

青藏高原东缘大渡河中游深切河谷沉积物 及其地震地质意义

李海龙^{1,2}, 张岳桥^{1,2}, 乔彦松¹, 朱府升³, 李建华¹

LI Hailong^{1,2}, ZHANG Yueqiao^{1,2}, QIAO Yansong¹, ZHU Fusheng³, LI Jianhua¹

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081;

3. 四川省地质矿产勘查开发局 101 地质队, 四川 成都 610017

1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*

2. *Key Laboratory of Neotectonic Movement and Geohazard, Ministry of Land and Resources, Beijing 100081, China;*

3. *Geologic Prospecting Team No. 101, Sichuan Bureau of Geology and Minerals Exploration, Chengdu 610017, Sichuan, China*

摘要: 青藏高原东缘的大渡河中游泸定—石棉段呈深切河谷地貌, 发育岩崩、滑坡、古地震堰塞湖、冲洪积扇等不同类型的堆积物、沉积物。基于野外调查、遥感解译、剖面测量和光释光测年(OSL)发现, 这些沉积物记录了龙门山断裂带西南段——冷碛镇断裂2万年来的两期活动, 可能是2次古地震事件。第一期发生在18ka左右, 冷碛镇断裂切割了晚更新世的角砾状砂层和岩崩堆积物, 显示右行走滑特征。这期变形促使大渡河堵塞, 形成得威乡古堰塞湖, 其堵江位置位于加郡乡—得安乡的V型深切河谷段。第二期活动冷碛镇断裂切割了湖相地层, 并破坏了堰塞湖, 可能发生在11ka左右。新发现对于全面认识龙门山断裂带的活动历史、序列及方式具有重要意义。

关键词: 龙门山断裂; 大渡河深切河谷; 混杂陆源沉积物; 古堰塞湖; 古地震事件

中图分类号: P315.2; P931.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2015)01-0104-09

Li H L, Zhang Y Q, Qiao Y S, Zhu F S, Li J H. A study of the sediments in the middle reaches of the Dadu River on the eastern margin of the Tibetan Plateau and its seismogeological implications. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34(1):104-112

Abstract: In the deep-incised valleys along the middle reaches of the Dadu River, field investigation led to the discovery of several types of sediments, which include rockfalls, landslides and paleo-dammed lake sediments. These sediments have preserved the activity records of the Lengqizhen fault, which is the southernmost segment of the Longmen Mountain fault zone. Two strike-slip events were determined on the basis of high resolution SPOT imagery interpretation, field observations, and stimulated luminescence dating (OSL). The early event occurred at 18Ma and the later at 11Ma. During the early deformation event, right slip faulting of the Lengqizhen fault cut into a brecciated sand and a suite of massive blocks. This deformation caused a damming event in the Dadu River and formed the Dewei paleo-dammed lake. The dammed lake lasted for 8ka and eventually broke about 11ka ago. The position of the damming event occurred in the main valley, from Jiajun Township to Dewei Township, along the V-shaped stream of the Dadu River. The late deformation event of the fault cut into the lacustrine deposits. This study has a great significance for understanding the history, activities and the full sequence of the Longmen Mountain fault zone.

Key words: southwestern segment of the Longmen Mountain fault; deep-incised valley of the Dadu River; paleo-dammed lake sediments; earthquake

收稿日期: 2014-10-30; 修订日期: 2014-11-17

资助项目: 国家自然科学基金项目(批准号: 41302168)、中国地质科学院基本科研业务费(编号: YWF201413)和中国地质调查局项目(编号: 1212011120167、12120114002211)

作者简介: 李海龙(1982-), 男, 硕士, 助理研究员, 从事青藏高原东缘区域地质与活动构造研究。E-mail: s050123@126.com

冷碛镇断裂是龙门山断裂带的西南段^[1],与龙门山中段相比^[2-3]研究程度很低。近几年在龙门山断裂带已发生2次大地震事件,造成了巨大的人员伤亡和经济损失。2008年龙门山断裂带中段发生了Ms8.0汶川地震^[3-9],2012年其中南段发生了Ms7.0芦山地震^[10-11]。然而这2次地震并未影响到龙门山断裂带的西南段,这表明西南段仍处于闭锁状态,同时表明西南段与中段可能具有不同的运动学特征^[1]。所以,对西南段的研究对于认识龙门山断裂带的活动历史、序列及方式具有重要的地质意义。

冷碛镇断裂穿过大渡河谷中段的冷碛镇、得妥乡等地,河谷地貌复杂、线性地貌较差,加之该区人口众多,人类行为对地貌的改造较大,使得该断裂活动性研究难度较大、研究程度较低。研究^[12-13]表明,新构造运动对河流演化起着非常重要的作用,尤其是板块边缘、构造活动强烈的地区,而河流地貌和相关沉积物往往记录了该地区重要的新构造事件。青藏高原东缘对应一条复杂的地貌边界带,也对应一条重要的地震断裂带。沿该带发育一系列与活动断裂带伴生的深切河谷地貌,内部发育大量与地震事件有关的沉积物。如沿岷江断裂展布的岷江河谷,发育与古地震有关的大型滑坡体、岩崩堆积物和地震堰塞湖沉积^[14-17]。再如2009年玉树发生的Ms7.6地震,地表地质和探槽揭示沿该断裂伴生有多期岩崩和滑坡事件^[18-20],指示了该断裂的历史活动。最具代表性的实例当属2008年汶川地震,伴生大面积的滑坡、岩崩及地震堰塞湖的形成,引起国际社会的普遍关注^[21-22]。这些与地震相关的沉积物或堆积物是研究古地震事件和断裂活动性的重要对象。本文通过对大渡河中游河谷沉积物的野外地质特征调查、遥感解译和光释光测年,研究了冷碛镇断裂的历史活动性。

