

DOI: 10.11779/CJGE202101015

滇中引水工程香炉山隧洞地应力特征及其活动构造响应

张新辉, 付平, 尹健民, 刘元坤

(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: 滇中引水工程香炉山隧洞埋深大、距离长且处于复杂的构造地质环境中。为查明其地应力分布特征, 统计分析了隧洞沿线 10 个钻孔的水压致裂法地应力测试成果。3 个主应力关系主要表现为 $S_H > S_V > S_h$, 反映了隧洞沿线以走滑性质为主的构造特征。工程区浅部地层的应力大小主要受地层岩性与断裂带影响。一方面坚硬岩体的水平主应力明显大于软质岩体; 另一方面断裂带的发育致使隧洞沿线的应力水平相对较低, 同时断裂带局部区间力学性质的差异导致浅部地层水平主应力呈现出较大离散性。香炉山隧洞最大水平主应力的测试方向主要分布在 NNE—NEE 向, 与隧洞沿线一系列全新世活动断裂走向及区域构造主压应力方向趋于一致, 响应了研究区震源机制解特征和楔形块体的运动特征。基于实测应力数据和断层滑动理论, 隧洞沿线活动断裂目前处于相对稳定状态, 而鹤庆-洱源断裂更为接近断层滑动的临界条件, 随着应力的不断积累其稳定性情况值得进一步关注。

关键词: 香炉山隧洞; 水平主应力; 应力方向; 活动断裂; 构造运动; 断层稳定性

中图分类号: TU456

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)01-0130-10

作者简介: 张新辉(1988—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事岩石力学试验方面的研究工作。E-mail: 547834903@qq.com。

In-situ stress characteristics and active tectonic response of Xianglushan tunnel of Middle Yunnan Water Diversion Project

ZHANG Xin-hui, FU Ping, YIN Jian-min, LIU Yuan-kun

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

Abstract: Xianglushan tunnel of Middle Yunnan Water Diversion Project is a deep buried and long distance tunnel in the complex tectonic geological environment. In order to find out the distribution characteristics of in-situ stress, the results of measured stress by hydraulic fracturing method in 10 boreholes along the tunnel are statistically analyzed. The three principal stress relationships are mainly expressed as $S_H > S_V > S_h$, which accords with the strike-slip tectonic characteristics along the tunnel. The in-situ stress of shallow stratum in the project area is mainly affected by the lithology and faults. On the one hand, the horizontal principal stress of hard rock mass is obviously greater than that of soft rock mass. On the other hand, the stress level along the tunnel is relatively lower due to the development of faults. Meanwhile, the difference of mechanical properties in the local section of fault zones makes the horizontal principal stress in shallow stratum discrete. The maximum horizontal principal stress direction of Xianglushan tunnel is distributed in NNE ~ NEE direction. And it is almost parallel to the strike of a series of Holocene active faults along the tunnel and the direction of regional tectonic principal compressive stress, which is in response to the characteristics of focal mechanism solution and wedge block movement in the study area. Based on the measured stress data and the fault slip theory, the active faults along Xianglushan tunnel are in a relatively stable state at present. Among them, Heqing-Eryuan fault is closer to the critical condition of fault sliding. Therefore, with the accumulation of stress in fault zone, the stability of Heqing-Eryuan fault deserves further attention.

Key words: Xianglushan tunnel; horizontal principal stress; stress direction; active fault; tectonic movement; fault stability

0 引言

地应力的大小和方向随时间和空间位置的不同而变化, 构成地应力场, 地壳应力状态的变化是导致断裂失稳乃至发生地震的直接动因, 探索地壳应力状态及其作用规律是认识地球内部物理过程和研究断层活

动性的重要科学问题^[1]。

香炉山隧洞作为滇中引水工程中单洞长度最大、

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0401803, 2016YFC0401801)

收稿日期: 2020-03-12

*通信作者 (E-mail: 547834903@qq.com)

穿越的地层及活动断裂最为复杂的隧洞之一, 位于中国大陆显著的强震活动区^[2]。其所在川滇地区构造应力场一直受到重点关注, 阚荣举等^[3]、崔效锋等^[4]综合利用震源机制解、水压致裂法地应力测量结果和断层滑动反演资料, 对川滇地区应力分区进行了较为详细的厘定, 主要揭示了大跨度区域地壳深部的应力方向信息。相较于地壳深部, 地壳浅部复杂多变的应力场才是工程建设中重点关注的对象。原位测试是了解地壳浅部应力场的重要手段, 尤其是在有丰富测试资料的情况下, 通过统计分析的方法即可获得地壳浅部应力场的基本规律。前人对此进行了大量研究, 如 Brown 等^[5]统计分析了全球实测垂直应力、水平平均主应力与铅直应力之比随埋深的分布规律。赵德安等^[6]、景峰等^[7]在大量地应力实测数据的基础上, 研究了国内地壳浅部三大岩类地应力量值随深度的变化规律。同时, 地壳浅部的主应力方向也是地下工程建设中的重要设计依据, 尤其是针对穿越活动断裂带的深埋长隧洞, 分析应力方向与断裂带的相关性及其在活动构造方面的动力响应在以往的文献中很少涉及到, 本文将结合丰富的实测数据与地质资料对此进行深入的研究。此外, 地壳应力状态也与断裂滑动失稳及地震孕育等密切相关, 当地壳内应力不断累积, 应力水平达到或超过某一“临界状态”, 断裂就会突然失稳错动引发地震^[8]。目前, 以实测应力数据为基础, 结合库伦破裂准则与 Byerely 等^[9]关于岩石摩擦系数方面的研究成果已成为断裂稳定性的重要评价方法。

香炉山隧洞单洞最长约 55 km, 最大埋深约 1370 m, 隧洞低于周边的侵蚀基准面 200 m 以上, 沿线穿越多条活动断裂^[2]。工程区实测地应力资料丰富, 隧洞埋深多位于沟谷高程之下, 很大程度上削弱了地形因素对应力场的影响, 应力数据具有较好的代表性。本文统计分析了香炉山隧洞沿线 10 个深钻孔的水压致裂法地应力测试结果, 主要针对工程区地壳浅部应力量值随埋深的变化规律、应力方向与活动断裂的相关性及其构造运动响应、隧洞沿线活动断裂的稳定性特征展开了深入研究, 该项研究不仅对香炉山隧洞工程的设计与施工具有重要的指导意义, 也为认识地震的孕育和发生机理提供了重要的科学依据。

1 实测地应力量值统计分析

地应力资料来自于长江科学院在香炉山隧洞的测试结果。测试方法采用国际岩石力学学会测试方法委员会于 1987 年、2003 年颁布的测定岩石应力的建议方法水压致裂法。隧洞沿线 10 个钻孔的实测应力数据见表 1 所示, 测点分布广泛, 最大测试深度超过 850 m,

