚀湖水与大气降水构成冰-水双源补给。沿竖向溶蚀裂隙, 可见溶沟、溶隙、溶孔, 局部发育规模不大的溶洞。随着河流下切和高原隆升, 山体内部岩溶发育滞后且垂向发育深度受限, 因侧向卸荷作用, 山体边坡张性裂隙发育, 后期逐渐扩展为溶隙。深切河谷底部为应力约束区, 岩体较为完整, 岩溶发育较弱。因此, 常见岩溶泉点出露于半山腰处。在断层破碎带附近, 溶隙发育程度加剧, 形成较通畅的溶蚀管道, 有利于地下水赋存和运移, 发育岩溶大泉, 如康定清泉村岩溶大泉和巴塘降曲西岸一系列岩溶大泉以及芒康山索奔大泉。

理塘毛垭坝地区和贡觉热曲河一带位于高原夷

平面上, 为典型的浅切宽谷区, 二者岩溶发育程度和特征略有差异。毛垭坝地区可溶岩地层为三叠系上统图姆沟组(T<sub>3t</sub>), 碳酸盐岩与碎屑岩互层, 因地处高寒的区域分水岭地带, 岩溶发育程度较弱, 主要为构造裂隙和层面裂隙基础上的溶蚀加宽作用, 见图 3(b), 大多数岩溶水分散排泄于低洼处, 个别泉点流量较大。贡觉热曲河一带可溶岩地层为石炭系中统敖曲组(C<sub>2a</sub>), 岩性较纯, 该地区具有水热同季的气候特征, 导致岩溶发育较强, 不同拔河高度可见若干规模不一的溶洞, 岩溶泉点主要出露于河谷边缘。

位于深切峡谷区的深埋长大隧道, 在冰-水双源补给和构造岩溶作用下, 隧道施工过程中可能出现大规模的高压涌突水现象, 尤其是在穿越断裂破碎带附近。隧道穿越浅切宽谷区时, 埋深相对较小, 发生高压涌突水的风险较小, 但由于隧道高程接近河谷排泄基准面, 岩溶较发育, 隧道将面临水头压力不高但流量较大的岩溶涌突水问题。表 2 为川藏铁路雅安—林芝段岩溶隧道涌突水灾害特征。



(a) 格聂山顶部类岩溶洼地(黑色)和冰湖(蓝色)

(b) 毛垭坝图姆沟组(T<sub>3t</sub>)溶蚀裂隙

图3 川藏铁路沿线典型岩溶发育特征

Fig. 3 Typical characteristics of karst development along the Sichuan-Tibet Railway

表2 川藏铁路雅安至林芝段岩溶隧道涌突水灾害特征

Table 2 Characteristics of karst tunnel water inrush disasters along the Ya'an-Linzi section of the Sichuan-Tibet Railway

岩溶区段	隧道	可溶岩地层	地形地貌特征	可溶岩段长度/占比	涌突水特征
雅安—康定段	垭口上隧道	P <sub>1q</sub> 、P <sub>1l</sub> 、D <sub>2</sub>	深切峡谷	971 m/16.3%	局部集中涌突水
	二郎山隧道	D <sub>2</sub> 、O	深切峡谷	2 742 m/18.6%	局部集中涌突水
	郭达山隧道	Z <sub>2s</sub> 、St、C-Px	深切峡谷	1 900 m/16.5%	局部高压涌突水
理塘—巴塘段	德达隧道	T <sub>3q</sub>	浅切宽谷(进口段) 深切峡谷(出口段)	2 735 m/10.8%	断层附近集中涌突水 断层附近高压涌突水
	莫西隧道	P <sub>3g</sub>	深切峡谷	3 440 m/19.3%	断层附近高压涌突水
	格聂隧道	D <sub>1g</sub> 、S <sub>2-3s</sub> 、E <sub>3e</sub> 、O <sub>2-3w</sub>	深切峡谷	5 595 m/32.7%	断层附近大规模高压涌突水
贡觉—昌都段	孜拉山隧道	T <sub>3b</sub> 、P <sub>1m</sub> 、C <sub>2a</sub>	深切峡谷	6 761 m/16.8%	局部高压涌突水
	贡觉隧道	T <sub>3b</sub>	浅切宽谷	920 m/3.5%	局部集中涌突水
	东达山隧道	T <sub>3b</sub> 、C <sub>2a</sub>	浅切宽谷	8 991 m/57.5%	断层附近和隧道出口段集中涌突水
	芒康山隧道	T <sub>3b</sub>	深切峡谷	2 636 m/8.6%	断层附近高压涌突水
昌都—洛隆段	康玉隧道	Pz <sub>2x</sub>	深切峡谷	5 561.5 m/28.5%	断层附近高压涌突水
洛隆—波密段	多吉隧道	P <sub>2l</sub>	深切峡谷	18 072 m/74.6%	断层附近高压涌突水
	多木格隧道	P <sub>2l</sub>	深切峡谷	1 288 m/8.7%	隧道出口段集中涌突水

