

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

台梓含¹, 向芳², 程万强³, 王运生⁴, 黄恒旭², 宋良⁴, 周宇航⁴

1. 云南省地震局, 昆明 650224;

2. 油气藏地质及开发工程全国重点实验室(成都理工大学), 成都 610059;

3. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 311122;

4. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 成都 610059

[摘要] 通过对巧家盆地第四纪洪积物沉积阶段及其沉积年代进行分析, 为小江断裂带北段第四纪活动性研究提供沉积学证据。研究结果表明: 巧家盆地形成于早更新世中期, 平均断陷速率为 0.59 m/ka, 共发育了 5 个洪积相沉积层。第四纪以来小江断裂带北段处于构造平静期与活跃期相互交替的阶段, 期间共经历了早更新世中期~1.6 Ma, 0.81~0.79 Ma, 0.65~0.59 Ma, 0.48~0.4 Ma, 0.12 Ma 至今等 5 期构造活跃期, 其中 0.48~0.4 Ma 和 0.12 Ma 至今为小江断裂带北段构造活动最强烈的阶段。小江断裂带北段活动性与新构造运动过程有着密切的成因联系, 受控于青藏高原东南缘持续的侧向扩展挤出作用, 但相较于断裂带中段活动性偏弱。

[关键词] 巧家盆地; 洪积物; 小江断裂带北段; 构造活跃期; 断陷速率

[分类号] P534.63

[文献标志码] A

Quaternary activity in the northern section of the Xiaojiang fault zone

TAI Zihan¹, XIANG Fang², CHENG Wanqiang³, WANG Yunsheng⁴,
HUANG Hengxu², SONG Liang⁴, ZHOU Yuhang⁴

1. Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, China;

2. State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

3. Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China;

4. State Key Laboratory Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: In this study, we analyze sedimentary stages in the Quaternary diluvium and its time of

[收稿日期] 2023-05-15。

[基金项目] 国家自然科学基金项目(42272123, 41972101); 云南省重点研发计划(202203AC100003)。

[第一作者] 台梓含(1993—), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向: 第四纪地质、地震地质, E-mail: 1079621875@qq.com。

[通信作者] 向芳(1974—), 女, 教授, 研究方向: 沉积岩石学、岩相古地理、第四纪地质地貌, E-mail: cdxiangfang@126.com。

[引用格式] 台梓含, 向芳, 程万强, 等, 2024. 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), 51(3): 418-427.

Tai Z H, Xiang F, Cheng W Q, et al., 2024. Quaternary activity in the northern section of the Xiaojiang fault zone[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 51(3): 418-427.

deposition in the Qiaojia Basin to provide sedimentological evidence of Quaternary activity in the northern section of the Xiaojiang fault zone. The results show that the Qiaojia Basin was formed in the middle of the early Pleistocene, with an average rift rate of 0.59 m/ka, and this led to the development of five diluvial sedimentary layers. Since the Quaternary, the northern section of the Xiaojiang fault zone has undergone alternating stages of quiet and active periods of tectonic activity. Five periods of tectonic activity have occurred: From the middle of the early Pleistocene to 1.6 Ma, 0.81 to 0.79 Ma, 0.65 to 0.59 Ma, 0.48 to 0.4 Ma, and 0.12 Ma to the present. The period from 0.48 to 0.4 Ma and 0.12 Ma featured the most intense stages of tectonic activity in the northern section of the Xiaojiang fault zone. Activity in this section was closely related to the process of neotectonics, which was controlled in turn by continual lateral expansion and extrusion on the southeast edge of the Qinghai Tibet Plateau. However, this activity was weaker than that in the middle section of the fault zone.

Key words: Qiaojia Basin; diluvium; northern section of Xiaojiang fault zone; period of tectonic activity; rift rate

新生代以来,滇中以东地区沿小江断裂带发育了一系列拉分盆地,如巧家盆地、嵩明盆地、宜良盆地等,这些盆地形态大小、成因机制、结构构造及发育演化都各具特点(沈军等,1998;裴向军等,2019)。盆地内第四纪沉积物不但为盆地演化、古环境研究等提供了强有力的证据,也记录了小江断裂带新构造活动的阶段性和特征。目前,众多学者对于小江断裂带第四纪活动性研究已取得了丰富成果(张文甫,1994;宋方敏等,1997;沈军等,1998;He et al.,2002;李力,2015;张欣和王运生,2017;韩竹军等,2017;毛泽斌,2017;李西等,2018;郑立龙等,2019;张欣,2019;常玉巧等,2021)。前人通过野外勘察,从地形地貌特征、构造运动特征、矿物特征、滑动速率计算、沉积学特征和年代学等方面对小江断裂带第四纪活动性进行了探讨,均表明小江断裂带第四纪活动频繁,尤其晚第四纪以来活动强烈。但前人研究时限多集中于晚更新世—全新世,对于早、中更新世的讨论较少,且由于超深厚覆盖层取样的限制,来自小江断裂带北段直接的沉积学证据不够充分。

位于小江断裂带北段的巧家盆地,是上新世晚期/早更新世—中更新世形成的近椭圆状拉分断陷盆地(张文甫,1994;王双,2016;裴向军等,2019),最大沉积厚度超过700 m,是断裂带活动性研究的理想区域。盆地内第四纪沉积物记录了小江断裂带北段的长期活动性,深入研究有助于对未来活动性的预测。此外,巧家县城及其邻区处于白鹤滩水电站水库库区及洪积层之上,前缘为富含砂质的阶地,如果发生强烈构造活动,在地

震作用影响下可能造成严重后果(王双,2016),因此研究小江断裂带北段活动特征也具有重要现实意义。本文在前人研究基础上,根据巧家盆地获取的超700 m连续钻孔资料,系统地划分了巧家盆地形成后的洪积期次,并对沉积年代进行分析,探讨小江断裂带北段第四纪活动特征。

