

DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850(2020)01-0082-09

龙门山南段印支晚期构造活动的厘定 – 来自构造几何分析及碎屑锆石年代学的约束

张宇杰, 孟立丰, 陈伟, 余养里, 应家梅

(西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都 610500)

摘要:印支运动在龙门山构造带的形成与演化中扮演着重要作用。为明确龙门山南段晚印支以来构造活动特点,本研究选取山前带某地震剖面进行构造解析和正演模拟,并采用碎屑锆石 U-Pb 年代进行定量约束。结果表明龙门山南段上三叠统物源与松潘-甘孜地块具有亲缘性,应来自北部的秦岭造山带以及松潘-甘孜褶皱带内中下三叠统的再旋回。研究区晚印支以来经历多次逆冲推覆,位移量约为 1.7km,与中北段相比,其构造活动相对较弱。结合区域资料,认为龙门山印支期的构造活动整体呈由北向南传递之特征。

关键词:龙门山南段;地震反射剖面;构造正演模拟;锆石 U-Pb 定年

中图分类号:P542

文献标识码:A

引言

因发育典型的前陆冲断构造,且构造活动具有明显的多期性,龙门山构造带的构造演化过程一直是地学研究的热点,也存在诸多争议,特别是早期构造明显受到后期的构造叠加改造影响,导致当前对早期构造的活动性及空间差异性的认识存在偏差^[1-5]。当前多数学者对龙门山构造带的构造研究主要采取地震剖面的解释与恢复进行,而不同人员进行处理得出的结果却存在很大差异,这也导致对龙门山构造带演化过程的认识存在很大差异。本文采取学科交叉的手段,以断层转折褶皱几何模型为基础,优选近年来中石化西南油气分公司采集处理的信噪比相对较高的地震剖面,在钻井、地表构造标定的约束条件下,对其进行构造解析和平衡剖面恢复,还原早期构造活动形成的逆冲推覆体系几何形态和构造变形的运动学过程;同时结合碎屑锆石年代学与岩相学分析,对研究区域印支晚期源-汇体系进行研究,为龙门山南段晚印支期的构造活动提供沉积学的定量化约束。

1 地质背景

龙门山构造带所处的大地构造位置特殊,西以茂县-汶川断裂与松潘-甘孜地体相邻,东以安县-灌县断裂与四川盆地相隔,向北东延入秦岭造山带,向南西与康滇南北构造带相接。龙门山构造带整体上划分为北段,中段和南段,其中龙门山南段自西北向东南发育有汶川-茂汶断裂、五龙断裂、宝兴断裂三条大型逆冲断层(图1)。位于龙门山南段山前的隐伏构造带,经历了印支期、喜山期的多期次构造活动,形成如今复杂的逆冲推覆构造特征^[6-14]。松潘-甘孜造山带与龙门山褶皱造山带关系密切,该构造带是由于古特提斯洋的闭合,导致华北、扬子板块与羌塘板块碰撞拼合而形成。

伴随着龙门山强烈的构造活动,该构造带内部出露了宝兴杂岩体和彭灌杂岩体(图1),宝兴杂岩由变形强烈、中低级变质的火成岩组成;其岩石组合复杂,主要由斜长角闪岩、绿泥石片岩、辉长质片麻岩、闪长质片麻岩、英云闪长质片麻岩和少量块状二长花岗岩组成^[15]。彭灌杂岩体主要由中晚元古代的黑云二长花岗岩、角闪石英闪长岩、辉长岩、石英闪长岩、黑云英云闪长岩等^[16]。岩体中糜棱岩、千枚糜棱岩定向性都十分规则,表现出北东向延伸展布的特征。

收稿日期:2019-10-12; **改回日期:**2019-01-24

作者简介:张宇杰(1995-),男,正攻读地质学硕士学位,主要研究造山带和盆山系统。455483302@qq.com

通信作者:孟立丰(1981-),男,副教授,主要研究方向为造山带与盆地构造。Bsblover007@163.com

资助项目:国家科技重大专项(2017ZX05005-001-002);国家自然科学基金项目(41302165)

