李兴奥,何仲太,郭龙,等.历史遥感影像应用于小江断裂北段精细几何结构分析[J].地震工程学报,2026,48(5):1218-1227.DOI:10.20000/j.1000-0844.20250211001

LI Xing'ao,HE Zhongtai,GUO Long,et al.Historical remote sensing for analyzing the high-resolution geometric configuration of the northern segment of the Xiaojiang fault[J].China Earthquake Engineering Journal,2026,48(5):1218-1227.DOI:10.20000/j.1000-0844.20250211001

历史遥感影像应用于小江断裂北段精细几何结构分析

李兴奥[1],何仲太[1],郭 龙[1],李林林[2]

(1.中国地震局地质研究所 地震动力学与强震预测全国重点实验室,北京 100029;
2.应急管理部国家自然灾害防治研究院,北京 100085)

摘要:活动断裂的几何展布是评估其未来强震危险性的重要基础。历史航片和KeyHole(KH)卫星影像自20世纪以来积累并解密了大量瞬时影像数据,为研究活动断裂相关的地质构造、构造地貌及地貌演化过程提供了精确的数据支持。收集小江断裂北段区域的上述两种历史影像,构建一套完整的影像处理流程(包括拼接、配准与几何纠正),基于历史遥感影像解译活动断裂的微地貌特征,确定断裂的几何展布;结合遥感解译与野外地质调查,系统分析小江断裂北段的几何展布与微地貌错动特征。结果表明:小江断裂北段由间距2~4 km的近平行断裂组成,沿金沙江与小江河谷展布,形成线性沟谷地貌;沟谷内可见多处水系左旋错动或偏转现象,并控制山间盆地发育,在山前形成山间盆地或剥蚀面。此外,断裂带发育断层崖、拉分盆地等构造地貌,揭示其兼具水平走滑与垂向运动的复杂活动性。

关键词:小江断裂;活动构造;历史影像;遥感解译

中图分类号:P65 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-0844(2026)05-1218-10

DOI:10.20000/j.1000-0844.20250211001

Historical remote sensing for analyzing the high-resolution geometric configuration of the northern segment of the Xiaojiang fault

LI Xing'ao[1], HE Zhongtai[1], GUO Long[1], LI Linlin[2]

(*1.State Key Laboratory of Earthquake Dynamics and Forecasting, Institute of Geology, CEA, Beijing 100029, China;*
2.National Institute of Natural Hazards, Ministry of Emergency Management of China, Beijing 100085, China)

Abstract: The geometric distribution of active faults serves as a critical foundation for assessing their

收稿日期:2025-02-11

基金项目:大震震源探查项目(DZ5WTT202501,DZ5WLD202301);中国地震局地质研究所中央级公益性科研院所基本科研业务专项(IGCEA2507)

第一作者简介:李兴奥(2000-),男,博士研究生,主要从事活动构造工作。E-mail:lixingao2021@126.com。

通信作者:何仲太(1982-),男,研究员,主要从事活动构造工作。E-mail:hezhongtai@126.com。

potential seismic hazards. Since the last century, numerous instantaneous image data have been preserved and declassified from historical aerial photographs and KeyHole satellite imagery, providing accurate data support for assessing geological structures, tectonic landforms, and geomorphic evolution processes associated with active faults. Here, two types of historical images covering the northern segment of the Xiaojiang fault were processed, and a comprehensive image processing workflow comprising image mosaicking, registration, and geometric correction was developed. By interpreting the microgeomorphic features of the active fault from historical remote sensing images, the high-resolution geometric distribution of the fault was delineated. By integrating remote sensing interpretation with field geological investigations, the geometric configuration and microgeomorphic deformation characteristics of the northern segment of the Xiaojiang fault were systematically analyzed. Results indicated that this segment consisted of subparallel fault strands spaced 2—4 km apart. These strands extended along the Jinsha River and Xiaojiang River valleys, forming linear gullies. Within these linear gullies, numerous features indicative of left-lateral displacement or deflected drainage systems were observed. Moreover, these faults facilitated the development of intermountain basins, forming intermountain basins or erosional surfaces along the mountain front. Tectonic landforms, such as fault scarps and pull-apart basins, were also developed, revealing the complex fault activity involving horizontal strike-slip and vertical movements.

Keywords: Xiaojiang fault; active fault; historical images; remote sensing interpretation

0　引言

区域性活动断裂通常分布范围广、延伸长，受人工改造和植被覆盖等因素影响，传统调查方法难以高效地开展工作。遥感图像不仅可从宏观上展现活动断层的影像全貌，还能直观揭示断裂活动的细节信息，为分析发震构造、强震孕育地段、断裂活动状态及其与地震活动的关系等提供丰富的信息[1-2]。与传统方法相比，遥感研究克服了地形、气候以及调查人员主观因素等局限，能够更加全面、精确地捕捉断层迹线及其活动特征。历史遥感影像（包括锁眼卫星影像与早期航片）在活动断层研究中被广泛采用，其高分辨率（1.8～2.0 m）与早期成像时间（20 世纪 60—70 年代）有效保留了城镇化前的地貌特征。前人基于历史航片分析，提出了相关解译原则：寻找异常地貌（如反向坎、水系异常弯曲）、区分线性构造与活动断层、合理连接断层迹线（推测连接需结合地貌证据）[3]。历史航片的应用包括重建数字高程模型（Digital Elevation Model，DEM）和正射影像（Digital Orthophoto Map，DOM）[4]，以及恢复隐伏断层的几何展布。前人对锁眼卫星数据的研究集中在东部地区，主要利用其识别断裂的构造微地貌（如断层陡坎、断层槽谷），并提出冲沟位错复位法以量化断层活动参数[5-6]。结合历史影像分析，可以弥补现代地形数据因城市化和人为活动导致的地表信息缺失。此外，断层的长期活动常在沿线塑造出多种构造地貌，表现为断层两侧显著的地貌差异、局部扭曲变形以及水系同步改变等。这些特征在遥感图像中多表现为线性构造，可以被识别出来。

小江断裂北段沿金沙江展布，曾发生 1733 年东川 7¾ 级地震。该地震地表破裂长，释放能量大，震害严重。小江断裂北段内建有白鹤滩水电站等大型工程，加之现今河谷区域的冲积平原多存在村庄，破坏了原始地貌，导致获取原始微地貌地表形态存在困难。历史遥感影像保留了未受或较少受人类活动影响的原始地表信息，通过影像数据处理可获得断层附近的原始地形地貌[4]。基于历史影像分析，可以获得活动断层的哪些信息？对历史影像的详细解译能否精确确定断层迹线？本文以小江断裂北段为例，对上述问题进行探讨。

