

文章编号: 1006-6616 (2010) 04-0359-13

龙门山断裂活动和川西高原隆升 历史的裂变径迹测年

杨农^{1,2}, 张岳桥^{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)

摘要: 通过 12 个构造岩、变质砂岩和花岗岩样品的磷灰石裂变径迹测年年龄分析, 结合前人研究成果, 初步确定了青藏高原东缘龙门山地区晚新生代主要断裂活动时期和区域隆升历史。结果表明, 龙门山逆冲推覆构造带 2 条主断裂: 汶川—茂县断裂和映秀—北川断裂, 最晚一次强烈活动发生在早更新世 (FT 年龄为 1.2 ~ 1.3 Ma), 高原内部北西向米亚罗断裂在中更新世 (约 0.5 Ma) 发生过强烈活动; 后龙门山逆冲推覆构造带在中新世晚期开始快速隆升, 而高原内部强烈隆升发生在上新世末至中更新世。高原隆升导致深切河谷地貌的形成和发育。

关键词: 晚新生代; 川西高原; 龙门山断裂带; 隆升; 裂变径迹测年

中图分类号: P542+.3; P546; P542+.1

文献标识码: A

0 引言

作为青藏高原的组成部分, 川西高原耸立于四川盆地的西侧, 龙门山构造带构成了高原的东界。该带向北东延伸与秦岭构造带相连, 向南西与康滇地轴相接, 著名的南北地震带由此通过。

川西高原隆升过程的研究受到国内外地质学者的广泛重视。唐荣昌等^[1]从构造地貌学角度总结了川西高原区 3 期 4 级夷平面, 分别是新近纪末青海早期夷平面 (海拔 4200 ~ 4500 m) 和青海晚期夷平面 (海拔 3800 ~ 4000 m)、早更新世漳腊夷平面 (海拔 3500 m)、中更新世涪江夷平面 (海拔 2000 ~ 2300 m)。刘树根^[2]等, Arne D. 等^[3]通过对川西高原中生代侵入体磷灰石等矿物的裂变径迹测年、龙门山构造带不同部位变质杂岩、三叠系砂岩的磷灰石、锆石裂变径迹测年, 计算了由断裂带分割的各构造带新生代以来的冷却过程和隆升速率, 认为上新世—更新世为快速冷却时期。刘树根等^[4]总结了印支运动以来龙门山—前陆盆地系统 7 个地层—构造事件, 认为喜马拉雅期 60Ma、30 ~ 40Ma、20 ~ 25Ma 和 10Ma 的构造事件使得龙门山造山带—川西前陆盆地系统发生强烈冲断作用和隆升作用。蒋复初

收稿日期: 2010-12-09

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

作者简介: 杨农 (1962-2010), 男, 研究员, 主要从事区域地质, 构造地质研究。

等^[5]依据晚新生代地层记录,提出青藏高原东南部地貌边界带雏形出现于距今 2.5 Ma 左右、定型于 1.2 Ma。Xu 等^[6]通过鲜水河断裂 111 个样品的磷灰石、锆石裂变径迹年龄的测定和统计,提出新近纪存在 22Ma、7Ma、2Ma 三个显著的冷却时期,认为青藏高原现今高度形成于早更新世。Kirby 等^[7]采用 U-Th/He 热年代学方法对区内几个主要中生代侵入体进行了测试,提出高原快速隆升剥露起始时间在上新世前,但不早于中新世(5~10Ma)。李勇等^[8]依据地层不整合面和 ESR 测年数据,将青藏高原东缘新生界划分为 5 个构造层,指出高原东缘构造地层记录了印度—欧亚大陆碰撞产生的远程效应。唐荣昌等^[9]、邓起东等^[10]、陈社发等^[11-12]、赵小麟等^[13]等通过构造地貌学、第四纪年代学等方面的分析,研究了岷山—龙门山中、晚更新世以来断裂活动性和地震活动性。钱洪等^[16]研究了成都平原的第四纪沉积记录和活动断裂特征,建立了龙门山推覆构造带与成都平原之间的成因关系。

尽管龙门山地区开展过较多构造热同位素年代学研究,但大部分测试的样品主要针对分散的侵入岩体,而完整的剖面样品测试工作尚没有进行;对断裂活动事件的年代学也缺乏详细的测试分析工作。虽然对高原隆升阶段的划分存在多种方案,但仍然缺乏足够年代学资料的制约。

裂变径迹测年方法已成功应用于构造带、山脉和高原隆升剥露时代的研究,相继在青藏高原南部的喜马拉雅造山带、东喜马拉雅构造结、喀喇昆仑地区、西昆仑、阿尔金山和帕米尔构造结等地区获得了一批重要的热年代学数据(丁林等^[15];陈文寄等^[16];王军^[17];陈正乐等^[18])。如钟大赉等^[19]通过对东喜马拉雅构造结地区大量的裂变径迹测年,提出了高原隆升是一个多阶段(45~38Ma、25~17Ma、13~8Ma、3Ma 至今)、不等速和非均性的演变过程,并指出,晚上新世以来青藏高原发生了整体隆起与局部快速抬升,3 Ma 以来是隆升最强烈阶段。

裂变径迹测年的另一应用领域是帮助确定断裂最新活动的时代^[20]。由于断层活动导致温度和压力的变化,使断裂构造岩内磷灰石“部分或全部”退火,原径迹部分或全部消失,降温后径迹重新累积计时。据此,可以通过对断层泥或碎裂岩中磷灰石裂变径迹测试,确定断层最后一次强烈活动的年龄(陈文寄等^[21])。

本文以不同构造单元的地貌要素和断裂带为研究对象,运用裂变径迹测年法,初步确定了川西高原晚新生代隆升过程和主要断裂最晚活动的时代。

1 地质背景

川西高原由三个构造单元组成(图 1):川西前陆盆地、夹于安县与汶川—茂县断裂之间的龙门山逆冲推覆构造带、位于汶川—茂县断裂以西松潘—甘孜褶皱构造带。龙门山逆冲推覆构造带北起广元,南达天全,长约 500km,宽 30 多 km。映秀—北川断裂将其分为前山带和后山带两个部分(龙学明等^[22]),映秀—北川断裂以东由古生界—三叠系片岩组成多个逆冲推覆体的称前龙门山,断裂以西由元古宙、古生界几个古隆起褶皱带组成后龙门山;大致以绵竹的汉旺和都江堰的三江口断裂为界,前山带又被分为北段(叠瓦冲断带)和中南段(滑覆—滑塌构造带)两段。

