

文章编号: 1674—8247(2020)05—0008—05

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2020.05.002

## 复杂艰险山区地质灾害特征及减灾选线研究

宋章 魏永幸 王朋 张广泽 蒋良文

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘要:**随着西部铁路路网规划及建设的加速,地质灾害已成为铁路建设、运营中不可绕避及忽视的工程地质问题;复杂艰险山区受内外动力地质作用强烈,具有大高差地形地势、复杂活跃的构造运动、破碎的地层岩性及高地应力等特征,其地质灾害类型多、分布广。本文针对复杂艰险山区地质灾害类型,在分析其特征的基础上,探讨了地质灾害对铁路的影响,进而研究减灾选线的原则,以期为工程建设服务。主要结论有:(1)复杂艰险山区主要发育有崩滑泥石流等重力不良地质、岩溶涌水突泥、地震震裂及次生灾害、沟谷型灾害链、高地应力、高温热水、有害气体、活动断裂等地质灾害;(2)地质灾害受内外动力地质作用耦合的影响,具有复杂性、隐蔽性、随机性等特点,难以完全查明;(3)因高速度目标值及高舒适性的需求,铁路工程选线在深度的剖面上及广度的平面上难以完全绕避,地质灾害对铁路工程建设和运营安全有较大影响;(4)铁路工程选线应树立减灾选线的理念,重视地质灾害的早期识别和风险规避与防控,从源头上规避和减轻地质灾害对铁路的影响。

**关键词:**复杂山区; 地质灾害; 减灾选线; 工程特性

中图分类号:P642

文献标志码:A

8

## Research on Geological Disaster Characteristics and Location for Disaster Reduction in Complex and Dangerous Mountainous Areas

SONG Zhang WEI Yongxing WANG Peng ZHANG Guangze JIANG Liangwen

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** With the acceleration of the planning and construction of the western railway network, geological disasters have become engineering geological problems that cannot be avoided and ignored in railway construction and operation. Complex and dangerous mountain areas are strongly affected by internal and external dynamic geological actions, with the characteristics of large elevation difference topography, complex and active tectonic movements, broken strata lithology and high ground stress. There are many types of geological disasters widely distributed in areas. According to the types of geological disasters in complex and dangerous mountainous areas, based on the analysis of their characteristics, the influence of geological disasters on railways is discussed, and then the principles of location for disaster reduction are researched for the construction in the paper. The main conclusions are as follows: (1) There are mainly geological disasters such as unfavorable gravity geology (landslide and debris flow), karst water and mud gushing, earthquake cracking and secondary disasters, valley-type disaster chain, high ground stress, high-temperature-hot-water, harmful gases and active faults. (2) Geological disasters are affected by the coupling of internal and external

收稿日期:2019-08-27

作者简介:宋章(1977-),男,教授级高级工程师。

基金项目:中国铁路总公司科技研究开发计划项目(2018BX07, P2018G047, P2018G045)

引文格式:宋章,魏永幸,王朋,等.复杂艰险山区地质灾害特征及减灾选线研究[J].高速铁路技术,2020,11(5):8-12.

SONG Zhang, WEI Yongxing, WANG Peng, et al. Research on Geological Disaster Characteristics and Location for Disaster Reduction in Complex and Dangerous Mountainous Areas [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(5):8-12.

dynamic geological actions and are characterized by complexity, concealment and randomness, so they are difficult to be completely identified. (3) Due to the high-speed target value and high comfort demand, it is difficult to completely avoid the disasters for the railway location in the depth profile and the breadth plane, so geological disasters have a great impact on the railway project construction and operation safety. (4) For the railway location, the concept of location for disaster reduction shall be established, the early identification of geological disasters and risk avoidance and prevention & control shall be considered, and the impact of geological disasters on the railway shall be avoided and mitigated from the source.

