

文章编号:1000-0550(2017)01-0085-08

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2017.01.009

龙门山北东段山前涪江第四纪冲洪积扇地貌演化及其构造响应

白毛伟, 谢小平, 陈芝聪, 叶卉, 徐文阳, 江若辰, 李冰, 李佳丽

曲阜师范大学地理与旅游学院, 山东日照 276826

摘要 青藏高原东缘龙门山北东段山前涪江冲积扇在武都盆地内的覆盖面积约为 25 km², 区域构造上为江油断层、香水—让水断层等组成的江油断裂带右旋走滑构造域。通过宇宙核素成因埋藏年龄测试技术精确地测定发源于龙门山北东段主要河流—涪江自第四纪以来发育的三期冲积扇形成年代, 即早更新世冲积扇(1.84 Ma)、中更新世冲积扇(0.54 Ma)和全新世冲积扇。由于龙门山北东段—江油断裂的右旋走滑兼逆冲运动, 导致涪江早更新世冲积扇扇头右旋错动约 3.2 km, 之后形成新的冲积扇(中更新世积扇)。随着江油断裂继续的继续活动, 中更新世冲积扇扇头又被右旋错动了约 0.8 km, 之后形成全新世的冲积扇。涪江形成以来总共右旋错动距离约为 4 km。同时, 早、中更新世冲积扇褶皱隆升了约 50 m, 早更新世冲积扇总共褶皱隆升了约 100 m。这在一定程度上反映了龙门山构造带北东段第四纪以来沉积对构造演化的响应过程。

关键词 龙门山; 冲积扇; 地貌演化; 构造响应; 涪江

第一作者简介 白毛伟, 男, 1991 年出生, 硕士研究生, 沉积学, E-mail: 17863349965@163.com

通讯作者 谢小平, 男, 教授, E-mail: xp.xie@263.net

中图分类号 P315.2 **文献标识码** A

0 引言

许多研究者都从河流阶地、冲积扇、河谷的形态及其宽度、水系样式等方面研究断裂的构造活动^[1-9]。Ouchi^[2]认为活动断层、活动褶皱及横向掀斜影响冲积河流的形态特征、冲淤过程、河型变化及沉积过程等。史兴民等认为构造活动影响着河流沉积的厚度及迁移方向, 控制着构造地貌的演化^[7]。早期逆滑和走滑断裂控制水系形态, 而晚期的正断层和地堑构造控制河流地貌的发育演变^[8]。青藏高原东缘龙门山断裂带北东段山前前陆盆地—武都盆地沉积了一套第四纪冲积扇(图 1, 2), 即早更新世、中更新世及全新世冲积扇, 该冲积扇为北东—南西向展布, 说明涪江冲积扇的形成及演化要受到活动构造的控制。本文从涪江冲积扇的构造环境、沉积特征、几何变形及测年等方面, 分析了江油断裂的活动性质和运动速率, 提出了涪江山前古、今冲积扇的沉积演化模式, 论证了第四纪期间涪江山前构造活动的阶段及强度^[10-11]。

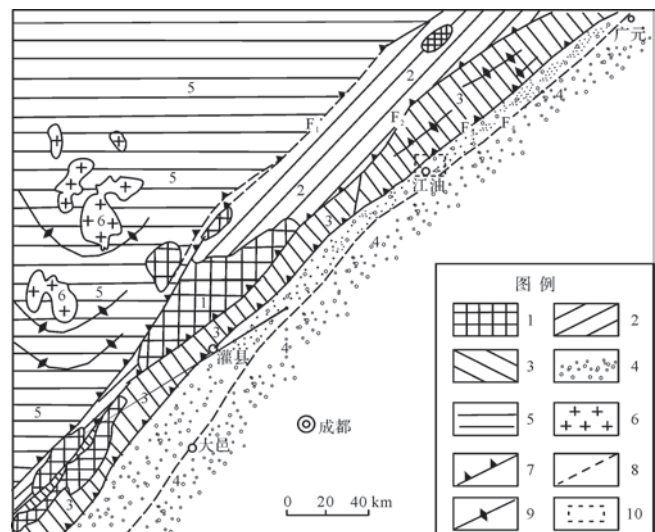


图 1 龙门山地区地质构造简图(据刘和甫等, 1994, 修改)
F₁. 青川—茂汶断裂; F₂. 北川—映秀断裂; F₃. 灌县—安县断裂; F₄. 广元—大邑断裂

1. 前震旦系杂岩体; 2. 震旦系和下古生界; 3. 上古生界; 4. 中生代陆相沉积; 5. 三叠纪复理石沉积; 6. 印支—燕山期花岗岩; 7. 冲断层; 8. 隐伏断层; 9. 褶皱; 10. 研究区—涪江冲积扇地区

Fig.1 The geological structure diagram of Longmen Mountains (modify from Liu et al., 1994)

F₁. Qingchuan-Maowen fault; F₂. Beichuan-Yingxiu fault; F₃. Guanxian-Anxian fault; F₄. Guangyuan-Dayi fault

1. Pre-Sinian complex; 2. Sinian and Lower Palaeozoic; 3. Upper Palaeozoic; 4. Mesozoic and Cenozoic nonmarine sediments; 5. Triassic flysch sediments; 6. Indosinian-Yanshanian granite; 7. Thrust fault; 8. Buried fault; 9. fold; 10. research area-The region of Fujiang alluvial fans

