

安宁河断裂冕宁以北晚第四纪地表变形与强震破裂行为

冉勇康*, 陈立春, 程建武, 宫会玲

中国地震局地质研究所, 北京 100029

* E-mail: ykran@263.net

收稿日期: 2007-08-31; 接受日期: 2008-02-18

国家重点基础研究发展计划(编号: 2004CB418401)资助项目

摘要 安宁河断裂作为川滇活动地块东边界的主要活动断裂, 研究其晚第四纪地表变形和强震破裂行为是认识断裂带乃至川西地区未来地震危险性的重要基础工作. 通过详细地质地貌调查、数字影像分析、全站仪实测、组合探槽开挖和年代测定, 对安宁河断裂冕宁以北段几个晚第四纪变形遗迹保存较好的地段进行断错地层地貌序列的研究, 获得了一些新认识: 紫马跨和野鸡洞两地点都反映出距今约 1634~1811, 1030~1050 和 280~550 a 左旋位移量在 3 m 左右的强震事件, 重复间隔为 520~660 a; 大海子-干海子最年轻的事件应该是公元 1536 年的地震, 其他事件别发生在距今 1768~1826, 2755~4108 和 4108~6593 a. 复发间隔为约 1300~1900 a. 强震活动存在群集现象. 安宁河断裂北段未来一段时间内有发生强震的可能性.

关键词

安宁河断裂
晚第四纪
古地震
强震破裂行为

川西位于川滇、巴颜喀拉和华南三大活动地块的交界部位 [1,2], 是中国大陆晚第四纪构造变形和强震活动最强烈的地区, 仅最近 150 多年就有 7 级以上强震 10 次之多, 平均 10~15 a 一次, 但 30 余年来没再有强震发生. 安宁河断裂作为川滇活动地块东边界的主要活动断裂, 在断裂附近的西昌地区历史记载过 1536 和 1850 年 2 次以上 7.5 级以上的地震, 但 150 多年来, 除 1952 年在冕宁以南记载过一次 6.5 级地震外, 则没有更大地震的发生. 历史强震的时空分布特征说明了什么, 川西地区是否进入新一轮的强震活跃区, 如果是下一个强震发生的地点或发震构造是否会 150 余年来没有 7 级以上强震记录的安宁河断裂, 尤其是明显“缺震”的安宁河断裂北段等, 这一直是地震科学工作者所关注的问题.

过去的几十年来, 有关川西和安宁河断裂晚第四纪变形和强震复发特征的研究, 几乎没有间断过,

尤其对于安宁河断裂的研究取得了一系列的成果 [3~12], 如探讨川西构造变形样式、强震活动的时空分布, 安宁河断裂的几何展布和晚第四纪活动性、分段特征, 以及个别地点的古地震等, 这些成果为进一步研究断裂的强震破裂行为奠定了良好的基础. 同时随着技术的进步和认识水平的提高, 也发现若干需要深入、细致开展工作的方面, 晚第四纪地质地貌序列变形和细致的探槽古地震研究是其中特别重要的内容之一.

在“973”项目“活动地块边界动力过程与强震预测”的支持下, 我们有机会通过数字影像分析、全站仪和实测和组合探槽的开挖, 对安宁河断裂紫马跨-冕宁段几个晚第四纪变形遗迹保存较好的地段进行断错地层地貌和古地震研究, 积累了更为扎实的资料, 获得了一些新认识.

1 安宁河断裂的演化历史与活动特征概述

安宁河断裂形成于元古代, 最早被称为康滇台背斜; 自二叠纪开始又被称为古裂谷, 晚三叠世后, 原断裂带基本处于隆升剥蚀状态. 早期安宁河断裂带的展布范围从康定至泸定之间的金汤附近开始, 向南经石棉、冕宁、西昌、攀枝花, 过金沙江深入云南境内^[8]. 新近纪末至第四纪初安宁河断裂东西两支活动明显, 以差异运动为主, 形成安宁河断陷盆地, 堆积昔格达组河湖相地层. 从早更新世末-中更新世初, 随着青藏高原隆升和应力环境的变化, 断裂的走滑运动开始占据优势, 同时伴有挤压逆冲的特征, 沿断裂分布的昔格达湖盆反转隆升, 昔格达组地层强

烈褶皱和断裂. 晚更新世开始, 安宁河西支断裂活动性趋于停止, 东支断裂的西昌以南段, 活动性也逐渐减弱. 而东支断裂的活动性则加强, 直至全新世^[8].

晚第四纪活动的安宁河断裂长约 150~160 km, 具有明显的分段特征(图 1). 一般认为安宁河断裂可划分为两个段落. 裴锡瑜等^[9]在 1:5 万活断层填图的基础上, 通过分析断裂的几何特征、活动强度, 认为大体以冕宁北的小盐井为界, 断裂北段由一系列次级断层组成的左旋左阶为主的逆走滑断裂, 平面结构简单; 南段由一系列次级断层斜列、断续延伸组成两条近平行的断裂. 两断裂之间为条状上升的山体, 东侧断裂控制了断层槽谷, 并发育串珠状的山间小

