

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 Yanguo, LUO Wenxing, YE Hao, 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]

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

房艳国, 罗文行, 叶浩, 周云
(长江勘测规划设计研究有限责任公司, 武汉 430010)

摘要: 鹤庆—洱源断裂位于滇西北, 呈 NE-SW 向延伸, 南端与红河断裂带斜交, 是一条晚第四纪以来仍在活动的断裂。通过对鹤庆—洱源断裂的野外露头的特征分析, 揭示了该断裂在晚第四纪以来具有左旋走滑特征, 同时又伴有张性正断性质, 结合该断裂带附近的地震活动特征分析, 认为该断裂对滇中引水香炉山隧洞工程有重要影响, 应引起重视。

关键词: 鹤庆—洱源断裂; 晚第四纪; 滇中引水工程; 红河断裂

中图分类号: P315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662(2019)03-006-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2019.03.002

Late Quaternary Activity of Heqing-Eryuan Fault and Its Impact on Water Diversion Project in the Central Yunnan

FANG Yanguo, LUO Wenxing, YE Hao, ZHOU Yun
(Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China)

Abstract: Heqing-Eryuan Fault (HEF) is located in northwest Yunnan province and extends NE-SW direction. HEF has been active since late Quaternary, its southern tip is oblique crossing on red river fault. Detailed field work on HEF show sinistral strike-slip with tensional normal fault since late Quaternary, combined with seismic activity characteristics near by the fault, it is considered that HEF has important impact on water diversion project Xianglushan tunnel project in central Yunan and should be brought to the forefront.

Keywords: Heqing-Eryuan fault; Late Quaternary; Water diversion project in central Yunan; Red River fault

收稿日期: 2019-03-19

基金项目: 国家重点研发计划: 隧洞穿越活断层围岩—衬砌灾变机制及抗断技术(2016YFC0401803)

作者简介: 房艳国(1981-), 男, 高级工程师, 从事区域地质与地震、水利水电勘察等工作。

E-mail: 273018201@qq.com.

通信作者: 罗文行(1983-), 男, 高级工程师, 主要从事构造地质与地热资源勘查研究工作。

Email: luo_wenxing@qq.com.

0 引言

滇中引水工程是云南省委省政府的重大决策部署,是云南省可持续发展的战略性基础工程^[1],其目的是解决滇中地区乃至云南省经济社会可持续发展的瓶颈。滇中引水工程输水总干渠总长663.236 km。按照新构造分区分块,工程输水线路沿线位于川滇菱形地块上。该地块被丽江—小金河断裂一分为二。与输水总干渠线路相交的主干工程活动断裂共计3条(图1)。鹤庆—洱源断裂是其东南部的一条主干断裂带,它位于滇西北活动断裂系的中心部位。

就工程活动断层而言,主要涉及三个方面的地质问题:①断层活动起算时间;②断层工程相交部位的精细空间分布及其运动学性质;③工程关心的断层活动速率。对于上述工程关心的活断层科学问题,前人关于鹤庆—洱源断裂的资料已经取得重要进展^[2-5],但未进行过系统的梳理。本文旨在对该活动断层起算时间的地质证据、断层空间分布的地球物理证据、断层运动学性质的构造地质学和地貌证据做一系统分析,并收集已有的活动速率研究,进一步揭示其晚第四纪以来的活动特征。这不仅对滇中引水工程施工具有重要的指导意义,同时也为理解该区域构造变形样式及其地球动力学环境提供更多的地质证据。

1 区域地质概况

印度板块与欧亚板块的会聚导致新特提斯洋的闭合及青藏高原快速隆升,这对青藏高原东缘地区的地质地貌变革具有深刻的影响^[6-9]。由于东喜马拉雅构造在向北的推进过程中,产生了强大的向东方向推挤力,形成了由西向东的推覆,在青藏高原东缘地区形成大型的弧形走滑断裂系,并造成川青块体向南东东方向的逸出和川滇块体向南南东方向的侧向滑移。这不仅对东缘地区地质、地貌的表现,而且对地震发生均具有重要的制约作用。受上述构造运动的影响,青藏高原东缘与扬子地台结合带新构造期以来发生大面积整体掀斜抬升运动、断块间差异升降运动、活动块体的侧向滑移与旋转运动以及一系列断裂。现今的地块活动以围绕东喜马拉雅构造结的顺时针旋转为特征^[10],起着调节青藏高原地区物质向东挤出的作用,或调节着印度板块与扬子地块之间强烈右旋剪切的作用^[11-16]。滇西北地区位于青藏高原东

