

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.05.17

滇中香炉山引水隧洞工程区地应力场特征 及断裂影响模糊综合评价

付平, 张新辉, 刘元坤, 尹健民, 徐春敏

(长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘要: 在滇中香炉山引水隧洞工程区活动断裂部位开展了八个钻孔的水压致裂原地应力测试工作。结果显示工程区应力状态以水平应力为主导, 龙蟠-乔后断裂和丽江-剑川断裂部位均为走滑应力状态, 鹤庆-洱源断裂西支为走滑应力状态, 南段为逆冲应力状态。从应力累积的角度分析, 测深范围内三条活动断裂大部分测点实测最大主应力值未超过使断层产生滑动失稳的临界值。地应力测试获得的最大主应力优势方位 NNE-NE 向与利用该地区震源机制解反演得到的现今构造应力场主压应力方位 NEE 向存在差异, 说明地应力测试结果在一定程度上受到了断层活动性的影响。考虑活动断裂变形和力学属性的多个指标参数, 对活动断裂影响程度的 Fuzzy-Grey 模糊综合评价表明龙蟠-乔后断裂对香炉山隧洞工程的影响较弱, 丽江-剑川断裂的影响程度最强, 需引起重视。

关键词: 地应力; 活动断裂; 应力累积; 稳定性; Fuzzy-Grey 综合评价

中图分类号: P642

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)05-0123-10

Characteristics of in-situ stress field and fuzzy comprehensive evaluation of the influence of active faults on the water diversion engineering of Xianglushan Tunnel Area in central Yunnan

FU Ping, ZHANG Xinhui, LIU Yuankun, YIN Jianmin, XU Chunmin

(Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources,
Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei 430010, China)

Abstract: In-situ stress testing of eight boreholes by hydraulic fracturing was carried out at the active fault zone of Xianglushan Tunnel engineering area of water diversion project in central Yunnan. The results show that the horizontal tectonic stress plays a dominant role in engineering area. The stress regimes in Longpan-Qiaohou Fault and Lijiang-Jianchuan Fault area are of strike-slip faulting. The stress regimes in west branch and south segment of Heqing-Eryuan Fault area are strike-slip and reverse faulting, respectively. From the standpoint of stress accumulation, the measured maximum principal stresses at most test points of the three active faults within the detection range do not exceed the thresholds that cause the slipping instability of the fault. There is a difference between the dominant direction NNE-NE of the measured maximum horizontal principal stresses obtained by in-situ stress test and the NEE direction of the principal compressive stress of the current tectonic stress field obtained from the inversion of focal mechanism in this area, indicating that the measured in-situ

收稿日期: 2020-01-20; 修订日期: 2020-03-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0401803); 国家自然科学基金项目(51879014)

第一作者: 付平(1989-), 男, 河南信阳人, 博士, 高级工程师, 主要从事地应力理论与测试技术、计算岩石力学方面的研究工作。

E-mail: fuping@mail.crsri.cn

通讯作者: 尹健民(1963-), 男, 四川南充人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事地质工程和岩土工程方面的研究工作。E-mail:

yinjm163@163.com

stresses have been influenced to a certain extent by fault activities. Taking account of multiple index parameters of active fault deformation and mechanical properties, the Fuzzy-Grey comprehensive evaluation of the influence of active faults shows that the influence of Longpan-Qiaohou fault on tunnel engineering is weak and Lijiang-Jianchuan Fault is the strongest, which should arouse more attention.

Keywords: in-situ stress; active fault; stress accumulation; stability; Fuzzy-Grey comprehensive evaluation

0 引言

地应力是地质构造运动和岩体自重等共同作用的结果,是进行地质环境和区域稳定性评价、地下工程设计与施工要考虑的重要因素。地应力的分布十分复杂,局部应力和区域应力之间可能存在相当大的差别,这种差别的主要原因之一是不同尺度的断裂构造发育^[1]。西南地区的滇中引水、川藏铁路等国家十三五重点工程项目位于印度板块与欧亚板块中国大陆碰撞带东缘。区域内有较大规模和深度的活动断裂发育,构造环境极为复杂,地震活动强烈而频繁,不少隧道不可避免地跨越不同的地质构造单元与不同尺度的活动断裂。开展活动断裂区的地应力赋存状态研究,对预测深埋隧洞开挖过程中的岩爆及大变形等工程地质灾害具有重要的实际意义,分析断裂活动对隧洞工程的影响程度,对场地稳定性和抗错断支护设计亦有参考和指导价值。

活动断裂区域地应力场的研究方法主要包括原地应力测量、震源机制解反演和数值模拟等。安其美^[2]、CHOI^[3]、PHAM^[4]等通过在典型断裂发育地区开展地应力测试工作,研究地应力的赋存状态及分布特征,指出断裂构造和岩层的非均质性是造成区域地应力场分异化的主要原因;郭啟良^[5]、陈群策^[6]、丰成君^[7]、WU^[8]等根据断裂带部位震前和震后的地应力实测数据,研究构造应力场的变化与调整;LI等^[9-10]利用我国华北地区的震源机制解及109~970 m深度范围内的原地应力实测数据,依据库伦摩擦准则分析了应力累积对断裂活动的激发作用;BAOUCHE等^[11]基于钻井诱发裂缝法地应力测试结果,通过应力多边形推算了断裂运动趋势;苏生瑞等^[12]通过多条活动断裂组成的断裂系统附近的地应力分布规律研究了活动断裂与地应力场相互作用;陈化然^[13]、陈连旺^[14]、YIN^[15]等借助有限元等数值计算方法并结合地质背景资料进行地球动力学模拟,分析了活动断裂区域应力场特征。

滇中引水工程大理I段香炉山隧洞全长62.6 km,埋深大于600 m洞段累计42.2 km,占比

67%,埋深大于1 000 m洞段累计21.4 km,占比34%,最大埋深约1 450 m,属典型深埋长隧洞,为滇中引水控制性重点难点工程。2010年至2016年,笔者所在团队先后在该隧洞隧址区断裂带区域完成了8个深钻孔的水压致裂法地应力测试工作,钻孔深度在245~950 m,共计获得了89个测段的有效地应力测试数据和其中20个测段的破裂缝方位印模结果。本文基于上述8个钻孔的原地应力测试资料,结合已有研究成果,揭示该地区现今地应力场的分布特征,依据滑动摩擦准则探讨活动断裂的稳定性,并全面考虑多类因素进行活动断裂对工程影响性的综合评价。

