

川南天宫堂地区反转构造特征与演化

陈珂磷¹ 陈伟¹ 文冉² 樊骥铨² 张渝¹ 余养里¹

1. 西南石油大学地球科学与技术学院, 成都;

2. 四川长宁天然气开发有限责任公司, 成都

摘要 | 天宫堂地区位于四川盆地西南缘, 是海相页岩气的重要勘探目标区, 其多期构造叠加作用导致构造演化历史复杂。本研究通过三维地震资料综合解释分析, 首次揭示了该区加里东晚期具有伸展断陷构造特征。综合构造变形几何解析, 明确了天宫堂地区经历加里东晚期拉张断陷, 加里东末期挤压反转以及中新世强烈挤压3个主要的变形时期, 并应用平衡恢复技术建立了区域运动学演化过程。本文系统识别了早期断陷的地震响应特征, 阐述了反转构造的几何样式与运动学机制, 探讨了多期构造叠加对页岩气保存与富集的影响, 为川南复杂构造区页岩气勘探提供了重要的地质依据。

关键词 | 川南; 天宫堂; 拉张; 反转; 演化

Copyright © 2026 by authorx (s) and SciScan Publishing Limited

This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



天宫堂地区位于四川盆地西南缘, 是我国海相页岩气战略突破的重点目标区之一^[1-3]。初期部署的探井显示了该区五峰-龙马溪组页岩气具有显著的资源潜力^[4-6], 但由于地处川西、川南构造叠加部位, 自晚古生代以来, 天宫堂地区受到多期次构造变形的影响, 导致区内断裂体系复杂, 构造演化不清, 严重制约了页岩气的进一步勘探开发^[7, 8]。

受印度板块与亚洲南缘碰撞的远程效应影响, 天宫堂地区在新生代发育大规模挤压逆冲退覆构造, 形成了1号断层和天宫堂背斜等主体构造^[9]。强烈的挤压变形对早期构造变形的痕迹进行了强烈叠加改造, 致使新生代以前的构造变形无法被准确厘定。因此, 揭示早期构造特征、恢复多期构造演化序列, 对于理解该区页岩气成

藏条件、评价保存单元具有重要意义。

本研究基于天宫堂高精度三维地震资料, 综合运用构造定量分析、地震资料解释, 以及构造平衡恢复技术, 复原了区域新生代之前的构造样式, 揭示了区域加里东晚期的拉张作用和加里东末期的挤压作用, 重建了区域反转构造的运动学过程, 为川南地区构造演化及页岩气勘探开发提供了支撑。

1 研究区地质概况

天宫堂地区位于四川盆地西南缘, 大地构造位置处于上扬子地块西北部与龙门山冲断带前缘的转换交接部位^[10]。区域地层发育完整, 自下古生界至新生代均

基金项目: 中国石油天然气集团公司—西南石油大学创新联合体合作项目“川南深层海相页岩气多幕构造演化及构造裂缝预测技术研究”(2020CX020100)。

通讯作者: 张渝, 西南石油大学地球科学与技术学院硕士研究生, 研究方向: 构造地质学。

文章引用: 陈珂磷, 陈伟, 文冉, 等. 川南天宫堂地区反转构造特征与演化 [J]. 环境与资源, 2026, 8 (1): 114-118.

<https://doi.org/10.35534/er.0801014>

有出露,其中下古生界以寒武系筇竹寺组、奥陶系五峰组、志留系龙马溪组等海相页岩层系为主体,累计厚度逾500m,构成页岩气勘探的主要目的层系。中生界则以三叠系须家河组陆相碎屑岩和侏罗系红色砂泥岩为主,形成区域性盖层^[11]。区内构造样式复杂,主要表现为北西走向的褶皱与逆冲断层系统,其中天宫堂背斜为区内主体构造,由1号断层主控,为典型的断层传播褶皱,属于基底卷入式构造^[12]。背斜整体长度达数十公里,翼部地层倾角较小,核部出露地层较老,翼部逐渐过渡为较新地层。

