

盆-山转换带构造变形特征及成因机制

——以四川盆地东南部桑木场背斜为例

杨金赫

[中国地质大学(北京)能源学院,北京 100083]

摘要:为了剖析湘鄂西“隔槽式”褶皱带前缘与川东南“隔挡式”褶皱带的叠置关系,探讨四川盆地东南缘盆山转换带构造变形特征及成因机制,基于现有的地震、测井、DEM数字高程及相关地质资料,以断层相关褶皱理论为指导,对切过桑木场背斜的多条二维地震剖面进行了精细的解释,分析了其地质结构特征;利用平衡剖面技术建立了其运动学模型,分析了其构造演化特征。研究认为,桑木场背斜存在分层滑脱变形的变形机制,在垂向上具有相互叠置的结构特征,盖层的变形较为一致,以沿滑脱面的顺层剪切变形为主,背斜的整体构造格局受到盆地基底形态与齐岳山断裂的共同影响。齐岳山断裂是由数条倾向南东的基底逆冲断层组合而成的隐伏断裂系统,在其控制下形成的深部基底构造楔及叠瓦构造相互叠置,共同控制了背斜的变形。进一步分析表明,背斜的变形始于燕山期中期,其构造演化经历了多期构造运动的叠加作用。在雪峰山西推应力的作用下,湘鄂西“隔槽式”褶皱带由东向西的递进构造变形控制了深部构造楔及叠瓦构造的活动,进而控制了背斜的主体构造形态。位于盆地内部的川东南“隔挡式”褶皱带对背盆山转换带构造变形特征的影响主要体现在背斜前翼,造成了背斜前翼宽缓,后翼陡窄的构造差异。

关键词:分层滑脱变形;地质结构;构造演化;齐岳山断裂;盆-山转换带;四川盆地

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

Characteristics and genetic mechanism of tectonic deformation in
basin-mountain transitional zone: A case study of Sangmuchang
Anticline in southeastern Sichuan Basin

Yang Jinhe

[School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China]

Abstract: The Sangmuchang Anticline, sitting at a crucial location where the front of “trough-like” fold belt in western Hubei and Hunan Provinces superimposing the “barrier-style” fold belt in southeastern Sichuan Basin, was chosen to be studied to gain insight into the superimposition relationship between the belts as well as the tectonic deformation characteristics and genetic mechanisms of this mountain-basin transitional zone from Xuefeng Mountains to the Sichuan Basin. Available seismic and logging data together with DEM digital elevation and other related geological information were combined with fault-related fold theories to perform a fine interpretation of multiple 2D seismic sections crossing the anticline for architectural characterization and to establish a kinematics model with the balanced section restoration technique for tectonic evolution analysis. The study has concluded that the deformation of the anticline involves layered decollement with a mutual structural superposition in vertical direction, and that with some consistently deformed cap-rocks and bedding shear deformation dominating along the decollement surface, the overall structure of the anticline is under the joint influence of basement occurrence and Qiyueshan Fault. The fault is a concealed system formed by the combination of several basement thrusting faults striking near south-east, and the deep basement wedge and imbricated structures are thereby in superimposition, jointly controlling the anticline deformation. Further analysis shows that the anticline deformation initiated since the middle of Yanshan period, and its tectonic evolution has experienced the superposition of multiple tectonic movements. Under the westward thrusting of Xuefeng Mountains, the east-to-west progressive tectonic deformation of the west of Hunan and Hubei “trough-like” fold belt controls the activity of the deep

收稿日期:2020-03-11;修订日期:2021-02-15。

第一作者简介:杨金赫(1997—),男,硕士研究生,含油气盆地构造解析。E-mail:yjhgzyx163@163.com。

基金项目:国家油气重大专项(2017ZX05036-003-005)。

tectonic wedges and the imbricated structures, which in turn control the main tectonic form of the anticline. The influence of the “partition-style” fold belt in the interior of the southeastern Sichuan Basin on the tectonic deformation of the dorsal basin-mountain transitional zone is mainly reflected in the anterior flank of the dorsal slope, resulting in the broad gentle fore wing and the steep narrow back wing of the anticline.

Key words: layered decollement deformation, geological architecture, structural evolution, Qiyueshan Fault, basin-mountain transitional zone, Sichuan Basin

近年来,雪峰山造山带及其西侧盆-山过渡带的构造样式与变形机制一直是研究的热点。桑木场背斜位于湘鄂西“隔槽式”褶皱带前缘,其西侧为川东南“隔挡式”褶皱带,是两个构造带过渡转换、复合叠加的位置^[1-2],它的构造变形特征记录了两个变形带之间的组合关系,同时这里也是四川盆地东南缘的盆-山转换带。对桑木场背斜开展相关研究,不仅对两个构造带的构造差异及其在空间上的组合关系具有指示意义,还是探究“隔槽式”褶皱带与四川盆地东南缘盆-山转换带的地质结构及成因机制的重要条件。此外,由于齐岳山断裂的走向在此发生改变,研究对分析齐岳山断裂的分段特征同样具有重要的指示意义。

前人对桑木场背斜所在川东南盆-山转换带的研究大多集中在地层的节理特征、裂缝发育模式与期次、以及脉体特征等方面^[3-7],并没有对转换带上构造单元的地质结构开展系统的分析,对转换带两侧不同构造带构造差异与过渡关系的研究也略为匮乏。关于背斜所处“隔槽式”褶皱带及相邻“隔挡式”褶皱带之间的过渡关系,虽然前人建立了诸多的地质模型,并提出了与之相对应的成因机制^[2,7-15],但是他们的研究成果大多来自于对于野外地质资料的分析及各种模拟实验,缺乏深部地震资料的约束。对于齐岳山断裂的研究,有些学者认为它是一条出露地表或切穿盖层的逆冲断裂^[16-18],这与在桑木场背斜地表没有明显断距的逆断层的现象存在冲突。

针对以上问题,本文以桑木场背斜为例,结合地震、钻井与浅表地质资料,以断层相关褶皱理论为指导,对研究区内横穿背斜的二维地震剖面进行了精确的解释,建立了深反射约束下的构造模型,进而分析了川东南盆-山转换带的地质结构特征;并利用平衡剖面技术,结合前人的研究成果,研究了其构造演化过程,分析了其成因机制。

1 区域地质背景

1.1 大地构造背景

桑木场背斜位于贵州省遵义市习水县东南侧大约

12 km 的鲁城-桑木场一带,西侧为大自塘向斜,东侧为官店向斜及二郎坝向斜,北接酒店垭背斜(图1)。其构造位置处于四川盆地东南缘,同时也是湘鄂西隔槽式褶皱与川东隔挡式褶皱带的过渡部位,以东为湘鄂西隔槽式褶皱区,以西为川东隔挡式褶皱区^[19-21],南西侧为北东向的齐岳山断裂^[1,21]。关于桑木场背斜的形成过程,前人的研究认为在燕山运动中晚期以前,研究区的构造变形主要以垂向运动为主,其现今构造样式的形成主要受控于燕山运动中晚期之后的构造活动^[22-25]。

1.2 地层特征

四川盆地是海相与陆相叠合的典型盆地,研究区的基底主要由前震旦系的绢云母石英板岩及石英片岩组成(图2)。沉积盖层中,震旦纪至中三叠世发育了一套以灰岩、白云岩为主的海相沉积地层,沉积厚度为3 400~5 800 m;晚三叠世至白垩纪发育一套主要由砂泥岩组成的陆相沉积地层,沉积厚度为3 200~4 200 m,沉积地层的总厚度为7 000~10 000 m。研究区内的盖层中存在两套重要的滑脱层,分别为中-下三叠统及中-下寒武统的膏岩层,背斜盖层的变形主要为这两套滑脱层控制的顺层剪切变形。这两套膏岩层及基底中的部分片岩、板岩层一同构成了研究区的滑脱层系统。桑木场背斜及其邻区整体缺失泥盆系及石炭系,白垩系主要沉积于背斜西侧。

2 地质结构

桑木场背斜的轴向为40°N~50°E,与齐岳山断裂带在此处的走向基本一致。背斜轴长约63 km,宽度约36 km,其北东端在青龙阁附近倾没,倾角为20°;南西端被北东走向的向家场断裂切断于回龙场地区,与酒店垭背斜呈左行雁行侧列。其核部出露最老地层为震旦系上统灯影组的白云岩,并由其构成背斜的高点,北西翼从核部向翼部依次出露寒武系至白垩系,南东翼出露寒武系-三叠系,轴部地层的倾角为2°~7°,两翼倾角约为15°~35°。背斜核部出露面积由南西北

