

https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.032



四川盆地元坝—通南巴地区关键构造期构造特征及陆相致密砂岩天然气成藏响应

刘昭茜¹, 罗开平², 唐永³, 杨帆², 梅廉夫¹, 沈传波¹

1. 中国地质大学构造与油气教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所, 江苏无锡 214126

3. 长江大学地球科学学院, 湖北武汉 430100

摘要: 中国多旋回叠合盆地陆相致密碎屑岩层系油气资源丰富, 多期、多属性构造作用使其具有复杂而特殊的油气地质特征, 四川盆地元坝—通南巴地区位于多旋回、多属性构造作用交接部位, 是揭示叠合盆地内多期复杂构造作用与陆相致密碎屑岩油气成藏作用关系和油气富集规律的典型地区。基于地震资料、磷灰石裂变径迹年代学和成藏特征对比, 厘定元坝—通南巴地区陆相层系存在燕山晚期(晚白垩世 100~70 Ma)和喜山早期(始新世—渐新世 40~25 Ma)两个关键构造期。陆相致密砂岩天然气富集主要受这两次关键构造作用的控制, 燕山晚期形成 NE 向主体构造, 是 NE 向弱变形区、NW-SN 向过渡变形带(通南巴西部)和 NW 向密集变形带的关键成藏期, 构造—成藏响应模式为早期成藏、陆源充注、背斜控藏、褶皱控缝。喜山早期形成 NW 向构造和局限在早期 NE 向构造之间的近 SN 向构造, 是 SN 向过渡变形带和 NW-SN 向过渡变形带(元坝东部)的关键成藏期, 也是 NW-SN 向过渡变形带(通南巴西部)和 NW 向密集变形带的关键改造期, 构造—成藏响应模式为晚期成藏、海相混源、断裂控藏、断裂控缝。

关键词: 元坝—通南巴地区; 关键构造期; 致密砂岩天然气; 构造—成藏响应; 石油地质。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2019)03-0756-17

收稿日期: 2019-02-26

Critical Tectonic Periods and the Response of Gas Accumulation in Non-Marine Tight Sandstone Reservoir in Yuanba-Tongnanba Area, Sichuan Basin

Liu Zhaoqian¹, Luo Kaiping², Tang Yong³, Yang Fan², Mei Lianfu¹, Shen Chuanbo¹

1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Wuxi 214126, China

3. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China

Abstract: Most of the non-marine tight sandstone strata in the polycyclic superimposed basins in China is rich in hydrocarbon resources and exhibits complicated and specific hydrocarbon geological characteristics. Yuanba-Tongnanba area is located in a polycyclic and multi-attribute tectonic intersection. It is a typical region which could reveal the respond relationship between multiphase tectonization and non-marine tight gas accumulation in the polycyclic superimposed basin. Based on the seismic da-

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41302112); 国家科技重大专项(No.2016ZX05002-006); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No.CUG160228)。

作者简介: 刘昭茜(1982-), 女, 副教授, 主要从事石油与天然气地质学、构造与成藏年代学、有机地球化学研究。ORCID:0000-0003-2601-2301。E-mail:lzqq2599@hotmail.com

引用格式: 刘昭茜, 罗开平, 唐永, 等, 2019. 四川盆地元坝—通南巴地区关键构造期构造特征及陆相致密砂岩天然气成藏响应. 地球科学, 44(3): 756-772.

ta, apatite fission track (AFT) geochronology and hydrocarbon accumulation characterizes analysis, two critical tectonic periods have been identified which are the Late Yanshan epoch (Late Cretaceous about 100—70 Ma) and the Early Himalayan epoch (Eocene to Oligocene about 40—25 Ma). The gas accumulation in the non-marine tight sandstone reservoirs was controlled by the tectonization of two critical tectonic periods. NE-trending structures were built in the Late Yanshan epoch which is the critical hydrocarbon accumulation period of NE-trending weak deformation zone, NW-SN trending transitional deformation belt (the west area of Tongnanba block) and NW-trending concentrated deformation belt. The respond pattern of Late Yanshan epoch could be expressed as earlier accumulation, terrestrial source, anticline control response on gas trap and fold control response on fractures. NW-trending and nearly SN-trending structures were built in the Early Himalayan epoch which is not only the critical hydrocarbon accumulation period of SN-trending transitional deformation belt and NW-SN trending transitional deformation belt (the east area of Yuanba block), but also the critical hydrocarbon reconstruction period of NW-SN trending transitional deformation belt (the west area of Tongnanba block) and NW-trending concentrated deformation belt. The respond pattern of Himalayan epoch could be expressed as late accumulation, marine-terrestrial mixed source, fault control response on gas trap and fault control response on fractures.

Key words: Yuanba-Tongnanba area; critical tectonic period; tight sandstone gas; hydrocarbon accumulation response to tectonism; petroleum geology.

0 引言

四川盆地是典型的多旋回叠加改造型盆地,同时也是中国致密砂岩天然气资源最丰富的盆地之一,致密砂岩天然气赋存在发育于海相层系基础之上的上三叠统须家河组及其以上层系,在漫长的地史过程中经历了多旋回叠合与改造过程,具有构造作用期次多、构造作用方向多变、构造改造差异性大、储层致密、非均质性强、有机质来源多样、烃类聚集与改造复杂、差异性大等油气地质特征(戴金星等,2012;龙胜祥等,2012;郭彤楼,2013;Li *et al.*, 2016;黎静容等,2016;Yang *et al.*,2016;范存辉等,2017;姜磊等,2018;吴小奇等,2019)。这些均体现了其成藏作用的复杂性与特殊性,涉及到盆地多旋回演化的动力学机制、有效烃源、储层致密化机制、致密储层油气聚散机理和成藏富集规律等重要的科学问题(戴金星等,2013;李军等,2016;仵宗涛等,2017;张莉等,2017;Qin *et al.*,2018)。

构造作用在不同时期和不同构造位置的表现形式不同,使构造定型或转型的关键构造活动时期对于油气的生成、运聚具有核心控制作用,特别是关键构造期对于致密砂岩储层中构造裂缝的控制作用,对于天然气的运移、聚集和保存至关重要。相对于强调烃源岩控制作用的“关键时刻”(Magoon and Dow, 1994)和以控制盆地格局为依据的“关键构造变革期”(汤良杰等,2001,2009)，“关键构造期”含义的差异性主要体现在确定关键构造期的依据和目的(刘昭茜,2011)。“关键构造期”强调与油气成藏/改造/破坏有密切关系的关键构造时刻,着重于构造作

用对油气成藏作用的核心控制以及后者对前者的呼应。这一时刻并不仅仅限于油气聚集到最初的圈闭时间,因多期多属性构造作用的存在,油气的后期改造时间也非常关键。将这种对于不同构造位置的油气成藏起到核心控制作用的关键构造时刻定义为“关键构造期”,指对不同构造位置的构造格局起关键定型作用的构造时期,这一构造时期的确定强调构造与油气活动的完全吻合关系,着重于构造作用对油气成藏作用的核心控制以及后者对前者的呼应,是揭示二者之间成因关系的一个最为关键的时间点。它不仅反映了该地区的关键构造期,同时也应该是对油气成藏起关键作用的关键成藏期或改造期,而且这种关键构造期是随着时间、空间而迁移的,由其控制的油气成藏作用也随之迁移,并在此基础上衍生出“关键成藏期”和“关键改造期”。

元坝地区和通南巴地区同位于四川盆地东北部,其北侧为米仓山冲断构造带,向南过渡为川中低缓构造带,东北侧为大巴山弧形冲断构造带,西北侧为龙门山造山带(图1),属于多旋回、多属性构造作用交接部位,构造位置和地理位置均相近,陆相层系均呈现多期构造作用叠加的特征;但多期构造导致的构造切割、围限关系、分布范围等在元坝和通南巴地区存在差异,而同期构造在两个地区的表现形式也存在差异,体现在构造形态、规模、波及范围、作用方式等方面。前人关于元坝和通南巴地区主体构造定型时间的认识也不一致(金文正等,2012;郭彤楼,2013;张庆峰等,2013;罗良等,2015;于冬冬等,2016;陈龙博等,2017)。虽然元坝和通南巴地区的陆相层系中均有致密砂岩气藏发现(郭彤楼,2013),但

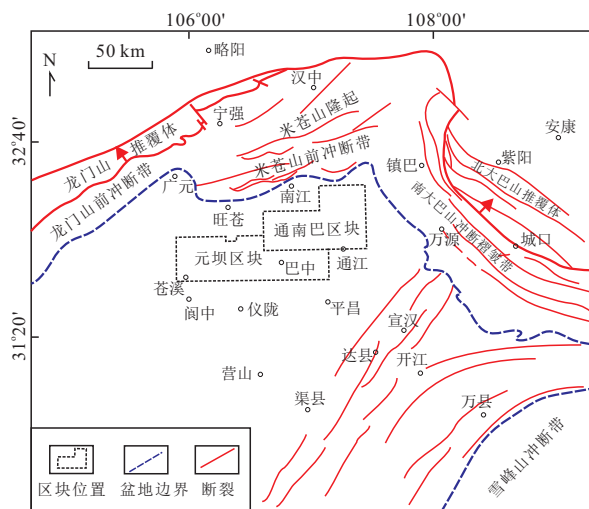


图 1 四川盆地元坝和通南巴地区构造位置

Fig.1 Tectonic location of Yuanba-Tongnanba area in Sichuan Basin

在烃类特征、天然气来源、富集层位、运移距离、成藏期次等方面却存在显著差异(谢小琴等,2014;李军等,2016;于冬冬等,2016;程立雪等,2017),体现了多旋回叠合盆地陆相致密碎屑岩层系复杂而特殊的油气地质特征,是揭示多期构造作用与陆相致密砂岩天然气成藏作用关系的典型地区.因此,对元坝和通南巴两个地区展开关键构造期、及其构造特征和陆相致密油气成藏响应的比较研究,明确其相似性与差异性,分析导致差异的原因,揭示关键构造期构造作用对油气成藏的控制作用,对研究中国叠合盆地复杂构造活动对陆相致密储层油气成藏的作用机制、油气成藏富集规律具有重要意义.

1 地质背景

元坝一通南巴地区位于四川盆地东北部,归属扬子板块的西北缘,其北侧为秦岭造山带南缘的米仓山冲断构造带,向南过渡为川中低缓构造带,东北侧为大巴山弧形冲断构造带,西北侧为龙门山造山带,为古生代一早中三叠世上扬子地台沉积的一部分,也是中、新生代米仓山一大巴山的前陆盆地区(图 1).自印支期以来,元坝一通南巴地区经历了多期复杂的构造演化.印支期,北大巴山及山前地带强烈隆升和逆冲推覆,盆内川东北地区普遍抬升,海水退出,转变为陆相沉积盆地,并形成了北东向开江前陆隆起;燕山期,环川东北地区的造山带向盆内的挤压作用持续加强,在来自雪峰构造域的 SE 向 NW

的挤压作用和 NW 向米仓山—龙门山的相对挤压作用下,形成了盆内 NE 向构造主体;喜马拉雅期,南东雪峰—武陵和北西米仓山—龙门山的相对挤压作用相继结束,代之而起的是大巴山构造带的重新活动,从 NE 向 SW 的挤压作用形成了盆内 NW 向构造带,并基本正交叠加在燕山晚期的 NE 向构造带上,形成复杂的构造干涉景观.NE 向构造组合是元坝一通南巴地区的主体构造,由九龙山背斜、金碧向斜、池溪向斜、通南巴背斜、通江向斜及其控制性边界断裂组成.NE 向构造还叠加了后期大巴山向盆内逆冲推覆过程中形成的 NW 向构造形迹,NW 向构造切割 NE 向构造.NE 向九龙山背斜和通南巴背斜之间还局限发育近 SN 向构造组合.