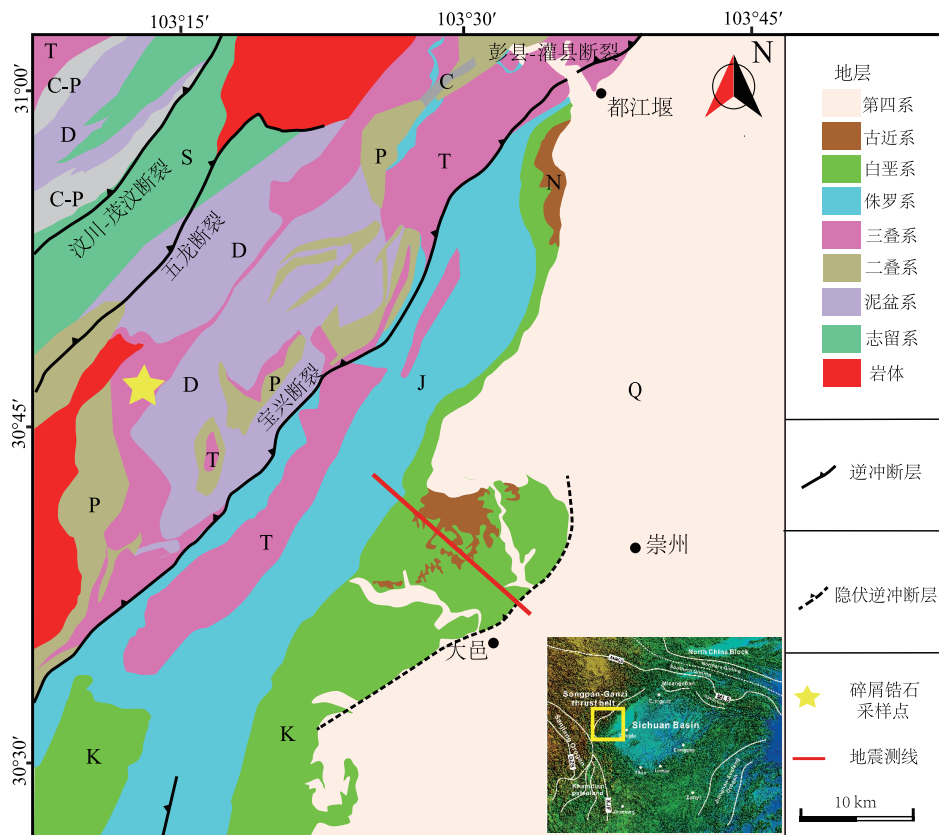


图1 研究区地质简图

Fig. 1 Simplified geological map of the study area

龙门山南段沉积了志留纪~晚三叠世早期的海相地层以及晚三叠世中晚期~白垩纪的陆相碎屑岩地层,晚三叠世地层主要为须家河组(T_3x)、马鞍塘组(T_3m)。其中须家河组主要是须二段(T_3x^2),须三段(T_3x^3),须四段(T_3x^4)。须三段上部为黑色页岩夹薄煤层;中部为灰白色厚层块状中-细粒岩屑长石石英砂岩,下部为灰黑色页岩夹细粒岩屑长石石英砂岩。须四段上、中部为黑色页岩与灰色细粒岩屑砂岩不等厚互层夹煤线,下部为深灰色中粒岩屑砂岩与黑色页岩不等厚互层夹煤线,底部为灰色细、中粒岩屑砂岩^[17-18]。

2 研究方法

2.1 地震剖面的构造几何解释

构造几何分析是指将解释的地层几何参数与断层的几何参数按找选取的构造几何模型进行几何匹配,以地震反射剖面中的构造参数为约束,降低构造解释的多解性,使得解释的构造形态与实际形态达到最佳的吻合。其主要原理是按构造活动的老新顺序,通过选取的断层相关褶皱几何模型,

模拟各断层活动产生的构造几何变形,并与实际地震剖面展示的构造几何特征进行对比,以获取合理的构造解释方案。一般来讲,当解释与选取的构造模型和实际构造接近时,模拟计算的几何变形同实际构造形态吻合,可以认为其构造解释是合理的,反之表明断层形态和构造几何模型与实际存在差异,需重新调整构造解释方案。

2.2 锆石 U-Pb 定年测试分析

锆石是广泛存在于岩浆岩、变质岩、沉积岩中的一种常见矿物。由于碎屑锆石 U-Pb 体系封闭温度较高,因此经过多旋回演变后仍然可以用于源区示踪^[19-21]。本文锆石 U-Pb 同位素定年在武汉上谱分析科技有限责任公司利用 LA-ICP-MS 分析完成。GeolasPro 激光剥蚀系统由 COMPexPro 102 ArF 193 nm 准分子激光器和 MicroLas 光学系统组成,ICP-MS 型号为 Agilent 7700e。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度^[22]。本次分析的激光束斑为 24 μm 。U-Pb 同位素定年和微量元素含量处理中采用锆石标准 91500 和玻璃标准物质 NIST610 作外标分别进行同位素和微量元素分

馏校正。每个时间分辨分析数据包括大约 20-30 s 空白信号和 50 s 样品信号。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMSDataCal^[23-24]完成。锆石样品的 U-Pb 年龄谱和图绘制和年龄加权平均计算采用 Isoplot/Ex_ver3^[25]完成。

3 分析结果

3.1 地震剖面的构造几何分析

本次研究选取横贯南部山前带背斜的地震剖面进行分析,从地震反射剖面反映出背斜整体呈宽缓的褶皱形态。背斜北西翼地层倾角较南东翼地层倾角陡,在背斜的深部,这一特征更加明显。且顶部地层发育一系列小断层。主断层以高角度向上逆冲切穿整个背斜直至地表,背斜前翼和后翼发育反冲断层。背斜顶部地层基本水平,深部地层发生明显变形,说明构造是多期次构造活动叠加的结果。根据层位标定结果,在白田坝组(J_1b)和须家河组四段(T_3x^4)两套地层之间有顶部薄、两翼厚的特征(图 2)。

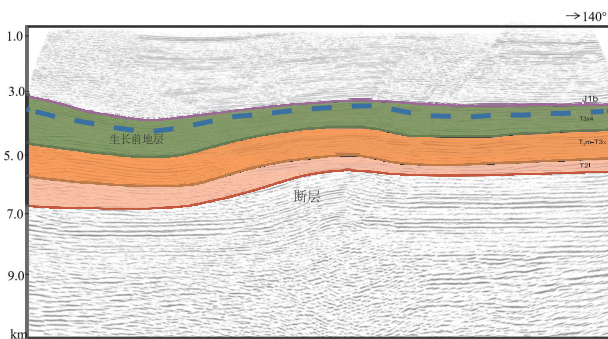


图 2 地震反射剖面构造解译图

Fig. 2 Seismic interpretation for structure

对恢复后的地震反射剖面进行几何特征分析,根据构造楔的原理对背斜后翼向斜处的反冲断层先进行去断距处理。处理后的地层形态表现出明显的断层转折褶皱的几何形态;同时,地震反射剖面中反射轴在背斜两翼未出现明显的上超或者削蚀的现象,构造特征与高沉积速率的生长断层转折褶皱模型相似^[26]。根据以上构造现象,断层活动在白田坝组(J_1b)和须家河组四段(T_3x^4)两套地层之间形成了生长地层(图 3),表明早期活动对该时期的沉积具有控制作用。