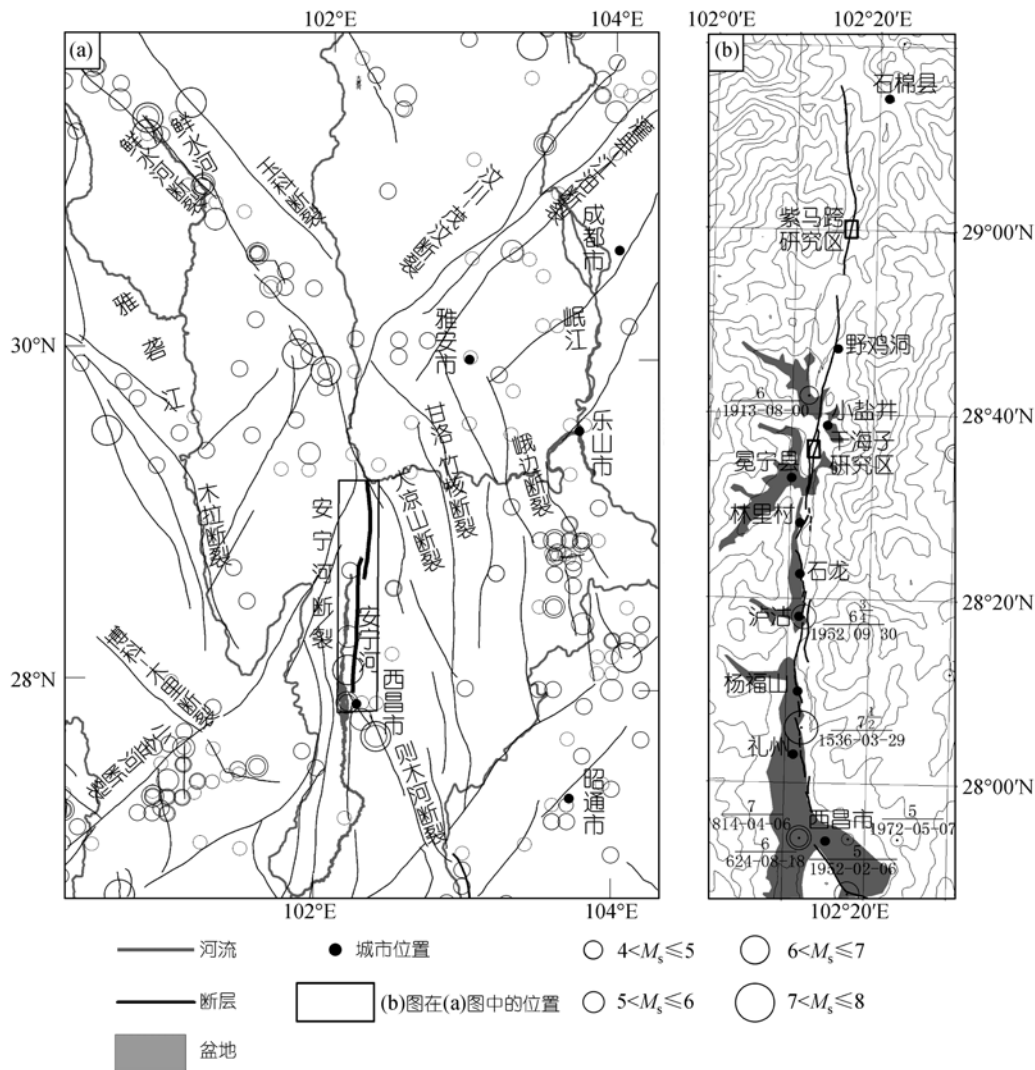


图 1 安宁河断裂的构造位置及几何结构

盆地, 西侧断裂的西边为安宁河谷地. 在断裂活动强度方面则有北段位移速率低于南段, 而且记录的 8 个 6 级以上地震有 6 个发生在南段冕宁以南^[9]; 闻学泽^[4]还认为 1536 年 7.5 级地震的地表破裂向北终止在冕宁附近, 并且在冕宁附近为重、磁正负异常的过渡部位. 我们赞同冕宁一带为南北两段的分段边界, 小盐井至马尿河应为两段的过渡带(证据后文将述及), 本文讨论的重点也就在马尿河以北的地区.

2 晚第四纪地表破裂与古地震

2.1 紫马跨一带断错地貌与古地震

紫马跨一带是安宁河断裂最新构造破裂迹线较单一, 断错地貌序列发育较最好的地点(图 2). 该处安宁河断裂走向北东 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 、倾向东, 近地表的倾角 70° 左右. 断层逆走滑位错由晚更新世晚期冰碛物^[5,8]组成的三级阶(台)地, 以冰碛物为基座、上覆冲积层的二级阶(台)地和以冲积物为主、并见局部断塞塘堆积的一级阶地, 因而记录了晚更新世中晚期以来不同时段水平和垂直变形量. 尤其三级和一级阶地

位错遗迹保存较好.

在紫马跨附近约 4 km 的地段上, 有 3~4 条南亚河次级的冲沟近垂直流过安宁河断裂(图 2(a)). 航空影像与数字地形的融合图上, 不同级别的地貌面显示清楚(图 2(b)), 在次级冲沟穿过断裂的部位阶地被同步位错, 两条主要冲沟的位错量分别为, 84.3 m(图 2(b)的 A), 56.6 m(图 2(b)的 B)和 86.5 m(图 2(b)的 C)平均约为 76 m. 对紫马跨北沟(图 2(b)冲沟 B)进行了全站仪实测, 得到该冲沟三级阶(台)地的位错量为 82 m(北侧), 与解译图基本一致. 表现出断裂晚更新世晚期以来的强烈活动.

在紫马跨北冲沟(图 2(b)冲沟 B)一级阶地明显被安宁河断裂的多次事件位错, 一是一级阶地的南边界被左旋位错了 10.5 m(图 3(b)), 二是断层的逆冲分量造成的断层陡坎使得下游阶地高于上游阶地, 堵水形成断塞塘. 更为重要的是在断层上盘一级阶地还可以分解出更次级的 3 级小阶地, 它们相对于断塞塘的高度分别为 0.75, 1.53 和 2.3 m(图 3(a)). 这种微地貌特征暗示着这级阶地形成以来可能发生过 3 次

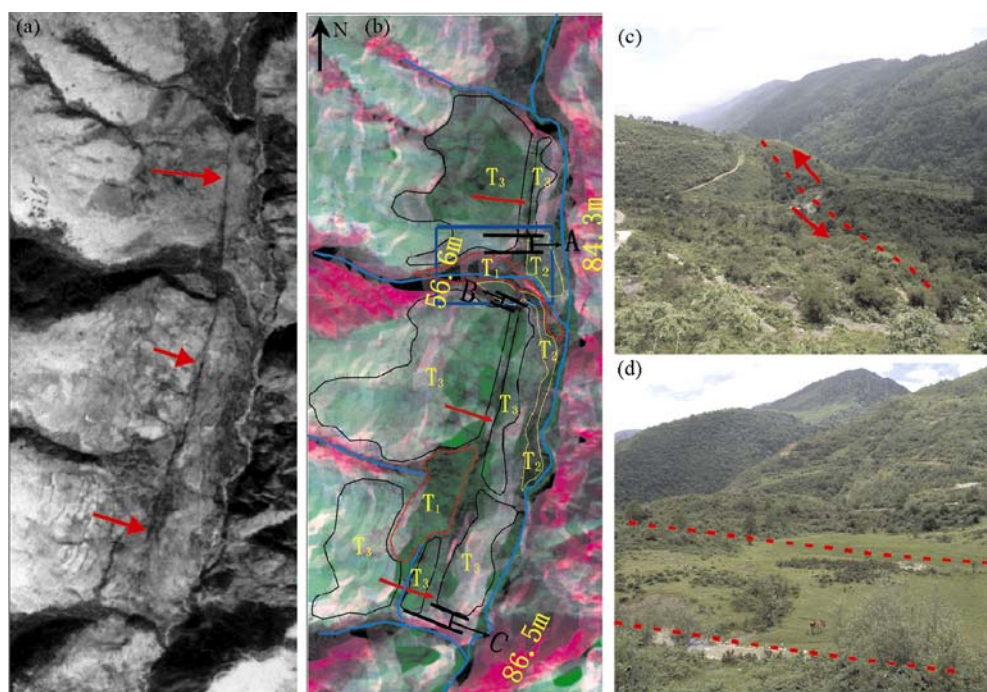


图 2 安宁河断裂紫马跨一带的断错地貌

(a) 航空影像, 红箭头所指为断裂; (b) 影像与 DEM 数据融合与地貌面提取, 红箭头所指为断层, 橙红、黄、黑细线分别表示识别的阶地边界, 蓝线表示水系, 黄色字 $T_1\sim T_3$ 为阶地编号, 86.5 m 等表示阶地左旋位错量; 图的色调由绿到红表示坡度梯度变大; (c) 紫马跨北左旋逆走滑断错地貌照片(镜向东北); (d) 紫马跨北约 0.7 km 大型断塞塘地貌(镜向西南)

