

青藏高原东缘中更新世伸展作用及其新构造意义

张岳桥^{1,2)}, 李海龙^{1,2)}, 李建华^{1,2)}

1) 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京, 100081;

2) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京, 100081

内容提要: 基于区域 TM 遥感影像资料解译和野外构造地貌调查以及晚第四纪沉积物光释光测年分析, 论述了青藏高原东缘复杂地貌边界带晚第四纪伸展构造及其构造地貌特征。结果显示, 伸展构造主要见于下列几个构造带: 沿南北走向的安宁河谷地、大凉山构造带、若尔盖盆地、岷江断裂带等。其典型的地貌特征表现为充填晚第四纪沉积物的狭窄河谷。根据盆地沉积物的地层时代和年龄推断, 正断作用主要发生在中更新世时期, 大约起始于早更新世末期(1.2~0.9 Ma), 结束于中更新世晚期(100~200 ka)。晚更新世以来, 构造体制转化为走滑—逆冲机制。青藏东缘中更新世伸展构造作用可能与该地貌边界带晚新生代造山后的高原垮塌有关。

关键词: 青藏高原东缘; 中更新世; 正断层; 构造地貌; 伸展作用; 造山后垮塌

青藏高原东缘对应一条特殊的、不规则的复杂构造地貌边界带(蒋复初等, 1998; 张岳桥等, 2003), 它横跨东、西两个大地构造单元, 西部为形成于三叠纪的松潘—甘孜褶皱造山带, 东侧为稳定的扬子克拉通地块。该地貌边界带由一系列山系(隆起带)和河谷盆地组成, 由北到南, 典型的构造地貌单元有: 岷山隆起带、岷江河谷、若尔盖盆地、龙门山构造带、锦屏山构造带、安宁河谷地、大凉山隆起带等。龙门山成为西部侵蚀高原和东部四川盆地的地势陡坡带; 岷山主峰雪宝顶海拔 5588m, 邛崃山的四姑娘山 6 千多米, 而成都平原海拔高程在 500~600m, 横穿龙门山 50~60 km 宽的地势斜坡带, 高程落差达 4500~5000m, 构成了青藏东缘最典型的陡峻地貌边界带。

前人对该地貌边界带的研究主要集中在该边界带的构造属性、晚新生代挤压造山机制和构造隆升历史上, 为此提出了各种构造模型, 典型的有: 构造挤出造山模型(Tapponnier et al., 2003)、右旋走滑边界模型(England and Molnar, 1990)、下地壳流动造山模型(Clark and Royden, 2000; Burchfiel et al., 2008)等。2008年5月12日汶川 Ms 8.0 级地震后, 地质学家重新将目光聚焦在龙门山造山作用的机理上(Dong et al., 2008; Xu et al., 2009;

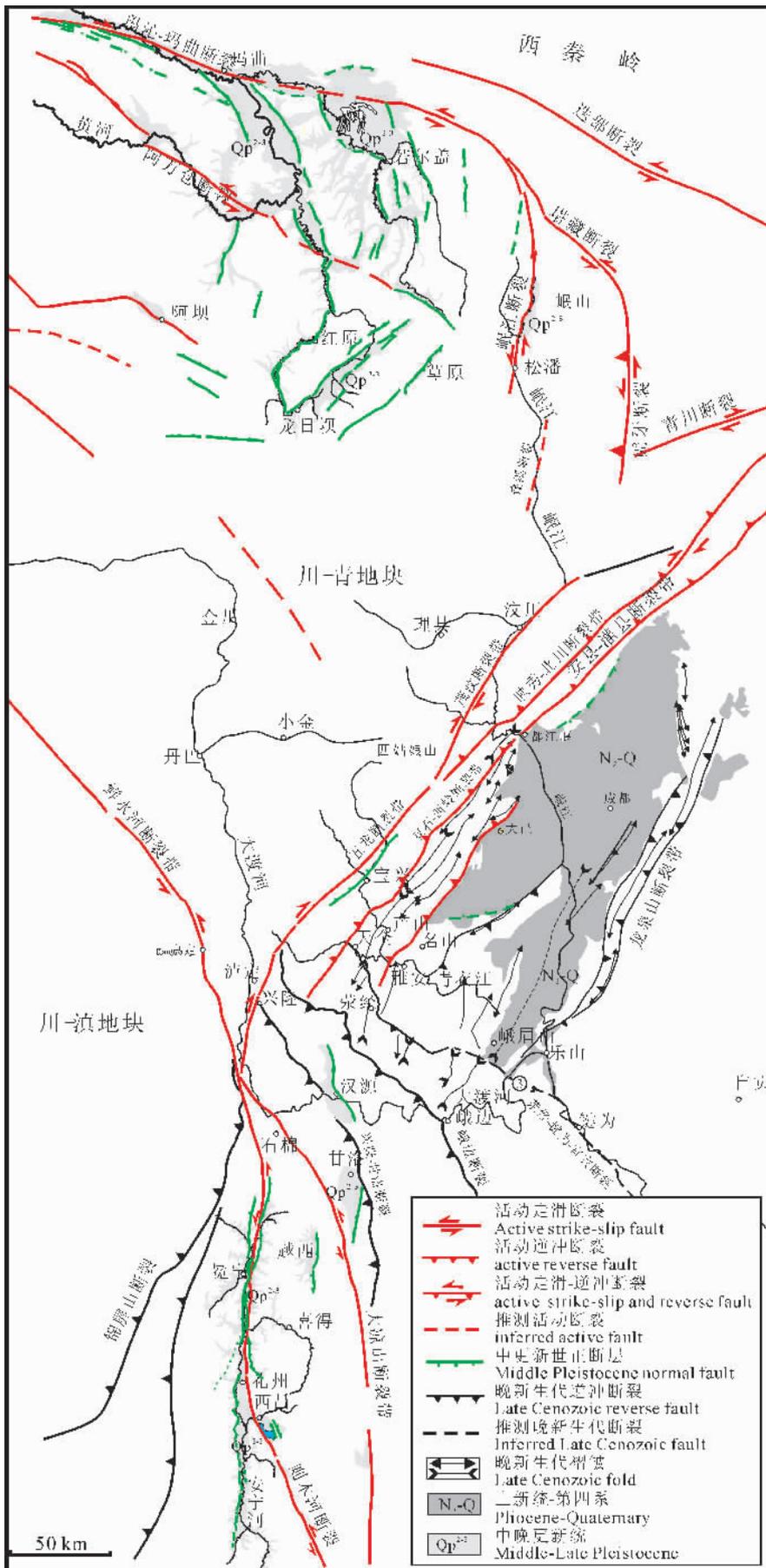
徐锡伟等, 2008; 李海兵等, 2008; 刘静等, 2008; 李勇等, 2008), 由此深化了对该边界带构造变形机制的认识。