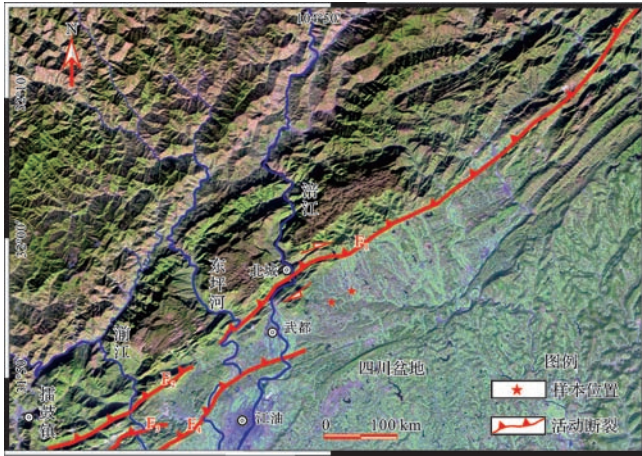


图2 涪江冲积扇地区地质构造简图

F₁. 江油断裂; F₂. 通口断裂; F₃. 黄莲桥断裂; F₄. 香水—让水断裂

Fig.2 The geological structures of Fujiang alluvial fans

F₁. Jiangyou Fault; F₂. Tongkou Fault; F₃. Huanglianqiao Fault;

F₄. Xiangshui-Rangshui Fault

1 涪江冲积扇发育的构造环境

1.1 构造地貌

涪江发源于岷山雪宝顶北坡,干流全长 675 km,是嘉陵江右岸的最大支流,也是四川省腹部地区的一条重要河流^[12]。该河穿越龙门山北东段天竹山后,在江油断裂南西侧山前盆地,携带的大量碎屑物质堆

积形成冲积扇,即涪江山前冲积扇(图3)。

涪江山前阶梯式台地、陡崖、冲洪积扇、低山丘陵构成了龙门山北东段山前构造地貌。涪江山前古、今冲洪积扇东南侧紧靠低山丘陵,其中亘台山近东西走向;北西侧紧邻高山高原地貌,其中观雾山、天竹山、窦圉山走向与江油断裂走向一致(图3)。涪江山前冲积扇前缘被观雾山阻挡,西部边界系北东向的中生代低山丘陵,南为亘台山所限,北东与涪江中更新世冲积扇相邻(图3)。涪江山前冲积扇与龙门山之间分布着北东宽、南西窄的山前台地,台地内侏罗纪、白垩纪沉积层较厚,而第四纪全新世沉积较薄,主要沿涪江干流及其主要支流分布,尤其在山前冲积扇带分布集中,岩性为粉质黏土、粉土及砂砾卵石^[13-14]。

山前丘状台地夹于观雾山南西侧断裂与天竹山北东侧断裂之间(图3),其前缘受天竹山北东侧断裂控制。在冲积扇的后缘,台地受构造挤压隆升,形成梯级式丘状台地,每级台地之间的陡崖高约为 100~200 m。涪江山前冲积扇面积约为 25 km²,扇面坡度为 1°~2°,扇顶距江油主断裂 1.5 km,平面上呈纺锤形,其形成的地质年代为全新世。该冲积扇北东侧展布着两个被废弃的涪江古冲积扇,自北东向南西依次为涪江早更新世冲积扇及中更新世冲积扇。其几何形态在扇顶均表现为“管状”北西—南东向延伸,而扇缘则均表现为向北东延伸的不对称扇形(图3)。

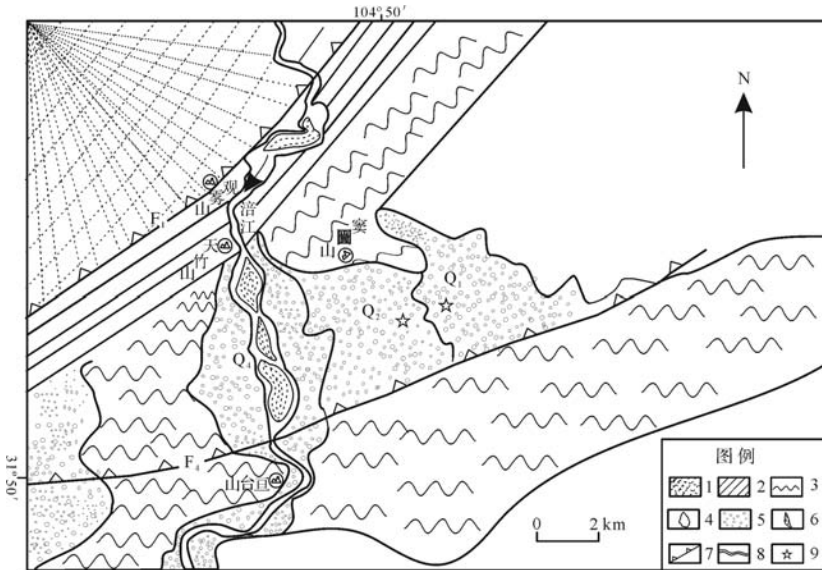


图3 涪江冲积扇地区构造地貌简图

1.高山;2.丘状台地;3.低山丘陵;4.武都盆地;5.冲积扇;6.江心洲;7.断层;8.水系;9.采样点

Fig.3 Sketch showing the active faults and tectonic landforms in the region around the Fujiang River alluvial fan

1. high mountain; 2. hummocky platform; 3. low mountains and hills; 4. Wudu Basin; 5. alluvial fans;