元坝一通南巴地区陆相层系发育上三叠统须家河组、下侏罗统自流井组、中侏罗统千佛崖组 3 套主力烃源岩.天然气在上三叠统须家河组、下侏罗统自流井组、中侏罗统千佛崖组和沙溪庙组中均有聚集.

2 关键构造期的厘定

关键构造期强调构造作用与油气成藏/改造/破坏的密切关系,元坝和通南巴地区陆相层系以构造圈闭为主,构造控制了圈闭和储层裂缝的发育规模及部位(郭彤楼,2013);烃类富集主要受构造作用的控制,NE 向构造圈闭的主体形成时期和 NW 向构造的叠加改造时期应为关键构造期,在不同构造位置有所差异.基于区域盆山关系的研究和构造年代学的分析,确定研究区的关键构造期.本次研究实测 12 个磷灰石裂变径迹样品,收集公开发表的数据 43 个(何登发等^①,2012;Lei *et al.*,2012; Tian *et al.*,2012; Yang *et al.*,2013,2017),共计 55 个数据用于关键构造期分析.55 个年代学样品分布在米仓山隆起、米仓山南部褶皱带、大巴山西部褶皱带、元坝和通南巴区块(图 2).

元坝一通南巴及周边地区 55 个年代学数据的磷灰石裂变径迹长度分布范围为 $10.2 \pm 2.1 \sim 15.0 \pm 0.053 \mu\text{m}$,均小于原始径迹长度 ($16.3 \pm 0.9 \mu\text{m}$),表明样品经历过较强的退火;径迹长度分布形态多为单峰特征,双峰不明显,表明样品达到最大埋深之后一直处于冷却的过程中;所测裂变径迹年龄均小于地层沉积年龄;单颗粒年龄的 X2 检验值 $P(X2)$ 大于或远大于 5%,说明单颗粒年龄的差

^①何登发,樊春,文竹,等,2012.四川盆地及邻区原型盆地的形成、演化与油气分布关系研究(报告).北京:中国地质大学.

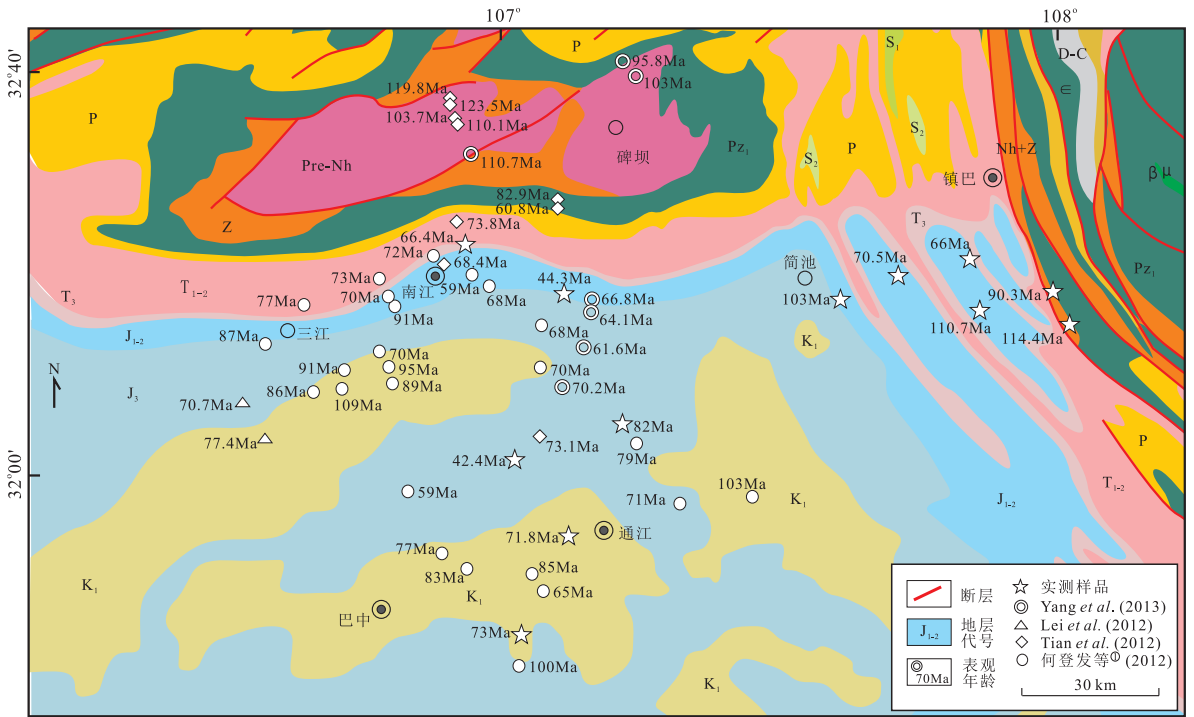


图 2 四川盆地元坝—通南巴及周边地区磷灰石裂变径迹数据分布

Fig.2 Apatite fission track ages plotted on geologic map of Micang Shan Uplift, South Dabashan Fold and Thrust Belt and Yuanba-Tongnanba area in Sichuan Basin

图中数据为中值年龄,部分数据来源:何登发等^①(2012);Lei *et al.*(2012); Tian *et al.*(2012)和 Yang *et al.*(2013, 2017)

别属于统计误差,具有单一的年龄平均值,属于同组年龄,其中 9 个样品值小于 5%,所示年龄为组合年龄.55 个数据中值年龄分布在 40~109 Ma 之间,其中 76.2%为 65~95 Ma(燕山晚期).随着纬度的减小,表观年龄整体(不包括 9 个组合年龄)呈逐渐减小的趋势,显示了 124~40 Ma 期间由北向南构造变形的递进性.

米仓山隆起和大巴山西部褶皱带的变形时间可以限定盆内元坝—通南巴地区的构造变形时间.米仓山隆起地区磷灰石裂变径迹热史模拟结果显示其快速隆升过程在 140~120 Ma(燕山中期,早白垩世)期间(图 3a),则盆内元坝—通南巴地区 NE 向主体构造的形成时间应在早白垩世之后.米仓山隆起和位于其北部的汉南隆起之间存在一个回军坝向斜,米仓山隆起夹持在四川盆地和回军坝向斜之间.在中侏罗世以前,回军坝向斜和四川盆地北部的地层具有良好的可对比性,回军坝向斜缺失中侏罗统下沙溪庙组以上地层(Yang *et al.*,2013),说明回军坝向斜在晚古生代至中侏罗世期间一直与四川盆地一体.米仓山快速隆升时间晚于中侏罗世(157 Ma),佐证了磷灰石裂变径迹热史模拟的结果.

盆内元坝—通南巴地区叠加在上构造层的 NW 向构造的形成受控于大巴山自 NE 向 SW 的逆冲挤压作用,大巴山前缘褶皱带磷灰石裂变径迹热史模拟结果揭示了 120~60 Ma 期间快速退火(图 3b),处于持续隆升阶段,其变形时间自早白垩世中晚期持续到晚白垩世,则大巴山逆冲导致的 NW 向褶皱变形波及到盆内元坝—通南巴地区应晚于晚白垩世(80~60 Ma 之后).

元坝—通南巴地区内部几乎所有磷灰石裂变径迹样品的热史模拟结果都揭示了 100~70 Ma(燕山晚期)的快速隆升(图 3c),对应 NE 向构造的变形时间.一部分样品的热史模拟结果还揭示了 40~25 Ma(喜山期始新世—渐新世)的第二次隆升过程(图 3c 中(15)~(18)),对应 NW 向构造形成时间.

元坝—通南巴地区陆相层系存在的 NE 向、NW 向、近 SN 向 3 种构造行迹的规模和交切关系可以反映其形成的先后顺序,NE 向构造以褶皱变形为主,规模显著大于 NW 向和近 SN 向构造;NW 向断裂和褶皱切割 NE 向构造;近 SN 向断裂和小褶皱局限于九龙山和通南巴 NE 向构造之间.说明 NE 向构造形成较早,NW 向和近 SN 向构造形成较

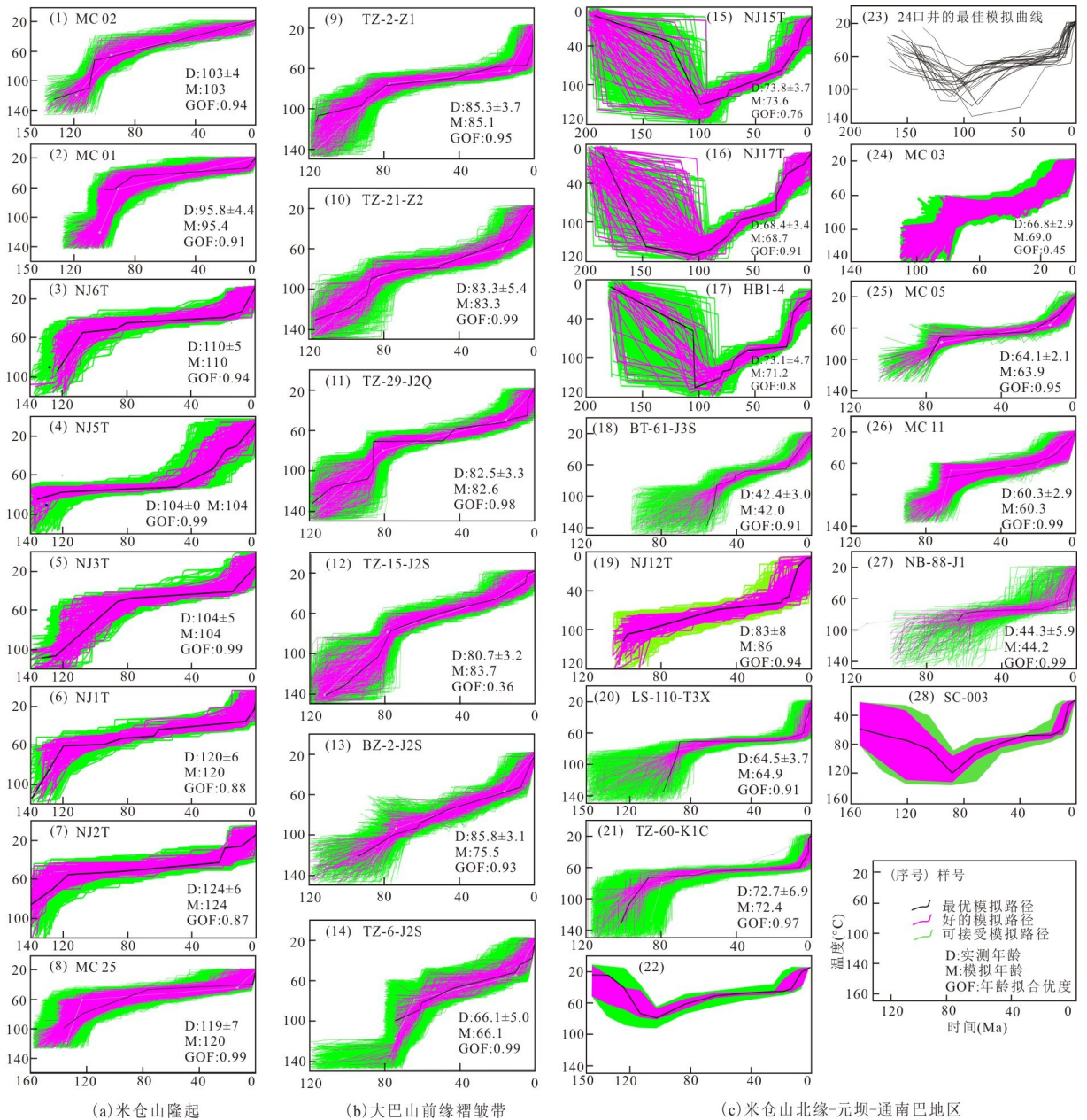


图 3 四川盆地元坝-通南巴及周边地区磷灰石裂变径迹模拟结果

Fig.3 Apatite fission track (AFT) thermal history modeling results of the Micang Shan Uplift, South Dabashan Fold and Thrust Belt and Yuanba-Tongnanba area in Sichuan Basin