缘地区,经历了复杂的构造演化^[17]。鹤庆—洱源断裂带位于川滇菱形块体西南缘^[18-19],滇中次级地块西北隅的大理和丽江境内^[21]。它居于滇西北活动断裂系的中心部位,是该活动断裂系的重要组成部分^[20]。该断裂带北端交于小金河—丽江断裂带,向南西经鹤庆盆地,止于洱源盆地。断裂整体走向北东,倾向南东或北西,长约108 km,由两条左阶羽列次级断裂组成,西北为鹤庆盆地西边界—栗雄卫断裂,东南为鹤庆盆地东边界—洱源盆地断裂,两条断裂于鹤庆盆地南端蝙蝠洞一带交汇^[4],向南西延伸37 km后止于洱源盆地(图1)。鹤庆—洱源断裂带处于一个复杂的动力学环境^[21],该区地貌起伏很大。

2 鹤庆—洱源断裂新构造期活动特征

2.1 活动时限的地质证据

通常认为活动断层是晚第四纪以来有活动的断层,并认为其现今仍在活动或近代地质时期曾有过活动,将来还可能重新活动,这对于工程如核电厂、水库大坝等具有十分重要的意义^[22]。就工程而言,更加关心的是现代构造条件下断层的活动。究竟“现代构造条件”该如何理解,本文在前人的基础上认为将有确切的证据证明最近一期构造应力场转变的时限作为工程活断层的时限较为合理。

鹤庆—洱源断裂所在的川滇菱形地块应力场可能是早更新世和中更新世之交发生的,现今应力场最大主应力方向NNE向^[23]。鹤庆盆地的下更新统蛇山组与中更新统鹤云寺组之间存在区域性角度不整合^[24],可与丽江盆地、剑川盆地、维西盆地、保山盆地等下更新统和中更新统广泛存在的角度不整合对比^[24]。这一不整合意味着最大主压应力方向从早更新世的近东西向变为中更新世以来的北北东向^[25-26]。鹤庆盆地与丽江盆地在早更新世还为统一的盆地,只是在早更新世末才解体。综上所述,现今鹤庆盆地轮廓的出现应该开始于中更新世^[24]。在后续工程设计时应主要考虑中更新世以来的活动断面和滑动速率。