6. central bar; 7. fault; 8. drainage; 9. sample position

1.2 活动断层

江油断裂又称香水断裂或马角坝断裂,是若干大致平向的断裂组成,在区域上是龙门山泥盆系—石炭系沉积的东界,也是四川中、新生界红色泥盆地的西界,也是现今四川盆地与青藏高原的地貌分界^[15-16]。在江油断裂带内发育了一系列与其走向一致的断层,如江油断层、通口断层、望乡台—倒挂牌断层、黄连桥断层、含增断层、香水—让水断层等一系列断层(图4)。它们向东北延伸,经过武都、江油、雁门坝等地直达广元以北;向南西延伸,经过安昌、睢水等地至灌县以南。江油断裂全长约为400 km,倾向北西,倾角 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$,断裂带内主要发育中生代地层^[17]。断裂带内柔皱与拖曳现象明显,形成叠瓦式断裂构造^[18-20]。

涪江山前冲积扇地区发育的活动断层主要有江油断层(F_{3-1})和香水—让水断层(F_{3-2})。江油断层的总体走向约 $NE45^{\circ}$,整体沿着龙门山东缘展布,跨断层的水系被右旋错段,表现为逆冲兼走滑运动。断层面陡峭、直立,在平面地貌上表现为线性槽状,是断层走滑运动的典型地貌特征^[21]。香水—让水断层的走向 $NE45^{\circ}$,倾向北西,倾角 $45^{\circ}\sim 60^{\circ}$,当断层经过水系时发生系统的右旋错断,说明断层右旋走滑的性质。就本研究区而言,断层向东北沿平通河河谷延伸至南塔村没于武都盆地内涪江第四系河流冲积层之下。

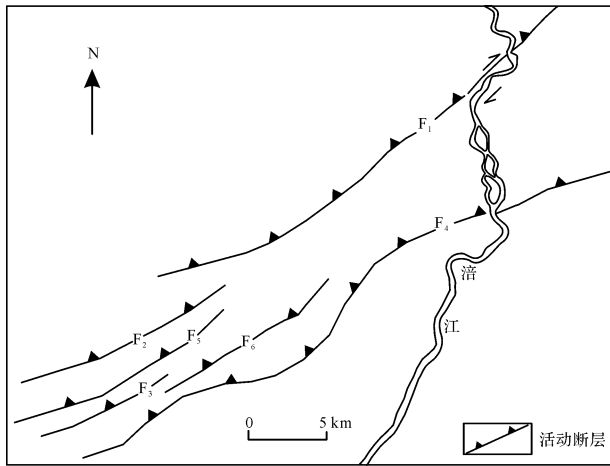


图4 江油断裂第四纪活动断层

F_1 . 江油断裂; F_2 . 通口断裂; F_3 . 黄连桥断裂; F_4 . 香水—让水断裂; F_5 . 望乡台—倒挂牌断层; F_6 . 含增断层

Fig.4 The Quaternary active faults of the Jiangyou Fault
 F_1 . Jiangyou Fault; F_2 . Tongkou Fault; F_3 . Huanglianqiao Fault;
 F_4 . Xiangshui-Rangshui Fault; F_5 . Wangxiangtai Fault; F_6 . Hanzeng Fault

1.3 新构造环境

现今四川地区构造格局的形成是在继承了印支运动与燕山运动时期形成的构造格局的基础上,再经过喜马拉雅运动,改造了青藏高原东缘的四川地区^[22]。武都盆地的侏罗纪、晚白垩世普遍发生褶皱、断裂。涪江山前冲积扇所在的武都盆地位于由江油断层和香水断层等众多次级断层组成的江油断裂带内。江油断裂属于龙门山北东段山前断裂,其活动性质控制了研究区水系的演化、构造的变形特征、河流的沉积特征。在江油断裂前缘发育了一些走滑盆地,盆内沉积了一套冲洪积相地层,如涪江古冲洪积扇砾石层。第四纪期间,龙门山冲断带新构造运动活跃,板块间的碰撞、挤压,使得青藏高原及其东缘龙门山冲断带地区或其他边缘地区强烈隆升。早更新世期间,随着龙门山冲断带的隆升,江油断裂前缘形成了一些断陷盆地,接受河流沉积;从中更新世开始,江油断裂转变为活动断裂,表现为右旋走滑性质;到晚更新世末期,江油断裂的走滑活动基本结束。江油断裂的整个运动期间主要表现为走滑兼逆冲运动^[22-25]。

2 冲积扇地区沉积特征

涪江全新世冲积扇发育于武都盆地内,覆盖整个武都镇,呈以水库下游为顶点向南展开的纺锤状沉积体。涪江古、今冲洪积扇均分布于江油断裂的南侧,受江油断裂的走滑兼逆冲运动的影响,因而涪江古、今冲洪积扇的沉积特征及研究区的构造环境的形成与其密切相关。

野外考察发现,涪江冲积扇发育的砾石层的胶结程度和沉积特征都与大邑砾岩相似,孔平等通过宇宙核素 ^{10}Be 与 ^{26}Al 埋藏年龄测试分析,获得大邑砾岩的沉积年龄为 $\sim 2.0\text{ Ma}$ ^[11]。在冲积扇展布区域钻井,分别采集大于20 m及3 m处的沉积岩,对沉积样品进行光释光测年研究,样本所需的物理与化学研究均在中国科学院地质与地球研究所宇宙成因核素实验室进行,孔平等对样本制备程序进行了详细的描述^[26]。获得的涪江古冲积扇沉积年龄与孔平等测年结果相近(表1)。