区域构造演化受控于扬子板块与周缘块体的多期相互作用。加里东期以来,该区经历了从拉张到挤压的多期应力场转换,形成了复杂的构造叠加样式。新生代以来,受印度板块与欧亚板块碰撞远程效应影响,区域应力场以近东西向挤压为主,导致早期构造发生强烈反转与改造,形成了现今的构造格局。

2 天宫堂地区早期断陷特征识别

天宫堂加里东晚期拉张构造在前人研究中未被提及,主要原因是天宫堂后期构造变形以挤压逆冲褶皱为主,早期拉张构造已被改造、反转、叠加,不易识别,因而被忽视。然而,早期拉张构造的识别对于恢复区域构造演化序列、理解页岩气储层形成与改造过程具有重要意义。

2.1 拉张构造的地质与地震响应特征

拉张背景下,地壳减薄,发育正断层,正断层上盘显著下降,创造了良好的沉积空间,往往形成一系列沉积盆地——断陷盆地。断陷盆地的构造样式受正断层的数量和形态控制,存在不同的剖面样式,最为典型的有两种:地堑式和半地堑式。其中,半地堑式具有一条主控正断层,不同区域上盘的下降存在差异,越靠近正断层位置,地层下降越多,远离断层位置则逐渐减小。由于沉积作用存在“填平补齐”的特点,因此在正断层活动过程中沉积的地层厚度也存在侧向差异——靠近正断层位置的同沉积地层厚度显著大于其他位置,沉积厚度随距离断层距离的增大而减小,平面上呈类似楔状的不

对称形态。这种半地堑的“楔状”同沉积特征是拉张环境的独特构造标志,因而具有良好的构造指示作用。

在三维地震剖面上,拉张断陷通常表现为以下特征:(1)同沉积地层厚度在断层下降盘明显增大,向远离断层方向逐渐减薄;(2)地层内部反射结构呈楔形发散样式;(3)断层两侧地层厚度差异显著,且断层上盘地层可能遭受剥蚀;(4)在拉张后期或挤压反转初期,可能发育生长断层及相关滚动背斜。这些地震相特征为识别早期拉张构造提供了重要依据。

2.2 天宫堂地区加里东晚期断陷的地震证据

基于天宫堂地区三维地震资料分析解释表明天宫堂背斜前翼,一号断层下盘位置存在典型的楔状沉积(图1)。但二叠系底与下伏地层存在显著的角度不整合,仅从该现象判断该楔状层系也可能是东侧抬升剥蚀造成的残余厚度差异。本研究测量了天宫堂地区不同构造部位五峰组-二叠系底界的残余厚度:1号断层上盘、天宫堂背斜顶部及后翼区域,厚度较为稳定,基本在500~620m之间;1号断层下盘靠近断层区域,残余厚度基本在800m以上,部分地区超过1km,但该厚度向东迅速减薄,向斜部位最薄处不到400m。由此可见,1号断层上盘区域基本代表了区域较为稳定的沉积厚度,靠近1号断层下盘位置厚度显著大于区域沉积厚度,由拉张断陷作用造成,而东侧向斜的厚度减薄则由后期抬升剥蚀所致(图1)。

进一步的地震属性分析表明,在1号断层下盘,五峰组-龙马溪组地层反射呈现明显地向断层方向增厚趋势,且内部反射结构较为连续,未见明显削截现象,说明该套地层沉积时期断层仍在活动,属于同沉积层。此外,在断层下降盘,地层倾角相对较缓,且发育一系列小型正断层,这些断层向下汇聚于主断层,向上逐渐消失于地层中,构成典型的“铲式”断层系统,进一步指示了拉张环境的存在。