3.2 锆石 U-Pb 定年测试分析

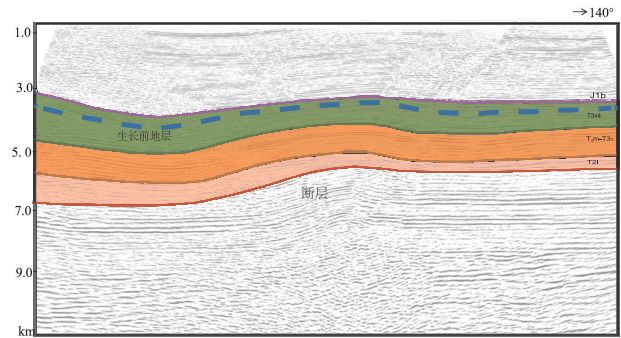


图 3 印支期逆冲断层恢复后的地震反射剖面的几何特征分析

Fig. 3 Geometric features of seismic reflection profiles after restoration of indosinian thrust fault

JGS-01 样品取自须家河组四段(T_3x^4),岩石成分主要为石英(65%)、长石(5%)、岩屑(10-15%)和填隙物(15%)。石英为他形粒状,磨圆度较差,多为次棱角状-棱角状,粒径 0.06-0.30 mm,以细粒级为主(图 4a)。长石为板条状、粒状,磨圆度较差,以次棱角状为主,可见绢云母化蚀变,粒径 0.10-0.25mm。岩屑形状不规则,磨圆度中等,以次圆状为主,成分有燧石岩、石英岩、变质粉砂岩、泥岩、板岩、千枚岩等低级变质岩,粒径 0.10-0.30 mm。可以鉴定岩样为细粒岩屑石英砂岩。

样品的锆石颗粒呈透明-半透明,晶形自形-半自形,大部分呈柱状或长柱状,部分为短柱状。直径 100~200 μm ,长宽比 2:1~3:1。锆石阴极发光图像显示清晰的岩浆振荡环带结构(图 3.3b)。总共对 90 个碎屑锆石进行激光测试,其中有 88 颗锆石的和谐度 >90%。少量锆石 $\text{Th}/\text{U} < 0.1$,其他锆石的 Th/U 值较高($\approx 0.11-1.52$)(图 4b),说明是岩浆成因。碎屑锆石的年龄可分为 5 组:287-219Ma (6%)、326-307Ma (8%)、444-415Ma (6%)、1989-1720Ma (53%)、2540-2362Ma (10%),主峰分别为 ~220Ma、~320Ma、~440Ma、~1820Ma、~2400Ma,其中 700-1000Ma 之间有分散簇(图 5)。

4 讨论

4.1 龙门山南段印支早期构造活动

4.1.1 地震反射剖面正演模拟

根据正演模拟过程(图 6),模拟的结果与图 3.1 地震反射剖面展示的构造几何样式基本吻合,由此可以分析背斜的构造演化过程。

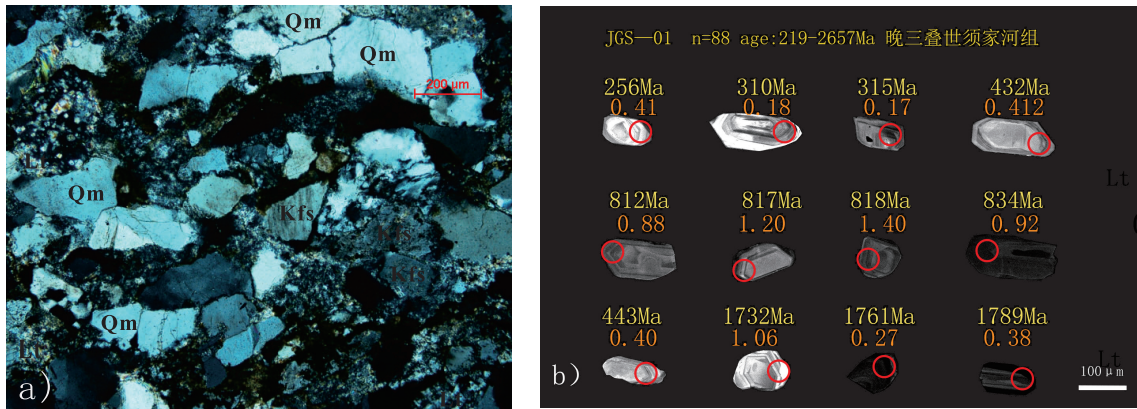


图4 (a) 须家河组四段细粒岩屑石英砂岩; (b) 碎屑岩中典型锆石的阴极发光图像

Fig. 4 Fine-grained detritus quartzose sandstone in No. 4 member of Xujiahe Formation (a) and Cathode luminescence image of typical zircon in clastic rocks (b)