1 大渡河泸定—得妥段构造地貌与沉积物特征

野外调查显示,大渡河南北段的泸定—得妥一带至少发育7级阶地面(层状地貌面)。7级阶地海拔高程为2300~2500m、河拔高度超过1000m;6级海拔高程为2000~2100m,河拔高度约800m;5级海拔高程为1800~1900m,河拔高度约600m;4级海拔高程为1700~1750m,河拔高度约400~450m;3级海拔高程为1400~1500m,河拔高度为200~

250m;2级海拔高程为1300~1320m,河拔高度为50~70m;1级河拔高度为6~8m。高阶地的沉积物已很难观测,而3级阶地及以下可识别出5类典型的沉积物(图2),分别为巨砾石堆积、滑坡堆积、角砾状砂层、古地震堰塞湖泥岩沉积和洪积扇—河漫滩相沉积。另外,4级阶地之上均发育红褐色红粘土(图3中剖面E-E'),成因不明。

(1) 巨砾石堆积和滑坡堆积

巨砾石堆积最高海拔在1400~1500m之间。在冷碛镇沈村一带,这套砾石直接覆盖于海拔约1400m

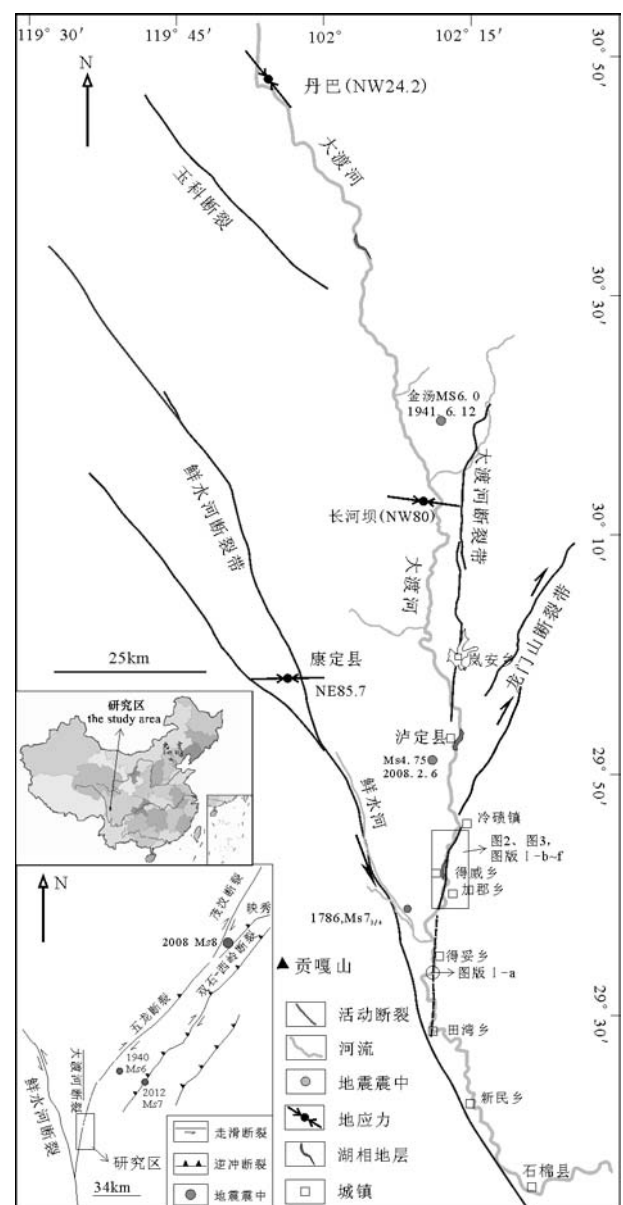


图1 研究区构造简图

Fig. 1 Simplified structural map of the studied area

的基岩之上,而残留于山坡上的巨砾石表明其早期堆积的高程可能达到1500m。在加郡乡一带,这套砾石堆积范围极大,长宽均约4km(图2、图3中剖面E-E')。砾石充填于大渡河谷两岸,现今最高海拔为1428m,最低处与现今的大渡河谷等高,海拔约1200m,堆积厚度超过200m。砾径巨大,可至2m(图3-e)。加郡乡这套巨砾石堆积的时代未知,但部分构成了该地区的三级阶地,初步判断形成时代应早于三级阶地。

研究区滑坡堆积的成分极其复杂,包含无分选、无磨圆、棱角状的砾石、巨砾石,以及磨圆程度较高的河漫滩砾石、细粒砂层、湖相地层等。其类

似于古滑坡、泥石流、岩崩等不同成因的松散堆积物在特殊时期发生同时堆积。不同成分之间无明显界限,不具有原生构造,无法进行岩相划分及成分对比。大渡河谷这套滑坡堆积部分构成了三级阶地,表明其形成于三级阶地之前。

(2)角砾状砂层

大渡河加郡乡—得威乡普遍分布一套角砾状砂层。其上部发育一套冲积扇,海拔高度约50~70m,构成了研究区的三级阶地。这套地层呈青灰色,成层性好,分选性差。由棱角状、无磨圆的砾石及细砂组成,砾径总体介于0.5~2cm之间,有些砾石砾径可达40cm。砾石成分有花岗岩、泥质页岩、片