龙门山构造带经历了复杂的构造演化历史。罗志立等^[23]认为龙门山冲断带是四川盆地大陆地壳在中、新生代向西北和青藏高原俯冲所形成,其动力学模式为多层次、多阶段、深层构造控制浅层变形的陆内俯冲(即 C 型俯冲),指出龙门山冲断带是一个独立的造山带,

应与松潘—甘孜褶皱带分开。许志琴等^[24]则认为龙门山构造带是松潘—甘孜造山造山带主体向扬子克拉通逆冲推覆的前缘地带。曾允孚等^[25]、李勇等^[26-27]等将龙门山冲断带与四川盆地作为一个整体,从前陆盆地沉积序列、充填史、构造地层和盆山耦合关系等方面进行了研究,以地层角度不整合接触关系为依据,划分了推覆变形诸阶段,建立了龙门山前陆盆地与冲断带同步沉积—构造演化模式。

龙门山逆冲推覆构造带在各个不同地质历史时期的构造特征表现不同,普遍认为龙门山推覆构造带由西北向东南具有韧性到脆性变形的变化过程^[28],其扩展方式为前展式或背驮式^[29],韧性变形主要发生在印支期和燕山期^[30-31],新生代以来以脆性变形为主。龙门山构造带新生代期间的多阶段活动性也比较明显,唐荣昌等^[1]等曾将龙门山的喜山运动分为渐新世末、上新世末和早更新世末3期。

本世纪以来相继发生昆仑山口西地震(2001年11月14日,8.1Ms, XI)、汶川地震(2008年5月12日,8.0Ms, XI)和玉树地震(2010年4月14日,7.1Ms, VII)3个强烈地震,更把人们的目光和研究重点聚焦到龙门山和川西高原这一地区^[32-41]。

2 采样位置及采集

本次采样主要集中在川西高原与后龙门山之间的地段,试图获取这两个构造地貌区及活动断裂的年代学资料。为了提高样品测试结果的可靠性和可对比性,兼顾断裂样品与地形剖面两方面内容,我们选取了地质调查程度较高的米亚罗—理县、卧龙—映秀两条剖面,采集了12件3种类型的样品:北川—映秀断裂、茂县—汶川断裂、米亚罗断裂的断裂样品;彭灌杂岩体、侏罗纪岩体的岩体样品和下三叠统地层样品。采样位置见图1、表1,样品的高程数据取自2m精度的气压计读数,以手持型GPS的测定数据用作参考,同时还应用1:50000地形图定点数据进行了校正。

3 测试结果

磷灰石的裂变径迹测试是在国家地震局地质研究所裂变径迹实验室完成,流程采用外探测器法,用美国国家标准局SRM612铀标准玻璃,裂变径迹年龄用Zeta法计算,标样为Durango磷灰石,计算公式引用Hurford等(1982)。结果见表1。

3.1 断裂活动年代测定

FT1样品为花岗质碎裂岩,采于映秀西侧,采样点位于北川—映秀断裂西盘接近主干断裂处(图2),该点断裂构造迹象明显,破裂发育,活动断裂地貌表现尤为清晰,断裂西盘为二叠纪石英闪长岩东盘为南华系苏雄组,断裂东盘阶地发育。样品岩石为变余中细粒花岗结构,碎裂构造,斜长石的粘土化、绢云母化明显,石英颗粒明显呈现带状消光、波状消光;岩石内不规则网状裂隙发育,其间被绢云母、绿帘石、碳酸盐等充填,表明岩石受到过明显的碎裂作用和蚀变。FT1(花岗质碎裂岩)的裂变径迹年龄为 1.2 ± 0.3 Ma,记录了早更新世时期北川—映秀断裂带一次重要的活动。

FT3采于汶川耿达东,处于茂县—汶川断裂主断裂上,地表为北东向断裂,裂面平直,走向NE23°,倾向NW倾角56~65°,岩石为花岗质糜棱岩,糜棱结构,块状构造、碎裂构造,FT3的磷灰石裂变径迹年龄为 1.3 ± 0.4 Ma。