可真实反映出研究区应力场分布特征。

统计分析香炉山隧洞的地应力测试结果可知, 香炉山隧洞 3 个主应力主要表现为 $S_H > S_V > S_h$ 的特征, 与工程区主要活动断裂呈走滑性质的构造特征相符。

1.1 硬质与软质岩类水平主应力分布规律

浅部地层应力量值的大小与地层岩性密切相关, 尤其是岩石的强度。本文根据所有测点不同岩石的单轴饱和抗压强度 R_c 把测试岩体分为两类: ①硬质岩类 ($R_c=50\sim90$ MPa), 包括灰岩、白云质灰岩、角砾灰岩、玄武岩、砂岩和粉砂岩; ②较软岩类 ($R_c=20\sim30$ MPa), 包括绢云母板岩、粉砂质泥岩和泥质灰岩。水平主应力随埋深变化见图 1 所示。

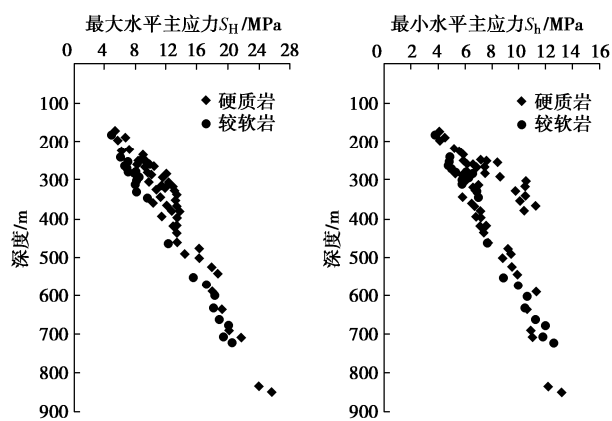


图 1 水平主应力随深度变化规律

Fig. 1. Variation of horizontal principal stress with depth

在测试深度小于 600 m 范围内水平主应力量值硬质岩明显大于较软岩; 在测试深度大于 600 m 后硬质岩与较软岩的水平主应力量值接近。

总体上硬质岩、较软岩的水平主应力与埋深 H 都表现出了较好的线性关系, 剔除一些异常状态的测点, 在测试范围内其线性回归结果分别为

$$\begin{cases} S_H = 0.0273H + 2.3, & R^2 = 0.91 \\ S_h = 0.0141H + 1.7, & R^2 = 0.95 \end{cases} \quad (\text{硬质岩}), \quad (1)$$

$$\begin{cases} S_H = 0.0298H - 0.8, & R^2 = 0.94 \\ S_h = 0.0152H + 1.3, & R^2 = 0.97 \end{cases} \quad (\text{较软岩}). \quad (2)$$

S_H , S_h 与埋深的线性相关系数均大于 0.9, 其回归精度较高。众多研究表明, 水平应力主要是由自重应力和构造应力共同作用产生的, 而 S_H 和 S_h 的线性回归式中均有一定量值的常数项, 该常数则主要体现了水平构造应力的作用^[7]。线性回归式中可看出, 硬质岩常数项明显大于较软岩, 因此可推断地壳浅部硬质岩赋存水平构造应力的能力强于较软岩, 较软岩在水平构造应力作用下可能通过变形引起应力调整与释放, 从而应力量值较低。

表 1 香炉山隧洞地应力测试结果表
Table 1 In-situ stress test results of Xianglushan tunnel

钻孔	深度 /m	岩性	S_H /MPa	S_h /MPa	S_V /MPa	α_H /(°)	钻孔	深度 /m	岩性	S_H /MPa	S_h /MPa	S_V /MPa	α_H /(°)	
XLZK2	241.8	绢云母板岩	6.1	4.9	6.4	N36°E	XLZK11	463.5	泥质灰岩	14.0	7.7	12.5	N33°E	
	247.8	砂岩	8.6	7.2	6.6			551.7	泥质灰岩	15.5	8.9	14.9		
	251.4	砂岩	9.3	7.6	6.7			572.7	泥质灰岩	17.2	10.0	15.5		
	259.9	砂岩	8.2	6.2	6.9			602.6	泥质灰岩	18.2	10.6	16.3		
	265.9	砂岩	9.3	6.8	7.0	N27°E		633.4	泥质灰岩	18.1	10.5	17.1	N29°E	
	283.9	绢云母板岩	7.9	6.6	7.5			663.3	泥质灰岩	18.9	11.3	17.9		
	295.7	绢云母板岩	8.4	6.3	7.8			678.6	泥质灰岩	20.0	12.0	18.3		
	303.0	绢云母板岩	8.1	5.8	8.0			708.5	泥质灰岩	19.4	11.8	19.1		
XLZK4	256.2	角砾灰岩	9.4	8.4	6.9	N53°E	XLZK16	723.5	泥质灰岩	20.5	12.6	19.5	N40°E	
	292.5	角砾灰岩	11.5	8.6	7.9			501.5	灰岩	16.3	8.8	13.5		
	304.5	角砾灰岩	12.3	10.5	8.2			524.6	灰岩	21.3	12.7	14.2		
	316.8	角砾灰岩	12.9	10.5	8.6			544.0	灰岩	18.6	9.9	14.7		
	329.2	角砾灰岩	13.1	9.8	8.9	N44°E		590.0	灰岩	18.0	11.3	15.9	N37°E	
	341.5	灰岩	13.4	10.5	9.2			636.1	灰岩	19.2	10.6	17.2		
	354.2	灰岩	13.2	10.1	9.6			690.4	灰岩	18.0	9.2	18.6		
	366.8	灰岩	13.4	11.2	9.9			708.5	灰岩	21.7	11.0	19.1		
379.2	灰岩	13.7	10.4	10.2	N11°E	835.2	灰岩	24.0	12.2	22.6	N43°E			
XLP3ZK2	181.8	粉砂质泥岩	4.9	3.8		4.9	XLZK17	850.0	灰岩	25.6		13.2	23.0	
	253.7	粉砂质泥岩	7.0	4.9		6.8		N55°E	313.1	白云质灰岩		11.4	7	8.5
	264.8	粉砂质泥岩	6.6	4.8		7.1			325.5	白云质灰岩		10.7	6.7	8.8
	272.2	粉砂质泥岩	6.9	5.0	7.3	359.5			白云质灰岩	10.3	6.5	9.7		
	280.8	粉砂质泥岩	7.1	5.3	7.6	395.1			白云质灰岩	10.4	6.8	10.7		
	311.5	粉砂质泥岩	8.0	5.8	8.4	460.6			白云质灰岩	11.5	7.7	12.4		
XLP3-1ZK3	173.0	粉砂岩	5.5	4.1	4.7	N65°E	491.8		白云质灰岩	14.4	9.4	13.3		
	189.0	粉砂岩	6.7	4.5	5.1		XLZK18	281.8	角砾灰岩	9.6	5.3	7.6		
	220.0	粉砂岩	7.2	5.2	5.9			305.7	角砾灰岩	9.9	5.9	8.3		
	235.0	粉砂岩	9.1	5.9	6.3			319.9	角砾灰岩	11.8	6.6	8.6		
	280.0	粉砂质泥岩	8.1	6.1	7.6			366.1	角砾灰岩	12.0	6.7	9.9		
	331.0	粉砂质泥岩	8.2	6.9	8.9			417.9	角砾灰岩	13.3	7.6	11.3		
	346.0	粉砂质泥岩	9.5	7	9.3			N54°E	XLZK25	260.2	白云质灰岩	9.8	6.6	7.0
XLZK10	197.0	白云质灰岩	5.7	4.1	5.3	N35°E				287.9	白云质灰岩	10.1	5.8	7.8
	225.2	白云质灰岩	6.2	5.6	6.1		344.3			白云质灰岩	11.2	5.8	9.3	
	252.4	白云质灰岩	8.3	5.9	6.8		380.2			灰岩	12.7	7.2	10.3	
	267.5	白云质灰岩	10.5	7.5	7.2		398.3			灰岩	13.4	7.2	10.8	
	281.5	白云质灰岩	12.0	7.5	7.6		419.2			灰岩	13.0	7.1	11.3	
	522.5	玄武岩	13.8	9.7	14.1		437.6			灰岩	13.4	7.4	11.8	
	560.0	玄武岩	17.4	11.7	15.1		N42°E	478.6	灰岩	16.2	9.2	12.9	N38°W	