**Key words:** complex mountainous area; geological disasters; location for disaster reduction; project characteristics

受印度板块向欧亚板块俯冲及青藏高原向南东强烈挤压的耦合作用,我国西部复杂艰险山区地势跌宕起伏、高差大,构造活动强烈、地震频繁,断裂褶曲发育、岩体破碎,内外动力地质作用复杂、灾害频发<sup>[1-3]</sup>。山区重大重力不良地质<sup>[4]</sup>,如崩滑泥石流、岩溶涌突水泥、深大活动断裂、高地应力、地震及其引发的次生灾害等给铁路工程地质选线、桥位及站场选址、工程建设、运营维护等带来了巨大挑战。随着西部铁路建设的加速,如何从早期的“地形选线”、“地质选线”向快速实现灾害早期判识和加强灾害风险规避与防控的“减灾选线”、“智慧选线”迈进<sup>[5]</sup>,关注全寿命周期的工程与运营安全变得极为重要。本文在分析复杂艰险山区灾害分布及特征的基础上,阐述地质灾害对铁路减灾选线的影响,进而研究工程地质选线原则,以期为工程建设服务。

## 1 复杂艰险山区重大地质灾害特征

复杂艰险山区往往具有大高差的地貌特征,为重力不良地质灾害的产生和发展提供了巨大的势能条件;地质构造复杂,断裂褶曲发育,地震频发,内外动力地质作用强烈,为重力不良地质的产生和发展提供了动能条件,且进一步强化了构造应力场,为高温热害、有害气体的存储和运移提供了良好的通道条件;加之干湿交替频繁变化的气候条件,进一步加剧了重力不良地质的发生发展。

### 1.1 重力地质作用下的崩塌、滑坡、泥石流灾害

首先,西部复杂艰险山区地质构造复杂,新构造运动强烈,节理裂隙发育,岩体破碎,为斜坡重力不良地质如崩塌、滑坡、泥石流等的产生提供了良好的物源基础;其次,区内地形陡峻,地势高差大,为重力不良地质如崩塌、滑坡、泥石流等的发生和发展提供了巨大的势能条件;再者降雨、地震及人类活动等内外动力因素的影响,加剧了重力不良地质的产生,加速了其发生和发展的过程。

西南山区重力不良地质数量多、规模大、分布广泛且难于防治,尤其是川藏、滇藏等高海拔、大高差地区,

其高位远程崩塌、滑坡、泥石流等重力不良地质,隐蔽性强,危害巨大,已成为西南山区铁路选线的重点和难点。

### 1.2 岩溶山区隧道施工突水、突泥、地表失水灾害

据统计,我国岩溶总面积约363万 $\text{km}^2$ ,占国土面积的1/3以上,主要分布于我国西南山区,西南地区云、贵、川、桂、渝及中南地区湘、鄂、粤等地的裸露型岩溶面积约75.64万 $\text{km}^2$ <sup>[6]</sup>。其境内气候湿润,雨水充沛,岩溶极为发育,且类型之多,堪称世界之最,主要有岩溶盆地、岩溶洼地、岩溶槽谷、岩溶丘陵、峰林、峰丛、盲谷、漏斗、落水洞、岩溶(准)平原、岩溶高原、溶沟、石芽等。岩溶地质问题已成为西南铁路建设中最突出的工程地质问题之一。

与浅埋隧道相比,深埋长大隧道因其复杂的水文地质单元、充足的水源补给量、高水头压力等特征,潜在的风险因素较多,更易发生涌水、突泥等风险事故。我国西南地区隧道岩溶段曾多次发生涌水、突泥,如川黔铁路凉风垭、娄山关隧道,贵昆铁路梅花山、梅子关、裸纳隧道,成昆铁路沙马拉达隧道,襄渝铁路中梁山、大巴山隧道,盘西铁路胜境关隧道,南昆线新桥、砂锅寨2号隧道,株六复线大竹林、花苗隧道,水柏铁路何家寨、红梁子、新寨2号隧道,遂渝铁路荆竹岭、桐子林隧道,渝怀铁路圆梁山、武隆、彭水隧道等,施工中都曾发生过较大规模的涌水、突泥,造成了重大损失。隧道施工发生岩溶涌水、突泥时,常伴随地表水或地下水漏失,如襄渝铁路中梁山隧道,施工期间多次发生涌水、突泥并伴随地表及地下水漏失,部分井泉干枯,导致当地农田灌溉、居民用水困难,且诱发多处地面塌陷。

### 1.3 高烈度地震山区工程震害及地震引发的次生地质灾害

我国是一个地震多发的国家,历史上曾多次发生较大地震,尤其在西南山区,新中国成立以来,7.0级及以上的地震事件主要有1950年“8.15西藏墨脱8.6级地震”、1988年“11.6云南澜沧7.6级”、“耿马7.2级地震”、2001年“11.14昆仑山8.1级地震”、2008年“5.12四川汶川8.0级地震”、2010年“4.14