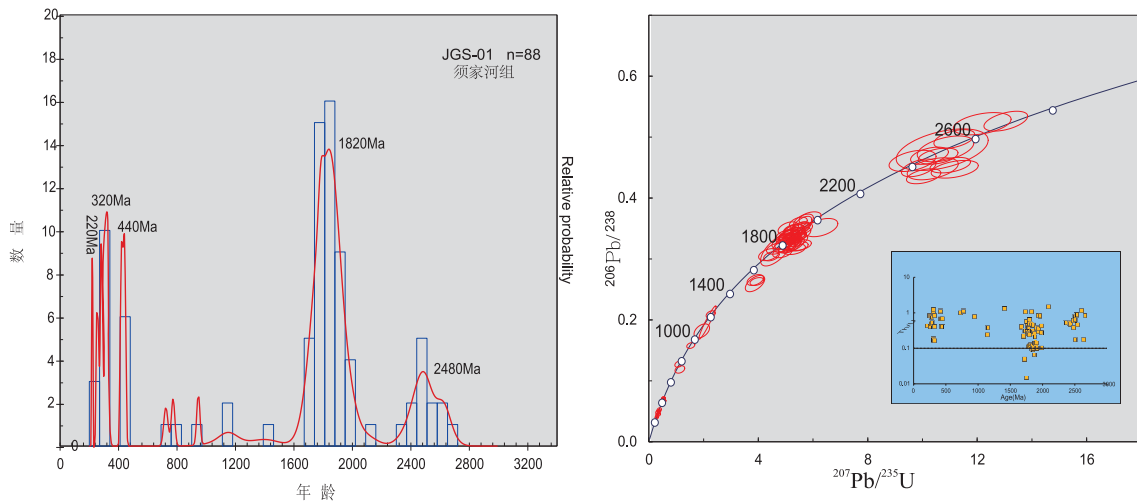


图5 碎屑锆石的年龄分布柱状图和 U-Pb 年龄谱和曲线图

Fig. 5 Detrital zircon age distribution histogram and U-Pb concordia plot

印支早期: 下二叠统(P_1) 和下三叠统飞仙关组(T_{1f})、嘉陵江(T_{1j})组、雷口坡(T_2l)组、马鞍塘(T_3m)组和须家河组(T_3x^{2-4})地层沉积, 地层初始状态水平。嘉陵江组沉积的碳酸盐岩、砂岩和蒸发岩和雷口坡组沉积的膏岩层在高温高压下成为了龙门山地区的一套区域性滑脱层, 为断层的产生提供了必要条件。印支晚期: 雷口坡组与嘉陵江组地层之间发育一隐伏转折断层, 断层倾角较小, 段坡位置和宽度与地震反射剖面中地层发生穿时的位置和宽度相当(图 6a)。受到北西方向龙门山的作用力影响, 断层发生活动, 上盘地层沿断层面运动, 发生褶皱(滑移量约 1.7km)(图 6b)。同时, 须家河组地层继续沉积, 在 T_3x^4 中上部形成生长地层(图 6c)。

喜山期 I 幕: 断层停止运动, 侏罗系沉积。下

侏罗统白田坝组(J_1b)与上三叠统须家河组四段(T_3x^4)形成顶部薄、两翼厚的生长地层的形态。断层在深部滑脱层中发育, 在背斜处以传播断层的形式向上逆冲, 导致断层上盘侏罗系形成褶皱(位移量为 1.3km)(图 6d)。喜山期 II 幕: 龙门山构造带的变形活动持续向前传递, 形成具有断坪-断坡构造几何样式的高角度逆冲断层, 断层切割早期深部的隐伏断层。由于高角度逆冲作用, 在背斜前翼、后翼向斜处伴随着有高陡的反冲断层形成(图 6e, f)。

由此得出龙门山南段的隐伏构造在 T_3x^4 时期已经形成, 但是整体抬升幅度较弱, 结合前人研究认为龙门山构造带北段在晚三叠世时期挤压逆冲作用形成主体冲断褶皱构造^[27], 构造应力自北向南传播, 引起龙门山构造带剧烈的变形活动, 形成一系列

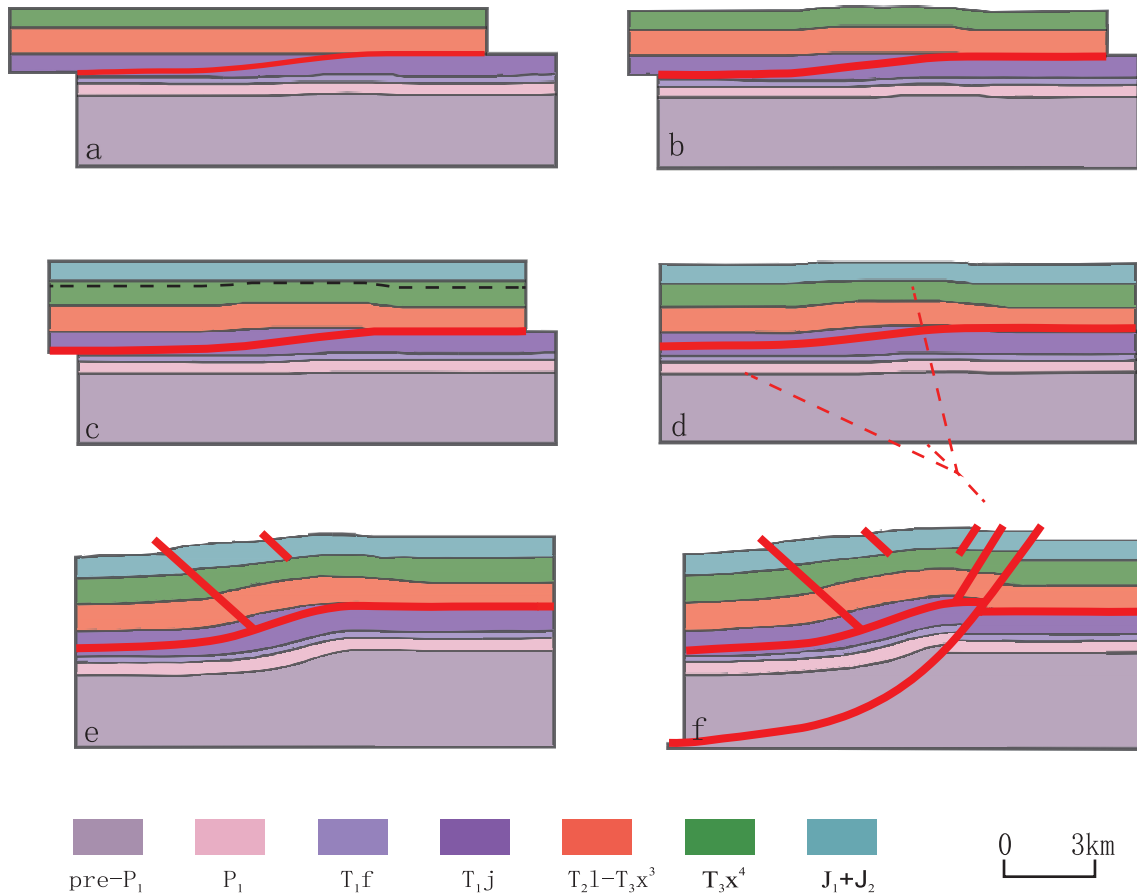


图6 地震反射剖面运动学正演模拟图

a:印支早期存在一深部隐伏转折断层;b:深部断层活动使得上覆地层发生褶皱;c:侏罗系沉积;d:深部断层活动造成的地层抬升,背斜两翼地层形成高差;e:喜山期,形成反冲断层;f:喜山期形成大型逆冲断层,伴随着次级断层产生