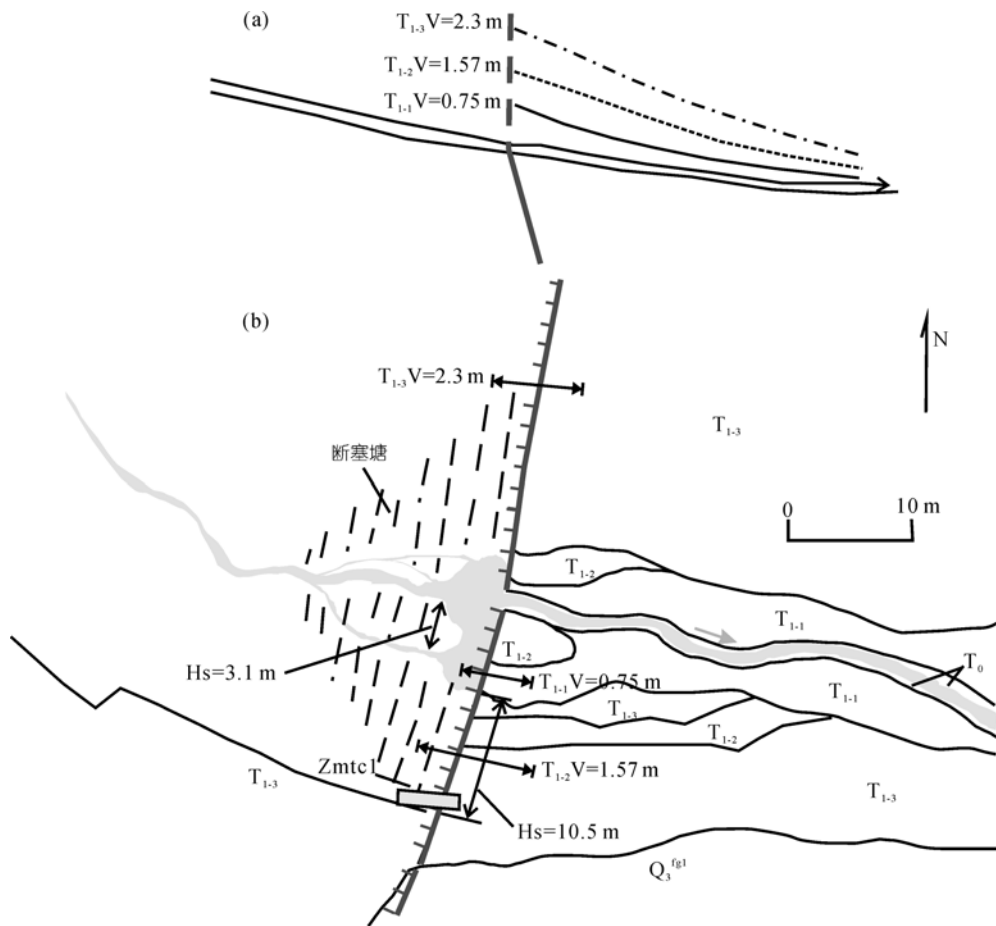


图3 紫马跨北冲沟一级阶地位错及小断塞塘

(a) 阶地位错剖面图; (b) 阶地位错平面图; 下游阶地被3次抬升; $T_{1-3}V=2.3\text{ m}$ 等表示垂直位移; $Hs=10.5\text{ m}$ 等表示左方位移

断错地表的事件 [13]。另外前人在紫马跨附近的微地貌研究认为, 该地点最年轻的一次事件的同震地表左旋位移量为约 $2.7\sim 2.8\text{ m}$ [3,5]; 那么 10.5 m 左右的左旋位移量认为是 3 次事件的累计位移量完全可以接受。

在断塞塘的边部开挖探槽, 揭示出一级阶地形成以来的位错事件。探槽剖面显示(图 4): F2 和 F3 断错以大或巨砾石为主组成的冲洪积层①, 而后堆积代表断塞塘沉积的层③和④; 层②则是以断塞塘物质为主的混杂堆积, 可认为是断层左旋走滑运动把它运移到目前的位置。由层②, ③分别获得 3 个 ^{14}C 和一个释光样品(表 1~3), 层②样品为木块, 层③底部和顶部样品为腐殖质土与碳化叶片细树枝的混合物, 释光样品为中粗砂, 它们的测年结果分别为距今 Zmtc1-1: $1349\sim 1634(1492\pm 142)\text{ a}$, Zmtc1-2: $1811\sim$

$1921(1870\pm 60)\text{ a}$, Zmtc1-6: $1053\sim 1172(1113\pm 63)\text{ a}$ 和 Zmtc1-7: $(5.3\pm 0.4)\text{ ka}$ (由于该值明显比 3 个 ^{14}C 值偏老, 不确定性较大, 未用于古地震年代分析)。分析得到探槽揭露的第一次事件应稍早于层③底部年代值, 层②中样品值应近似等于层③底部样品值, 因此取这两个样品的区间值代表事件发生的大体年代为距今: $1634\sim 1811(1680\pm 190)\text{ a}$ 。探槽中的第二次事件发生在层④堆积之后, 堆积断塞塘堆积⑤和⑥, 层⑥底部 ^{14}C 样品年代值为距今 Zmtc1-3: $508\sim 556(532\pm 24)\text{ a}$, 事件 2 应发生在层③顶部和层⑥底部年代之间, 即距今 $556\sim 1053\text{ a}$ 。最后一次事件发生在层⑥之后, 层⑦~⑨之前, 由于层⑧底部 2 个 ^{14}C 样品(Zmtc1-4, Zmtc1-5)年代为现代, 事件年代应比距今 $508\sim 556(532\pm 24)\text{ a}$ 年轻。显然, 探槽揭露的断错事件期次与断错地貌显示的事件具有很好的一致性。

表 1 安宁河断裂冕宁以北晚第四纪地层样品常规碳 14 测年结果^{a)}

野外编号	样品	采样地点	年代/a BP	树轮校正年龄/cal a BP	
				区间	概率
Zmtc1-1	朽木	四川石棉栗子乡探槽	1610±160	[1349:1634]	0.88
Zmtc1-2	腐殖土		1910±60	[1648:1694]	0.12
Zmtc1-3	腐殖土		520±55	[1741:1755]	0.07
Zmtc1-4	树枝		现代碳	[1811:1929]	0.87
Zmtc1-5	腐殖土		现代碳	[508:556]	0.79
Zmtc1-6	腐殖土		1170±50	[606:625]	0.21
Btc1-1	腐殖土	四川冕宁县大海子附近	11010±130	[1009:1028]	0.12
Btc1-2	腐殖土		3120±60	[1053:1172]	0.88
Btc1-3	腐殖土		1075±95	[12866:13055]	1.00
Btc1-4	腐殖土		785±60	[3262:3312]	0.32
Btc2-2	腐殖土		9830±125	[3316:3400]	0.68
Btc2-3	腐殖土		11285±100	[912:1092]	0.90
Btc2-4	腐殖土	四川冕宁县干海子	4880±75	[1106:1136]	0.09
Btc2-5	腐殖土		5790±75	[669:743]	0.95
Btc2-6	腐殖土		540±60	[753:761]	0.05
TC3-1	腐殖土		9160±75	[11099:11409]	0.85
TC3-2	腐殖土		5790±65	[11433:11478]	0.07
TC3-3	腐殖土		3740±60	[11551:11600]	0.07
TC3-4	腐殖土	四川冕宁县大海子	2630±55	[13091:13258]	1.00
TC3-5	腐殖土		1830±55	[5487:5507]	0.10
TC3-6	腐殖土		1870±55	[5581:5715]	0.90
Btc7-1	腐殖土		3845±75	[6496:6668]	1.00
				[515:560]	0.61
				[598:632]	0.39
				[10238:10407]	1.00
				[6503:6524]	0.11
				[6526:6660]	0.89
				[3985:4052]	0.36
				[4060:4156]	0.57
				[2717:2793]	0.94
				[2828:2840]	0.06
				[1703:1826]	0.96
				[1851:1859]	0.04
				[1736:1764]	0.21
				[1768:1870]	0.79
				[4154:4301]	0.68
				[4324:4356]	0.14
				[4367:4405]	0.16