涪江冲积扇沉积砾岩覆盖在中生代地层之上,且与下伏地层不整合接触。涪江古冲积扇沉积砾岩的地层分布情况是早更新世砾岩厚度最大,向南西向逐渐变薄且分布于山前。涪江冲积扇由一套砾岩—砂岩—粉砂岩—泥岩系列岩组成。早更新世涪江冲积

表1 涪江古冲积扇剖面位置及样品年龄(采样位置见图2)

Table 1 Ages and locations of samples from the ancient alluvial fan of Fujiang river (sample site is in the Fig.2)

样本编号	海拔/m	纬度(N)	经度(E)	深度/m	最小年龄/Ma	误差/Ma	最大年龄/Ma
10XLM01	669	31°53.667'	104°52.617'	3	0.54	32%	无法模拟
10XLM02	649	31°53.733'	104°54.767'	>20	1.73	31%	1.84

扇由松散砾石组成。砾石呈灰褐色、黄褐色的厚层状,厚度约为10~20 m,粒径一般为8~20 cm。砾石成分以石英岩、闪长岩为主,次有砂岩、灰岩等。砾石磨圆度较好,填隙物为砂、泥、钙泥质胶结(图5)。早更新世涪江冲积扇沉积砾石的不对称分布,与江油断裂第四纪的走滑活动密切相关。通过在采样点钻井深大于20 m采集冲积扇沉积样品并进行Al-Be埋藏年代测试分析,确定该套砾岩的沉积最早年代为1.84 Ma,相当于早更新世(表1)。

中更新世涪江冲积扇沉积砾岩与下伏地层呈不整合接触。该套砾岩层的相变为黏土层与砾石互层,代表河流相与山麓洪积相的交互叠置。砾石成分以石英岩、石英砂岩、花岗岩为主,厚度一般为10~20 m,粒径一般为5~20 cm,沉积砾石分布不均匀,砾径大小不一,分选性差,磨圆度好,排列具有定向性。砾石间充填物为粉砂质、泥质物质,呈钙泥质胶结。通过在采样点钻井深约3 m采集冲积扇沉积样品并进行Al-Be埋藏年代测试分析,确定该套砾岩的沉积最早年代为0.54 Ma,相当于中更新世(表1)。

全新世涪江冲积扇在武都盆地内集中分布,位于横切龙门山的横向河谷的河口地带,地势北西高南东低,海拔高程在558~600 m之间。全新世砾石层比较松散,夹少量薄层的砂土透镜体;岩性为粉质黏土、粉土及砂砾卵石;磨圆度良好,粒径一般以2~10 cm居多,向南东颗粒变细而磨圆度变好,厚度约为8~10 m。

早更新世涪江冲积扇扇顶距其南西向的现代冲积扇扇顶约为4 km左右,而中更新世涪江冲积扇扇顶与现代冲积扇扇顶相距0.8 km。此外,早、中更新世涪江冲积扇废弃后先后经历了明显的构造抬升作用,排除外力的侵蚀作用,据DEM数据早更新世涪江废弃冲积扇地表高出现代涪江冲积扇100 m左右,中更新世涪江废弃冲积扇地表高出现代涪江冲积扇50 m左右。