表1 磷灰石裂变径迹样品数据表

Table 1 Results of apatite fission track dating

编号	北纬	东经	高程 (m)	岩性	采样岩石地层单位 及构造部位	颗粒 数	$P(x^2)$ /%	r 相关 系数	$RHO_s(N_s)$ ($\times 10^3$)/ cm^2	$RHO_i(N_i)$ ($\times 10^5$)/ cm^2	$RHO_D(N_D)$ ($\times 10^6$)/ cm^2	Pooled Age /Ma $\pm 2\sigma$
FT1	31°03'31"	103°29'01"	957	碎裂蚀变质中细粒斜长花岗岩	北川—映秀断裂上(西)盘, 早元古代康定群斜长角闪岩岩体中	42	85.9	0.642	3.912(16)	7.633(3122)	1.338(3342)	1.2 \pm 0.3
FT2	31°04'06"	103°22'34"	1322	强蚀变斜长角闪岩	彭灌杂岩体内, 早元古代康定群斜长角闪岩岩体中	13	83.4	0.591	21.43(6)	7.393(207)	1.342(3551)	6.8 \pm 2.9
FT3	31°04'21"	103°19'19"	1463	花岗质变余糜棱岩	茂县断裂(东)下盘彭灌杂岩体一侧, 早元古代康定群	42	44.2	0.183	5.137(15)	9.284(2711)	1.346(3360)	1.3 \pm 0.4
FT4	31°06'51"	103°28'52"	970	蚀变细中粒石英闪长岩	彭灌杂岩体内二叠纪石英闪长岩体内	42	16.0	0.770	5.198(21)	17.32(6996)	1.349(3369)	0.7 \pm 0.2
FT6	31°17'25"	103°27'58"	1196	变质中细粒斑状花岗闪长岩	茂县断裂下盘彭灌杂岩体一侧, 中元古代花岗闪长岩体	38	70.9	0.270	4.211(8)	8.311(1579)	1.352(3378)	1.2 \pm 0.4
FT9	31°57'52"	102°38'20"	3251	碎裂状细粒黑云石英二长闪长岩	大渡河上游梭磨河河谷, 北西向三叠纪石英二长岩体	42	95.0	0.690	6.250(19)	16.64(5059)	1.363(3045)	0.9 \pm 0.2
FT10	31°55'31"	102°39'06"	3419	变质中细粒长石岩屑砂岩	大渡河上游梭磨河河谷, 下三叠统新都桥组	26	45.2	0.304	7.843(8)	6.559(669)	1.366(3414)	2.9 \pm 1.1
FT11	31°51'03"	102°40'15"	4022	变质细粒钙质长石岩屑砂岩	大渡河上游梭磨河与岷江支流来苏河分水岭, 下三叠统新都桥组	42	93.0	0.943	12.70(31)	1.277(3117)	1.370(3423)	2.4 \pm 0.5
FT12	31°49'10"	102°41'12"	3577	中细粒钙质岩屑砂岩	来苏河谷, 米亚罗断裂, 下三叠统新都桥组	28	85.2	0.653	4.605(7)	22.35(3397)	1.374(3432)	0.5 \pm 0.2
FT13	31°45'03"	102°49'39"	3517	中细粒二云二长花岗岩	侏罗纪二长花岗岩体边部	42	20.8	0.396	6.397(19)	28.72(8531)	1.377(3447)	0.5 \pm 0.1
FT14	31°37'12"	102°49'41"	2603	变质中细粒含长石岩屑砂岩	杂谷脑河谷, 下三叠统侏儒组	42	69.9	0.449	3.963(13)	12.05(3953)	1.380(3450)	0.8 \pm 0.2
FT15	31°24'15"	103°06'03"	2012	黑云角岩化绢云板岩	杂谷脑河谷北岸, 下三叠统侏儒组	16	3.6	0.867	30.00(18)	19.17(1150)	1.384(3459)	3.8 \pm 1.0

注: 测试样品, 送中国原子能科学研究院 492 反应堆进行照射, 径迹统计使用 OLYMPUS 偏光显微镜, 在放大 1000 倍图像条件下完成。表中 $P(x^2)$ 为自由度 $(n-1)x^2$ 值的几率, r 为单颗粒径迹之间的间相关系数, RHO_s 为自发径迹密度, N_s 为自发径迹数, RHO_i 为诱发径迹密度, N_i 为诱发径迹数, Pooled Age 为极年龄。

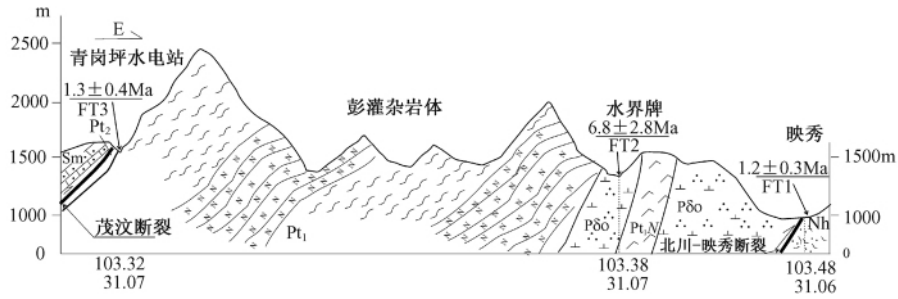


图 2 FT1 ~ 3 样品位置地形构造剖面图

Fig. 2 Topographic profile and location of Samples FT1 ~ 3

P80 : 二叠纪石英闪长岩; Sm: 志留系茂县群; Nh: 南华系苏雄组; Pt₂: 中元古代黄河河群;
 Pt₁: 早元古代康定群; Pt₁N: 早元古代铁镁质岩

FT6 采于汶川大邑坪, 采样点处于茂县—汶川断裂上, 采样处为北东断裂带, 样品为中细粒斑状花岗闪长质碎裂岩, 中细粒花岗结构, 碎裂构造, 长石以斜长石为主粘土化强、绢云母化明显, 石英颗粒明显呈现带状消光、波状消光. 断裂带发育于斜长花岗岩中, 地貌为北东向陡坎, FT6 的磷灰石裂变径迹年龄为 $1.2 \pm 0.4 \text{ Ma}$.

FT12 样品采自米亚罗断裂 (图 3), 样品为中细粒钙质岩屑砂岩, 岩石裂隙发育, 裂隙由钙质和粘土等充填; FT13 样品采自米亚罗断裂的次级断裂, 样品为碎裂花岗岩, 产于岩体边部碎裂带, 两个样品均采于深切谷地的侧壁. FT12 和 FT13 磷灰石裂变径迹年龄分别为 $0.5 \pm 0.2 \text{ Ma}$ 和 $0.5 \pm 0.1 \text{ Ma}$.