然而, 从新构造演化角度分析, 这条复杂构造地貌边界带的形成经历了复杂的构造地貌过程和构造体制转换(张岳桥等, 2003; Zhang et al., 2009)。研究表明, 青藏高原东缘在中新世晚期和上新世时期(即 8Ma 以来), 由于青藏东缘地块的向东挤出, 发生多幕式的挤压造山作用, 沿东缘的岷山、龙门山一带发生强烈的基底逆冲, 岷山隆起带和龙门山构造带在此时快速崛起(许志琴等, 1992; Burchfiel et al., 1995; Arne et al., 1997; Kirby et al., 2002; 张培震等, 2006)。沿龙门山构造带中南段强烈的基底拆离和向东逆冲, 形成了以宝兴、彭灌杂岩体为主体、龙门山前山带飞来峰构造为表观的逆冲推覆系统, 该系统向东扩展到成都平原东缘的龙泉山构造带, 形成了卷入盖层的断层相关褶皱(Meng et al., 2006; Jia et al., 2006)。这期造山作用大致于早更新世晚期结束, 于中更新世时期, 青藏高原东缘处于相对稳定的弱伸展状态, 并沿这个构造地貌边界带发生正断作用, 形成一些列受断裂控制的河谷地貌。晚更新世—全新世时期, 青藏高原东缘又处于挤压逆冲—走滑变形阶段, 现今构造活动与地震是这个

注: 本文为科技部 973 课题“龙门山地质构造断裂带及其与汶川强震动力条件分析”(编号 2008CB425702)的成果。

收稿日期: 2010-05-16; 改回日期: 2010-09-20; 责任编辑: 章雨旭。

作者简介: 张岳桥, 男, 1963 年生。博士, 研究员。主要从事区域构造与新构造的研究工作。通讯地址: 100081, 北京市海淀区民族大学南路 11 号; Email: zhangyueqiao@yahoo.com。



最新构造变动阶段的延续和表现。

本文的目的是在区域卫星遥感影像解译的基础上,通过野外构造地貌调查和地层年代学测试,重点论述青藏高原东缘中更新世弱伸展作用及其变形特征,探讨该复杂地貌边界带第四纪构造体制的转换过程。

1 青藏高原东缘中更新世正断作用

青藏高原东缘中更新伸展作用主要发生在下列几个构造地貌单元:安宁河河谷、大凉山构造带、若尔盖盆地区、岷江上游河谷等,沿后龙门山断裂带也有正断作用的报道(许志琴等,2007)(图1)。

1.1 安宁河裂谷带

安宁河裂谷带沿南北向的安宁河河谷发育,北起冕宁,南达德昌,南北长约160km,东西宽5~15km(图2a)。根据裂谷带的组成和形态特征,可以分为南、北2段。

北段冕宁—礼州段,为典型的两堑夹一垒断陷构造组合,东侧断陷盆地海拔高度大于2000m,为单断型,受西侧正断层控制,断陷内充填了一系列晚第四纪冲积扇体,不整合覆盖在褶皱了的上新世—早更新世昔格达组湖相地层之上(图3)。西侧断陷对应安宁河谷地,海拔高度在1500~1800m,其中充填

图1 青藏高原东缘复杂地貌边界带晚新生代构造纲要图

Fig. 1 Late Cenozoic tectonic outline of the eastern margin of the Qinghai—Xizang (Tibetan) Plateau

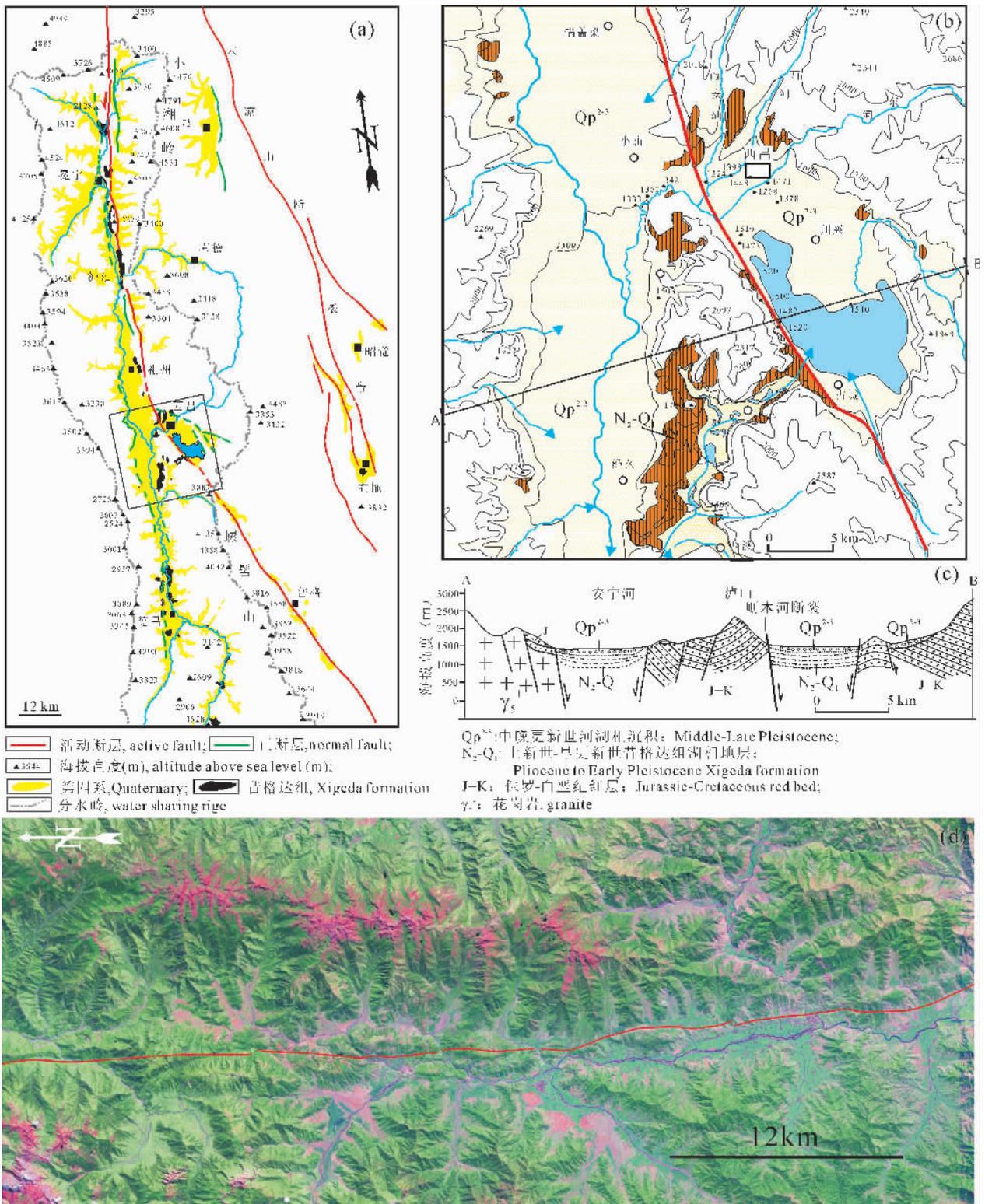


图 2 安宁河河谷构造地貌特征、晚第四纪正断层与活动走滑断裂分布

Fig. 2 Morpho-structural features, late Quaternary normal faults and active faults along valley of the Anning River (a) 晚第四纪沉积物与断裂分布图(根据张岳桥等, 2004); (b), (c) 西昌地区构造地貌与晚第四纪断裂分布图以及横穿断陷盆地构造剖面图; (d) TM 遥感影像图, 展示活动走滑断裂(红色线)切割晚第四纪两堑夹一垒的伸展构造格局

(a) Distribution of late Quaternary deposits and faults (interpreted from TM Landsat images); (b), (c) morpho-structural map and cross section in the Xichang region; (d) Landsat TM imagery view of active strike-slip fault traces that cut the late Quaternary graben-host structure of valley of the Anning River