## 2.2 隧道高温热害问题

伴随着印度板块和欧亚板块的陆陆碰撞,青藏高原地区新生代岩浆活动和水热活动异常活跃,造成了区域性热流异常背景,形成著名的喜马拉雅地热带<sup>[14]</sup>。该地区平均热流值约 90 mW/m<sup>2</sup>,远高于我国大陆地区平均热流值(61.5±13.9 mW/m<sup>2</sup>)<sup>[15]</sup>。青藏高原偕同周缘地区温泉、热泉、沸泉甚至间歇喷泉以及喷气孔等地热显示,沿断裂构造或分布于皑皑雪山之下,或分布于巨壑深谷中(图4),为窥探地球内热的最佳窗口<sup>[16]</sup>。

青藏高原地壳深部热结构与地表高温水热活动密切相关。地震波数据和大地电磁剖面资料显示,青藏高原地区中上地壳普遍存在不连续的低速高导层,为深部岩浆向上侵位以及地壳加厚产生热能导致的

部分熔融<sup>[17-19]</sup>。该部分熔融体为地热流体的主要热源,辅以构造变形产热和花岗岩放射性元素生热,驱动并维系着喜马拉雅地热带强烈的水热活动(图5)。

川藏铁路雅安—林芝段穿越多个水热活动区,热水分布严格受断裂构造控制,同时空间上与地震活动大体相对应(图6)。沿线水热活动区自东向西依次为川西高原水热活动区、藏东“三江”北段水热活动区和藏南雅鲁藏布江大拐弯水热活动区。按受控断裂构造及热水温度,可进一步划分为鲜水河断裂带中高温水热活动区、甘孜—理塘断裂带中高温水热活动区、金沙江断裂带中高温水热活动区、字嘎寺—德钦断裂中低温水热活动区、澜沧江中高温水热活动区、怒江中高温水热活动区、雅鲁藏布江缝合带中高温水热活



(a) 理塘章柯沸泉群

(b) 波密通麦—长青沸泉

图 4 川藏铁路沿线典型高温热水

Fig. 4 Typical high-temperature geothermal springs along the Sichuan-Tibet Railway