青海玉树7.1级地震”、2013年“4.20芦山7.0级地震”及2017年“8.8九寨沟7.0级地震”等,均造成了极为惨重的损失。地震震害主要体现在两方面,一是对工程的震害,如损毁房屋建筑、桥梁、隧道、路基等;二是地震诱发的系列次生地质灾害,如崩塌、滑坡、泥石流等山地灾害。据研究<sup>[7-9]</sup>,山区地震次生地质灾害具有沿主震断裂带和河流、沟谷成带状分布的特点,其规模大、数量多、密度高、类型复杂、损失惨重,是改变山河地貌的主控因素。

#### 1.4 高山峡谷区沟谷型灾害链

在强震、降雨等因素的影响下,高山峡谷区沟谷型灾害,尤其是高海拔、大高差沟谷型高位滑坡-堵江-溃决、高位崩塌-泥石流-堵江-溃决等灾害时有发生,造成重大人员伤亡、构筑物破坏及巨大的财产损失。历史上较著名的有:1933年8月15日,叠溪7.5级地震造成岷江两岸多处高位山体崩塌,形成山崩堵江-水位上涨-坝体溃决-洪流-冲毁灾害链事件,导致叠溪古镇被掩埋于岷江,形成的洪流灾害冲毁岷江下游至成都平原100多公里的道路桥梁及沿岸房屋等,死伤2000余人;1953年7月8日,古乡沟受墨脱8.6级地震、冰川消融、雪崩、强降雨等影响,形成崩塌-堵沟-堰塞湖-溃决-特大型泥石流-冲毁灾害链事件,形成的碎屑流倾泻而下,瞬间吞噬了140余人的生命,造成川藏公路断道,堵塞帕隆藏布并形成如今的古乡湖;2000年4月9日,西藏易贡藏布在冰川消融、强降雨等条件下,形成高位崩塌滑动-碎屑流-土石水气浪-特大型泥石流-堵江-堰塞湖-溃决灾害链事件,形成的巨大洪流席卷了下游几百公里沿岸的道路桥梁和城镇,亦给下游的印度带来了巨大损失;2013年7月22日,汶川草坡受5.12汶川8.0级地震及多年降雨等因素影响,产生了高位山体滑坡,紧急转移250余人,造成巨大损失;2017年6月24日,茂县叠溪镇新磨村受5.12汶川8.0级地震、余震及多年降雨等因素影响,产生了高位远程崩塌滑坡-堵江灾害链事件,造成10人遇难、93人失联、3人受伤的巨大大人员伤亡;2018年10月11日,金沙江白格高速滑坡-堵江-堰塞湖,由于应急处置及时得当,对下游造成影响较小,但11月3日发生第二次滑坡,堵塞了原来的过水通道,形成超大型堰塞湖,处置过程中超高位水流倾泻而下,冲垮了松散坝体,巨大的洪流给下游几百公里沿江两岸带来了巨大的财产损失;2018年10月17日,雅鲁藏布江米林附近的色东普沟受11.18米林6.9级地震、冰雪融水及重力侵蚀等影响,形成冰碛物高速崩滑-泥石流-堵江-堰塞湖-溃决灾害链事件,亦给沿江两岸及上、下游造成了重大损失。

#### 1.5 高地应力环境隧道岩爆大变形灾害

西南复杂艰险山区构造环境复杂,具有深大活动断裂发育、地震活动频发、新构造运动强烈等构造特征,地应力场尤其是构造应力场复杂多变。高地应力环境下隧道开挖硬岩岩爆及软岩大变形灾害问题较为突出,是西南山区铁路工程建设中不可回避的工程地质问题之一。近年来,随着西南山区铁路建设的加速,工程建设中岩爆和大变形问题越来越突出,如在建的川藏拉林段、成兰、丽香、大瑞、玉磨、郑万、成昆等铁路在隧道开挖和支护过程中均出现了不同程度的硬岩岩爆和软岩大变形问题。硬岩岩爆主要表现为开挖后1~7d的即时型岩爆和开挖后7~30d甚至更长时间的时滞型岩爆<sup>[10]</sup>;软岩大变形因其成因机制复杂,呈现形式各异,主要表现为构造应力挤压型、构造岩体碎裂松散型、顺层偏压型、膨胀型、结构群洞型及施工因素型等大变形。还有岩爆和大变形同时出现现象,如川藏铁路拉林段巴玉隧道和成昆铁路的保安营隧道,岩爆和大变形共生,或可称之为岩爆型大变形。