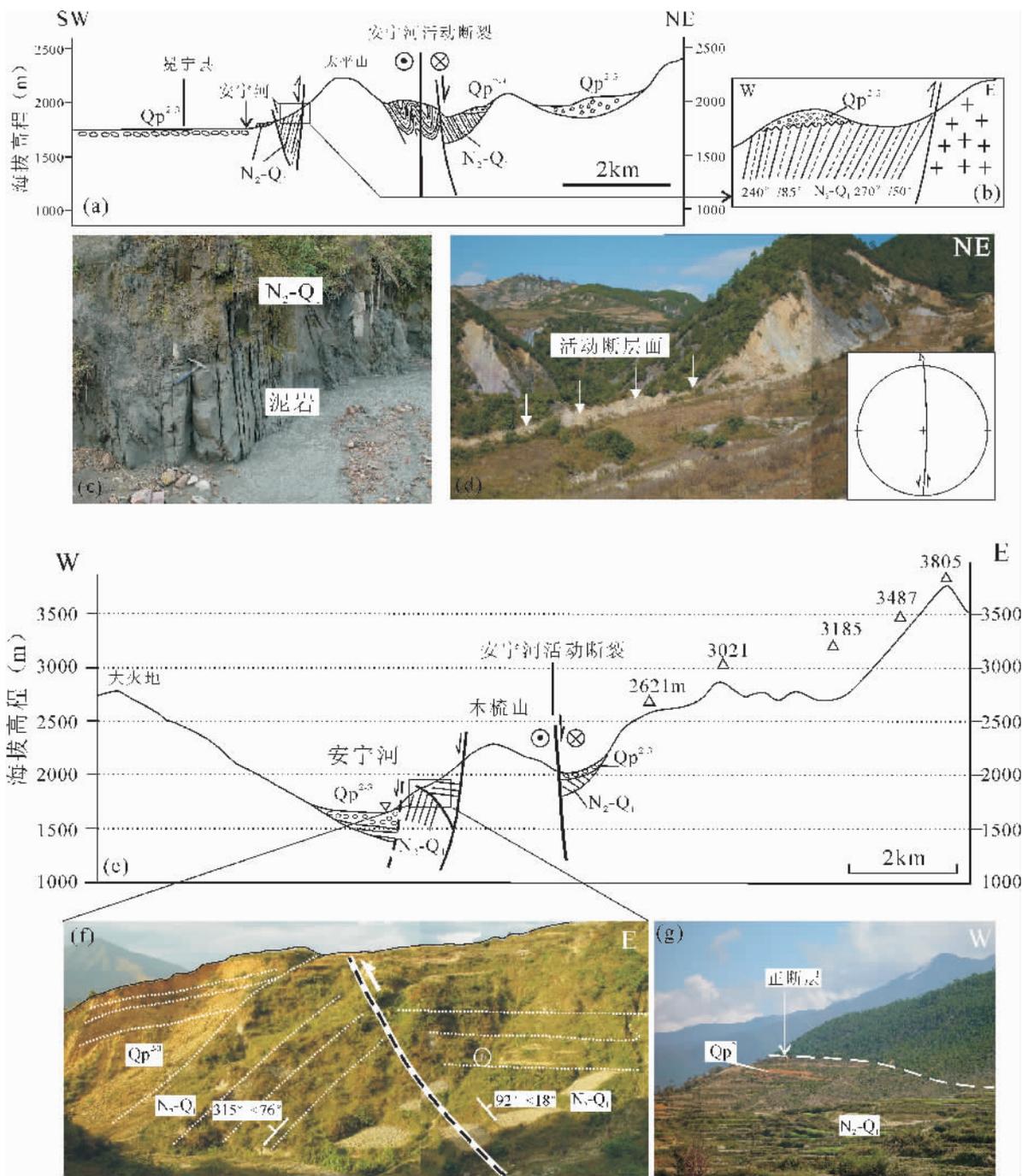


图 3 安宁河断陷谷北段晚新生代构造活动特征

Fig. 3 late Cenozoic active structures of the Anning River valley

(a) 横穿断陷谷北段构造剖面图,其中昔格达组湖相地层(N_2-Q_1)发生褶皱,被晚第四纪正断层和活动走滑断裂所切割;(b) 野外剖面素描图,展示了中更新世砾石层角度不整合覆盖在褶皱的昔格达组湖相地层(N_2-Q_1);(c)、(d) 野外照片展示了陡倾的昔格达组湖相地层(N_2-Q_1)和地震断层面;(e) 横穿断陷谷中段构造—地貌横剖面图;(f) 野外照片展示昔格达组湖相地层(N_2-Q_1)和中更新世地层之间的接触关系;(g) 野外照片展示了控制中更新世沉积的边界正断层。 N_2-Q_1 —上新世—早更新世昔格达组; Qp^{2-3} —中—上新统

(a) morphostructural section across the northern segment of the Anning River valley at Mianning; Pliocene to early Quaternary Xigeda lacustrine deposits were folded and sliced by strike-slip faults;(b) scheme showing angular unconformity between the Xigeda lacustrine layers below and late Quaternary conglomerates up;(c), (d) field views of folded Xigeda lacustrine deposits and active strike-slip fault;(e) morphostructural section across the central segment of the Anning River valley;(f) field view showing folded Xigeda lacustrine deposits and the contact with Late Pleistocene deposits;(g) normal fault controlling late Quaternary deposits in the Anning River valley.
 N_2-Q_1 —Pliocene—Early Pleistocene Xigeda Formation; Qp^{2-3} —Middle—Late Pleistocene

了河流相沉积物。在中间地垒上出露昔格达组湖相地层,已发生不同程度的褶皱变形,其上覆盖了呈水平状的晚第四纪红色砂砾层。这种地层角度不整合接触关系,在多处地点可见(图 3)。在冕宁地区,湖相地层倾角大于 70° ,褶皱轴向 NNE—SSW,指示 NW—SE 的挤压(张岳桥等,2004)。

南段礼州—德昌段,为一狭长的、近乎对称发育的断陷盆地,昔格达组湖相地层零星出露在河谷的两侧,大部分被晚第四纪河流相沉积物覆盖,沉降中心位于中部西昌一带,钻孔资料揭示,晚第四纪河湖相地层的厚度在 $140\sim 200\text{m}$ (图 2b、c)。这套地层向南、向北迅速减薄。与北段相比,该段出露的昔格达组湖相地层变形轻微,地层倾角小于 25° ,一般为 $5^\circ\sim 15^\circ$ 。

活动断裂仅发育在裂谷带的北段,其形迹穿插在裂谷带地堑—地垒之间,地表破裂面清楚,倾角陡(图 2d),断层面上擦痕显示走滑运动性质。向南延伸至西昌地区,与 NW—SE 向则木河断裂连接。该断裂带组成了青藏高原东南缘左旋走滑边界带,是一条强震活动带(闻学泽等,2000)。

分析认为,该裂谷带的形成可以追溯到上新世—早更新世,即昔格达组湖相地层发育时期,当时安宁河河谷是一个统一的带状湖盆,由于受到早更新世晚期挤压作用影响,湖盆消失,地层发生褶皱变形。现今两堑夹一垒的构造格局是在中更新世时期伸展作用形成的,因为无论在地堑还是在中间地垒,昔格达组湖相地层均发生了强烈的褶皱变形,而其上的中更新世砂砾层则没有变形。中间地垒两侧的正断层形迹清楚,控制了地堑盆地的冲积扇和河流相沉积。这种两堑夹一垒的构造格局又被最新的活动走滑断裂所切割。这种构造切割关系表明,安宁河裂谷带在湖相地层沉积后发生了 3 期构造变形:早更新世晚期的挤压变形(相当于元谋运动,时代 $1.2\sim 1\text{Ma}$),中更新世时期的正断作用