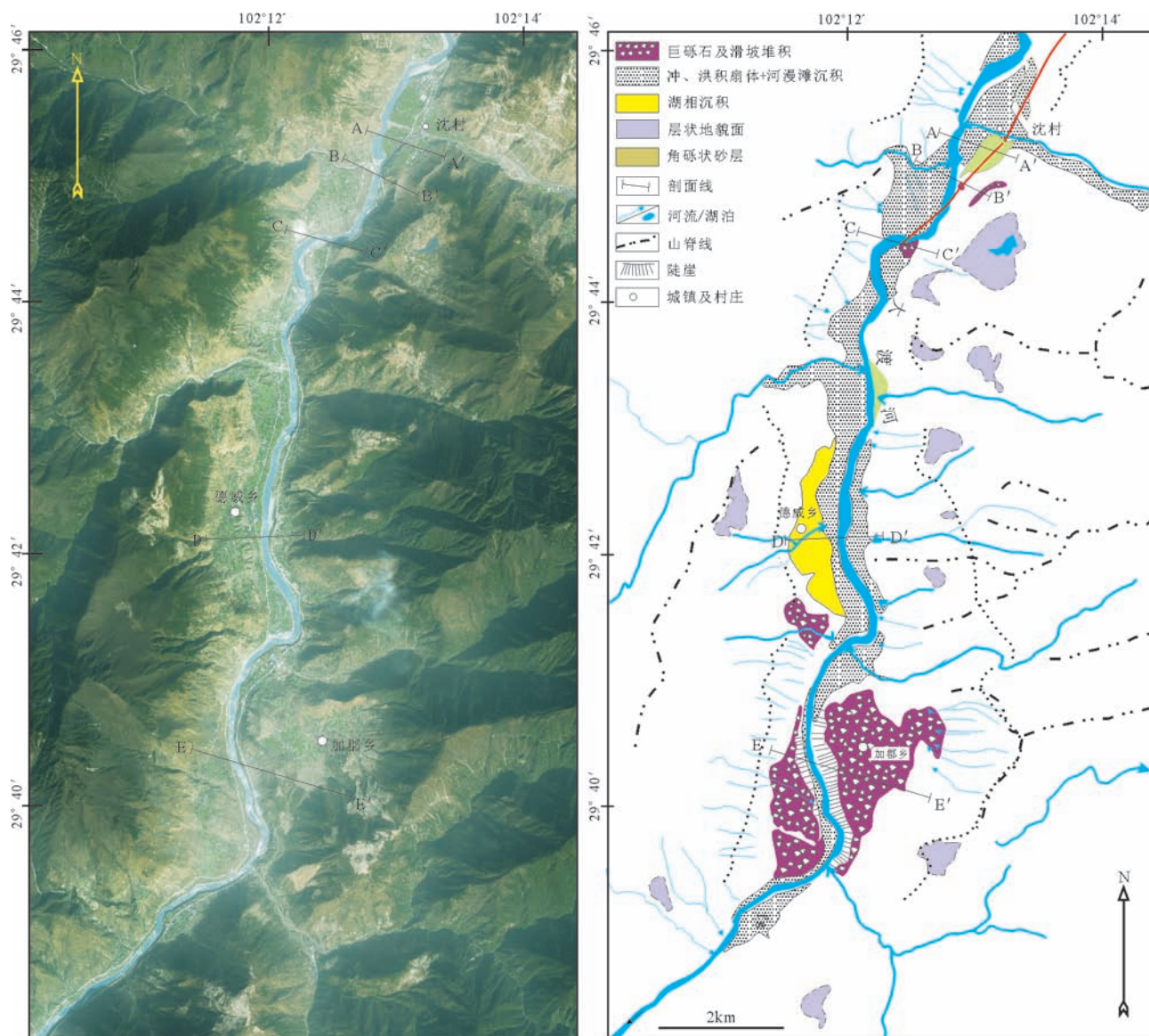


图2 大渡河得妥乡—冷碛镇段沉积物分布遥感解译(底图为spot 2.5m的高分辨率遥感图)

Fig. 2 Remote sensing interpretation of the Dadu River from Detuo Township to Lengqi Town