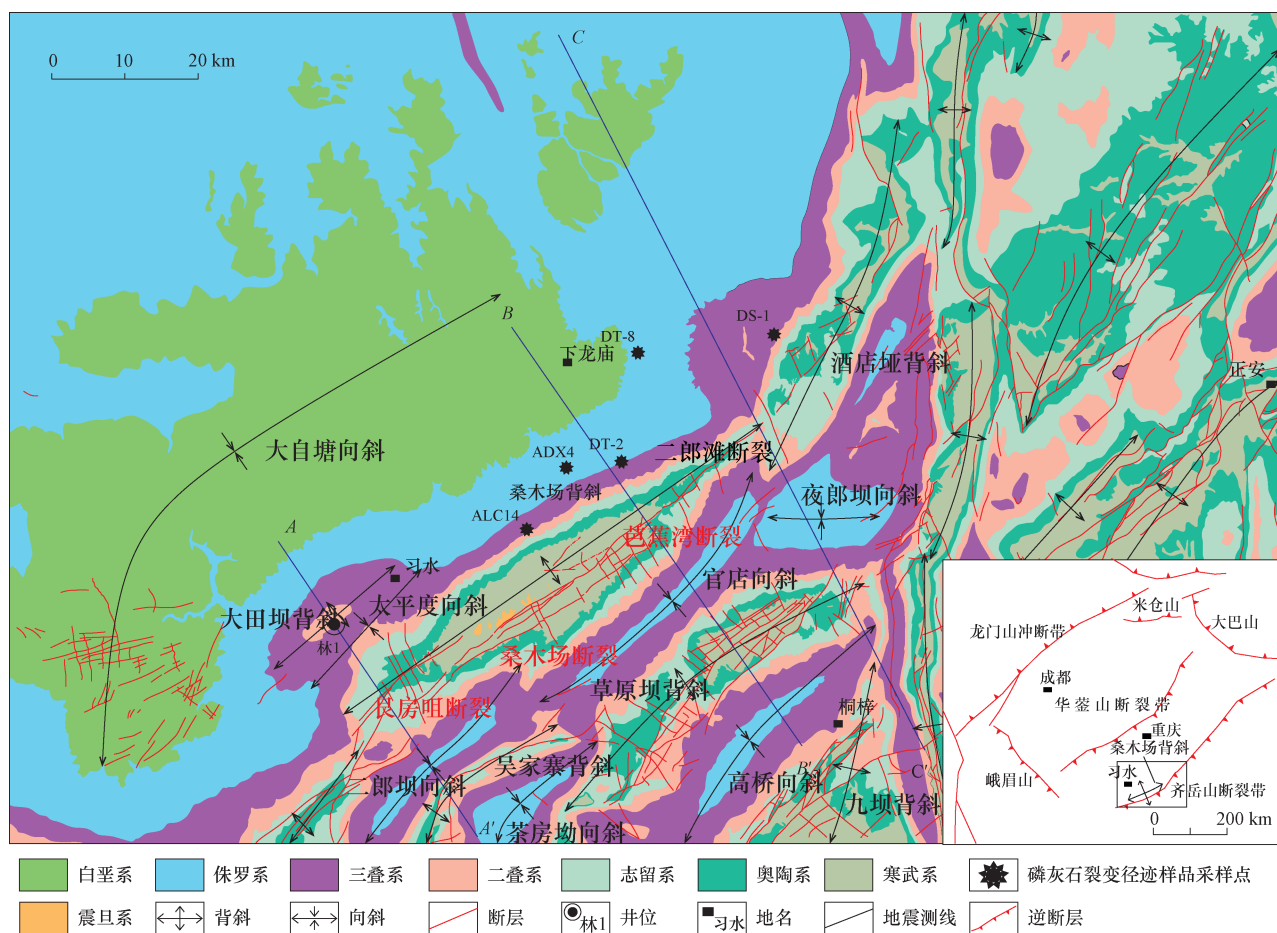


图1 四川盆地东南部桑木场背斜及邻区构造纲要图

Fig. 1 Structural outline of the Sangmuchi Anticline and adjacent areas in southeastern Sichuan Basin

东逐渐减小,整体表现为南西侧较宽、北东侧较窄且大体对称,地表形迹呈锥形。

2.1 桑木场背斜浅表断裂特征

桑木场背斜发育大量出露地表的浅层断裂,包括一系列平行于背斜走向的北东向高角度断裂及少量垂直于背斜走向的南东向断裂,其中南东向断裂是在背斜变形过程中产生的调节断层。北东向断裂主要有桑木场断裂、良房咀断裂、芭蕉湾断裂及二郎滩断裂等(图1),这些断裂的长度在10~65 km,基本覆盖背斜核部,且均未切穿盖层。

桑木场断裂在背斜中部下盘出露震旦系灯影组,上盘出露下寒武统清虚洞组;在背斜北东部下盘出露下寒武统清虚洞组,上盘出露中上寒武统娄山关群;良房咀断裂及桑木场断裂具有走滑特征。北东向断裂的野外露头的擦痕指示这些断层为正断层。综合断层两侧地层的接触关系以及擦痕所指示的断层两侧地层的运动方向来看,背斜区域北东向的浅部断裂为具有走滑性质的正断层(图3)。

2.2 纵向地质结构特征

基于林1井合成地震记录的层位标定以及区域内的地震层位追踪对比,选用了品质较好、研究区覆盖全面、构造特征较为清晰且垂直于背斜轴向的3条代表性剖面AA'、BB'、CC'(位置见图1),结合地表地质资料,运用断层相关褶皱理论,对所选地震剖面进行了精细的构造解释,明确了桑木场背斜的几何学特征。桑木场背斜存在分层滑脱变形的变形机制,具有相互叠置的结构特征,盖层的变形为顺层剪切变形,并没有大型的逆冲断层,但在背斜核部浅表存在一些断距很小的正断层;背斜基底的变形主要由深部基底构造楔与其上方的叠瓦构造相互叠置而成,齐岳山断裂在背斜区域表现为多条基底逆冲断层组成的隐伏断裂系统。

剖面AA'位于桑木场背斜的南西部,剖面中背斜南东翼地层的倾角为 $13^{\circ} \sim 37^{\circ}$,由核部向翼部地层逐渐变陡;北西翼地层的倾角为 $10^{\circ} \sim 37^{\circ}$,在翼部的大田坝次级背斜北西侧,地层的倾角逐渐变缓,直至大自塘

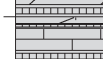
地层				地层 符号	厚度/m	年龄 /Ma	岩性剖面	岩性描述	构造 地层 层序	构造 运动	
界	系	统	组								
中生界	白垩系	上统	夹关组	K _{2j}	505~922	145.0		棕红色泥岩、灰色粉砂岩	白垩系构造层	燕山运动	
	侏罗系	上统	蓬莱镇组	J ₃	697~1 195			灰色细砂岩、棕红色泥岩、灰色粉砂岩	上三叠统-上侏罗统构造层		
		中统	遂宁组	J _{2sn}	375~578		灰色细砂岩、棕红色泥岩、灰色粉砂岩				
			上沙溪庙组	J _{2s}	871~1 239		灰色细砂岩、棕红色泥岩				
			下沙溪庙组	J _{2x}	261~371						
		下统	自流井组	J ₁	290~476		灰色细砂岩、紫红色泥岩				
	三叠系	上统	须家河组	T _{3x}	209~373	201.3		灰色细砂岩、深灰色泥岩	上二叠统-中三叠统构造层	印支运动晚期	
		中统	雷口坡组	T _{2l}	152~330	237		灰色白云岩、灰白色石膏岩			印支运动早期
		下统	嘉陵江组	T _{1j}	414~591	247.2		灰色含灰白云岩、灰色灰岩、灰白色石膏岩			
			飞仙关组	T _{1f}	310~504		紫红色泥岩、灰色灰岩、灰色泥岩、灰色泥质灰岩				
				252.2		煤层、灰色生屑灰岩、灰色灰岩	下二叠统构造层	东吴运动			
古生界	二叠系	中统	茅口组	P _{2m}	398~710	298.9		灰色泥岩	寒武系-中、下志留统构造层	加里东运动	
	志留系	下统	韩家店组	S _{1h}	130~395	443.8		生物碎屑灰岩、灰色泥岩			
		奥陶系	下统	十字铺组	O ₁		262~485			灰色泥岩、生物碎屑灰岩、深灰色白云岩	都匀运动
	寒武系	上统	洗象池组	Є _{3x}	570~604	485.4		灰色泥岩、生物碎屑灰岩、深灰色白云岩	桐湾运动		
		中统	陡坡寺组	Є _{2d}	130~339	509		深灰色白云岩、灰白色石膏岩			
			下统	青虚洞组	Є ₁	570~934	521			灰白色石膏岩、深灰色砂屑白云岩、灰色泥岩、灰色中砂岩	
		筇竹寺组		541				灰色藻云岩、灰色白云岩		震旦系构造层	
	元古界	震旦系	上统	灯影组	Z _{2dn}	>210	850		灰色绢云母石英板岩、灰黑色黑云母石英片岩	前震旦系构造层	晋宁运动

图 2 四川盆地东南部桑木场背斜区域综合柱状图

Fig. 2 Composite column of the Sangmuchang anticline area, southeastern Sichuan Basin

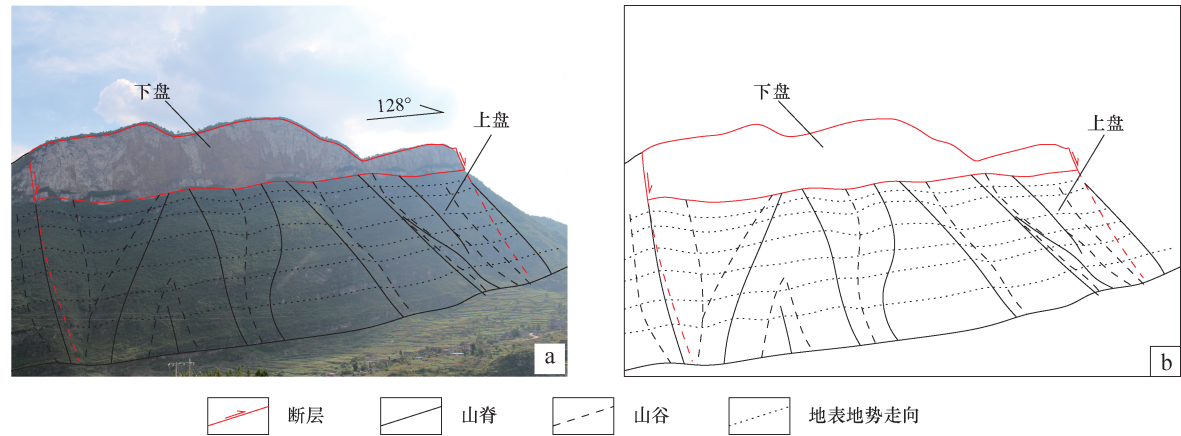


图 3 四川盆地东南部桑木场断裂地表特征(28°08′27.93″N,106°15′11.59″E)