1 区域地质背景

巧家盆地地处川滇块体与华南板块分界线附近,位于小江断裂带北端与则木河断裂交接部,是川西高原、云贵高原与四川盆地交汇地带。主要包括金沙江右岸巧家县城及其邻区,呈北北西向的不规则长轴椭圆状,面积约36.26 km²,地势整体东高西低,山坡陡缓相间(图1)。巧家盆地的形成及沉积相、构造格架主要受到小江断裂带北段的控制。小江断裂带北段北起巧家县城以北,往南南东向延伸,主体沿金沙江、小江河谷展布,长度约60 km,走向340°~345°,结构较为单一,是以左旋走滑为主的活动断裂带,地貌上表现为河流沿断裂破碎带侵蚀而成的大型断层槽谷。此断裂带活动频繁、强度高、破坏性地震频发,是西南地区现今最活跃的区域性断层之一(王双,2016;张欣和王运生,2017;张欣,2019;裴向军等,2019)。区内金沙江自南向北流,河道较为平直,在东岸宽广的谷坡上发育了4级河流阶地,其中I~III级阶地发育较为完整,为堆积阶地,上覆于湖相沉积之上,湖相沉积之下为洪积堆积体;IV级阶地仅零星分布,为基座阶地或侵蚀阶地,基座为洪积堆积体,如图2所示(张文甫,1994;李郎平等,2009;刘芬良,2018;裴向军等,2019)。

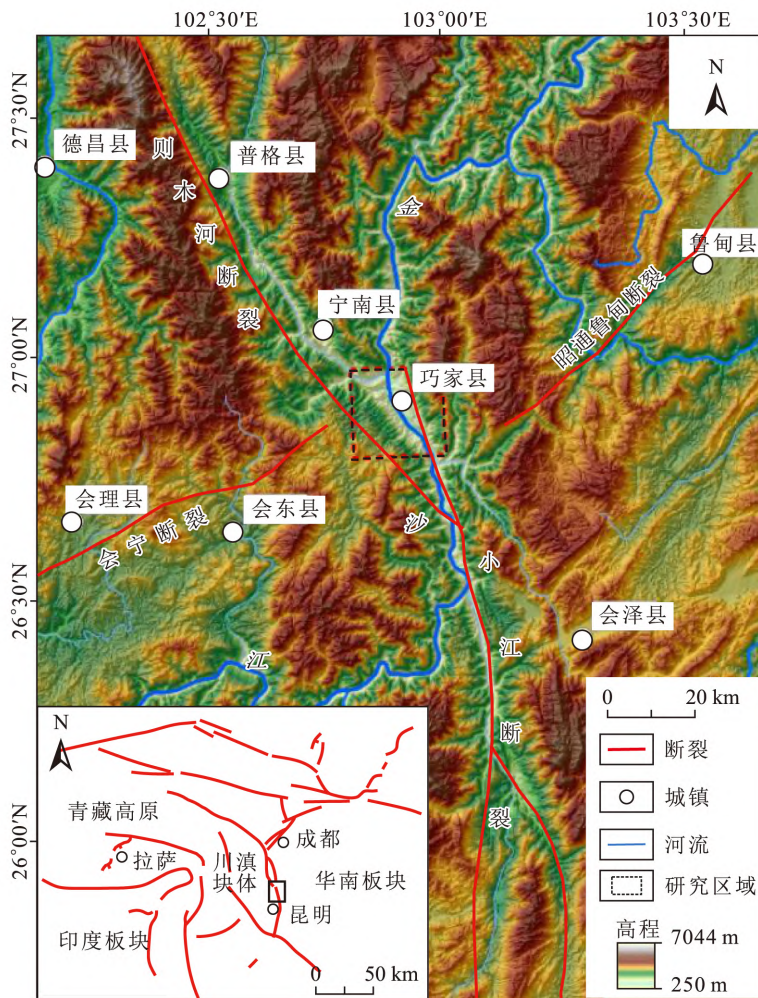


图 1 研究区地势特征及构造背景

Fig. 1 Topographical characteristics and tectonic setting of the study area (数据源自 DEM 数字高程数据, 构造背景图据韩竹军, 2017 改绘)

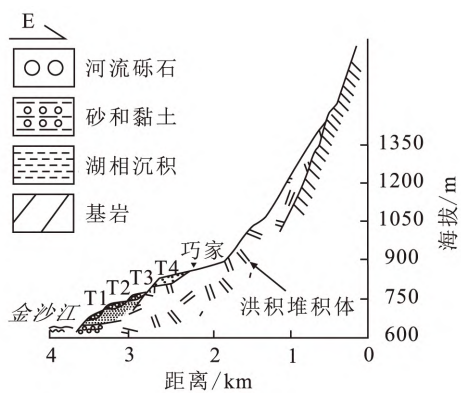


图 2 研究区河流阶地剖面(据刘芬良, 2018 改绘)
Fig. 2 Profile of the river terrace in the study area

2 洪积物沉积特征

洪积沉积是中国山地第四纪的一种重要地质

过程,它是新构造期内,在特殊地质构造和气候条件下的产物(况明生等,2002)。山麓洪积相的形成和发展受地壳运动、气候条件和自然地理等因素的制约,造山运动越强、气候越干旱,山麓洪积相越发育(赵澄林和朱筱敏,2001)。苏怀等(2013)和贺蕊(2018)曾对金沙江干热河谷的形成年代做过研究,结果显示金沙江巧家段现今的干热河谷气候特征形成于上新世末期或早更新世,表明第四纪巧家盆地气候条件较为稳定,构造因素为洪积物形成的主因。因此,对巧家盆地洪积物沉积特征进行研究,对分析小江断裂带北段的构造活动性有着重要的指示作用。