(9)~(14)、(18)、(20)~(21)、(27)样品为实测数据,(1)~(2)、(8)、(24)~(26)来自 Yang *et al.*(2013);(3)~(7)、(15)~(17)、(19)来自 Tian *et al.* (2012);(22)~(23)、(28)来自何登发等^①(2012)

晚,与年代学分析反映的构造先后关系一致(图 4)。因此,元坝-通南巴地区存在两期关键构造期:燕山晚期(晚白垩世 100~70 Ma),在米仓山和龙门山作用下,形成 NE 向主体构造;喜山早期(始新世-渐新世 40~25 Ma),在以南大巴山为主导和龙门山联合作用下,形成 NW 向构造和局限在早期 NE 向构造之间的近 SN 向构造。

3 关键构造期构造特征

元坝-通南巴地区陆相层系整体构造面貌为 NE 走向的两隆两凹,形态宽缓、规模大,形成于燕山晚期(晚白垩世),后期被喜山早期(始新世-渐新世)形成的 NW 向构造叠加改造,使通南巴-元坝东部的 NE 向背斜和向斜的局部形态发生变化, NW 向构造切割 NE 向构造.这种影响自 NE 向 SW

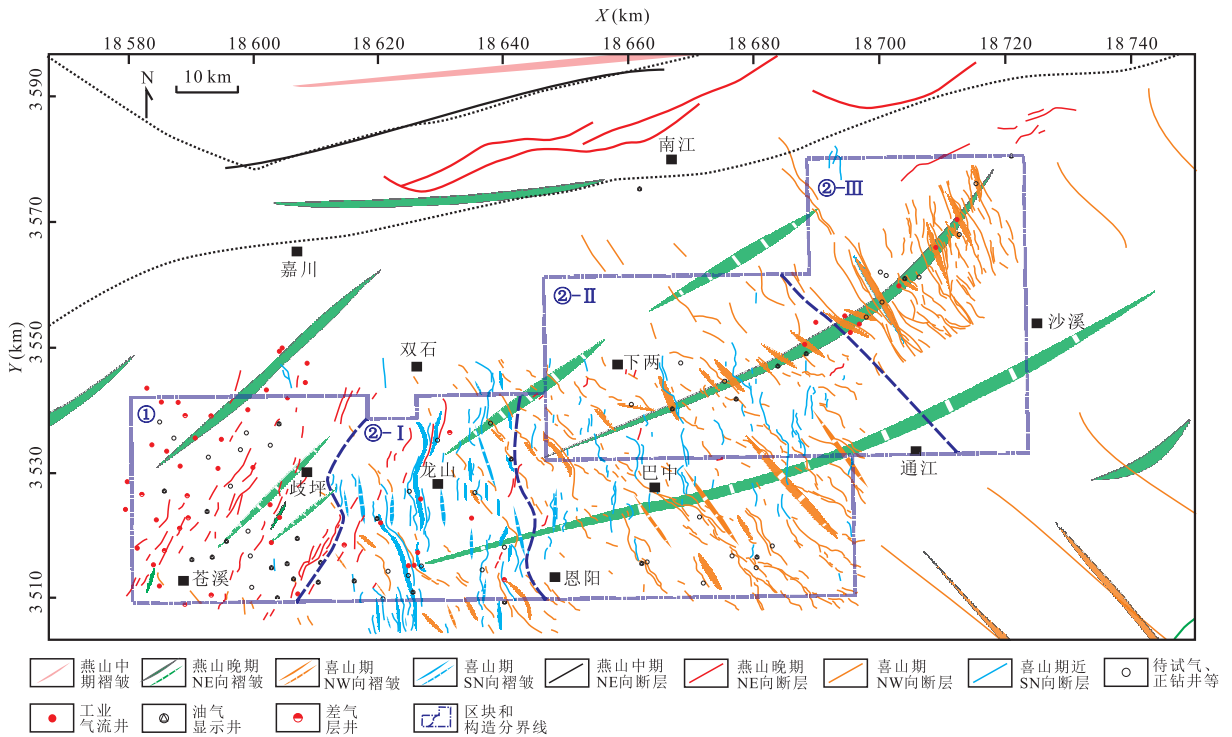


图 4 元坝—通南巴地区上三叠统须家河组四段顶部构造体系及构造分区

Fig.4 Structural system and tectonic division of the top of 4th member of Xujiahe Formation of the Upper Triassic in Yuanba-Tongnanba area

①为 NE 向弱变形区;②为 NE-NW 向叠加变形区;②-I 为 SN 向过渡变形带;②-II 为 NW-SN 向过渡变形带;②-III 为 NW 向密集变形带

方向逐渐减弱,波及到元坝中部截止,在元坝中部形成近 SN 向构造组合,局限于九龙山和通南巴 NE 向构造之间,对元坝西部影响较小(图 4)。燕山晚期和喜山早期两期关键构造期在元坝—通南巴地区陆相层系内形成的构造形态、规模、波及范围、作用方式存在差异,主要体现在构造切割和围限关系、褶皱形态和尺度差异、断裂走向、密度、切层深度、分布范围差异等方面。

3.1 燕山晚期

燕山晚期元坝—通南巴地区陆相层系主要形成宽缓的 NE 向褶皱和局部小型的 NE 向断裂。NE 向褶皱长轴方向延伸较长,褶皱幅度较宽缓。NE 向断裂分布在元坝西部地区,平面延伸长度较短,纵向切割层系少,主要发育在须家河组内部。燕山晚期控制局部构造的主要是 NE 向褶皱,在喜山早期遭受了非常强烈的改造(图 5,图 6)。

3.2 喜山早期

喜山早期元坝—通南巴地区陆相层系形成 NW 向、近 SN 向两组断裂及其相关褶皱,两组断裂的发育密度和平面延伸长度都远大于燕山晚期形成的 NE 向断裂。NW 向断裂主要发育在通南巴地区,自

通南巴东端向 SW 方向发展到元坝中部地区,呈逐渐减少趋势。近 SN 向断裂密集发育在元坝中部地区,向 NE 方向波及至通南巴西部地区。NW 向和近 SN 向褶皱受断层控制,相对于早期 NE 向褶皱而言,长轴方向延伸较短,褶皱幅度较为紧闭。NW 向褶皱发育在通南巴地区—元坝东部地区,到元坝中部—西部地区不再发育,近 SN 向褶皱集中发育在元坝中部地区。喜山早期对燕山晚期构造面貌的改造自通南巴地区向 SW 方向仅波及到了元坝中部地区,在元坝西部地区没有明显的喜山早期改造作用。喜山早期古构造面貌表现为以 NW 向构造行迹为主,局部发育近 SN 向构造行迹,燕山晚期形成的大型 NE 向构造行迹在通南巴东端—元坝中部地区已经被喜山早期的两种构造行迹强烈改造(图 5,图 7)。