#### 1.6 高地温热水灾害

我国西南山区处于印度板块与欧亚板块碰撞而隆升的青藏高原东、南部及其边缘地带,属于地中海-喜马拉雅地热带范围,区内地质构造复杂,岩浆活动频繁,变质作用强烈,岩类繁杂多变。地热往往受控于褶皱、活动断裂及深大断裂,呈带状展布。地热成因类型总体可划分为褶皱断裂型和岩浆活动型两类。随着西南山区铁路隧道建设向山体纵深发展,高地温及热水活动已成为铁路选线和工程建设的拦路虎之一,如大瑞铁路的高黎贡山隧道、川藏铁路的折多山隧道、海子山隧道等的地热选线问题及川藏铁路拉林段桑珠岭隧道89.9°高岩温隧道的建设问题等。高温热水灾害不仅影响施工安全及工期,亦对运营安全、耐温及防腐蚀性材料提出了更高的要求。

#### 1.7 有害气体灾害

铁路工程呈线状展布,当穿越煤系地层、深大断裂带、岩浆岩分布区等区域时,往往会遇到一氧化碳、硫化氢等瓦斯有害气体,这也是复杂艰险山区铁路建设无法完全绕避的地质灾害问题。有害气体按其产生成因大致可以分为煤系气、构造气和非煤瓦斯三类。(1)煤系气即煤系地层、含炭质地层中往往高瓦斯聚集,如不按规范严格施工及防护,极易产生爆炸事故,如成贵铁路七扇岩隧道因煤系地层瓦斯爆炸造成12人死亡;(2)构造气即深大断裂因其剖面上发育的深度深、平面上发育的广度延伸具有区域性,往往把深部有害气体或断层穿越远处煤系地层、含沥青地层等所含瓦斯气体随水导入隧道区,随着隧道开挖压力的

降低,溶解于水的有害气体释放出来,造成瓦斯聚集对施工和运营产生较大影响,如成兰铁路跃龙门隧道硫化氢气体就属于此类型;(3)非煤瓦斯即当隧道穿越岩浆岩发育区时,由于岩浆岩冷却时,局部有害气体无法排出而形成高浓度、高压气包裹体埋藏于地下,当隧道穿越此包裹体时,高浓度、高压有害气体瞬间释放而产生爆炸,对施工人员和机具产生较大的危害,如云南大临铁路红豆山隧道非煤瓦斯爆炸造成6人死亡,此类有害气体难于勘测,具有不可预测性,危害较大。

### 1.8 活动构造灾害

受印度板块和亚欧板块碰撞的影响,我国西部山区新构造运动强烈,深大活动断裂及活动褶皱发育,是西部复杂山区铁路建设中不可绕避的工程地质问题。活动构造按其运动特性大致可分为粘滑构造和蠕滑构造。龙门山断裂为粘滑构造,一定时期内无法探知其运动特征,但当构造应力聚集大于岩体强度时,能量骤然释放,产生地震破坏;鲜水河断裂为蠕滑构造,每年产生一定量的竖向和水平方面的位移,构造应力逐渐增大,当应力大于岩体强度时亦产生地震破坏。

## 2 对铁路选线的影响及减灾选线原则

### 2.1 重力不良地质减灾选线

重力不良地质如崩塌、滑坡、泥石流等,已成为山区选线的重点和难点,往往控制着线路的走向及重大控制性工程(如跨沟跨河桥梁、站场、隧道进出口等)的设置。针对重大崩滑流地质灾害分布的高山峡谷地段,铁路减灾选线应在查明崩滑流灾害分布的基础上,以傍山隧道长隧短打的方案加以绕避,或通过沟谷两岸地质比选加以绕避。