与伸展变形($0.8\sim ?\text{Ma}$),晚更新世以来的左旋走滑变形(张岳桥等,2004)。

1.2 大凉山构造带

大凉山构造带位于安宁河—则木

河断裂以东地区,是一个中生代残留盆地,其中地层已发生了褶皱和断裂变形,这些南北向构造主体形成于中新世时期,是川滇地块向东构造挤出作用的结果。遥感影像资料解译显示,沿该构造带的局部地区,发育一些受正断裂控制的小型山间盆地,典型的如越西盆地、甘洛盆地、汉源盆地等(图 1),其中充填了中、晚更新世沉积。在汉源盆地,在上新世昔格达组湖相地层之上,发育一套晚第四纪湖相地层,零星分布于大渡河河谷两侧阶地上,构成了大渡河三级阶地的基座。该套地层呈水平状,为青灰色、灰黄色粘土及粘土质粉砂岩互层,地层厚度大多数在 $20\sim 30\text{m}$,其上为冲洪积相和河流相地层所覆盖。该地层时代尚没有测定,推测为中更新世,与成都平原红粘土时代相当。

1.3 若尔盖盆地区

若尔盖盆地是位于青藏高原东部的一个侵蚀地貌盆地,盆地四周均为海拔 4000m 以上的高山,盆地内部地形相对比较平坦,地形起伏度小于 200m ,盆地海拔高程在 3400m 以上,区内发育现代草本泥炭沼泽。盆地北侧为活动的东昆仑左旋走滑断裂东段所切,中间被阿万仓左旋断裂所切割,将盆地分为南、北两部分(图 4)。

在盆地内部发育线性河谷地貌,其中充填了晚第四纪河湖相沉积物。基于遥感影像资料解译发现,这些河谷地貌主体受 3 组正断层控制,分别为 NE—SW 向、NW—SE 向和近 W—E 向。盆地南部的红原断陷谷、龙日坝断陷谷和毛尔盖断陷谷受 NE—SW 向正断层控制,尤其沿龙日坝断陷谷和毛尔盖断陷谷的西侧,断层三角面地貌十分清楚(图 5),指示了断裂正断活动。盆地北部地区发育的河谷主要受到 NW—SE 向和近 W—E 向正断层控制,但由于若尔盖盆地都已草原化,地表覆盖严重,大部分边界断层被草甸覆盖而无法直接观察到。

表 1 晚第四纪沉积物的光释光测年

Table 1 Optically stimulated luminescence (OSL) dating of late Quaternary deposits

野外编号	U	Th	K	等效剂量 E. D (Gy)	年剂量 Dy (Gy/ka)	含水量 (%)	年龄 (ka)	地点
	($\mu\text{g/g}$)		(%)					
LMS067-01	2.18	9.6	3.06	336.07 ± 22.12	4.86	2.82	69.1 ± 5.3	龙日坝盆地
LMS070-01	2.16	9.76	1.53	87.75 ± 4.65	3.17	2.94	27.6 ± 1.8	若尔盖阿西乡北
LMS072-01	2.32	11.2	1.76	75.92 ± 4.95	3.68	7.13	20.6 ± 1.6	若尔盖阿西乡北
LMS073-01	2.27	9.3	1.58	571.42 ± 15.02	3.25	17.96	176.0 ± 8.4	若尔盖阿西乡北
LMS074-01	1.77	8.82	1.54	135.47 ± 1.72	3.19	12.22	42.4 ± 1.8	若尔盖砖厂
LMS-037-01	2.1	2.02	0.39	284.08 ± 6.99	1.5	4.71	189.8 ± 8.9	川主寺飞机场

注:由中国地质科学院水文地质研究所光释光实验室测试。

盆地北部地区钻了2个孔(RM和RH孔),根据钻孔资料,河谷中充填的沉积物为一套河湖相沉积物,底部发育砾石层,其上主体由一套泥岩和粉砂岩组成,钻遇最厚地层为310m,地层时代为中—上更新世(薛滨等,1997;张平中等,1995;吴敬禄,1997)。笔者在若尔盖县城西侧的砖厂,观察到出露于盆地边缘的这套地层,下部为一套红色泥岩(红粘土),其上覆盖一套褐黄色含砾粉砂岩。对上部褐黄色粉砂岩层进行了光释光测年(表1,样品LMS074-01),结果为 42.4 ± 1.8 ka,属于晚更新世。在红粘土层中,发现了两组正断层,走向分别为NE—SW和W—E向(图6),其上为黄褐色粉砂岩所覆盖。

另外,笔者对若尔盖县阿西乡北出露的一套粉砂岩进行了光释光测年(表1,样品LMS070-01, LMS072-01, LMS073-01),获得的年龄指示为中更新世晚期至晚更新世晚期。

龙日坝断陷谷发育两套地层,下部一套红色砂砾层,出露零星,其上被一套黄褐色砂砾石层所覆盖。区域地质调查将下部一套地层归属于古近纪,上部一套为晚第四纪。对上部一套砂砾层,笔者采集了一个光释光样品(表1,样品LMS067-01),OSL测年结果为 69.1 ± 5.3 ka,属于晚更新世中期。