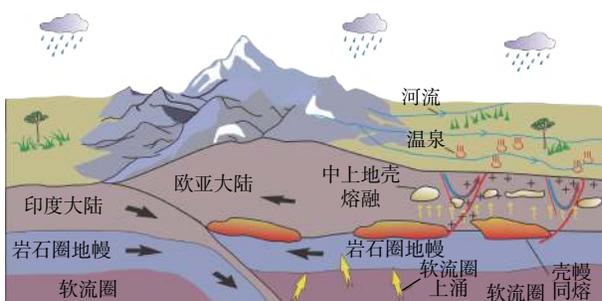


图 5 喜马拉雅地热带热水成因模式

Fig. 5 Formation model of geothermal water in the Himalayan Geothermal Belt

动区。深埋长大隧道穿越上述水热活动区时可能遭遇高压热水、涌突热水、热水腐蚀、高温岩体等热害问题。

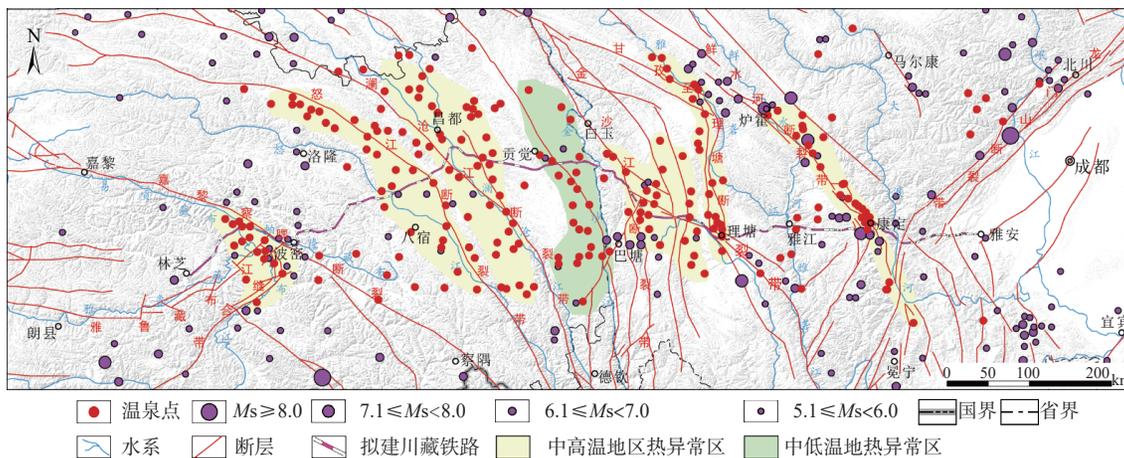
沿线热水主要沿断裂或裂隙密集带出露，在岩性、地形等因素的共同作用下，形成多个热水系统。隧道高温热害类型及特征因隧道穿越热水系统循环

部位不同而存在差异(表 3)，且同一隧道可能穿越同一热水系统甚至多个热水系统的不同部位，导致高温热害问题更为复杂。譬如，位于鲜水河断裂带中高温水热活动区的康定 1#隧道和雅鲁藏布江缝合带中高温水热活动区的拉月隧道<sup>[20]</sup>，在深部热水上升排泄的优势部位，钻孔揭示中高温热水，推测隧道穿越该部位时存在一定程度的中高温热害问题，其余部位热害问题不突出。

### 2.3 隧道排水对生态环境的影响

青藏高原地区生态环境具有敏感性和脆弱性，川藏铁路雅安—林芝段穿越原始森林、高原草甸、高原冻土、高原湿地等多种生态系统，导致川藏铁路建设面临重大挑战。

隧道工程作为新的地下水集中汇集场所或排泄通道，长期排放地下水将打破隧址区及周边多年来形



● 温泉点    ●  $M_s \geq 8.0$     ●  $7.1 \leq M_s < 8.0$     ●  $6.1 \leq M_s < 7.0$     ●  $5.1 \leq M_s < 6.0$     — 国界    - - - 省界  
 水系    断层    拟建川藏铁路    中高温地区热异常区    中低温地热异常区

审图号: GS (2021) 5086号

图 6 川藏铁路雅安至林芝段热水及地震分布图

Fig. 6 Distribution of geothermal springs and earthquakes along the Ya'an-Linzhi section of the Sichuan-Tibet Railway

表3 川藏铁路雅安—林芝段隧道穿越不同热水系统部位的高温热害特征

Table 3 Characteristics of high-temperature heat-damage of tunnel at different parts of hot spring systems along the Ya'an-Linzhi section of the Sichuan-Tibet Railway

隧道布设与热水系统空间位置关系	热害特征	涉及隧道	洞身处钻孔热害情况
隧道未穿越热水系统	热水对隧道无直接影响,但偏高的热流背景可能导致深埋隧道因正常增温产生中低岩温和中低温热涌突水问题	格聂山隧道、茶洛隧道	无热害问题
隧道穿越两个热水系统之间	隧道埋深有限且远离控热控水构造,无深部水热活动影响,地温梯度低,基本无岩温异常或热涌突水问题	康玉隧道	无热害问题
隧道穿越热水系统补给区	大气降水或融雪水下渗导致浅层岩体维持低温,深部水热活动影响弱,但因补给区隧道埋深大,若隧道位于上部冷水影响区之下,可能存在中低岩温和中低温热涌突水问题	德达隧道	轻微热害问题
隧道穿越热水系统径流区	隧道布设于径流区之上,深部热水通过热传导方式对上部岩体及浅层地下水加热,隧道可能存在中低岩温和中低温热涌突水问题	芒康山隧道	轻微热害问题
隧道穿越热水系统排泄区	热水上升溢流时,与浅层冷水混合,出露温度略微降低,但地温梯度值仍较大;位于上溢区的隧道,虽埋深相对较浅,但穿越控制热水出露的断层或裂隙密集带附近,易诱发高压热水、高岩温以及热水腐蚀性问题	康定1#隧道、拉月隧道	中等热害问题、严重热害问题