a) 中国地震局国家地震动力学实验室测试, 单位 cal a BP 为径树轮校正后的 ¹⁴C 年龄

表 2 干海子大探槽 TC3 地层样品加速器质谱碳 14 测年结果^{a)}

样品编号	样品	碳 14 年代/a BP	树轮校正后年代	
			(1σ)	(2σ)
TC3C1	炭屑	3045±40	1390 BC(68.2%)1260 BC	1420 BC(95.4%)1190 BC
TC3C2	炭屑	1725±40	250 AD(68.2%)390 AD	230 AD(95.4%)420 AD
TC3C3	炭屑	75±30	1690 AD(20.3%)1730 AD 1810 AD(14.2%)1840 AD 1870 AD(33.7%)1920 AD	1690 AD(24.9%)1730 AD 1800 AD(70.5%)1930 AD
TC3C4	炭屑	1515±45	440 AD(18.2%)490 AD 530 AD(50.0%)610 AD	430 AD(95.4%)640 AD
TC3C5	炭屑	5590±40	4455 BC(68.2%)4365 BC	4500 BC(95.4%)4340 BC
TC3C6	炭屑	2235±35	380 BC(17.6%)350 BC 300 BC(50.6%)210 BC	390 BC(95.4%)200 BC
TC3C7	炭屑	3155±45	1495 BC(13.5%)1470 BC 1465 BC(54.7%)1395 BC	1520 BC(95.4%)1310 BC
TC3C8	炭屑	6185±40	5220 BC(6.2%)5200 BC 5180 BC(62.0%)5060 BC	5290 BC(2.4%)5260 BC 5230 BC(93.0%)5000 BC

a) 北京大学加速器质谱实验室、第四纪年代测定实验室测试

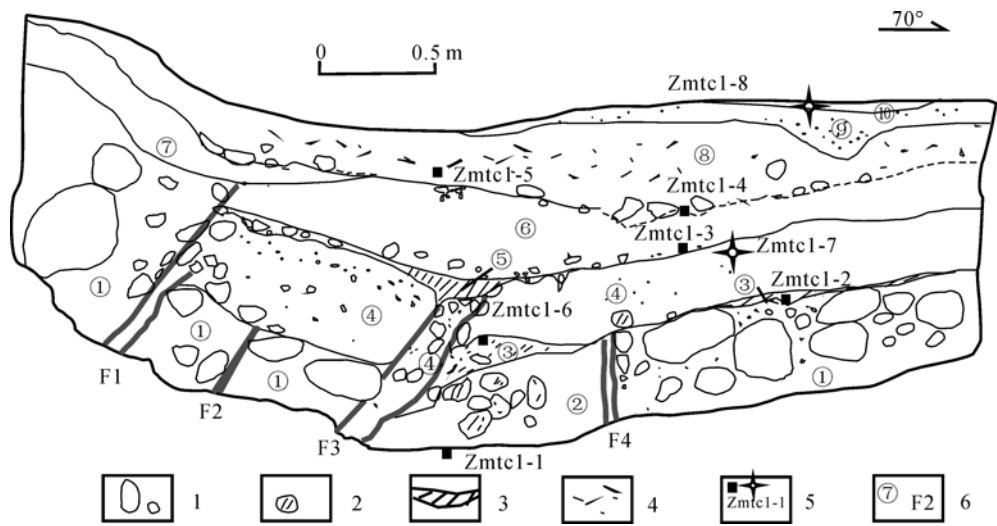


图4 紫马跨北断塞塘边部探槽剖面(样品测试结果见表1和3)

1 砾石和巨砾; 2 团块状堆积; 3 腐殖质土, 夹炭化树枝、叶片等; 4 基本未炭化的树枝、木段; 5 采样位置及编号, 黑方块为 ^{14}C , 星状为光释光; 6 圆圈数字为地层编号, F 为断层编号; ① 灰绿色含黏土中细砂充填的大砾、巨砾层; ② 灰白砂团块与草炭、棕黑泥混堆层; ③ 棕黑色草炭, 见半炭化的植物细茎和叶片; ④ 铁灰色含黏土砂, 含 1~2 cm 的次园状小砾, 剖面左侧含量高于右侧; ⑤ 相对杂乱的灰黑色土; ⑥ 灰黑色砂土, 夹少量树根; ⑦ 较均一的棕黄、微发黑的砂土; ⑧ 棕黄色砂土, 散布小砾、木屑; ⑨ 棕黑色黏泥, 植物根系和树枝较多, 含少量砾石; ⑩ 层厚仅 2~3 cm 的白、黄粗砂细砾

表3 紫马跨一带沉积样品光释光测年结果表^{a)}

送样号	埋深/m	测量技术	等效剂量/Gy	剂量率/ $\text{Gy} \cdot \text{ka}^{-1}$	年龄/ka	实验室评估
Zmtc1-7	1.3	细颗粒石英 OSL(SMAR)	11.1 ± 0.14	2.1	5.3 ± 0.4	仅供参考
Zmtc1-8	0.0	细颗粒石英 OSL(SMAR)	0.22 ± 0.02	2.3	0.1 ± 0.01	仅供参考

a) 中国地震局国家地震动力学实验室测试, Zmtc1-8 为现代样品, 作光晒退条件对比用

2.2 大海子-干海子一带的古地震

在冕宁县城东北的大海子-干海子一带, 安宁河断裂的最新活动在地貌上留下明显的遗迹, 一是在大海子, 由于断层的左旋逆走滑造成上盘(西盘)上升, 阻挡向西流入安宁河的支沟, 形成“大海子”断塞湖, 最新的位错事件还使湖岸阶地断错约 (3.5 ± 0.5) m(图 5(a)); 二是在干海子及附近, 安宁河断裂表现为局部的左旋拉张, 形成阶梯状下降的断层组, 并形成小型山间盆地(“干海子”和其北部的明显负地形)(图 5(b)), 这也可能是安宁河断裂分段的地质地貌标志。

(i) 大海子组合探槽. 为揭露由于断错阻水造成的多期湖积地层边界在安宁河断裂两侧的现在位置, 不同地层单元与断层的切盖关系, 由此判断古地震事件及其同震位移量. 在大海子南岸开挖了组合探槽, 3 条探槽垂直断层开挖, 长度分别为 30, 10 和 22 m, 以揭露断层与不同地层单元的切盖关系, 同时

也能反映湖积单元边界的位置, 而 5 条 10~12 m 长, 平行布设在断裂两侧的探槽则以揭露断错地层单元在断层两侧的位置为目的(图 5(a)~(8)).

探槽组主要揭露了 A, B, C1, C2, D, E, F 和 G 等 8 个地层单元. 单元 A 为风化岩石或岩石碎块组成的残积物, 主要见于探槽 TC1, TC2, TC3 和 TC6 的下部颜色偏锈黄; 单元 B 由砾块充填锈黄色砂黏土组成, 为短距离搬运过的坡积物, 在靠近断塞湖的 TC2, TC7 和 TC8 中颜色微显灰(TC9 和 TC10 由于探槽浅而未出露); 单元 C1 为断塞湖(塘)堆积的黑色、棕黑色黏土含少量砾块, 其沉积边界在断层两侧的探槽中被揭露出来, 现在的位置可作为分析断层是否存在走滑位移和位移量的依据; C2 层也为断塞湖的黏土和砂质黏土堆积, 但堆积物的颜色下部为发白且黏土含量高, 上部和断层上盘土壤化作用使得色微发锈黄, 其堆积范围比 C1 层分布广泛, 已开挖的探