1 研究区地质构造背景

滇中引水工程大部分路段位于川滇菱形块体的中南部,现今该块体主要受如图1所示的三方面构造作用:一是青藏高原向东推移受阻于川黔地块与华南地块,使川滇菱形块体整体向南南东方向挤出和侧向滑移;二是印支板块对川滇块体东北向的挤压,最终作用于云南西部;三是受到来自华南地块北西-北北西向力的作用。菱形块体被小金河-丽江-剑川断裂带划分为川西北块体和滇中块体,香炉山隧洞跨越这两个块体,大部分洞段位于丽江台缘褶皱带,新构造运动活跃,区域构造稳定性总体较差。隧址区褶皱和断裂构造发育,起主要控制作用的断褶构造主要为北北东-北东向、近东西向和少量近南北向,其中龙蟠-乔后断裂、丽江-剑川断裂和鹤庆-洱源断裂为全新世活动断裂,与香炉山隧洞直接相交。

地应力测孔基本位于上述三条活动断裂部位或附近,测孔位置与断裂展布如图2所示。各断裂主要性质如下:(1)龙蟠-乔后断裂^[16]走向NNE,倾向NW,倾角约60°,沿断裂发育龙蟠、九河、剑川、沙溪、乔后等一系列第四纪小盆地,说明该断裂现今具有较强活动性,全新世以来表现为左旋走滑运动;(2)丽江-剑川断裂^[17]走向NE,倾向NW,倾角60°~80°,晚更新世以来表现出明显的左旋走滑运动;(3)鹤庆-洱源断裂^[18]走向NE,倾向SE或NW,由北西支和南东支两条左阶羽状次级断裂组成,于鹤庆盆地南段蝙蝠洞一

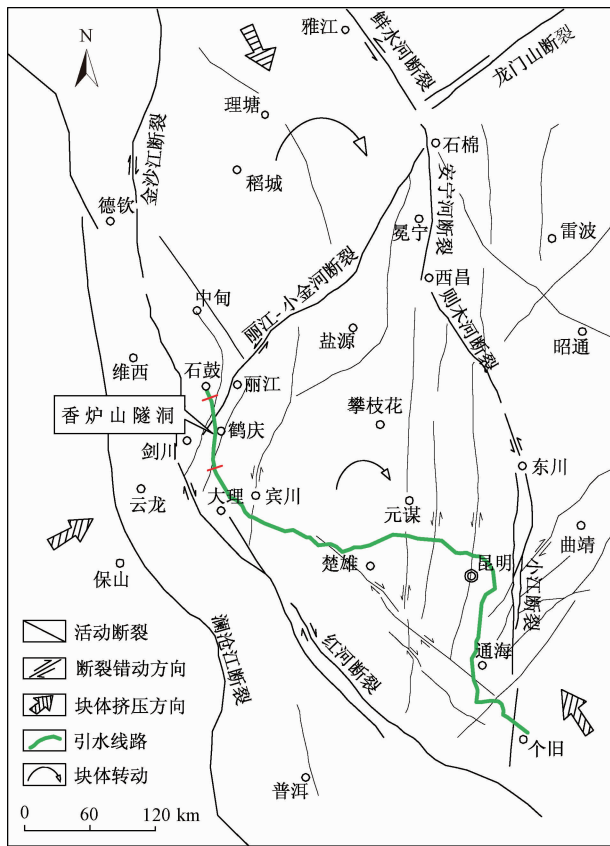


图 1 滇中引水工程沿线构造格架图

Fig.1 Tectonic framework of the water diversion lines area of central Yunnan

带交汇后向南继续延伸止于洱源盆地,晚更新世以来东西支具有左旋走滑性质,南段具逆冲性质。三条断裂都是中强地震活动带,历史上均发生过 6 级以上地震。

2 研究区原地应力测试与结果分析

2.1 测试与分析方法

所用地应力数据均由水压致裂法测试得到,该方法的原理是通过分析水力诱发裂缝的张开和关闭压力来确定主应力大小,记录诱发裂缝的方位来确定垂直于钻孔轴的平面内主应力方向^[19]。针对香炉山隧洞工程区断裂褶皱发育、软硬岩层相间的复杂地质条件,笔者所在团队研发了绳索取心钻杆双回路水压致裂测试系统,通过植入钻杆内部的两条高压软管与地面高压泵连接,实现双回路加压试验。钻杆不承压,减少钻杆因膨胀变形而滑脱的风险,同时利用钻杆对孔壁的保护,解决了软弱岩层中欠稳定深孔的地应力测试难题。此外,对于低水位钻孔,采用高压气体坐封,保证了测试工作的快速连续性。

进行水压致裂测试前,须对钻孔进行检查,包括钻

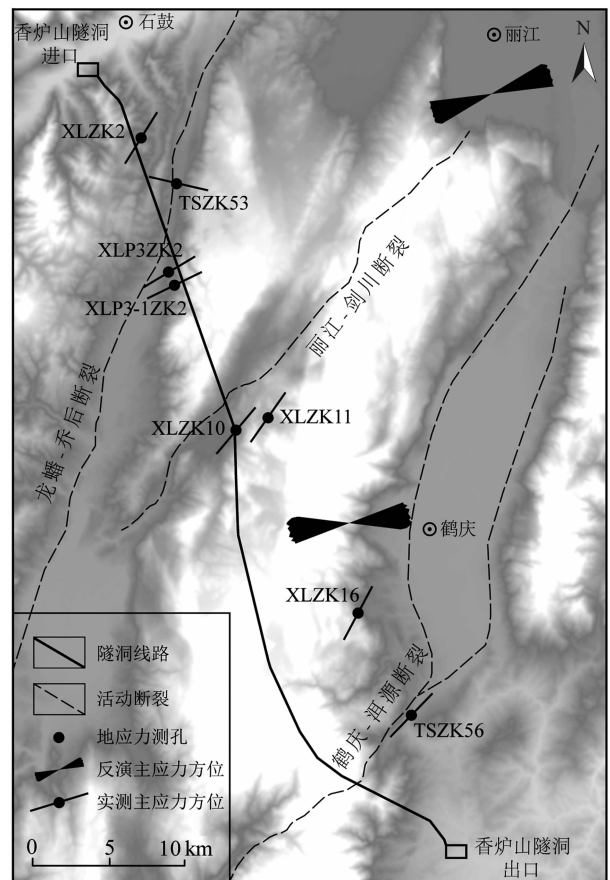


图 2 香炉山隧洞工程区主要断裂及地应力测试钻孔布置图

Fig.2 Schematic of main active faults and test boreholes location of the Xianglushan tunnel area