为了探明巧家盆地沉积特征,一方面对研究区展开了野外踏勘工作,调查发现巧家盆地周边主要分布寒武系—泥盆系、二叠系—古近系地层,

岩石类型以灰岩、玄武岩和砂岩为主,盆地内为第四系松散堆积物,主要为洪积物和冲积物(图 3)。关于盆地内洪积物物源,作者在另一篇文章(台梓含,2021)中通过对砾石和重矿物成分分析,表明研究区洪积沉积应为近源沉积(图 4)。

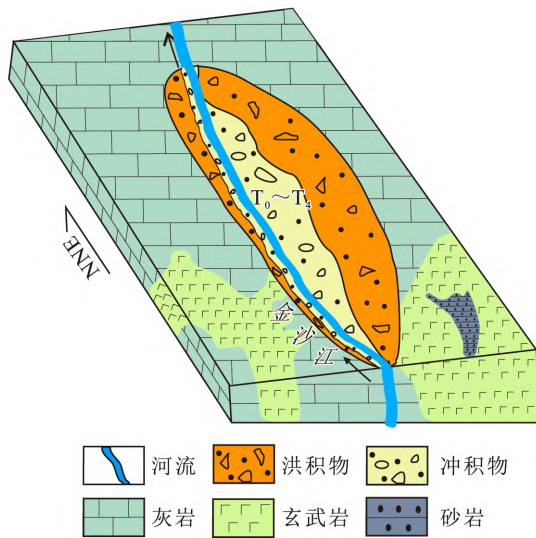


图 3 巧家盆地沉积物平面分布示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the distribution of the sediment plane in Qiaojia Basin

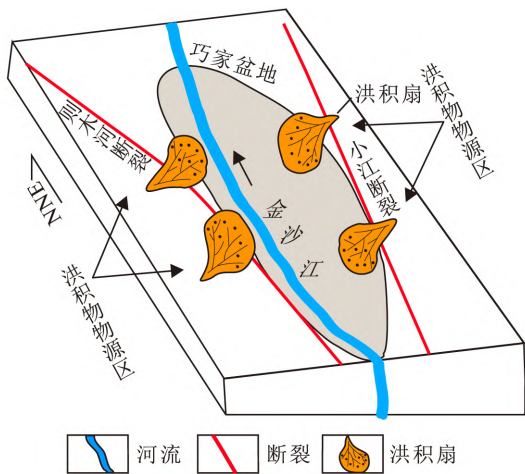


图 4 巧家盆地洪积模式及物源示意图
Fig. 4 Schematic diagram of the diluvial model and provenance in Qiaojia Basin

另一方面,对中国电建集团华东勘测设计研究院在盆地内布置的 7 个钻孔进行了详细的岩心编录,其中最深孔深度达 748 m,贯穿第四纪覆盖层至基岩,其余 6 个钻孔深度为 150~300 m 之间。以最深孔为典型参照,对各钻孔岩心进行系统分析并根据沉积相类型对比划分后,形成图 5 所示巧家盆地钻孔沉积剖面。研究发现,巧家盆

地底部基岩主要为风化的二叠系峨眉山玄武岩,第四系总共可划分为 10 个沉积层。成因类型包括冲积层、湖积层以及洪积层。就研究区而言,河流和湖泊沉积为构造活动较稳定时期的产物,洪积沉积则在构造活动较活跃时期形成。鉴于本文研究目的,重点对剖面中发育的 5 个洪积相沉积层(①,③,⑥,⑧,⑩层)特征展开探讨,具体描述如下:

①层为基岩上的第一个洪积相沉积层,厚度 22.82 m,砾石体积分数为砾石层的 40%~55% 左右,成分以灰岩和玄武岩为主,其次为砂岩。砾石砾径差别较大,可见最小砾径 2 mm,最大砾径 130 mm,以 10~20 mm 居多,分选中等,磨圆度呈棱角状-次圆状,砾间以泥砂质充填。砾石层较厚,之上为粗砂-粉砂层。

③层为第二个洪积相沉积层,厚度较薄,仅 8.64 m,砾石体积分数为砾石层的 40% 左右,成分为灰岩、玄武岩和砂岩。砾石砾径差别较大,可见最小砾径 2 mm,最大砾径 120 mm,大小混杂、分选性差,磨圆度呈次棱角状,砾间以泥砂质充填。砾石层之上为粗砂至黏土层,层中可见碳化木。

⑥层为第三个洪积相沉积层,厚度 23.79 m,砾石体积分数为砾石层的 45% 左右,成分为灰岩、玄武岩和砂岩,偶见白云岩。砾石砾径差别较大,可见最小砾径 2 mm,最大砾径 150 mm,大小混杂,分选性差,磨圆度呈棱角-次棱角状,砾间以泥砂质充填。砾石层之上为粗砂-粉砂质黏土层,粒度由下往上呈现过渡变化。

⑧层为第四个洪积相沉积层,厚度 53.6 m。砾石体积分数为砾石层的 45%~55% 左右,成分主要为灰岩、玄武岩和砂岩,含少量灰泥岩、云泥岩和白云岩。砾石砾径差别较大,可见最小砾径 2 mm,最大砾径 200 mm,大小混杂,分选性差,磨圆度呈次棱角状-次圆状,砾间以泥砂质充填,部分可见钙质胶结。砾石层之上为粗砂-粉砂质黏土层,粒度由下往上呈现过渡变化。

⑩层(顶层)为最后一个洪积相沉积层,厚度较厚,达 169.09 m,整体呈现棕红色-棕黄色,砾石体积分数约为砾石层的 30%~50%,成分主要为灰岩和玄武岩,少见或不见砂岩等其他成分。砾径 2~190 mm 之间的砾石均可见,也含有较多大于 200 mm 的巨砾,大小混杂,分选性差,风化较为严重,磨圆度以棱角状-次棱角状为主,砾间以泥砂质充填,部分可见钙质胶结。砾石层之上为细砂-黏土层,含有碳化木。