1　研究区构造背景

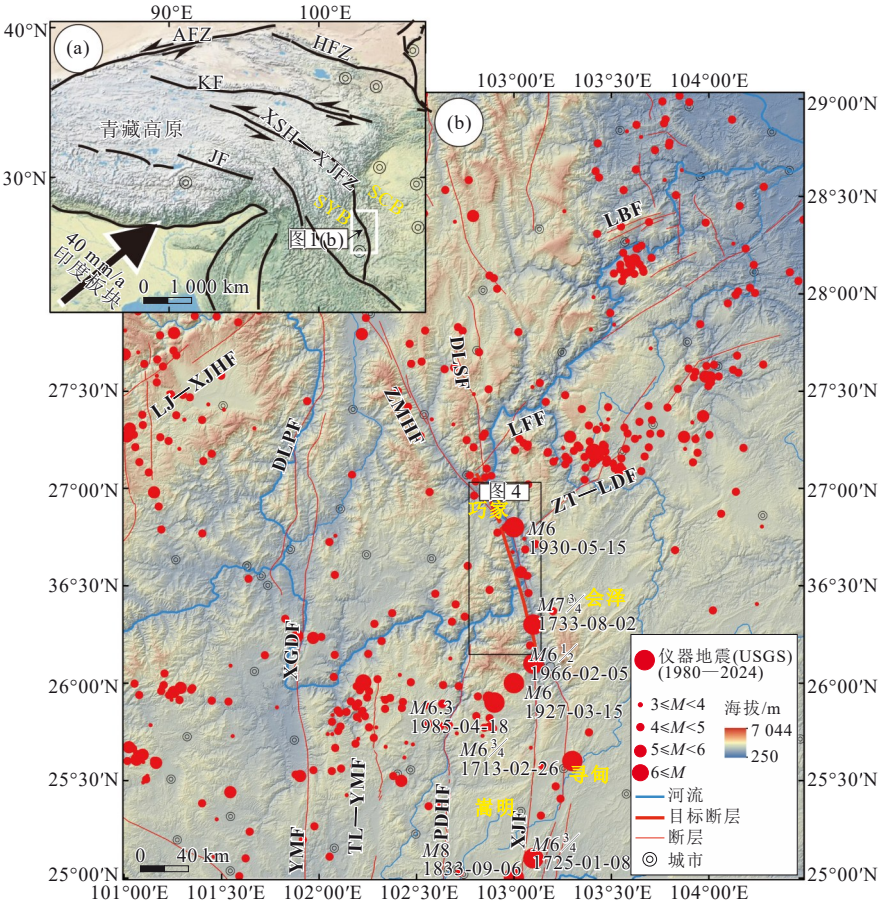
如图 1 所示，川滇块体位于青藏高原东南缘，东部与华南地块接壤。印度板块与欧亚板块的汇聚和挤压作用，导致青藏高原抬升，推动川滇块体向 S-SE 方向移动[7-8]。川滇块体东南部发育两组走向分别为近 NS 向和 NW-WNW 向的活动断裂，其中

近NS向断裂主要由小江断裂带组成。小江断裂带内部断层交错，全长约400 km，以左旋走滑为主要运动特征，整体呈东向微凸的弧形展布[9-11]。已有研究表明，川滇块体以3～5 mm/a的速率向东南方向运动[12]，相对于华南块体，其SE向挤出分量约为20 mm/a[13]。

小江断裂带的形成可追溯至中元古代末期的晋宁运动[14]。经历长期地质演化，特别是新生代以来多次喜马拉雅造山运动的影响，青藏高原的强烈隆升驱动川滇菱形块体向东挤压[15-16]。随着地质构造的不断演变，川滇菱形块体在区域应力作用下持续向S-SE方向运动，导致其东边界小江断裂的活动性质由挤压转变为左旋走滑兼具逆冲特征[17]。小江断裂带北段起于巧家县城北，往SSE方向延伸，沿金沙江及小江河谷展布[18-19]。晚第四纪以来，该段断裂活动主要表现为左旋走滑，沿线发育水系、山脊和地质体的左旋位错现象，沿断裂带可见清晰的断层槽谷、陡崖及沿断裂纵向发育的断陷盆地等构造地貌[17]。走滑断裂系中的几何复杂段落可以影响大地震破裂的起始、扩展和结束，并最终决定大地震的破裂长度和最大震级[20]。小江断裂带几何结构研究的特殊作用主要体现为：其北段走向偏转所形成的构造屏障，通过几何弯曲部位的应力分异和拉分盆地的能量吸收，有效阻隔了东边界断裂（如则木河断裂）大地震破裂的跨段传播，形成持久性的分段边界[20]。

2 数据和方法

本研究使用的遥感数据包括KeyHole-4B（KH-4B）卫星图像、历史航片及Google Earth影像。KH

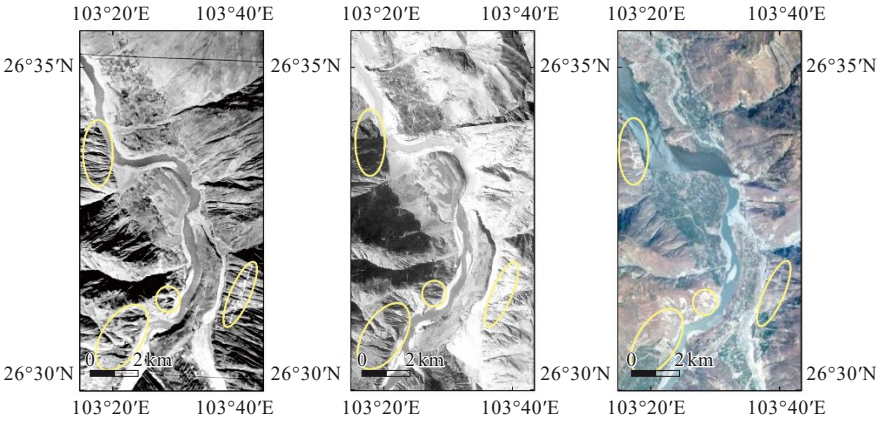


LJ—XJHF：丽江—小金河断裂；DLPF：得力铺断裂；XGDF：西格达断裂；YMF：元谋断裂；TL—YMF：汤朗—易门断裂；LBF：雷波断裂；PDHF：普渡河断裂；ZT—LDF：昭通—鲁甸断裂；ZMHF：则木河断裂；LFF：莲峰断裂；XJF：小江断裂；DLSF：大凉山断裂；AFZ：阿尔金断裂带；HFZ：海源断裂带；KF：昆仑断裂；XSH—XJFZ：鲜水河—小江断裂带；JF：嘉黎断裂；SYB：川滇块体；SCB：华南块体