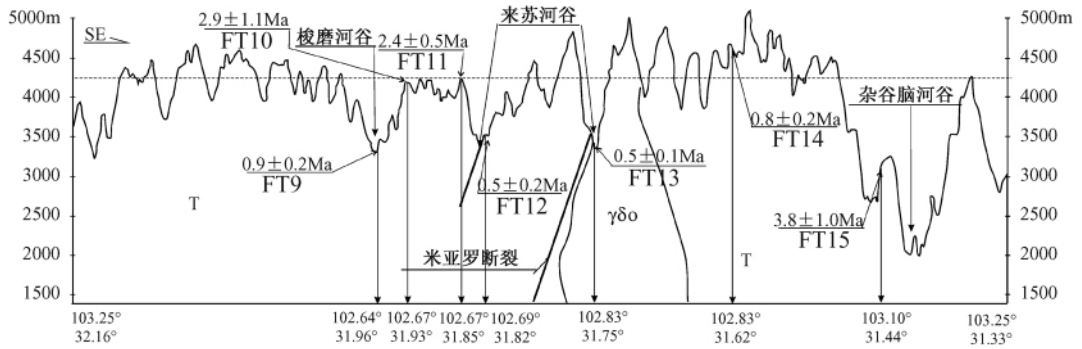


图 3 FT9 ~ FT15 样品位置地形构造剖面图

Fig. 3 Topographic profile showing location of samples FT9 ~ FT15

$\gamma\delta_0$: 燕山期岩体; T: 三叠系

3.2 剥露与切割年代测定

FT2 采于汶川木江坪东, 样点位于汶川—茂汶断裂与映秀—北川断裂之间 (图 1、图 2), 构造部位为龙门山推覆构造带中的后龙门山. FT2 岩性为强蚀变斜长角闪岩, 属于早元古代康定群, 为彭灌杂岩体组成部分, 岩石具变余花岗结构, 块状构造, 见绿泥石化, 绿帘石化. FT2 的磷灰石裂变径迹年龄为 $6.8 \pm 2.9 \text{ Ma}$.

FT4 采于汶川东界老, 样点处于岷江河谷中, 构造部位为汶川—茂汶断裂与映秀—北川断裂之间, 构造部位为龙门山推覆构造带中的后龙门山 (图 1). FT4 岩性为角闪岩, 属于

彭灌杂岩体西南段中心部分, 岩石具块状构造, 为自形柱粒状结构, 由角闪石、辉石斜长石等组成。FT4 的磷灰石裂变径迹年龄为 $0.7 \pm 0.2 \text{ Ma}$ 。

FT9 ~ FT12 样品采于大渡河水系与岷江水系的分水岭与两侧河谷地段 (图3), 除 FT9 为三叠纪石英二长岩体外, 其他均为下三叠统新都桥组岩石, 岩性为浅变质砂岩、岩屑砂岩等。FT10 和 FT11 两个样品采于分水岭附近, FT10 高程为 3419m, 磷灰石裂变径迹年龄为 $2.9 \pm 1.1 \text{ Ma}$, FT11 高程为 4022m 磷灰石裂变径迹年龄为 $2.4 \pm 0.5 \text{ Ma}$; FT9 和 FT12 两个样品采于两侧河谷中, FT9 采于大渡河水系梭磨河河谷, 高程为 3251m 磷灰石裂变径迹年龄为 $0.9 \pm 0.2 \text{ Ma}$, FT12 采于岷江水系来苏河河谷, 高程为 3577m 磷灰石裂变径迹年龄为 $0.5 \pm 0.2 \text{ Ma}$ 。

FT15 采于理县朴头, 处于杂谷脑河北岸, 松潘甘孜构造带边缘接近龙门山逆冲推覆构造带的部位 (图1), 系下三叠统侏倭组岩石, 岩性为板岩, FT15 裂变径迹年龄 $3.8 \pm 1.0 \text{ Ma}$ 。

4 讨论

4.1 主要边界断裂最新活动时代

近北川—映秀断裂带的 FT1 (花岗质碎裂岩) 的裂变径迹年龄为 $1.2 \pm 0.3 \text{ Ma}$, 明显小于断裂两侧二叠纪石英闪长岩和南华系苏雄组的形成时代, 也小于两侧岩石的裂变径迹年龄, 因此它记录了早更新世时期北川—映秀断裂带一次重要的活动。断裂的最新活动时代晚于断裂两侧岩石的剥露年代, Arne et al. [3] 在北川—映秀断裂两侧的岩石分别获得了两组磷灰石裂变径迹年龄数据 ($4.8 \pm 3 \text{ Ma}$ 和 $3.6.5 \pm 2.4 \text{ Ma}$) 和一个锆石裂变径迹年龄数据 ($110 \pm 4 \text{ Ma}$); Kirby et al. [7] 在该断裂以西获得一组 AFT 测年数据 ($4.6 \pm 0.4 \text{ Ma}$)。我们在该断裂西侧的花岗质杂岩体内获得的磷灰石裂变径迹年龄为 $6.8 \pm 2.9 \text{ Ma}$ (样品 FT2)。

茂县—汶川断裂上的 FT3、FT6 的磷灰石裂变径迹年龄为 1.3 ± 0.4 和 $1.2 \pm 0.4 \text{ Ma}$ 同样反映茂县—汶川断裂也曾经经历过一次强烈的活动。这两个样品采样位置相距甚远, 测试结果非常接近。据此推断, 茂县—汶川断裂在早更新世发生过一次规模较大的强烈活动 (图2)。

以上数据可以认为, 龙门山两条主边界断裂晚期活动时间接近, 龙门山逆冲推覆构造带的最晚一次强烈活动发生在早更新世。唐荣昌等 [9] 曾经报道都江堰市—安县断裂的都江堰市二王庙断层泥扫描电镜 (SEM) 分析结果以及据此估测的两次活动时间: 早更新世和晚更新世。显然, 其早期与本次测试结果基本一致。这期活动在四川盆地内部也有较强的反映, 由于成都平原东西两侧边界断裂在第四纪的对冲作用, 成都平原具有地堑式盆地特点 (钱洪等 [14]), 盆地基底显示出向龙门山倾斜的特点。资料表明, 盆地在第四纪具有较大的沉降速率, 达 0.3 mma^{-1} (曾允孚等 [25])。第四纪早期粗碎屑楔状体的广泛发育、山前冲积扇和山前冲积平原的分布、砾石层与粘土层交替构成的退积型构造层序等盆地充填特征, 都可能是盆地对龙门山逆冲推覆构造带早更新世强烈活动的响应。

龙门山两条主断裂的构造岩为在糜棱岩基础上发育的碎裂岩, 其糜棱结构反映岩石早期遭受了糜棱岩化作用, 其碎裂构造则反映晚期龙门山两条主边界断裂的脆性破裂过程。关于早期断裂性质和时间, 刘树根等 [2]、Arne et al. [3] 曾提出的茂县—汶川断裂在印支期发生过强烈韧性剪切作用的观点。