### 2.2 岩溶减灾选线

岩溶发育具有高度不均一性、隐蔽性、随机性、复杂性等特点,平面上完全绕避岩溶发育区、剖面上完全绕避深部岩溶发育带极其困难。岩溶对隧道的影响主要表现为高压涌突水泥问题,对路基的影响主要表现为隐伏岩溶的塌陷问题,因此岩溶灾害仍是西南铁路工程建设中的难题。针对岩溶灾害,铁路减灾选线应在尽最大可能查明岩溶的空间分布形态及发育规律的基础上,遵循“先绕避、短通过、抬高程、傍河边、靠既隧、顺坡排、浅覆盖、防崩滑”的减灾选线原则<sup>[11]</sup>。

### 2.3 高烈度地震减灾选线

地震引发的震裂及次生地质灾害,具有不可预见性、灾害规模大、破坏力强、类型和数量多等特点。通过对汶川“5.12”地震、芦山“4.20”地震等的调查分析,发现地震引发的次生地质灾害对铁路的影响远甚于工程本身,尤其是对傍山工程和傍河明线工程的影

响极大。铁路减灾选线应遵循“抗震、隔震、减震”设防措施原则,在查明区域地震发生情况及震害烈度的条件下,工程尽可能选择地震远场区,避免布设于地震波入射方向<sup>[12]</sup>。

### 2.4 沟谷灾害链减灾选线

高山峡谷区沟谷型灾害链因其灾害的多种性和复杂性,具有规模大、破坏力强、难于预测和预防等特点,对山区铁路选线及工程设置影响较大。铁路减灾选线应遵循“拔高程、高墩大跨越”的选线原则,首先应进行流域潜在灾害风险的判识、边坡稳定性评价,重视铁路跨江、跨河的工程地质条件和桥梁高度、基础设置及基础抗冲刷能力等;其次应预防上游沟谷崩滑泥石流堵江—溃坝后倾泻而下的洪水夹裹沿线泥石流对下游岸坡、基础的冲刷破坏。

### 2.5 高地应力减灾选线

高应力作用下的硬岩岩爆和软岩大变形,已成为复杂艰险山区铁路建设中的普遍性难题,因其成因机制的复杂性,目前的勘察技术还不能做到完全的预测和预防。高地应力在施工阶段主要表现为破坏支护结构、造成人员伤亡,在后期运营阶段主要表现为造成隧道隆起、导致结构破坏。针对高地应力灾害,铁路减灾选线应在查明区域地应力场特性的基础上,考虑工程开挖二次应力场的影响,选择与主应力方向大角度相交、短距离、快速穿越高构造应力区,在工程设计和施工中,应遵循“放抗相宜、强支强护”的原则。

### 2.6 地热减灾选线

随着复杂艰险山区铁路建设的加速,地热已成为铁路建设中不能完全绕避的工程地质问题之一。针对高温热害灾害,铁路减灾选线应在查明区域地热分布特性、地热成因机制的基础上,综合考虑工程选型、可行性、经济性、安全性等因素,无法绕避时,选择地热分布低温走廊通过。

### 2.7 有害气体减灾选线

煤系地层、深大断裂构造气及非煤系地层气等有害气体为近年来铁路工程建设中遭遇较多的工程地质问题,对隧道施工建设安全及工期影响较大。针对有害气体,铁路减灾选线应在查明有害气体分布范围、有害气体类型、浓度等的基础上,评价其对工程的影响,选择在有害气体含量较少、浓度较低的部位,以短距离、快速穿越。同时,施工中遵循“超前地质预报先行、强通风、勤检测、强监测”的施工组织原则。

### 2.8 活动构造减灾选线

活动构造亦是铁路建设中不可忽视的重大工程地质问题,往往控制着铁路线路的走向和重大工程(如桥梁、车站等)的设置。针对活动构造,铁路减灾选线

应在查明构造活动位置、活动方向、活动速率、活动频率等活动特性的基础上,遵循“或绕避、或于断裂被动盘(下盘)展线、或简单工程大角度快速穿越”的选线原则。

### 3 结束语

随着西部铁路路网规划及建设的加速,地质灾害已成为复杂艰险山区不可绕避和忽视的工程地质问题。减轻地质灾害对铁路工程的影响,应在综合考虑工程可行性、工程安全性、经济性等因素的基础上,从工程选线、设计、施工等方面出发,加强减灾选线和工程的防控对策。首先,铁路选线应树立减灾选线理念,重视地质灾害的早期识别和判示,并在此基础上,做好规避灾害、减轻灾害的线路方案研究,从源头上减轻地质灾害对铁路建设及运营的影响;其次,工程设计应充分考虑工程全寿命周期内结构的可靠性、耐久性和坚固性,确保工程质量;最后,施工阶段应加强施工组织设计、超前地质预报、施工地质等工作,预防地质灾害对工程建设的影响,按蓝图施工,确保质量。