孔斜度、岩心获得率、透水率等,并根据工程实际需要选择合适的压裂试验段。现场测试主要分为以下步骤:(1)坐封:通过钻杆将两个可膨胀橡胶封隔器下放到选定的压裂段,加压使其膨胀并坐封于孔壁上,在中间形成承压段;(2)加压致裂:通过钻杆内高压软管,用液压泵对压裂段注水加压,当孔壁承受的压力足够大时孔壁沿阻力最小的方向出现破裂,裂缝在垂直于截面上最小主应力方向的平面内扩展;(3)关泵泄压:关泵后压力瞬时陡降,随着压裂液渗入岩层,压力继续缓慢降低。当压力降到使裂缝处于临界闭合状态时,即垂直于裂缝面的最小主应力与液压回路达到平衡时的压力,称为关闭压力,然后打开卸压阀,使裂缝完全闭合,泵压清零;(4)重张:重复以上两个步骤连续进行多次循环,以便取得合理的压力特征读数;(5)解封:压裂完毕后,通过拉动转换阀使封隔器内液体通过钻杆排出,封隔器收缩恢复至原状;(6)破裂缝记录:采用外层橡胶覆盖的印模筒和自动定向器记录破裂缝的长度和方向。隧址区典型钻孔地应力测试场景如

图 3 所示。

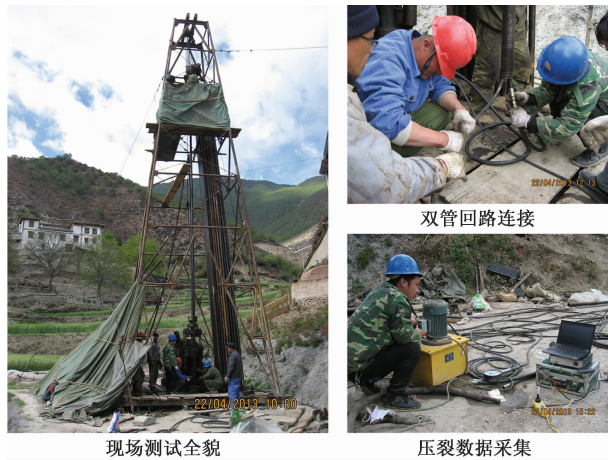


图 3 典型水压致裂法地应力测试现场 (XLZK10 钻孔)

Fig. 3 Typical test scene of hydraulic fracturing stress measurements (XLZK10 borehole)

按钻孔水平面岩体最大拉应力破坏准则,根据实时采集的压力-时间曲线确定的水压致裂产生的破裂

压力 P_b 、裂缝开始闭合时的关闭压力 P_s 以及裂缝重新张开时的重张压力 P_r , 可得到水压致裂法岩体的最大和最小主应力量值计算公式如下:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_H &= 3P_s - P_r - P_0 \\ \sigma_h &= P_s \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: P_0 —— 试验段部位岩体的孔隙水压力。

需要指出的是,本文给出的原地应力测试结果,其现场测试步骤及数据采集、处理和计算严格按照相关技术规范执行,有效测试段均在 100 m 以下,可认为不受非构造活动影响^[20]。

2.2 各测孔地应力测试结果

龙蟠-乔后断裂近场钻孔为 XLZK2、TSZK53、XLP3ZK2、XLP3-1ZK2, 丽江-剑川断裂近场钻孔为 XLZK10、XLP3ZK11, 鹤庆-洱源断裂近场钻孔为 XLZK16、TSZK56。下面对以上各测点相关信息和测试结果做简要介绍,各测点的主应力量值沿深度分布情况如图 4 所示。