3.3 构造分区

根据燕山晚期和喜山早期两个关键构造期在平面上的波及范围、作用方式的差异及叠加关系,笔者将元坝—通南巴地区划分两区四带(图 4,图 5,表 1)。

3.3.1 断裂特征差异 4 个构造带在断层走向、平面延伸长度、发育密度、断穿层位、形成时间等方面存

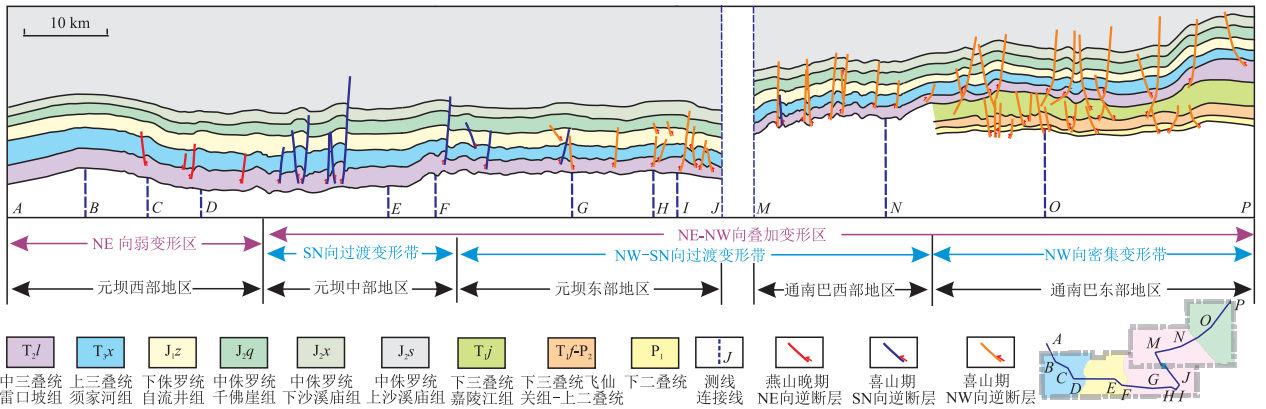


图 5 元坝—通南巴地区构造剖面

Fig.5 Structural cross section of Yuanba-Tongnanba area

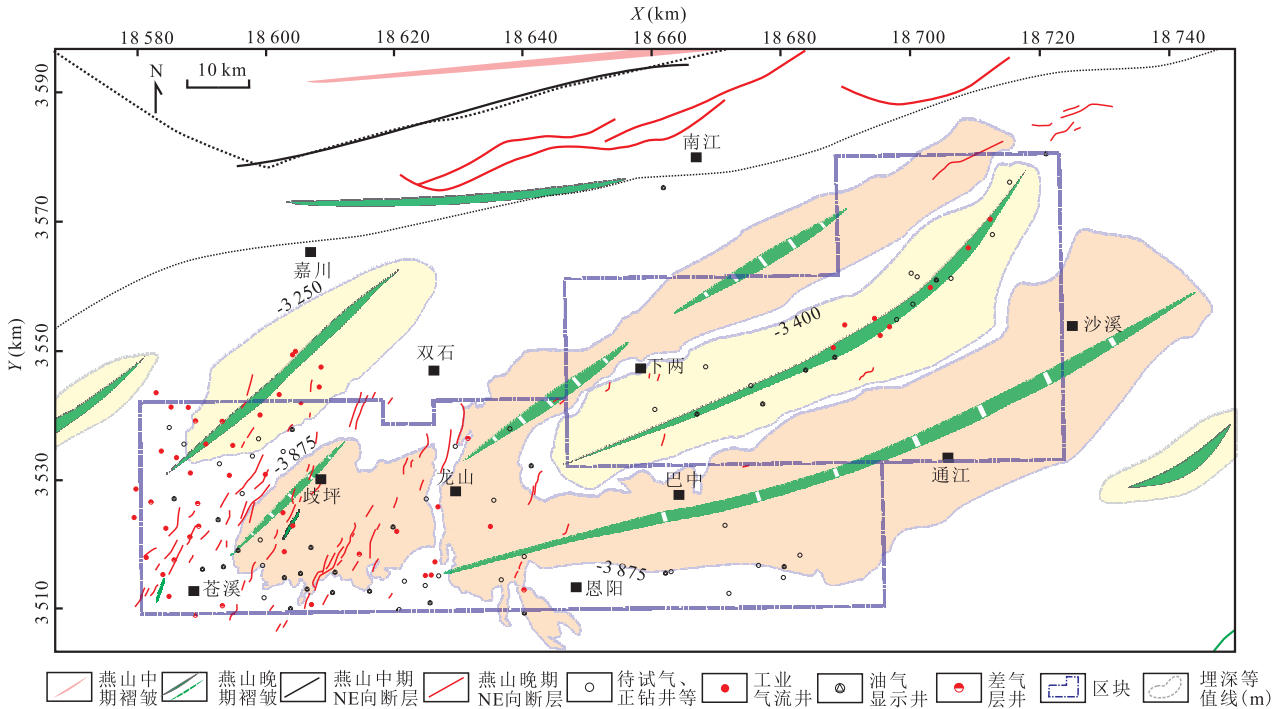


图 6 元坝—通南巴地区燕山晚期上三叠统须家河组四段顶部古构造格架

Fig.6 Late Yanshan epoch paleotectonic framework of the top of 4th member of Xujiahe Formation of the Upper Triassic in Yuanba-Tongnanba area

在显著差异.NE向弱变形带主要发育NE向断层,断层平面延伸长度较短,纵向上切穿层位较少,向下断至中三叠统雷口坡组,向上切至下侏罗统自流井组,少量断至中侏罗统千佛崖组,主要发育在上三叠统须家河组内部,发育密度较小.SN向过渡变形带主要发育近SN向断层,少量NW向断层,NE向断层很少.近SN向断层平面延伸长度相对较长,纵向上切穿层位较多,向下断至膏盐层,向上切至中侏罗统千佛崖组,少数断至中侏罗统上沙溪庙组,产状高陡,发育密度较大.NW-SN向过渡变形带主要发育

近SN向和NW向断层,NW向断层发育密度大于近SN向断层,SN向断层向东逐渐减少.元坝东部和通南巴西部NW向断层纵向断穿层位有差异,元坝东部地区断层断穿层位相对较少,向上多断至下侏罗统自流井组;通南巴西部断层断穿层位较多,多断至中侏罗统上沙溪庙组.NW向密集变形带主要发育NW向断层,发育密度大,平面延伸较长,纵向切割层位多,多数可以向上断至中侏罗统上沙溪庙组,向下可以断至海相地层(图5,图8,图9,表1).

3.3.2 褶皱特征差异 4个构造带的褶皱规模、走

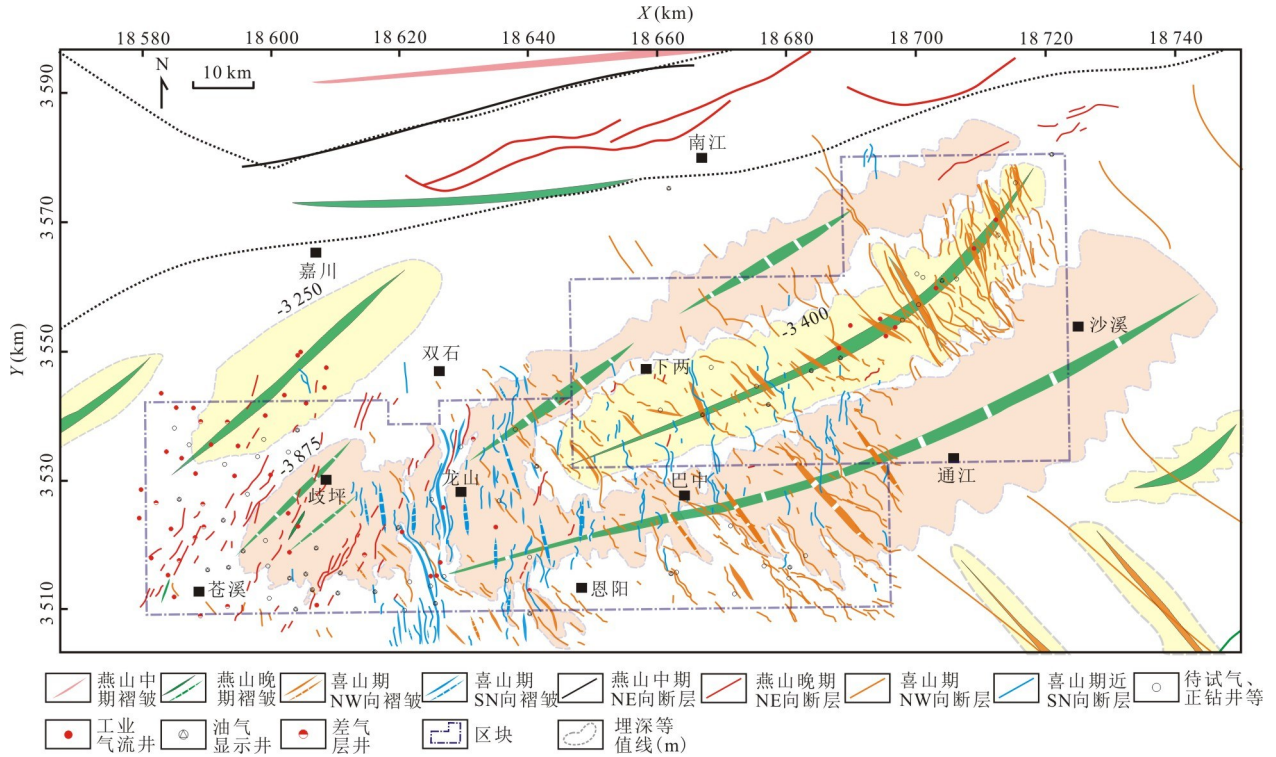


图 7 元坝—通南巴地区喜山早期上三叠统须家河组四段顶部古构造格架

Fig.7 Early Himalayan epoch paleotectonic framework of the top of 4th member of Xujiahe Formation of the Upper Triassic in Yuanba-Tongnanba area

表 1 元坝—通南巴地区各构造带断裂特征对比

Table 1 Comparison of fracture characteristics of each structural belt in Yuanba-Tongnanba area

构造区	NE 向弱变形区		NW-SN 向叠加变形区		
	构造带	构造带	构造带	构造带	构造带
地理位置	元坝西部	元坝中部	元坝东部	通南巴西部	通南巴东部
走向	NE 向	近 SN 向	SN, NW 向	SN, NW 向	NW 向
平面延伸长度	短	长	长	短	长
纵向切层层位	少, T _{2l} -J _{1z}	多, 膏岩-J _{2s}	多, 膏岩-J _{1z}	多, 膏岩-J _{2s}	多, 海相地层-J _{2s}
发育密度	小	大	NW>SN	NW>SN	大
形成时间	燕山晚期	喜山早期	喜山早期	喜山早期	喜山早期

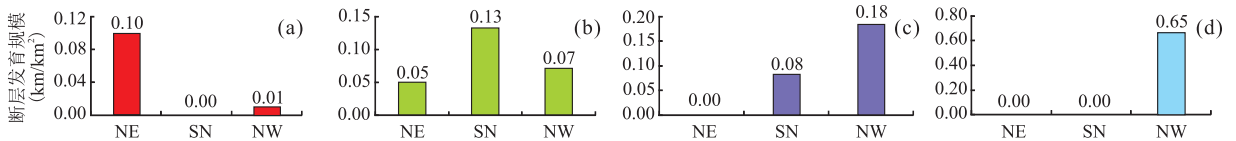


图 8 元坝—通南巴地区上三叠统须家河组四段顶部各构造带断层发育规模

Fig.8 Structure belts' fault scales of the top of 4th member of Xujiahe Formation of the Upper Triassic in Yuanba-Tongnanba area

a. NE 向弱变形带; b. SN 向过渡变形带; c. NW-SN 向过渡变形带; d. NW 向密集变形带

向、幅度、延伸长度、叠加情况、与断层关系、形成时间等方面存在差异。NE 向弱变形带主要发育 NE 向宽缓褶皱, 褶皱长轴方向延伸较长, 断层对其没有明显

的控制作用, 仅在局部形成简单的断背斜构造, 没有遭受喜山早期 NW 向构造的叠加改造。SN 向过渡变形带主要发育受 SN 向对冲、背冲或叠瓦状断层控制

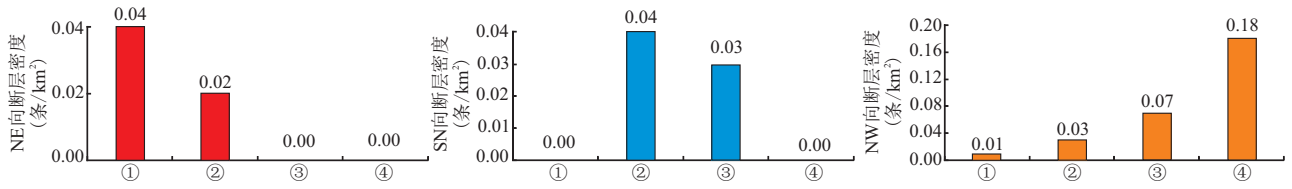


图 9 元坝—通南巴地区上三叠统须家河组四段顶部 3 种方向断层发育密度

Fig.9 Three direction faults' density of the top of 4th member of Xujiahe Formation of the Upper Triassic in Yuanba-Tongnanba area