1.4 岷江上游河谷

沿岷江上游发育的漳腊盆地,是一个典型的受

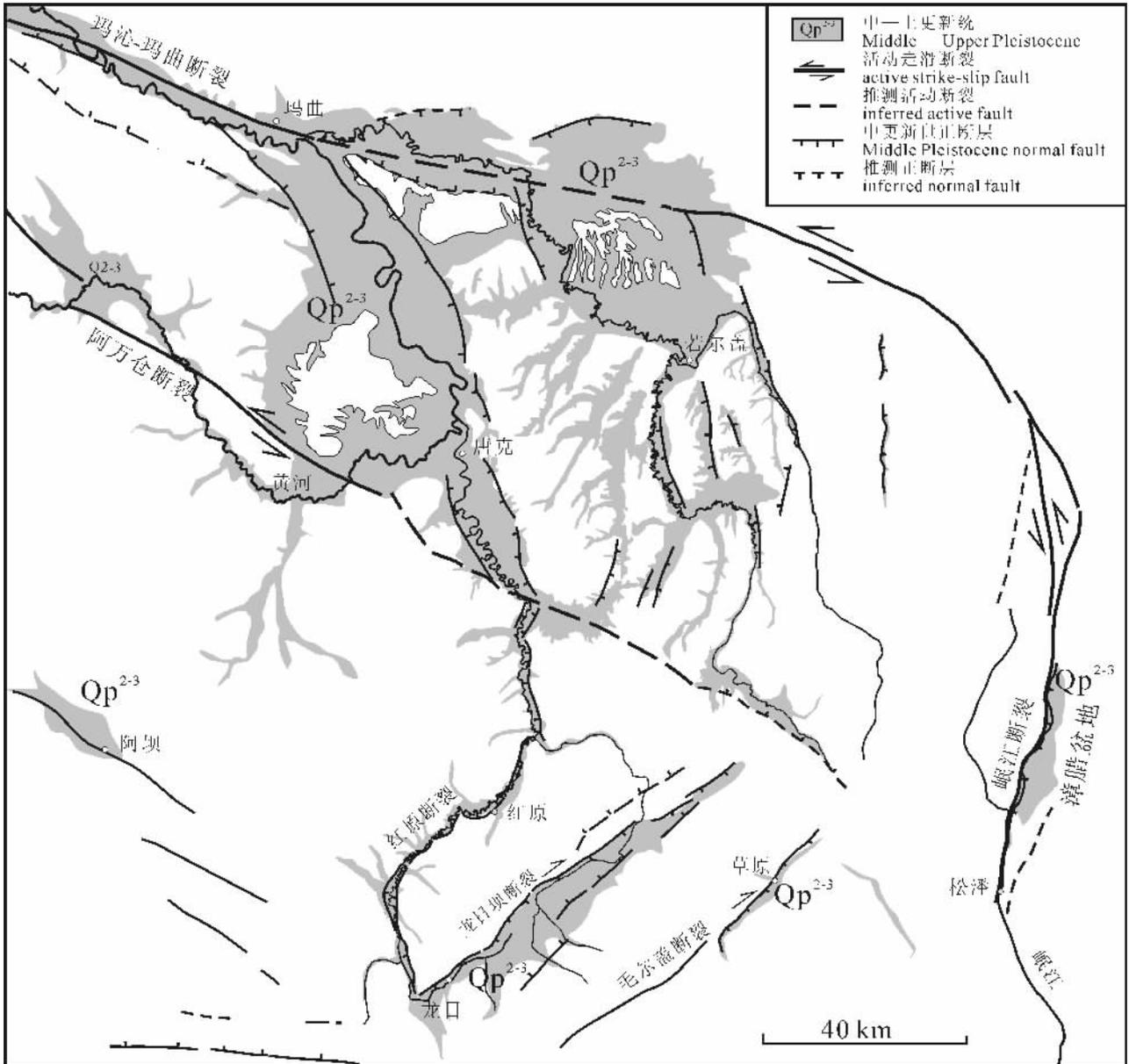


图4 若尔盖盆地地区晚第四纪正断层与活动走滑断裂分布图

Fig. 4 Distribution map of late Quaternary normal and active strike-slip faults in the Zoige basin

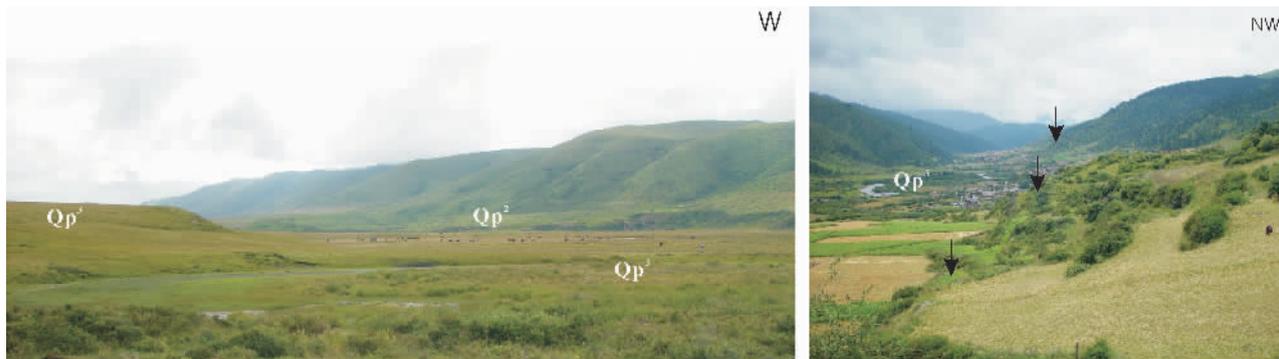


图 5 龙日坝断陷盆地西缘正断地貌(左)和毛尔盖断陷盆地西缘正断地貌(右)野外照片

Fig. 5 Field views of normal faulting morphology on the western boundary of the Longriba faulted zone (left) and on the western side of the Maoergai faulted zone (right)

Qp²—中更系统; Qp³—上更新统

Qp²—Middle Pleistocene; Qp³—Upper Pleistocene

正断层控制的断陷盆地。正断层位于盆地西缘,断层三角面地貌十分清楚,断面向东倾,倾角在 50°~60°。该断层控制了盆地晚第四纪沉积充填。在盆地内部,沉积物主体由红色砂砾岩冲积扇体组成,其上被黄土和河流相沉积物所覆盖。Kirby 等(2000)用红外释光(RISL)方法测定了这套厚度在 180~200m 的冲积扇砾岩,砾岩层上部所夹的黄土年代为 157±28 Ka BP,砾岩底部年代为 254±35 ka BP。笔者于川主寺飞机场,在这套地层的上部一层粘土质粉砂层中,采集了一个样品,进行了光释光测年(表 1,样品 LMS-037-01),获得的结果为 189.8±8.9 ka,证实属于中更新世晚期。沿岷江河谷两侧发育的 2 级阶地,年龄分别为 4000~6000a 和

22750±340a(Kirby et al., 2000)。这些年龄数据表明,漳腊盆地形成于中更新世中晚期,盆地西缘正断作用发生在中更新世中晚期。

1.5 龙门山断裂带

前人对龙门山断裂带的运动学特征做过大量的调查和分析。根据目前所获得观察资料,沿龙门山构造带,没有发现晚第四纪断陷盆地。但后龙门山断裂带被认为是一条高角度正断层,许志琴等将其命名为青藏东缘拆离断裂带(许志琴等,2007;Xu et al., 2009)。在宝兴地区,笔者发现该正断裂上盘为二叠系灰岩,直接与下盘的宝兴杂岩体接触,断层西倾,倾角在 60°~70°,以脆性变形为主。茂县—汶川断裂现今以右旋走滑为主,早期可能存在正倾滑活

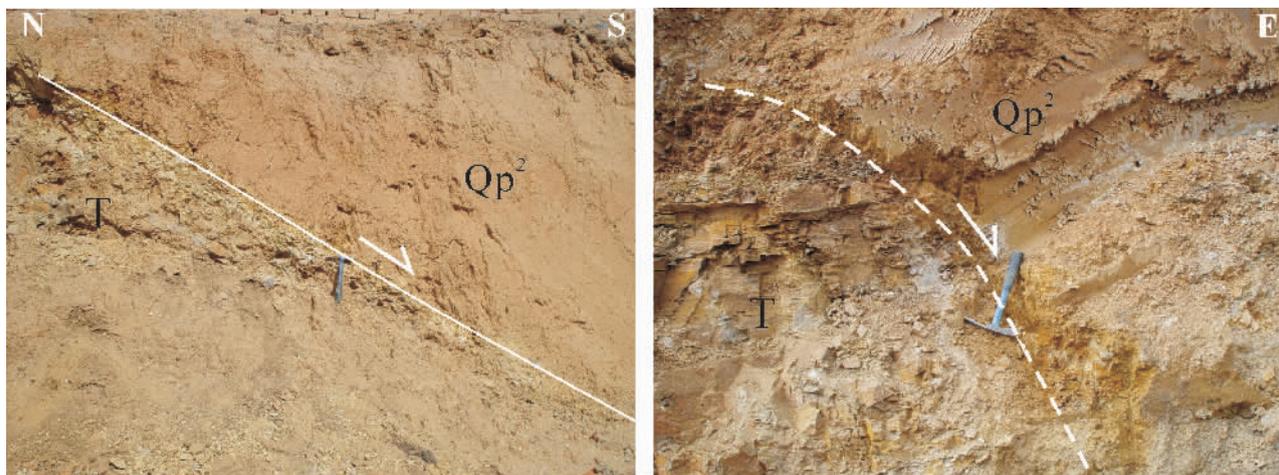


图 6 若尔盖盆地控制中更新世红色沉积物的边界正断层野外照片(若尔盖县城西砖厂)