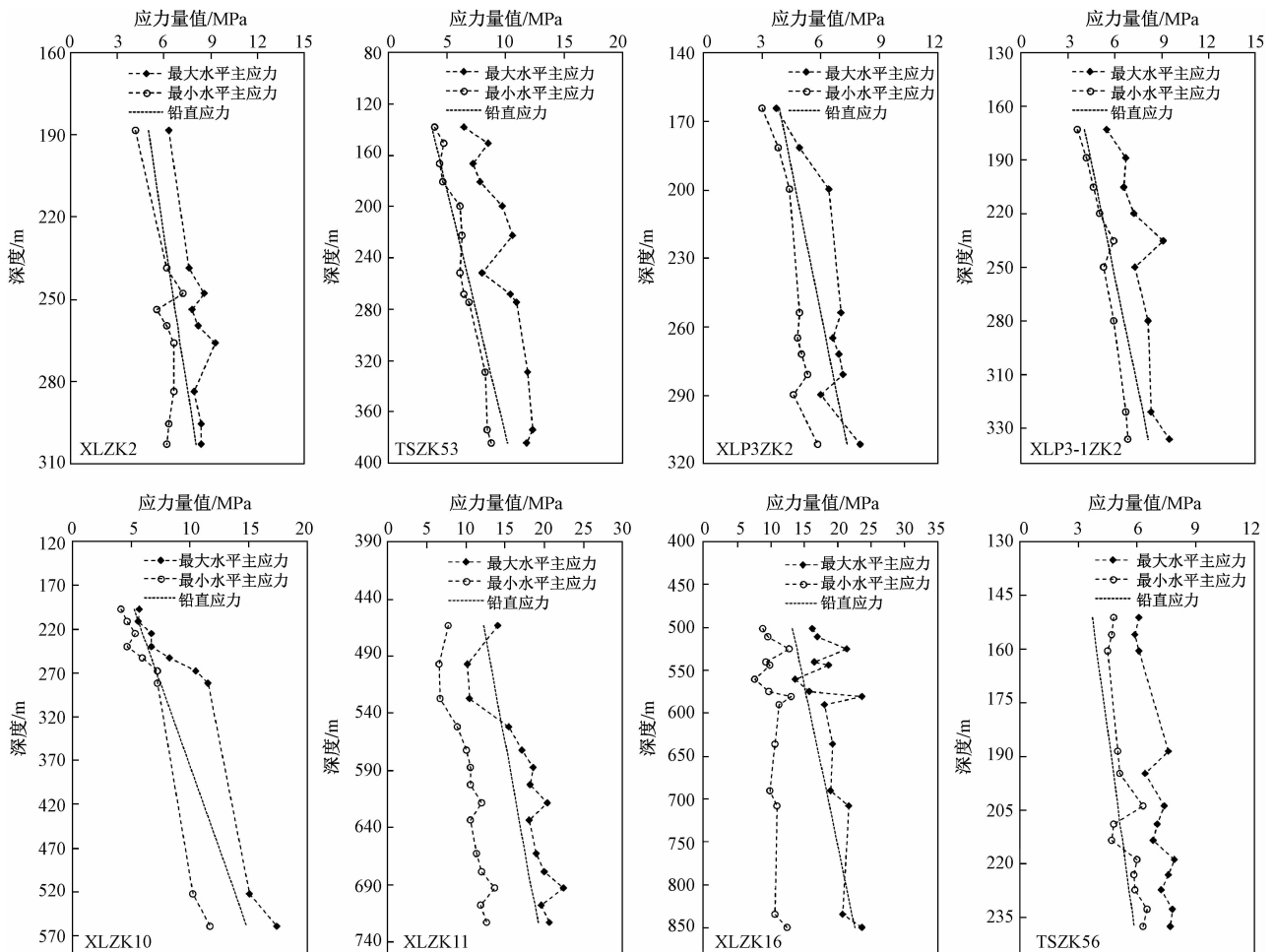


图 4 各测点主应力量值随深度变化图

Fig. 4 Variations of principal stress values with the depth in each measuring point

XLZK2:该测点位于丽江石鼓镇大场,钻孔位于近东西向冲沟中,孔口高程 2 407.3 m,孔深 410.2 m。揭露岩层主要为弱风化和微新绢云母板岩、砂岩,孔深 308 m 附近存在流沙层,其下未能进行试验。测试深度在 188.6 ~ 303.0 m 范围,最大水平主应力量值为 6.3 ~ 9.3 MPa,最小水平主应力量值为 4.2 ~ 7.2 MPa。

TSZK53:该测点位于玉龙九河乡白汉场水库西北侧,孔口高程 2 400.7 m,孔深 412.3 m。揭露岩层主要为白云岩、白云质灰岩。测试深度在 138.5 ~ 384.1 m 范围,最大水平主应力量值为 6.4 ~ 12.3 MPa,最小水平主应力量值为 3.9 ~ 8.8 MPa。

XLP3ZK2:该测点位于玉龙子大姜沟,孔口高程 2 476.5 m,孔深 320.8 m。揭露岩层主要为砂质泥岩、泥质砂岩、石英砂岩、粉砂岩、灰岩和泥岩。测试深度在 164.3 ~ 311.5 m 范围,最大水平主应力量值为 3.7 ~ 8.0 MPa,最小水平主应力量值为 3.0 ~ 5.8 MPa。

XLP3-1ZK2:该测点位于玉龙子大姜沟,孔口高程 2 574.9 m,孔深 406.9 m。揭露岩层主要为泥岩、粉砂岩、细砂岩、灰岩。346 m 以下孔壁坍塌无法试验。测试深度在 173.0 ~ 346.0 m 范围,最大水平主应力量值为 5.5 ~ 9.5 MPa,最小水平主应力量值为 3.6 ~ 6.8 MPa。

XLZK10:该测点位于玉龙红麦村,孔口高程 2 571.6 m,孔深 590.5 m。揭露岩层主要为玄武岩和白云质灰岩,孔底掉块严重,探头仅可下放至 560 m 左右。测试深度在 197.0 ~ 560.0 m 范围,最大水平主应力量值为 5.6 ~ 17.4 MPa,最小水平主应力量值为 4.1 ~ 11.7 MPa。

XLZK11:该测点位于鹤庆沙子坪,孔口高程 2 784.4 m,孔深 780.0 m。揭露岩层主要为灰岩和泥质灰岩。测试深度在 463.5 ~ 723.5 m 范围,最大水平主应力量值为 10.2 ~ 22.5 MPa,最小水平主应力量值为 6.6 ~ 13.6 MPa。

XLZK16:该测点位于鹤庆大陡山,孔口高程 2 951.7 m,孔深 950.4 m。揭露岩层主要为灰岩和白云质灰岩,850 m 以下岩心较破碎,未能取得有效数据。测试深度在 501.5 ~ 850.0 m 范围,最大水平主应力量值为 13.6 ~ 23.7 MPa,最小水平主应力量值为 7.7 ~ 13.0 MPa。

TSZK56:该测点位于鹤庆蝙蝠洞东坡,孔口高程 2 214.6 m,孔深 245.0 m。揭露岩层主要为泥质灰岩、

细砂岩和页岩,165 ~ 180 m 为钻探事故处理段,无法进行测试。测试深度在 151.3 ~ 237.5 m 范围,最大水平主应力量值为 5.9 ~ 7.9 MPa,最小水平主应力量值为 4.5 ~ 6.5 MPa。

2.3 地应力量值与断层稳定性分析

从各测点主应力量值随深度的变化曲线可以看到,除个别测试深度外,对于龙蟠-乔后断裂近场的四个测点和丽江-剑川断裂近场的两个测点,三个主应力量值之间的关系均呈现出 $\sigma_H > \sigma_V > \sigma_h$ 的特征,为走滑型应力状态,鹤庆-洱源断裂西支附近测点 XLZK16 主应力关系呈 $\sigma_H > \sigma_V > \sigma_h$,为走滑型应力状态,南段附近测点 TSZK56 主应力关系呈 $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_V$,为逆冲型应力状态,表明研究区浅表地壳应力状态以水平应力为主导。

地壳应力状态和断层活动性之间有着密切的关系。库仑摩擦滑动准则 $\tau = \mu \sigma_n + c$ 表明,在内聚力 $c = 0$ 的情况下,如果断层面上的剪应力 τ 大于等于滑动摩阻力 $\mu \sigma_n$ 时,断层发生失稳破坏。用主应力改写库仑准则,并考虑孔隙水压力 P_0 作用,则最大有效应力与最小有效应力的比值可表示为断层摩擦系数的函数:

$$(S_1 - P_0)/(S_3 - P_0) = ((\mu^2 + 1)^{1/2} + \mu)^2 = K_\mu \quad (2)$$

当最大与最小有效应力的比值小于 K_μ ,认为断层稳定,反之,断层面则可能沿最有利方位产生黏滑失稳。其中,断层摩擦系数 μ 由试验确定,国内外学者关于各类岩石室内摩擦物理试验成果^[21-22]表明大部分岩石的摩擦系数介于 0.6 ~ 1.0,所以这里认为在分析浅部断层的稳定性时,将岩石摩擦系数近似作为断层摩擦系数,且黏滑失稳的下限值取为 0.6 是合理的。结合上述原地应力实测数据,对走滑断层, $S_1 = \sigma_H$, $S_3 = \sigma_h$,对逆冲断层, $S_1 = \sigma_H$, $S_3 = \sigma_V$,根据式(2)可计算得出每个测点所对应的最大水平主应力临界值。计算结果如图 5 所示,可以看到,除一些浅部测段的实测最大主应力值接近 $\mu = 0.6$ 所对应的使断层黏滑失稳最大主应力临界值外,测深范围内三条活动断裂附近大部分测点实测最大主应力值未超过临界值,因应力达到临界状态而发生黏滑的危险性较小。