Fig. 3 Surface features of the Sangmuchang Fault in southeastern Sichuan Basin(28°08′27.93″N,106°15′11.59″E)

a. 桑木场断裂浅表特征解释; b. 桑木场断裂浅表地质模型

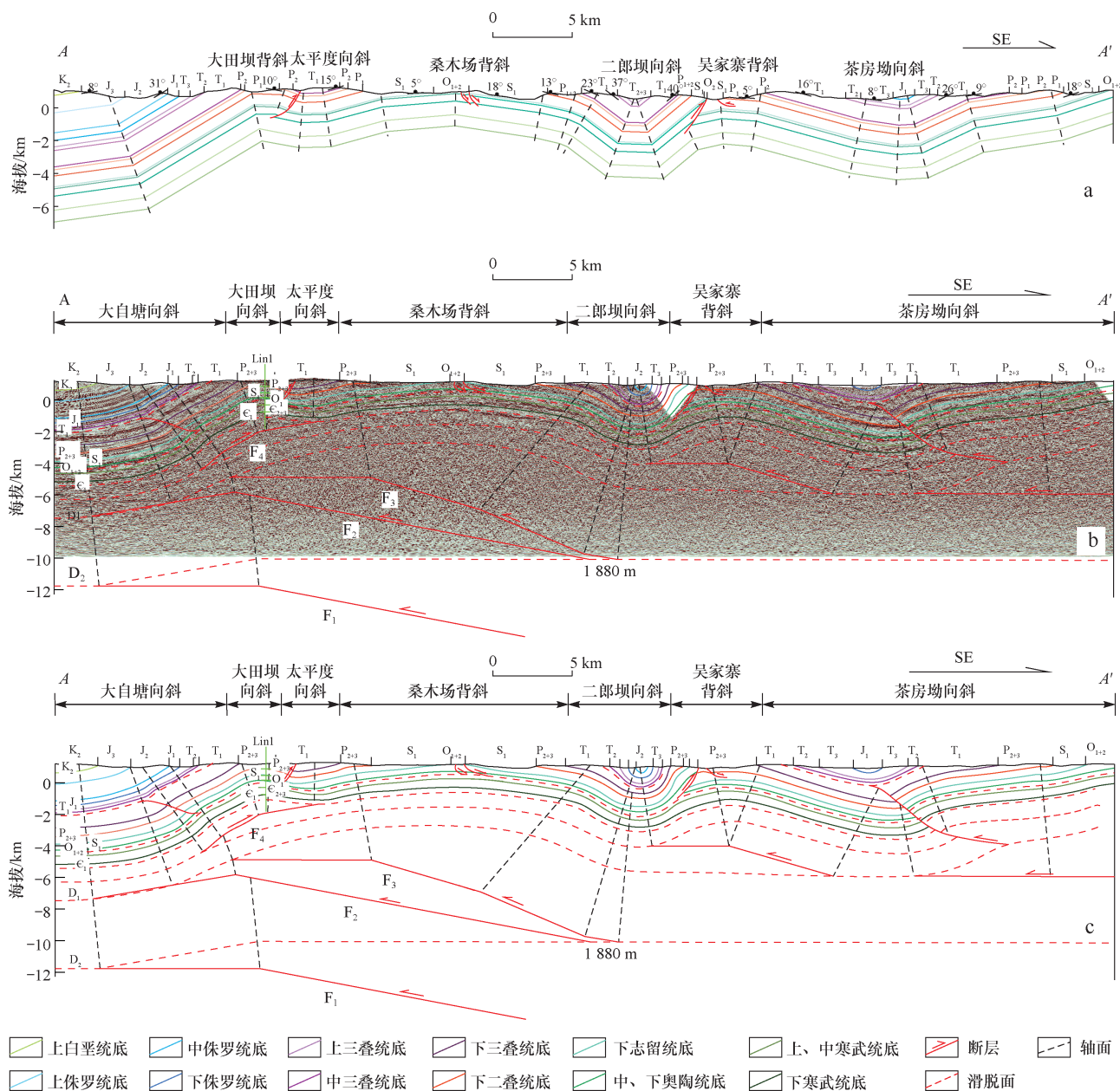


图4 川东南桑木场背斜南西部NW-SE向剖面AA'的浅表地质剖面及解地震解释结果

Fig. 4 Section AA' (striking NW-SE) and interpretations showing the surface and shallow subsurface in southwestern Sangmuchi Anticline, southeastern Sichuan Basin

a. 浅表地质剖面; b. 构造解释方案; c. 构造模型

向斜西侧过渡为盆内向斜宽缓、背斜高陡的川东隔挡式褶皱带。总的来看,背斜南西部地层在核部相对宽缓,翼部相对陡峭,为一箱式背斜。桑木场背斜在此剖面处,深部滑脱层D₁所在位置宽度为28.5 km,背斜的隆升高度为4.8 km。

剖面的解释结果显示,桑木场背斜在此处表现出分层滑脱变形的特征,其隆升的机制位于基底(图4b)。背斜盖层中并没有发育大型逆冲断层,仅发育一些出露地表的小型正向断裂。这些断裂断距不明显,且均未切穿寒武系,对背斜的形态没有产生明显的

影响。背斜基底的变形为多条逆冲断层与之产生的多重叠瓦构造,呈现相互叠置的复合变形特征,其垂向上的叠置关系受到多套基底滑脱层及多条基底断裂的共同影响。滑脱层D₁与D₂之间的基底被倾向南东的断层F₂、F₃分割为多个逆冲断片,以堆垛式叠置,呈前展式破裂结构,滑脱层D₂下方的基底在断层F₁控制下以构造楔的模式向北西楔入,深部叠瓦构造及基底构造楔的相互叠置决定了桑木场背斜在剖面位置的主要构造形态。

此外,背斜的北西翼还发育有大田坝次级背斜构

造,它是浅层基底在倾向北西的反冲断层 F_4 控制下形成的断坪-断坡式断层转折褶皱,其上、下断坪分别位于基底的两套滑脱层中。断层 F_4 为浅部对深部构造变形的响应,它直接控制了大田坝背斜的几何形态,同时改变了桑木场背斜前翼的构造形态。

剖面 BB' 位于桑木场背斜的中部, 背斜沉积盖层在此处的展布特征与南西部略有差异, 这种差异主要体现在核部地层的宽度与两翼地层倾角的变化上, 与南东部核部宽缓、两翼陡窄的地层展布特点不同, 背斜

中部地层的核部较窄,两翼的倾角也略大于南东部(图5);此外,虽然背斜前翼与后翼的倾角相差不大,但前翼的长度却远大于后翼,背斜南东侧一系列向斜核部的地层与北西侧大自塘向斜核部地层相比也被大幅抬高,这种现象是齐岳山断裂带两侧不同构造带构造样式与变形机制差异在浅部地层中的表现。剖面 BB' 所在位置,桑木场背斜在滑脱层 D_1 所处深度的宽度为36.5 km,隆升高度为9.2 km。背斜两翼地层与核部地层过渡自然,呈圆弧状,为典型的圆弧褶皱。

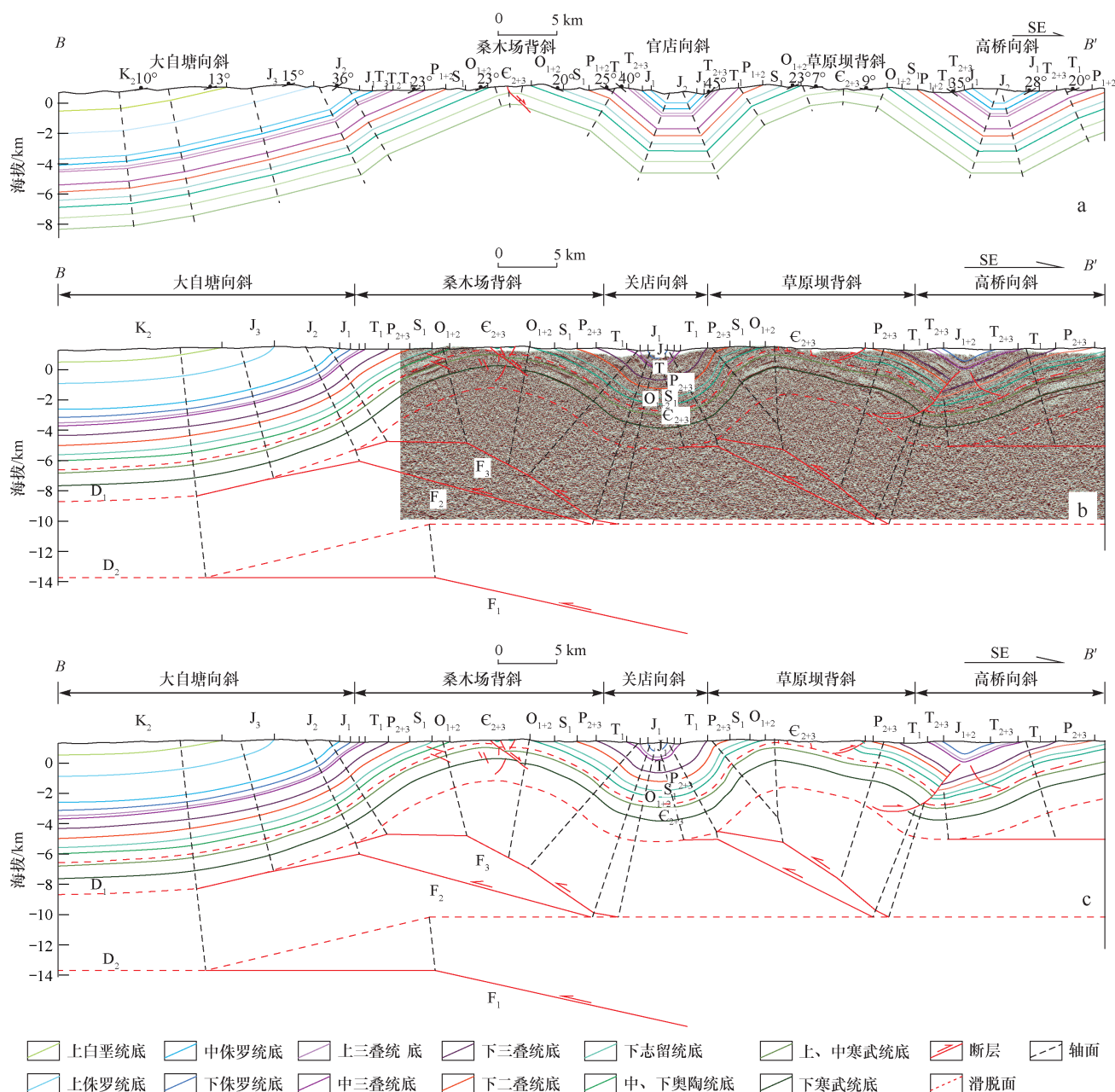


图5 川东南桑木场背斜中部 NW-SE 向剖面 BB' 的浅表地质剖面及解地震解释结果

Fig. 5 Section *BB'* (striking NW – SE) and interpretations showing the surface and shallow subsurface of central Sangmchang Anticline, southeastern Sichuan Basin