图1 区域构造背景

Fig. 1 Regional tectonic setting

系列卫星为美国照相侦察卫星，国内解密的历史数据主要来源于20世纪80年代末期拍摄的影像[4]。KH-4B影像为条带式黑白全色影像，一景影像通常分为a、b、c、d四个部分，每个部分均为单独的TIFF格式文件，大小约300 MB[4]。本文所用KH-4B图像拍摄于1968年（数据来源：https://earthexplorer.usgs.gov/），分辨率约1.8 m。主要技术参数包括：胶片式相机，70 mm底片；全色波段成像（黑白）；焦距61 mm；名义轨道高度150 km[5]。所选历史航片拍摄于20世纪50年代，分辨率约2 m。受限于航片数据年代久远，收集到的资料并不全面，但仍覆盖了大部分研究区。部分研究区位于高山森林覆盖区，在选择遥感数据时优先选取落叶期（冬季）影像，以确保地表特征清晰可见[21]；同时，尽量选取云量较小且云层分布远离断裂带的影像，以减少云层对图像质量的影响，保证数据的准确性和可用性。本研究采用挑选出的美国KH卫星影像和历史航片（图2），对小江断裂北段的构造地貌与断层迹线进行遥感解译。此类历史影像数据在活动断裂研究中已有成熟应用，如在沂沭断裂带的精细解译中效果良好[22]。



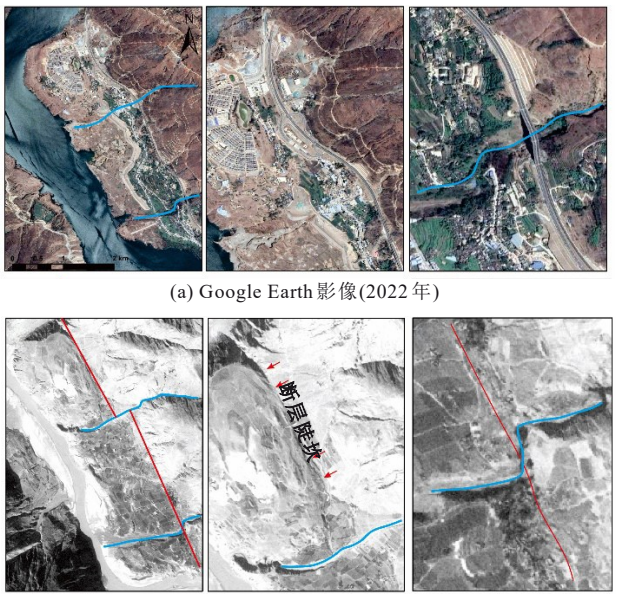
(a) KH-4B影像　(b) 历史航片　(c) Google Earth影像(2022年)

图2　历史影像对比

Fig. 2　Comparison of historical images

两种历史图像[图2(a)、(b)]记录了研究区未被城市化和机械化农业破坏的原始地貌（图2中黄色椭圆区域）。对比近期遥感影像[图2(c)]发现，河流两岸大部分区域地形地貌改造严重，河谷地区原始地貌破坏严重，山区部分冲沟因道路修建而受损。通过构造地貌影像对比（图3）发现，历史遥感影像[图3(b)]中可观测到明显的线性构造，断层两侧色调变化显著。图3(b)中解译出清晰的断层陡坎，而在现代影像[图3(a)]中该构造地貌已经被破坏。历史影像中显示的冲沟左旋位错更加明显，现代影像中冲沟下游多被破坏。

针对KeyHole影像的四个条带图幅，在遥感图像软件中先进行拼接、镶嵌与匀色处理，处理完成后裁剪出目标区域。以带有坐标的Google Earth影像为基准（所选Google Earth影像的拍摄时间尽量接近历史航片和KH影像拍摄时间），对裁剪后影像使用ArcGIS、ENVI等软件进行配准、纠正等处理[5]，制作出小江断裂北段的历史遥感影像图。处理步骤如下：(1)影像配准；(2)影像拼接；(3)几何



(a) Google Earth影像(2022年)

(b) KH卫星影像

图3　构造地貌影像对比（红色线代表断层，蓝色线代表冲沟）

Fig. 3　Comparison of tectonic landforms from remote sensing images (Red lines indicate faults, and blue lines indicate gullies)

纠正;(4)影像镶嵌。这些地物通常有清晰的视觉分界线,有助于减小拼接区域的不自然过渡,使边界不明显,镶嵌效果更加自然。应避免选择较为复杂或模糊的区域作为拼接线[4],镶嵌后需检查色差、几何准确性与纹理连续性。

历史航空照片的前期操作与KH卫星影像处理相似,最后在ArcGIS中,以已完成的KH-4B卫星影像为基准进行配准。

3 结果和分析

3.1 遥感解译断层几何展布

前人研究结果认为[10-11],小江断裂北段结构简单,地貌现象明显,在遥感影像上形迹较为单一且连续性好。根据历史影像图和遥感解译标志,解译得到小江断裂北段的断层展布(图4)。图中,红色线条代表断层,蓝色框表示大比例尺遥感解译位置,黄色五角星代表野外调查点位。