①为 NE 向弱变形区;②为 SN 向过渡变形带;③为 NW-SN 向过渡变形带;④为 NW 向密集变形带

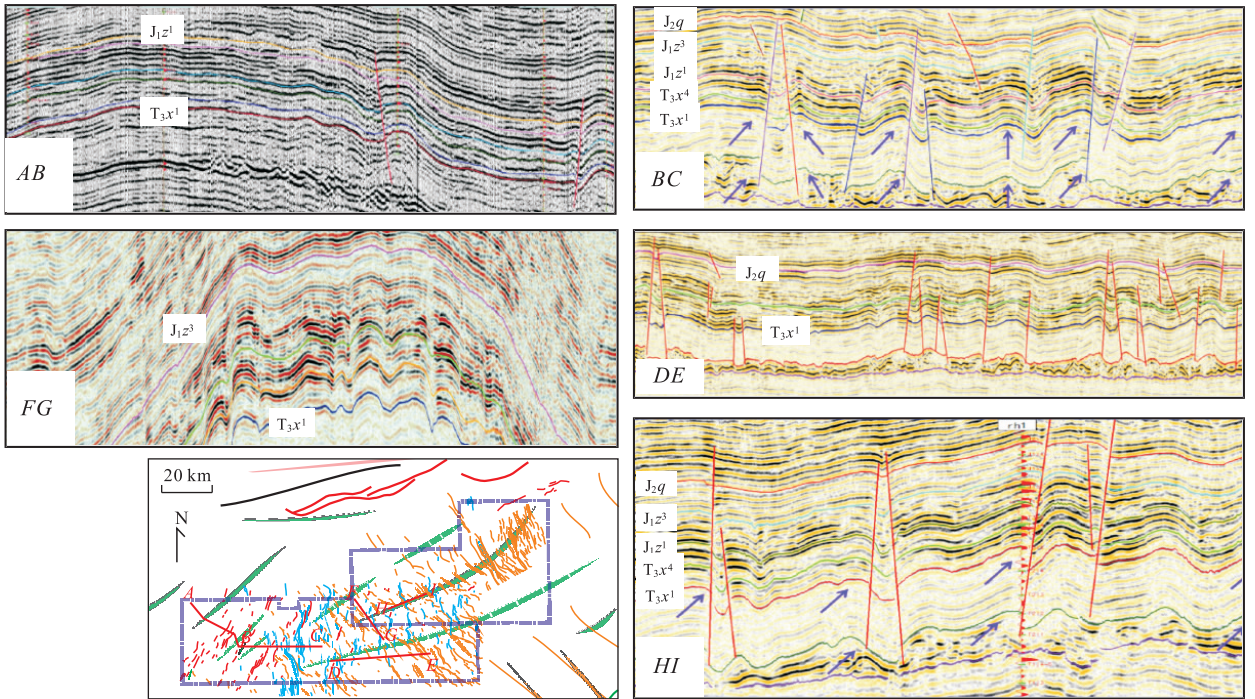


图 10 元坝—通南巴地区褶皱剖面

Fig.10 Fold sections in Yuanba-Tongnanba area

的短小、紧闭的褶皱,并被局限在早期 NE 向九龙山背斜和通南巴背斜之间.NW-SN 向过渡变形带和 NW 向密集变形带存在 NE 和 NW 两期褶皱的叠加, NW 向褶皱受断层控制,延伸长度短且紧闭,叠加在 NE 向宽缓大型褶皱之上,改造了早期 NE 向褶皱的形态(图 7,图 10).

4 构造—成藏响应关系

4.1 成藏要素差异性

4.1.1 生烃演化 元坝地区和通南巴地区的单井热史—埋藏史模拟结果(李军等,2016; Li *et al.*,2016; 李宏涛,2016)显示 2 个地区的陆相主力烃源岩生烃演化过程相似,上三叠统须家河组、中侏罗统和下侏罗统烃源岩大量生油时期分别为晚侏罗世—白垩纪、白

垩纪和白垩纪,早白垩世末期达到最大埋深之后处于高成熟阶段,未达到过成熟.白垩纪时期各套陆相烃源岩生烃量最大.

4.1.2 烃类赋存类型 元坝—通南巴地区陆相层系中可见固态烃、液态烃和气态烃共存.固态烃主要在元坝、通南巴地区须家河组发现,显示为赋存于储层石英颗粒裂纹中的沥青包裹体,不发光或发微弱白色荧光,说明存在高热演化的原油裂解气或湿气裂解气.液态烃较少,但在通南巴和元坝地区均可见,显示为石英颗粒裂纹及胶结物中的发黄、黄白色荧光的油包裹体,说明存在早期原油充注.纯气态烃包裹体和含气态烃盐水包裹体在元坝—通南巴地区普遍存在,赋存在储层石英颗粒裂纹、次生加大边和裂缝充填的方解石脉内,呈白色荧光,说明元坝—通南巴地区存在多期天然气充注,后期裂缝对天然气藏的贡献

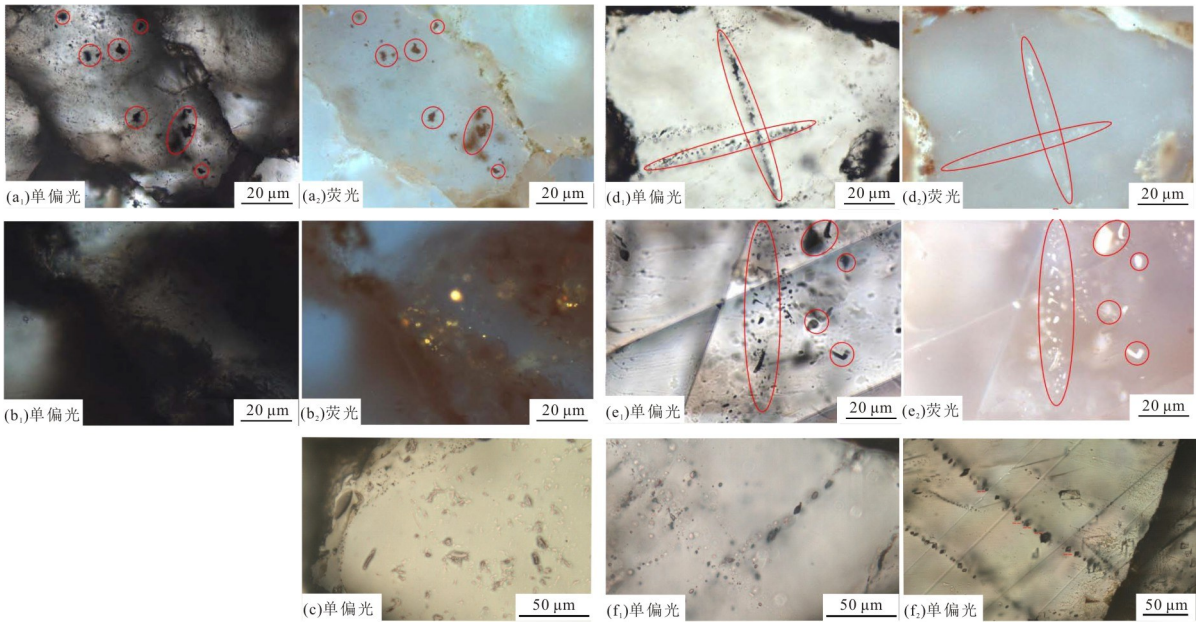


图 11 元坝—通南巴地区陆相致密砂岩层系烃类赋存类型及特征

Fig.11 Three kinds of hydrocarbon type in non-marine tight sandstone reservoirs in Yuanba-Tongnanba area

图 a、b、d、e 据盘昌林和王威^②(2013);图 c、f 据张枝焕^③(2015)。a.沥青包裹体(元坝 204 井须二段);b.油包裹体(马 201 井须二段);c.油包裹体(元坝 204 井须二段石英颗粒加大边);d.气态烃包裹体(元坝 6 井须四段方解石脉);e.气态烃包裹体(元坝 6 井须二段石英颗粒裂纹);f.气态烃包裹体(马 2 须二段、马 102 须四段石英颗粒裂纹)

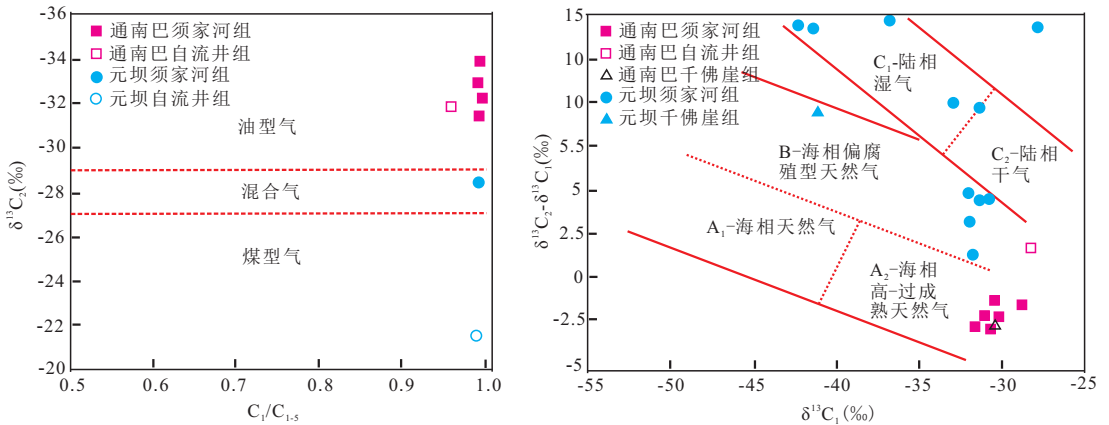


图 12 元坝—通南巴地区陆相层系天然气类型分析

Fig.12 Gas type in non-marine strata in Yuanba-Tongnanba area

数据来源据张枝焕^③(2015)

显著(图 11)。

4.1.3 天然气来源差异 元坝地区和通南巴地区的天然气类型和来源存在一定差异性。张枝焕^③(2015)根据天然气碳同位素相对含量估算天然气的混源比,认为通南巴地区海相油型气的贡献显著,占混合天然气的 83%~95%;元坝区块陆相成因天然气贡献显著,占混合天然气的 87%~93%。利用天然气的碳同位素

值的相互关系及其与干燥系数的相互关系可以区分天然气类型(图 12)。通南巴地区陆相层系赋存的天然气具有海相和陆相烃源岩混合来源特征,天然气成因类型为原油裂解气,海相原油裂解气为主导(主要来自上二叠统龙潭组烃源岩,混有下志留统龙马溪组烃源岩的贡献),陆相天然气为辅。元坝地区陆相层系天然气主要为陆相来源,天然气成因类型为干酪根裂解

②盘昌林,王威,2013.川东北须家河组天然气富集规律与增储领域(报告).成都:中国石油化工股份有限公司勘探南方分公司。

③张枝焕,2015.四川盆地屑岩领域油气富集规律与主控因素(报告).北京:中国石油大学。

气,存在混源气,以上三叠统须家河组、下侏罗统自流井组和中侏罗统千佛崖组烃源岩裂解气为主,含有少量原油裂解气和湿气裂解气。

4.1.4 天然气纵向富集层系差异 元坝地区和通南巴地区不同构造带内陆相层系天然气藏的纵向富集层位存在显著差异。NE 向弱变形区天然气藏主要赋存在上三叠统须家河组二段、三段和四段储层;SN 向过渡变形带存在浅层成藏,天然气藏赋存在上三叠统须家河组二段、四段和中侏罗统千佛崖组;NW-SN 向过渡变形带(元坝东部)天然气主要赋存在上三叠统须家河组四段储层;NW-SN 向过渡变形带(通南巴西部)天然气主要赋存在须家河组二段和四段储层;NW 向密集变形带天然气赋存层位多,分布于须家河组二段、四段、五段和中侏罗统千佛崖组、下沙溪庙组和上沙溪庙组(图 13)。天然气富集层位的差异主要是与不同构造带内断层纵向切割层位差异有关,相对而言,元坝中部 SN 向过渡变形带和通南巴东部 NW 向密集变形带存在侏罗系浅层成藏,其他 3 个构造带主要成藏层位为三叠系须家河组。

4.1.5 运移通道和运移距离差异 元坝地区 NE 向弱变形区天然气以砂体的侧向运移为主,近源,运移距离短;NE 向断层仅在须家河组内部起到局部输导作用;SN 向过渡变形带内存在 SN 向断层的纵向运移,导致中侏罗统千佛崖组的浅层成藏;NW-SN 向过渡变形带(元坝东部)内天然气以砂体的侧向运移为主,油气主要聚集在须家河组;通南巴地区 NW 向密集变形带内天然气以 NW 向断层的纵向运移为主,该成藏带内海相地层普遍发育 NW 向断层(图 13,图 14),与陆相地层发育的 NW 向断层构成纵向运移接力作用,导致海相天然气的纵向远源疏导,运移距离长,造成陆相层系内天然气海陆混源和纵向多层成藏。这种显著的海陆断层接力作用向 SW 方向截止在河坝 1 井附近,到 NW-SN 向过渡变形带(通南巴西部)海相地层内 NW 向断层发育较少(图 14)。