断层失稳破裂的实质是剪应力增大而产生的断层面滑动,最大剪应力和平均应力的比值 μ_m 同样可作为评价浅层地壳破坏状态的参数。地壳应力通常能够保持一个相对均衡的状态,差应力与平均主应力具有固定比例^[23]。因此,该比值本质上反映了区域断裂的地

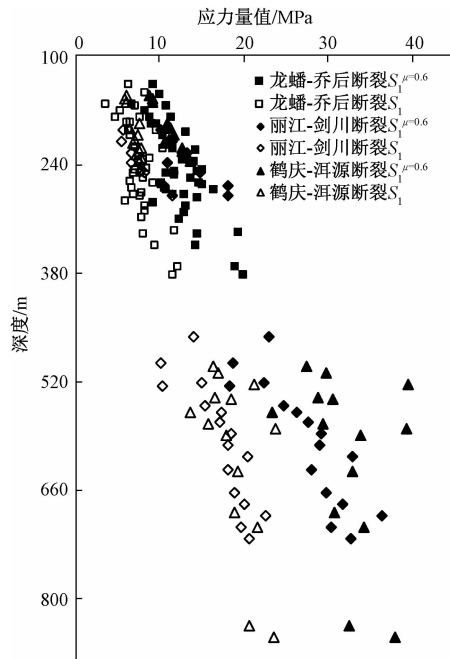


图5 实测最大主应力量值与断层黏滑失稳临界最大主应力量值随深度分布图

Fig.5 Distributions of measured maximum principal stresses and the stress thresholds of fault slipping with depth

应力累积水平,而这种应力累积和断层强度密切相关,应力累积水平高可能指示断层具有较高强度。考虑孔隙水压力的作用下, μ_m 的表达式为:

$$\mu_m = (S_1 - S_3) / (S_1 + S_3 - 2P_0) \quad (3)$$

且 μ_m 与断层摩擦系数 μ 有如下关系:

$$\mu_m = \mu / \sqrt{1 + \mu^2} \quad (4)$$

μ_m 跟应力的方向无关,当 μ_m 接近 0.5 时,说明应力累积水平较高,当 $\mu_m < 0.3$,说明应力累积水平较低^[23]。根据式(3)将各测点地应力实测数据绘制于图6,可以看出,大部分钻孔测段的应力数据均落在 $\mu_m = 0.2$ ($\mu = 0.2$) 和 $\mu_m = 0.5$ ($\mu = 0.58$) 所限定区域之间。受到地表剥蚀、地形地貌等因素影响, XLZK2、XLP3ZK2、XLZK10 和 TSZK56 测点的浅部数据落在 $\mu_m = 0.2$ 界线之外。说明与周围地壳相比,三条活动断裂为中等强度且浅部较软弱。取测深大于 200 m 的试验数据,计算得到龙蟠-乔后断裂、丽江-剑川断裂、鹤庆-洱源断裂的 μ_m 平均值分别为 0.28、0.30、0.24,表明三条活动断裂部位现今地应力累积水平整体偏低,龙蟠-乔后和丽江-剑川断裂区域的应力累积水平要略高于鹤庆-洱源断裂。

2.4 现今地应力场作用方位分析

笔者收集了研究区 2008—2012 年 $M_L 3.0$ 级以上

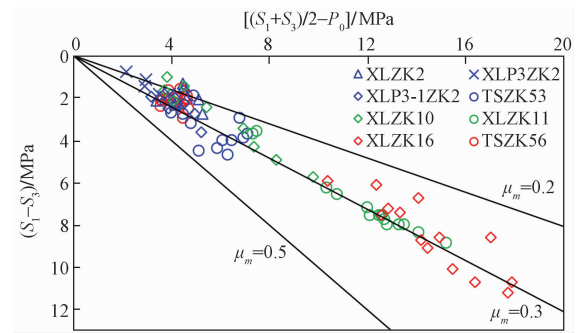


图6 最大差应力与平均有效应力关系图

Fig.6 Relations of the maximum differential stress and effective mean stress based on measured data

中小地震的震源机制解资料^[24],并对该区域的构造应力场进行反演。主应力方位反演结果如图2所示,同时将8个测孔每个测孔获得的最大主应力方向平均值绘制于图2进行对比。可以看到,研究区三条活动断裂附近地应力测试得到的最大主应力优势方位整体呈 NNE-NE 向,较现今构造应力场主压应力方位 NEE 向存在一定的偏转,主要原因在于本文中测试的深度在千米范围内,而震源机制解反演给出的是震源部位 (7~30 km 深度) 的应力状态,其次也说明地应力测试结果在一定程度上受到了断裂活动的影响,同时证实龙蟠-乔后断裂和丽江-剑川断裂现今具有左旋走滑的运动特性。原地应力测试结果总体上反映了工程区现今构造应力场的基本特征。

3 断裂对工程影响模糊综合评价

断裂的活动是一个多因素影响的复杂系统。尽管龙蟠-乔后断裂、丽江-剑川断裂和鹤庆-洱源断裂区域地应力累积水平偏低,不利于断层的黏滑失稳,但尚不能忽略其他因素对断裂活动性的影响。模糊综合评价方法是以模糊计算为主,定性和定量相结合,精确和非精确相统一,对受多因素制约的事物或现象进行总体分析评判的方法。该评价体系能够较好地解决各影响因素分级本身具有模糊与渐变性的问题,避免单因素评价的片面和局限,已被应用于隧道围岩安全性评价^[25]、岩爆预测^[26]、洪灾和泥石流风险评估^[27-28]、TBM 施工风险评估^[29]、地质环境承载力评价^[30]等方面的研究。