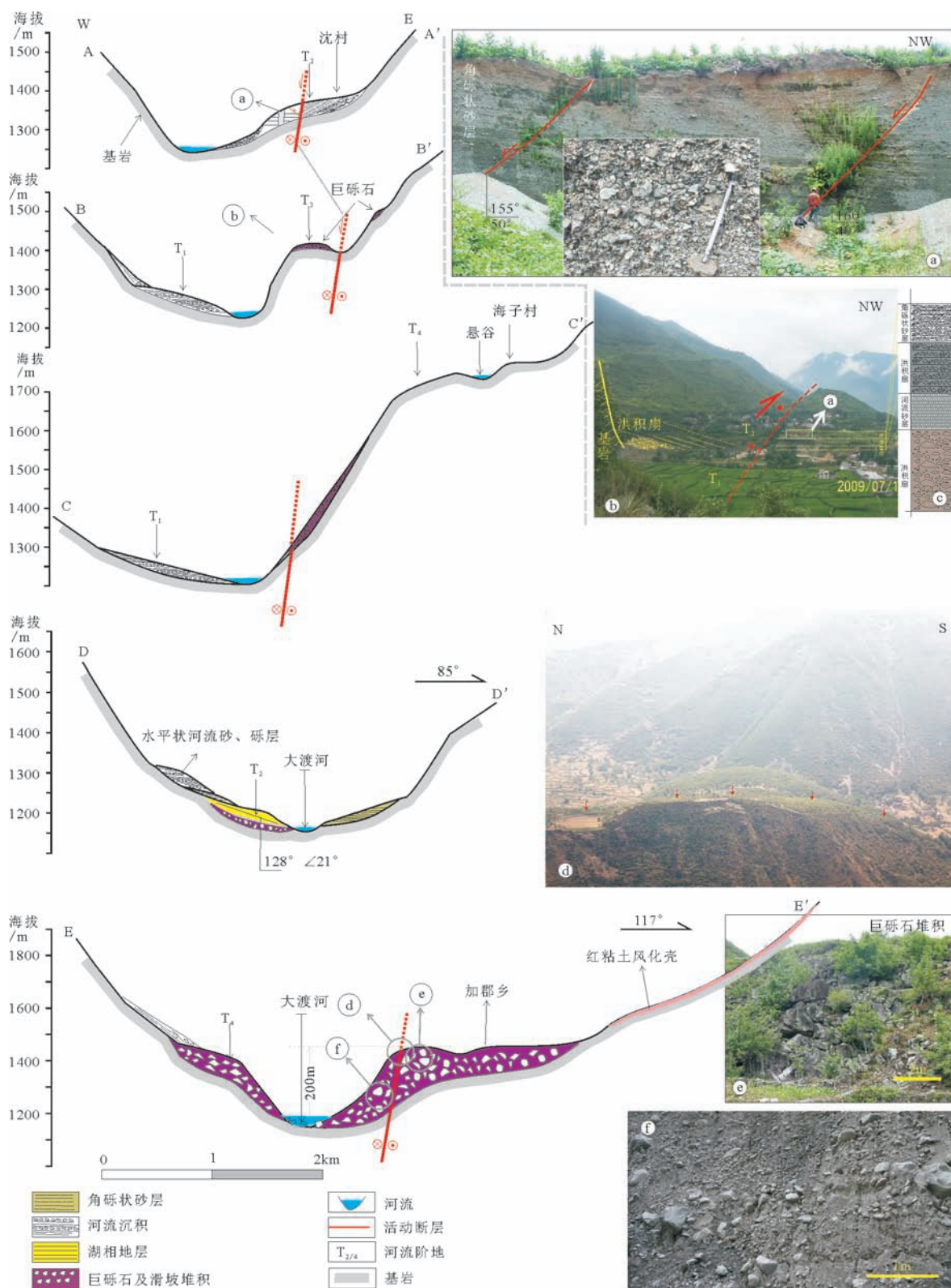


图3 横切大渡河5条地质剖面图(剖面位置见图2)

Fig. 3 Five sections transecting the Dadu River

a—角砾状砂层被断层切割;b—断层地貌;c—地层柱状图;d—巨砾石堆积物被断层切割;e—巨砾石堆积;f—巨砾石堆积之下的砾石沉积

麻岩等,亦有云母、长石等极易风化的矿物,反映出近缘快速堆积的特点。

(3)湖相地层

沿大渡河谷发育数个古地震堰塞湖,从上游丹巴—泸定—汉源一带区域上均有大量发育^[17]。在大渡河的得威乡、加郡乡一带的河谷两岸同样存在湖相地层。在加郡乡湖相地层底界海拔高程1270m,沉积厚度大于7.6m。在大渡河右岸的得威乡磨房坝村一带湖相地层出露厚度和规模较大,长约3km,宽100~200m,底部海拔高程为1246m,沉积中心厚度大于30m。该湖相地层内部沉积韵律完好,无沉积间断面,无软沉积褶皱,表明沉积时水体较为稳定。其自上而下可分为13层,以褐色、黄褐色粘土、粉砂层组成^①。其上覆地层为河流相砂层、砾石层,二者呈不整合接触,与湖相地层共同构成了研究区的二级阶地。

(4)洪积扇—河漫滩相沉积

这是研究区分布最广泛的沉积物,沿着大渡河分布,位于T₁阶地之上。河拔高度为6~8m。这套地层晚于湖相地层沉积,目前未有直接的测年数据。

2 年龄测定

首先对研究区相关砂层进行了光释光测年。采样之前去掉表面浮土30cm,采样之后对样品进行很好的密封。样品委托国土资源部地下水矿泉水及环境监测中心进行测试,在Daybreak 2200光释光仪上测定。该系统蓝光光源波长为470nm,半宽5nm,最大功率为60mW/cm²;红外光源波长为880nm,半宽10nm,最大功率为80mW/cm²,选择最大功率进行测量。预热温度为260℃ 10s,试验剂量预热温度220℃ 10s。需要辐照的测片都是在801E辐照仪中进行的,其⁹⁰Sr-^Y β 放射源的照射剂量率约为0.103871Gy/Sec。样品的U、Th和K含量是用中子活化法测得的,宇宙射线的贡献据Prescott^[23]推荐的数据估计。对于所有细颗粒样品采用简单多片再生法

获得等效剂量值,用饱和指数方法进行拟合,从生长曲线图可以看出,简单多片法测的细颗粒样品再生剂量点不太分散,生长曲线没有明显饱和,说明所测得年龄不会偏年轻。本批样品送来时密封较好,测得的含水量即设定为它们沉积时的原始含水量,并用Fleming^[24]提出的校正方法,对环境剂量率进行了修正。表1为本文的测试结果。样品3-1角度不整合于角砾状砂层之上,样品4-1位于角砾状砂层的中下部(图版I-a)。样品JJOSL-1 JJOSL-5 JJOSL-7分别采集于得威乡湖相地层的底部、中上部和顶部^①。

其次,本文采集了角砾状砂层底部、泥质粉砂层的顶部(图版II)的炭样BDS-1。样品委托Beta实验室进行了¹⁴C测年(实验室编号Beta-386759),获得了27870±130a BP的同位素年龄,限定了角砾状砂层的下限年龄。