Fig. 6 Kinematic forward modeling of seismic reflection profile

的逆冲推覆构造带。

4.1.2 锆石 U-Pb 测年分析

根据样品测试的碎屑锆石年龄峰值特点,研究区存在多个年龄段的峰值。通过对研究区周缘岩体的碎屑锆石年龄数据整理,显示样品中 220Ma 年龄峰与扬子西部的义敦岛弧^[28,29]和扬子北缘的秦岭三叠纪岩浆事件^[30]时间相对应。而 320Ma 年龄峰很可能与南秦岭花岗岩类相匹配^[31]。440Ma 年龄的形成与加里东造山运动较为一致^[32],北秦岭一带、扬子北缘及东南部同样含有大量的 500-400Ma 基岩^[33-35]。而 780Ma,960Ma 年龄段峰值与 Rodinia 超大陆的裂解导致的扬子板块沿边缘发生的巨量岩浆事件时间对应^[36-39]。1820Ma 年龄段峰值则可能与扬子西南缘 1.8-1.6Ga 年龄范围的河口群^[40]、东川群^[41]等形成事件有关。2480Ma 年龄相关太古代岩体理论上在古老陆块内均有分布^[36]。

根据年龄谱对比图,样品的 220Ma 年龄峰则可

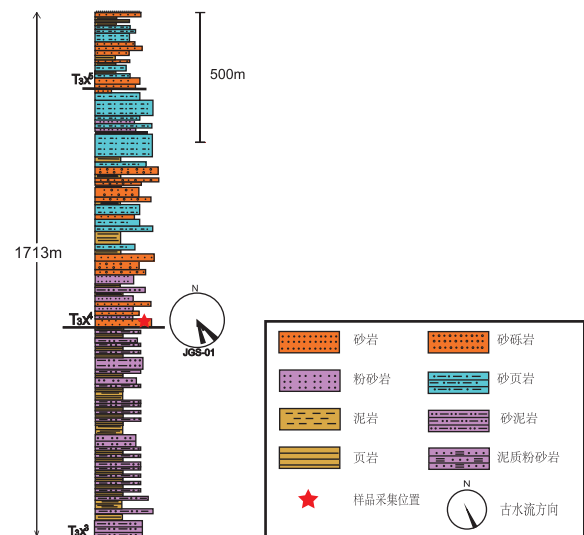


图7 须家河组地层柱状图及采样位置

Fig. 7 Strata histogram of Xujiahe Formation and sampling location

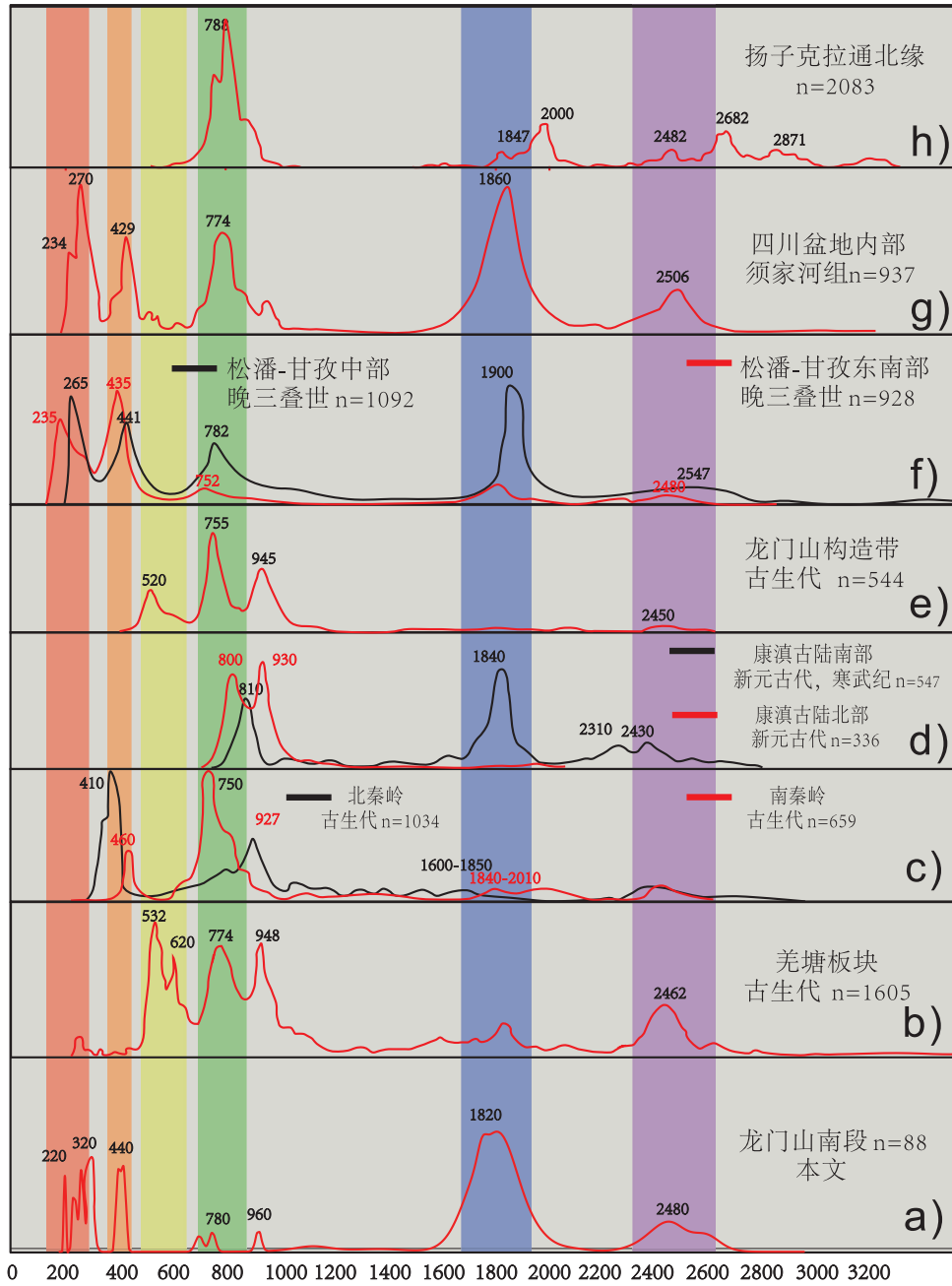


图8 四川及邻区构造单元沉积地层碎屑锆石年龄谱对比图

(a) JGS-01 样品锆石年龄谱分布曲线; (b) 羌塘板块锆石年龄分布曲线^[48]; (c) 秦岭锆石年龄分布曲线图^[46]; (d) 康滇古陆锆石年龄分布曲线; (e) 龙门山构造带锆石年龄分布曲线^[49]; (f) 松潘-甘孜东南部锆石年龄分布曲线^[44]; (g) 四川盆地内部须家河组锆石年龄分布曲线^[43]; (h) 扬子克拉通北缘锆石年龄分布曲线^[47]

Fig. 8 Age spectrum of detrital zircon in the sedimentary stratum of tectonic units in Sichuan and its adjacent area

能为四川北部的秦岭造山带来源^[42,43]。研究区样品的年龄图谱特征与松潘-甘孜晚三叠世的年龄谱分布曲线十分匹配,故研究区与松潘-甘孜地体具有亲缘性。通过碎屑锆石定年分析提出松潘甘孜地区晚三叠世物源来自秦岭-大别造山带^[44,45],故研究区物源可能来自北部的秦岭造山带以及松