为了更加科学、合理反映断裂活动对工程建设带来的影响,下面将综合考虑活动断裂过水段长度 L (断裂长度与其活动性具有正相关关系,鉴于三条活动断裂长度均大于 200 km,这里取其过水段长度作为对隧

洞工程的直接影响因素)、断裂水平运动速率 v_h (与断裂活动性正相关)、断裂垂直运动速率 v_v (与断裂活动性正相关)、历史最大地震震级 M (断裂历史活动强度的重要标志)、最大剪应力和平均值应力的比值 μ_m (应力累积水平越高,断裂面产生黏滑破裂的可能性越大)以及最大剪应力与断裂走向的夹角 θ (夹角越大,活动性越弱)等多种类型指标参数,基于 Fuzzy-Grey 理论评估活动断裂对隧洞工程的影响程度。

首先,参考前人研究成果^[31-32],对上述活动断裂各指标参数对工程影响的强弱程度进行分级(表 1)。

表 1 活动断裂各指标参数分级

Table 1 Classification of each characteristic parameter's influence on active fault

指标参数	影响程度分级		
	强	中	弱
L/km	> 50	20 ~ 50	< 20
$v_h/(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	> 3	1 ~ 3	< 1
$v_v/(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	> 0.6	0.2 ~ 0.6	< 0.2
M	> 6	3 ~ 6	< 3
μ_m	> 0.5	0.3 ~ 0.5	< 0.3
$\theta/(^{\circ})$	< 30	30 ~ 60	> 60

将以上指标参数进一步按照活动性属性划分为形变属性指标(L 、 v_h 、 v_v)和力学属性指标(M 、 μ_m 、 θ)。参考滇中引水工程区域活动断裂地质学初步研究报告^[33]并结合上节地应力实测数据分析结果,龙蟠-乔后断裂、丽江-剑川断裂和鹤庆-断裂各指标参数列于表 2。

表 2 香炉山隧洞工程区主要活动断裂指标参数值

Table 2 Characteristic parameters of main active faults in Xianglushan tunnel engineering area

断裂名称	L	v_h	v_v	M	μ_m	θ
龙蟠-乔后断裂	56	2.2	0.31	6.2	0.28	64
丽江-剑川断裂	48	3.2	0.85	7.0	0.30	39
鹤庆-洱源断裂	37	2.8	0.75	6.2	0.24	45

对每种活动性属性类别进行单一评价后,计算各属性对应的权重系数,采用综合加权法即可得到每条活动断裂对隧洞工程影响的强弱程度。可以看到,单属性类别决策矩阵的建立和权重计算是两项关键工作,其具体实施步骤阐述如下。

3.1 单属性类别评价

活动断裂构成事件集 $P = \{\text{断裂} F_1, \text{断裂} F_2, \text{断裂} F_3\} = \{p_1, p_2, p_3\}$, 指标参数分级标准构成对策集 $S = \{\text{强}, \text{中}, \text{弱}\} = \{s_1, s_2, s_3\}$, 指标参数值则构成目标集 $t = \{L, v_h, v_v, M, \mu_m, \theta\} = \{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6\}$ 。

首先,需要计算第 i 个事件的评价对第 j 个等级的隶属度 r_{ij} 。由于指标参数在活动断裂影响程度各等级的区间大小存在不一致的情况,这里采用模糊数学中的梯形隶属函数^[34]计算 $r_{ij}^{(t)}$ 。对于第 i 个活动断裂的 t 指标参数 $c_i^{(t)}$, 其隶属函数由(5)~(7)式确定

$$r_{i1}^{(t)} = \begin{cases} 1 & c_i^{(t)} \leq s_1^{(t)} \\ -\frac{c_i^{(t)} - s_2^{(t)}}{s_2^{(t)} - s_1^{(t)}} & s_1^{(t)} \leq c_i^{(t)} \leq s_2^{(t)} \\ 0 & c_i^{(t)} \geq s_2^{(t)} \end{cases} \quad (5)$$

$$r_{i2}^{(t)} = \begin{cases} \frac{c_i^{(t)} - s_1^{(t)}}{s_2^{(t)} - s_1^{(t)}} & s_1^{(t)} \leq c_i^{(t)} \leq s_2^{(t)} \\ -\frac{c_i^{(t)} - s_3^{(t)}}{s_3^{(t)} - s_2^{(t)}} & s_2^{(t)} \leq c_i^{(t)} \leq s_3^{(t)} \\ 0 & c_i^{(t)} \notin [s_1^{(t)}, s_3^{(t)}] \end{cases} \quad (6)$$

$$r_{i3}^{(t)} = \begin{cases} 0 & c_i^{(t)} \leq s_2^{(t)} \\ \frac{c_i^{(t)} - s_2^{(t)}}{s_3^{(t)} - s_2^{(t)}} & s_2^{(t)} \leq c_i^{(t)} \leq s_3^{(t)} \\ 1 & c_i^{(t)} \geq s_3^{(t)} \end{cases} \quad (7)$$

其中, $s_1^{(t)}$ 、 $s_2^{(t)}$ 、 $s_3^{(t)}$ 为活动断裂的 t 指标参数的各等级标准值。其中,为便于构造指标夹角 θ 的隶属函数,取其余角计算。

其次,确定各个指标参数的权重系数 $w_i^{(t)}$, 即每一个指标参数对断裂活动性的贡献程度。对表 2 中的不同指标参数以 $s_3^{(t)}$ 为基准进行权重赋值,小于该值时赋值为 1,大于该值时以 $s_3^{(t)}$ 为基准做增幅赋值,以客观反映各指标参数的波动特点。

求出隶属度矩阵和权重系数矩阵后,按下式即可求得每种属性类别的效果测度综合决策矩阵

$$D_k(D_{ij}^k) = \sum_{t=1}^N w_i^{(t)} r_{ij}^{(t)} \quad (8)$$

3.2 综合评价

对于每一条活动断裂各类属性中的每项指标参数,按下式分别求出其在强、中、弱三种程度中的权重

$$f_{ij}^{(t)} = \begin{cases} 1.0 & c_i^{(t)} \leq s_j^{(t)} \\ c_i^{(t)} / s_j^{(t)} & c_i^{(t)} > s_j^{(t)} \end{cases} \quad (9)$$

则每一条活动断裂各类属性指标参数对每个等级影响程度占总评价指标参数的权重表达式为

$$I_k = \sum_{t=1}^N f_{ij}^{(t)} / \sum_{k=1}^2 \sum_{t=1}^N f_{ij}^{(t)} \quad (10)$$