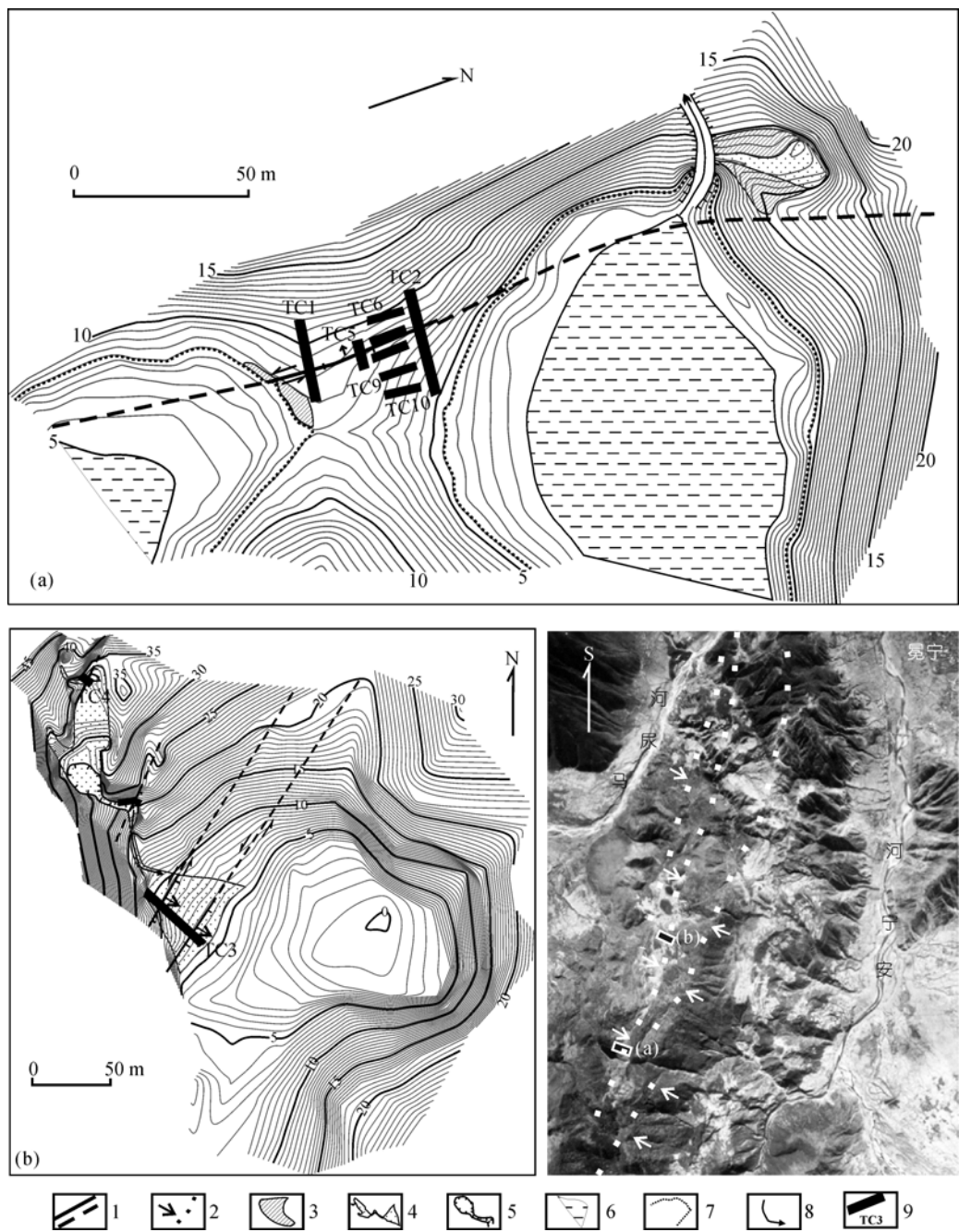


图 5 大海子和干海子断错地貌实测及组合探槽布设

1. 断层和推测断层的位置; 2. 航片显示的安宁河断裂; 3. 阶地分布范围; 4. 冲积扇; 5. 冲沟; 6. 断塞湖水面; 7. 高湖岸; 8. 断塞湖出水口; 9. 探槽及编号

槽组没有揭露其沉积边界在断层两侧的确切位置(主要见于探槽 TC2, TC7, TC8, TC9 和 TC10 中); 单元 D 为锈黄色砂土层、散布磨圆差的砾石, 应为有一定土壤化作用的坡积物, 仅在 TC1 和 TC2 的上盘、TC5 和 TC6 中见到, 不在断塞湖的堆积范围内。单元 E 为

断塞塘堆积, 为灰白色、灰黑色砂黏土, 其中杂堆着较多的半腐状态的直径厘米至几厘米的树枝和其他腐殖质堆积, 该层仅在 TC2, TC7, TC8, TC9 和 TC10 中较见到, 厚度数厘米至 30 cm 左右; 单元 F 为砂土炭灰堆积, 黑色, 在干海子、大海子一带低洼处普遍

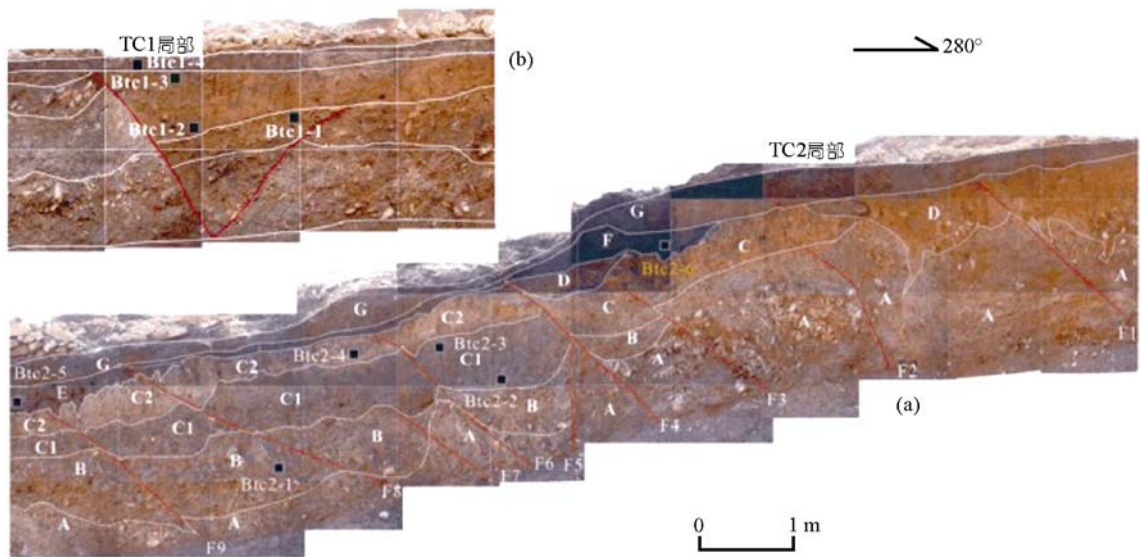


图6 大海子 TC1 探槽和 TC2 探槽局部照片解释图

大写字母为地层单元编号; 黑方块为 C 样品采样位置, 旁侧为样品编号; 红线表示断层

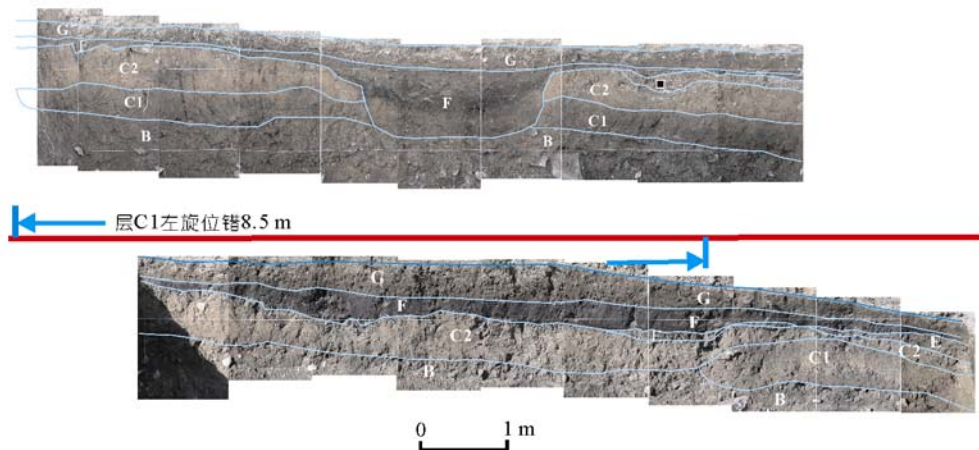


图7 大海子两条平行断层探槽 TC7 东壁和 TC8 西壁反映的标志地层层位错

大写字母为地层单元编号; 黑方块为 C 样品采样位置, 旁侧为样品编号; 断层两侧地层单元 C1 被左旋位错 8.5 m

见到, 很可能是山火之后的堆积层; G 层为表层砂土夹石块堆积, 土壤化程度在不同部位表现不一样, 较高部位红壤作用明显, 靠近断塞湖则腐殖质成分增加。从探槽组揭露的这 8 个地层单元分析, 除 C1 层堆积外, 其他地层单元现在的位置很难判断断层的水平位移量。