### 参考文献:

- [1] 朱颖. 复杂艰险山区铁路选线与总体设计论文集[M]. 北京:中国铁道出版社,2010.  
ZHU Ying. Symposium of Railway Alignment and System Design in Complicated Mountain Area[M]. Beijing:China Railway Publishing House, 2010.
- [2] 朱颖,魏永幸. 复杂艰险山区铁路地质灾害风险与减灾选线策略[J]. 高速铁路技术,2018,9(2):1-4.  
ZHU Ying, WEI Yongxing. Geological Hazard Risk and Disaster Reduction Strategy of Route Selection in Complex Dangerous Mountain Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(2):1-4.
- [3] 魏永幸,岳志勤,李光辉. 复杂艰险山区地质灾害识别与铁路减灾选线[J]. 高速铁路技术,2019,10(3):1-5.  
WEI Yongxing, YUE Zhiqin, LI Guanghui. Identification of Geological Hazards and Disaster Reduction Techniques of Railway Route Selection in Complex Dangerous Mountain Area[J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(3):1-5.
- [4] 张广泽,蒋良文,宋章,等. 横断山区川藏线山地灾害和地质选线原则研究[J]. 铁道工程学报,2016,33(2):21-24.  
ZHANG Guangze, JIANG Liangwen, SONG Zhang, et al. Research on the Mountain Disaster and Geological Alignment Fundamental of Sichuan-Tibet Railway Running through N-S Mountain Area[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(2):21-24.
- [5] 朱颖,魏永幸. 复杂艰险山区铁路减灾选线[J]. 高速铁路技术,2018,9(6):1-4.  
ZHU Ying, WEI Yongxing. Disaster Reduction Techniques for Route Selection of Railway in Complex and Dangerous Mountain[J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(6):1-4.
- [6] 中铁二院工程集团有限责任公司. 岩溶勘察技术报告[R]. 成都:中铁二院工程集团有限责任公司,2009.  
China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Report of Karst Exploitation Technique [R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2009.
- [7] 黄润秋. 汶川地震地质灾害后效应分析[J]. 工程地质学报,2011,19(2):145-151.  
HUANG Runqiu. After Effect of Geohazards Induced by the Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(2):145-151.
- [8] 程强. 汶川地震崩塌灾害影响因素分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2011,22(3):1-6.  
CHENG Qiang. Analysis of the Influence Factors of the Landslides and Rock Falls Induced by the Wenchuan Earthquake[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, 22(3):1-6.
- [9] 鄢毅,王军,李鸿雁. 汶川地震区地质灾害特征及生成过程探讨[J]. 中国地质灾害与防治学报,2009,20(2):143-144.  
YAN Yi, WANG Jun, LI Hongyan. Characteristics of Geological Hazards and Development in Wenchuan-earthquake-stricken Areas[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2009, 20(2):143-144.
- [10] 冯夏庭,陈炳瑞,明华军,等. 深埋隧洞岩爆孕育规律与机制:即时型岩爆[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(3):433-444.  
FENG Xiating, CHEN Bingrui, MING Huajun, et al. Evolution Law and Mechanism of Rockbursts in Deep Tunnels: Immediate Rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3):433-444.
- [11] 中铁二院工程集团有限责任公司. 高速铁路复杂岩溶勘察成套技术及应用[R]. 成都:中铁二院工程集团有限责任公司,2018.  
China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Complete Technology of Complex Karst Survey and Its Application of High-speed Railway [R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2018.
- [12] 邱燕玲,姚令侃,朱颖,等. 高烈度地震山区铁路减灾选线技术[J]. 西南交通大学学报,2014,49(6):972-980.  
QIU Yanling, YAO Lingkan, ZHU Ying, et al. Disaster Reduction Techniques of Railway Route Selection in Mountainous Regions with High Earthquake Intensity [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(6):972-980.