注： S_H 为最大水平主应力； S_h 为最小水平主应力； S_V 为岩体上覆自重重力（ $S_V = \gamma H$ ）； α_H 为最大水平主应力方向。

1.2 水平主应力侧压系数分布规律

在研究地应力场的变化规律时，习惯采用侧压系数来描述某点的应力状态，经统计隧洞沿线水平主应力侧压系数随深度变化如图 2 所示。图 2 显示：浅部地层水平主应力侧压系数分布比较离散，随着地层埋深的增加侧压系数逐渐降低并趋于集中；硬质岩的最大水平主应力侧压系数明显大于较软岩，硬质岩最大

水平主应力侧压系数为 1.0~1.6，随着地层埋深增加逐渐集中在 1.2 左右，较软岩最大水平主应力侧压系数为 0.9~1.1，随着地层埋深增加逐渐集中在 1.0 左右；硬质岩与较软岩的最小水平主应力侧压系数分布特征比较接近，浅部地层最小水平主应力侧压系数为 0.6~1.1，随着地层埋深增加逐渐集中在 0.7 左右。

Brown 等^[5]、赵德安等^[6]在统计分析地应力实测

数据时, 以平均水平主应力侧压系数来研究水平应力的分布规律, 但鉴于浅部地层最大和最小水平主应力大小有较大的差异, 分开研究最大、最小以及平均水平主应力侧压系数随埋深的变化规律更具工程意义。表 1 显示, 香炉山隧洞地应力测试岩体均为沉积岩, 针对所有测点, 本文在水平应力侧压系数与深度的散点图中, 两侧包络线及趋势线采用 $k=a/H+b$ (a , b 为待定常数) 的函数形式进行回归。最大、最小水平主应力侧压系数与平均水平主应力侧压系数的趋势线及包络线分别见图 2, 3 所示。

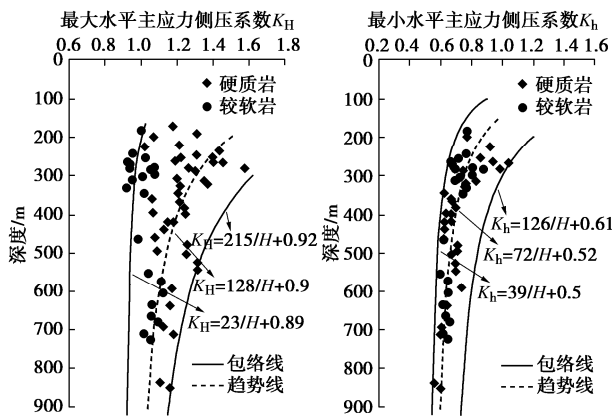


图 2 水平主应力侧压系数随深度变化规律

Fig. 2 Variation of lateral pressure coefficient of horizontal principal stress with depth

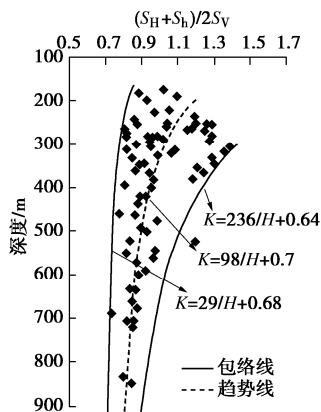


图 3 平均水平主应力侧压系数随深度变化规律

Fig. 3 Variation of lateral pressure coefficient of average horizontal stress with depth

最大水平主应力侧压系数包络线及趋势线关系式为

$$\left. \begin{aligned} \frac{23}{H} + 0.89 \leq K_H \leq \frac{215}{H} + 0.92, \\ K_H = \frac{128}{H} + 0.9. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

最小水平主应力侧压系数包络线及趋势线关系式为

$$\left. \begin{aligned} \frac{39}{H} + 0.5 \leq K_h \leq \frac{126}{H} + 0.61, \\ K_h = \frac{72}{H} + 0.52. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

平均水平主应力侧压系数包络线及趋势线关系式为

$$\left. \begin{aligned} \frac{29}{H} + 0.68 \leq K \leq \frac{236}{H} + 0.64, \\ K = \frac{98}{H} + 0.7. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

针对全国范围沉积岩, 赵德安等^[6]、景峰等^[7]对其平均水平主应力侧压系数进行了统计分析, 两者得到的趋势线关系式分别为 $K=104/H+0.9$ 和 $K=140/H+0.78$ 。对比可知, 香炉山隧洞所在区域地层的水平主应力侧压系数相对偏小。众多研究表明, 断裂错动过程中能量的释放和断裂带的形成会使其影响范围内地应力明显低于原岩应力, 而香炉山隧洞沿线断裂众多, 并且规模大、距离近, 因此相近断裂影响区的相互叠加, 形成了地壳浅部相对较低的应力环境。