成的水环境平衡,从而带来一系列生态环境问题及效应<sup>[21-22]</sup>。隧道排水不仅引起地下水流场变动,同时排放的异常水体如高温水、高矿化水等,进入环境中也会产生污染问题。

隧道开挖破坏了含水层结构和围岩力学平衡,从而改变地下水动力条件,以隧道为中心形成势汇,地下水不断渗入。地下水渗流场因隧道排水而不断变化,地下水位持续下降,降落漏斗范围内大量静储量被疏排,尤其是在隧道穿越可溶岩地层断裂带、花岗岩长大裂隙等导水且富水部位,大量的地下水顺着导水通道涌入隧道,地下水位或将降低至隧道顶板。其结果为隧道排水影响范围内的泉点及地表溪沟流量锐减甚至断流,从而造成植被、动物以及人类赖以生存的水源地数量减少(图7)。

青藏高原是全球最典型的大陆碰撞造山带,伴随碰撞造山作用而发生大量的成矿作用<sup>[23]</sup>。川藏铁路雅安—林芝段穿越的东缘构造转换带,即为其中重要成矿构造单元之一。沿线涉及多个油气区、煤层瓦斯浸染区和矿区,在贡觉—昌都一带,线路以北分布有著名的特大型斑岩类铜矿。

成矿带地下水在循环演化过程中,水-岩作用使得矿体中高含量元素迁移至地下水,从而形成高矿化地下水,尤其是区域性深循环的热水,一般具有较高的溶解性总固体。例如羌北—滇西盐类成矿域,大量的盐泉、咸泉出露,且部分泉点携带一定的温度<sup>[24-25]</sup>。铁路沿线成矿带的展布受断裂构造控制明显,在康定、理塘、巴塘、昌都、贡觉、八宿以及波密等地区,深埋长大隧道穿越断裂带部位可能揭示高矿化或高矿化高温地下水,经隧道疏排汇入地表溪沟、河流等

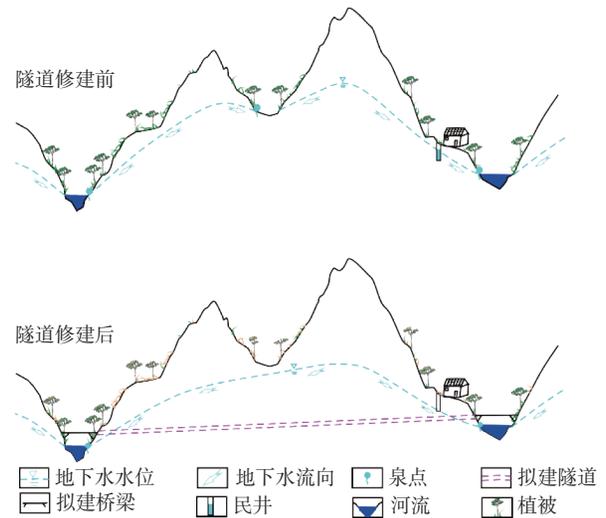


图7 隧道排水对地下水渗流场的影响

Fig. 7 Effect of tunnel drainage on the groundwater seepage field

接纳水体后,将对生态环境造成较大影响。

### 3 重大工程水文地质问题研究对策展望

川藏铁路雅安—林芝段,途经横断山脉和喜马拉雅东构造结,在高原隆升、复杂构造演化、气候变化作用下,沿线水文地质结构具有独特性和复杂性,高压、高温热水、高矿化水、大规模岩溶涌突水等重大工程水文地质问题,威胁着川藏铁路工程安全。因此,在研究川藏铁路沿线工程水文地质问题时,应从基础地质出发,查明水文地质结构及特征,识别重大工程水文地质问题,揭示其发育规律和机制,划分重点段落并预测评价灾害风险,对重大灾害风险防控提出切实有效的应对措施。