潘-甘孜褶皱带内中-晚三叠世的再旋回物质。这一结果与野外观测古水流恢复的方向基本一致(图7)。

4.2 龙门山南段构造活动强度

结合高沉积速率生长断层转折褶皱模型、去断距处理后的地层形态对地震反射剖面特征进行了

构造几何分析。假设深部地层穿时位置处发育一隐伏转折断层,断坡位置和宽度与发生穿时的地层的位置和宽度一致,上、下断坪形态与地层形态基本一致。断层形态与褶皱轴面、褶皱前翼、后翼以及生长地层发育过程中在背斜两翼形成的向上变窄的生长三角形的几何特征相匹配,褶皱形态与高沉积速率生长断层转折褶皱的形态相似。同时,由生长三角形的形态可以看出生长地层规模较小,发育于 T_3x^4 中上部,形成时间为印支晚期。结合物源分析的方法,在印支活动晚期,松潘-甘孜地块发生隆升剥蚀,构造应力传播至龙门山山前,受到北西方的作用力影响,该地区断层发生活动,上盘地层沿断面运动,发生褶皱,位移量约为 1.7km,位移量相比靠近松潘-甘孜地块的龙门山北段偏小,上述研究表明,龙门山南段在 T_3x^4 沉积时期构造活动仍然较为微弱。

结合物源可能来自北部的秦岭造山带、松潘-甘孜褶皱带内中-晚三叠世的再旋回物质,得出在印支活动晚期,龙门山北段已经挤压隆升,构造活动整体由北向南传递,结合本次研究中关于构造活动性的研究,南段的构造缩短量较弱,且龙门山古生代地层的再旋回以及彭灌杂岩的年龄在本次研究样品中尚未显示(图8),因此本文认为龙门山南段未隆升到一定高度,尚未成为剥蚀区而是继续接受沉积。

5 结论

1. 对地震剖面进行解释和正演化模拟,得出龙门山南段隐伏构造在 T_3x^4 时期已经形成。结合锆石 U-Pb 年代学和沉积学方法,得出在印支活动晚期,位于龙门山构造带西北方向的松潘-甘孜造山带很可能开始已经发生了隆升剥蚀。板块碰撞形成的构造应力自北向南传播到龙门山前,导致龙门山构造带发生构造活动,龙门山南段形成一系列的逆冲推覆褶皱带。

2. 对恢复后的地震反射剖面进行几何特征分析,发现剖面的构造特征与高沉积速率的生长断层转折褶皱模型相匹配。正演模式图也展示出整个褶皱自印支运动期间,整个褶皱的位移量为 1.7km 左右。由生长地层的生长三角形形态和整个褶皱在晚印支活动时期的位移量结合物源物源分析的方法,得出在印支活动晚期,龙门山北段已经挤压隆升,构造活动整体由北向南传递,而龙门山南段

活动较弱,且龙门山古生代地层的再旋回以及彭灌杂岩的年龄在本次研究样品中尚未显示(图8),因此认为龙门山南段未隆升到一定高度,尚未成为剥蚀区而是继续接受来自北部隆升的秦岭造山带以及松潘-甘孜褶皱带内中-晚三叠世的再旋回物质的沉积。

参考文献:

- [1] 王振南,鲁人齐,徐锡伟,何登发,蔡明刚,李英强,罗佳宏. 龙门山中段山前彭县隐伏活动断裂三维构造特征[J]. 地震地质, 2019, 41(04): 944-959.
- [2] 贾霍甫,曹波,欧奎. 川西绵竹地区构造特征及对油气成藏控制作用[J]. 地质学刊, 2019, 43(01): 18-24.
- [3] 梁瀚,肖富森,冉崎,关旭,韩嵩,陈骁,狄贵东,谢枕,刘冉. 四川盆地龙门山前复杂构造带北段精细构造建模及对油气勘探的启示[J]. 天然气工业, 2018, 38(11): 26-32.
- [4] 杨跃明,陈聪,文龙,陈骁,梁瀚,刘冉,关旭,罗冰,谢枕. 四川盆地龙门山北段隐伏构造带特征及其油气勘探意义[J]. 天然气工业, 2018, 38(08): 8-15.
- [5] 范增辉,刘树根,范存辉,胡林辉,李文佳,米鸿,韩翀,韩小俊. 龙门山褶皱冲断带典型地震剖面平衡剖面恢复及构造演化分析[J]. 地质论评, 2018, 64(02): 347-360.
- [6] Burchfiel, B. C., Chen, Z., Liu, Y., et al. Tectonics of the Longmen Shan and adjacent regions [J]. International Geology Review, 1995, 37, 661-735.
- [7] 罗啸泉,郭卫星,吕志洲. 龙门山构造变形与油气关系探讨[J]. 沉积与特提斯地质, 2016, 36(04): 71-76.
- [8] Rolf, M., Walter, M. Weakness of the lower continental crust: a condition for delamination, uplift, and escape [J]. Tectonophysics, 1998, 296(1-2), 47-60.
- [9] 汪泽成,赵文智,张林等. 四川盆地构造层序与天然气勘探[M]. 地质出版社(北京). 2002, 1-287.
- [10] Mathew, J., Harrowfield, Christopher, J. L., Wilson. Indosinian deformation of the Songpan Garze Fold Belt, northeast Tibetan Plateau [J]. Journal of Structural Geology, 2005, 27, 101-117.
- [11] Jia, D., Wei, G. Q., Chen, Z. X., et al. Longmen Shan fold-thrust belt and its relation to the western Sichuan Basin in Central China: New insights from hydrocarbon exploration [J]. AAPG, 2006, 90(9), 1425-1447.
- [12] WANG, E., MENG, Q. R. Mesozoic and Cenozoic tectonic evolution of the Longmenshan fault belt [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2009, 52(5), 579-592.
- [13] 邓飞,贾东,罗良等. 晚三叠世松潘甘孜和川西前陆盆地的物源对比: 构造演化和古地理变迁的线索[J]. 地质论评. 2008. 54(4): 145-157
- [14] 戴建全. 龙门山冲断带构造变形期次及动力学成因[J]. 西南石油大学学报. 2011, 33(2): 61-67
- [15] 刘树文,杨恺,李秋根,王宗起,闫全人. 新元古代宝兴杂岩的岩石成因及其对扬子西缘构造环境的制约[J]. 地学前缘,

- 2009, 16(02): 107–118.
- [16] 刘春平, 林娟华. 龙门山造山带彭灌杂岩体形成模式研究[J]. 内蒙古石油化工, 2008, 34(19): 1–4.
- [17] 黄丽飞, 楼章华, 陈明玉, 朱蓉, 王君. 川西坳陷新场构造带须家河组超压演化与流体的关系[J]. 地质通报, 2018, 37(05): 954–964.
- [18] 刘崇瑞, 颜丹平, 李书兵. 川西坳陷大邑构造须三段储层裂缝类型及控制因素[J]. 断块油气田, 2014, 21(01): 28–31.
- [19] 张宇坤. 物源分析方法[J]. 地下水, 2013, 35(5): 174–187.
- [20] U-Pb 同位素定年技术及其地质应用潜力[J]. 周红英, 李惠民. 地质调查与研究, 2011(01).
- [21] Zhu, M., Chen, H. L., Zhou, J., et al. Provenance change from the Middle to Late Triassic of the southwestern Sichuan basin, Southwest China: Constraints from the sedimentary record and its tectonic significance[J]. Tectonophysics, 2017, 700, 92–107.
- [22] Hu, Z. C., Zhang, W., Liu, Y. S., Gao, S., Li, M., Zong, K. Q., Chen, H. H., Hu, S. H., 2015. “Wave” signal smoothing and mercury removing device for laser ablation quadrupole and multiple collector ICP-MS analysis: application to lead isotope analysis. Analytical Chemistry, 87, 1152–1157.
- [23] Liu, Y. S., Gao, S., Hu, Z. C., Gao, C. G., Zong, K. Q., Wang, D. B., 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons of mantle xenoliths. Journal of Petrology 51, 537–571.
- [24] Liu, Y. S., Hu, Z. C., Gao, S., Gu-nther, D., Xu, J., Gao, C. G., Chen, H. H., 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. Chemical Geology 257, 34–43.
- [25] Ludwig, K. R., 2003. ISOPLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, California, Berkeley, 39 pp.
- [26] 何登发, John SUPPE, 贾承造. 断层相关褶皱理论与应用研究新进展[J]. 地学前缘, 2005(04): 353–364.
- [27] 王丽宁, 陈竹新, 李本亮, 雷永良, 闫淑玉. 龙门山冲断带北段构造解析及有利区带预测[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(05): 539–545.
- [28] Hou, Z. Q., Qu, X. M., Yang, Y. Q., 2001. Collision orogeny in the Yidun arc: evidence from granites in the Sanjiang region, China. Acta Geol. Sin. 75, 484–497.
- [29] Reid, A., Wilson, C. J. L., Shun, L., Pearson, N., Belousova, E., 2007. Mesozoic plutons of the Yidun arc, SW China: U-Pb geochronology and Hf isotopic signature. Ore Geol. Rev. 34, 88–106.
- [30] Dong, Y. P., Zhang, G. W., Neubauer, F., Liu, X. M., Genser, J., Hauenberger, C., 2011. Tectonic evolution of the Qinling orogen, China: review and synthesis. J. Asian Earth Sci. 41, 213–237.
- [31] Amy L. Weislogel; Stephan A. Graham; Edmund Z. Chang; Joseph L. Wooden; George E. Gehrels; Hengshu Yang. Detrital zircon provenance of the Late Triassic Songpan-Ganzi complex: Sedimentary record of collision of the North and South China blocks; Comment and Reply: REPLY[J]. Geology, 2006, Vol. 34(1): e107–e108.
- [32] McKerrow W S, Mac Niocail C and Dewey J F. (2000) The Caledonian orogeny redefined: Journal of the Geological Society, 157: 1149–1154.
- [33] Kröner A, Zhang G W and Sun Y. (1993) Granulites in the Tongbai area, Qinling Belt, China: Geochemistry, petrology, single zircon geochronology, and implications for the tectonic evolution of eastern Asia: Tectonics, 12: 245–255.
- [34] 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 2001.
- [35] 张宗清, 宋彪, 唐索寒, 等, 2004. 秦岭佛坪变质结晶岩系年龄和物质组成特征-SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学和全岩 Sm-Nd 年代学数据. 中国地质, 31: 161–168.
- [36] Li Z X, Li X H, Kinny P. D, et al., 2003. Geochronology of NeoProterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia. Precambrian Research, 122: 85–109.
- [37] Greentree, M R, Li Z X, Li X H., et al., 2006. Late Mesoproterozoic to earliest NeoProterozoic basin record of the Sibao orogenesis in western South China and relationship to the assembly of Rodinia-Precambrian Research, 151: 79–100.
- [38] Ye M I, Li X H, Li W X, et al., 2007. SHRIMP zircon U-Pb geochronological and whole-rock geochemical evidence for an early NeoProterozoic Sibaoan magmatic arc along the southeastern margin of the Yangtze Block. Gondwana Research.
- [39] 李明龙, 田景春, 方喜林, 郑德顺, 许克元, 陈林, 曹文胜, 赵军, 冉中夏. 鄂西走马地区大塘坡组顶部泥岩碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 沉积与特提斯地质, 2019, 39(01): 22–31.
- [40] 王冬兵, 孙志明, 尹福光, 王立全, 王保弟, 张万平, 2012. 扬子地块西缘河口群的时代: 来自火山岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄的证据. 地层学杂志, 36: 630–635.
- [41] Zhao X F, Zhou M F, Li J W, Sun M, Gao J F, Sun W H and Yang J H. 2010. Late Paleoproterozoic to Early Mesoproterozoic Dongchuan Group in Yunnan, SW China: Implications for tectonic evolution of the Yangtze Block. Precambrian Research, 182: 57–69.
- [42] 陈扬, 刘树根, 李智武, 等, 2011. 川西前陆盆地晚三叠世早期物源与龙门山的有限隆升: 碎屑锆石 U-Pb 年代学研究. 大地构造与成矿学, 35: 315–323.
- [43] Luo L, Qi J F, Zhang M Z, Wang K, Han Y Z. (2013) Detrital zircon U-Pb ages of Late-Jurassic deposits in the western and northern Sichuan Basin margin: constraints on the foreland basin provenance and tectonic implications. International journal of Earth Sciences, 103: 553–1568.
- [44] Weislogel A L, Graham S A, Chang E Z, 2010. Detrital zircon provenance from three turbidite depocenters of the Middle-Upper