活动断裂对工程影响程度综合评价矩阵表示为

$$D = \sum_{k=1}^2 I_k D_k \quad (11)$$

根据表2给出的研究区三条活动断裂指标参数分别计算形变属性和力学属性的效果测度综合决策矩阵,由上式获得最终的综合评价矩阵

$$D = \begin{bmatrix} 0.60 & 0.19 & 0.18 \\ 0.85 & 0.05 & 0.07 \\ 0.75 & 0.14 & 0.08 \end{bmatrix} \quad (12)$$

可以看到,无论是断裂的形变属性指标参数还是力学属性指标参数,都会对香炉山隧洞工程产生重要影响。根据最大隶属原则,研究区三条活动断裂对工程的影响程度从强至弱依次为:丽江-剑川断裂 > 鹤庆-洱源断裂 > 龙蟠-乔后断裂,即丽江-剑川断裂对工程区的影响最大。应在密切关注其活动习性的同时,开展隧洞结构的抗错断研究,增加跨活动断裂洞段的整体柔度,且根据断层面滑动模式以及围岩地质条件制定隧洞衬砌的设计标准、设计寿命和结构型式。建议加强相关洞段的地应力监测工作,以确保隧洞的安全施工与后期正常运行。

4 结论

本文基于滇中香炉山引水隧洞工程区的地应力测试结果,揭示了该地区现今地应力的赋存状态和分布特征,以测孔所在的龙蟠-乔后、丽江-剑川以及鹤庆-洱源断裂为研究对象,依据滑动摩擦准则探讨了活动断裂的稳定性,进一步地综合断裂的形变属性和力学属性参数综合评价了断裂活动对隧洞工程的影响程度,取得如下几点认识:

(1) 龙蟠-乔后断裂和丽江-剑川断裂部位均为走滑应力状态,鹤庆-洱源断裂西支为走滑型应力状态,南段为逆冲型应力状态,工程区应力状态以水平应力为主导。

(2) 测深范围内三条活动断裂除个别浅部测段的实测最大主应力值接近断层黏滑失稳最大主应力临界值外,大部分测点实测最大主应力值未超过使断层产生滑动的临界值。丽江-剑川断裂区域现今应力累积速率相对较快,总体而言,三条活动断裂部位应力累积水平偏低,因应力达到临界值而产生黏滑失稳的可能性较小。

(3) 地应力测试得到的最大主应力优势方位 NNE-NE 向与用震源机制解反演得到的现今构造应力场主压应力方位 NEE 向存在差异,可能是地应力测试结果在一定程度上受到了断层活动的影响。

(4) 龙蟠-乔后断裂对香炉山隧洞工程的影响较弱,丽江-剑川断裂的影响程度最强,应密切关注其活

动习性,开展隧洞衬砌结构的抗断设计研究并加强相关洞段的地应力监测工作,以确保隧洞的安全施工与后期正常运行。

参考文献:

- [1] ZOBACK M D, TOWNEND J, GROLLIMUND B. Steady-state failure equilibrium and deformation of intraplate lithosphere [J]. *International Geology Review*, 2002, 44(5): 383-401.
- [2] 安其美,丁立丰,王海忠,等. 龙门山断裂带的性质与活动性研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2004, 24(2): 115-119. [AN Q M, DING L F, WANG H Z, et al. Research of property and activity of Longmen mountain fault zone [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2004, 24(2): 115-119. (in Chinese)]
- [3] CHOI S O, LEE B J, SHIN H S. Geological and geotechnical investigation on *in situ* stress regime around the Yangsan Fault Zone in Korea [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2006, 21(3): 243.
- [4] PHAM C, CHANG C D, JANG Y, et al. Effect of faults and rock physical properties on *in situ* stress within highly heterogeneous carbonate reservoirs [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 185: 106601.
- [5] 郭啟良,王成虎,马洪生,等. 汶川 M_s8.0 级地震前后的水压致裂原地应力测量[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(5): 1395-1401. [GUO Q L, WANG C H, MA H S, et al. *In-situ* hydro-fracture stress measurement before and after the Wenchuan M_s8.0 earthquake of China [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(5): 1395-1401. (in Chinese)]
- [6] 陈群策,丰成君,孟文,等. 5.12 汶川地震后龙门山断裂带东北段现今地应力测量结果分析[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(12): 3923-3932. [CHEN Q C, FENG C J, MENG W, et al. Analysis of *in situ* stress measurements at the northeastern section of the Longmenshan fault zone after the 5.12 Wenchuan earthquake [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(12): 3923-3932. (in Chinese)]
- [7] 丰成君,陈群策,谭成轩,等. 汶川 M_s8.0 地震对龙门山断裂带附近地应力环境影响初探——以北川、江油地区为例[J]. *地震学报*, 2013, 35(2): 137-150. [FENG C J, CHEN Q C, TAN C X, et al. A preliminary study of the influence of Wenchuan