4.2 米亚罗断裂活动时代

川西与龙门山相邻地区的北西向断裂的存在很早就被认识。除了著名的鲜水河断裂带外,还有松岗沟断裂、阿坝断裂、松坪沟断裂、米亚罗断裂和抚边断裂等,这些断裂地表延续性差,研究程度较低,都具有较强的地震活动性,如松坪沟断裂末端的叠溪地震带、阿坝—马尔康地震带等。沿断裂往往发育深切河谷,如来苏河谷、黑水和松坪沟等。

米亚罗断裂是一条左旋走滑断裂,遥感线性影像特征清楚,沿断裂带滑坡崩塌等地质灾害频发,延断裂发生过较强的现今地震活动。FT12 和 FT13 磷灰石裂变径迹年龄分别为 0.5 ± 0.2 Ma 和 0.5 ± 0.1 Ma。样品反映了米亚罗断裂中更新世强烈活动。与此次活动相当的事件在龙门山构造带中也有表现,文德华^[42]获得了青川断裂带 TL (热释光) 年龄 (44.96 ± 3.557) $\times 10^4$ a, (48.61 ± 3.60) $\times 10^4$ a)。

4.3 高原快速隆升时间

彭灌杂岩体已经获得了不同的剥露年龄数据(如图1)。本次测定的 FT2 磷灰石裂变径迹年龄为 6.8 ± 2.9 Ma, 与 Arne et al.^[3] 获得的彭灌杂岩体磷灰石裂变径迹年龄 (6.5 Ma、4.8 Ma) 和宝兴杂岩体磷灰石裂变径迹年龄 (8.9 Ma、4.3 Ma) 基本一致,与 Kirby et al.^[7] 获得的彭灌杂岩体磷灰石裂变径迹年龄 (4.6 Ma) 吻合。这个结果进一步揭示了龙门山逆冲构造带基底岩石在中新世晚期快速隆升过程。

采于松潘—甘孜构造带边缘接近龙门山逆冲推覆构造带部位的样品 (FT15), 其裂变径迹年龄为 3.8 ± 1.0 Ma, 大于川西高原内部, 但小于龙门山逆冲推覆构造带基底岩石, 暗示高原边部隆升早于高原内部, 这与龙门山推覆构造带总体为中新世中晚期隆升、高原内部于上新世末隆升的事实是一致的。

4.4 深切河谷地貌形成时间

河谷地貌不同部位的剥露年代反映了河谷下切的时间, 梭磨河和来苏河都位于高原面上, 在同一分水岭的两侧。在大渡河水系梭磨河河谷一侧, 分水岭附近高程 3419m 的样品 FT10 磷灰石裂变径迹年龄为 2.9 ± 1.1 Ma, 河谷中高程 3251m 的样品 FT9 磷灰石裂变径迹年龄为 0.9 ± 0.2 Ma; 在岷江水系来苏河河谷一侧, 分水岭附近高程 4022m 的样品 FT11 磷灰石裂变径迹年龄为 2.4 ± 0.5 Ma, 河谷中高程 3577m 的样品 FT12 磷灰石裂变径迹年龄为 0.5 ± 0.2 Ma。可见分水岭的剥露时间大致在早更新世 (2.9 ~ 2.4 Ma), 高原内部河谷底部则在中更新世才剥露, 分水岭与两侧河谷剥露时间的差异, 揭示了上新世末到中更新世川西高原的强烈隆升与河流的深切过程, 同时也指示以梭磨河和来苏河分水岭为代表的川西高原普遍存在的 4500 m 地貌面存在于上新世末期以前。

在后龙门山的汶川东界老岷江干流河谷中, 高程 970m 的样品 (FT4) 磷灰石裂变径迹为 0.7 ± 0.2 Ma, 比较前文讨论的相同构造部位非河谷地段中新世晚期 (4.6 ~ 8.9 Ma) 的剥露年代, 岷江干流流域的龙门山构造带地区河流深切的起始时间早于高原内部。

本次所测得的岷江支流来苏河—杂谷脑河河谷下切 0.5 Ma 时期与川西主要河流地貌特点一致, 据唐荣昌等^[1] 统计, 金沙江、雅砻江、鲜水河、大渡河及岷江等中更新世以前的河流 V、VI 级阶地中才有侵蚀阶地, 而基座阶地占绝大多数, 且没有堆积阶地的观察记录。测试结果显示, 上新世末是川西高原强烈隆升时期, 也是川西高原现今深切河谷地貌形成的主要时期, 中更新世是北西向米亚罗断裂最晚一次强烈活动时期, 与此同时河流的下切速率较大。

5 结论

图1上标示了作者收集整理川西高原及龙门山地区现有磷灰石、锆石裂变径迹 U-Th/He 年龄数据,可以看出大部分年龄小于 20Ma,在汶川—茂县断裂以西的高原区有 20 Ma、6~8 Ma、3~4 Ma 几个数值段,它们可能代表了该地区主要的地质体剥露时间段,或许对应了相应的隆升时期,本次获得的 0.8~0.5 Ma 对应了河谷剥露时期。在后龙门山数据集中于 7~5 Ma,似乎可以指示高原边缘山脉隆升剥露时期。

基于本次测试数据的结果和相关资料的分析,川西高原新近纪以来经历了中新世晚期和上新世末期 (2.9~2.4Ma) 两个快速隆升阶段。龙门山逆冲推覆构造带的主边界断裂:汶川—茂县断裂和映秀—北川断裂,在早更新世 (1.2~1.3 Ma) 有一次强烈的活动,而北西向米亚罗断裂中更新世 (0.5 Ma) 有一次强烈的活动。晚第四纪断裂活动同时伴随来苏河谷—杂谷脑河河谷的下切,代表了川西高原现今深切河谷的发育时期。

后记: 本文是杨农研究员本世纪初在川西高原野外调查和研究的成果之一,由于工作繁忙,该成果一直没有发表。杨农今年仙辞人间,我们悲痛万分,把此研究成果整理发表,以此表示深切怀念。