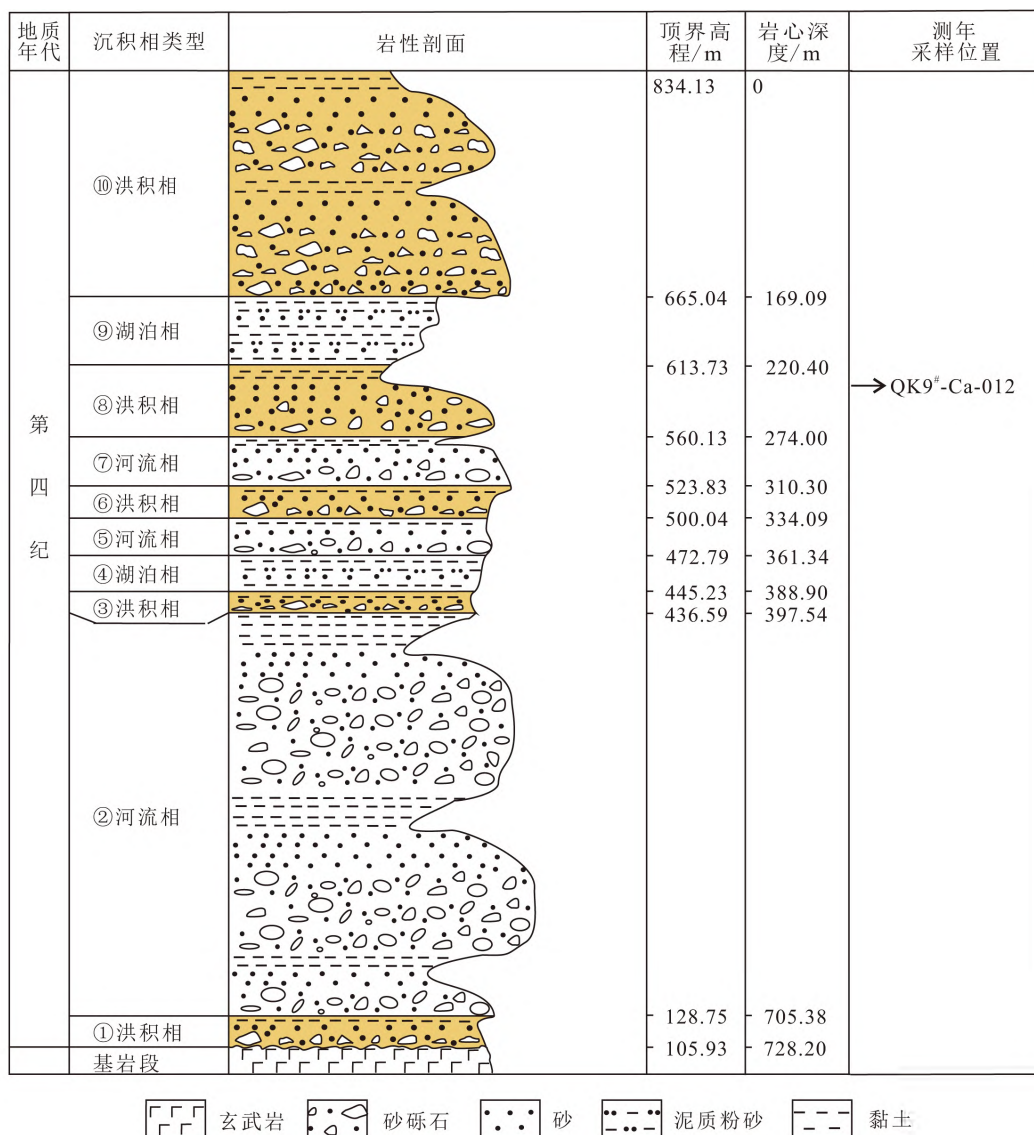


图 5 巧家盆地钻孔沉积剖面及测年样品采样位置

Fig. 5 Depositional profile of boreholes and locations from which the samples were extracted in the Qiaojia Basin

由图 5 可知,巧家盆地内部共发育了 5 个洪积相沉积层,表明巧家盆地形成以来共经历了 5 期构造活跃期。从 5 个沉积层沉积特征来看,①层、③层、⑥层厚度较薄,分别为 22.82 m,8.64 m 和 23.79 m;⑧层、⑩层厚度较厚,其中⑧层厚度 53.6 m;⑩层最厚,达 169.09 m,反映⑧层、⑩层沉积时期构造活动程度可能较①层、③层、⑥层时期更强,尤其⑩层沉积时期,推断为巧家盆地构造活动最强烈阶段。此外,沉积物中砾石可见最大砾径差别也较大,①层、③层、⑥层、⑧层中可见砾石最大砾径分别为 130 mm,120 mm,150 mm,200 mm,⑩层则有较多大于 200 mm 的巨砾(图 6);⑧层、⑩层可见最大砾石砾径明显大于其

他沉积层,也表明⑧层、⑩层沉积时期构造活动强烈,物源区形成了更多更大的破碎岩石,在洪流作用下被搬运至盆地中沉积。

由于巧家盆地的形成和沉积相主要受小江断裂带北段的控制,且气候条件较为稳定,因此巧家盆地内洪积层沉积时期即为小江断裂带北段第四纪构造活跃期。通过以上分析表明,第四纪小江断裂带北段经历了多次构造活跃阶段,根据沉积的先后顺序对应为一~五期,即①层洪积相沉积层为第一期、③层洪积相沉积层为第二期、⑥层洪积相沉积层为第三期、⑧层洪积相沉积层为第四期、⑩层洪积相沉积层为第五期,第四期、第五期是小江断裂带北段活动最强烈的时期。