3 沉积物的古地震意义与活动断裂记录

(1)沿着大渡河3级阶地分布的巨砾石堆积、与分布于岷江两岸由于汶川地震形成的岩崩堆积很类似,可能与地震事件有关。野外调查显示,这套巨砾石堆积已经被断层切割(图3-d),显示右行走滑,可作为冷碛镇断裂,即龙门山西南段的活动记录。

(2)研究区古滑坡堆积的地震意义已很难判断。目前可知这套地层部分构成了研究区的3级阶地,部分与巨砾石堆积物处于同一高度。笔者初步判断这期滑坡可能与上文述及的巨砾石堆积近于同时,可能是一次古地震事件的产物。冷碛镇断裂切割了3级阶地,形成明显的断层垭口,应该发生在滑坡和岩崩事件之后。

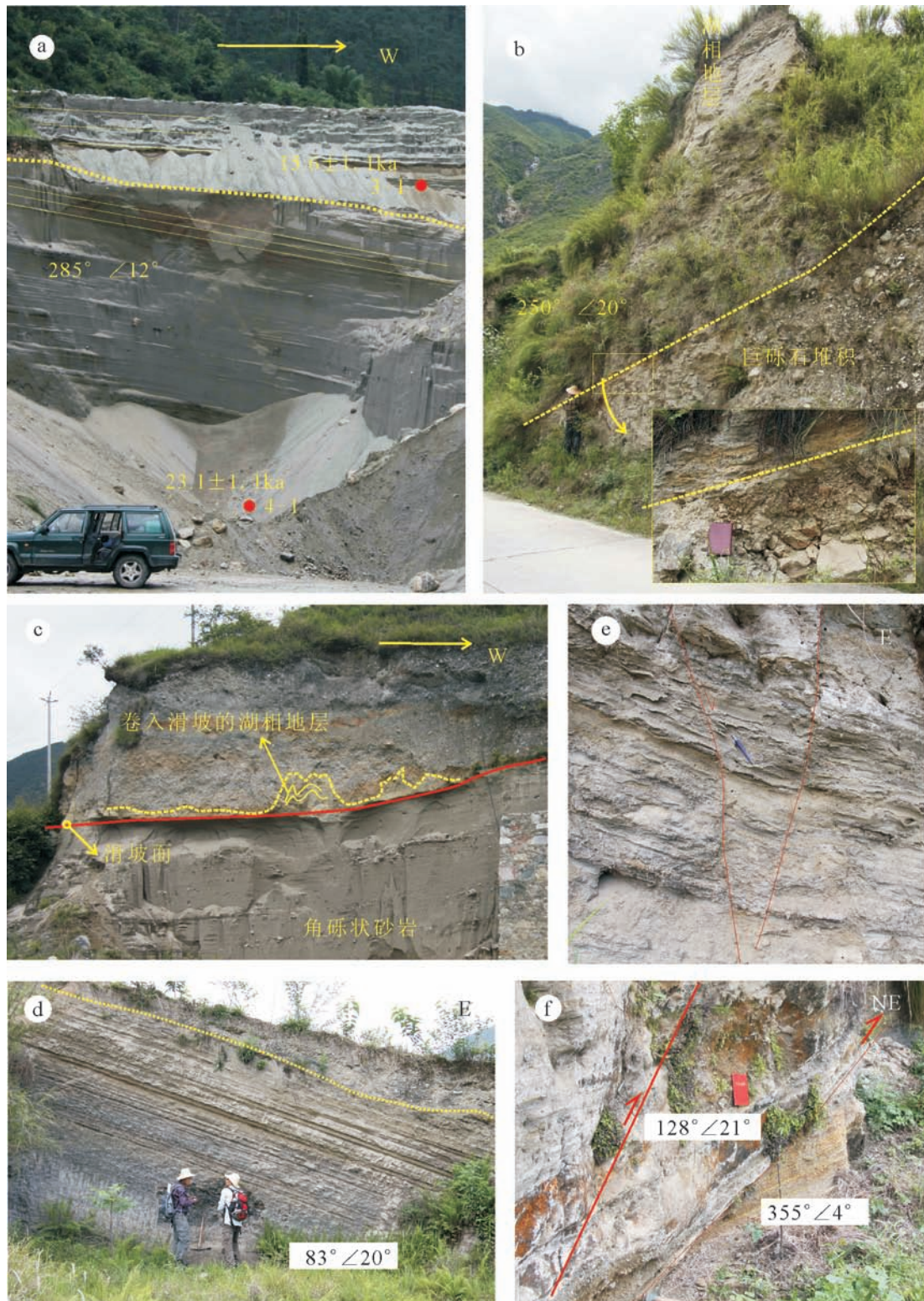
(3)角砾状砂层内部发现了断层活动记录(图3-a)。在冷碛镇的沈村一带,角砾状砂层内部发育3条正断层,产状分别为140°∠48°、155°∠50°、160°∠44°。在得威乡,角砾状砂层上部发育一处滑坡

表1 研究区样品测试结果

Table 1 OSL dating results of the samples

野外编号	岩性	埋深/m	U/10 ⁻⁶	Th/10 ⁻⁶	K/%	等效剂量 E.D/Gy	年剂量Dy /Gy·ka ⁻¹	含水量 /%	年龄/ka	数据来源
3-1	粗砂	25	1.42	4.10	2.53	54.13±3.31	3.47±0.14	3.3	15.6±1.1	本文
4-1	角砾状砂	5	3.19	14.8	2.29	106.52±2.66	4.60±0.18	16.6	23.1±1.1	
JJOSL-1	粉砂	24.2			3.02	4.89±0.49	86.7±9.5	14	17.8±2.6	①
JJOSL-5	粉砂	8.4			2.6	4.70±0.47	54.1±2.2	10	11.5±1.2	
JJOSL-7	粉砂	0.6			2.53	3.96±0.40	44.1±3.0	2	11.1±1.3	