元坝和通南巴地区天然气甲烷碳同位素参数和天然气成熟度的差异也显示了 2 个地区天然气运移距离的差异。天然气甲烷碳同位素参数显示(张枝焕^⑤,2015),通南巴区块由深层向中浅层发生了较长距离的运移,元坝区块气藏内部可能没有发生较长距离的运移。天然气成熟度分析显示(张枝焕^⑤,2015),通南巴区块陆相层系天然气主要来源于下覆海相层系,属于远源输导。元坝区块陆相层系天然气主要来自自身陆相烃源岩,属于近源输导。

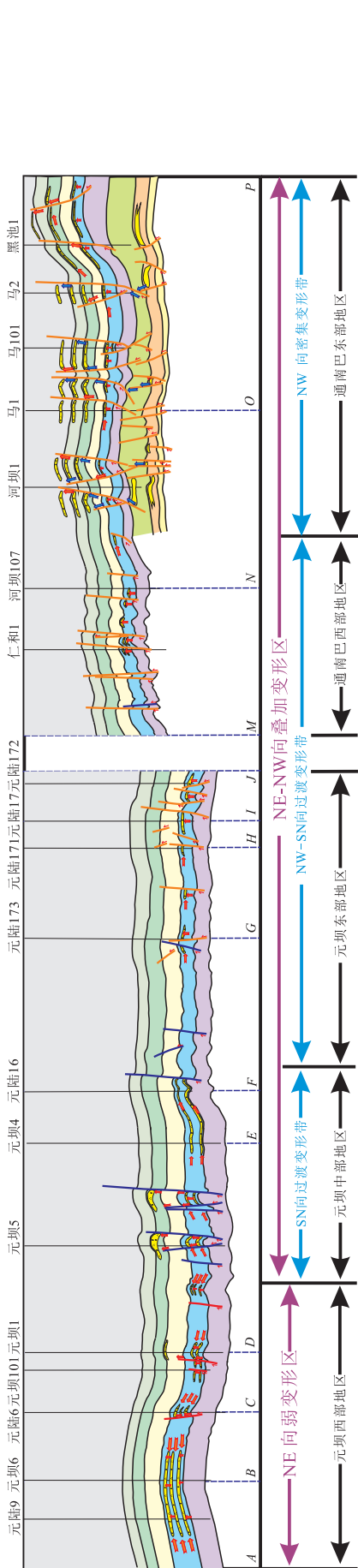
4.1.6 圈闭特征差异 NE 向弱变形区圈闭受燕山晚期形成的 NE 向背斜控制,断层控圈作用不明显;SN 向过渡变形带圈闭受喜山期形成的近 SN 向断层和狭长紧闭褶皱控制;NW-SN 向过渡带内,元坝东部圈闭主要受喜山期 NW 向构造控制,通南巴西部圈闭受燕山晚期的 NE 向主体背斜和喜山期 NW 断层切割变形共同控制;NW 向密集变形带圈闭受燕山晚期的 NE 向主体背斜和喜山期 NW 断层切割变形共同控制(图 10,图 13)。

4.1.7 储层特征及致密化过程 受物源、沉积、成岩、古地貌、构造活动等多种因素的影响,元坝—通南巴地区陆相碎屑岩储层发育层位、分布范围及物性等存在显著差异,但储层致密化和裂缝对储层的改造作用是其典型特征。三叠系须家河组和中—下侏罗统陆相碎屑岩储层目前处于晚成岩 B 亚期(龙胜祥等,2012),成岩作用强度大,在强烈压实、胶结等作用下,储层在早成岩阶段(晚三叠世—早侏罗世)因强烈压实作用和钙质胶结作用致密化,在中成岩阶段(中侏罗世—早白垩世)因压溶及其伴生的再次钙质/硅质胶结作用而超致密化,致密化程度极高,以超低孔、超低渗储层为主,属于超致密砂岩(张莉等,2017)。对于这种超致密砂岩储层而言,裂缝发育程度控制了储层发育程度已达成共识(樊靖宇等,2009;郭彤楼,2013;肖开华等,2014;王浩等,2016;李虎等,2018),而裂缝的发育主要受构造和岩性及岩性组合共同控制,在元坝—通南巴地区的 4 个构造带(区),裂缝发育程度和控缝因素存在差异。储层在早成岩—中成岩阶段(晚三叠世—早白垩世)已经发展为超致密化,燕山晚期和喜山早期构造作用形成的构造裂缝和沿裂缝发育的溶蚀孔隙改善储层物性,是天然气富集高产的关键因素。

4.1.8 关键构造期裂缝特征差异 燕山晚期元坝—通南巴地区陆相层系形成宽缓、大型的 NE 向褶皱,断层较少,而喜山早期则形成大量的 NW 向和近 SN 向断层及其相关褶皱,因此燕山晚期和喜山早期主要发育的裂缝类型、发育部位和控缝因素存在差异。

燕山晚期主要发育两种裂缝类型,一是受褶皱控制的裂缝,在褶皱变形过程中,转折端多为裂缝发育区;二是受单条断层控制的裂缝。喜山早期形成的 NW 向对冲、背冲断层组合样式是有效构造裂缝发育的优势构造样式,裂缝发育规模大,单井测试效果好。野外实测的单条断层控制的裂缝分布范围约 32 cm,而对冲、背冲多条断层控制的裂缝分布范围

喜山早期 (始新世-渐新世)



燕山晚期 (晚白垩世)

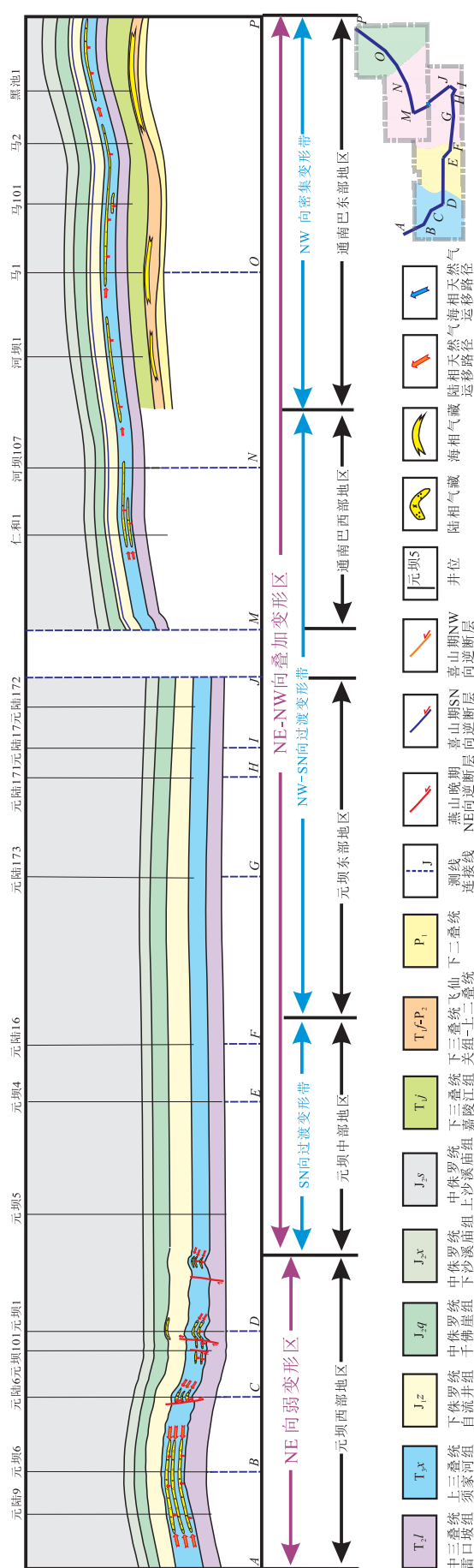


图13 元坝-通南巴地区陆相致密砂岩天然气成藏模式

Fig.13 The hydrocarbon accumulation pattern in non-marine tight sandstone reservoirs in Yuanba-Tongnanba area

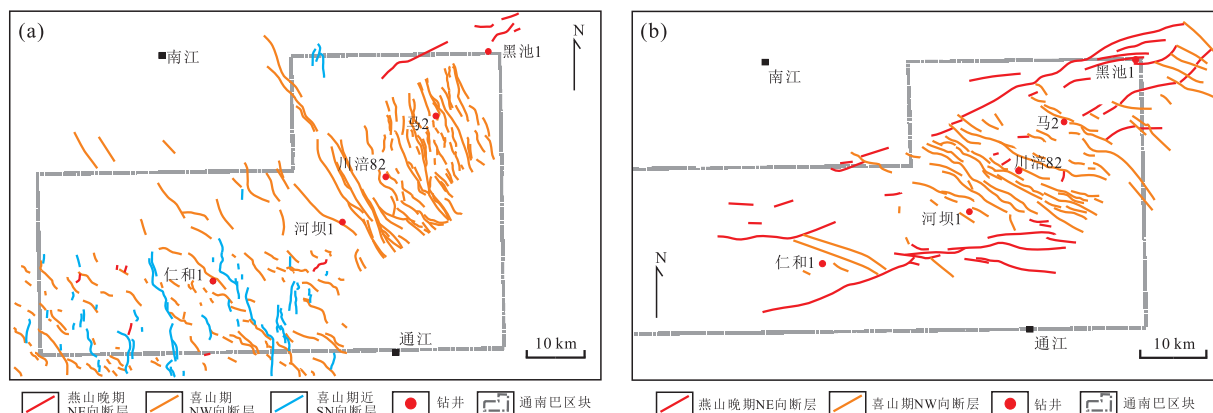


图 14 通南巴地区海相层系和陆相层系喜山期 NW 向断裂发育程度对比

Fig.14 The distribution of Early Himalayan epoch NW-trend faults in marine and non-marine strata in Tongnanba area

a. 上三叠统须家河组四段顶反射层断裂分布; b. 中二叠统顶反射层断裂分布

约 80 cm, 构造裂缝发育范围明显较大, 并且对应类型的单井测试日产气量显著高于单条断层控制的单井产气量。比如元陆 17 井、171 井、173 井均为背冲或对冲断层控制圈闭, 日产气为 12.73~22.64 万方; 而元陆 172 井为单条断层控制的圈闭, 日产气仅 2.02 万方。喜山早期构造形成的裂缝整体上比燕山晚期形成的裂缝规模大, 对油气改造程度高, 燕山晚期裂缝以改善储层物性为主, 喜山期裂缝以疏导油气和改善储层为主。