香炉山隧洞沿线的地应力测试结果显示地壳浅部 (约 300 m 埋深以上) 水平主应力呈现较大离散性, 而在 300 m 埋深以下地层水平主应力相对比较集中, 这除了和地层岩性和地形的差异相关, 更大程度受到了隧洞沿线众多断裂带复杂的局部构造性质影响。根据地质资料^[2], 香炉山隧洞沿线断裂带整体上以走滑性质为主, 实测应力统计也体现了这一特征, 但是断裂带的局部位置往往并不表现为纯粹的走滑性质, 还经常伴随逆断或正断性质的叠加。例如 XLZK4 钻孔恰好穿过一逆断层, 岩心为胶结良好的构造角砾岩, 三向主应力关系呈 $S_H > S_h > S_V$ 特征, 其水平主应力侧压系数相较于其他测孔明显偏大。因此, 本文基于不同类型断层的力学性质推断, 断裂带局部区间力学性质的差异会引起地壳浅部地层水平主应力呈现较大的离散性, 但随着地层埋深的增加, 地应力逐渐受区域构造作用控制, 应力环境趋于稳定, 因此水平主应力在深部岩体相对比较集中。

2 主应力方向与活动断裂相关性研究

香炉山隧洞地处“川滇菱形块体”西部, 工程区内以北东、北北东向构造带和北西向构造带为主体, 断裂构造发育, 各断裂带经历了较长的地质发育历史, 大多属继承性活动断裂, 其中龙蟠—乔后断裂、丽江—剑川断裂、鹤庆—洱源断裂均属于区域性大断裂或深大断裂带, 与隧洞线路直接相交, 与研究区应力场的分布特征密切相关。

统计香炉山隧洞各测孔的最大水平主应力方向, 按照测孔坐标绘制到研究区构造地质图内, 见图 4 所

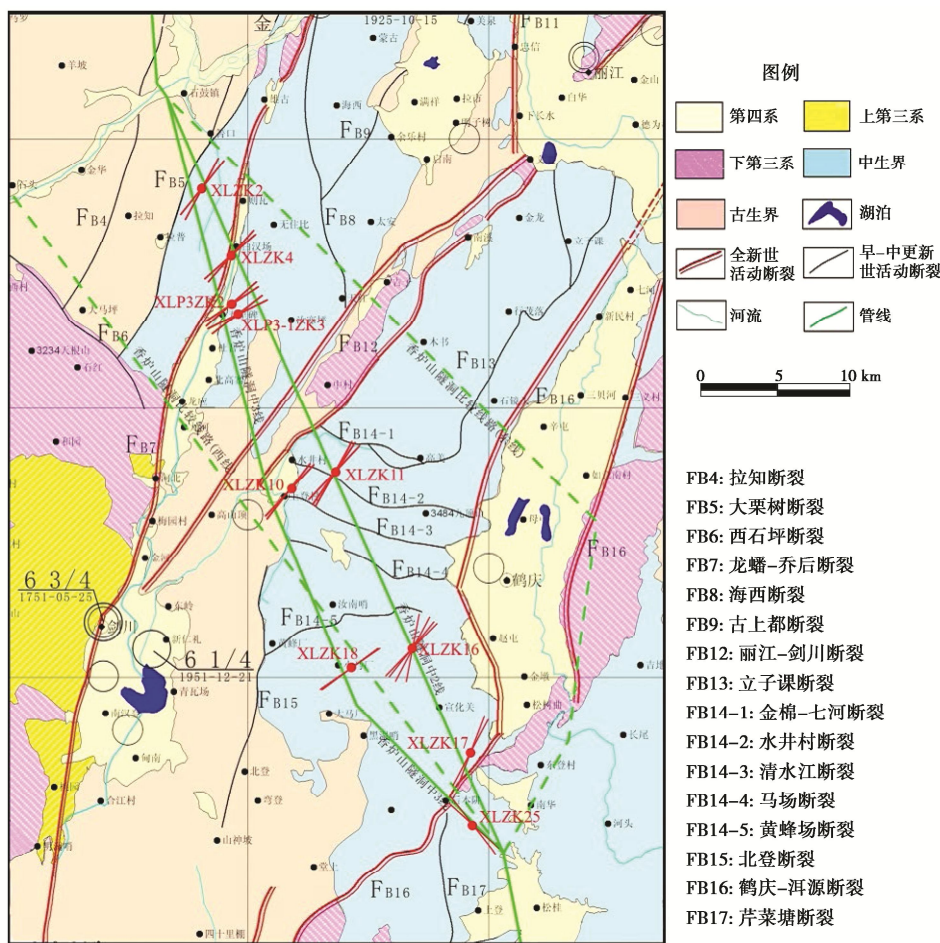


图 4 香炉山隧洞工程区及其周边活动断裂与最大水平主应力方向分布图

Fig. 4 Distribution of active faults and maximum horizontal principal stress in Xianglushan tunnel and its surrounding areas

示, 图中红色圆点代表测试钻孔所在的平面位置, 红线指向代表测孔最大水平主应力方向。本文最大水平主应力方向的统计数据均来自于埋深大于 200 m 的测点, 较大程度上降低了地形因素对应力方向的影响。

根据图 4 所示, 香炉山隧洞最大水平主应力测试方向具有较好的一致性, 具体统计结果见图 5 所示。

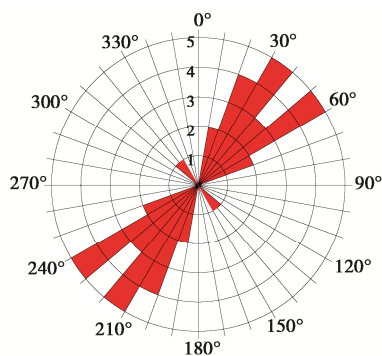


图 5 香炉山隧洞最大水平主应力方向玫瑰花图

Fig. 5 Rose diagram of maximum horizontal principal stress direction of Xianglushan tunnel

图 5 表明, 香炉山隧洞最大水平主应力方向主要分布在 NNE—NEE 向, 仅 XLZK25 钻孔最大水平主

应力方向与其他测试结果差异较大, 表现为 NW 向, 结合地质资料发现该测孔位于山顶, 所处位置地形起伏过大, 应力方向主要受地形因素影响。研究区内 $NE30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 和 $NE50^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 为出现频率最高的方向区间, 可作为香炉山隧洞最大水平主应力的优势方向。整体来看, 测孔中最大水平主应力方向和隧洞穿越的一系列区域性活动断裂走向非常接近, 这说明应力方向与活动断裂的展布具有密切相关性。

香炉山隧洞穿越的断裂带较为复杂, 全新世活动断裂主要有龙蟠—乔后断裂、丽江—剑川断裂和鹤庆—洱源断裂, 其余皆为早—中更新世活动断裂。实测结果显示香炉山隧洞最大水平主应力方向与研究区最大的三条全新世活动断裂走向接近或小角度相交, 而与早—中更新世活动断裂的夹角无明显规律, 该现象揭示了研究区应力方向主要是受最新活动时期的断裂带影响。下文将结合这几条全新世活动断裂的地质特征展开具体分析。