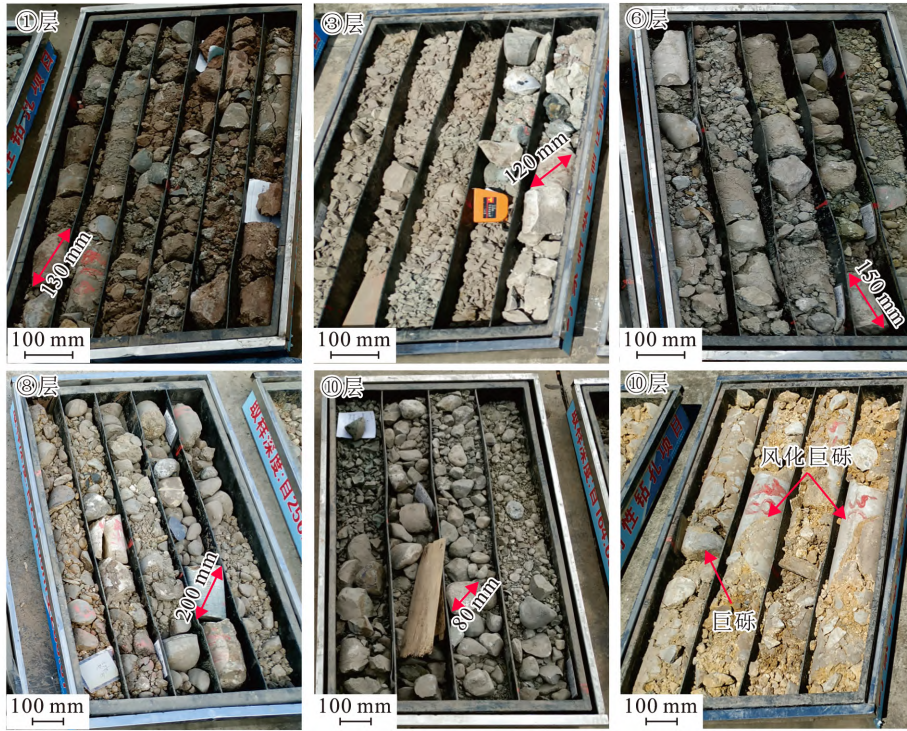


图 6 各洪积层中砾石特征
Fig. 6 Characteristics of gravel in the diluvial layers

3 沉积年代的划分

于巧家盆地 QK9 钻孔⑧层洪积相沉积层上部的钙质胶结物中采集了碳酸盐测年样品

QK9[#]-Ca-012(图 5),委托中国科学院地质与地球物理研究所铀系年代学实验室选择铀钍同位素稀释法测定,结果显示样品年龄为 0.401 Ma(表 1),说明⑧层沉积结束时间大约为 0.4 Ma。

表 1 研究区相关层位年代
Table 1 Ages of the relevant layers in the study area

采样位置	数据来源	测年方法	地质年龄
巧家盆地 QK9 钻孔⑧层上部	本文 QK9 [#] -Ca-012 样品	铀系	0.401 Ma
巧家段最高一级古阶地	贺蕊(2018)	ESR	1.59 Ma
巧家盆地金沙江Ⅳ级阶地	台梓含(2021)	前人数据综合	0.5~0.3 Ma
巧家盆地金沙江Ⅲ级阶地	苏怀等(2013)	地貌外推	Qp ₃ 早期
巧家盆地金沙江Ⅱ级阶地	苏怀等(2013)	地貌外推	Qp ₃ 晚期
巧家盆地金沙江Ⅰ级阶地	苏怀等(2013)	地貌外推	Qh

盆地中金沙江Ⅰ~Ⅲ级阶地为堆积阶地,上覆于湖相沉积之上(图 2),Ⅲ级阶地开始形成年代可大致代表⑨层湖泊相沉积结束的时间,也为⑩层洪积相沉积的开始时间。苏怀等(2013)根据地貌外推方法认为巧家Ⅲ级阶地形成年代为 Qp₃ 早期(0.12 Ma 左右)(表 1),由此推断,巧家盆地上部的第⑩层洪积物形成于 0.12 Ma 至今。

贺蕊(2018)曾对巧家段水系最高一级古河流阶地的年龄做过测定,约为 1.59 Ma(表 1),该阶

地形成时代应与巧家盆地中第一套河流相开始沉积时代相对应,即与钻孔剖面中的②层河流相沉积层相对应,因此大致推断巧家盆地②层河流相开始沉积时间应为 1.59 Ma 之前,而①层洪积相沉积层的形成年代大致能确定为 1.6 Ma 之前。

从②层河流相沉积层底部至⑧层洪积相沉积层上部 QK9[#]-Ca-012,沉积物厚度为 464 m,期间交替发育了河流相、湖泊相和洪积相等地层,缺少相关的文献资料及年龄测试结果,根据上述分析

可知二者之间年龄差约 1.2 Ma,因此可计算出②层至⑧层的平均沉积速率为 0.39 m/ka。虽然不同沉积相的沉积速率不一致,得出的结果或存在较大误差,但在没有较为准确地质年龄的前提下,通过沉积速率计算出的年龄,可为钻孔中不同沉积相的地质年代划分提供参考(杨坤美等,2022)。基于此,通过计算得出③层洪积相沉积层开始和结束沉积时间为 0.81 Ma 和 0.79 Ma,⑥层洪积相沉积层开始和结束沉积时间为 0.65 Ma 和 0.59 Ma,⑧层洪积相沉积层开始沉积时间为 0.48 Ma。

综上所述,第四纪小江断裂带北段的 5 期构造活跃期时间段分别为:早更新世中期~1.6 Ma, 0.81~0.79 Ma,0.65~0.59 Ma,0.48~0.4 Ma,