2.2 断层运动性质

2.2.1 断裂的左旋走滑特征

沿断裂洪积扇发育,从南到北大小洪积扇组成洪积裙带,断裂通过处发育左旋断错水系,出

山的冲沟通过断裂处也有左旋扭错现象。从大松坪到洞门口沿断裂分布一系列左旋扭动的冲沟和山脊。洞门口可见一断层残丘再次被后期断层活

动的左旋错开。地貌上形成陡崖，剖面上形成正断层系列断面，其间夹多个构造楔，形成时代为晚更新世至全新世。

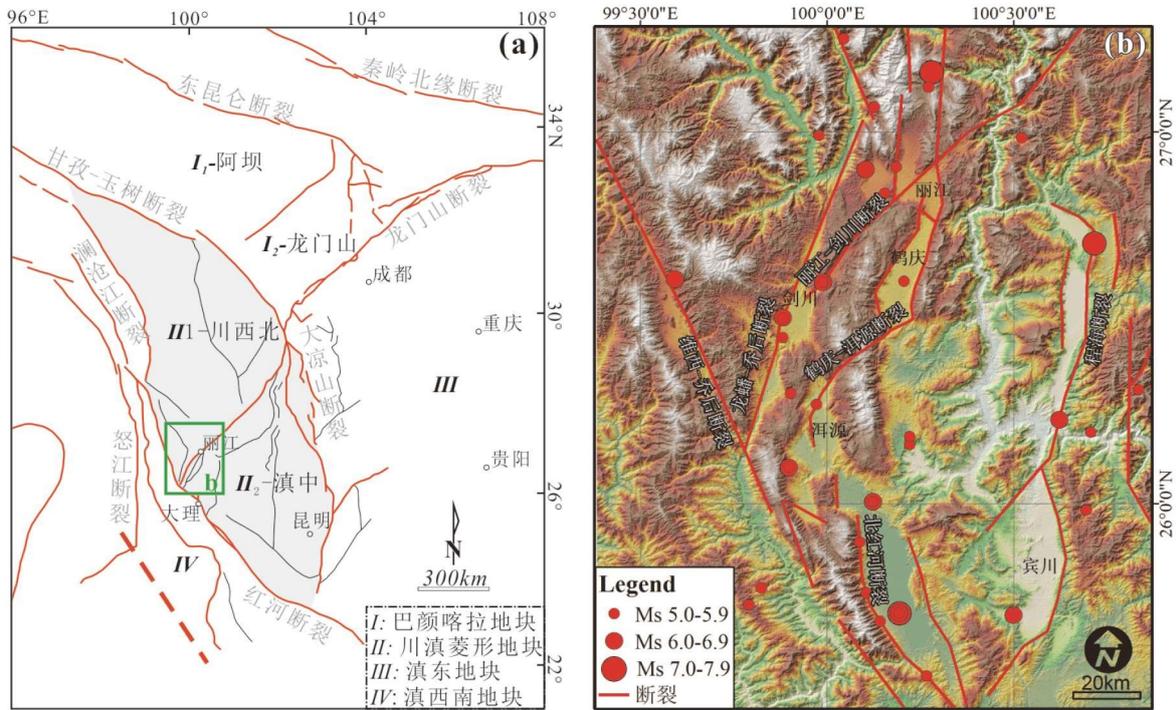


图 1 鹤庆—洱源断裂新构造活动块体划分图(图 a 改自[18])和 DEM 空间展布(图 b 改自[15])

Fig.1 Neo-tectonic division map of Heqing-Eryuan fault (modified from Luo et al. 2012) and the spatial distribution of Digital Elevation Model (modified from Sun et al. 2017)

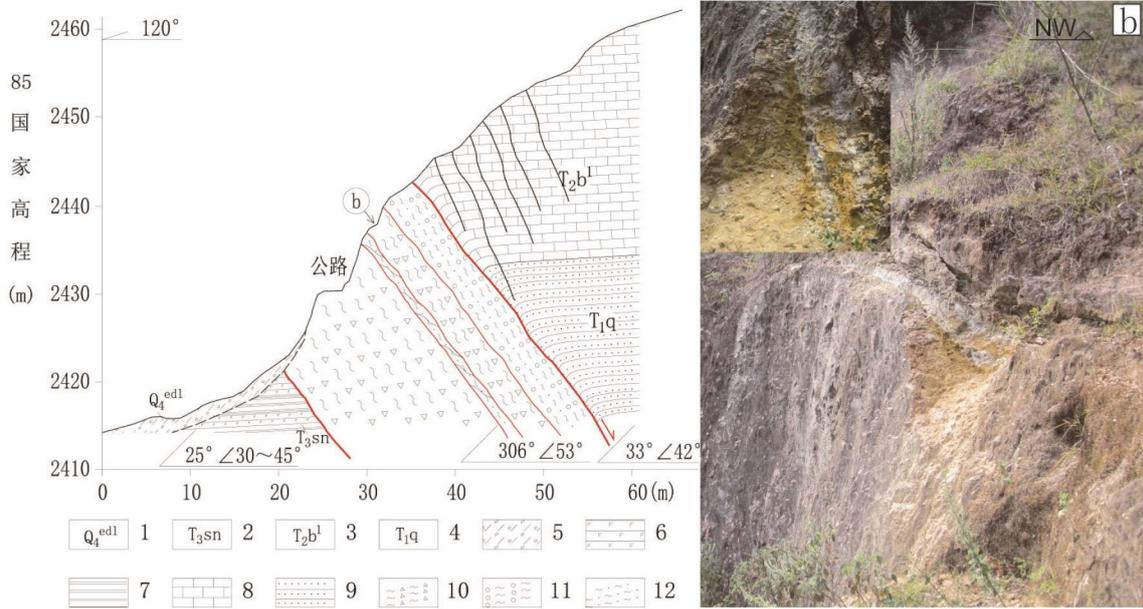
鹤庆新民中学南 500 m 见断裂错断下更新统及上更新统，表明为晚更新世以来有过活动。启可村东—达瓦村东，鹤庆盆地东边界断裂—洱源盆地断裂在地貌上有断阶平台断层崖、断层陡坎发育，跨断裂的冲沟有左旋同步位移；洪家村一带冲沟左旋位移为 250 m，在启可村南断裂最新断错 TL1.211±0.13 万年的洪积扇台地。在美自村东北，断裂发育在二叠系玄武岩与中三叠统北衙组灰岩之间，见中、晚更新世黄土中发育走向北北东向的小断层及其与之伴生的一组锐角指向北北西向的劈理带。

在鹤庆县东坡村东坡路 K4-K5 里程碑之间一带揭露鹤庆盆地东边界—洱源盆地断裂南段，断层走向 36°，倾向北西，倾角 53°左右(图 2)。顺断层为一陡坎，局部有崩塌现象。山坡 SE 侧为槽状地形，槽地内发育一冲沟，冲沟展布方向与断层走向近一致。断层上盘为三叠系下统青天堡组灰黄色砂岩与三叠系中统北衙组灰褐色灰岩，砂岩呈中厚层—厚层状，岩层产状为 33°∠42°，灰