由图4可知,小江断裂北段由多条断裂组成,由北至南逐步演化为一组距离相近的断裂,总体上可分为两条近平行展布的断裂:东支和西支,两支相距2~4 km;沿断裂发育一系列随断裂走向线性分布的第四纪盆地。东支为巧家断裂,沿金沙江东岸展布;其地貌标志显著,控制河谷山麓转折带及山前第四纪盆地(如巧家盆地),在影像上表现为连续线性沟谷,两侧冲沟左旋位错普遍,局部发育断层三角面。西支主要在山体内分布,并向南延伸至小江断裂中段西支;历史影像揭示其左旋走滑特征,如山脊位错、断陷盆地及拉分构造。沿金沙江和小江河谷,河流侵蚀形成线性沟谷地貌,其中可见诸多水系左旋错动或偏转现象。河谷地区的山麓地形转折带主要受巧家断裂控制。该断裂同时控制山间盆地,在山前形成山间盆地或剥蚀面,是金沙江东侧山前地形的主控断裂。西支断裂主要在山体内展布,宏观地貌不如东支断裂显著,但山体内部冲沟保存较好且左旋特征明显。遥感解译结果亦显示,小江断裂北段不仅存在水平位移,还存在垂直位移。

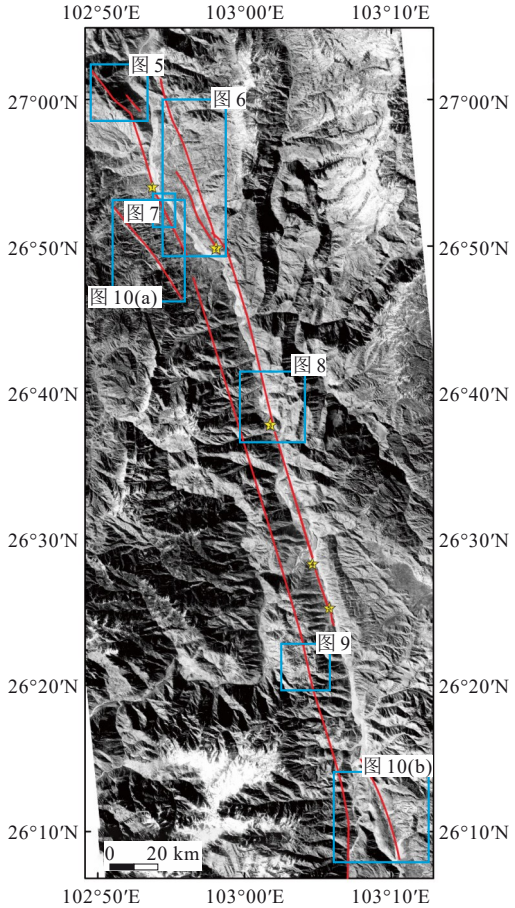


图4 小江断裂北段遥感解译图

Fig. 4 Remote sensing interpretation map of the northern segment of the Xiaojiang fault

为进一步揭示小江断裂北段的精细几何结构与运动特征,基于拼接配准后的高分辨率KH-4B卫星图像与历史航片,沿断裂带选取了6处典型构造地貌发育区(具体位置见图4),进行大比例尺局部放大与精细解译,结果如图5~10所示。这些局部影像图直观展示了断层迹线与地表微地貌的空间几何关系。图中红色线代表解译断层经过位置,蓝色线代表冲沟,黑色矩形框指示局部放大位置。

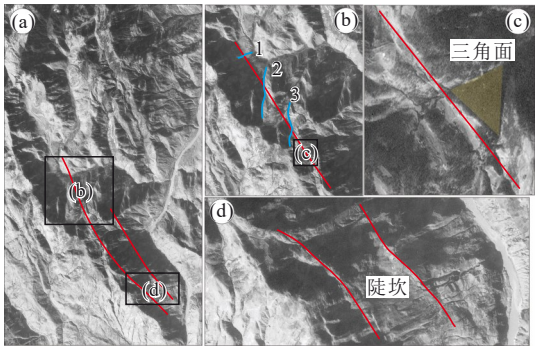


图5 典型断层三角面与冲沟左旋位错精细解译图

Fig. 5 Detailed interpretation map of typical fault scarps and left-lateral offset gullies

在图4西北部的局部解译区,可观察到明显的线性构造(图5)。该线性构造从北至南依次发育6个地貌判读点,且呈NW向沿伸至小江河谷,主要展布于山体内部,部分沿山前展布。断层西侧发育

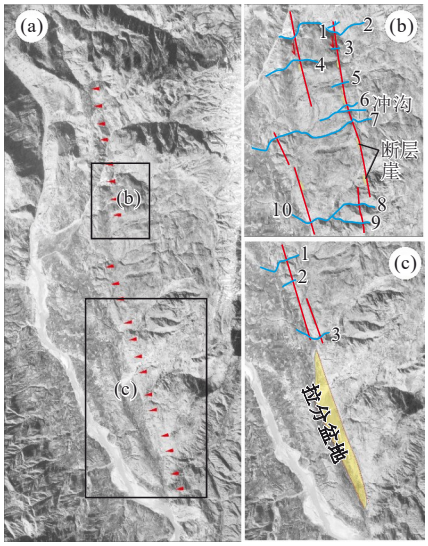


图 6　断层陡坎与拉分盆地构造精细解译图

Fig. 6　Detailed interpretation map of fault scarps and pull-apart basin structures

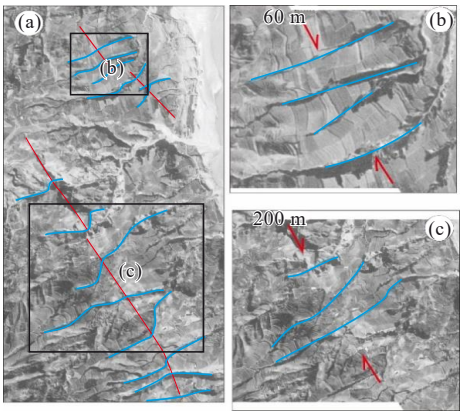


图 7　连续冲沟左旋位错及其位移恢复解译图

Fig. 7　Detailed interpretation map of continuous left-lateral offset gullies and their displacement restoration

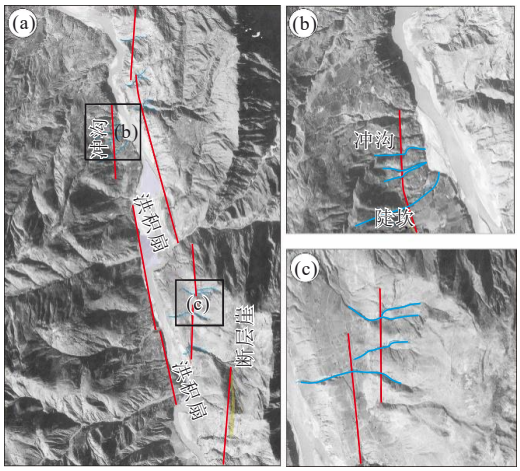


图 8　小江河谷段洪积扇错动与断层崖解译图

Fig. 8　Detailed interpretation map of displaced alluvial fans and fault scarps in the Xiaojiang River valley segments