a. 浅表地质剖面; b. 构造解释方案; c. 构造模型

在剖面 BB' 所在位置,桑木场背斜也存在分层滑脱的变形机制。滑脱层 D_1 以上地层的变形以沿滑脱层的顺层剪切变形为主,并没有发育大型逆冲断裂。深部基底中的变形与南东部类似,为断层 F_2 、 F_3 控制的叠瓦构造与其下方的断层 F_1 所控制的基底构造楔叠置形成的复合构造样式,其垂向上的叠置关系受到多套基底滑脱层及多期构造活动的共同影响。背斜南东侧地层由于基底构造楔的楔入被整体抬高 4.5 km,剖面中背斜以东地层也被其整体抬高。虽然桑木场背斜在此处的主要地质结构与剖面 AA' 所在位置相似,但是在构造样式上与之存在一定的差异,这主要是由于基底断裂沿背斜轴向发生变化导致的。断层 F_2 、 F_3 在此处的倾角略大于背斜南东部,但地层沿其的滑移量却比南东部小很多,另外由于断层 F_4 并未向北延伸至此,大田坝背斜的存在使得背斜南西部与中部前翼的地质结构的差异很大。

剖面 CC' 位于背斜北东部倾末端,由于处于桑木场背斜与酒店垭背斜转换带的部位,此剖面能较好的反映

出桑木场背斜北东部的几何形态及桑木场背斜与酒店垭背斜及丁山构造在空间上的衔接关系(图 6)。

剖面 CC' 同样表现为分层变形、相互叠置的构造变形特征。但是其变形特征与背斜南西部与中部存在明显差异,桑木场背斜在此处地表出露的宽度为 2.4 km,深部志留系底所界定的宽度也仅为 5.8 km,背斜的隆升高度为 0.9 km。

剖面由浅至深可分为浅部、中部、深部 3 套变形系统。浅部变形系统的变形主要由两条倾向南东的逆冲断层 F_7 、 F_8 所控制,断层 F_8 断坡的倾角大于 F_7 。这两条断层向上均收敛于志留系中的一套由白云岩组成的滑脱层中,向下收敛于寒武系的膏岩滑脱层中(图 6b)。由断层 F_7 、 F_8 控制的两个逆冲断片在此处形成一个向后破裂式的叠瓦构造。其中断层 F_7 直接控制了桑木场背斜在剖面位置的浅部几何形态,断层 F_8 直接控制了酒店垭背斜的浅部几何形态。中部变形系统的变形由倾向北西的反冲断层 F_6 与其控制的构造楔组成。断坡北西侧地层在变形中沿断层向南东楔入,

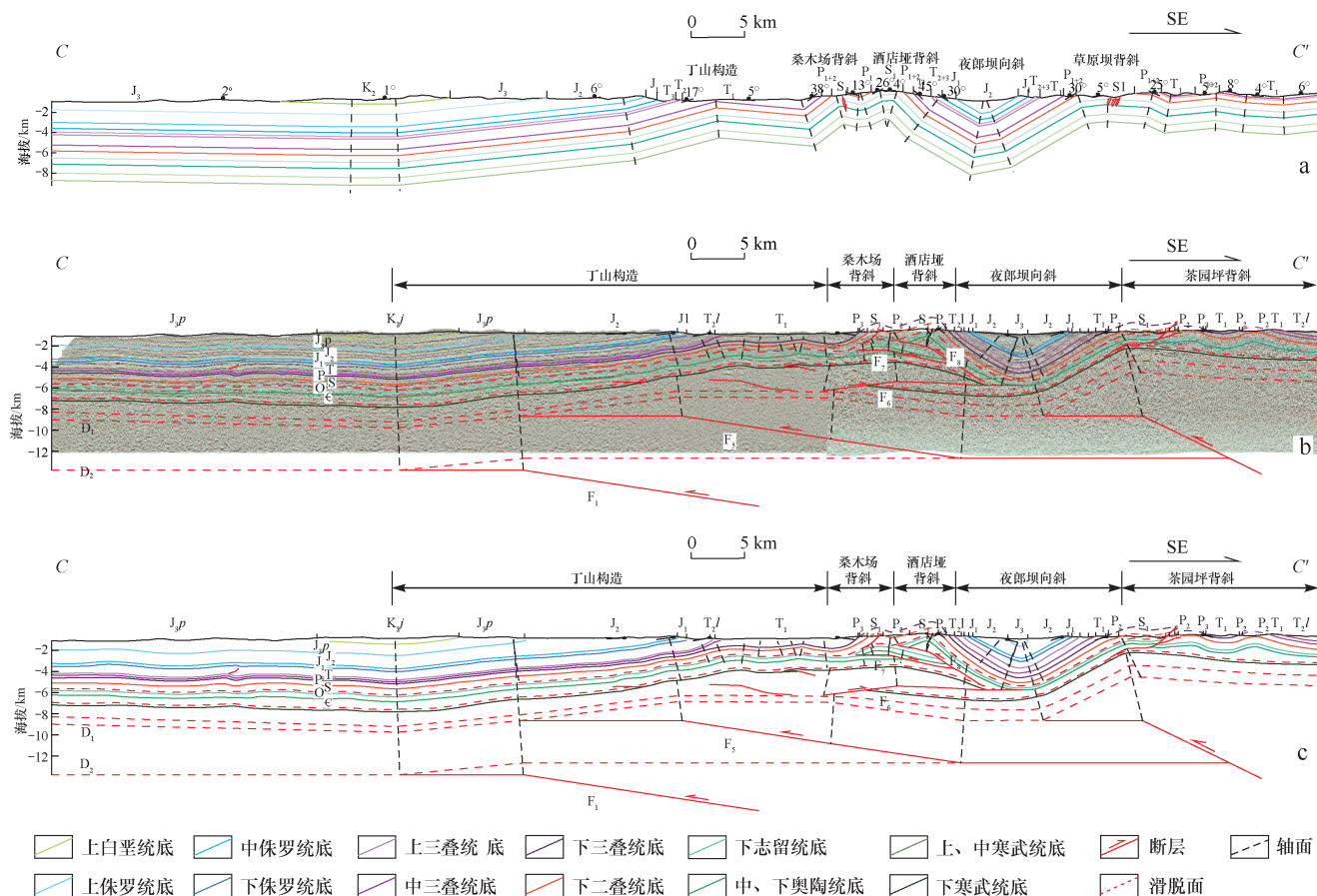


图 6 川东南桑木场背斜北东部 NW-SE 向剖面 CC' 的浅表地质剖面及解地震解释结果

Fig. 6 Section CC' (striking NW-SE) and its interpretations showing the surface and shallow subsurface of northeastern Sangmuchang Anticline, southeastern Sichuan Basin

a. 浅表地质剖面; b. 构造解释方案; c. 构造模型

所形成次级背斜的前翼陡窄、后翼宽缓,将桑木场背斜及酒店垭背斜一同抬高,其变形是浅部基底对深部基底变形的响应。

深部变形系统的变形是由断层 F_5 控制的断层转折褶皱及断层 F_1 控制的基底构造楔相互叠加形成的,两个断层的断坡均倾向南东。从对剖面的解释可以看出,这两个断层控制了丁山单斜构造的构造形态并间接影响了桑木场背斜的构造形态。断层 F_1 所控制的基底构造楔在剖面位置将桑木场背斜南西侧的地层整体抬高约 1.1 km。

桑木场背斜在剖面 CC' 位置已进入消亡段,其构造形态主要受到浅部叠瓦构造的控制,中部反向构造楔变形系统、深部的断层转折褶皱及基底构造楔属于丁山构造的地质结构,它们仅造成桑木场背斜在剖面位置的纵向隆升,并为对其构造形态产生直接影响。

2.3 桑木场背斜平面展布特征

桑木场背斜的构造样式在不同位置略有差异,从对地震剖面的解释结果来看:垂直于背斜走向,桑木场背斜两侧的构造特征存在较为明显的差异,这主要体现在背斜两翼的构造形态以及两侧向斜构造相同地层的埋深差异上。相比较来说,背斜的后翼陡窄;前翼地层宽缓,且长度却远高于后翼。同时,由于基底构造楔的存在,背斜南东侧的地层相对北西侧被整体抬高。沿背斜走向,自南西至北东背斜的宽度逐渐减小,南西部在剖面 AA' 所在位置虽然平顶很长,但其宽度及隆升程度却远小于背斜中部(剖面 BB' 所在位置)。在背斜北东部剖面 CC' 所在位置,背斜的变形强度相对较弱,已经进入消亡段。结合背斜的地表痕迹,可以发现桑木场背斜的几何形态及变形强度在其轴向方向并不对称,地表张性断裂的发育情况也印证了这一观点。