岩呈中厚层状；断层下盘为三叠系上统松桂组薄层—中厚层状深灰色粉砂岩、岩体结构松散，多风化呈针状，岩层产状为 25°∠30°~45°。断层带北西侧为宽约 4 m 的灰白色—褐黄色碎粒岩夹碎粉岩带，为钙质胶结，结构较密实，该带南东侧为宽约 2 m 的灰褐色角砾岩带，角砾粒径一般为 5~10 cm，胶结较好；主断面处为可见 20~30 cm 灰白色夹棕黄色条带状碎粉岩，棕黄色条带宽约 1~2 cm，灰白色条带宽约 3~5 cm，两者相间分布；主断带南东侧为灰白色—褐黄色角砾岩带夹灰紫色透镜体状角砾岩，结构较密实。

在鹤庆县上窝北西侧线路穿过活动断裂部位揭露鹤庆盆地东边界—洱源盆地断裂南段，断层走向 NE30°，倾向北西，倾角 46°(图 3)。断层通过处形成陡崖地貌，顺直的槽状地形，陡坎崖处见有崩塌块石，沿三叠系松桂组砂岩与覆盖层接触部位处见泉水出露，渗水，从地貌特征来看该断裂具有一定的活动性。揭露处断层构造岩带宽约 130 m，带内构造岩位深灰色角砾岩，泥质胶

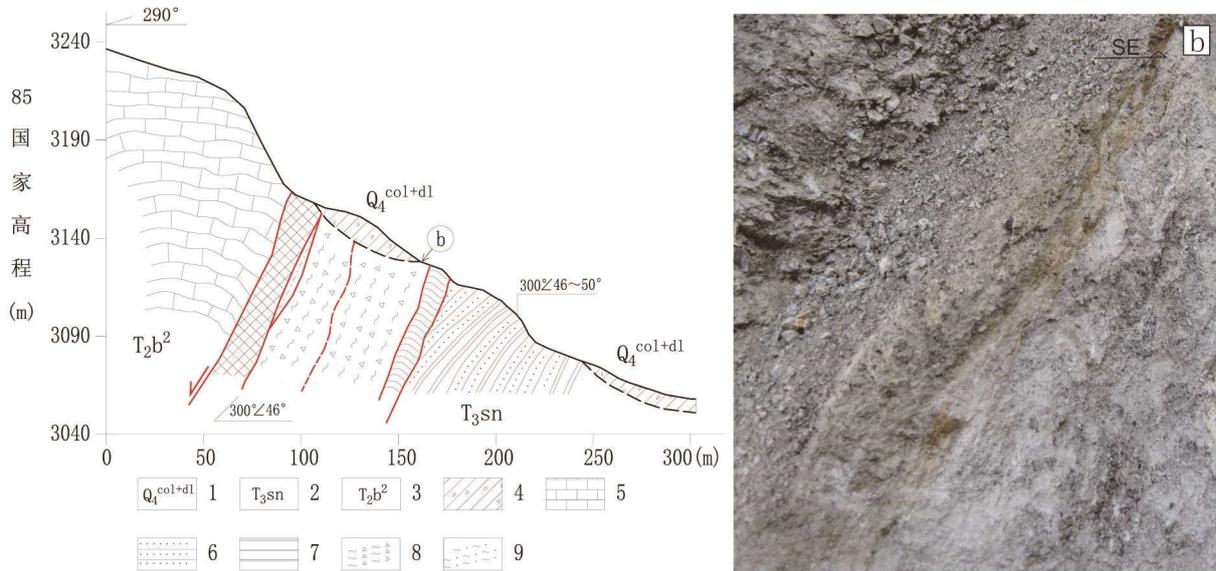
结,胶结较差角砾呈次棱角状,直径一般 3~6 cm, 状碎粉岩,遇水易崩解,岩体性状差。少量大于 10 cm。靠西侧断面部位有灰白色透镜体



- 1. 第四系残坡积物;2. 三叠系上统松桂组;3. 三叠系中统北衙组下段;4. 三叠系下统青天堡组;5. 砾质土;6. 粉砂岩;7. 页岩;8. 灰岩;9. 砂岩;
- 10. 角砾岩;11. 碎粒岩;12. 碎粉岩

图 2 鹤庆—洱源断裂东坡村东坡路 K4~K5 km 剖面图

Fig.2 Sketch map and field photograph showing cross-section of Heqing-Eryuan fault zone lying between milestone K4 and K5, Dongpo Road, eastern Heqing county