参 考 文 献

- [1] 唐荣昌,韩渭宾. 四川活动断裂与地震 [M]. 北京:地震出版社,1993.
TANG Rongchang, HAN Weibin. Active fractures and earthquakes in Sichuan Province [M]. Beijing: Seismological Publishing House, 1993.
- [2] 刘树根,罗志立,戴苏兰,等. 龙门山冲断带的隆升和川西前陆盆地的沉降 [J]. 地质学报, 1995, 69 (3): 205~214.
LIU Shugen, LUO Zhili, DAI Sulan, et al. The uplift of the Longmenshan thrust belt and subsidence of the western Sichuan foreland basin [J]. Acta Geologica Sinica, 1995, 69 (3): 205~214.
- [3] Arne D, Worley B, Wilson C H, et al. Differential exhumation in response to episodic thrusting along the eastern margin of the Tibetan plateau [J]. Tectonophysics, 1997, 280: 239~256.
- [4] 刘树根,赵锡奎,罗志立,等. 龙门山造山带—川西前陆盆地系统构造事件研究 [J]. 成都理工学院学报, 2001, 28 (3): 221~230.
LIU Shugen, ZHAO Xikui, LUO Zhili, et al. Study on the tectonic events in the system of the Longmen Mountain, west Sichuan foreland basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2001, 28 (3): 221~230.
- [5] 蒋复初,吴锡浩. 青藏高原东南部地貌边界带晚新生代构造运动 [J]. 成都理工学院学报, 1998, 25 (2): 162~168.
JIANG Fuchu, WU Xihao. Late Cenozoic tectonic movement in geomorphologic boundary belt of southeastern Qinghai-Xizang Plateau [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1998, 25 (2): 162~168.
- [6] Xu Ganqing, Kamp P J J. Tectonics and denudation adjacent to the Xianshuihe Fault, eastern Tibetan Plateau: Constraints from fission track thermochronology [J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105 (B8): 19231~19251.
- [7] Kirby E, Reiners P W, Krol M A, et al. Late Cenozoic evolution of eastern margin of the Tibetan Plateau: Inferences from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and (U-Th)/He thermochronology [J]. Tectonics, 2002, 21 (1): 1~20.
- [8] 李勇,侯中键,司光影,等. 青藏高原东缘新生代构造层序与构造事件 [J]. 中国地质, 2002, 29 (1): 30~36.
LI Yong, HOU Zhongjian, SI Guangying, et al. Cenozoic tectonic sequence and tectonic events at the eastern margin of the Qinghai-Tibet plateau [J]. Chinese Geology, 2002, 29 (1): 30~36.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 陈社发, 邓起东, 赵小麟, 等. 龙门山中段推覆构造带及相关构造的演化历史和变形机制 (一) [J]. *地震地质*, 1994, 16 (4): 404~412.
- CHEN Shefa, DENG Qidong, ZHAO Xiaolin, et al. Deformational characteristics, evolutionary history, and deformation mechanism of the middle Longmenshan thrust-nappes and related tectonics (Part I) [J]. *Seismology and Geology*, 1994, 16 (4): 404~412.
- [12] 陈社发, 邓起东, 赵小麟, 等. 龙门山中段推覆构造带及相关构造的演化历史和变形机制 (二) [J]. *地震地质*, 1994, 16 (4): 413~421.
- CHEN Shefa, DENG Qidong, ZHAO Xiaolin, et al. Deformational characteristics, evolutionary history, and deformation mechanism of the middle Longmenshan thrust-nappes and related tectonics (Part II) [J]. *Seismology and Geology*, 1994, 16 (4): 413~421.
- [13] 赵小麟, 邓起东, 陈社发. 龙门山逆断裂带中段的构造地貌学研究 [J]. *地震地质*, 1994, 16 (4): 422~428.
- ZHAO Xiaolin, DENG Qidong, CHEN Shefa. Tectonic geomorphology of the central segment of the Longmenshan thrust belt, western Sichuan, southwestern China [J]. *Seismology and Geology*, 1994, 16 (4): 422~428.
- [14] 钱洪, 唐荣昌. 成都平原的形成与演化 [J]. *四川地震*, 1997, (3): 1~7.
- QIAN Hong, TANG Rongchang. On the formation and evolution of the Chengdu Plain [J]. *Earthquake Research in Sichuan*, 1997, (3): 1~7.
- [15] 丁林, 钟大赉, 潘裕生, 等. 东喜马拉雅构造结上新世以来快速抬升的裂变径迹证据 [J]. *科学通报*, 1995, 40 (16): 1497~1500.
- DING Lin, ZHONG Dalai, PAN Yusheng, et al. Fission track evidence of rapid uplifting of the east Himalaya structural knot since Pliocene [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1995, 40 (16): 1497~1500.
- [16] 陈文寄, 李齐, 周新华, 等. 青藏高原南部两次快速冷却事件的构造含义 [J]. *地震地质*, 1996, 18 (2): 109~115.
- CHEN Wenji, LI Qi, ZHOU Xinhua, et al. The tectonic implication of two rapid cooling events on the southern Xizang (Tibet) Plateau [J]. *Seismology and Geology*, 1996, 18 (2): 109~115.
- [17] 王军. 西昆仑卡日巴生岩体和苦子干岩体的隆升——来自磷灰石裂变径迹分析的证据 [J]. *地质论评*, 1998, 44 (4): 435~442.
- WANG Jun. Uplift of the Karibasheng and Kuzigan granite in the west Kunlun Mountains: Evidence from apatite fission track analysis [J]. *Geological Review*, 1998, 44 (4): 435~442.
- [18] 陈正乐, 张岳桥, 王小凤, 等. 新生代阿尔金山脉隆升历史的裂变径迹证据 [J]. *地球学报*, 2001, 22 (5): 413~418.
- CHEN Zhengle, ZHANG Yueqiao, WANG Xiaofeng, et al. Fission track dating of apatite constrains on the Cenozoic uplift of the Altyn Tagh Mountain [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2001, 22 (5): 413~418.
- [19] 钟大赉, 丁林. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨 [J]. *中国科学 (D辑)*, 1996, 26 (4): 289~295.
- ZHONG Dalai, DING Lin. Discussion on the uplift process and mechanism of Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Science in China (Series D)*, 1996, 26 (4): 289~295.
- [20] 王庆隆, 万景林. 用裂变径迹法研究断层活动年龄的初步探讨 [J]. *地震地质*, 1988, 10 (4): 199~205.
- WANG Qinglong, WAN Jinglin. Application of fission track method to timing of faulting [J]. *Seismology and Geology*, 1988, 10 (4): 199~205.
- [21] 陈文寄, 计风桔, 王非, 等. 年轻地质体系的年代测定 [M]. 北京: 地震出版社. 1991.
- CHEN Wenji, JI Fengju, WANG Fei, et al. Timing of young geological system [M]. Beijing: Seismological Publishing