### 3.1 重大问题发育规律和致灾机制研究对策展望

川藏铁路沿线环境条件复杂艰险,既有水文地质基础研究薄弱,对沿线重大工程水文地质问题的识别和思考造成巨大困难。因此,全线更精细的大比例尺水文地质调查工作十分必要。在调查人员无法到达的地区需利用遥感技术、航空物探、无人机三维技术、定向钻探等新技术,实现“空天地一体化”的综合调查方法。在此基础上,结合构造应力场、活动断裂、缝合带、地震等基础地质研究成果,展开系统深入的多尺度水文地质调查研究。同时辅以理论分析、室内物理模型试验和数值模拟着重刻画沿线活动断裂带、成矿带、岩溶发育区、高温水热活动区等重点区段天然条件下及不同工况下的渗流场、地温场特征。从而加深对沿线水文地质结构、多级次地下水系统以及工程扰动下地下水流场变化的认知,分析关键致灾因素,并进一步掌握沿线重大工程水文地质问题的发育规律和致灾机制。

### 3.2 重大问题超前预测评价技术研究对策展望

基于重大工程水文地质问题发育规律和机制分析,对沿线隧道工程的重大水文地质问题进行初步定性评估,划分各类工程水文地质灾害的易发区段,然后根据钻探、物探结果以及地表显示,精准识别具体隧道的具体灾害类型及特征。同时引入当前学科前沿科学理论,基于川藏铁路沿线特殊的水文地质条件以及西南山区岩溶隧道涌突水灾害危险性评价系统(THK)与高压水灾害危险性预测评价方法等已有技术<sup>[26-27]</sup>,明确契合川藏铁路工程特征的各项重大工程水文地质问题评价标准,提取相应的关键评价因子和指标,赋予科学、合理的权重,建立适用于川藏铁路重大工程水文地质问题的超前预测评价体系。此外,结合先期开工隧道并借鉴青藏高原地区其它大型工程建设如青藏铁路、大瑞铁路、锦屏二级水电站、拉日铁路等勘察设计阶段与施工过程中揭示的典型水文地质问题相关成果,不断完善和修正预测评价体系。在此基础上,对重点隧道的高水压、涌突水、高地温等灾害开展定量分析评价,做到有效识别风险段落、超前预测灾害等级,从而选取更优的综合探测手段与预报技术,为地质综合选线、安全施工和运营提供科学依据。

### 3.3 灾害防控措施研究对策展望

目前,针对重大工程水文地质问题的灾害防控措施研究主要从线路设计和施工两个方面进行。根据重大问题的致灾机制,提出各灾害类型防控关键因素

和关键参数,重点针对先期开工隧道和风险较高的深埋长大隧道开展水文地质灾害防控精细化探究,指导线路方案优化及施工方案调整。综合性超前地质预报与实时动态监测预警系统相结合,构建主动灾害防控体系,尤其是在灾害风险高的段落,加深前期预报和预警工作,确保能够及时反馈、及时处理。同时从川藏铁路工程实际出发,研发新型防排水材料、防腐蚀性材料、隔热材料等防控材料,提出隧道排水处理方案,革新隧道施工工艺,从而建立主、被动相结合的危害防控体系,做到全面防控重大工程水文地质问题。

## 4 结论

(1)川藏铁路沿线独特的地质环境塑造了极为复杂的水文地质条件,孕育了高水压、高温热水、高矿化水、大规模岩溶涌突水等重大工程水文地质问题。

(2)川藏铁路雅安—林芝段途经 5 大岩溶分布区,涉及 3 类特殊的储水构造。寒冷气候限制了现代岩溶发育程度,仅贡觉热曲河一带因水热同季的气候因素,导致岩溶较为发育。金沙江东岸具有典型的构造岩溶特征,岩溶大泉发育,深埋长大隧道揭示断裂带储水构造时高压岩溶涌突水问题最为显著。

(3)水热活动分布明显受控于深大断裂,沿线涉及 6 个中高温水热活动区和 1 个中低温水热活动区。穿越热水上溢区的隧道,高温热害问题较为突出,尤其是在穿越控制热水出露的断层或裂隙密集带处,极易诱发高压热水、高岩温以及热水腐蚀性问题。

(4)川藏铁路雅安—林芝段穿越多个敏感且脆弱的生态系统,隧道排水不仅引起地下水流场变动,同时隧道穿越成矿带时排放的高矿化水甚至高温高矿化水,将引发一系列生态环境问题及效应。

## 参考文献 (References) :

- [1] 郭长宝,张永双,蒋良文,等.川藏铁路沿线及邻区环境工程地质问题概论[J].现代地质,2017,31(5):877-889. [GUO Changbao, ZHANG Yongshuang, JIANG Liangwen, et al. Discussion on the environmental and engineering geological problems along the Sichuan-Tibet Railway and its adjacent area[J]. Geoscience, 2017, 31(5): 877-889. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 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. (in