不同构造带内控制致密砂岩裂缝的因素不同, 以燕山晚期为关键构造期的 NE 向弱变形区(元坝西部)裂缝主要受褶皱控制; 以喜山早期为关键构造期的 SN 向过渡变形带(元坝中部)裂缝主要受单条断层控制; 以喜山早期为关键构造期的 NW-SN 向过渡变形带(元坝东部)裂缝主要受多条断层控制; 受两期关键构造期共同控制的 NW-SN 向过渡变形带(通南巴西部)和 NW 向密集变形带(通南巴东部)裂缝受燕山晚期背斜和喜山早期断层共同控制, 但相对而言, 燕山晚期 NE 向背斜控制的裂缝发育相对均一、发育程度较低, 在褶皱端部比翼部要发育; 而喜山早期 NW 向断层控制的裂缝发育强度更大, 且存在平面上的变化规律, 自 NW-SN 向过渡变形带(通南巴西部)向 NW 向密集变形带(通南巴东部), 裂缝发育程度越来越高, 控制裂缝的断层由形态简单的单条断层逐渐向形态复杂的单条断层、复杂的多条断层演变。

4.2 关键成藏期和关键改造期

在确定了元坝—通南巴地区存在燕山晚期(晚白垩世 100~70 Ma)和喜山早期(始新世—渐新世 40~25 Ma)两期关键构造期, 以及明确了两期关键

构造期的构造变形特征的基础上, 联合该地区不同构造带的生烃演化历史、储层致密化时间、烃类赋存状态、天然气来源分析、天然气富集层位、运移通道和距离、圈闭特征的对比分析, 可以明确元坝—通南巴地区 4 个构造带(区)内陆相致密砂岩储层天然气藏的关键成藏期和关键改造期。该地区陆相碎屑岩属于超致密储层, 后期裂缝的形成改造致密储层对天然气成藏非常关键, 是富集高产的控制因素。前文已经讨论, 燕山晚期和喜山早期均是该地区裂缝的主要形成时期, 只是裂缝发育部位以及控缝因素存在差异。陆相烃源岩在白垩纪生烃量最大, 储层在晚三叠世—早白垩世就已经成为超致密砂岩, 因此燕山晚期构造裂缝的形成促进了天然气聚集成藏, 燕山晚期(晚白垩世 100~70 Ma)是一期关键成藏期。而喜山早期大量 NW 向断层的形成再次伴生大量断层相关裂缝, 特别是在通南巴构造东部, 喜山期作用自东向西延伸至元坝中部地区, 在局部造成早期 NE 向圈闭中天然气藏在 NW 向圈闭中的调整再分配, 以及在某些未成藏的构造带和层位聚集成藏, 喜山早期(始新世—渐新世 40~25 Ma)是第二期关键成藏期和关键改造期。因 NW 向断层疏导作用造成的浅层成藏, 以及海陆天然气混源就是喜山早期天然气成藏或改造的证据。

4.2.1 关键成藏期 元坝—通南巴地区上三叠统须家河组和中—下侏罗统烃源岩大量生烃时期为晚侏罗世—白垩纪, 白垩纪生烃量最大, 陆相碎屑岩储层在晚三叠世—早白垩世时期逐步发展成超致密储层。燕山晚期构造作用使元坝—通南巴地区形成 NE 向宽缓背斜以及 NE 向断层, 伴生大量构造裂缝, 构造裂缝的形成及其伴生的溶蚀作用改善了超致密储

表2 元坝—通南巴地区构造—成藏响应特征

Table 2 Tectonic-accumulation response characteristics in Yuanba-Tongnanba area

构造分带	关键成藏期	关键改造期及程度	控缝要素	层系差异	烃源差异	
NE向弱变形区	燕山晚期	弱改造	褶皱控缝	浅层少成藏	陆源	近源
SN向过渡变形带	喜山早期	弱改造	断裂控缝	浅层多成藏	陆源	近源
NW-SN向过渡变形带(元坝东部)	喜山早期	弱改造	断裂控缝	浅层少成藏	陆源	近源
NW-SN向过渡变形带(通南巴西部)	燕山晚期	喜山早期强改造	褶皱—断裂联控	浅层少成藏	海陆混源,以陆为主	近源为主,局部远源
NW向密集变形带	燕山晚期	喜山早期强改造	褶皱—断裂联控	浅层多成藏	海陆混源,以海为主	近源+远源

层的物性,天然气在该时期形成的NE向构造圈闭中聚集成藏,但4个构造变形带(区)的关键成藏期有所差异,NE向弱变形区、NW-SN向过渡变形带(通南巴西部)和NW向密集变形带在燕山晚期形成NE向构造圈闭,陆相烃源岩生烃的天然气在NE向背斜圈闭中聚集成藏,关键成藏期是燕山晚期。SN向过渡变形带和NW-SN向过渡变形带(元坝东部)的圈闭主要受控于喜山早期形成的近SN向和NW向断层,关键成藏期为喜山早期(图13)。

4.2.2 关键改造期 NE向弱变形区(元坝西部)基本不存在喜山早期NW向断层改造,后期构造运动对油气聚集影响较小;SN向过渡变形带(元坝中部)和NW-SN向过渡变形带(元坝东部)成藏期即为喜山早期,喜山晚期四川盆地的整体抬升对油气影响较小。喜山早期大巴山向盆内的挤压作用对油气聚集的影响主要波及到NW向密集变形带(通南巴东部)和NW-SN向过渡变形带(通南巴西部),对在燕山晚期聚集成藏的天然气藏造成了显著的改造作用,使其再分配,在局部浅层聚集成藏;并且因海相地层和陆相地层均形成了NW向断层,海相接力断层造成局部海相天然气大幅度混源,构造作用形成大量裂缝改善储层和运移,但喜山早期的改造作用在NW-SN向过渡变形带(通南巴西部)和NW向密集变形带(通南巴东部)的表现也存在一定差异,NW-SN向过渡变形带(通南巴西部)喜山早期NW向构造改造了早期NE向背斜中聚集的气藏位置,但未造成大范围混源和浅层成藏;NW向密集变形带(通南巴东部)喜山早期NW向构造强烈改造了早期气藏,造成以海相来源为主的海陆混源和浅层成藏(图13)。

4.3 构造—成藏响应模式

元坝—通南巴地区陆相致密砂岩天然气富集复杂性体现在多源成烃、成藏的时间、空间和成分差异,以及构造改造作用的差异。天然气存在海相层系烃源岩来源和陆相层系烃源岩来源的多层系源,固

态、液态和气态烃类的共存说明了天然气存在原油或湿气裂解气以及干酪根裂解气的多转化源。燕山晚期的构造作用使天然气局部富集成藏,但喜山早期的构造改造作用造成了显著的改造差异,体现在各构造带内改造程度、NW向断层构成纵向运移通道、深部海相天然气混源、NW向断层和近SN向断层对早期圈闭的改造、构造裂缝改善储层和侧向运移等方面。不同成藏带的差异性整体体现在时间差异、空间差异和成分差异。时间差异指存在燕山晚期和喜山早期两期关键成藏期,空间差异指因为断层和裂缝导致的天然气富集层位的调整,成分差异指海相原油裂解气和陆相干酪根裂解气的混源差异。

天然气富集主要受燕山晚期和喜山早期两次关键构造作用的控制,不同构造变形带的天然气成藏模式对这两期关键构造期构造作用的响应存在差异。燕山晚期是NE向弱变形区、NW-SN向过渡变形带(通南巴西部)和NW向密集变形带的关键成藏期,构造—成藏响应模式为早期成藏、陆源充注、背斜控藏、褶皱控缝。喜山早期是SN向过渡变形带和NW-SN向过渡变形带(元坝东部)的关键成藏期,也是NW-SN向过渡变形带(通南巴西部)和NW向密集变形带的关键改造期,构造—成藏响应模式为晚期成藏、海相混源、断裂控藏、断裂控缝(图13,表2)。

5 结论

(1)四川盆地元坝—通南巴地区存在燕山晚期(晚白垩世100~70 Ma)和喜山早期(始新世—渐新世40~25 Ma)两个关键构造期。燕山晚期在米仓山和龙门山作用下,形成NE向主体构造;喜山早期在以南大巴山为主导和龙门山联合作用下,形成NW向构造和局限在早期NE向构造之间的近SN向构造。

(2)燕山晚期元坝—通南巴地区陆相层系主要形成宽缓的NE向褶皱和局部小型的NE向断裂;

喜山早期元坝一通南巴地区陆相层系形成 NW 向、近 SN 向两组断裂及其相关褶皱。两期关键构造期在陆相层系内的构造波及范围、作用方式存在差异,并在局部存在叠加关系,形成的构造形态、规模、波及范围、作用方式存在差异,构造差异性主要体现在构造切割和围限关系、褶皱形态和尺度、断裂走向、密度、切层深度、分布范围方面。

(3) 陆相致密砂岩天然气富集主要受两次关键构造作用的控制,燕山晚期是 NE 向弱变形区、NW-SN 向过渡变形带(通南巴西部)和 NW 向密集变形带的关键成藏期,构造一成藏响应模式为早期成藏、陆源充注、背斜控藏、褶皱控缝。喜山早期是 SN 向过渡变形带和 NW-SN 向过渡变形带(元坝东部)的关键成藏期,也是 NW-SN 向过渡变形带(通南巴西部)和 NW 向密集变形带的关键改造期,构造一成藏响应模式为晚期成藏、海相混源、断裂控藏、断裂控缝。

References

- Chen, L. B., He, D. F., Wang, B., et al., 2017. Dating the Tectonic Deformation since the Middle Triassic for the Tongnanba Anticline in the Northeastern Sichuan Basin and Its Geological Implications. *Geotectonica et Metallogenia*, 41 (3): 433—445 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, L. X., Wang, W., Wang, T., et al., 2017. Reasons for the Productivity Difference of Quartz Sandstone Gas Reservoirs of Upper Triassic Xu 2 Member between Yuanba and Malubei Areas in NE Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 37(8): 14—21 (in Chinese with English abstract).
- Dai, J. X., Ni, Y. Y., Wu, X. Q., et al., 2012. Tight Gas in China and Its Significance in Exploration and Exploitation. *Petroleum Exploration and Development*, 39 (3): 257—264 (in Chinese with English abstract).
- Dai, J. X., Liao, F. R., Ni, Y. Y., et al., 2013. Discussions on the Gas Source of the Triassic Xujiahe Formation Tight Sandstone Gas Reservoirs in Yuanba and Tongnanba, Sichuan Basin: An Answer to Yinfeng et al. *Petroleum Exploration and Development*, 40 (2): 250—256 (in Chinese with English abstract).
- Fan, C. H., Tao, J. L., Zhou, K., et al., 2017. Fractal Characteristics of Fracture of Xujiahe Formation in Fault-Fold Belt of Central Yuanba Area. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 39(1): 35—42 (in Chinese with English abstract).
- Fan, J. Y., Qin, Q. R., Su, P. D., et al., 2009. Fracture Genesis in Tongnanba Structural Belt. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 16(1): 38—41 (in Chinese with English abstract).
- Guo, T. L., 2013. Key Controls on Accumulation and High Production of Large Non-Marine Gas Fields in Northern Sichuan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 40 (2): 139—149 (in Chinese with English abstract).
- Jin, W. Z., Wan, G. M., Cui, Z. H., et al., 2012. Key Tectonic Change Epoch and Hydrocarbon Accumulation Periods of Continental Clastic Reservoir in Sichuan Basin. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 19 (3): 273—277 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, L., Deng, B., Liu, S. G., et al., 2018. Differential Uplift and Fragmentation of Upper Yangtze Basin in Cenozoic. *Earth Science*, 43(6): 1872—1886 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.597>
- Lei, Y. L., Jia, C. Z., Li, B. L., et al., 2012. Meso-Cenozoic Tectonic Events Recorded by Apatite Fission Track in the Northern Longmen-Micang Mountains Region. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 86(1): 153—165. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2012.00618.x>
- Li, H., Fan, C. H., Qin, Q. R., et al., 2018. Fracture Characteristics and Its Genesis of Tight Reservoir in Xujiahe Formation of Central Yuanba Area in Sichuan Basin. *Reservoir Evaluation and Development*, 8 (2): 1—6 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. T., 2016. Accumulation Process and Pattern of Oolitic Shoal Gas Pools in the Platform: A Case from Member 3 of Lower Triassic Feixianguan Formation in the Heba Area, Northeastern Sichuan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 43 (5): 723—732 (in Chinese with English abstract).
- Li, J., Hu, D. F., Zou, H. Y., et al., 2016. Coupling Relationship between Reservoir Diagenesis and Gas Accumulation in Xujiahe Formation of Yuanba-Tongnanba Area, Sichuan Basin, China. *Natural Gas Geoscience*, 27 (7): 1164—1178 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. R., Zhu, H., Fen, X. M., et al., 2016. Differences of Fracture Characteristics and the Influence on Productivity in the Northeastern Sichuan Continental Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 38(6): 742—747 (in Chinese with English abstract).
- Li, P. P., Hao, F., Guo, X. S., et al., 2016. Origin and Distribution of Hydrogen Sulfide in the Yuanba Gas Field, Sichuan Basin, Southwest China. *Marine and Petroleum Geology*, 75: 220—239. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.04.021>
- Liu, Z. Q., 2011. Hydrocarbon Accumulation in Marine Strata at Critical Tectonic Moment in Southern Middle and Upper Yangtze Intra-Continental Structural Belt, South