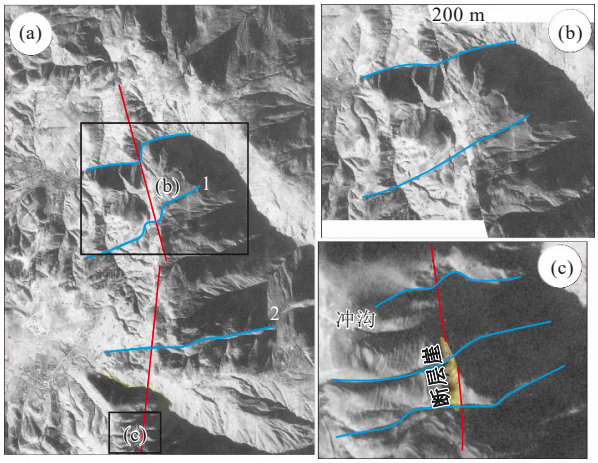


图 9　山间构造盆地水系扭曲与断层陡坎解译图

Fig. 9　Detailed interpretation map of drainage distortion and fault scarps in intermontane tectonic basin

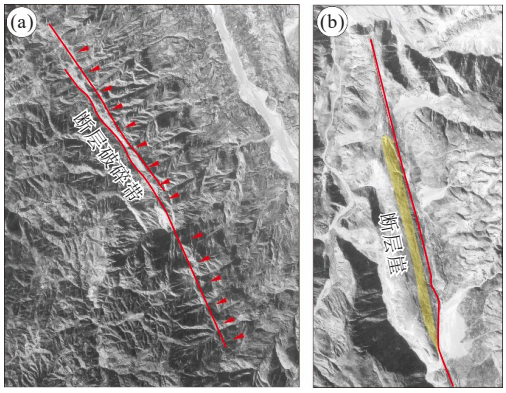


图 10　典型断层破碎带及线性断层崖特征解译图

Fig. 10　Detailed interpretation map of typical fault fracture zones and linear fault scarps

小型盆地。总体上，断层东盘为抬升盘，西盘为下降盘，导致断层两侧地形呈现东高西低的特征。图 5(b)中可观测到明显的线性构造，沿该构造分布有 3 条冲沟位错(分别用 1、2、3 表示，后图同)，其中冲沟 1、2 的位错量约为 80 m，表明断层具有左旋走滑运动特征。部分区域[图 5(c)]发育明显的断层三角面，且三角面前缘线性构造清晰。图 5(d)中可见两条长约 1 km 的连续陡坎，据此判断存在两条近平行的断层。

在图 4 中部偏北的局部解译区，可观察到明显的线性构造(图 6)。该构造长约 15 km，呈 NNW 向并沿小江河谷展布，其位于西高东低的地形转换带，西侧为基岩山地，东侧为小型盆地。在该断层上选择两处解译点位，逐段解译断层地貌。

图 6(b)中点位展示出丰富的断层地貌特征：自北向南发育 7 处断层崖，陡崖陡立平直；断层东盘抬

升、西盘下降，形成东高西低的地貌。该点位发育一系列横向冲沟，跨断层共解译出10处水平位错。其中，2、3、5为小型冲沟，位错量较小，约25 m；1、7、10为大型冲沟，位错量较大，均可观测到两处明显的左旋位错。大型冲沟经历的地震次数更多，积累的位错量更大，反映多期次走滑活动。结合冲沟4和10附近发育的断层崖，推断该点位应由两条小型断层组成。在冲沟6的尽头，尽管该点似乎指示断层的左旋运动，但冲沟6和7之间的地貌上未发现断层地貌特征，因此推断断层迹线并未穿过冲沟7。

图6(c)中，两条断层在拉张弯曲(即剪切拉张)部位形成一个小型拉分盆地。盆地长轴方向与断层走向一致，长约8 km；短轴较短，约850 m。冲沟3发育两处左旋位错，对应拉分盆地边缘的两条断层；冲沟1仅发育一处位错。在冲沟1和2之间，断层汇聚为一条断裂。

在图4中部的西侧解译区，可观测到连续的冲沟左旋位错(图7)。图7(b)、(c)展示了位错恢复结果。图7(b)中，4条小型冲沟构成复杂水系，通过系统性一次复位可获得相对一致的位移量(约60 m)。图7(c)中可见3条大型冲沟，同样可通过系统性一次复位获得位移量(约200 m)。通过对不同冲沟进行位移恢复，可得到不同大小的位错量，对其进行统计分析，可以进一步揭示断裂的活动特征。

在图4中部的东侧解译区，断层主要沿小江河谷展布，走向大体为NNW向(图8)。图8(a)中，两处大型河流洪积扇呈不对称形态，北侧堆积明显大于南侧，甚至在洪积扇北侧的小江河流中可见类似扇体堆积，据此判断原始洪积扇被小江断裂左旋错动至该处。图8(b)中，西侧山区可观测到连续的冲沟位错，并伴随断层陡坎发育。如图8(c)所示，东侧小江河谷平原上发育多条冲沟左旋位错，西侧山区部分区域发育断层崖，断层呈雁列式展布。

在图4偏南的解译区，断层主要沿山内小型盆地展布，主要表现为断层崖、水系位错及盆地面倾斜(图9)。如图9(a)所示，断层东侧构造抬升、西侧下降，形成小型构造盆地；受左旋错动造成的局部挤压影响，断层西盘的河流1呈S型扭转。此外，断层东盘的抬升迫使河流2强烈下切，导致该河流两侧坡度较陡。图9(b)中，两条冲沟统一进行位移恢复，位错量约为200 m。图9(c)中显著地貌为断层崖，地形呈现东高西低的特征，3条小型冲沟在断层崖处发育左旋位错。

位于图4南端的解译区(图10)中，可见明显线性构造在山内展布。一套清晰的白色线状带发育其中，判断为断层破碎带，破碎带两侧可见明显陡坎地貌。图10(b)中，线性构造十分明显，判断为断层崖，两侧色调对比明显：西侧呈暗黑色，为基岩线形山地；东侧呈灰白色平原地貌，发育第四系冲洪积物。