由垂直断层开挖的探槽 TC2 和 TC1 可看出 A, B, C1, C2, D, E, F 和 G 等 8 个地层单元, 它们与断层的切错关系 [13~17] 反映出断层的 4 次事件。另外, TC1 也反映出 3 次事件。所采样品能控制的事件仅最年轻的 3

次。由图可以分析出, TC1 和 TC2 中较早事件断错层 B, 之后堆积层 C, 发生的年代分别被控制在距今 12866~13055 a ((12960±95) a, 样品编号 Btc1-1) 和 13091~13258 a ((13175±84) a, Btc2-3) 或 11090~11409 a ((11254±155) a, Btc2-2) 之前, 推测事件发生年代约在距今 13000 a 左右, 年代数据的不确定性较大; 次年轻的事件断错层 C, 在 TC1, TC2 和 TC7 中限制的年代分别为, 距今 3316~3400 a ((3358±42) a, Btc1-2) 之前, 5581~5715 a ((5648±67) a, Btc2-4) 之后和 4154~4301 a ((4222±73) a, Btc7-1) 之前。由逐次限定

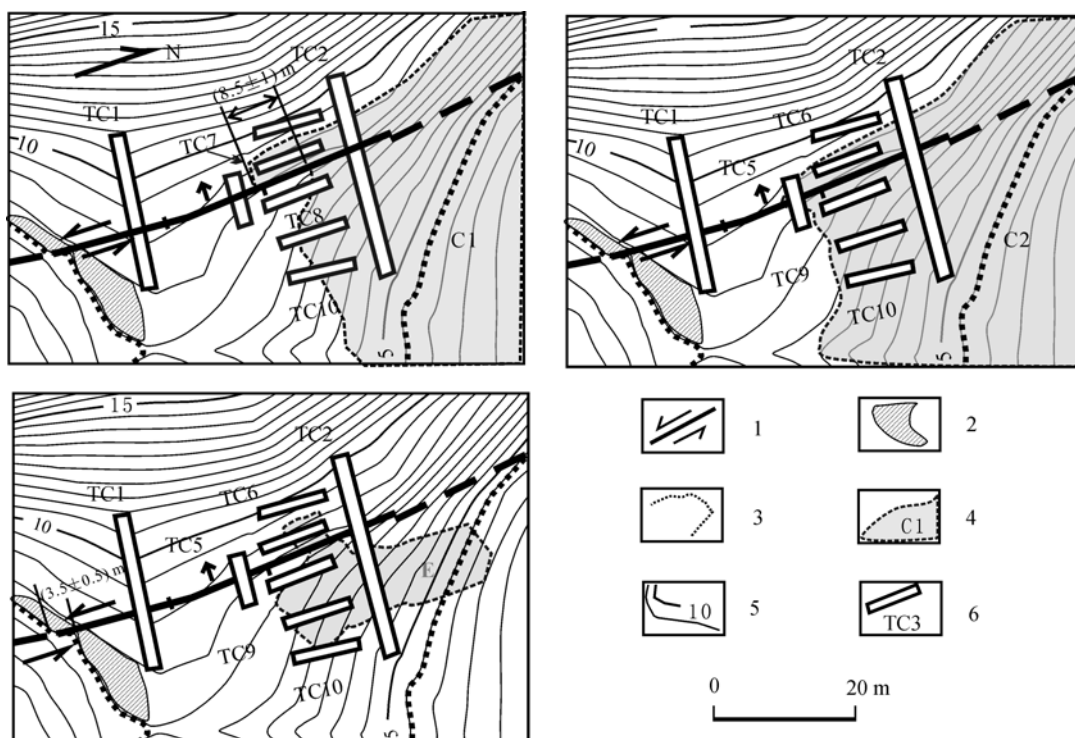


图 8 探槽组揭露的断塞湖或断落塘在主断层两侧的位置

1. 断层及运动方向; 2. 阶地分布范围, 阶地边界存在约 3.5 m 的左旋位错; 3. 断塞湖高湖岸; 4. 古断塞湖或断落塘堆积边界, 地层单元 C1 在断层两侧存在 8.5 m 的左旋位错, C2 和 E 难以识别出位移量; 5. 等高线; 6. 探槽及编号

的方法^[17]并考虑样品数量的权重, 事件发生的年代约为距今(4697±950) a; 最年轻的事件在 TC1 和 TC2 中断错层 D 和 E, 被层 G 覆盖, 事件的限制年代分别为: TC1 距今 912~1092 a((1012±90) a, Btc1-3)之后和 669~743 a((676±37) a, Btc1-4)之前; TC2, 距今 515~560 a((538±23) a Btc2-6)之前。由此推测事件发生在距今 564~1012 (788±224) a。

重要的是平行分布在断层两侧的 TC7 和 TC8 揭露出层 C1 堆积边界在主断层(图 7 中 TC2F4)两侧存在(8.5±1) m 的位差, 从探槽组揭露的该层的分布位置看, 应为断层左旋位错的结果(图 6~8)。结合 TC1 和 TC2 事件分析的结果, 应为最年轻的两次事件的累积同震位移量。前文已知最年轻事件在此地点的左旋位移为(3.5±0.5) m, 那么次年轻事件的左旋位错为约 5 m。

(ii) 干海子北大型探槽。干海子北由于断层表现为张性走滑的特征, 探槽布设也分 3 处以求跨过断层组(图 6(b))。图中 2 个小型探槽以揭露断层是否存在为目的, 长 50 m, 深 2.5~3.5 m 的探槽开挖在近垂

直流经断裂带的冲沟最新冲积锥上, 以求不遗漏最年轻的古地震事件。

主探槽在两支断层上揭露出断错事件。西断层(图 9(c))至少发生 3 次事件, 第一次断错层 A, 覆盖层 B, 2 个单元的 C 样品(TC3-2 和 TC3-3)把该事件的年代限制在距今 6526~6660 a ((6593±67) a)和 4060~4156 a ((4108±48) a)之间, 中间值为(5350±1240) a, 与大海子的次年轻事件在同一的误差范围内。第二次事件断错 B 被 C 覆盖, 样品年代(TC3-2; TC3-4 在距今 4060~4156 a((4108±48) a)和 2717~2793 a ((2755±38) a), 中间值为(3432±677) a(该次事件在大海子反映不明显)。最年轻的事件断错层 C, 被层 D 及其以上更年轻的地层覆盖, 样品年代值(TC3-5 和 TC3-6)把事件发生的时间限制在距今 1768~1826 a 之间, 中间值为距今(1797±29) a。东断层(图 9(b))揭露出两次事件, 从断错层位分析, 早的事件应与西断层最年轻的事件一致, 而样品年代(TC3C1 和 TC3C2)(表 2)限制的事件发生在公元前 1390~1260 和公元 250~390 年之间, 与西断层该事件样品年龄值