0.12 Ma 至今。河流阶地通常形成于构造运动强烈阶段,台梓含(2021)曾对金沙江巧家段 IV 级阶地的形成年代进行过探讨,结果显示其形成年代约为 0.5~0.3 Ma(表 1),与本文计算得出的⑧层洪积相沉积层沉积时间即小江断裂带北段第四期构造活跃期时间 0.48~0.4 Ma 一致。此外,苏怀等(2013)认为金沙江巧家段 I~III 级阶地的形成年代为 Qp₃ 早期至 Qh(表 1),同期盆地内也沉积了巨厚的洪积沉积层,证实了小江断裂带北段第四、五期构造活跃期确为构造活动强烈阶段。

小江断裂带北段构造活跃期阶段划分及年代如图 7 所示,本文关于第四纪年代划分均沿用曹伯勋(1995)的方案。

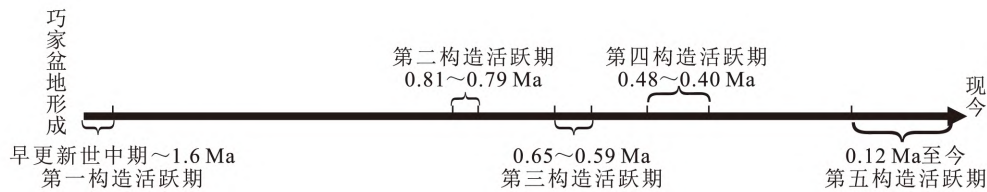


图 7 小江断裂带北段构造活跃期阶段及年代

Fig. 7 Stages and times of tectonic activity in the northern section of the Xiaojiang fault zone

4 断陷速率与沉积速率分析

巧家盆地邻区最高海拔为盆地东侧药山,山脉近 SN 走向,山顶高程 4 041 m,向下分布有 3 级夷平面,其中最低一级夷平面经实地勘测高程约 1 000~1 050 m。盆地内最深孔揭示的盆地底部基岩顶高程为 105.93 m(图 5),约 106 m,根据巧家盆地邻区最低一级夷平面与盆地底部基岩之间高程差,得到盆地基底垂直位移量为 944 m,通过年代讨论已知巧家盆地形成于 1.6 Ma 之前的早更新世中期,取 1.6 Ma 进行计算,得出第四纪巧家盆地平均断陷速率约为 0.59 m/ka。汪一鹏等(2013)在 1:50 000 小江活动断裂带地质图绘制中,对小江断裂带中段嵩明、沧溪、东川、清水海、羊街等盆地垂直位移速率进行过探讨,研究显示中更新世以来嵩明盆地、沧溪盆地垂直位移速率为 0.55~1.1 m/ka,晚更新世以来东川、清水海、羊街等盆地垂直位移速率为 0.3~2.5 m/ka。巧家盆地断陷速率相较于小江断裂带中段嵩明等盆地总体偏小,表明第四纪小江断裂带北段活动性相较于中段表现偏弱。

前文据②层河流相沉积层底部至⑧层洪积相沉积层上部二者沉积物厚度和年龄差计算出②层至⑧层的平均沉积速率为 0.39 m/ka。类似地,据沉积物厚度和年龄差可计算出⑨层湖泊相沉积层沉积速率为 0.18 m/ka,⑩层洪积相沉积层沉积速率为 1.41 m/ka。由此表明,一是巧家盆地洪积相沉积层沉积速率远大于河湖相沉积层沉积速率;二是 0.12 Ma 以来强烈的断裂带活动导致巧家盆地快速断陷,使得盆地可容纳空间急剧增大,同时也提供了充足的物源供给,沉积物沉积速率快速增加,对照⑩层沉积速率 1.41 m/ka,该时期巧家盆地断陷速率应大于沉积速率 1.41 m/ka,也远大于平均断陷速率 0.59 m/ka。

5 讨论

张文甫(1994)认为喜马拉雅运动第三幕发生于早更新世—中更新世之间,该幕运动结果使西部一带地层发生褶皱、断裂,并形成如巧家等盆地。李吉均等(李吉均,1996;李吉均和方小敏,1998)则把该时期的构造运动称为青藏运动,包括 A,B,C 3 幕,其中 C 幕年代为 1.7 Ma 左右,同时

也表明 1.1~0.6 Ma 及 0.15 Ma 以来是青藏高原强烈隆升的时期,称为昆黄运动及共和运动。本文研究显示巧家盆地形成于 1.6 Ma 前的早更新世中期,与张^文甫(1994)认为的巧家盆地形成年代较为一致,更与李吉均等(李吉均,1996;李吉均和方小敏,1998)划分的青藏运动 C 幕相对应。因此推断早更新世中期,即青藏运动 C 幕,作为川滇菱形地块东边界之一的小江断裂带受到青藏运动作用的影响,走滑拉分活

动加强,从而断陷形成了巧家等盆地。通过前文对小江断裂带北段构造活跃期探讨可知早更新世中期~1.6 Ma,0.81~0.79 Ma,0.65~0.59 Ma,0.12 Ma 至今等也都与青藏运动 C 幕、昆黄运动、共和运动时间相吻合。而第四构造活跃期(0.48~0.4 Ma)由于通过沉积速率计算出的年龄存在一定偏差,且不同区域或有时间差异性,但大致可以推断与昆黄运动作用相对应。相关地质年代对应关系见表 2。

表 2 相关地质事件及年代对应关系
Table 2 Relationships between geological events and ages

地质事件	本文地质年代数据来源	青藏高原构造事件及地质年代
小江断裂带北段第五构造活跃期	0.12 Ma 以来	共和运动 0.15 Ma 以来(李吉均,1996;李吉均和方小敏,1998)
小江断裂带北段第四构造活跃期	0.48~0.4 Ma	昆黄运动 1.1~0.6 Ma(李吉均,1996;李吉均和方小敏,1998)
小江断裂带北段第三构造活跃期	0.65~0.59 Ma	
小江断裂带北段第二构造活跃期	0.81~0.79 Ma	
巧家盆地形成、小江断裂带北段第一构造活跃期	早更新世中期~1.6 Ma	青藏运动 C 幕 1.7 Ma(李吉均,1996;李吉均和方小敏,1998)