背斜盖层中的变形主要以垂向隆升为主,并没有发育大型的逆冲断层,但是在背斜北东部与酒店垭背斜相交的地方,志留系与寒武系的滑脱面之间发育有一个叠瓦构造。深部的构造变形在此处对于桑木场背斜几何形态的影响已经非常小,背斜在北东端的构造样式直接受控于这个浅层的叠瓦构造,这使得背斜在此处的构造形态较中部及南西部发生变化。

由上文分析可知,断层 F_1 、 F_2 、 F_3 共同控制了背斜的整体构造形态。其中断层 F_1 是一条区域型逆冲断裂,在剖面 CC' 所在位置,由断层 F_1 造成的隆升已经不是很明显。断层 F_2 、 F_3 向北东方向并没有延伸至剖面 CC' 的位置,这说明这两条断层向北东终止于桑木场背斜的北东端,背斜北侧的酒店垭背斜在剖面 CC'

位置除断层 F_1 外,还受到基底逆冲断层 F_5 及基底反冲断层 F_6 的共同控制,断层 F_5 向南东方向同样终止于桑木场背斜及酒店垭背斜转换带的位置。

断层 F_2 、 F_3 向北东方向终止的位置及断层 F_5 向南东方向终止的位置均处于齐岳山断裂走向发生变化的位置,齐岳山断裂在此以北走向平行于酒店垭背斜走向,在此以南平行于桑木场背斜走向。

3 构造演化

3.1 变形时间的确定

前人对川东南地区演化的研究表明川南地区经历了燕山-喜马拉雅多期复合运动^[22-25]。本文对前人在桑木场背斜及其邻区 5 个采样点(位置见图 1)的磷灰石裂变径迹实验结果进行了统计与分析^[22-29],结果表明:研究区的构造变形始于燕山运动中期(约 85 Ma),在此之前,研究区处于沉降埋藏阶段,桑木场背斜并没有明显隆升,经历的构造运动以垂向运动为主,地层并没有发生明显的缩短。自燕山期中期至今,研究区经历了燕山中-晚期(85~72 Ma)的快速隆升阶段、燕山期末期-喜马拉雅期中期(72~31 Ma)的缓慢隆升阶段及喜马拉雅期中期至今(31~0 Ma)的快速隆升阶段。

3.2 构造演化阶段特征

燕山期中期(约 85 Ma),受到来自南西方向应力的挤压作用,在桑木场背斜下方约 15 km 以下的基底

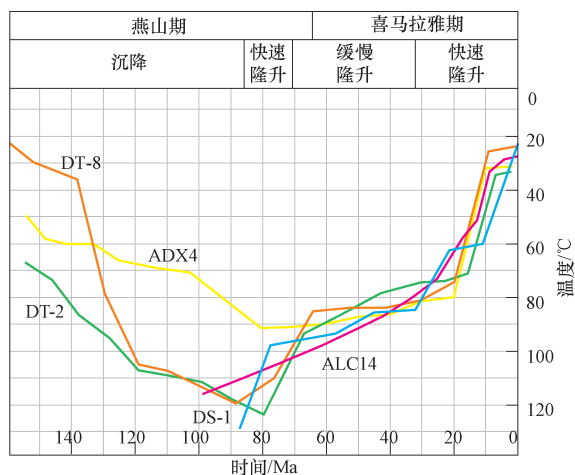


图7 四川盆地东南缘磷灰石裂变径迹热隆升模拟图(据文献[27-29]修改)

Fig. 7 Simulation chart of thermal uplift of apatite fission track in southeastern Sichuan Basin (modified from references[27-29])

中产生了一个原始断面 F_1 , 其上盘的地层沿断面向北西滑动, 并沿顶板滑脱层楔入断层北西侧地层, 形成一个区域型的基底构造楔 (图 8), 将桑木场背斜南东侧的地层整体抬高, 这一过程一直持续到燕山期晚期, 桑木场背斜在此阶段经历快速隆升。在这期变形中, 剖面中三叠系以上地层的缩短量约为 2.0 km, 二叠系及以下盖层的缩短量为 2.3 km, 基底的缩短量为 1.1 km。

燕山期末期 (约 72 Ma), 基底沿断层 F_1 的运动停止, 同时在滑脱层 D_1 、 D_2 间, 先后生成了两个倾向南东的断面 F_2 、 F_3 , 其南东侧的地层在南东向挤压应力下沿断层向上缓慢滑动, 在背斜下方形成了一个由两个逆冲断片组成的前展式叠瓦构造, 这时研究区初现背斜形态。桑木场背斜在这一阶段的隆升速度较慢, 三叠系以上地层的缩短量约为 3.0 km, 二叠系及以下盖层的缩短量为 4.4 km, 基底的缩短量为 7.6 km。

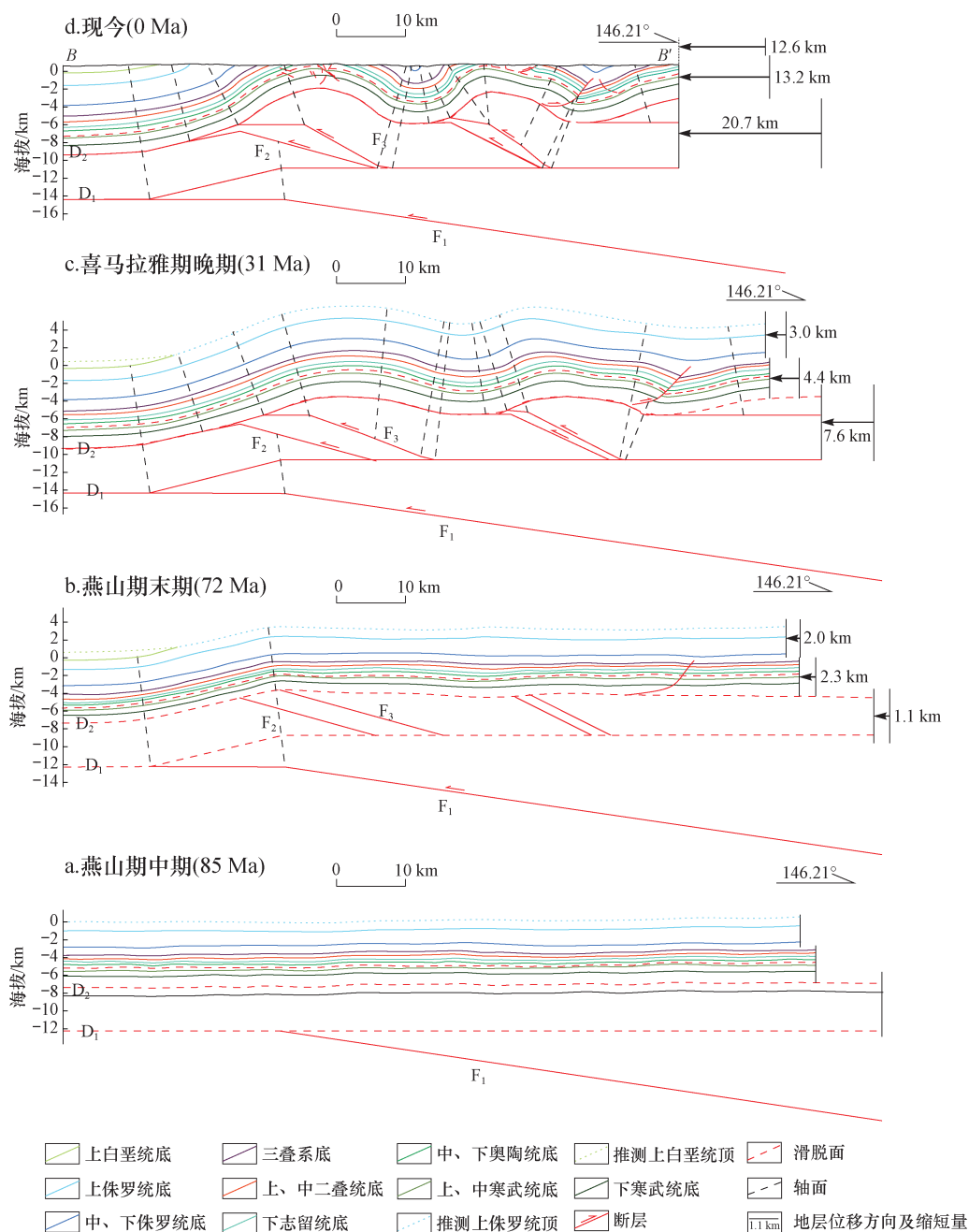


图 8 川东南桑木场背斜的构造演化剖面 (沿背斜中部 NW-SE 向 BB' 剖面)

Fig. 8 Structural evolution of the Sangmuchang Anticline in southeastern Sichuan Basin (along the section BB' striking NW-SE in central Sangmuchang Anticline)

喜马拉雅晚期(约 31 Ma), 基底沿断层 F_2 、 F_3 的滑动速率加快, 桑木场背斜再次进入快速隆升期。这一期变形一直持续至今, 在这一过程中, 背斜核部的地层逐渐露出地表并接受风化剥蚀, 背斜现今的几何形态逐渐形成。该阶段盖层的缩短量为 12.6 ~ 13.2 km, 基底的缩短量为 20.7 km, 基底与盖层缩短量的不同是地层的分层滑脱变形造成的。