- $M_s 8.0$ earthquake on *in situ* stress state near Longmenshan fault zone: a case study in Beichuan and Jiangyou areas[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2013, 35(2): 137 – 150. (in Chinese)]
- [8] WU M L, ZHANG C Y, FAN T Y. Stress state of the Baoxing segment of the southwestern Longmenshan Fault Zone before and after the $M_s 7.0$ Lushan earthquake[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 121: 9 – 19.
- [9] LI P, CAI M F. Distribution law of *in situ* stress field and regional stress field assessments in the Jiaodong Peninsula, China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 166: 66 – 79.
- [10] LI P, REN F H, CAI M F, et al. Present-day stress state and fault stability analysis in the capital area of China constrained by *in situ* stress measurements and focal mechanism solutions[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 185: 104007.
- [11] BAOUCHE R, SEN S, BOUTALEB K. Present day *In-situ* stress magnitude and orientation of horizontal stress components in the eastern Illizi basin, Algeria: a geomechanical modeling [J]. *Journal of Structural Geology*, 2020, 132: 103975.
- [12] 苏生瑞, 黄润秋, 王士天. 断裂构造对地应力场的影响及其工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002. [SU S R, HUANG R Q, WANG S T. Effect of fractures on rock stress and its application in geological engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)]
- [13] 陈化然, 陈连旺, 马宏生, 等. 川滇地区应力场演化与强震间相互作用的三维有限元模拟[J]. *地震学报*, 2004, 26(6): 567 – 575. [CHEN H R, CHEN L W, MA H S, et al. 3-d finite element modeling for evolution of stress field and interaction among strong earthquakes in Sichuan-Yunnan region [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2004, 26(6): 567 – 575. (in Chinese)]
- [14] 陈连旺, 詹自敏. 华北地区构造应力场年动态变化特征的数值模拟[J]. *大地测量与地球动力学*, 2011, 31(6): 1 – 5. [CHEN L W, ZHAN Z M. Numerically modeling of annual change of tectonic stress field in North China[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2011, 31(6): 1 – 5. (in Chinese)]
- [15] YIN S, XIE R C, WU Z H, et al. *In situ* stress heterogeneity in a highly developed strike-slip fault zone and its effect on the distribution of tight gases: a 3D finite element simulation study [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 99: 75 – 91.
- [16] 周伟, 李延兴, 张静华, 等. 川滇地区现今构造变形分析[J]. *大地测量与地球动力学*, 2008, 28(2): 22 – 27. [ZHOU W, LI Y X, ZHANG J H, et al. Analysis of present-day tectonic deformation in sichuan-Yunnan area [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2008, 28(2): 22 – 27. (in Chinese)]
- [17] 黄小巾, 吴中海, 李家存, 等. 滇西北裂陷带的构造地貌特征与第四纪构造活动性[J]. *地质通报*, 2014, 33(4): 578 – 593. [HUANG X J, WU Z H, LI J C, et al. Tectonic geomorphology and quaternary tectonic activity in the northwest Yunnan rift zone[J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(4): 578 – 593. (in Chinese)]
- [18] 房艳国, 罗文行, 叶浩, 等. 鹤庆—洱源断裂晚第四纪活动特征及对滇中引水工程的影响[J]. *华南地震*, 2019, 39(3): 6 – 13. [FANG Y G, LUO W X, YE H, et al. Late quaternary activity of Heqing-Eryuan fault and its impact on water diversion project in the central Yunnan [J]. *South China Journal of Seismology*, 2019, 39(3): 6 – 13. (in Chinese)]
- [19] 刘允芳, 尹健民, 刘元坤. 地应力测量方法和工程应用[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2014. [LIU Y F, YIN J M, LIU Y K. Geostress measurement methods and engineering application [M]. Wuhan: Hubei Science & Technology Press, 2014. (in Chinese)]
- [20] ZOBACK M D. *Reservoir geomechanics* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [21] BYERLEE J. Friction of rocks[J]. *Pure and Applied Geophysics PAGEOPH*, 1978, 116(4/5): 615 – 626.
- [22] 苏恺之, 李方全, 张伯崇, 等. 长江三峡坝区地壳应力与孔隙水压力综合研究[M]. 北京: 地震出版社, 1996. [SU K Z, LI F Q, ZHANG B C, et al. Integrated research on the stress field and pore pressure at the Three Gorges site [M]. Beijing: Seismological Press, 1996. (in Chinese)]
- [23] TOWNEND J, ZOBACK M D. How faulting keeps the crust strong[J]. *Geology*, 2000, 28(5): 399 – 402.
- [24] 徐彦. 云南地区 $M_L 3.0$ 级以上中小地震震源机制解汇编: 2008 ~ 2012 [M]. 昆明: 云南科技出版社, 2013. [XU Y. Compilation of focal mechanism solutions of medium and small earthquakes above $M_L 3.0$ in Yunnan [M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2013. (in Chinese)]

- [25] 祁英弟,靳春玲,贡力. 基于 ANP-KL-TOPSIS 法的铁路隧道围岩安全性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(4): 54-60. [QI Y D, JIN C L, GONG L. Safety evaluation of railway tunnel surrounding rock based on ANP-KL-TOPSIS Method [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(4): 54-60. (in Chinese)]
- [26] 陈鹏宇,余宏明,师华鹏. 基于权重反分析和标准化模糊综合评价的岩爆预测模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(10): 2154-2160. [CHEN P Y, YU H M, SHI H P. Prediction model for rockburst based on weighted back analysis and standardized fuzzy comprehensive evaluation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(10): 2154-2160. (in Chinese)]
- [27] LAI C G, CHEN X H, CHEN X Y, et al. A fuzzy comprehensive evaluation model for flood risk based on the combination weight of game theory [J]. Natural Hazards, 2015, 77(2): 1243-1259.
- [28] 尚慧,王明轩,罗东海,等. 基于函数赋值模型与模糊综合评判法的单沟泥石流危险性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(1): 61-69. [SHANG H, WANG M X, LUO D H, et al. Single gully debris flow hazard assessment based on function assignment model and fuzzy comprehensive evaluation method [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(1): 61-69. (in Chinese)]
- [29] LIANG X D, CHEN R, WU X L, et al. Improved fuzzy comprehensive evaluation with AHP in construction risk assessment: a case study of tunnel boring machine at high altitude [J]. Proceedings of the Twelfth International Conference on Management Science and Engineering Management, 2019; Springer, Cham.
- [30] 王欣,赵其华,张朝俊,等. 基于组合权重的金阳县生态地质环境承载力评价[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(6): 29-35. [WANG X, ZHAO Q H, ZHANG C J, et al. Ecological geological environment carrying capacity evaluation of Jinyang county based on combined weight method [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2019, 17(6): 29-35. (in Chinese)]
- [31] 韩军,张宏伟. 地质动力区划中断裂活动性的模糊综合评判[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(2): 101-105. [HAN J, ZHANG H W. Fuzzy integrated estimation of fault activity in geology dynamic zoning [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2007, 18(2): 101-105. (in Chinese)]
- [32] 孙芳强,苏生瑞,彭建兵. 西安地区活动断裂活动性的 Fuzzy-Grey 模式评价[J]. 工程地质学报, 2010, 18(2): 183-188. [SUN F Q, SU S R, PENG J B. Fuzzy-grey model assessment for activity of faults in Xi'an [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(2): 183-188. (in Chinese)]
- [33] 房艳国,龚成,杨捷,等. 滇中引水工程区域活动断裂地质学初步研究报告[R]. 武汉:长江勘测规划设计研究院, 2015. [FANG Y G, GONG C, YANG J, et al. Preliminary geology research report on active faults in water diversion project in central Yunnan [R]. Wuhan: Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, 2015. (in Chinese)]
- [34] 刘俊娟,王炜,程琳. 基于梯形隶属函数的区间数模糊评价方法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(2): 390-392. [LIU J J, WANG W, CHENG L. Interval number fuzzy evaluation based on trapezoid subordinate function [J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(2): 390-392. (in Chinese)]