图版 I Plate I



a.角砾状砂层上部的不整合;b.得威乡湖相地层底部的岩崩砾石堆积,反映了可能的地震成因;c.角砾状砂层上面的滑坡体;d.倾斜的古堰塞湖地层;
e.湖相地层内部的花状构造;f.堰塞湖内部的逆冲断层

体,卷入滑坡变形的地层有河流相砾石和湖相地层,其中湖相地层呈团块状褶皱(图版 I-c)。在得妥乡,角砾状砂层已发生倾斜,产状 $285^{\circ}\angle 12^{\circ}$,其上为一套冲积扇,产状 $85^{\circ}\angle 28^{\circ}$,呈微角度不整合接触(图版 I-a)。冲积扇上部发育一套产状水平的河流相细砂层。以上3个发现说明,角砾状砂层沉积之后冷碛镇断裂带发生过活动。角砾状砂层底部年龄约 27ka (^{14}C),下部1个样品获得的光释光年龄为 $23.1\pm 1.1\text{ka}$ (表1)。冲积扇上部水平产状的河流相砂层获得的光释光年龄是 $15.6\pm 1.1\text{ka}$ (表1,图版 I-a),将冷碛镇断裂带的活动时间限定在 23~16ka 之间。

(4)得威乡古堰塞湖湖相地层的底部发育棱角状、无磨圆、无分选的岩崩砾石堆积(图版 I-b),指示了堰塞湖的地震成因。堰塞湖的沉积范围位于加郡乡以北,表明地震堵江的位置位于加郡乡—得妥乡 V 型深切河谷段。在靠近底部采集了湖相地层内部的粉砂层,光释光年龄为 $17.8\pm 2.6\text{ka}$ ^①,代表了地震堰塞湖的形成时间,也代表了古地震发生的时间。结合前文角砾状砂层变形的数据(23~16ka),笔者判断冷碛镇断裂的准确活动时间约为 18ka。

得威乡湖相地层内部尚未发现软沉积变形,但发现许多后期变形的记录。考虑到阶地上未固结的泥岩可以出现滑坡等变形,在野外调查中对湖相地层内部变形进行了认真辨别。在河流西岸,湖相地层总体向东、东南倾斜(图版 I-d),局部西倾(图版 I-b),有滑坡成因的可能。但是,在已经倾斜的地层中发现有规模较小的走滑断层,具有花状构造的特点,显示走滑正断的特征(图版 I-e),与角砾状砂层内部发现的正断层相匹配。同时,还发现倾斜的湖相地层逆冲于一套砂层之上,断层倾向东南,倾角 45° (图版 I-f)。断层的倾向与坡向相同,但为逆断层,这绝不可能是滑坡成因。以上说明,在湖相地层沉积之后,冷碛镇断裂带仍在活动,但其运动学性质尚不清楚。

湖相地层之上不整合一套粉砂层,其光释光年龄为 $11.1\pm 1.3\text{ka}$ (JJOSL-7)^①,代表了湖相地层结束的上限值。如断层活动使得威乡古地震堰塞湖的溃坝,那么 11ka 可作为这期活动的参考值。

4 讨论

4.1 冷碛镇断裂的活动性及其意义

龙门山断裂带西南段具有怎样的活动性目前尚不清楚。野外发现冷碛镇断层切割了 T_3 阶地。

沈村一带, T_3 阶地之上的地貌发育断层垭口(图 3-b 中剖面 B-B')。垭口以西的角砾状砂层内部发育正断层,指示了与右行走滑相伴生的伸展应力环境,同时获得了 23~16ka 的活动期限。结合地震型堰塞湖的形成,将变形的时间确定为 18ka 左右。湖相地层的变形指示,冷碛镇断裂,即龙门山断裂带西南段在湖相地层沉积之后仍在活动。本文初步给出 11ka 左右的认识,但尚需进一步的研究。沿大渡河泸定—石棉段分布最为广泛的沉积物是构成一级阶地的沉积物,其时代尚不清楚。沿着大渡河中游分布的城镇、村庄和耕地大部分位于一级阶地之上,其内部没有断裂痕迹,说明西南段在一级阶地之后并没有活动,不过尚需调查验证。

冷碛镇断裂带具有右行走滑伸展的性质。2008 年龙门山断裂带中段的 $M_s 8.0$ 汶川地震显示,该断裂带具有逆冲兼右行走滑的运动特征^[3-9]。2012 年龙门山断裂带中南段的 $M_s 7.0$ 芦山地震同样显示出逆冲的特征^[10-11]。冷碛镇断裂带的右行走滑伸展与龙门山中段右行走滑逆冲形成了鲜明的对比^[1]。是什么原因造成的这一现象呢? 本文未深入研究,但笔者认为原因之一可能是受到鲜水河断裂带的影响。龙门山断裂带与鲜水河断裂带斜交,构成青藏高原东南缘独特的 Y 型构造^[1, 25-26]。这种 Y 型构造在深部结构亦有表现,即莫霍面在龙门山断裂带呈北东向而在马尔康断裂呈北西向,在小金以南转为南北向^[27]。冷碛镇断裂与鲜水河断裂带约呈 40° 斜交(图 1),鲜水河断裂呈现强烈的左行走滑,按照里德尔剪切模型,冷碛镇断裂恰好位于张裂 T 的位置。鲜水河断裂的左行走滑是否可促使冷碛镇断裂出现伸展的应力环境呢? 这涉及到区域大型断裂带之间的相互影响,而对于龙门山断裂带西南段走滑伸展的运动特点和动力学背景的研究,是理解青藏高原东南缘块体运动方式及其地震地质意义的重要方面。