- House, 1991.
- [22] 龙学明, 罗志立. 龙门山冲断带的分区及其演化 [A]. 见: 罗志立、赵锡奎、刘树根, 等. 龙门山造山带的崛起和四川盆地的形成与演化 [C]. 成都: 成都科技大学出版社, 1994.
- LONG Xueming, LUO Zhili. Division and evolution of Longmenshan thrust belt [A]. In: LUO Zhi-li, ZHAO Xi-kui, LIU Shu-gen, et al. Uplift of Longmen Mountain orogenic belt and the formation and evolution of Sichuan Basin [C]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1994.
- [23] 罗志立, 赵锡奎, 刘树根, 等. 龙门山造山带的崛起和四川盆地的形成与演化 [C]. 成都: 成都科技大学出版社, 1994.
- LUO Zhili, ZHAO Xikui, LIU Shugen, et al. Uplift of Longmen Mountain orogenic belt and the formation and evolution of Sichuan Basin [C]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1994.
- [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.
- XU Zhiqin, HOU Liwei, WANG Zongxiu, et al. Orogenic process of the Songpan-Ganzi orogenic belt in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992.
- [25] 曾允孚, 李勇. 龙门山前陆盆地形成与演化 [J]. 矿物岩石, 1995, 15 (1): 40~49.
- ZENG Yunfu, LI Yong. The formation and evolution of Longmen Mountains foreland basin [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 1995, 15 (1): 40~49.
- [26] 李勇, 曾允孚. 龙门山前陆盆地充填序列 [J]. 成都理工学院学报, 1994, 21 (3): 46~55.
- LI Yong, ZENG Yunfu. Fill sequence of Longmen Mountains foreland basin [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1994, 21 (3): 46~55.
- [27] 李勇, 孙爱珍. 龙门山造山带构造地层学研究 [J]. 地层学杂志, 2000, 24 (3): 201~206.
- LI Yong, SUN Aizhen. Tectostratigraphy of Longmenshan Orogen [J]. Journal of Stratigraphy, 2000, 24 (3): 201~206.
- [28] Dirks P H G M, Wilson C J L, Chen S, et al. Tectonic evolution of the NE margin of the Tibetan Plateau: Evidence from the central Longmen Mountains, Sichuan Province, China [J]. Journal of Southeast Asian Earth Sciences, 1994, 9 (1~2): 181~192.
- [29] 林茂炳, 吴山. 龙门山推覆构造变形特征 [J]. 成都理工学院学报 (自然科学版), 1991, 18 (1): 46~54.
- LIN Maobing, WU Shan. Deformational features of nappe structures in the Longmenshan Mountains [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 1991, 18 (1): 46~54.
- [30] 马永旺, 杨尽. 龙门山中段推覆构造的变形特征 [J]. 成都理工学院学报, 2001, 28 (3): 236~240.
- MA Yongwang, YANG Jin. Tectonic deformation of the nappe tectonics in the middle Longmen Mountains [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2001, 28 (3): 236~240.
- [31] 刘顺. 论龙门山中北段东缘印之运动晚幕的性质 [J]. 成都理工学院学报, 1998, 25 (4): 524~528.
- LIU Shun. On properties of tectonic movement in east margin of middle and northern Longmen Mountains at the end of Triassic period [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1998, 25 (4): 524~528.
- [32] 王连捷, 崔军文, 周春景, 等. 汶川 5.12 地震发震机理的数值模拟 [J]. 地质力学学报, 2009, 15 (2): 105~113.
- WANG Lianjie, CUI Junwen, ZHOU Chunjing, et al. Numerical modeling for Wenchuan earthquake mechanism [J]. Journal of Geomechanics, 2009, 15 (2): 105~113.
- [33] 彭华, 马秀敏, 姜景捷. 龙门山北端青川断层附近应力测量与断层稳定性 [J]. 地质力学学报, 2009, 15 (2): 114~130.
- PENG Hua, MA Xiumin, JIANG Jingjie. Stability and stress measurement near the Qingchuan fault in the northern Longmen Mountains [J]. Journal of Geomechanics, 2009, 15 (2): 114~130.
- [34] 张永双, 石菊松, 孙萍, 等. 汶川地震内外动力耦合及灾害实例 [J]. 地质力学学报, 2009, 15 (2): 131~141.
- ZHANG Yongshuang, SHI Jusong, SUN Ping, et al. Coupling between endogenic and exogenic geological processes in the Wenchuan earthquake and example analysis of geo-hazards [J]. Journal of Geomechanics, 2009, 15 (2): 131~141.
- [35] 谭成轩, 孙叶, 吴树仁, 等. 5.12 汶川 M_s 8.0 大地震后关于我国区域地壳稳定性评价的思考 [J]. 地质力学学报