涪江古、今冲积扇沉积特征总体表现为沉积中心向南西迁移、叠瓦状沉积砾岩层、向上变粗的沉积序列等特征。

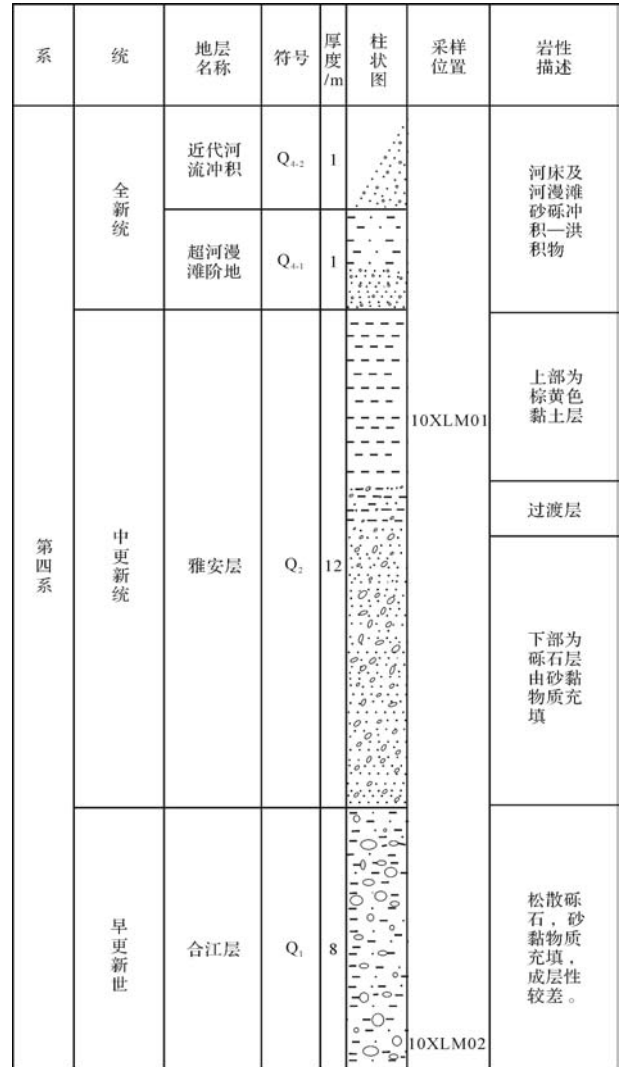


图5 江油地区的沉积充填序列

Fig.5 Filling sequence in Jiang You region

3 涪江冲积扇演化与安县—灌县断裂第四纪的活动的讨论

研究区位于巴颜喀拉地块与扬子地块的交界处,研究区内山前断裂—江油断裂活动性质主要表现为走滑兼逆冲。江油断裂的右旋走滑运动造成构造带向南西向走滑,江油断裂的逆冲运动则造成研究区山体的隆升^[27-29]。

3.1 江油断裂的走向滑动

关于断裂活动性质的研究主要通过水系错动、冲积扇几何形态变形及其展布、河流阶地、河床等方面进行。笔者通过涪江古、今冲洪积扇的高程差、几何不对称分布及其展布方向为江油断裂的活动性质提供了证据。

河流冲洪积扇对构造活动有明显的反映。在正常情况下,河流冲洪积扇将以河谷为轴基本对称。第四纪期间,龙门山强烈隆升,大量的碎屑物在山前迅速堆积形成涪江古冲洪积扇。涪江山前断裂—江油断裂发生右旋走滑运动时,造成涪江在出山口处右旋错动,河道向南西方向折拐;江油断裂右旋走滑运动的幅度小于河谷的宽度,涪江冲洪积扇持续接受沉积;一定时间段内,涪江山前的河流侵蚀幅度大于江油断裂右旋走滑运动的幅度,河流南西岸受遭侵蚀,北东岸产生堆积^[30]。随着时间推移,造成涪江山前早、中更新世冲洪积扇的几何不对称分布。

前文已述,涪江早、中更新世冲积扇从几何形态来看可以分为两部分:“管状”冲积体和北东—南西向延伸的不对称冲积体,早更新世冲积扇扇顶距全新世冲积扇扇顶 4 km,中更新世冲积扇扇顶距全新世冲积扇扇顶 0.8 km。按照一般山前冲积扇的分布形态,该冲积扇应该是中更新世冲积扇超覆于早更新世冲积扇,全新世冲积扇覆盖在中更新世冲积扇之上,而现实情况是沿走滑断裂方向,冲积扇具有明显的侧向迁移特征(图 6)。一个合理的解释就是随着走滑断裂的右旋走滑运动,沿走滑断裂的走向,涪江冲积扇发生侧向叠置,冲积扇的形成时代由老变新(图 6)。江油断裂的右旋走滑导致河道及其沉积物不断向南西迁移,即早更新世以来涪江冲积扇沉积砾岩被右旋错动 4 km,中更新世以来涪江冲积扇沉积砾岩被右旋错动 0.8 km。用这一数据去计算江油断裂的右旋走滑速率,需要确定该套砾岩的沉积年代。那么,江油断裂自 1.84 Ma 以来的平均右旋走滑速率约为 2.17 mm/a,自 0.54 Ma 以来的平均右旋走滑速率约为 1.48 mm/a 说明早更新世以来江油断裂的右旋走滑程度变弱。

3.2 江油断裂的隆升扩展活动

关于龙门山断裂带北段第四纪活动的地质地貌证据主要通过河流地貌来进行判断。龙门山断裂带北段所在地区的河流的一般发育 5 级阶地, T_1 阶地拔河高度 3~5 m,为全新世堆积阶地。 T_2 阶地拔河高度 10 m 左右,为晚更新世基座阶地。 T_3 阶地拔河

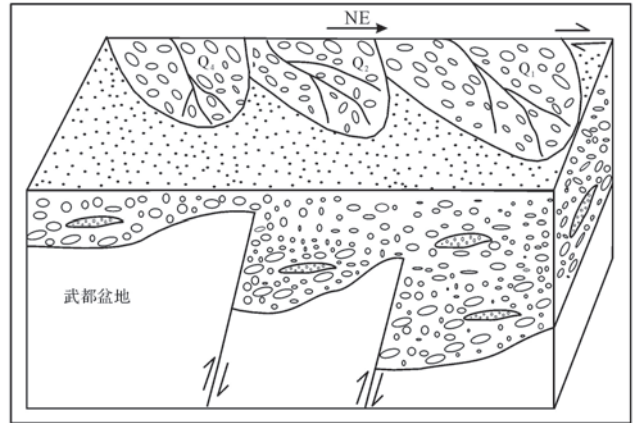


图 6 涪江冲积扇沿走滑断裂方向的右行迁移模式图
Fig.6 The model of the dextral migration of Fujiang alluvial fan and fan along strike slife fault

高度一般为 30~35 m,为晚更新世早期形成的基座阶地。 T_4 阶地拔河高度 60~70 m,残留的阶地砾石层中花岗岩、砂岩砾石已经被强风化,只保留砾石的形态。 T_5 阶地拔河高度为 90 m 左右,阶地堆积物被剥蚀殆尽^[31]。而江油断裂第四纪活动的地质地貌证据主要表现为涪江古冲积扇隆升。