4.2 影响大渡河谷构造地貌演化的因素

冷碛镇断裂沿大渡河中游冷碛镇—得妥乡一带展布,影响了该段河谷地貌的演化。大渡河泸定—石棉段距离鲜水河断裂带较近,也必然受到鲜水河断裂带活动的影响。如 1786 年 6 月 1 日,鲜水河断裂带上、位于康定与磨西之间的雅家埂附近发生的 $7\frac{1}{4}$ 级地震,造成大渡河水堵塞,停蓄山间积 9 日,倒灌百余里,6 月 10 日堵河大坝溃决死伤数万^[28-30]。这是一次地震诱发山体滑坡、岩体崩

图版 II Plate II



a~b.得威乡附近角砾状砂层的野外地质特征;c.地层柱状图

塌、河流堰塞的典型灾害事件。地质历史时期,鲜水河断裂带发生过多次7级以上的强震^[31-33],对大渡河河谷地貌的影响不容忽视。需要说明的是,虽然T₂阶地内角砾状砂层和湖相地层内部的活动断层为冷碛镇断裂活动的产物,但T₃阶地内的巨砾石堆积和滑坡堆积在没有确切断裂活动证据之前,很难确定是否为冷碛镇断裂活动的直接产物。由于受到2条活动断裂带的共同影响,大渡河中游泸定—石棉段的河谷地貌演化还有深入研究的必要。

4.3 河谷沉积物的地震地质意义

青藏高原东缘活动断层与河流发育高度重合,断裂形迹较难观测。在深切河谷地区,河流阶地沉积物往往难以保存,但是大型滑坡、岩崩,甚至大型古地震堰塞湖常能保留下来。这些沉积物在空间上呈不连续块状产出,与普通的河流阶地沉积物形成鲜明对比。野外发现,规模巨大的滑坡在空间上往往与河流堵塞有关,常构成古地震堰塞湖的堵江物质。在青藏高原东缘的河流中大量存在这类滑坡,如著名的叠溪古堰塞湖,沿江分布长约10km的滑坡堆积构成该堰塞湖的堵江物质,内部由洪积扇、

岩崩巨砾石及其松散破碎的岩石组成^[15, 17]。再如金沙江金坪子一带发育的大面积滑坡,内部由少量河流相沉积物、崩积物、坡积物及泥石流相堆积物组成,造成了大规模的堵江事件^[34-35]。岩崩、滑坡、堰塞湖等沉积物或堆积物往往是地震事件的产物,具有重要的地震地质意义。同时,这类沉积物内部往往有活动断裂的形迹、古地震形迹^[16]。在与活动断裂带伴生的、沉积物缺乏的深切河谷内,对此类沉积物或堆积物的研究具有重要的地震地质意义,这在青藏高原东缘的河流系统中具有普遍性。

5 结 论

(1)龙门山断裂西南段,即冷碛镇断裂2万年以来存在2期活动。第一期发生在18ka左右,断层切断一套巨砾石堆积和角砾状砂层,形成砂层内部的正断层,显示右行走滑伸展的运动学特征。变形还促使形成了得威乡古地震堰塞湖,该堰塞湖保留了约8ka。第二期活动可能发生在11ka,使得威乡湖相地层发生变形。