- China (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Long, S. X., Xiao, K. H., Li, X. P., et al., 2012. Gas Accumulation Conditions and Exploration Strategies of Mesozoic Terrestrial Strata in the Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 32 (11): 10—17 (in Chinese with English abstract).
- Luo, L., Qi, J. F., Zhang, M. Z., et al., 2015. Difference Study on Evolution and Deformation of the Fold-Thrust Belts Surrounding Sichuan Basin. *Geological Review*, 61 (3): 525—535 (in Chinese with English abstract).
- Magoon, L. B., Dow, W. G., 1994. The Petroleum System—From Source to Trap. AAPG Memoir 60. American Association of Petroleum Geologists, Tulsa.
- Qin, S. F., Zhang, Y. H., Zhao, C. Y., et al., 2018. Geochemical Evidence for in Situ Accumulation of Tight Gas in the Xujiahe Formation Coal Measures in the Central Sichuan Basin, China. *International Journal of Coal Geology*, 196: 173—184. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2018.07.009>
- Tang, L. J., Jin, W. Z., He, C. B., et al., 2009. Key Tectonic Changes and Staging Differential Structural Deformation in Superimposed Basins. *Xinjiang Petroleum Geology*, 30 (2): 163—167 (in Chinese with English abstract).
- Tang, L. J., Jin, Z. J., Jia, C. Z., et al., 2001. Tectonic Analysis of Superimposed Basins. *Experimental Petroleum Geology*, 23 (3): 251—255 (in Chinese with English abstract).
- Tian, Y. T., Kohn, B. P., Zhu, C. Q., et al., 2012. Post-Orogenic Evolution of the Mesozoic Micang Shan Foreland Basin System, Central China. *Basin Research*, 24 (1): 70—90. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2011.00516.x>
- Wang, H., Zhou, W., Zhang, C., et al., 2016. Reservoir Characteristics and Main Controlling Factor of the Third Member of Xujiahe Formation in Yuanba Gas Reservoir. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 38 (4): 19—26 (in Chinese with English abstract).
- Wu, X. Q., Chen, Y. B., Liu, Q. Y., et al., 2019. Molecular Geochemical Characteristics of Source Rocks in the 5th Member of the Upper Triassic Xujiahe Formation, Xinchang Gas Field, Western Sichuan Depression. *Earth Science*, 44 (3): 859—871 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.000>
- Wu, Z. T., Liu, X. W., Li, X. F., et al., 2017. The Application of Noble Gas Isotope in Gas-Source Correlation of Yuanba Reservoir, Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 28 (7): 1072—1077 (in Chinese with English abstract).
- Xie, X. Q., Guan, P., Han, D. K., et al., 2014. Geochemical Characteristics and Source of Terrestrial Reservoir Gas in Northeast Sichuan. *Natural Gas Geoscience*, 25 (S1): 131—140 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, K. H., Li, H. T., Jia, S., et al., 2014. Characteristics of Calcarenaceous Sandstone Reservoirs and Gas Accumulation Control Factors of the 3rd Member of Xujiahe Formation in Yuanba Area, Northeast Sichuan Basin. *Oil & Gas Geology*, 35 (5): 654—660 (in Chinese with English abstract).
- Yang, R., He, S., Li, T. Y., et al., 2016. Origin of Over-Pressure in Clastic Rocks in Yuanba Area, Northeast Sichuan Basin, China. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 30: 90—105. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.01.043>
- Yang, Z., Ratschbacher, L., Jonckheere, R., et al., 2013. Late-Stage Foreland Growth of China's Largest Orogens (Qinling, Tibet): Evidence from the Hannan-Micang Crystalline Massifs and the Northern Sichuan Basin, Central China. *Lithosphere*, 5 (4): 420—437. <https://doi.org/10.1130/l260.1>
- Yang, Z., Shen, C. B., Ratschbacher, L., et al., 2017. Sichuan Basin and beyond: Eastward Foreland Growth of the Tibetan Plateau from an Integration of Late Cretaceous-Cenozoic Fission Track and (U-Th)/He Ages of the Eastern Tibetan Plateau, Qinling, and Daba Shan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122 (6): 4712—4740. <https://doi.org/10.1002/2016jb013751>
- Yu, D. D., Tang, L. J., Yu, Y. X., et al., 2016. Differential Structural Evolution and Its Influence on the Natural Gas Accumulation of Continental Strata in the Western and Northeastern Sichuan Basin. *Geoscience*, 30 (5): 1085—1095 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L., Zou, H. Y., Hao, F., et al., 2017. Characteristics and Densification Causes and of Highly-Tight Sandstone of the Xujiahe Formation (T_3x^2) in the Yuanba Area, Northeastern Sichuan Basin. *Acta Geologica Sinica*, 91 (9): 2105—2118 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q. F., Chen, Z. Q., Zhao, Y. Q., et al., 2013. Relationship between Tectonic Evolution and Hydrocarbon Accumulation in the Changxing and Feixianguan Fms in the Frontal Concealed Structural Zone of Micangshan Mountain, Northeastern Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 33 (5): 24—29 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈龙博,何登发,王贝,等,2017.川东北地区通南巴背斜中三叠世以来构造变形时间厘定及其地质意义.大地构造与成矿学,41(3):433—445.
- 程立雪,王威,王涛,等,2017.川东北元坝、马路背地区上三

- 叠统须二段石英砂岩储层天然气产能差异的原因. 天然气工业, 37(8): 14-21.
- 戴金星, 倪云燕, 吴小奇, 等, 2012. 中国致密砂岩气及在勘探开发上的重要意义. 石油勘探与开发, 39(3): 257-264.
- 戴金星, 廖凤蓉, 倪云燕, 等, 2013. 四川盆地元坝和通南巴地区须家河组致密砂岩气藏气源探讨——兼答印峰等. 石油勘探与开发, 40(2): 250-256.
- 范存辉, 陶佳丽, 周坤, 等, 2017. 元坝中部断褶带须家河组裂缝分形特征. 西南石油大学学报(自然科学版), 39(1): 35-42.
- 樊靖宇, 秦启荣, 苏培东, 等, 2009. 通南巴构造带裂缝成因研究. 特种油气藏, 16(1): 38-41.
- 郭彤楼, 2013. 四川盆地北部陆相大气田形成与高产主控因素. 石油勘探与开发, 40(2): 139-149.
- 金文正, 万桂梅, 崔泽宏, 等, 2012. 四川盆地关键构造变革期与陆相油气成藏期次. 断块油气田, 19(3): 273-277.
- 姜磊, 邓宾, 刘树根, 等, 2018. 上扬子盆地新生代差异抬升剥蚀与分异过程. 地球科学, 43(6): 1872-1886. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.597>
- 李虎, 范存辉, 秦启荣, 等, 2018. 川东北元坝中部地区须家河组致密储层裂缝特征及成因探讨. 油气藏评价与开发, 8(2): 1-6.
- 李宏涛, 2016. 台内鲕粒滩气藏成藏过程与模式——以川东北河坝地区下三叠统飞仙关组三段为例. 石油勘探与开发, 43(5): 723-732.
- 李军, 胡东风, 邹华耀, 等, 2016. 四川盆地元坝—通南巴地区须家河组致密砂岩储层成岩—成藏耦合关系. 天然气地球科学, 27(7): 1164-1178.
- 黎静容, 朱桦, 冯晓明, 等, 2016. 川东北陆相储层裂缝特征差异性及其对产能的影响. 石油实验地质, 38(6): 742-747.
- 刘昭茜, 2011. 中、上扬子区南部陆内构造带关键构造期海相油气成藏作用研究(博士学位论文). 武汉: 中国地质大学.
- 龙胜祥, 肖开华, 李秀鹏, 等, 2012. 四川盆地陆相层系天然气成藏条件与勘探思路. 天然气工业, 32(11): 10-17.
- 罗良, 漆家福, 张明正, 等, 2015. 四川盆地周缘冲断带构造演化及变形差异性研究. 地质论评, 61(3): 525-535.
- 汤良杰, 金文正, 何春波, 等, 2009. 叠合盆地关键构造变革期与分期差异构造变形. 新疆石油地质, 30(2): 163-167.
- 汤良杰, 金之钧, 贾承造, 等, 2001. 叠合盆地构造解析几点思考. 石油实验地质, 23(3): 251-255.
- 王浩, 周文, 张冲, 等, 2016. 元坝气藏须家河组三段储层特征与主控因素. 西南石油大学学报(自然科学版), 38(4): 19-26.
- 吴小奇, 陈迎宾, 刘全有, 等, 2019. 川西坳陷新场气田须家河组烃源岩分子地球化学特征. 地球科学, 44(3): 859-871. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.000>
- 件宗涛, 刘兴旺, 李孝甫, 等, 2017. 稀有气体同位素在四川盆地元坝气藏气源对比中的应用. 天然气地球科学, 28(7): 1072-1077.
- 谢小琴, 关平, 韩定坤, 等, 2014. 川东北陆相储层天然气地球化学特征及来源分析. 天然气地球科学, 25(S1): 131-140.
- 肖开华, 李宏涛, 贾爽, 等, 2014. 川东北元坝地区须三段钙屑砂岩储层特征及控气因素. 石油与天然气地质, 35(5): 654-660.
- 于冬冬, 汤良杰, 余一欣, 等, 2016. 川西和川东北地区差异构造演化及其对陆相层系天然气成藏的影响. 现代地质, 30(5): 1085-1095.
- 张莉, 邹华耀, 郝芳, 等, 2017. 川东北元坝地区须家河组储层特征与超致密成因探讨. 地质学报, 91(9): 2105-2118.
- 张庆峰, 陈祖庆, 赵永庆, 等, 2013. 米仓山前缘隐伏构造带构造演化与长兴—飞仙关组油气成藏的关系. 天然气工业, 33(5): 24-29.