早更新世,龙门山构造带强烈隆升,涪江山前由沉积作用发生,龙门山构造带的隆升速度大于涪江河道的下蚀作用速度,造成涪江山前持续沉积,加之龙门山构造带持续进行构造隆升活动,则在涪江山前形成巨厚的河流冲洪积扇沉积^[32]。中更新世,涪江河道的下蚀作用速度大于龙门山构造带的构造隆升速度且大于山麓的侵蚀作用速度,涪江冲洪积扇的沉积中心开始向南移动,加之山前江油断裂的右旋走滑运动,使形成的新冲积扇分布于早更新世冲积扇的南西侧^[32]。

涪江古冲积扇的高程差异可能反映中更新世以来山前带的间歇性隆升活动。正常情况下,随着龙门山构造带的持续隆升,沉积中心向下游移动,则冲洪积扇随之向下游移动,形成串珠状冲洪积扇。现实情况是,受江油断裂右旋走滑活动的影响,涪江早、中、晚更新世冲洪积扇发生侧向叠置,而全新世冲积扇超覆于晚更新世冲洪积扇,使得晚更新世冲洪积扇成为埋藏扇(图 7)。这一现象可能表明,从中更新世以来江油断裂带表现为阶段性的较缓慢的隆升活动。

前文已述,早更新世涪江废弃冲积扇地表高出现代涪江冲积扇 100 m 左右,中更新世涪江废弃冲积扇地表高出现代涪江冲积扇 50 m 左右。据此,我们可

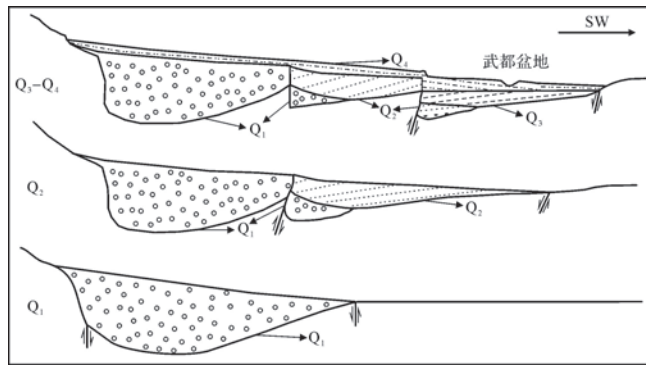


图7 涪江冲积扇演化示意图

Fig.7 The evolution sketch of Fujing alluvial fan

以粗略的计算出中更新世以来江油断裂的隆升速率,即中更新世以来江油断裂带的隆升速率约为0.19 mm/a。

4 初步认识

(1) 涪江冲积扇发育在青藏高原东缘北东—南西走向的龙门山断裂带北端的山前断裂带—江油断裂带内,江油断裂的活动性质控制了涪江古、今冲洪积扇的展布方向及扇体的几何形态。涪江古今冲洪积扇的形成、演化与青藏高原的构造隆升活动,尤其是江油断裂的走滑兼逆冲运动有着密切的联系。

(2) 涪江在龙门山北东段山前的早、中更新世冲积扇形成年代分别为1.84 Ma、0.54 Ma,在江油断裂右旋走滑过程中,早、中更新世冲积扇右旋错动距离分别为4 km、0.8 km,可以估算出江油断裂自1.84 Ma和0.54 Ma以来的平均右旋走滑速率分别约为2.17 mm/a、1.48 mm/a,表明早更新世以来江油断裂的右旋走滑速率有减小的趋势。

(3) 在江油断裂的逆冲运动过程中,将涪江冲积扇分割成相对抬升的山前台地(早、中更新世涪江冲积扇)及山前盆地。早、中更新世涪江废弃冲积扇地表高出现代涪江冲积扇分别约为100 m、50 m。则中更新世以来江油断裂带表现为阶段性的较缓慢的隆升活动,其隆升速率约为0.19 mm/a。

参考文献 (References)

[1] Bull W B. The alluvial-fan environment[J]. *Progress in Physical Geography*, 1977, 1(2): 222-270.
 [2] Ouchi S. Response of alluvial rivers to slow active tectonic movement [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1985, 96(4): 504-515.
 [3] Burbank P. Landscape evolution: the interactions of tectonics and

surface processes[J]. *Basin Research*, 1999, 11(1): 1-6.