总的来说, 这 3 期构造活动均对桑木场背斜构造主体产生了重要的影响, 研究区基底的变形具有持续活动的特点, 从燕山期中期至今从未中断。燕山中晚期的构造活动仅造成剖面基底 1.1 km 的缩短, 而燕山期末期-喜马拉雅期中期与喜马拉雅期中期至今的构造活动分别使剖面基底缩短 7.6 km 及 20.7 km, 其缩短量均在第一阶段的 5 倍以上, 这表明后两期构造活动的剧烈程度要远大于第一期构造活动, 从演化剖面也可以看出, 燕山期末期至今的一系列构造活动对背斜现今构造样式的形成所造成的影响明显大于之前的构造活动, 但是燕山中-晚期(85 ~ 72 Ma)的构造活动对桑木场背斜的构造形态尤其是背斜北西翼的形成同样起到了不可忽略的作用, 背斜现今的构造样式是在多期次构造活动的叠加控制下形成的。

4 讨论

4.1 变形机制

前人关于“隔槽式”褶皱带成因机制的研究一直存在争议, 刘学锋提出这种构造样式主要表现为基底卷入型的逆冲褶皱系与组合在垂向上的叠加, 其构造在受基底控制的同时, 也受盖层滑脱作用的叠加改造^[9]。张必龙等人通过数值模拟研究认为其形成主要受地层的埋深与能干性差异的控制^[10]。杨坤光等人提出其主要受滑脱作用的控制, 变形的复杂部分应该位于紧闭向斜的核部。在向斜核部发育有与褶皱枢纽一致走向的断层, 这些断层控制了向斜的形成, 在被断层间隔出的稳定区域发育背斜^[11]。柏道远等人提出齐岳山断裂东侧盆山过渡带褶皱的形成主要受区域挤压体制下包括褶皱基底和盖层在内的原地岩层体的整体水平收缩及其导生的冲断、滑脱作用所控制^[12-13]。颜丹平等人认为在雪峰山陆内造山运动强烈的挤压应力下先产生一系列阶梯状逆冲断层, 外来岩席沿断坡向上滑动首先形成尖棱状背斜, 随着时间的推移, 在逆冲带的前缘产生新的“隔挡式”背斜; 后缘的背斜逐渐变宽, 之间的向斜逐渐变窄, 进而形成“隔槽式”背斜^[14-16]。

此次研究认为: 在桑木场背斜所在区域, “隔槽式”背斜存在分层滑脱变形的变形机制, 其形成主要受控于基底的变形。在雪峰山西推应力的作用下, 在基底中先后产生数条倾向南东并收敛于不同滑脱层的基底断裂, 基底断块沿断面向西逆冲形成基底构造楔、断层转折褶皱及叠瓦构造等多种构造样式。盖层中并没有发育大型的逆冲断层, 其变形主要为在基底变形的作用下的顺层剪切变形。

研究区及邻区的构造主要为一系列走向北东的背斜构造与一系列走向北北东的背斜构造(图 1), 同时区域内也存在两条走向分别与之对应的主要断裂: 走向北东的齐岳山断裂及走向北北东的南川-遵义断裂^[30]。桑木场背斜位于齐岳山断裂的正上方, 走向与齐岳山断裂向一致, 南川-遵义断裂位于桑木场背斜南东侧较远的位置, 且走向与背斜的走向存在明显差异。故可以判断, 桑木场背斜的变形主要受齐岳山断裂的控制, 结合在第二章中对背斜应力方向的分析可知, 造成桑木场背斜变形的主应力来自于雪峰山陆内造山运动所产生的向西的推覆力^[12-17, 31-39]。

雪峰山的造山运动早在加里东运动前就已经开始, 而桑木场背斜在燕山期才开始隆升, 这说明“隔槽式”褶皱带内各背斜的变形时间并不一致, 是在雪峰山西推应力的传递过程中依次变形的, 应力传递到桑木场背斜区域经历了漫长的时间, 在雪峰山造山带至隔槽式褶皱带间, 变形是从深部向浅部递进发育的, 由东向西卷入变形的基底的深度逐渐减小^[12-17, 19-20, 22], 应力也在传递中释放并减弱。当应力传递至隔槽式褶皱带西缘时, 已经不足以继续推动其西侧的基底发生变形, 应力在此积累释放, 由此形成齐岳山断裂, 断裂东侧的地层沿断裂向西滑动, 在断裂带的位置上形成了一系列成因类似、特征相似的背斜构造, 桑木场背斜就是其中之一, 这也是桑木场区域背斜构造形成的主要原因。

断层 F_2 、 F_3 切断的地层的厚度与上覆地层压力要远小于 F_1 所切断的地层, 从这个角度来看, 在相同的应力作用下, 由断层 F_2 、 F_3 造成的变形强度就要大于由断层 F_1 造成的变形, 也就是说, 推动地层沿断层 F_2 、 F_3 发生滑动需要更小的应力, 所以桑木场背斜基底的变形向浅部传递很可能是由于应力的减小造成的, 此时应力已经无法推动深部地层沿深度更深、长度更长的断裂滑动。这一过程很可能指示了在齐岳山断裂带形成的过程中, 来自雪峰山的应力的变化过程。

由应力变化及卷入变形地层的厚度变化等多方面因素的共同作用, 桑木场背斜在燕山期末期的隆升速度要较上一阶段明显减缓。在喜马拉雅晚期, 受到喜

马拉雅构造运动的影响,来自青藏高原由西向东的挤压应力越过华蓥山波及至此^[22,40-42],虽然没有在产生倾向北西的大型逆冲断层,但是在背斜核部的该层中产生了数个倾向北西的浅表反冲断层,且加快了基底沿活动断层(F_2 、 F_3)的滑移速度,进而加速了桑木场背斜的隆升,这一过程一直持续至今。

4.2 地质意义

桑木场背斜的构造变形,对研究四川盆地东南缘盆-山过渡带,即湘鄂西“隔槽式”褶皱带与川东南“隔挡式”褶皱带之间的过渡关系以及齐岳山断裂的几何形态具有重要的指示意义。

前人对于湘鄂西“隔槽式”褶皱带与川东南“隔挡式”褶皱带之间转换关系的研究相对匮乏^[31-37,43-56],大多数学者仅提出以齐岳山断裂为界,以西为薄皮构造,以东为基底卷入的厚皮构造^[14,19,32,36,43-46]。在颜丹平等人提出的雪峰山西推模型中,两个褶皱带之间的过渡是变形沿一系列连续的阶梯状断层向前传递形成的,过渡带西侧的背斜没有发生拓宽,东侧的背斜已处于拓宽阶段,并不存在特殊的构造样式^[14-15]。关于齐岳山断裂,一种观点认为它是一条初露地表的区域性基底断裂^[16,18,44-45],也有人将其解释为一条切穿部分盖层的隐伏断裂^[17,46]。

本次研究认为:齐岳山断裂南段表现为隐伏断裂,且未切穿盖层,是由多条倾向南东的基底逆冲断层共同组成的断裂系统,包括一条深部的区域性基底逆冲断层及数条浅部基底断层,在不同的构造位置,齐岳山断裂的几何形态存在差异,在桑木场背斜区域,其浅部存在两条逆冲断层,在丁山构造区域,浅部仅存在一条逆冲断层。在两个构造之间,齐岳山断裂的走向发生变化,浅部逆冲断层的发育情况指示了齐岳山断裂走向发生改变的原因。

同时,“隔槽式”褶皱带与“隔挡式”褶皱带并不是由一系列阶梯状断层连接的,齐岳山断裂是二者的分界线,两个构造带之间是过渡是由齐岳山断裂以及上方的背斜构造实现的,两个构造带的不同构造特征直接反映在背斜两翼的构造差异上。以桑木场背斜为代表,背斜的南东翼陡窄,在受到基底逆冲断层控制的同时,还受到其东侧背斜构造盖层较为强烈的横向挤压,故表现为背斜宽缓、向斜陡窄的“隔槽式”背斜;背斜北西翼的地层则较为宽缓,由于西侧背斜的盖层并未对其产生强烈的横向挤压作用,以至其向西延伸较远,表现为背斜陡窄、向斜宽缓的“隔挡式”背斜。

5 结论

1) 桑木场背斜处于“隔槽式”褶皱带与“隔挡式”褶皱带的过渡部位,二者构造特征的差异体现在背斜的两翼上。桑木场背斜是多期构造活动叠加作用形成的,其整体构造格局受盆地基底形态与齐岳山断裂的联合控制。在平面上背斜呈现为北东窄、南西宽的锥形展布,剖面上呈现前翼宽缓、后翼陡窄的构造特征。

2) 桑木场背斜存在分层滑脱变形的变形机制,在垂向上具有相互叠置的结构特征。盖层的变形主要为深部基底变形引起的顺层剪切变形,并没有发育大型逆冲断裂。基底的变形控制了背斜的构造形态,深部基底沿其向上逆冲形成叠瓦构造与构造楔相互叠置是桑木场背斜隆升的主要原因。

3) 桑木场背斜的变形发生在燕山期中期之后,在此之前,研究区的构造演化以垂向上的升降运动为主,横向上并未发生明显的缩短。燕山期中期开始,研究区共经历了快速—缓慢—快速3个隆升阶段,背斜在燕山期中晚期的构造活动中的变形受断层 F_1 的控制,处于快速隆升期。在燕山期末期—喜马拉雅期中期,背斜的隆升速率较慢,其变形主要受控于断层 F_2 、 F_3 ,桑木场背斜在这一阶段初现雏形。喜马拉雅期中期至今,基底沿断层 F_2 、 F_3 的滑移速度增加,背斜再次处于快速隆升期,并逐渐形成背斜现今的构造形态。桑木场背斜的构造演化十分复杂,在其演化过程中,基底的缩短量为29.4 km,盖层的缩短量为17.6~19.9 km,这主要是背斜的分层滑脱变形导致的。