3.2 小江断裂北段野外地质调查

为验证上述解译结果，沿小江断裂北段开展野外地质调查，共设置5个典型调查点位，针对性地进行构造地貌分析与断层露头绘制，以揭示该断层的活动特征。

野外调查点1(26°51′41.22″N，102°54′26.51″E)位于金沙江西侧，属于解译所得的小江断裂西支(图4)。图11(a)、(d)中，层①为盖层黄土；层②为上盘黄土，无明显层理，含砂；层③为下盘黄土，无层理，含砂，中部含团块状砂层。断层面发育于黄土地层中，倾角66°，走向约300°，与解译断层走向接近。沿断层面发育灰褐色粉砂及粉细砂，断层两侧土体为黄褐色黏土，无明显层理，无法判断两侧位移量。

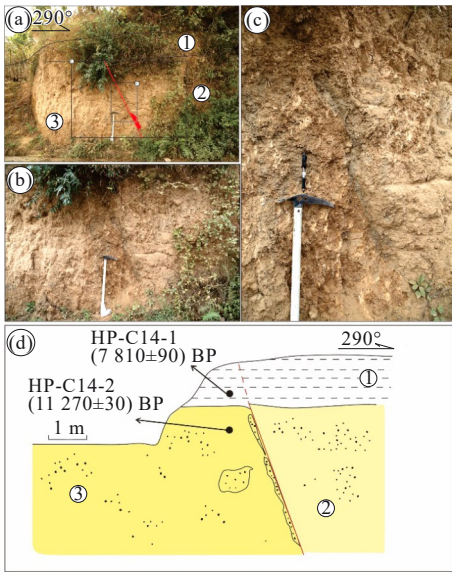


图11 野外调查点1断层露头剖面图

Fig. 11 Fault outcrop profile of field survey site 1

野外调查点2为巧家调查点(26°50′58.13″N，102°57′48.79″E)，其断层露头剖面图(图12)修改自文献[18]。该点位断层未断错至地表，断层面两侧地层明显不同。

野外调查点3(26°47′6.87″N，102°58′38.89″E)位于金沙江阶地上。如图13(a)所示，该点位发育

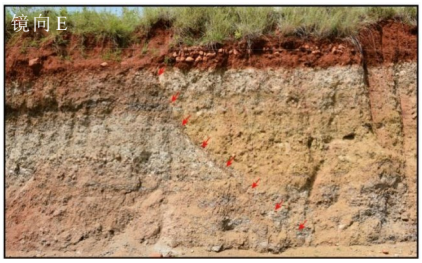


图 12　野外调查点 2 断层露头剖面图（修改自文献[18]）

Fig. 12　Fault outcrop profile of field survey site 2 (modified from reference [18])

温泉，温泉泉眼处发育金沙江 T_3 阶地，砾石磨圆度较好。图 13(b)中，金沙江 T_2 阶地上发育线性槽谷，判断为断层经过。该槽谷在历史影像上清晰可见，现今虽可判断为线性槽谷，但已不明显，原因是受到人工水池修建等人类活动的破坏。

野外调查点 4 的坐标为 26°29′38.83″N，103°3′32.74″E。图 14 中，F_1 断层错断 U2 底部，U2 顶部无明显变化，图中所有断层均未错断表层 U1。F_1 为该露头的主要断裂，表现为正断层。整个露头剖面上发育多个地震楔，大部分断层发育在基岩中，其中 F_1、F_2、F_{11} 三条断层均错断了 U4 洪积物砾石层。U4 胶结程度低，判断为第四纪洪积物。