- 1. 第四系崩坡积物;2. 三叠系松桂组;3. 三叠系北衙组;4. 碎石土夹块石;5. 灰岩;6. 砂岩;7. 页岩;8. 断层角砾岩;9. 碎粉岩

图 3 鹤庆—洱源断裂上窝北西侧剖面图

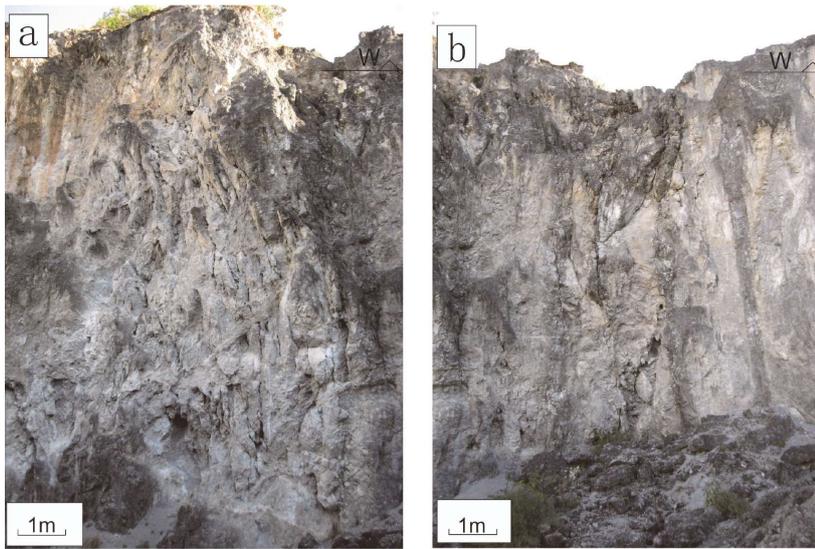
Fig.3 Sketch map and field photograph showing cross-section of Heqing-Eryuan fault zone lying in Shangwo village, Heqing county.

2.2.2 断裂的张性特征

丽江市玉龙县瓦窑村南华丰采砂场处揭露鹤庆盆地东边界—洱源盆地断裂,断裂走向 NE30°~NE60°,断面近直立,微倾向东,断层错断三叠系北衙组上段灰岩地层,断裂带宽度约 80 m,主断面旁侧陡立张性劈理发育(图 4),断裂带内构造岩为灰色角砾岩、碎粒岩,胶结差;该断裂后期活动切错了早期形成的角砾岩带,在角砾岩带内形成了剪切镜面及张性劈理密集带,断裂具多期活

动性。

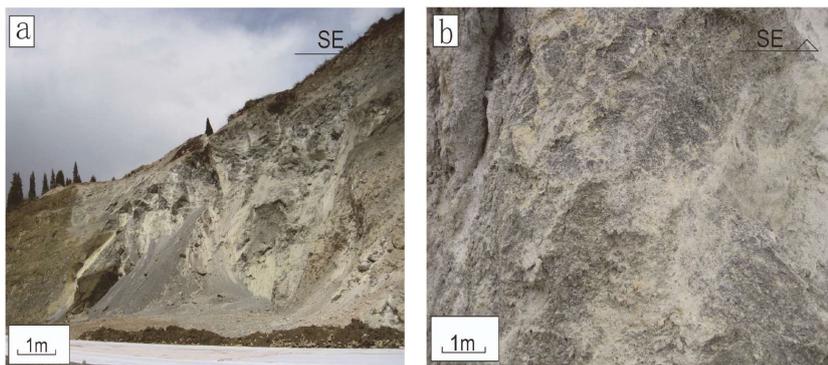
在线路南西洱源牛街、福田一带大丽高速开挖边坡揭露鹤庆盆地东边界—洱源盆地断裂(图 5),揭露处主断裂破碎带宽约 100 m,断裂带内构造岩为灰白色碎粒岩、碎粉岩,胶结差,遇水易软化,水冲易形成水砂流,碎粉岩、碎粒岩带内可见断裂活动剪切镜面。洱源牛街—三营一带沿该断裂带有温泉出露,温度一般 50 ℃~70 ℃,最高 88 ℃。



a:断裂拉张活动形成的张性劈理密集带;b:断裂拉张活动形成的楔形体

图4 鹤庆—洱源断裂东支(向南摄)

Fig.4 Field photograph showing eastern branch of Heqing-Eryuan Fault(to the south)



a:断裂活动形成的碎粒岩、碎粉岩带;b:碎粒岩、碎粉岩

图5 鹤庆—洱源断裂福田一带构造岩特征(向北东摄)