参 考 文 献

- [1] 钟城,秦启荣,何威,等. 桑木场背斜沙溪庙组节理特征与构造解析[J]. 科学技术与工程,2017,17(30):194-201.
Zhong Cheng, Qin Qirong, He Wei, et al. Characteristic and tectonic analysis for joints of Shaximiao Formation in the Sangmuchang Anticline [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(30): 194-201.
- [2] 吴航,邱楠生,常健,等. 川东多套滑脱层褶皱构造带形成物理模拟[J]. 地球科学,2019,44(3):784-797.
Wu Hang, Qiu Nansheng, Chang Jian, et al. Physical simulation on development of multilayer detachment fold belt in Eastern Sichuan [J]. Earth Science, 2019, 44(3): 784-797.
- [3] 霍建峰,高健,郭小文,等. 川东地区龙马溪组页岩不同岩相孔隙结构特征及其主控因素[J]. 石油与天然气地质,2020,41(6):1162-1175.
Huo Jianfeng, Gao Jian, Guo Xiaowen, et al. Characteristics and controlling factors of pore structures of various lithofacies in shales of Longmaxi Formation, eastern Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology,

- 2020, 41(6): 1162–1175.
- [4] 洪克岩, 李博, 姜生玲, 等. 湘鄂西低勘探程度区构造解释及页岩气保存条件——以来凤咸丰区块为例[J]. 断块油气田, 2017, 24(6): 779–782.
- Hong Keyan, Li Bo, Jiang Shengling, et al. Structural interpretation and shale gas preservation conditions of low exploration level region, western Hunan-Hubei; taking Laifeng-Xianfeng Block as an example [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2017, 24(6): 779–782.
- [5] 胡璐宇. 渝东南地区构造特征及其对页岩气富集的影响[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- Hu Luyu. Tectonic Characteristics and its effect on shale gas enrichment in the regional of Southeastern Chongqing [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [6] 黄仁春, 魏祥峰, 王强. 四川盆地东南缘丁山地区页岩气成藏富集的关键控制因素[J]. 海相油气地质, 2017, 22(2): 25–30.
- Huang Renchun, Wei Xiangfeng, Wang Qiang. Key Factors of shale gas accumulation in Dingshan Area of Southeastern Sichuan Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2017, 22(2): 25–30.
- [7] 郭卫星, 熊亮, 魏力民. 川东南构造变形特征及其对页岩气保存的影响[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(6): 21–26.
- Guo Weixing, Xiong Liang, Wei Limin. Structure deformation of southeast Sichuan and its influences on preservation of shale gas [J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(6): 21–26.
- [8] 魏峰, 陈孔全, 庾秀松. 川东齐岳山断层北部差异构造变形特征[J]. 石油实验地质, 2019, 41(3): 348–354.
- Wei Feng, Chen Kongquan, Tuo Xiusong. Differential tectonic deformation in the northern Qiyueshan Fault, eastern Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2019, 41(3): 348–354.
- [9] 刘学锋, 刘成鑫. 渝鄂湘边区构造样式分析[J]. 石油天然气学报, 2002, 24(2): 1–4.
- Liu Xuefeng, Liu Chengxin. Analysis of structural styles at the juncture of Chongqing, Hubei and Hunan [J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 2002, 24(2): 1–4.
- [10] 张必龙, 朱光, Dazhi J, 等. 川东“侏罗山式”褶皱的数值模拟及成因探讨[J]. 地质论评, 2009, 55(5): 701–711.
- Zhang Bilong, Zhu Guang, Dazhi J, et al. Numerical modeling and formation mechanism of the Eastern Sichuan Jura-type Folds [J]. Geological Review, 2009, 55(5): 701–711.
- [11] 杨坤光, 李学刚, 戴传固, 等. 黔东南隔槽式褶皱成因分析[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 53–60.
- Yang Kunguang, Li Xuegang, Dai Chuangu, et al. Analysis of the origin of trough-like folds in Southeast Guizhou [J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 53–60.
- [12] 柏道远, 钟响, 贾朋远, 等. 雪峰造山带及邻区构造变形和构造演化研究新进展[J]. 华南地质与矿产, 2015, 31(4): 321–343.
- Bo Daoyuan, Zhong Xiang, Jia Pengyan, et al. Progresses in the deformations and tectonic evolutions of the Xuefeng Orogenic Belt and its adjacent areas. [J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2015, 31(4): 321–343.
- [13] 柏道远, 熊雄, 杨俊, 等. 齐岳山断裂东侧盆地过渡带褶皱特征及其变形机制[J]. 大地构造与成矿学, 2015, 39(6): 1008–1021.
- Bo Daoyuan, Xiong Xiong, Yang Jun, et al. Characteristics and dynamic mechanisms of the folds in the basin-mountain transition zone, East of the Qiyueshan Fault [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2015, 39(6): 1008–1021.
- [14] 颜丹平, 汪新文, 刘友元. 川鄂湘边区褶皱构造样式及其成因机制分析[J]. 现代地质, 2000, 14(1): 37–43.
- Yan Danping, Wang Wenxin, Liu Youyuan. Analysis of fold style and its formation mechanism in the area of boundary among Sichuan, Hubei and Hunan [J]. Geoscience, 2000, 14(1): 37–43.
- [15] 颜丹平, 邱亮, 陈峰, 等. 华南地块雪峰山中生代板内造山带构造样式及其形成机制[J]. 地学前缘, 2018, 25(1): 1–13.
- Yan Danping, Qiu Liang, Chen Feng, et al. Structural style and kinematics of the Mesozoic Xuefengshan intraplate orogenic belt, South China Block [J]. Earth Science Frontiers, 2018, 25(1): 1–13.
- [16] Yan D, Zhou M, Song H, et al. Origin and tectonic significance of a Mesozoic multi-layer over-thrust system within the Yangtze Block (South China) [J]. Tectonophysics, 2003, 361(3): 239–254.
- [17] Yan D P, Zhang B, Zhou M F, et al. Constraints on the depth, geometry and kinematics of blind detachment faults provided by fault-propagation folds: An example from the Mesozoic fold belt of South China [J]. Journal of Structural Geology, 2009, 31(2): 150–162.
- [18] 庾秀松, 陈孔全, 罗顺社, 等. 渝东大焦石坝地区差异构造变形[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(5): 1074–1083.
- Tuo Xiusong, Chen Kongquan, Luo Shunshe, et al. Differential structural deformation of the Dajiaoshiba area, East Chongqing [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(5): 1074–1083.
- [19] 赵旭东. 四川盆地东缘构造几何学与运动学[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
- Zhao Xudong. Structural Geometries and Kinematics of Eastern Margin of Sichuan Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences, Beijing, 2017.
- [20] 庾秀松, 陈孔全, 罗顺社, 等. 四川盆地东南缘齐岳山断裂构造特征与页岩气保存条件[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(5): 1017–1027.
- Tuo Xiusong, Chen Kongquan, Luo Shunshe, et al. Structural characteristics of Qiyueshan Fault and shale gas preservation at the southeastern margin of Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(5): 1017–1027.
- [21] 范存辉, 李虎, 钟城, 等. 川东南丁山构造龙马溪组页岩构造裂缝期次及演化模式[J]. 石油学报, 2018, 39(4): 379–390.
- Fan Cunhui, Li Hu, Zhong Cheng, et al. Tectonic fracture stages and evolution model of Longmaxi Formation shale, Dingshan structure, Southeast Sichuan [J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(4): 379–390.
- [22] 王东. 川东南桑木场—酒店垭构造形成演化与多期流体充注[D]. 成都: 成都理工大学, 2009.
- Wang Dong. The evolution and multi-phase fluids injection of Sangmunchang-Jiudianya Structure, Southeast of Sichuan Basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2009.
- [23] 张旭亮. 鄂西—渝东地区构造演化及成因机制[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- Zhang Xuliang. Tectonic evolution and genetic mechanism of Western Hubei and Eastern Chongqing Area [D]. Beijing: China University of Geosciences, Beijing, 2019.
- [24] 吴航. 川东地区中—新生代构造隆升过程研究[D]. 北京: 中国