野外调查点 5 的坐标为 26°26′32.55″N，103°

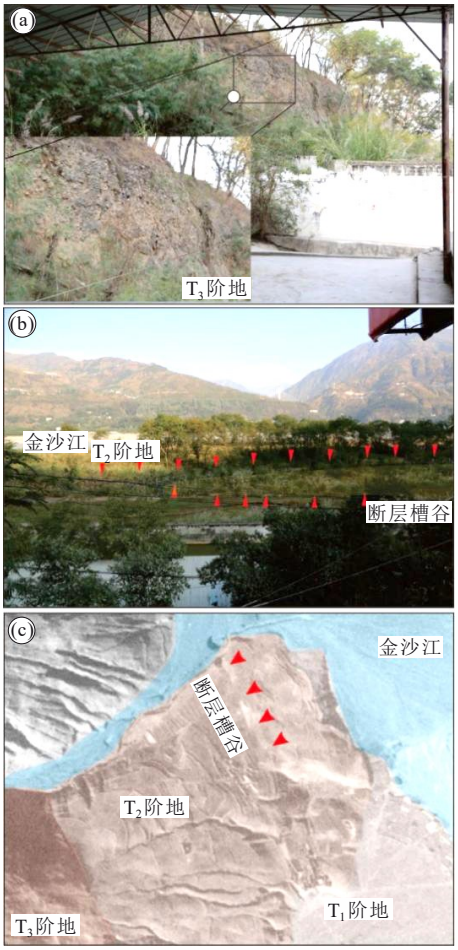


图 13　野外调查点 3 断层地貌图

Fig. 13　Fault geomorphology of field survey site 3

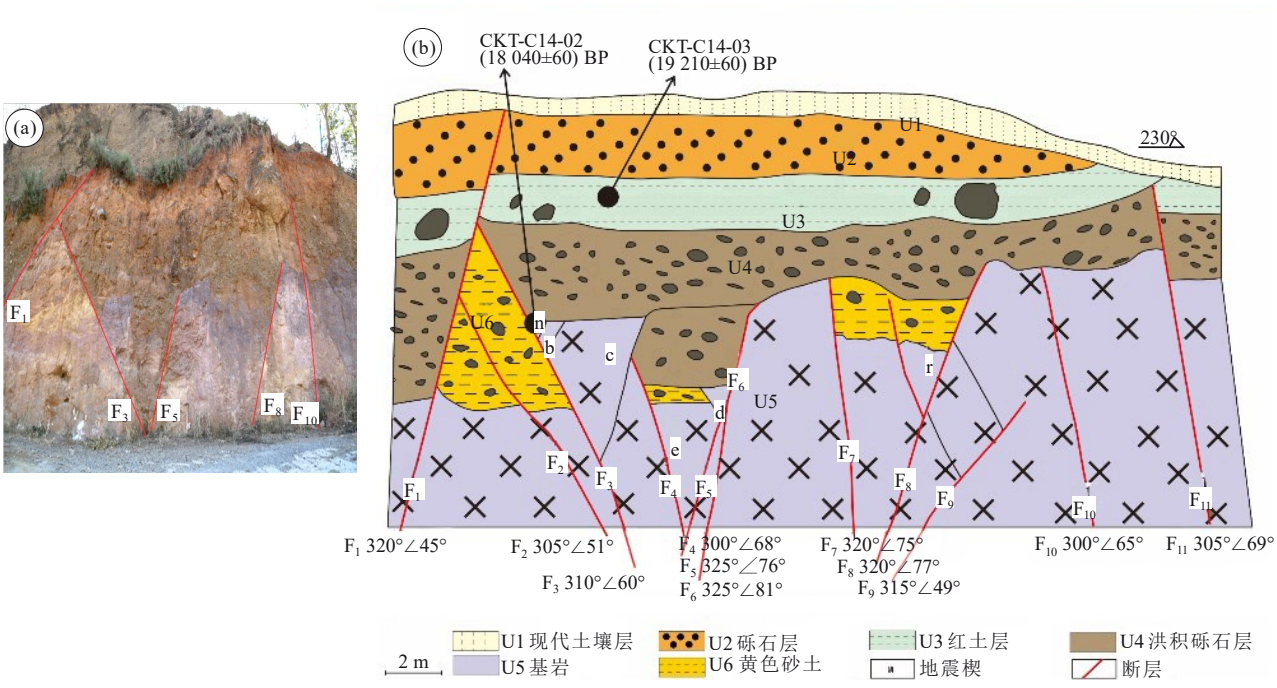


图 14　野外调查点 4 断层剖面图

Fig. 14　Fault profile of field survey site 4

4′16.09″E。如图15所示，断层F_1断错至地表，地表无陡坎发育。该断层从上至下发育4个地震楔，可能代表4次古地震事件。断层F_6、F_7在该剖面上均表现为正断层，其中层U1垂直断距约2 m，地表对应位置发育高约2.5 m的陡坎。被断错的U3为橘色黏土砾石层，砾石磨圆度较差。

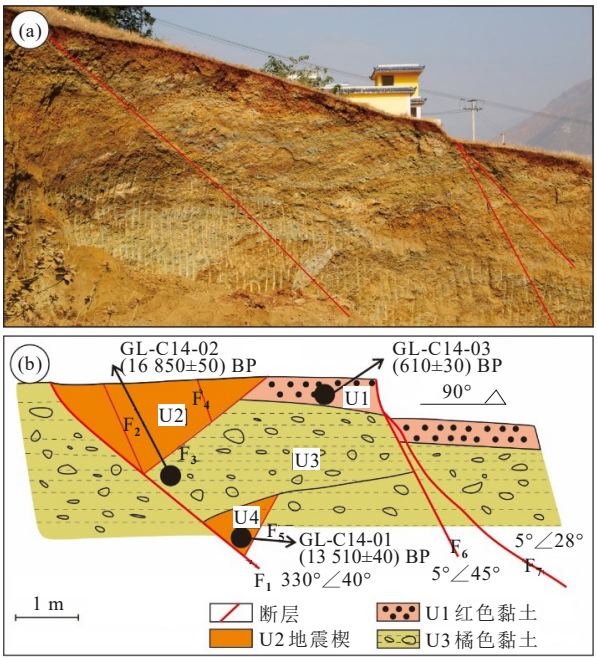


图15 野外调查点5断层剖面图

Fig. 15 Fault profile of field survey site 5

4 结论

本文介绍了历史航片及KH-4B卫星数据的基本处理流程，通过对上述资料的处理，对小江断裂北段进行解译，识别了断层解译标志，并结合野外地质调查发现的露头与地貌现象，对解译结果加以验证，最终获得了小江断裂北段的原始地形地貌与精细几何展布。相较于传统地貌调查方法，历史影像的高分辨率与早期成像特性有效恢复了城镇化前已遭破坏的构造地貌，为走滑断裂系统的精细解析提供了新视角，表明历史遥感影像可用于断层的精细解译。KH卫星影像和历史航片提供了丰富的瞬时影像数据，保存了断层活动留下的各种地貌痕迹，在断层解译研究中有重要价值；同时，可将历史影像与现阶段高分辨率的亚米级遥感影像相结合，开展活动断层的定量化研究。

前人研究认为，小江断裂北段结构简单，地貌现象明显，在遥感影像上形迹较为单一且连续性好。本文的遥感解译结果显示：

（1）小江断裂北段由多条断裂组成，由北至南逐步演化成一组相距2～4 km、近平行展布的断裂，大体沿金沙江河谷和小江河谷展布，其左旋走滑运动伴随显著的垂直位移分量。

（2）沿断裂发育一系列顺断裂走向线性分布的第四纪盆地。断层沿线地貌主要表现为多处左旋位错冲沟，其位错量存在多级差异（25～400 m），并发育沿山前分布的线性沟谷与断层崖。

参考文献（References）

[1] 谢广林. 中国活动断裂遥感信息分析[M]. 北京：地震出版社，2000.
XIE Guanglin. Analysis of remote sensing information of active faults in China[M]. Beijing: Seismological Press, 2000.

[2] 王阳明，张景发，刘智荣，等. 基于多源遥感数据西藏山南地区活动断层解译[J]. 国土资源遥感，2018，30(3)：230-237.
WANG Yangming, ZHANG Jingfa, LIU Zhirong, et al. Active faults interpretation of Shannan area in Tibet based on multi-source remote sensing data[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2018, 30(3): 230-237.

[3] 何宏林. 活动断层填图中的航片解译问题[J]. 地震地质，2011，33(4)：938-950.
HE Honglin. Some problems of aerial photo interpretation in active fault mapping[J]. Seismology and Geology, 2011, 33(4): 938-950.

[4] 郭菲，任俊杰，郭慧，等. 基于历史航卫片的城市“隐形”活动断层精确定位：以大同盆地水峪断裂为例[J]. 地质力学学报，2021，27(2)：254-266.
GUO Fei, REN Junjie, GUO Hui, et al. Using historical aerial images to accurately locate the urban “invisible” active faults: a case study of the Shuiyu fault of the Datong Basin in Shanxi Province[J]. Journal of Geomechanics, 2021, 27(2): 254-266.