Fig.5 Characteristics of tectonic rocks in the Futian area of Heqing-Eryuan fault (to the northeast)

综上所述,鹤庆—洱源断裂带形成于早古生代,其后经历多次活动,沿线发育一系列自西北向东南的推覆构造和褶皱带,宽几十米~几百米。其中,鹤庆—洱源断裂带中段构造活动的时间主要从距今约 12 万年以来的晚更新世早期开始,一

直延续到晚更新世晚期以后,最新活动时代晚于距今 2 万年,在晚更新世早期(距今 10~5 万年)构造活动最为密集^[9]。新构造期以来,鹤庆—洱源断裂带断裂活动性质既表现为左旋走滑,又有张性正断层特征。左旋走滑表现在沿断裂发育的水系、

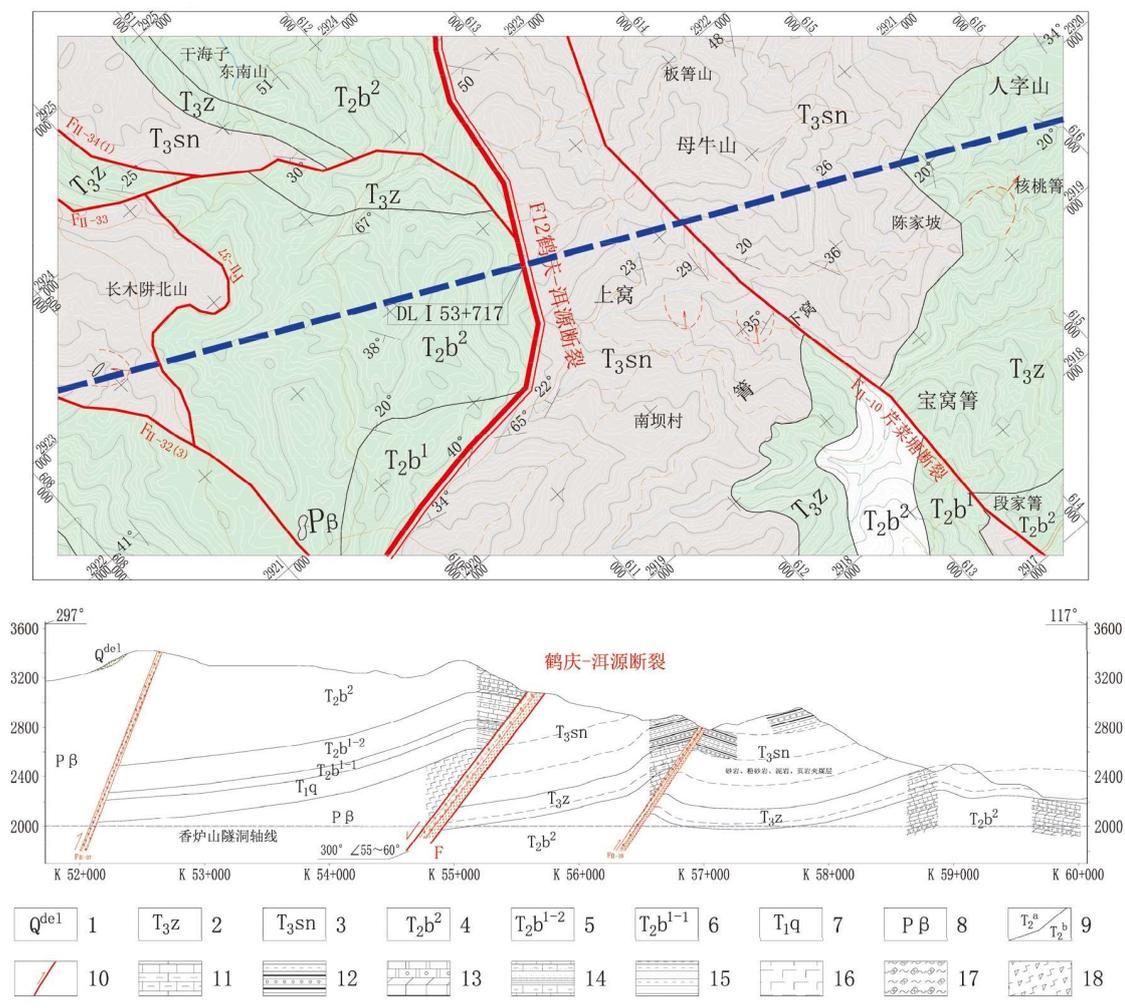
山脊、冲沟、洪积扇等被左旋扭错,张性活动表现在断裂带上的盆地附近第四纪正断层发育。鹤庆盆地南端文明村水库大坝附近见第四系中发育有正断层,新构造运动显示出强烈的差异升降特征^[27]。