- [4] Burbank D W, Anderson R S. *Tectonic Geomorphology* [M]. Oxford: Blackwell Science Ltd, 2000: 1-274.
 [5] Schumm S A, Dumont J F, Holbrook J M. *Active Tectonics and Alluvial Rivers* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002: 1-78.
 [6] 杨景春,李有利. 地貌学原理 [M]. 北京:北京大学出版社, 2001:36-51. [Yang Jingchun, Li Youli. *Principle of Geomorphology* [M]. Beijing: Peking University Press, 2001: 36-51.]
 [7] 史兴民,杨景春. 河流地貌对构造活动的响应 [J]. *水土保持研究*, 2003, 10(3): 48-51, 108. [Shi Xingmin, Yang Jingchun. Response of fluvial geomorphology to tectonic movement [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2003, 10(3): 48-51, 108.]
 [8] 李亚林,王成善,王谋,等. 藏北长江源地区河流地貌特征及其对新构造运动的响应 [J]. *中国地质*, 2006, 33(2): 374-382. [Li Yalin, Wang Chengshan, Wang Mou, et al. Morphological features of river valleys in the source region of the Yangtze River, northern Tibet, and their response to neotectonic movement [J]. *Geology in China*, 2006, 33(2): 374-382.]
 [9] 贾营营,付碧宏,王岩,等. 青藏高原东缘龙门山断裂带晚新生代构造地貌生长及水系响应 [J]. *第四纪研究*, 2010, 30(4): 825-836. [Jia Yingying, Fu Bihong, Wang Yan, et al. Late Cenozoic tectono-geomorphic growth and drainage response in the Longmen Shan Fault Zone, east margin of Tibet [J]. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(4): 825-836.]
 [10] Fu Bihong, Shi Pilog, Guo Huadong, et al. Surface deformation related to the 2008 Wenchuan earthquake, and mountain building of the Longmen Shan, eastern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 40(4): 805-824.]
 [11] Kong Ping, Zheng Yong, Fu Bihong. Cosmogenic nuclide burial ages and provenance of Late Cenozoic deposits in the Sichuan Basin: implications for Early Quaternary glaciations in east Tibet [J]. *Quaternary Geochronology*, 2011, 6(3/4): 304-312.]
 [12] 王文鹄. 四川省通口河河流袭夺 [J]. *山地研究*, 1997, 15(1): 18-23. [Wang Wengu. The capture of Tongkouhe River in Sichuan province [J]. *Mountain Research*, 1997, 15(1): 18-23.]
 [13] 陈竹新,贾东,魏国齐,等. 龙门山北段冲断前锋构造带特征 [J]. *石油学报*, 2008, 29(5): 657-662, 668. [Chen Zhuxin, Jia Dong, Wei Guoqi, et al. Characteristics of thrust structures in the northern Longmenshan front belt [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(5): 657-662, 668.]
 [14] 刘鹏飞,吕擎峰,李传波. 江油市地质灾害易发性评价与防治建议 [J]. *路基工程*, 2014, (5): 207-213. [Liu Pengfei, Lv Qingfeng, Li Chuanbo. Evaluation on susceptibility of geological disasters in Jiangyou and the control measures [J]. *Subgrade Engineering*, 2014, (5): 207-213.]
 [15] 邓起东,陈社发,赵小麟. 龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学 [J]. *地震地质*, 1994, 16(4): 389-403. [Deng Qidong, Chen Shefa, Zhao Xiaolin. Tectonics, seismicity and dynamics of Longmenshan mountains and its adjacent regions [J]. *Seismology and Geology*, 1994, 16(4): 389-403.]