[5] 王鑫，张景发，姜文亮，等. 美国锁眼侦查卫星遥感数据在活动断层研究中的应用：以郯庐断裂带江苏段为例[J]. 遥感学报，2018，22(增刊1)：233-246.
WANG Xin, ZHANG Jingfa, JIANG Wenliang, et al. Application of Keyhole satellite data in active fault study: a case example of Jiangsu segment of Tan-Lu fault zone[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2018, 22(Suppl01): 233-246.

[6] 焦其松，张景发，姜文亮，等. KH-4B卫星数据在城镇周边活动断层解译中的应用[J]. 科学技术与工程，2015，15(14)：110-115.
JIAO Qisong, ZHANG Jingfa, JIANG Wenliang, et al. KH-4B images using in the active faults interpretation around urban area[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(14): 110-115.

[7] SCHOENBOHM L M, BURCHFIEL B C, CHEN L Z. Propagation of surface uplift, lower crustal flow, and Cenozoic

tectonics of the southeast margin of the Tibetan Plateau[J]. Geology, 2006, 34(10): 813.

[8] WANG E, BURCHFIEL B C. Late Cenozoic to Holocene deformation in southwestern Sichuan and adjacent Yunnan, China, and its role in formation of the southeastern part of the Tibetan Plateau[J]. Geological Society of America Bulletin, 2000, 112(3): 413-423.

[9] 韩竹军，董绍鹏，毛泽斌，等. 小江断裂带南段全新世活动的地质地貌证据与滑动速率[J]. 地震地质，2017，39(1)：1-19.
HAN Zhujun, DONG Shaopeng, MAO Zebin, et al. The Holocene activity and strike-slip rate of the southern segment of Xiaojiang fault in the southeastern Yunnan region, China[J]. Seismology and Geology, 2017, 39(1): 1-19.

[10] 宋方敏，汪一鹏. 中国活断层研究专辑：小江活动断裂带[M]. 北京：地震出版社，1998.
SONG Fangmin, WANG Yipeng. China active fault research album: Xiaojiang active fault zone[M]. Beijing: Seismological Press, 1998.

[11] 谭鑫，梁宽，马保起. 小江断裂带晚第四纪活动研究综述[J]. 震灾防御技术，2023，18(4)：757-772.
TAN Xin, LIANG Kuan, MA Baoqi. A review of research progress on the Late Quaternary activities of the Xiaojiang fault zone[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2023, 18(4): 757-772.

[12] BURCHFIEL B C, WANG E. Northwest-trending, Middle Cenozoic, left-lateral faults in southern Yunnan, China, and their tectonic significance[J]. Journal of Structural Geology, 2003, 25(5): 781-792.

[13] ZHANG P Z, SHEN Z K, WANG M, et al. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data[J]. Geology, 2004, 32(9): 809.

[14] 张朝坤，韩倩，何龙. 四川布拖地区小江断裂带构造特征及其演化[J]. 四川有色金属，2018(2)：19-22，50.
ZHANG |Zhaokun, HAN Qian, HE Long. Structural characteristics and evolution of the Xiaojiang fault zone in Butuo area, Sichuan Province[J]. Sichuan Nonferrous Metals, 2018(2): 19-22, 50.

[15] 李君，王勤彩，崔子健，等. 川滇菱形块体东边界及邻区震源机制解与构造应力场空间分布特征[J]. 地震地质，2019，41(6)：1395-1412.
LI Jun, WANG Qincai, CUI Zijian, et al. Characteristics of focal mechanisms and stress field in the eastern boundary of Sichuan—Yunnan Block and its adjacent area[J]. Seismology and Geology, 2019, 41(6): 1395-1412.

[16] 余年，王绪本，李德伟，等. 小江断裂带系统深部物质运移机制及孕震环境：来自大地电磁阵列数据的证据[J]. 中国科学：地球科学，2022，52(6)：1132-1150.
YU Nian, WANG Xuben, LI Dewei, et al. Mechanism of deep material migration and seismogenic environment in Xiaojiang fault zone system: evidence from magnetotelluric array data[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2022, 52(6): 1132-1150.

[17] 张欣. 小江断裂中北段活动性及其致灾效应研究[D]. 成都：成都理工大学，2019.
ZHANG Xin. Study on the activity and disaster-causing effects of the middle and northern sections of Xiaojiang fracture[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.

[18] 台梓含，向芳，程万强，等. 巧家盆地第四纪洪积物沉积阶段及其对小江断裂带北段活动性的指示[J]. 成都理工大学学报(自然科学版)，2024，51(3)：418-427.
TAI Zihan, XIANG Fang, CHENG Wanqiang, et al. Quaternary activity in the northern section of the Xiaojiang fault zone[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2024, 51(3): 418-427.

[19] 李凯，李家存，马晓雪，等. 多源遥感影像在活动断裂研究中的应用：以小江断裂带为例[J]. 城市地质，2020，15(3)：342-350.
LI Kai, LI Jiacun, MA Xiaoxue, et al. The application of multi-source remote sensing image in the study of active faults: taking Xiaojiang fault zone as an example[J]. Urban Geology, 2020, 15(3): 342-350.

[20] 王明明，陈翰，李圣. 则木河、大凉山和小江断裂交会区断裂几何展布及运动特征研究[J]. 地震学报，2024，46(6)：969-981.
WANG Mingming, CHEN Han, LI Sheng. Study on the geometric distribution and active characteristics of faults in the intersection area of the Zemuhe fault, the Daliangshan fault and the Xiaojiang fault[J]. Acta Seismologica Sinica, 2024, 46(6): 969-981.

[21] 张波，王爱国，袁道阳，等. 基于多源遥感解译和野外验证的断裂几何展布：以西秦岭光盖山—迭山南麓断裂为例[J]. 地震地质，2018，40(5)：1018-1039.
ZHANG Bo, WANG Aiguo, YUAN Daoyang, et al. Fault geometry defined by multiple remote sensing images interpretation and field verification: a case study from southern Guanggaishan—Dieshan fault, western Qinling[J]. Seismology and Geology, 2018, 40(5): 1018-1039.

[22] JIANG W L, ZHANG J F, HAN Z J, et al. Characteristic slip of strong earthquakes along the yishu fault zone in East China evidenced by offset landforms[J]. Tectonics, 2017, 36(10): 1947-1965.

（本文编辑：赵乘程）