Fig. 6 Normal faults affecting the Middle Pleistocene red clay deposits at the brick factory, west Zoige County

T—三叠系砂岩; Qp²—中更新世

T—Triassic sandstone; Qp²—Middle Pleistocene clay

动。

对这条拆离带的发生时代,则存在不同的认识。Burchfiel等(1995)认为该正断层发生在晚新生代,与龙门山基底逆冲作用同时,认为这条正断层控制了龙门山构造带中南段基底逆冲块体的构造挤出。而许志琴等(2007)则根据大渡河地区所获得的 Ar-Ar 年龄,认为基底挤出作用发生在早白垩世。目前对这条断裂带的晚第四纪活动性质,缺乏运动学和年代学研究。

2 讨论

2.1 中更新世伸展作用时限

青藏高原东缘中更新世伸展作用形成了近南北走向的地堑盆地,其中沉积物堆积记录了伸展作用的起始和结束时间。但目前对盆地内的这套地层缺乏系统的地层年代学研究。这里仅根据一些有限的测年数据,对这期伸展变形的时限进行简略分析。

沉积记录最好的是若尔盖盆地。盆地北部两个环境钻孔(RM和RH)揭示了该盆地沉积的起始年代。根据古地磁地层学和 ^{14}C 年代学方法以及沉积速率推断,RM孔地层起始时间约900 ka(薛滨等,1997),而RH孔的起始时间约826 ka(张中平等,

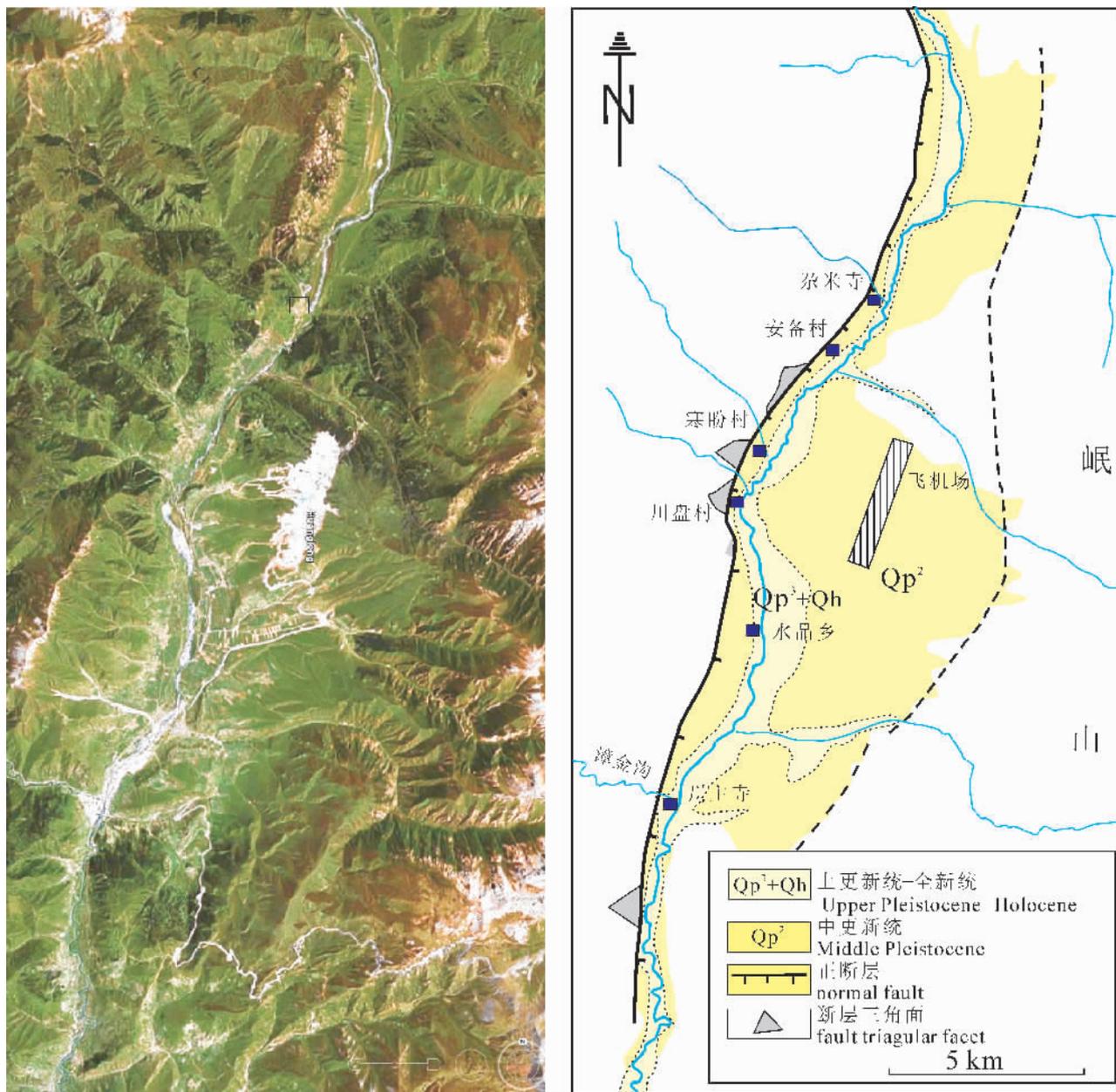


图7 岷江上游漳腊盆地 TM 遥感影像图(左)及其构造地貌解译图(右)

Fig. 7 TM image (left) and morphostructural interpretation (right) of the Zhangla basin, upper Minjiang River



图 8 野外照片展示了漳腊盆地西缘正断地貌特征(左)和盆地内中更新世冲积扇沉积物(右)

Fig. 8 Field views of normal faulting morphology (left) on the western boundary of the Zhangla basin, upstream Minjiang River, and fanglomerates in the basin (right)

黑五边形为光释光测年样品采样点;Qp²—中更系统

Black pentagon indicates site of rock sampling for OSL dating;Qp²—Middle Pleistocene

1995;吴敬禄,1997),代表了中更新世伸展变形的起始时间。研究显示,若尔盖盆地在 160 ka BP,沉积岩性变化剧烈,沉积速率增高(达 1.3mm/a),沉积旋回不清晰,泥炭出现频繁,环境的组合面貌发生根本性的变化,以冷干与暖湿的气候组合为基本特征。这个界面(160 ka)可能指示了一次重要的构造隆升事件(共和运动),使得 RM 孔出现了一次明显的气候转型(薛滨等,1997)。

漳腊盆地红层沉积时代为中更新世中晚期(Kirby et al., 2000)。红粘土沉积于 157 ka 之前结束,可能与一次构造隆升事件有关。这表明,盆地的伸展作用主要发生在中更新世中—晚期。