3 断层活动速率对滇中引水工程的影响

活断层,意味着现在仍在活动,将来还会活动。断层并非持续表现为地震、滑动而没有间断,它常常存在平静期。理论上讲,现今构造应力场和岩石的强度极限决定了该断层是不是活动。但是现今构造应力场不易获得,强度极限也不容易获得。因此,可假定某一时段以来,构造应力场

未发生改变时,活动的持续活动,稳定的持续稳定。动者恒动,静者恒静。似乎这并非用发展的或者活动的眼光,而是用静止的眼光看问题。实则不然,这牵扯到的是一个时间分辨率问题。在一定的时间尺度,把某一区域内的构造活动看作一种近似于模式化的运动图像,对于现今工程实践是有帮助的。本次总结资料,以晚第四纪尤其是晚更新世以来作为活动断层的时限具有地层学和构造应力场的充足证据。

滇中引水工程香炉山隧洞在上窝、南坝一带穿过该鹤庆盆地东边界—洱源盆地断裂南段,输水线路与断裂相交部位桩号 DL I 53+747~53+912,线路轴线与断裂整体夹角约 72° (图 6)。



- 1.第四系滑坡堆积层;2.三叠系中窝组;3.三叠系松柱组;4.三叠系北衙组二段;5.三叠系北衙组一段上部;6.三叠系北衙组一段下部;7.三叠系青天堡组;8.二叠系玄武岩;9.地层界线;10.逆冲断层;11.灰岩、泥质灰岩;12.砂岩、泥岩、页岩、煤;13.灰岩、白云质灰岩;14.泥岩、灰岩互层;15.粉砂岩、泥岩、页岩互层;16.玄武岩;17.断层角砾岩;18.碎裂岩

图 6 鹤庆—洱源断裂展布及引水线路轴线剖面图
Fig.6 Heqing-Eryuan fault spreading and axis profile of water diversion line

据中国地震局地壳应力研究所 1:5 万活动断层填图成果,鹤庆盆地西边界栗雄卫断裂晚更新世以来的左旋位移速率为 2.2~2.5 mm/a,东边界断裂 2.5~3.0 mm/a。两条断裂的垂直位移速率约为 0.7~0.8 mm/a。沿该断裂带 1839 年在洱源盆地曾发生两次 6¹/₄ 级地震,该断裂为全新世活动断裂。本次研究在北长村一带获得断裂岩溶作用时代约 87 Ka,综合高程,计算得到的垂直平均滑动速率约为 2.4 mm/a,但这一活动位置处于盆地边缘,而非引水线路所经基岩山区段,显然偏大。

据中国地震局地质研究所完成的《滇中引水工程水源及总干渠线路活动断层鉴定报告》及前期勘察研究成果,鹤庆—洱源断裂带(F12)为全新世活动断裂,但其活动强度较龙蟠—乔后断裂带(F10)、丽江—剑川断裂带(F11)弱,但历史上在洱源附近发生过多 6<M<7 级地震,强震多集中在断裂南段牛街、三营及洱源盆地附近。

受区域构造的影响活动,鹤庆—洱源断裂带在不同时期有着不同的活动方式^[28]。断裂活动有时表现强烈,有时表现比较平静。研究鹤庆—洱源断裂断层的分段性活动方式、主断面几何学特征、活动断裂滑动速率、滑动量值及其滑动的力学机制及运动模式,为引水工程建筑物抗震及抗剪断措施设计提供地质学依据。

4 结语

(1)鹤庆—洱源断裂控制了区域盆山地貌和部分晚第四纪以来的地层分布,切割了早更新统以前的地层,且多处有温泉热水活动,断层错段了盆地边缘多条水系,表明其是一条新构造期仍在活动的断裂。在基岩山区,断裂常有新生方解石脉充填。本文通过对鹤庆—洱源断裂的野外露头及构造特征分析,查明了该断裂基岩区的地质地貌表现,在新构造期晚第四纪以来既有左旋走滑特征,又具有张性正断层活动特征。