其次,张^欣(2019)在对小江断裂带活动性讨论中表示早更新世末期—中更新世初期,强烈的构造运动使得青藏高原侧向挤出活动加强,以小江断裂为东边界的川滇菱形地块开始向东南挤出,这一活动过程一直延续至今。张^欣和王^运生(2017)还证实小江断裂北段强烈活动时期在第四纪晚期,尤其是晚更新世,与本文研究结果 0.48~0.4 Ma 和 0.12 Ma 以来为小江断裂带北段构造活动最强烈阶段也相印证。此外,狄^会哲等(2018)在云贵高原河流水系演化与高原形成过程研究中也表明鲜水河—小江断裂带的左旋走滑活动与青藏高原的活动有着密切的联系。综上分析,反映出小江断裂带北段活动性与青藏高原隆升过程有着内在的联系和响应。

6 结论

本文在前人研究的基础上,通过对巧家盆地第四纪洪积物沉积阶段及其沉积年代分析,探讨了第四纪小江断裂带北段活动性,得出以下认识:

a. 巧家盆地形成于早更新世中期,平均断陷速率为 0.59 m/ka,至今共经历了 5 期构造活跃期,期间构造运动强烈,物源区形成了大量破碎砂石,在洪流作用下被搬运至盆地中沉积,发育了 5 个洪积相沉积层。

b. 第四纪以来小江断裂带北段处于构造平静期与活跃期相互交替的阶段,5 期构造活跃期按时间顺序分别为:早更新世中期~1.6 Ma,0.81~0.79 Ma,0.65~0.59 Ma,0.48~0.4 Ma,0.12 Ma 至今。其中,0.48~0.4 Ma 和 0.12 Ma 至今为小江断裂带北段构造活动最强烈的阶段,现今仍然活跃,存在发生破坏性地震、滑坡、泥石流等地质灾害的风险,应加强相关区域构造活动监测与研究。

c. 小江断裂带北段活动性与新构造运动过程有着密切的成因联系,受控于青藏高原东南缘持续的侧向扩展挤出作用,但相较于断裂带中段活动性偏弱。

[参 考 文 献]

曹伯勋,1995. 地貌学及第四纪地质学[M]. 武汉:中国地质大学出版社.
Cao B X, 1995. Geomorphology and Quaternary Geology [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press. (in Chinese)
常玉巧,陈立春,李西,等,2021. 小江断裂带宜良盆地西缘断裂晚第四纪活动的地质地貌证据[J]. 地震研究, 44(2):152-161.
Chang Y Q, Chen L C, Li X, et al., 2021. The late Quater-

- nary activity of the fault along the western margin of the Yiliang Basin of the Xiaojiang fault zone[J]. Journal of Seismological Research, 44(2): 152—161. (in Chinese)
- 狄会哲, 邓宾, 赵高平, 等, 2018. 云贵高原河流水系演化与高原形成过程——基于现代河流沉积物示踪[J]. 四川地质学报, 38(4): 536—541.
- Di H Z, Deng B, Zhao G P, *et al.*, 2018. The evolution of the river system on the Yunnan-Guizhou Plateau and formation process of the plateau based on modern river sediment[J]. Acta Geologica Sichuan, 38(4): 536—541. (in Chinese)
- 韩竹军, 董绍鹏, 毛泽斌, 等, 2017. 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, 39(1): 1—19.
- Han Z J, Dong S P, Mao Z B, *et al.*, 2017. The Holocene activity and strike-slip rate of the southern segment of Xiaojiang fault in the southeastern Yunnan region, China[J]. Seismology and Geology, 39(1): 1—19. (in Chinese)
- 贺蕊, 2018. 金沙江巧家段河流阶地记录的干热河谷形成年代研究[D]. 昆明: 云南师范大学档案馆.
- He R, 2018. Study on Slope Formation Age of the Dry Hot Valley Based on River Terrace Records in the Qiaojia Section of Jinsha River[D]. Kunming: The Archive of Yunnan Normal University. (in Chinese)
- 况明生, 张远瞩, 谢世友, 等, 2002. 云南小江流域第四纪洪积—泥石流沉积的年代与地层划分[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 27(6): 974—980.
- Kuang M S, Zhang Y Z, Xie S Y, *et al.*, 2002. Age and stratigraphical division of diluvium-depositional sub-facies of debris-flow in Quaternary in Xiaojiang drainage, Yunnan[J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science), 27(6): 974—980. (in Chinese)
- 李吉均, 方小敏, 马海洲, 等, 1996. 晚新生代黄河上游地貌演化与青藏高原隆起[J]. 中国科学(D 辑), 26(4): 316—322.
- 李吉均, 方小敏, 1998. 青藏高原隆起与环境变化研究[J]. 科学通报, 43(15): 1569—1574.
- Li J J, Fang X M, 1998. Study on uplift of Qinghai-Tibet Plateau and environmental change[J]. Chinese Science Bulletin, 43(15): 1569—1574. (in Chinese)
- 李郎平, 杨达源, 黄典, 等, 2009. 金沙江巧家—新市镇河段的水系变迁[J]. 第四纪研究, 29(2): 327—333.
- Li L P, Yang D Y, Huang D, *et al.*, 2009. Drainage evolution of Qiaojia-Xinshizhen section of Jinsha River[J]. Quaternary Sciences, 29(2): 327—333. (in Chinese)
- 李力, 2015. 小江—莫边府断裂活动性研究[D]. 昆明: 云南大学档案馆.
- Li L, 2015. Study on the Activity of Xiaojiang-Dianbianfu Fault[D]. Kunming: The Archive of Yunnan University. (in Chinese)
- 李西, 冉勇康, 吴富晓, 等, 2018. 小江断裂带西支晚第四纪强震破裂特征[J]. 地震地质, 40(6): 1179—1203.
- Li X, Ran Y K, Wu F Y, *et al.*, 2018. Rupture characteristics of late Quaternary strong earthquakes on the western branch of the Xiaojiang fault zone[J]. Seismology and Geology, 40(6): 1179—1203. (in Chinese)
- 刘芬良, 2018. 晚新生代金沙江下游段地貌演化与河谷发育研究[D]. 兰州: 兰州大学档案馆.
- Liu F L, 2018. Geomorphological Evolution and Valley Development of the Lower Jinsha River during Late Cenozoic[D]. Lanzhou: The Archive of Lanzhou University. (in Chinese)
- 毛泽斌, 2017. 小江断裂带南段晚第四纪活动性研究[D]. 北京: 中国地质大学档案馆.
- Mao Z B, 2017. The Activity of the South Segment of Xiaojiang Fault in Late Quaternary[D]. Beijing: The Archive of China University of Geosciences. (in Chinese)
- 裴向军, 李天涛, 黄润秋, 等, 2019. 巧家拉分盆地结构特征及其形成演化过程分析[J]. 西南交通大学学报, 54(2): 278—286.
- Pei X J, Li T T, Huang R Q, *et al.*, 2019. Structural features and evolutionary history of Qiaojia pull-apart basin[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 54(2): 278—286. (in Chinese)
- 宋方敏, 汪一鹏, 沈军, 等, 1997. 小江断裂带中段盆地的发育阶段及其与区域构造运动的关系[J]. 地震地质, 19(3): 211—217.
- Song F M, Wang Y P, Shen J, *et al.*, 1997. The development stages of the basins along the middle segment of the Xiaojiang fault zone and its relation to regional tectonic movement [J]. Seismology and Geology, 19(3): 211—217. (in Chinese)
- 沈军, 汪一鹏, 宋方敏, 等, 1998. 小江断裂带中段晚新生代构造盆地演化阶段[J]. 地震研究, 21(1): 58—64.
- Shen J, Wang Y P, Song F M, *et al.*, 1998. The evolution stages of the late Cenozoic tectonic basins in the central part of the Xiaojiang fault zone[J]. Journal of Seismological Research, 21(1): 58—64. (in Chinese)
- 苏怀, 明庆忠, 潘保田, 等, 2013. 金沙江河谷—水系发育