- Triassic Songpan-Ganzi complex, central China; Record of collisional tectonics, erosional exhumation, and sediment production. *Geological Society of America Bulletin*. 122: 2041–2062.
- [45] Ding L, Yang D, Cai F L, Pullen A, Kapp P, Gehrels G E, Zhang L Y, Zhang Q H, Lai Q Z, Yue Y H, Shi R D. (2013) Provenance analysis of the Mesozoic Hoh-Xil-Songpan-Ganzi turbidites in northern Tibet; Implications for the tectonic evolution of the eastern Paleo-Tethys Ocean. *Tectonics*, 32: 34–48.
- [46] Zhu, X. Y., Chen, F. K., Li, S. Q., Yang, Y. Z., Nie, H., Siebel, W., Zhai, M. G., 2011. Crustal evolution of the North Qinling terrain of the Qinling Orogen, China; evidence from detrital zircon U-Pb ages and Hf isotopic composition. *Gondwana Res.* 20, 194–204.
- [47] Shi, Y., Yu, H. J., Santosh, M., 2013. Tectonic evolution of the Qinling orogenic belt, Central China; new evidence from geochemical, zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes. *Precambrian Res.* 231, 19–60.
- [48] Gehrels, G., Kapp, P., DeCelles, P., 2011. Detrital zircon geochronology of pre-Tertiary strata in the Tibetan-Himalayan orogen. *Tectonics* 30, 1–27.
- [49] Chen, Q., Sun, M., Long, X., Zhao, G., Yuan, C., 2015. U-Pb ages and Hf isotopic record of zircons from the late Neoproterozoic and Silurian-Devonian sedimentary rocks of the western Yangtze Block; implication.

A study on the late Indosinian tectonic activity of the south part of Longmenshan: constraints from structural analyses and detrital zircon chronology

Zhangyujie¹, Menglifeng^{*1}, Chenwei¹, Yuyangli¹, Yingjiamei¹

1. *Southwest Petroleum University School of Geoscience and Technology, Sichuan Chengdu, 610500*

Abstract: The Indosinian tectonic event played an important role in the formation and evolution of the Longmenshan thrust belt. In order to depict the structural characteristic of the southern section of the Longmenshan thrust belt during the late Indosinian epoch, integration of structural analysis and forward modeling of seismic section and detrital zircon U-Pb chronology analyses from the piedmont belt are used in this study. The results show that, the provenance of the syntectonic sediments from the southern section of the Longmenshan thrust belt was affinity to the Songpan-Ganzi block, thus most likely from the Qinling Orogenic Belt and the recycling of the folded Middle to Lower Triassic strata of Songpan-Ganzi block. The balanced restoration of the seismic section reveals a 1.7 km shortening at the southern section of the Longmenshan thrust belt, which is weaker than that of middle and north part of Longmenshan thrust belt. Combined with the regional geological data, the tectonic activity of Longmenshan thrust belt during Indosinian was migrated from north to south, thus the piedmont zone of southern section of the Longmenshan thrust belt can receive material from the recycled Middle to Lower Triassic of Songpan-Ganzi block.

Key words: southern section of the Longmenshan thrust belt; seismic section; forward modeling; U-Pb chronology analyses of detrital zircons