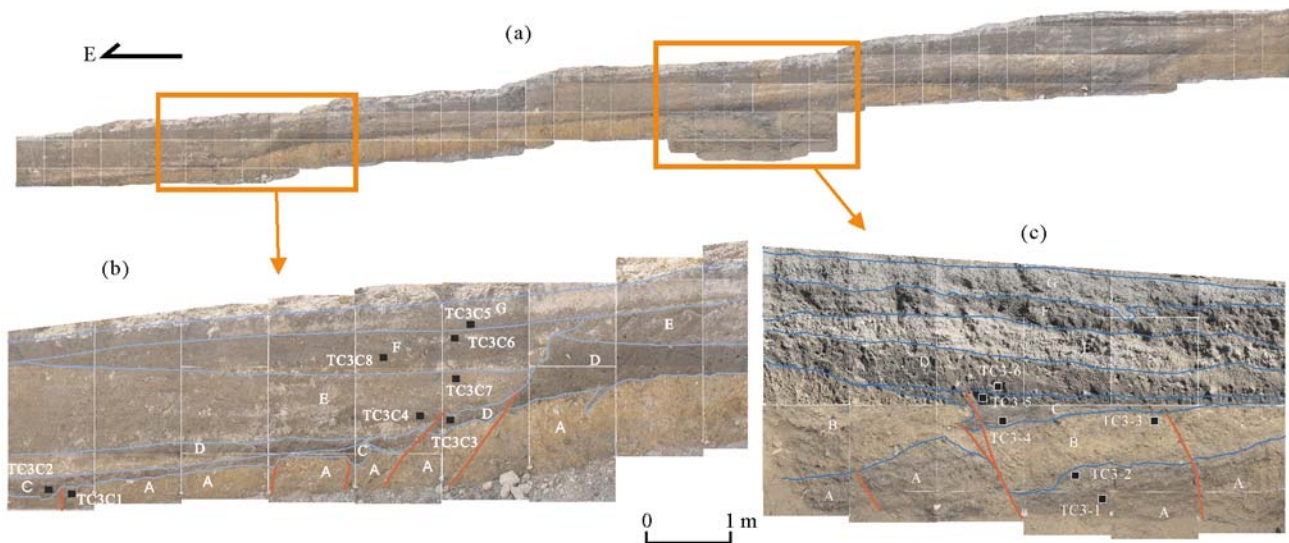


图9 干海子探槽及东断层、西断层局部解释图

大写字母为地层单元编号; 白框黑底为 C 样品采样位置, 旁侧为样品编号; 红线表示断层。地层单元: A 锈黄色砂土砾石层, 砾石磨圆差, 在图 9(c)的位置层由于断层作用层 A 变得较复杂, 为黄色砂土砾石与浅棕黑色砂土砾石互层; 单元 B, 仅在图 9(c)的位置层, 灰黄色砂土, 散布小砾, 为断层作用下的局部堆积; 单元 C, 棕黑色砂土, 图 9(b), (c)都能见到, 为断落洼地堆积; 单元 D 棕黑色砂土, 富水环境下的堆积, 几乎整个大探槽都见到该层, 普遍 10~30 cm 厚, 断层附近增厚到 50~60 cm; 单元 E, 灰黄色砂土砾石层, 整个探槽中都能见到, 为冲积扇堆积; 单元 F, 灰黄色砂土含砾石, 局部冲积、坡积物; 单元 G, 灰黄色砂土砾石层, 探槽中都能见到, 为最新冲积扇堆积

(距今 1797 ± 29) a)吻合的较好。东断层最年轻的事件断错地层 D, 而 E 及以上地层覆盖在上方, 张性作用的迹象较明显, D1 顶部和 E 下部的 C 样品年代值(TC3C3 和 TC3C4)(表 2)分别为公元 1800~1930 (1865 $\pm$ 65)和 530~610(570 $\pm$ 40) 年。需要指出层 E 以上的地层为现代冲出锥的堆积物, 在该层以上以炭屑为样品物质的 ^{14}C 年代样品值都偏老和层序混乱(表 2), 这应该是较老炭屑再搬运的结果。而层 D 及以下地层的样品基本是以断塞塘腐殖质为主, 应更可信。故此, 可以接受该年轻事件发生在公元 1800~610 年之间的范围内, 更接近公元 1800 年。

3 强震复发特征

上述 3 个地点揭露的断错地层地貌序列、古地震事件较好地反映出安宁河断裂北段晚第四纪地表变形与强震破裂的一些特征。

3.1 古地震事件显示的强震破裂行为

把安宁河断裂石棉-冕宁之间几个地点、不同探槽揭露的古地震事件用逐次限定的方法进行发生年代的限定和对比(含前人工作, 图 10), 可以看出年轻

的事件具有很好地可对比性。

(1) 所有探槽都把最年轻的一次事件发生时间限制在距今 280~550 a 之间, 而该时段安宁河断裂发生过公元 1536 年(冕宁-西昌北)接近或等于 7.5 级的地震 [3,18]有学者认为历史记载发生在越西卫的公元 1480 年地震, 可能是发生在安宁河断裂北段的紫马跨至野鸡洞一带, 震级大于 7 级, 由于该地区历史记录的欠缺而造成震中位置、震级和强度的不确定性 [3]。

(2) 紫马跨和野鸡洞两地点都反映出距今约 1700 a 以来有过 3 次左旋位移量在 3~3.5 m 左右的强震事件, 分别为距今 1634~1811, 1030~1050 和 280~550 a。古地震的证据反映出公元 1400~1670 年间, 安宁河断裂北段发生过 7 级以上地震。无论最年轻的事件是否为公元 1480 年历史地震遗迹, 古地震资料显示的强震重复间隔时间为 520~660 a。

(3) 大海子-干海子一带限制的古地震事件发生年代有两种对比的可能性, 一是与紫马跨-野鸡洞不属同一破裂段落, 而是南段的北延部分, 其最年轻的事件可以是公元 1536 年的地震, 其他事件由年轻至老分别发生在距今 1768~1826 (1800), 2755~4108 (3423)和 4108~6593(5350) a。强震的复发间隔为约