- 的年代学框架分析与探讨[J]. 山地学报, 31(6): 685—692.
- Su H, Ming Q Z, Pan B T, *et al.*, 2013. The analysis and discussion on the chronological frame of Jinshajiang River valley-drainage[J]. Journal of Mountain Science, 31(6): 685—692. (in Chinese)
- 台梓含, 2021. 滇东巧家盆地第四纪沉积特征及对盆地和水系演化的指示[D]. 成都: 成都理工大学档案馆.
- Tai Z H, 2021. Quaternary Sedimentary Characteristics and Implications for Basin and Drainage Evolution in Qiaojia Basin, Eastern Yunnan[D]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese)
- 汪一鹏, 宋方敏, 曹忠权, 等, 2013. 小江活动断裂带地质图(1: 50000)说明书[M]. 北京: 地震出版社.
- Wang Y P, Song F M, Cao Z Q, *et al.*, 2013. Geological Map of Xiaojiang Active Fault Zone(1: 50000) Instructions[M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- 王双, 2016. 白鹤滩库区巧家县城岸坡动力稳定性研究[D]. 成都: 成都理工大学档案馆.
- Wang S, 2016. Study on Slope Dynamic Stability Baihetan Reservoir Qiaojia County[D]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese)
- 杨坤美, 向芳, 台梓含, 等, 2022. 巧家盆地第四纪孢粉特征及其古气候意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 49(3): 324—337.
- Yang K M, Xiang F, Tai Z H, *et al.*, 2022. Quaternary sporopollen characteristics and paleoclimate significance in Qiaojia Basin, Yunnan Province, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 49(3): 324—337. (in Chinese)
- 赵澄林, 朱筱敏, 2001. 沉积岩石学(第三版)[M]. 北京: 石油工业出版社.
- Zhao C L, Zhu X M, 2001. Sedimentary Petrology (Third Edition)[M]. Beijing: Petroleum Industry Press. (in Chinese)
- 张文甫, 1994. 川、滇毗邻地区新构造运动与活动断裂[J]. 四川地震, (4): 34—43.
- Zhang W F, 1994. Current tectonic movement and active fault in the area where Sichuan and Yunnan meet[J]. Earthquake Research in Sichuan, (4): 34—43. (in Chinese)
- 张欣, 王运生, 2017. 白鹤滩水电站库区小江断裂带活动性研究[J]. 工程地质学报, 25(2): 531—540.
- Zhang X, Wang Y S, 2017. Activities of Xiaojiang Fault zone in Baihetan hydropower station reservoir[J]. Journal of Engineering Geology, 25(2): 531—540. (in Chinese)
- 张欣, 2019. 小江断裂带中北段活动性及其致灾效应研究[D]. 成都: 成都理工大学档案馆.
- Zhang X, 2019. Study on the Activity and Disaster-causing Effects of the Middle and Northern Sections of Xiaojiang Fracture[D]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese)
- 郑立龙, 孔凡全, 黄赞慧, 等, 2019. 小江断裂带中段西支沧溪—清水海断层更新世活动性[J]. 科学技术与工程, 19(14): 39—45.
- Zheng L L, Kong F Q, Huang Z H, *et al.*, 2019. The Pleistocene activity of Cangxi-Qingshuihai fault of the west branch in the middle segment of Xiaojiang fault[J]. Science Technology and Engineering, 19(14): 39—45. (in Chinese)
- He H L, Yasutaka I, Song F M, *et al.*, 2002. Late Quaternary slip rate of the Xiaojiang fault and its implication[J]. Seismology and Geology, 24(1): 14—26.

(责任编辑: 魏 巍)