成都平原发育的一套中晚更新世粘土沉积,也为这期伸展作用提供了较好的年代学制约。这套地层有三部分组成(乔彦松等,2007):下部为砾石层(即雅安砾岩),主要出露于成都平原西部地带;中部为棕黄色或棕红色网纹状红粘土,广泛出露于平原东部地区;上部为灰黄色粘土(即成都粘土或广汉粘土)。网纹状红粘土与灰黄色成都粘土之间为平行不整合接触。根据古地磁地层学和¹⁴C 年代学分析结果,上部成都粘土沉积时代为晚更新世(陈治荣等,1990),而中部网纹状红粘土的沉积时代为早更新世晚期至中更新世,推断的起始时间至少 1.13 Ma(赵志中等,2007)。成都粘土底部所获得的最老年龄为 100 ka,而网纹状红粘土顶部年龄为 400ka,这两套地层之间大约缺失了约 300 ka 的沉积。这

个沉积间断代表了一次构造隆升事件,指示了本区伸展构造的结束,新的构造变动时代的开始。这次事件可能与青藏高原东北缘共和运动相当,共和运动发生时代约 150 ka(李吉均等,1996)。

上述分析表明,青藏东缘复杂地貌边界带中更新世弱伸展作用起始于约 0.9~1.13 Ma,终止于 100~200ka 之间,持续时间在 80~100ka。

2.2 第四纪构造体制的转换

从空间分布上看,中更新世的弱伸展作用既发生在造山带一侧,如若尔盖盆地区,也发生在扬子地块一侧,如安宁河裂谷带。在成都平原的粘土层中也发现了正断层(费美高等,1995)。其中一个重要特点是大部分正断层继承了早期逆冲断裂,或者说,断裂构造发生了“负反转”。岷江断裂带、安宁河断裂带即是典型的例子。

活动构造研究结果显示,青藏高原东缘的活动构造可以组合为 3 个变形系统,它们是:东昆仑—岷山左旋走滑断裂系统、龙门山右旋逆冲断裂系统、鲜水河—安宁河—小江—大凉山走滑—逆冲构造系统(张岳桥等,2008)。这三个变形系统分别调节着青藏高原东部地区川青地块(或巴颜喀拉山地块)和川滇地块的向东构造挤出(Tapponnier et al., 2003)。地震震源机制解也证明了青藏高原东缘现今走滑—逆冲应力机制占主导(Chen et al., 1994;谢富仁等,2003;Zhang et al., 2009),这与中更新世时期伸展变形机制形成鲜明的对照。因此,青藏

高原东缘复杂地貌边界带在晚第四纪时期发生过构造体制的转换,即从中更新世的弱伸展作用到晚更新世—全新世的走滑—逆冲作用。根据地层记录,这种构造体制转换发生在早更新世末期(1.2~0.9Ma)。晚更新世以来的构造运动也称为最新构造变动阶段(张培震等,1999)。

青藏高原东缘复杂地貌边界带的主要构造地貌格架定型于最近10~8Ma以来的造山作用。这个造山过程呈阶段性和幕式发展,其中发生在8Ma、3.6Ma、2.5Ma、1.2Ma的构造事件对构造地貌带的定型起到决定性作用(蒋复初等,1998;张培震等,2006)。中更新世正断层的出现,表明沿地貌边界带造山过程出现了松弛,增厚的地壳发生垮塌,从而发育了弱伸展变形。中更新世的弱伸展作用阶段代表了一个构造运动相对比较稳定的时期,在断陷盆地中沉积了一套湖相地层。

从构造演化的角度看,第四纪时期青藏高原东缘复杂地貌边界带经历了2次重要的构造体制转化:第一次发生在早更新世末—中更新初,从早期的挤压造山作用转换为弱伸展作用;这次构造转化以川西地区的昔格达湖盆地的消失为标志,在成都平原出现了红粘土沉积。第二次转换发生在晚更新世初期(100~200 ka),从弱伸展作用转变为走滑—逆冲作用,这次构造转换以成都平原的隆升和黄河袭夺若尔盖湖盆地为标志。由此,可将晚新生代造山过程划分为3个演化阶段:上新世—早更新世时期的主造山阶段、中更新世时期的伸展垮塌阶段、晚更新世—全新世时期的最新构造变动阶段。

3 初步结论

卫星遥感影像资料解译和野外构造地貌观察以及沉积物的OSL测年分析,揭示了青藏高原东缘复杂地貌边界带存在一期中更新世弱伸展作用,起始时间时在1.2~0.9Ma,结束时间100~200 ka。这期伸展作用既发生在青藏高原一侧,也发生在扬子地台一侧,其发生是对青藏高原东缘晚新生代造山后地壳垮塌的地表构造响应。青藏高原东缘复杂地貌边界带第四纪构造经历了2次构造体制的转换:第一次发生在早更新世末期,从逆冲造山作用转换为弱伸展作用;第二次发生在中更新世晚期或晚更新世初期,从弱伸展作用为走滑—逆冲作用。

参 考 文 献 / References

陈治荣,何银武. 1990. 据¹⁴C年龄数据浅议广汉粘土和成都粘土的

- 时代归属. 山地研究, 8(3): 167~173.
- 费美高, 许国琳, 张品翠. 1995. 成都粘土中的构造断裂现象及其研究意义. 地质灾害与环境保护, 6(3): 24~32.
- 蒋复初, 吴锡浩. 1998. 青藏高原东南部地貌边界带晚新生代构造运动. 成都理工大学学报, 25(2): 162~168.
- 李吉均, 方小敏, 马海洲. 1996. 晚新生代黄河上游地貌演化与青藏高原隆升. 中国科学(D辑), 26(4): 316~322.
- 李海兵, 付小方, van der Woerd J, 司家亮, 王宗秀, 侯立玮, 邱礼, 李宁, 吴富晓, 许志琴, Tapponnier P. 2008. 汶川地震(Ms8.0)地表破裂及其同震右旋斜向逆冲作用. 地质学报, 82(12): 1623~1643.
- 李勇, 周荣军, Densmore A L, 闫亮, Richardson N, 董顺利, Ellis M A, 张毅, 何玉林, 陈浩, 乔宝成, 马博琳. 2008. 映秀—北川断裂的地表破裂与变形特征. 地质学报, 82(12): 1688~1702.
- 刘静, 张智慧, 文力, 孙杰, 邢秀臣, 胡古月, 许强, Tapponnier P, 曾令森, 丁林, 刘延乐. 2008. 汶川8级大地震破裂的特殊性及构造意义——多条平行断裂同时活动的反序型逆冲地震事件. 地质学报, 82(12): 1707~1722.
- 乔彦松, 赵治中, 李增悦, 王燕, 傅建利, 王书兵, 李朝柱, 姚海涛, 蒋复初. 2007. 成都平原红土堆积的风成成因证据. 第四纪研究, 27(2): 286~295.
- 吴敬禄. 1997. 若尔盖盆地RH孔近80万年来¹³C_{org}气候特征的频谱分析. 湖泊科学, 9(3): 211~215.
- 闻学泽. 2000. 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, 22(3): 239~249.
- 谢富仁, 祝景忠, 梁海庆, 刘光勋. 2003. 中国西南地区现代构造应力场基本特征. 地震学报, 15(4): 407~417.
- 许志琴, 李化启, 侯立玮, 付小芳, 陈文, 曾令森, 蔡志慧, 陈方远. 2007. 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. 地质通报, 26(10): 1262~1276.
- 许志琴, 索书田, 韩郁菁, 傅小方, 黄明华. 1992. 中国松潘—甘孜造山带的造山过程. 北京:地质出版社, 1~190.
- 薛滨, 王苏民, 夏威岚, 吴敬禄, 王云飞, 钱君龙, 胡守云, 吴艳宏, 张平中. 1997. 若尔盖RM孔揭示的青藏高原900 ka BP以来的隆升与环境变化. 中国科学(D辑), 27(6): 543~547.
- 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 马报起, 陈杰, 周荣军, 何宏林, 田勤俭, 河玉林, 王志才, 孙昭民, 冯希杰, 于贵华, 陈立春, 陈桂华, 于慎鄂, 冉勇康, 李细光, 李陈侠, 安艳芬. 2008. 汶川Ms8.0地震地表破裂及其发震构造. 地震地质, 30(3): 597~629.
- 张培震. 1999. 中国大陆岩石圈最新构造变动与地震灾害. 第四纪研究, 5: 404~411.
- 张培震, 郑德文, 尹功明, 袁道阳, 张广良, 李传友, 王志才. 2006. 有关青藏高原东北缘晚新生代扩展与隆升的讨论. 第四纪研究, 26(1): 5~13.
- 张岳桥, 杨农, 陈文, 马寅生, 孟晖. 2003. 中国东西部地貌边界带晚新生代构造变形历史与青藏高原隆升过程初步研究. 地学前缘, 10(4): 599~612.
- 张岳桥, 杨农, 孟晖, 陈文. 2004. 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. 中国地质, 31(1): 23~33.
- 张岳桥, 杨农, 施炜, 董树文. 2008. 青藏高原东缘新构造及其对汶川地震的控制作用. 地质学报, 82(12): 1668~1678.
- 张平中, 王先彬, 陈践发, 李春园, 王苏民. 1995. 青藏高原若尔盖盆地RH孔沉积有机质的 $\delta^{13}C$ 值和氢指数记录. 中国科学(D辑), 25(6): 631~638.
- 赵志中, 乔彦松, 王燕, 傅建利, 王书兵, 李朝柱, 姚海涛, 蒋复初. 2007. 成都平原红土堆积的磁性地层学及其环境记录. 中国科学(D辑), 37(3): 370~377.