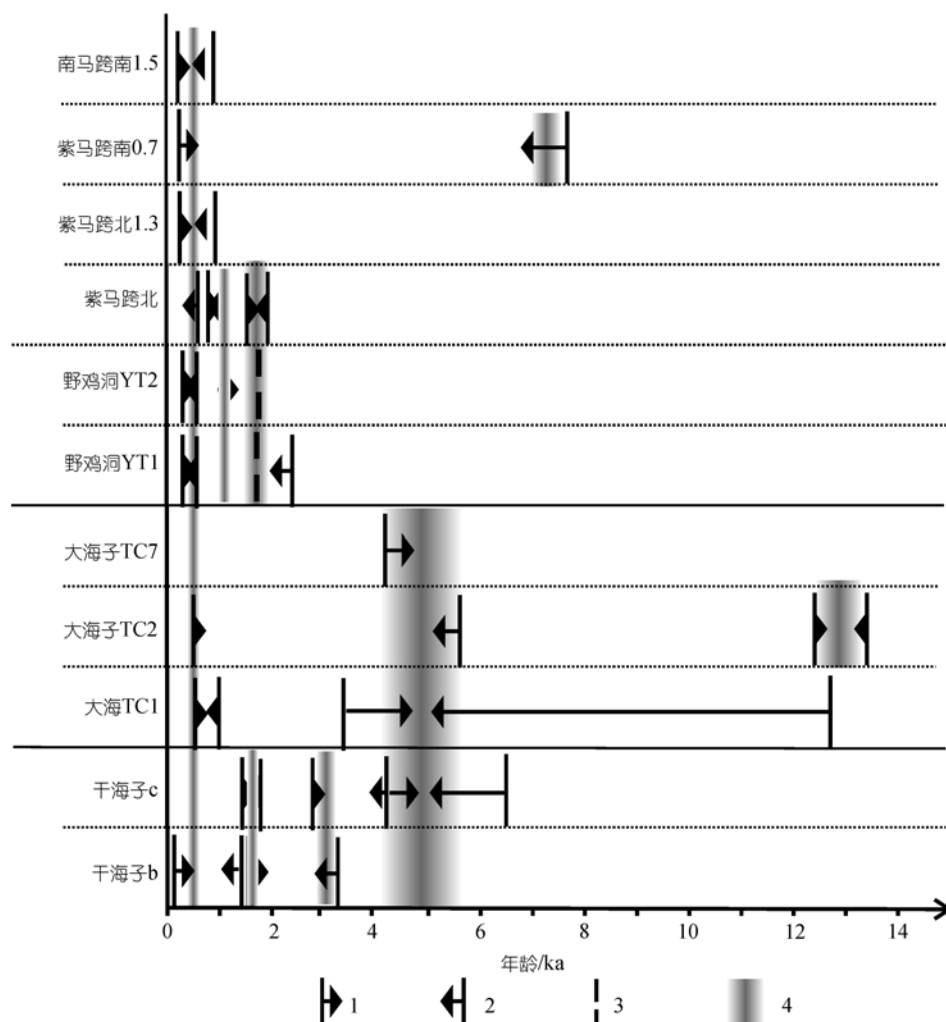


图 10 安宁河断裂冕宁以北段古地震对比

1. 古地震事件的年代限制, 表示事件比该值老; 2. 表示事件比该值年轻; 3. 无样品年代控制的事件; 4. 古地震事件及误差范围(野鸡洞两探槽、紫马跨北 1.3 km 和南两探槽的资料据闻学泽等^[3])

1300~1900 a, 而且更靠北的大海子并没有完全记录到南段过来的事件; 二是认为还属同一段, 可以和紫马跨-野鸡洞对比, 次年轻的事件和紫马跨-野鸡洞第三年轻的事件对比, 不同地点存在事件漏记。就目前的资料我们趋向第一种认识。

(4) 古地震事件显示了群集发生的情况, 全新世中晚期 3~4 次事件重复时间较短, 而更早的事件就存在一个较长的间隔期。

3.2 破裂行为与强震危险性讨论

安宁河断裂冕宁以北古地震揭露的实际强震复发间隔显示, 晚全新世以来重复间隔时间短, 而晚第

四纪以来的平均重复间隔时间长。说明强震存在群集发生的情况。另外, 目前的古地震资料也证实安宁河断裂在冕宁一带分段, 以南和以北有相对独立的强震破裂历史。

根据上述两点认识, 从确定性的方法^[15,16], 可以推断安宁河断裂北段如果还处于群集期(3~4 次强震? 已发生 3 次)的话, 最后一次事件的离逝时间已 527 a, 断裂已进入复发期(520~660 a), 未来一段时间内有发生强震的可能, 应为重点监视的发震段落。尽管安宁河断裂南段不是本文讨论的重点, 但从已掌握的资料看, 其重复间隔时间长, 离逝期短, 近期发震的危险性不如北段高。

4 主要结论与问题

(1) 安宁河断裂紫马跨和野鸡洞两地点都反映出距今约 1700 a 以来有过 3 次左旋位移量在 3 m 左右的强震事件, 分别为距今 1634~1811, 1030~1050 和 280~550 a. 强震重复间隔时间为 520~660 a. 大海子-干海子一带最年轻的事件应该是公元 1536 年的地震, 其他事件由年轻至老分别发生在距今 1768~1826, 2755~4108 和 4108~6593 a. 强震的复发间隔为约 1300~1900 a. 大海子-干海子一带与紫马跨-野鸡洞不属同一破裂段落, 而是南段的北延部分.

(2) 由古地震揭露的实际强震复发间隔显示, 晚

全新世以来重复间隔时间短, 而晚第四纪以来的平均重复间隔时间长. 强震活动存在群集现象或强弱活动交替现象.

(3) 安宁河断裂北段如果还处于群集期的话, 未来一段时间内有发生强震的可能, 应为重点监视的发震段落. 另外, 安宁河断裂南段近期发生强震的危险性不如北段高.

(4) 不排除探槽中较老的古地震事件漏记, 或测年样品的不确定性(部分样品新老倒置, 或两种方法样品测年结果差距较大), 造成事件定年不准、重复间隔时间过长的可能.

致谢 张培震、徐锡伟和闻学泽研究员对本研究给予非常好的建议, 并亲临野外工作现场进行指导和讨论, 李建彪博士、许洪泰硕士参与了部分野外工作, 四川省地震局及其西昌地震监测中心在野外工作中给予大力协助, 在此一并表示感谢.

参考文献

- 1 邓起东, 张培震, 冉勇康, 等. 中国活动构造基本特征. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2002, 32(12): 1020—1030
- 2 张培震, 邓起东, 张国民, 等. 中国大陆的强震活动与活动地块. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33(增刊): 12—20
- 3 闻学泽, 杜平山, 龙德雄. 安宁河断裂带小相岭段古地震的新证据及最晚事件的年代. 地震地质, 2000, 22 (1): 1—8
- 4 闻学泽. 四川西部鲜水河-安宁河-则木河断裂带的地震破裂分段特征. 地震地质, 2000, 22(3): 239—249
- 5 周荣军, 何玉林, 杨涛. 鲜水河-安宁河断裂带磨西-冕宁段的滑动速率与强震位错. 中国地震, 2001, 17(3): 253—262
- 6 申重阳, 王琪. 川滇菱形块体主要边界运动模型的 GPS 数据反演分析. 地球物理, 2002, 45(3): 352—361
- 7 唐荣昌, 钱洪, 黄祖智, 等. 安宁河断裂北段晚更新世以来的分段活动特征. 中国地震, 1992, 8(3): 60—67
- 8 王新民, 张成贵, 裴锡瑜. 安宁河活动断裂带的新活动性. 四川地震, 1998, (4): 13—33
- 9 裴锡瑜, 王新民, 张成贵. 晚第四纪安宁河断裂分段的基本特征. 四川地震, 1997, (4): 52—61
- 10 钱洪, 伍先国, 马声浩, 等. 安宁河断裂带北段的古地震事件及其在地震研究中的意义. 中国地震, 1990, 6(4): 43—49
- 11 徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章, 等. 川滇地区活动块体最新构造变形样式及其动力来源. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33(4): 151—162
- 12 徐锡伟, 张培震, 闻学泽. 川西及其邻近地区活动构造基本特征与强震复发模型. 地震地质, 2005, 27(3): 446—461
- 13 McCalpin J P. Paleoseismology. San Diego: Academic Press, 1996. 588
- 14 Sieh K E. Lateral offsets and revised dates of large earthquakes at Palmett Creelz, California. J Geophys Res, 1984, 89: 7641—7670 [DOI](#)
- 15 冉勇康, 邓起东. 古地震学的历史、现状和发展趋势. 科学通报, 1999, 44(1): 12—20
- 16 冉勇康, 邓起东. 大地震重复特征与平均重复间隔的取值问题. 地震地质, 1999, 1(4): 316—323
- 17 毛凤英, 张培震. 古地震研究的逐次限定法与新疆北部主要断裂带的古地震研究. 活动断裂研究(4). 北京: 地震出版社, 1995. 153—164
- 18 闻学泽, 马胜利, 雷兴林. 安宁河-则木河断裂过渡段及其附近新发现历史大地震破裂的遗迹. 地震地质, 2007, 29(4): 826—833