龙蟠—乔后断裂带走向北北东, 陡倾角, 整体上表现为左旋兼正断性质的活动断裂, 对龙蟠、中和、雄古、九河、剑川、沙溪等第四纪盆地的形成起明显

的控制作用, 该断裂在隧洞穿越段主要呈现正断特征, 在剑川北水泥厂、九河村、北高寨村、新文村北、雄古村北、宏文村等断层剖面均可看到明显的正断摩擦痕迹^[2, 10]。

丽江—剑川断裂为一走向北东的左旋走滑活动断裂, 南西延入剑川盆地, 控制了沿线吉子盆地、中村盆地、红麦盆地的发育^[2]。该断裂在隧洞穿越段具有明显的拉张特性, 在丽江文化本过村西探槽剖面^[2]和丽江—永胜公路 13 km 处断层剖面^[11]均观测到全新世时期正断性质的活动擦痕。

鹤庆—洱源断裂沿鹤庆盆地东、西缘展布, 走向北北东—北东, 具有左旋走滑兼正断的活动特性, 鹤庆盆地和洱源盆地为主体断裂尾端产生张性断裂并形成的拉分盆地^[2], 鹤庆盆地东侧断层陡坎遥感影像、断层及探槽剖面均可看出明显的正断层构造地貌特征^[12]。

因此, 新构造时期研究区内断裂活动表现出强烈的断陷作用, 主要活动断裂沿线都分布有断陷盆地、湖泊、槽谷等, 其中沉积物可厚达数百余米, 形成于主干断裂的拉分或引张作用。

结合以上构造地质条件, 研究区地壳浅部的水平主应力方向受隧洞沿线走向北北东—北东向全新世活动断裂的控制作用主要表现在以下两个方面: ①香炉山隧洞穿越的活动断裂带具有明显的走滑和正断特征, 基于 Anderson 断层理论, 走滑断层最大水平主应力一般小角度相交于断层走向, 而正断层最大水平主应力平行于断层走向。因此, 受断裂的活动性质影响, 断裂带内的最大水平主应力方向平行或小角度相交于断裂走向。②活动断裂在走滑或正断作用下地壳浅部断裂带内岩体主要呈拉分和张拉性质, 应力得到释放, 经过长期的地质作用, 沿断裂带形成了诸如剑川、丽江、鹤庆之类的断陷盆地, 盆地中主要为第四系覆盖层, 厚度可达数百米, 因此沿断裂带或盆地的浅部地层呈破碎或松散状态, 水平主应力在垂直于断裂走向得不到有效传递, 则最大水平主应力方向会相应调整到与断裂带走向一致。

3 区域应力状态及其活动构造响应

为研究香炉山隧洞所在区域构造应力环境, 本文对香炉山隧洞附近范围 (纬度 $25^{\circ} \sim 28^{\circ}$, 经度 $98^{\circ} \sim 102^{\circ}$) 的地震震源机制资料展开研究, 该资料来自于湖北省地震局, 研究区地震震源机制解 P 轴分布见图 6 所示。图中可见隧洞附近的震源机制解 P 轴方向分布比较复杂, 以北北东—北东东向构造主压方向为主, 但由于样本较少, 很难得到确切的构造应力方向。结合崔效峰等^[4]、丰成君等^[13]的研究可知, 香

炉山隧洞位于川滇应力区与滇西南应力区的交界地区, 此处发生了构造应力方向从 NNW 向 NNE 向的转向。

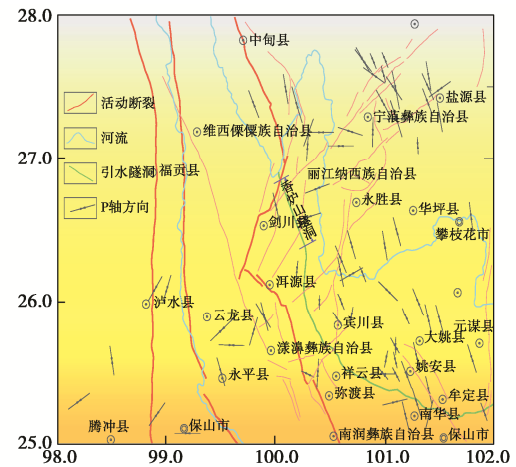


图 6 震源机制解 P 轴分布图

Fig. 6 P-axis distribution of focal mechanism solutions

鉴于构造应力场是地壳变形的起因, 地壳变形是地应力活动的实际证据, 因此根据区域活动断裂位移场的观测, 研究其产生的力源, 可以从地球动力学角度解释构造应力场的形成。

香炉山隧洞位于川西北次级块体、滇中次级块体和保山次级块体的交接地带, 由丽江—小金河断裂、丽江—剑川断裂、龙蟠—乔后断裂、红河断裂北段、宾川—程海断裂围限成一个楔形块体, 见图 7 所示。



图 7 楔形块体滑移趋势示意图

Fig. 7 Schematic diagram of wedge block slip trend

全新世以来, 滇中次级块体向南东方向平移且叠加顺时针转动, 这是印度板块与欧亚板块碰撞后印度板块北偏东向运移在青藏高原与相对稳定的华南地块之间近南北向右旋剪切变形区的应变响应, 红河断裂北段张性倾滑分量 (滇西张性区) 则是顺时针转动在边界带上的局部应变响应^[14]。通过对第四纪地貌的研

究, Lepoup 等^[15]认为红河断裂表现为右旋走滑运动, 右旋滑移量约 20~50 km, 走滑位错速率为 7 ± 3 mm/a。而受到红河断裂强烈右旋走滑运动的影响, 丽江—剑川断裂、龙蟠—乔后断裂、鹤庆—洱源断裂和宾川—程海断裂均表现为左旋走滑运动特征^[16]。根据丽江盆地的左旋位移量及其形成时代, 丽江—剑川断裂全新世以来的左旋走滑水平位错速率介于 2.0~5.0 mm/a, 平均水平位错速率值约为 3.5 mm/a^[17]。晚更新世以来, 鹤庆—洱源断裂西边界的左旋走滑水平位错速率为 2.2~2.5 mm/a, 东边界断裂 0.53~1.3 mm/a^[2]。第四纪晚期以来, 程海断裂走滑水平位错速率为 2.5~3.0 mm/a^[18]。

以上数据表明, 楔形块体区的主断裂带均处于较强的走滑活动状态, 尤其是边界断裂带。在其由北西向南东掀斜的过程中, 其力源主要来自滇西北块体向东南方向的挤压和华南地块的阻挡。鉴于红河断裂北段表现为张性特征, 楔形块体在北西和南东方向的挤出作用下, 致使楔形块体具有沿着北西边界(丽江—小金河断裂、丽江剑川断裂、龙蟠—乔后断裂)和东边界(宾川—程海断裂)向南西方向滑移的趋势。同时, 红河断裂北段右旋和宾川—程海断裂左旋的走滑特征也反映了所夹持的楔形块体向南—南南西方向滑移, 因此, 综合考虑, 推断楔形块体具有向南南西方向滑移的趋势, 见图 7 所示。