- Arne D, Worley B, Wilson Ch, Chen S F, Foster D, Luo Z L, Liu S G, Dirks P. 1997. Differential exhumation in response to episodic thrusting along the eastern margin of the Tibetan Plateau. *Tectonophysics*, 280: 239~256.
- Burchfiel B C, Chen Z, Liu Y, Royde L H. 1995. Tectonics of the Longmen Shan and adjacent regions, central China. *International Geological Review*, 37(8): 661~735.
- Burchfiel B C, Royden L H, Vander Hilst R D, Hager B H, Chen Z, King R W, Li C, Lü J, Ao H, Kirby E. 2008. A geological and geophysical context for the Wenchuan earthquake of 12 May 2008, Sichuan, People's Republic of China. *GSA Today*, 18(7): 4~11.
- Chen S F, Wilson C J L, Deng Q D, Zhao X L, Luo Z L. 1994. Active faulting and block movement associated with large earthquakes in the Minshan and Longmen Mountains, northeastern Tibetan plateau. *Journal of Geophysical Research*, 99: 24025~24038.
- Clark M K, Royden L H. 2000. Topographic ooze: building the eastern margin of Tibet by lower crustal flow. *Geology*, 28: 703~706.
- Dong Shuwen, Zhang Yueqiao, Wu Zhenhan, Yang Nong, Ma Yinsheng, Shi Wei, Chen Zhengle, Long Changxing, An Meijian. 2008. Surface ruptures and co-seismic displacement produced by the Ms 8 Wenchuan earthquake on 12th May, 2008, Sichuan, China: eastward growth of Qinghai—Tibet Plateau. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 82(5): 938~948.
- England P, Molnar P. 1990. Right-lateral shear and rotation as the explanation of strike-slip faulting in eastern Tibet. *Nature*, 344: 140~143.
- Jia D, Wei G Q, Chen Z X, Li B L, Zen Q, Yang G. 2006. Longmen Shan fold—thrust belt and its relation to the western Sichuan Basin in central China: New insights from hydrocarbon exploration. *AAPG Bulletin*, 90: 1425~1447.
- Kirby E, Whipple K X, Burchfiel C, Tang W, Berger G, Sun Z, Chen Z. 2000. Neotectonics of the Min Shan, China: Implications for mechanisms driving Quaternary deformation along the eastern margin of the Tibetan Plateau. *Geological Society of America Bulletin*, 112(3): 375~393.
- Kirby E, Reiners P W, Krol M A, Hodges K V, Whipple K X, Farley K A, Chen Z L and Tang W Q. 2002. Late Cenozoic evolution of the eastern margin of the Tibetan Plateau: inferences from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and (U—Th)/He thermochronology. *Tectonics*, 21(1): 1~19.
- Li Jijun, Fang Xiaomin, Ma Haizhou. 1996. Geomorphological and environmental evolution of the Yellow River during the late Cenozoic. *Science in China (Series D)*, 26(4): 316~322.
- Meng Qingren, Hu Jianmin, Wang Erchie, Qu Hongjie. 2006. Late Cenozoic denudation by large magnitude landslides in the eastern edge of Tibetan Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 243: 252~267.
- Tapponnier P, Xu Z Q, Roger F, Meyer B, Arnaud N, Wittlinger G, Yang J S. 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet plateau. *Science*, 294: 1671~1677.
- Xu Zhiqin, Ji Shaocheng, Li Haibing, Hou Liwei, Fu Xiaofang, Cai Zhihui. 2008. Uplift of the Longmen Shan range and the Wenchuan earthquake. *Episodes*, 31(3): 291~301.
- Xu Xiwei, Wen Xueze, Yu Cuihua, Chen Guihua, Yann Klinger, Judith Hubbard, Jhon Shaw. 2009. Coseismic reverse- and oblique-slip surface faulting generated by the 2008 Mw7.9 Wenchuan earthquake, China. *Geology*, 37(6): 515~518.
- Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Yang Nong. 2009. Active faulting pattern, present-day tectonic stress field and block kinematics in the east Tibetan Plateau. *Acta Geologica Sinica (English edition)*, 83(4): 694~712.

Middle Pleistocene Extension along the Eastern Margin of Xizang (Tibetan) Plateau and Its Neotectonic Significance

ZHANG Yueqiao^{1,2)}, LI Hailong^{1,2)}, LI Jianhua^{1,2)}

1) *Key Laboratory of Neotectonic Movement and Geohazard, Ministry of Land and Resources, Beijing, 100081;*

2) *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100081*

Abstract: This paper deals with late Quaternary extension occurred along the eastern marginal zone of the Xizang (Tibetan) Plateau, based on Landsat TM imagery interpretation, field observations and optically stimulated luminescence (OSL) dating. The results show that late Quaternary extension has been observed along the longitudinal Anninghe valley, along the Daliangshan structural zone, in the Zoige basin and in the upstream Minjiang river. The characteristic feature of these extensional structures is the elongate valley controlled by normal faults and filled with late Quaternary deposits. According to the stratigraphic ages and OSL dating results, normal faulting occurred mostly in Middle Pleistocene, beginning from latest Early Pleistocene (1.2~0.9 Ma), and ending in earliest Late Pleistocene (100~200 ka). Since the Late Pleistocene, the tectonic regime has changed to strike-slip and reverse faulting one. The occurrence of the Middle Pleistocene extension along the eastern margin of the Tibetan Plateau may be the response to post-orogenic collapse of this marginal zone.

Key words: eastern margin of the Xizang (Tibetan) Plateau; Middle Pleistocene; normal faulting, extension; morpho-structure; post-orogenic collapse