- Chinese with English abstract) ]
- [ 3 ] 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.
- [ 4 ] 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) ]
- [ 5 ] 郭长宝, 王保弟, 刘建康, 等. 川藏铁路交通廊道地质调查工程主要进展与成果[J]. *中国地质调查*, 2020, 7(6): 1 – 12. [ GUO Changbao, WANG Baodi, LIU Jiankang, et al. Main progress and achievements of the geological survey project of Sichuan-Tibet Railway traffic corridor[J]. *Geological Survey of China*, 2020, 7(6): 1 – 12. ( in Chinese with English abstract) ]
- [ 6 ] 宋章, 张广泽, 蒋良文, 等. 川藏铁路工程地质特征及地质选线原则[J]. *铁道建筑*, 2017, 57(2): 142 – 145. [ SONG Zhang, ZHANG Guangze, JIANG Liangwen, et al. Engineering geological features and geological route selection principle of Sichuan-Tibet Railway[J]. *Railway Engineering*, 2017, 57(2): 142 – 145. ( in Chinese with English abstract) ]
- [ 7 ] 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) ]
- [ 8 ] 杨德宏. 川藏铁路昌都至林芝段主要工程地质问题分析[J]. *铁道标准设计*, 2019, 63(9): 16 – 22. [ YANG Dehong. Analysis of main engineering geological problems in Changdu to Linzhi section of Sichuan-Tibet Railway[J]. *Railway Standard Design*, 2019, 63(9): 16 – 22. ( in Chinese with English abstract) ]
- [ 9 ] 文力, 魏鹏飞, 常华进, 等. 青藏高原周边地区河流分形特征与地貌、构造活动耦合关系[J]. *地质通报*, 2018, 37(6): 965 – 974. [ WEN Li, WEI Pengfei, CHANG Huajin, et al. A study of the coupling relationship between fractal characteristics of river, geomorphology and tectonic activity in areas around the Tibetan Plateau[J]. *Geological Bulletin of China*, 2018, 37(6): 965 – 974. ( in Chinese with English abstract) ]
- [ 10 ] 潘桂棠, 肖庆辉, 尹福光, 等. 中国大地构造[M]. 北京: 地质出版社, 2017. [ PAN Guitang, XIAO Qinghui, YIN Fuguang, et al. *Great geological structure of China*[M]. Beijing: Geology Press, 2017.(in Chinese) ]
- [ 11 ] 任文峰. 高水压隧道应力场一位移场一渗流场耦合理论及注浆防水研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013. [ REN Wenfeng. Theory research of stress field displacement field and seepage field and study on grouting waterproofing of high water pressure tunnel[D]. Changsha: Central South University, 2013. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 12 ] 黄润秋, 王贤能, 陈龙生. 深埋隧道涌水过程的水力劈裂作用分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(5): 573 – 576. [ HUANG Runqiu, WANG Xianneng, CHEN Longsheng. Hydro-splitting off analysis on underground water in deep-lying tunnels and its effect on water gushing out[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(5): 573 – 576. ( in Chinese with English abstract) ]
- [ 13 ] 许模, 毛邦燕, 张广泽, 等. 青藏高原东缘梯度带大气 CO<sub>2</sub>含量与岩溶发育相关性初探[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2020, 47(6): 724 – 732. [ XU Mo, MAO Bangyan, ZHANG Guangze, et al. A preliminary study on correlation of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration and karst development in the eastern margin of Qinghai-Tibet plateau, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition)*, 2020, 47(6): 724 – 732. ( in Chinese with English abstract) ]
- [ 14 ] 胡圣标, 黄少鹏. 中国陆地大地热流[C]//汪集旸. 地热学及其应用. 北京: 科学出版社, 2015. [ HU Shengbiao, HUANG Shaopeng. Heat flow in the continental area of China[C]//WANG Jiyang. *Geothermics and its applications*. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese) ]
- [ 15 ] 姜光政, 高翔, 饶松, 等. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第四版)[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(8): 2892 – 2910. [ JIANG Guangzheng, GAO Peng, RAO Song, et al. *Compilation of heat flow data in the continental area of China (4th edition)*[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(8): 2892 – 2910. ( in Chinese with English abstract) ]
- [ 16 ] 廖志杰, 赵平. 滇藏地热带: 地热资源和典型地热系统[M]. 北京: 科学出版社, 1999. [ LIAO Zhijie, ZHAO Ping. *Yunnan-Tibet geothermal belt-geothermal resources and typical geothermal systems*[M]. Beijing: Science Press, 1999.(in Chinese) ]