- 报, 2009, 15 (2): 142 ~ 150.
- TAN Chengxuan, SUN Ye, WU Shuren, et al. A consideration on regional crustal stability assessment after M_s 8.0 Wenchuan strong earthquake in China [J]. *Journal of Geomechanics*, 2009, 15 (2): 142 ~ 150.
- [36] 姚鑫, 张永双. 基于差分干涉雷达的汶川地震同震形变特点 [J]. *地质力学学报*, 2009, 15 (2): 151 ~ 161.
- YAO Xin, ZHANG Yongshuang. Co-seismic deformation of 5. 12 Wenchuan earthquake based on D-INSAR [J]. *Journal of Geomechanics*, 2009, 15 (2): 151 ~ 161.
- [37] 王连捷, 周春景, 孙东生, 等. 汶川 5. 12 地震引起的库仑应力变化及其对周边地震活动的影响 [J]. *地质力学学报*, 2008, 14 (3): 193 ~ 200.
- WANG Lianjie, ZHOU Chunjing, SUN Dong-sheng, et al. Coulomb stress changes caused by Wenchuan earthquake and its influence on seismic activity in the adjacent area [J]. *Journal of Geomechanics*, 2008, 14 (3): 193 ~ 200.
- [38] 马寅生, 张永双, 胡道功, 等. 玉树地震地表破裂与宏观震中 [J]. *地质力学学报*, 2010, 16 (2): 115 ~ 128.
- MA yinsheng, ZHANG Yongshuang, HU Daogong. et al. The Surface Ruptures And The Macroscopical Epicenter Of Yushu $M_s7. 1$ Earthquake [J]. *Journal of Geomechanics*, 2010, 16 (2): 115 ~ 128.
- [39] 姚鑫, 张永双, 杨农, 等. 玉树地震地表变形 InSAR 观测及初步分析 [J]. *地质力学学报*, 2010, 16 (2): 129 ~ 136.
- YAO Xin, ZHANG Yongshuang, YANG Nong, et, al. D-InSAR Deformation Observation and Preliminary Analysis of the $M_s7. 1$ Yushu Earthquake [J]. *Journal of Geomechanics*, 2010, 16 (2): 129 ~ 136.
- [40] 王连捷, 崔军文, 王薇, 等. 青海玉树 $M_s7. 1$ 地震发震过程的数值模拟 [J]. *地质力学学报*, 2010, 16 (2): 137 ~ 145.
- WANG Lianjie, CUI Junwen, WANG Wei, et, al. Numerical modeling of Yushu $M_s7. 1$ earthquake mechanism [J]. *Journal of Geomechanics*, 2010, 16 (20): 137 ~ 145.
- [41] 甘建军, 黄润秋, 李前银, 等. 都江堰—汶川公路汶川地震次生地质灾害主要特征和形成机理 [J]. *地质力学学报*, 16 (2): 146 ~ 158.
- GAN Jianjun, HUANG Runqiu, LI Qianyin, et al. Formation Mechanism Of Geo-Hazards Triggered By Wenchuan M_s . 8. 0 Earthquake Along Dujiangyan-Wenchuan Highway [J]. *Journal of Geomechanics*, 2010, 16 (2): 146 ~ 158.
- [42] 文德华. 龙门山北段断裂活动特征 [J]. *四川地震*. 1994, (1): 53 ~ 57.
- WEN De-hua. Characteristics of fracture activity in the northern Longmenshan Mountains [J]. *Earthquake Research in Sichuan*, 1994, (1): 53 ~ 57.

TISSION-TRACK DATING FOR ACTIVITY OF THE LONGMENSHAN FAULT ZONE AND UPLIFTING OF THE WESTERN SICHUAN PLATEAU

YANG Nong^{1, 2}, ZHANG Yueqiao^{1, 2}

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

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

Abstract: Twelve samples of tectonites, metasediments and granites taken from the western Sichuan Plateau were dated in this study by apatite fission track dating method. The results are used to reconstruct uplifting history and fault activity of the Longmenshan tectonic belt in eastern margin of the Tibetan Plateau. It is shown that the recent activity of the two major boundary faults: the

Wenchuan-Maowen fault and the Yingxiu-Beichuan fault, occurred in early Pleistocene (FT ages of 1.2 ~ 1.3 Ma); the Miyaluo fault developed in the interior of the plateau was strongly active in middle Pleistocene (around 0.5 Ma); the back Longmenshan tectonic zone started to uplift in Miocene; and the interior of the plateau began rapid uplift in latest Pliocene to Middle Pleistocene. The uplifting of the plateau caused formation of deep-incised river morphology.

Key words: Late Cenozoic; western Sichuan Plateau; Longmenshan fault zone; Uplift; apatite fission track dating

怀念杨农同志

中国地质科学院地质力学研究所研究员、科技信息室副主任、本刊编辑部主任、北京地质学会理事、九三学社国土资源委员会一支社委员, 杨农同志因突发心脏病抢救无效, 于2010年10月26日01时在北京逝世, 享年48岁。他的过早辞世, 令人倍感伤感和惋惜。

杨农同志1984年毕业于中国地质大学(武汉)地质力学专业, 1991~1994年师从张国铎研究员攻读硕士。继而在地质力学研究所历任工程师、副研究员和研究员。杨农同志热爱祖国、热爱地质事业, 先后从事过区域地质调查、地质找矿勘查和地震地质调查工作, 在青藏雪域高原、祁连陡壁、秦岭之巅、燕山腹地、大兴安岭丛林, 在祖国的山山水水都留下了他坚定的足迹和辛勤的汗水; 在汶川地震和玉树地震现场风餐露宿, 为抗震救灾和灾后重建提供了第一手实际资料和合理化建议, 为此2008年荣获九三学社中央委员会颁发的《九三学社抗震救灾先进个人》奖励。他善长电脑技术, 致力把现代声讯技术、信息技术和遥感技术广泛应用于科研领域, 近10年来他重点研究和开拓数字地球和数字地貌学, 已成为这一领域的专家学者和开拓者。任科技信息室负责人以来, 他为所信息系统和网站建设付出巨大心血, 取得显著成绩; 作为本刊编辑部主任, 他在紧张科研工作的同时, 精心打理编辑部的工作, 为提高本刊质量和知名度, 付出了辛勤的劳动和汗水, 已初见成效。

杨农同志不仅学识渊博、基础理论扎实、刻苦钻研, 而且为人谦逊、工作勤奋、责任心强, 忘我精神和淡薄名利是他人生的一个突出亮点。充满工作热情、助人为乐、认真实干、从不夸夸其谈是他又一个人生亮点。他在勤奋和忘我中走完了不长但无愧无悔的一生。

在此, 我们缅怀杨农同志, 愿他一路走好! 杨农同志安息吧!

地质力学学报编辑部全体同志
2010年10月30日