- [16] 唐荣昌,文德华,黄祖智,等. 松潘—龙门山地区主要活动断裂带第四纪活动特征[J]. 中国地震,1991,7(3):64-71. [Tang Rongchang, Wen Dehua, Huang Zuzhi, et al. The Quaternary activity characteristics of several major active faults in the Songpan-Longmenshan region[J]. Earthquake Research in China, 1991, 7(3): 64-71.]
- [17] 杨长清,岳全玲,燕继红,等. 龙门山北段构造变形特征与物理模拟[J]. 断块油气田,2010,17(6):686-689. [Yang Changqing, Yue Quanling, Yan Jihong, et al. Tectonic deformation features and physical modeling of northern section of Longmen Mountains[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2010, 17(6): 686-689.]
- [18] 陈竹新,贾东,张悛,等. 龙门山前陆褶皱冲断带的平衡剖面分析[J]. 地质学报,2005,79(1):38-45. [Chen Zhuxin, Jia Dong, Zhang Qie, et al. Balanced cross-section analysis of the fold-thrust belt of the Longmen mountains[J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(1): 38-45.]
- [19] 李智武,刘树根,陈洪德,等. 龙门山冲断带分段—分带性构造格局及其差异变形特征[J]. 成都理工大学学报:自然科学版,2008,35(4):440-454. [Li Zhiwu, Liu Shugen, Chen Hongde, et al. Structural segmentation and zonation and differential deformation across and along the Longmen thrust belt, West Sichuan, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2008, 35(4): 440-454.]
- [20] 李勇,黄润秋,周荣军,等. 龙门山地震带的地质背景与汶川地震的地表破裂[J]. 工程地质学报,2009,17(1):3-18. [Li Yong, Huang Runqiu, Zhou Rongjun, et al. Geological background of Longmen Shan seismic belt and surface ruptures in Wenchuan earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(1): 3-18.]
- [21] 陈立春,冉勇康,陈杰,等. 龙门山前山断裂大地震原地重复发生的地质地貌证据[J]. 第四纪研究,2009,29(3):472-483. [Chen Lichun, Ran Yongkang, Chen Jie, et al. Geological and geomorphic evidence for repeatedly occurring severe earthquakes on frontier-range fault of Longmenshan, China [J]. Quaternary Sciences, 2009, 29(3): 472-483.]
- [22] 唐荣昌,黄祖智,马声浩,等. 四川活动断裂带的基本特征[J]. 地震地质,1995,17(4):390-396. [Tang Rongchang, Huang Zuzhi, Ma Shenghao, et al. Basic characteristics of active fault zones in Sichuan province[J]. Seismology and Geology, 1995, 17(4): 390-396.]
- [23] 四川省地质矿产局. 四川省区域地质志[M]. 北京:地质出版社,1991:627-634. [Bureau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province. Regional Geology of Sichuan Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 627-634.]
- [24] 许志琴,侯立玮,王宗秀,等. 中国松潘—甘孜造山带的造山过程[M]. 北京:地质出版社,1992:73-87. [Xu Zhiqin, Hou Liwei, Wang Zongxiu, et al. Orogenic Processes of the Songpan Ganze Orogenic Belt of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992: 73-87.]
- [25] 许志琴,杨经绥,姜枚,等. 大陆俯冲作用及青藏高原周缘造山带的崛起[J]. 地学前缘,1999,6(3):139-151. [Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Jiang Mei, et al. Continental subduction and uplifting of the orogenic belts at the margin of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(3): 139-151.]
- [26] Kong Ping, Granger D E, Wu Fuyuan, et al. Cosmogenic nuclide burial ages and provenance of the Xigeda paleo-lake: implications for evolution of the Middle Yangtze River[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2009, 278(1/2): 131-141.]
- [27] 李勇,周荣军, Densmore A L. 青藏高原东缘大陆动力学过程与地质响应[M]. 北京:地质出版社,2006:1-148. [Li Yong, Zhou Rongjun, Densmore A L. Geodynamic Processes of the Eastern Margin of the Tibetan Plateau and Its Geological Response [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 1-148.]
- [28] 李勇,周荣军, Densmore A L, 等. 青藏高原东缘龙门山晚新生代走滑—逆冲作用的地貌标志[J]. 第四纪研究,2006,26(1):40-51. [Li Yong, Zhou Rongjun, Densmore A L, et al. Geomorphic evidence for the Late Cenozoic strike-slipping and thrusting in Longmen mountain at the eastern margin of the Tibetan Plateau [J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(1): 40-51.]
- [29] 许志琴,李化启,侯立炜,等. 青藏高原东缘龙门—锦屏造山带的崛起—大型拆离断层和挤出机制[J]. 地质通报,2007,26(10):1262-1276. [Xu Zhiqin, Li Huaqi, Hou Liwei, et al. Uplift of the Longmen-Jinping orogenic belt along the eastern margin of the Qinghai-Tibet plateau: large-scale detachment faulting and extrusion mechanism [J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26(10): 1262-1276.]
- [30] 张珂,刘开瑜,杨景春. 海源断裂带的断层走滑型不对称谷地[M]//卢演涛,高维明,陈国星,等. 新构造与环境. 北京:地震出版社,2001:1-78. [Zhang Ke, Liu Kaiyu, Yang Jingchun. Fault strike-slip type asymmetric valley of Haiyuan Fault Zone [M]//Lu Yantao, Gao Weiming, Chen Guoxing, et al. Neotectonics and Environments. Beijing: Seismological Press, 2001: 1-78.]
- [31] 杨晓平,冯希杰,戈天勇,等. 龙门山断裂带北段第四纪活动的地质地貌证据[J]. 地震地质,2008,30(3):644-657. [Yang Xiaoping, Feng Xijie, Ge Tianyong, et al. Geological and geomorphic evidence for the Quaternary activity on the northeast segment of Longmenshan Fault Zone [J]. Seismology and Geology, 2008, 30(3): 644-657.]
- [32] Bull W B, McFadden L D. Tectonic geomorphology north and south of the Garlock fault, California [M]//Doehring D O. Geomorphology in Arid Regions. Binghamton: State University of New York, 1997: 115-138.

Geomorphological Evolution of Quaternary Alluvial Fans and Its Response to Tectonic Activity along the Fujiang River, Northeastern Longmen Mountains

BAI MaoWei, XIE XiaoPing, CHEN ZhiCong, YE Hui, XU WenYang, JIANG RuoChen, LI Bing, LI JiaLi
School of Geography and Tourism, Qufu Normal University, Rizhao, Shandong 276826, China

Abstract: Fujiang river alluvial fan is located in the Wudu Basin, the North-Eastern part of Longmen mountains, which is a foreland basin formed near the eastern margin of Tibetan Plateau, and the alluvial fan covers an area of about 25 km². The alluvial fan has developed in a right-lateral strike-slip domain settings, it belongs to the Jiangyou Fault and Xiangshui-Rangshui Fault. Through the field survey, sedimentary sequence and cosmogenic nuclide burial ages data of alluvial fan, and combined with the previous research results and geological survey data, three alluvial fan's formation, distribution and tectonic activities along the Fujiang river are determined respectively. Early Pleistocene alluvial fan(1.84 Ma), Middle Pleistocene alluvial fan(0.54 Ma) and Holocene alluvial fan distributed near the northeast-southwest directions in foreland of Longmen mountains. In the middle Pleistocene, Jiangyou rupture is right-lateral strike-slip thrust fault, causing the early Pleistocene Fujiang river alluvial fan head right-lateral slip about 3.2 km, and the fan uplifted about 50 m. As Jiangyou rupture continued right-lateral strike-slip and thrust, the middle Pleistocene alluvial fan's head was right-lateral displaced about 0.8 km. During the Quaternary period, the early and middle Pleistocene alluvial fan total was right-lateral displaced about 4 km, 0.8 km, respectively. The middle Pleistocene alluvial fan uplifted about 50 m, The early Pleistocene alluvial fan total uplifted about 100 m. Sedimentary center of Fujiang river alluvial fan moved to the right downstream. Characterized by coarsening upward sedimentary sequence, gravel layer of alluvial fans asymmetrically distributed. The results show the Longmen mountains has been uplifted and the rupture right-lateral strike-slip and thrust, the Fujiang river alluvial fans expanded as a correspondence to the tectonic activities.

Key words: Longmen mountains; alluvial fan; geomorphological evolution; structural response; Fujiang River