乔学军等^[19]、王闫昭等^[20]关于川滇地块大区域 GPS 速度场的研究表明, 在印度板块向北北东方向楔入青藏高原、高原重力势能推挤和稳定华南块体的阻挡作用下, 滇中块体产生了顺时针转动的运动轨迹, 如图 8 所示。图中可看出滇中次级块体向南东运动的过程中, 在其内部楔形块体所在区域发生明显的顺时针转动, GPS 水平速度场的轨迹方向恰好与该区域一系列北北东—北东走向的走滑断裂契合。前文指出, 楔形块体的边界断裂具有较大的水平滑动速率, 地壳形变也主要发生在其边界上, 因此根据 GPS 水平速度场的轨迹方向, 楔形块体沿着其边界断裂表现出向南南西滑移的运动特征。邓启东等^[21]和俞鸿年等^[22]曾在研究构造应力场与板块运动的关系中指出, 二者具有良好的对应关系, 主要表现为后者为前者提供动力来源, 前者为后者提供验证和地质依据。基于该观点, 研究区楔形块体在所受力源的驱动下, 其内部的构造主压应力方向与块体的运动方向具有一致性, 表现为南南西向。

4 隧洞沿线活动断裂带稳定性探讨

香炉山隧洞沿线依次穿过龙蟠—乔后断裂、丽江

—剑川断裂、鹤庆—洱源断裂等 3 条全新世活动断裂, 它们活动时代新、规模大、活动强烈, 历史上曾发生过多次大震和强震。1996 年丽江地区发生了 7.0 级地震, 造成 300 多人死亡, 此次地震是近 70 a 来滇西北地区最强烈的一次地震。强烈的地震活动显示研究区断裂依然趋于活跃状态, 因此分析其活动稳定性对香炉山隧洞的抗震设计有着重要作用。

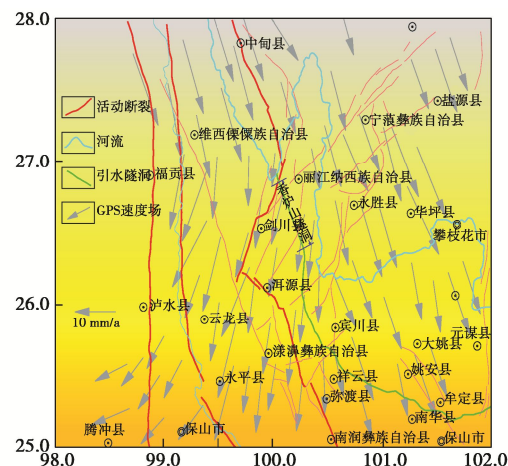


图 8 研究区相对华南块体的 GPS 水平速度场 (参考文献 [19, 20])

Fig. 8 GPS horizontal velocity fields of study area relative to South China block (Reference [19, 20])

Coulomb 准则指出, 若断层面上的剪应力大于等于滑动摩擦阻力, 则断层产生滑动, 破裂面上应力呈现为 $\tau = \mu \sigma_n$, 其中 τ 为剪应力, σ_n 为正应力, μ 为滑动面摩擦系数。根据 Mohr-Coulomb 准则, 断层面上的正应力和剪应力分别为

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha, \quad (6)$$

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha. \quad (7)$$

式中 σ_1 , σ_3 为最大和最小主应力; α 为最大主应力与破裂面的夹角。

考虑到裂隙岩体中存在空隙水压力 p_0 , 这里引入有效应力的概念, 因此岩体的地应力就由有效应力(岩石晶格骨架所承受的应力)和孔隙水压力(岩石孔隙中的静水压力)组成, 即有效应力为 $\sigma - p_0$, 当有效主应力满足断层滑动的条件时, 将式 (6), (7) 代入 $\tau = \mu \sigma_n$ 中, 滑动面摩擦系数 μ 可表示为

$$\mu = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\alpha}{(\sigma_1 + \sigma_3) - (\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\alpha - 2p_0}. \quad (8)$$

需要指出, 断层滑动时是在方位合适的层面上发生剪切滑动, 此处方位合适的面是指断层面的法线方向与最大主应力 σ_1 的夹角为 φ 的面。张伯崇^[23]在研究断层滑动准则中指出 φ 与 μ 的关系为 $\varphi = 0.5(\pi/2 +$

$\arctan \mu$), 即断层与最大主应力 σ_1 的夹角 $\alpha = \pi/2 - \varphi$, 则

$$\sin 2\alpha = \frac{1}{\sqrt{1+\mu^2}}, \quad \cos 2\alpha = \frac{\mu}{\sqrt{1+\mu^2}} \quad (9)$$

将式 (9) 代入式 (8) 转换为

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 - 2p_0} = \frac{\mu}{\sqrt{1+\mu^2}} \quad (10)$$

宏观上来讲, 断层产生的本质就是剪应力的增大而沿剪切面发生滑动破坏, 式 (10) 则反映了最大剪切应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ 与平均有效主应力 $(\sigma_1 + \sigma_3 - 2p_0)/2$ 的比值, 该比值体现了一个区域应力的积累水平, 比值越大说明应力积累程度越高、断层破裂面的剪应力相对较大, 更有利于断层活动^[24]。

为了便于表达, 将式 (10) 进一步转换为

$$\mu = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2\sqrt{(\sigma_1 - p_0)(\sigma_3 - p_0)}} \quad (11)$$

显然, 式 (11) 中 μ 只与最大和最小主应力的有效应力相关。在 Anderson 理论体系下, 中间主应力与断层破裂面共面, 逆断层的应力状态为 $\sigma_1 = S_H$, $\sigma_3 = S_V$, 正断层的应力状态为 $\sigma_1 = S_V$, $\sigma_3 = S_H$, 走滑断层的应力状态为 $\sigma_1 = S_H$, $\sigma_3 = S_h$ 。因此通过对比实测地应力与式 (11) 所限定的主应力关系即可判定应力状态是否能够导致断层失稳。

Byerlee^[9]总结了各种岩石的室内摩擦试验资料得出, 应力值小于 100 MPa 时, 大部分岩石的摩擦系数 μ 为 0.85, μ 总体位于 0.6~1.0。张伯崇等^[23]在三峡地区花岗岩、灰岩和砂岩进行的三轴摩擦试验中得到的结果与 Byerlee^[9]的结论基本一致, 同时论证了在判断浅部断层活动时, 摩擦系数取 0.6~1.0 是合理的。

因此本文将摩擦系数 $\mu=0.6$ 及 $\mu=1.0$ 作为断层滑动的临界值, 依据香炉山隧洞地应力实测数据、各测点静水压力和上述断层滑动理论, 对断层的稳定性进行判别, 隧洞沿线断层稳定性分析结果如图 9 所示。