(2)与断裂伴生的深切河谷内的沉积物,如岩

崩堆积、古地震堰塞湖沉积等,对于研究断裂带的活动性和活动历史具有重要的指示意义,这在青藏高原东缘深切河流系统中具有普遍性。

致谢:感谢中国地质科学院地质力学研究所吴中海研究员的讨论交流,同时感谢李恒强硕士、刘城利同学在野外工作中的帮助,以及审稿专家的辛苦工作。

参考文献

- [1]张岳桥,李海龙. 龙门山断裂带西南段晚第四纪活动性调查与分析[J]. 第四纪研究, 2010, 30(4): 699-710.
- [2]Densmore A L, Ellis M A, Li Y, et al. Active tectonics of the Beichuan and Pengguan faults at the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Tectonics, 2007, 26(4): 1-17.
- [3]Li Y Q, Jia D, Shaw J H, et al. Structural interpretation of the coseismic faults of the Wenchuan earthquake: Three-dimensional modeling of the Longmen Shan fold-and-thrust belt[J]. J. Geophys. Res., 2010, 115(B4): B4317.
- [4]An M, Feng M, Long C. Deep ruptures around the hypocenter of the 12 May 2008 Wenchuan earthquake deduced from aftershock observations[J]. Tectonophysics, 2010, 491(1/4): 96-104.
- [5]Burchfiel B C, Royden L H, Van der Hilst R D, et al. A geological and geophysical context for the Wenchuan earthquake of 12 May 2008, Sichuan, People's Republic of China[J]. GSA Today, 2008, 18(7): 5.
- [6]Dong S W, Zhang Y Q, Wu Z H, et al. Surface Rupture and Co-seismic Displacement Produced by the Ms 8.0 Wenchuan Earthquake of May 12th, 2008, Sichuan, China: Eastwards Growth of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Geologica Sinica-English Edition, 2008, 82(5): 938-948.
- [7]Li H B, Fu X F, Woerd J M V D, et al. Co-seismic Surface Rupture and Dextral-slip Oblique Thrusting of the Ms8.0 Wenchuan Earthquake[J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(12): 1623-1643.
- [8]Nakamura T, Tsuboi S, Kaneda Y, et al. Rupture process of the 2008 Wenchuan, China earthquake inferred from teleseismic waveform inversion and forward modeling of broadband seismic waves[J]. Tectonophysics, 2010, 491(1): 72-84.
- [9]Xu X, Wen X, Yu G, et al. Coseismic reverse- and oblique-slip surface faulting generated by the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake, China[J]. Geology, 2009, 37(6): 515-518.
- [10]Zhang Y, Dong S, Hou C, et al. Seismogenic Structure of the April 20, 2013, Lushan Ms7 Earthquake in Sichuan[J]. Acta Geologica Sinica-English Edition, 2013, 87(3): 633-645.
- [11]徐锡伟,陈桂华,于贵华,等. 芦山地震震构造及其与汶川地震关系讨论[J]. 地学前缘, 2013, 20(3): 11-20.
- [12]Arger J, Mitchell J, Westaway R W. Neogene and Quaternary volcanism of southeastern Turkey[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2000, 173(1): 459-487.
- [13]黄镇国,张伟强. 中国热带第四纪板块构造的地貌效应[J]. 地理科学, 2004, 24(3): 286-291.
- [14]王兰生,王小群,许向宁,等. 岷江叠溪古堰塞湖的研究意义[J]. 第四纪研究, 2012, 32(5): 998-1010.
- [15]王兰生,杨立铮,王小群,等. 岷江叠溪古堰塞湖的发现[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2005, 32(1): 1-11.
- [16]Wang P, Zhang B, Qiu W, et al. Soft-sediment deformation structures from the Diexi paleo-dammed lakes in the upper reaches of the Minjiang River, east Tibet[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 40(4): 865-872.
- [17]李海龙,张岳桥,李建华. 青藏高原东缘南北向河流系统及其伴生古堰塞湖研究[J]. 第四纪研究, 2010, 30(4): 812-824.
- [18]吴中海,周春景,冯卉,等. 青海玉树地区活动断裂与地震[J]. 地质通报, 2014, 33(4): 419-469.
- [19]蒋瑶,吴中海,刘艳辉. 青海玉树活动断裂带的多期古地震滑坡及其年龄[J]. 地质通报, 2014, 33(4): 503-517.
- [20]田婷婷,吴中海,马志邦. 青海玉树断裂带地震落石的地震地质意义[J]. 地质通报, 2014, 33(4): 567-578.
- [21]Parker R N, Densmore A L, Rosser N J, et al. Mass wasting triggered by the 2008 Wenchuan earthquake is greater than orogenic growth[J]. Nature Geoscience, 2011, 4(7): 449-452.
- [22]Ugai K, Yagi H, Wakai A, et al. The Future in the Tangjiashan Dammed-Lake Resulted from the M8.0 Wenchuan Earthquake: Discussion on Several Scientific Issues[M]. Earthquake-Induced Landslides, Ugai K, Yagi H, Wakai A, Springer Berlin Heidelberg, 2013: 901-906.
- [23]Prescott J R, Hutton J T. Cosmic ray contributions to dose rates for luminescence and ESR dating: large depths and long-term time variations[J]. Radiation Measurements, 1994, 23(2): 497-500.
- [24]Fleming S J. The Pre-dose technique: a new thermoluminescence dating method[J]. Archaeometry, 1973, 15(1): 13-30.
- [25]张岳桥,杨农,孟晖,等. 四川攀西地区晚新生代构造变形历史与隆升过程初步研究[J]. 中国地质, 2004, 31(1): 23-33.
- [26]唐文清,陈智梁,刘宇平,等. 青藏高原东缘鲜水河断裂与龙门山断裂交会区现今的构造活动[J]. 地质通报, 2005, 24(12): 1169-1172.
- [27]龙锋,倪四道,闻学泽. 用远震接收函数研究龙门山断裂带与其邻区的莫霍面深度及波速比分布[J]. 地球学报, 2011, 32(4): 438-446.
- [28]Dai F C, Lee C F, Deng J H, et al. The 1786 earthquake-triggered landslide dam and subsequent dam-break flood on the Dadu River, southwestern China[J]. Geomorphology, 2005, 65(3): 205-221.
- [29]江在雄. 1786 年大渡河地震、水患及救灾 康定—泸定磨西地震 220 周年[J]. 四川地震, 2006, (3): 4-9.
- [30]王新民,裴锡瑜. 康定—泸定地区强震活动与地震宏观破坏研究[J]. 四川地震, 1998, (1/2): 7-46.
- [31]Ma J, Ma S L, Lei X L. Fault geometry and its relationship with seismicity in the Xianshuihe fault zone[J]. Phys. Chem. Earth, 1989, 17: 131-142.
- [32]张培震. 青藏高原东缘川西地区的现今构造变形、应变分配与深部动力过程[J]. 中国科学(D辑), 2008, 38(9): 1041-1056.
- [33]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 Papers, 1998, 327: 1-108.
- [34]胥勰,杨达源,葛兆帅,等. 金沙江金坪子堆积体成因的初步研究[J]. 山地学报, 2006, 24(4): 403-409.
- [35]徐永辉,杨达源,陈可锋,等. 金沙江金坪子堆积体地貌过程与稳定性研究[J]. 工程地质学报, 2007, 15(2): 169-173.
- ①乔彦松. 川西河谷第四纪地质环境调查与灾害效应研究. 北京:中国地质调查局地质力学研究所, 2011.