- 石油大学(北京),2019.
- Wu Hang. Meso-Cenozoic tectonic uplift process of the Eastern Sichuan Basin [D]. Beijing: China University of Petroleum, Beijing, 2019.
- [25] 覃作鹏,刘树根,邓宾,等. 川东南构造带中生代多期构造特征及演化[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2013,40(6):703-711.
- Tan Zuopeng, Liu Shugen, Deng Bin, et al. Multiphase structural features and evolution of Southeast Sichuan tectonic belt in China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2013, 40(6): 703-711.
- [26] 孙博,邓宾,刘树根,等. 多期叠加构造变形与页岩气保存条件的相关性—以川东南焦石坝地区为例[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2018,45(1):109-120.
- Sun Bo, Deng Bin, Liu Shugen, et al. Discussion on correlation between multistage superimposed tectonic deformation and shale gas preservation conditions in the Jiaoshiiba shale-gas field, Sichuan, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2018, 45(1): 109-120.
- [27] 邓宾,刘树根,王国芝,等. 四川盆地南部地区新生代隆升剥露研究——低温热年代学证据[J]. 地球物理学报,2013,56(6):1958-1973.
- Deng Bin, Liu Shugen, Wang Guozhi, et al. Cenozoic uplift and exhumation in southern Sichuan Basin—Evidence from low-temperature thermochronology[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(6): 1958-1973.
- [28] 邓宾,刘树根,刘顺,等. 四川盆地地壳剥蚀量恢复及其意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2009,36(6):675-686.
- Deng Bin, Liu Shugen, Liu Shun, et al. Restoration of exhumation thickness and its significance in Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2009, 36(6): 675-686.
- [29] 李双建,李建明,周雁,等. 四川盆地东南缘中生代构造隆升的裂变径迹证据[J]. 岩石矿物学杂志,2011,30(2):225-233.
- Li Shuangjian, Li Jianming, Zhou Yan, et al. Fission track evidence for Mesozoic-Cenozoic uplifting in the southeastern margin of Sichuan basin[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2011, 30(2): 225-233.
- [30] 钟城,秦启荣,魏志红,等. 酒店垭—桑木场构造须家河组节理发育特征与应力场解析[J]. 现代地质,2018,32(2):279-288.
- Zhong Cheng, Qin Qirong, Wei Zhihong, et al. Characteristics and tectonic stress field of joints in Xujiache Formation of Jiudianya-sang-muchang Structure[J]. Geoscience, 2018, 32(2): 279-288.
- [31] 李三忠,王涛,金宠,等. 雪峰山基底隆升带及其邻区印支陆内构造特征与成因[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2011,41(1):93-105.
- Li Sanzhong, Wang Tao, Jin Chong, et al. Features and causes of indosinian intracontinental structures in the Xuefengshan Precambrian basement and its neighboring regions[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(1): 93-105.
- [32] 丘元禧,张渝昌,马文璞. 雪峰山陆内造山带的构造特征与演化[J]. 高校地质学报,1998,4(4):432-443.
- Qiu Yuanxi, Zhang Yuchang, Ma Wenpu. Tectonics and geological evolution of xuefengintra continental orogene, South China[J]. Geological Journal of China Universities, 1998, 4(4): 432-443.
- [33] 唐永,周立夫,陈孔全,等. 川东南构造应力场地质分析及构造变形成因机制讨论[J]. 地质论评,2018,64(1):15-28.
- Tang Yong, Zhou Lifu, Chen Quanli, et al. Analysis of tectonic stress field of Southeastern Sichuan and formation mechanism of tectonic deformation[J]. Geological Review, 2018, 64(1): 15-28.
- [34] 汪昌亮,颜丹平,张冰,等. 雪峰山西部中生代厚皮逆冲推覆构造样式与变形特征研究[J]. 现代地质,2011,25(6):1021-1031.
- Wang Changliang, Yan Danping, Zhang Bing, et al. Structural style and deformational characteristics of the thick-skinned thrust belt in the Western Xuefeng Mountain[J]. Geoscience, 2011, 25(6): 1021-1031.
- [35] 张小琼,单业华,倪永进,等. 中生代川东褶皱带的数值模拟:两阶段的构造演化模型[J]. 大地构造与成矿学,2015,39(6):1022-1032.
- Zhang Xiaoqiong, Shan Yebi, Ni Yongjin, et al. Numerical modeling of the Mesozoic East Sichuan Fold Belt: A Two-stage Tectonic Model [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2015, 39(6): 1022-1032.
- [36] 贾小乐. 川东南构造几何学与运动学特征及其与雪峰山西段的构造关系探讨[D]. 北京:中国地质大学(北京),2016.
- Jia Xiaole. Structural geometry and kinematics of Southeast Sichuan Basin: Insights into tectonic relationship with the western segment of Xue Feng Mountain Orogenic Belt [D]. Beijing: China University of Geosciences, Beijing, 2016.
- [37] 汪新伟,沃玉进,周雁,等. 上扬子地区褶皱—冲断带的运动学特征[J]. 地学前缘,2010,17(3):200-212.
- Wang Xinwei, Wo Yujin, Zhou Yan, et al. The kinematics of the fold-thrust zones in the western Yangtze Area [J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(3): 200-212.
- [38] 李英强. 川西南地区构造几何学、运动学与成因机制[D]. 北京:中国地质大学(北京),2015.
- Li Yingqiang. Structural geometries, kinematics and formation mechanism of Southwestern Sichuan Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences, Beijing, 2015.
- [39] 曾晓,王鹏,刘叶. 多滑脱层体系对川东南构造变形的影响分析[J]. 地球科学前沿,2020,10(6):524-532.
- Zeng Xiao, Wang Peng, Liu Ye. Analysis of the influence of multi-slip delamination system on the tectonic deformation in Southeastern Sichuan [J]. Advances in Geosciences, 2020, 10(6): 524-532.
- [40] 姜永涛,张永志,吴然,等. 青藏高原东缘地应变演化特征[J]. 地震工程学报,2015,37(1):152-158.
- Jiang Yongtao, Zhang Yongzhi, Wu Ran, et al. Evolution Characteristics of crustal strain at the eastern margin of the Tibetan Plateau [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(1): 152-158.
- [41] 闫全人,王宗起,刘树文,等. 青藏高原东缘构造演化的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学框架[J]. 地质学报,2006,80(9):1285-1294.
- Yan Quanren, Wang Zongqi, Liu Shuwen, et al. Eastern margin of the Tibetan Plateau: A window to probe the complex geological history from the Proterozoic to the Cenozoic Revealed by SHRIMP analyses [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(9): 1285-1294.
- [42] 叶卓,高锐,李秋生,等. 青藏高原向东挤出与向北扩展——高原隆升深部过程之探讨[J]. 科学通报,2018,63(31):3217-3228.

- Ye Zhuo, Gao Rui, Li Qiusheng, et al. Eastward extrusion and northward expansion of the Tibetan Plateau—Discussions for the deep processes of the plateau uplift[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(31): 3217–3228.
- [43] 邹玉涛, 段金宝, 赵艳军, 等. 川东高陡断褶带构造特征及其演化[J]. 地质学报, 2015, 89(11): 2046–2052.
- Zou Yutao, Duan Jinbao, Zhao Yanjun, et al. Tectonic characteristics and evolution of the high and steep fault folding belt in East Sichuan[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(11): 2046–2052.
- [44] 刘心怡. 关于川东—湘鄂西一带隔挡、隔槽式褶皱形成机制综述[J]. 中山大学研究生学刊: 自然科学, 2013, 34(2): 53–59.
- Liu Xinyi. Summary of forming mechanism of the comb-like and trough-like folds in Eastern Sichuan and Western Hunan-Hubei Region[J]. Journal of the Graduates Sun YAT-SEN University (Natural Sciences. Medicine), 2013, 34(2): 53–59.
- [45] Dong S W, Zhang Y Q, Gao R, et al. A possible buried Paleoproterozoic collisional orogen beneath central South China: Evidence from seismic-reflection profiling[J]. Precambrian Research, 2015, 264(3): 1–10.
- [46] 梅廉夫, 刘昭茜, 汤济广, 等. 湘鄂西—川东中生代陆内递进扩展变形: 来自裂变迹和平衡剖面的证据[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2010, 35(2): 161–174.
- Mei Lianfu, Liu Shaoqian, Tang Jiguang, et al. Mesozoic intra-continental progressive deformation in Western Hunan-Hubei-Eastern Sichuan Provinces of China: Evidence from apatite fission track and balanced cross-section[J]. Editorial Committee of Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2010, 35(2): 161–174.
- [47] 庾秀松, 陈孔全, 罗顺社, 等. 渝东大焦石坝地区差异构造变形[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(5): 1074–1083.
- Tuo Xiusong, Chen Kongquan, Luo Shunshu, et al. Differential structural deformation of the Dajiaoshiba area, East Chongqing[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(5): 1074–1083.
- [48] 潘磊, 徐祖新, 李让彬, 等. 川东南涪陵地区基底断裂特征与油气成藏[J]. 特种油气藏, 2020, 27(4): 19–25.
- Pan Lei, Xu Zuxin, Li Rangbin et al. Basement fault characterization and hydrocarbon accumulation in Fuling of Southeastern Sichuan[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(4): 19–25.
- [49] 马军. 页岩裂缝成因及其对含气性影响——以渝东南地区阳春沟构造带五峰—龙马溪组为例[J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(3): 126–134.
- Ma Jun. Origin of shale fractures and its influence on gas-bearing properties: A case study of Wufeng-Longmaxi Formation in Yangchongou structural belt in southeast Chongqing[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(3): 126–134.
- [50] 朱洪建, 琚宜文, 孙岩, 等. 构造变形作用下页岩孔裂隙结构演化特征及其模式——以四川盆地及其周缘下古生界海相页岩为例[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(1): 186–200.
- Zhu Hongjian, Ju Yiwen, Sun Yan, et al. Evolution characteristics and models of shale pores and fractures under tectonic deformation: A case study of the Lower Paleozoic marine shale in the Sichuan Basin and its periphery[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(1): 186–200.
- [51] 孙帅, 侯贵廷. 岩石力学参数影响断背斜内张裂缝发育带的概念模型[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(3): 455–462.
- Sun Shuai, Hou Guiting. Analysis of conceptual models for the influence of rock mechanics on tensile zone in faulted anticlines[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(3): 455–462.
- [52] 张伟康, 何登发. 三角剪切断层传播褶皱应变分布[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(5): 1065–1072.
- Zhang Weikang, He Dengfa. Strain distribution of tri-shear fault propagation folding[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(5): 1065–1072.
- [53] 孙同文, 高喜成, 吕延防, 等. 断裂转换带作为油气侧向、垂向运移通道的研究进展[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(5): 1011–1021.
- Sun Tongwen, Gao Xicheng, Lv Yanfang, et al. Research progress in fault transformation zones as lateral or vertical hydrocarbon migration pathways[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(5): 1011–1021.
- [54] 霍建峰, 高健, 郭小文, 等. 川东地区龙马溪组页岩不同岩相孔隙结构特征及其主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(6): 1162–1175.
- Huo Jianfeng, Gao Jian, Guo Xiaowen, et al. Characteristics and controlling factors of pore structures of various lithofacies in shales of Longmaxi Formation, eastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(6): 1162–1175.
- [55] 邓铭哲, 张伟康. 四川盆地秭归复向斜构造变形机制及构造意义[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(5): 182–196.
- Deng Mingzhe, Zhang Weikang. Structural deformation mechanism and significance of the Zigui synclinorium, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(5): 182–196.
- [56] 田鹤, 曾联波, 徐翔, 等. 四川盆地涪陵地区海相页岩天然裂缝特征及对页岩气的影响[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(3): 474–483.
- Tian He, Zeng Lianbo, Xu Xiang, et al. Characteristics of natural fractures in marine shale in Fuling area, Sichuan Basin, and their influence on shale gas[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(3): 474–483.

(编辑 张亚雄)