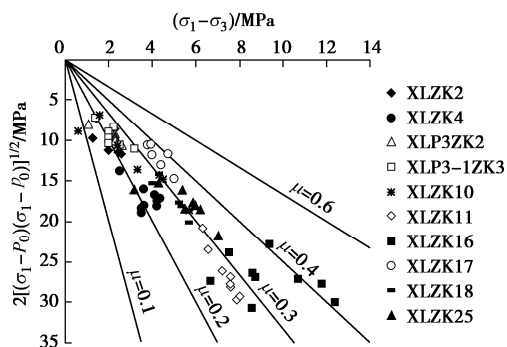


图 9 断层摩擦系数 μ 与有效主应力的相关性

Fig. 9 Correlation between friction coefficient (μ) of faults and effective principal stress

图 9 中可以看出, 各钻孔地应力测值均位于临界线 $\mu=0.6$ 之下, 地应力实测值低于断层发生摩擦滑动极限状态的应力临界值, 因此香炉山隧洞沿线活动断裂暂时处于相对稳定状态。需要说明的是, 上述评价实际上是一种定性的分析方法, 其并不含有应力方向的相关信息, 只能反映出最大与最小主应力的大小关系以及断层带应力积累程度。

进一步分析发现, 隧洞沿线各测点的应力测值大多处于 μ 值为 0.1~0.4 所对应的应力区间, 比较离散, 其中 XLZK2、XLZK4、XLP3ZK2 和 XLP3-1ZK3 钻孔的应力测值多处于 μ 值为 0.1~0.3 所对应的应力区间, XLZK10、XLZK11 和 XLZK18 钻孔的应力测值多处于 μ 值接近 0.3 所对应的应力区间, 而 XLZK16、XLZK17 和 XLZK25 钻孔的应力测值多处于 μ 值为 0.3~0.4 所对应的应力区间, 且部分测点 μ 值大于 0.4, 这一特征主要反映了香炉山隧洞沿线各断裂应力积累程度不同, 对照钻孔位置, 可推断龙蟠—乔后断裂和丽江—剑川断裂处于较为稳定状态, 而鹤庆—洱源断裂发生滑动的危险性较高。因此, 随着应力积累的不断积累, 鹤庆—洱源断裂带的稳定性情况值得进一步研究。

活动断裂与地震的发生密切相关, 香炉山隧洞所在区域属于地震多发区, 其中 1996 年丽江 7.0 级地震导致丽江及其附近地区地壳内能量得到释放, 该震源附近断层过渡到相对稳定的状态, 香炉山隧洞地应力测试结果与断层稳定评价也体现了这一特征。

5 结 论

统计分析滇中引水工程香炉山隧洞 10 个钻孔的实测地应力数据, 结合隧洞沿线活动断裂与构造运动研究了香炉山隧洞所在区域的应力场分布特征, 并对活动断裂稳定性展开分析, 可得到以下 4 点结论。

(1) 香炉山隧洞主应力关系主要表现为 $S_H > S_V > S_h$, 应力量值的大小与岩性相关, 表现为硬质岩的水平主应力明显大于较软岩, 但随着地层埋深的增大, 岩性对水平主应力量值的影响逐渐减弱, 表现为软硬岩体应力量值接近一致。

(2) 一系列断裂带的相互叠加影响, 形成了工程区地壳浅部相对较低的应力环境。断裂带局部区间力学性质的差异会引起地壳浅部地层水平主应力呈现较大的离散性, 但随着地层埋深的增加, 地应力逐渐过度到区域性构造应力场, 深部岩体应力趋于稳定。

(3) 隧洞沿线最大水平主应力方向主要分布在 NNE—NEE 向。最大水平主应力方向受全新世活动断裂控制, 测试方向表现为平行于或小角度相交于全新

世活动断裂走向。研究区楔形块体沿着其边界断裂朝南南西方向滑移,块体在所受力源的驱动下,其内部的构造主压应力方向与块体的运动方向具有一致性,表现为南南西向。

(4)基于香炉山隧洞地应力实测数据和断层滑动理论,隧洞沿线活动断裂处于相对稳定状态,但各断裂应力积累程度不同。受1996年丽江7.0级地震影响,丽江及其附近地区地壳内能量得到一定的释放,应力积累程度相对较低,因此龙蟠—乔后断裂和丽江—剑川断裂相对稳定;而鹤庆—洱源断裂距震中心较远,随着应力的不断积累,该断裂滑动失稳的可能性较高,需要进一步关注。

参考文献:

- [1] 谢富仁, 陈群策, 崔效锋, 等. 中国大陆地壳应力环境研究[M]. 北京: 地质出版社, 2003. (XIE Fu-ren, CHEN Qun-ce, CUI Xiao-feng, et al. Study on Crustal Stress Environment in Mainland China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003. (in Chinese))
- [2] 长江勘测规划设计研究有限责任公司. 滇中引水工程可行性研究阶段香炉山隧洞线路比选地质专题研究报告[R]. 武汉: 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 2013. (Changjiang Survey Planning and Design Research Co., Ltd. Geological subject study report on route selection of Xianglushan tunnel in feasibility study stage of Yunnan diversion project[R]. Wuhan: Changjiang Survey Planning and Design Research Co., Ltd., 2013. (in Chinese))
- [3] 阚荣举, 张四昌, 晏凤桐, 等. 我国西南地区现代构造应力场与现代构造活动特征的探讨[J]. 地球物理学报, 1977, 20(2): 96 - 108. (KAN Rong-ju, ZHANG Si-chang, YAN Feng-tong, et al. Present tectonic stress field and its relation to the characteristics of recent tectonic activity in southwest China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1977, 20(2): 96 - 108. (in Chinese))
- [4] 崔效锋, 谢富仁, 张红艳. 川滇地区现代构造应力场分区及动力学意义[J]. 地震学报, 2006, 28(5): 451 - 461. (CUI Xiao-feng, XIE Fu-ren, ZHANG Hong-yan. Recent tectonic stress field zoning in Sichuan-Yunnan region and its dynamics interest[J]. Acta Seismologica Sinica, 2006, 28(5): 451 - 461. (in Chinese))
- [5] BROWN E T, HOEK E. Technical note trends in relationships between measured in-situ stress and depth[J]. Int J Rock Mech Min Sci and Geomech Abstr, 1978, 15(4): 211 - 215.
- [6] 赵德安, 陈志敏, 蔡小林, 等. 我国地应力场分布规律统计分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1265 - 1271. (ZHAO De-an, CHEN Zhi-min, CAI Xiao-lin, et al. Analysis of the distribution rule of geostress in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 1265 - 1271. (in Chinese))
- [7] 景 锋, 盛 谦, 张勇慧, 等. 不同地质成因岩石地应力分布规律的统计分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1877 - 1883. (JING Feng, SHENG Qian, ZHANG Yong-hui, et al. Statistical analysis of geostress distribution laws for different rocks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(7): 1877 - 1883. (in Chinese))
- [8] 张培震, 邓起东, 张国民, 等. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学(D 辑), 2003, 33(增刊): 12 - 20. (ZHANG Pei-zhen, DENG Qi-dong, ZHANG Guo-min, et al. Strong seismic activities and active blocks in mainland China[J]. Science in China (Series D), 2003, 33(S0): 12 - 20. (in Chinese))
- [9] BYERLEE J D. Friction of rock[J]. Pure and Applied Geophysics, 1978, 116: 615 - 626.
- [10] 汤 勇. 龙蟠—乔后断裂带晚第四纪活动速率研究[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所, 2014. (TANG Yong. A Study on the Slip Rates of Longpan-Qiaohou Fault Zone in Late Quaternary[D]. Beijing: Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, 2014. (in Chinese))
- [11] 许晶莉. 云南丽江—剑川断裂带活动性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012. (XU Jing-li. Study on the Activity of Lijiang-Jianchuan Fault Zone in Yunnan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [12] 魏永明, 魏显虎, 李德文, 等. 滇西北地区鹤庆—洱源断裂带遥感影像特征及活动性分析[J]. 第四纪研究, 2017, 37(2): 234 - 249. (WEI Yong-ming, WEI Xian-hu, LI De-wen, et al. Remote sensing imagery features and activity analyses of Heqing-Eryuan fault zone in the northwestern area of Yunnan province[J]. Quaternary Sciences, 2017, 37(2): 234 - 249. (in Chinese))
- [13] 丰成君, 陈群策, 李国歧, 等. 青藏高原东南缘丽江—剑川地区地应力测量与地震危险性[J]. 地质通报, 2014, 33(4): 524 - 534. (FENG Cheng-jun, CHEN Qun-ce, LI Guo-qi, et al. In-situ stress measurement in Lijiang-Jianchuan area and tentative discussion on the seismic hazards on the southeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Geological Bulletin of China, 2014, 33(4): 524 - 534. (in Chinese))
- [14] 徐锡伟, 程国良, 于贵华, 等. 川滇菱形块体顺时针转动的构造学与古地磁学证据[J]. 地震地质, 2003, 25(1): 61 - 70. (XU Xi-wei, CHENG Guo-liang, YU Gui-hua, et al.

- Tectonic and paleomagnetic evidence for the clockwise rotation of the Sichuan-Yunnan Rhombic Block[J]. *Seismology and Geology*, 2003, **25**(1): 61 - 70. (in Chinese))
- [15] LEPOUP P H, HARRISON T M, RYERSON F J, et al. Structural, petrological and thermal evolution of a tertiary ductile strike slip shear zone, Diancangshan, Yunnan[J]. *J Geophys Res*, 1993, **98**: 6715 - 6743.
- [16] 范柱国, 李 峰, 谈树成, 等. 丽江—大理地区新构造运动特征及环境效应[J]. *大地构造与成矿学*, 2002, **26**(1): 6 - 9. (FAN Zhu-guo, LI Feng, TAN Shu-cheng, et al. The characteristics and environment effects of geotectonic movement in the Lijiang-Dali region[J]. *Geotectonic et Metallogenia*, 2002, **26**(1): 6 - 9. (in Chinese))
- [17] 向宏发, 徐锡伟, 虢顺民, 等. 丽江—小金河断裂第四纪以来的左旋逆推运动及其构造地质意义—陆内活动地块横向构造的屏蔽作用[J]. *地震地质*, 2002, **24**(2): 188 - 198. (XIANG Hong-fa, XU Xi-wei, GUO Shun-min, et al. Sinistral thrusting along the Lijiang-Xiaojinhe fault since quaternary and its geologic-tectonic significance-shielding effect of transverse structure of intracontinental active block[J]. *Seismology and Geology*, 2002, **24**(2): 188 - 198. (in Chinese))
- [18] 韩 源, 张 靖. 滇西北地区活动断裂[M]. 北京: 地震出版社, 1990. (HAN Yuan, ZHANG Jing. Active Faults in Northwest Yunnan[M]. Beijing: Seismological Press, 1990. (in Chinese))
- [19] 乔学军, 王 琪, 杜瑞林. 川滇地区活动地块现今地壳形变特征[J]. *地球物理学报*, 2004, **47**(5): 805 - 811. (QIAO Xue-jun, WANG Qi, DU Rui-lin. Characteristics of current crustal deformation of active blocks in the Sichuan-Yunnan region[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2004, **47**(5): 805 - 811. (in Chinese))
- [20] 王阎昭, 王恩宁, 沈正康, 等. 基于 GPS 资料约束反演川滇地区主要断裂现今活动速率[J]. *中国科学(D 辑)*, 2008, **38**(5): 582 - 597. (WANG Yan-zhao, WANG En-ning, SHEN Zheng-kang, et al. Inversion of present activity rate of main faults in Sichuan-Yunnan region based on GPS data constraints[J]. *Science in China (Series D)*, 2008, **38**(5): 582 - 597. (in Chinese))
- [21] 邓起东, 张裕明, 许桂林, 等. 中国构造应力场特征及其与板块运动的关系[J]. *地震地质*, 1979, **1**(1): 11 - 22. (DENG Qi-dong, ZHANG Yu-ming, XU Gui-lin, et al. On the tectonic stress field in China and its relation to plate movement[J]. *Seismology and Geology*, 1979, **1**(1): 11 - 22. (in Chinese))
- [22] 俞鸿年, 卢华复, 张庆龙, 等. 福建东南沿海中、新生代构造应力场的演化及其与板块运动的关系[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 1987, **23**(3): 473 - 484. (YU Hong-nian, LU Hua-fu, ZHANG Qing-long, et al. The evolution of the meso-cenozoic structural stress field in the southeastern Fujian coastal region and its bearing on the plate movement[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science Edition)*, 1987, **23**(3): 473 - 484. (in Chinese))
- [23] 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 Kai-zhi, LI Fang-quan, ZHANG Bo-chong, et al. Integrated research on the crustal stress and pore water pressure at the dam site of the Three Gorges[M]. Beijing: Earthquake Press, 1996. (in Chinese))
- [24] 王成虎, 宋成科, 郭启良, 等. 利用原地应力实测资料分析芦山地震震前浅部地壳应力积累[J]. *地球物理学报*, 2014, **57**(1): 102 - 114. (WANG Cheng-hu, SONG Cheng-ke, GUO Qi-liang, et al. Stress build-up in the shallow crust before the Lushan Earth quake based on the in-situ stress measurements[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, **57**(1): 102 - 114. (in Chinese))