- [17] 李振清, 侯增谦, 聂凤军, 等. 藏南上地壳低速高导层的性质与分布: 来自热水流体活动的证据[J]. 地质学报, 2005, 79(1): 68 - 77. [ LI Zhenqing, HOU Zengqian, NIE Fengjun, et al. Characteristic and distribution of the partial melting layers in the upper crust: evidence from active hydrothermal fluid in the south Tibet[J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(1): 68 - 77. (in Chinese with English abstract) ]
- [18] 白嘉启, 梅琳, 杨美伶. 青藏高原地热资源与地壳热结构[J]. 地质力学学报, 2006, 12(3): 354 - 362. [ BAI Jiaqi, MEI Lin, YANG Meiling. Geothermal resources and crustal thermal structure of the Qinghai-Tibet plateau[J]. Journal of Geomechanics, 2006, 12(3): 354 - 362. (in Chinese with English abstract) ]
- [19] 刘美, 白登海, 肖鹏飞. 青藏高原东部岩石圈电性结构特征及其构造意义[J]. 地震地质, 2010, 32(1): 51 - 58. [ LIU Mei, BAI Denghai, XIAO Pengfei. The electrical conductivity structure of the eastern Tibetan Plateau and its tectonic implications[J]. Seismology and Geology, 2010, 32(1): 51 - 58. (in Chinese with English abstract) ]
- [20] 王生仁, 张晓宇, 杜世回, 等. 川藏铁路拉月隧道穿越东构造结地温分布特征及预测[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(1): 100 - 107. [ WANG Shengren, ZHANG Xiaoyu, DU Shihui, et al. Geothermal distribution characteristics and prediction of Layue tunnel of Sichuan-Tibet Railway passing through east syntaxis[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(1): 100 - 107. (in Chinese with English abstract) ]
- [21] 李苍松, 李强, 史永跃, 等. 关于川藏铁路隧道施工地下水环境保护的认识和建议[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(增刊1): 24 - 33. [ LI Cangsong, LI Qiang, SHI Yongyue, et al. Understanding and suggestions on groundwater environmental protection in Sichuan-Tibet Railway tunnel construction[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(Sup1): 24 - 33. (in Chinese with English abstract) ]
- [22] 刘金刚. 基于生态环境保护的隧道排水控制研究[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(3): 61 - 66. [ LIU Jingang. Research on tunnel drainage control based on ecological environment protection[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(3): 61 - 66. (in Chinese with English abstract) ]
- [23] 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, 33(2): 340 - 351. [ HOU Zengqian, MO Xuanxue, YANG Zhiming, et al. Metallogenesis in the collisional orogen of the Qinghai-Tibet Plateau: Tectonic setting, tempo-spatial distribution and ore deposit types[J]. Geology in China, 2006, 33(2): 340 - 351. (in Chinese with English abstract) ]
- [24] 张彧齐, 周训, 刘海生, 等. 云南兰坪—思茅盆地红层中温泉和盐泉的水文地质特征[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(3): 40 - 48. [ ZHANG Yuqi, ZHOU Xun, LIU Haisheng, et al. Hydrogeological characteristics of the hot springs and salty springs occurring in the redbeds in the Lanping-Simao Basin of Yunnan[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(3): 40 - 48. (in Chinese with English abstract) ]
- [25] QI J H, LI X, XU M, et al. Origin of saline springs in Yanjing, Tibet: Hydrochemical and isotopic characteristics[J]. Applied Geochemistry, 2018, 96: 164 - 176.
- [26] 杨艳娜. 西南山区岩溶隧道涌突水灾害危险性评价系统研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2009. [ YANG Yanna. Research of karst tunnel water bursting hazard risk assessment system in the southwest mountainous area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2009. (in Chinese with English abstract) ]
- [27] 中国中铁二院工程集团有限责任公司, 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室. 高铁隧道外水压力多尺度集成分析及应用研究[R]. 2018. [ China Railway Eryuan Engineering Group Co, Ltd, State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology. Multi-scale integrated analysis and application of external water pressure of tunnel of high-speed railway tunnels[R]. 2018. (in Chinese) ]

编辑: 张若琳