(2)滇中引水工程穿越了鹤庆洱源断裂南段基岩基岩段,综合分析前人研究成果,结合该断裂带附近的地震活动特征分析,认为该断裂的活动对滇中引水工程有重要影响,尤其是晚更新世以来 Ca. 2 mm/a 的左旋滑动速率和 Ca. 2 mm/a 的垂直滑动速率对其有较大影响。因此,其活动习性、活动规模以及活动速率等应引起重视,做进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 瞿霜菊,黄辉,曹正浩. 云南省滇中引水工程规划研究[J]. 人民长江,2013,44(10):80-83.
- [2] 康艳蕊. 晚新生代以来鹤庆—洱源断裂带的地貌和沉积记录[D]. 北京:中国地震局地壳应力研究所,2014.
- [3] 沈晓明,李德文,孙昌斌,等. 鹤庆—洱源断裂带中段晚更新世以来的走滑活动[J]. 大地构造与成矿学,2016,40(1):29-37.
- [4] 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.
- [5] Sun C, Li D, Shen X, et al. Holocene activity evidence on the southeast boundary fault of Heqing basin, middle segment of Heqing -Eryuan fault zone, West Yunnan Province, China [J]. Journal of Mountain Science, 2017, 14(7):1445-1453.
- [6] England P, Molnar P. Right-lateral shear and rotation as the explanation for strike-slip faulting in eastern Tibet[J]. Nature, 1990, 344(6262):140-142.
- [7] Copley A. Kinematics and dynamics of the southeastern margin of the Tibetan Plateau [J]. Geophysical Journal International, 2008, 174(3):1081-1100.
- [8] Molnar P, Lyon -Caent H. Fault plane solutions of earthquakes and active tectonics of the Tibetan Plateau and its margins [J]. Geophysical Journal International, 1989, 99(1):123-153.
- [9] Royden L H. Surface Deformation and Lower Crustal Flow in Eastern Tibet[J]. Science, 1997, 276(5313):788-790.
- [10] 吴中海,龙长兴,范桃园,等. 青藏高原东南缘弧形旋扭活动构造体系及其动力学特征与机制[J]. 地质通报, 2015(1):1-31.
- [11] 徐锡伟,闻学泽,郑荣章,等. 川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源[J]. 中国科学 D 辑, 2003, 33(z1):151-162.
- [12] 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.
- [13] 张培震,王琪,马宗晋. 青藏高原现今构造变形特征与 GPS 速度场[J]. 地学前缘, 2002, 9(2):442-450.
- [14] Holt W E, Ni J F, Wallace T C, et al. The active tectonics of the eastern Himalayan syntaxis and surrounding regions [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1991, 96(B9):14595-14632.
- [15] Wang E, Burchfiel B C. Interpretation of Cenozoic tectonics in the right-lateral accommodation zone between the Ailao Shan shear zone and the eastern Himalayan syntaxis [J]. International Geology Review, 1997, 39(3):191-219.

- [16] Shen Z, Lv J, Wang M, et al. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2005, 110(B11).
- [17] 杨尖絮, 尹宏伟, 张震, 等. 滇西兰坪—思茅盆地成钾地质条件分析[J]. *大地构造与成矿学*, 2013, 37(4): 633-640.
- [18] 骆佳骥, 崔效锋, 胡幸平, 等. 川滇地区活动块体划分与现代构造应力场分区研究综述[J]. *地震研究*, 2012, 35(03): 309-317.
- [19] 苏有锦, 秦嘉政. 川滇地区强地震活动与区域新构造运动的关系[J]. *中国地震*, 2001(01): 24-34.
- [20] Wang E, Burchfiel B C, Royden L H, et al. Late Cenozoic Xianshuihe-Xiaojiang, Red River, and Dali fault systems of southwestern Sichuan and central Yunnan, China [J]. *Geological Society of America Special Paper*, 1998, 327: 1-108.
- [21] 韩竹军, 向宏发, 魏顺民. 滇西北丽江盆地北部区第四纪时期的左旋剪切拉张 [J]. *科学通报*, 2005, 56(04): 356-362.
- [22] 时振梁, 环文林, 张裕明, 等. 核电厂地震安全性评价中的地震构造研究[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [23] 刘光勋, 李方全, 李桂荣. 我国滇西北地震活动区的活动构造与应力状态[J]. *地震地质*, 1986(01): 1-14.
- [24] 李鼎容, 黄兴根, 王安德, 等. 滇西北第四系的划分[J]. *地质论评*, 1987, 33(2): 105-114, 1.
- [25] 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(02): 96-109.
- [26] 谢富仁, 祝景忠, 梁海庆, 等. 中国西南地区现代构造应力场基本特征[J]. *地震学报*, 1993, 15(04): 408-418.
- [27] 韩竹军, 徐杰, 向宏发, 等. 滇西北洱源、三营盆地的基本构造特征与形成机制[M] \ 国家地震局地质研究所. 活动断裂研究. 北京: 地震出版社, 1991.
- [28] 林爱文. 滇西洱源地区断裂构造及其新活动特征研究 [J]. *测绘信息与工程*, 1997, 22(2): 14-18.