综合地层厚度分布、地震反射结构及断层组合特征,认为天宫堂地区在加里东晚期处于拉张环境,发育以1号断层为界的半地堑结构,该断陷控制了当时地层的沉积与空间展布。

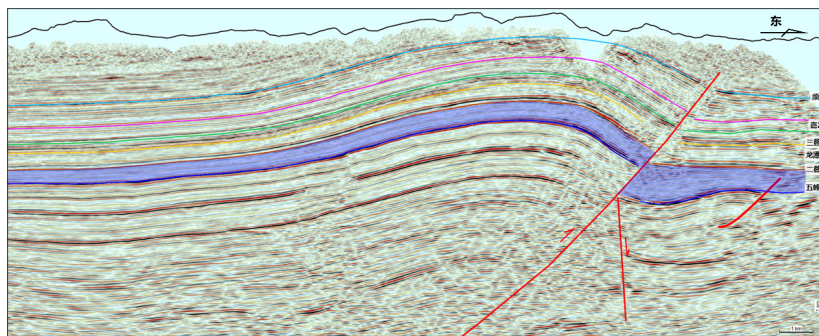


图1 天宫堂加里东晚期断陷构造特征地震解释

Figure 1 Seismic interpretation of late Caledonian fault-depression tectonic characteristics in the Tiangongtang area

2.3 早期断陷的构造意义

早期拉张断陷的识别不仅丰富了天宫堂地区构造演化历史,也对页岩气成藏具有重要指示意义。拉张期形成的半地堑结构为优质页岩的沉积提供了可容纳空间,同时同沉积断层的活动可能影响沉积相带分布与有机质富集。此外,拉张期形成的正断层系统在后期挤压作用下易发生反转,成为油气运移的通道或遮挡,影响页岩气的保存条件。因此,明确早期断陷的分布范围、活动期次及构造样式,对于页岩气有利区预测与保存单元评价具有实际应用价值。

3 天宫堂反转构造演化

天宫堂地区古生界-白垩系地层协同变形,表明该区域主体变形时期位于燕山期和喜山期。前人基于构造几

何分析、磷灰石裂变径迹和热演化史分析认为,天宫堂主体构造变形时期为新生代早期和晚期^[12, 13]。结合本文断陷构造的识别,天宫堂地区主要经历3个主要时期的构造变形,分别为加里东晚期的拉张断陷、加里东末期的挤压反转,以及喜山期的强烈挤压冲断褶皱。

3.1 加里东晚期拉张断陷阶段

加里东末期,对应区域上郁南运动-都匀运动构造背景下,天宫堂地区形成局部东西向拉张应力场,发育高角度正断层和断陷同沉积。这些早期拉张构造在后期挤压应力场作用下发生反转,因而仅在1号断层下盘保留(图2a)。该阶段区域构造背景可能与古特提斯洋的扩张或扬子板块内部伸展作用有关,导致地壳减薄,发育一系列北西向或近东西向正断层,控制了下古生界地层的沉积。

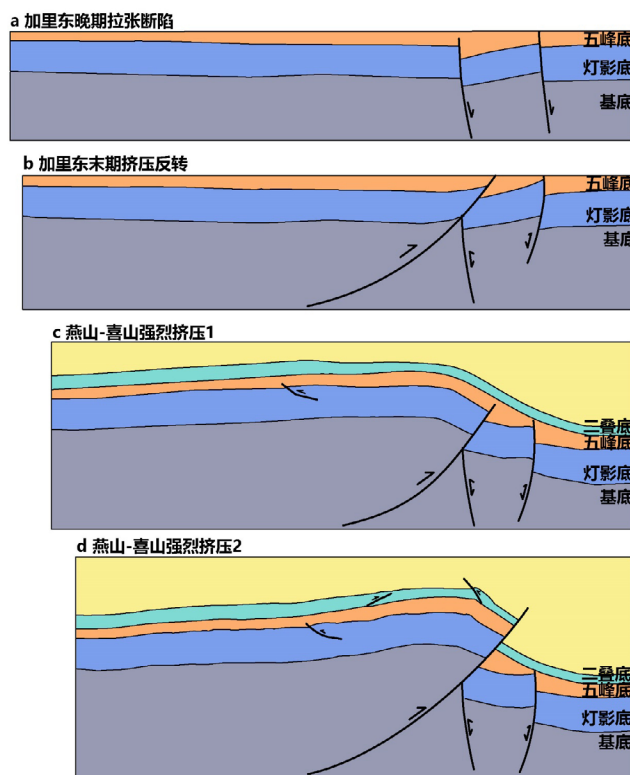


图2 天宫堂区域构造演化图(基于平衡剖面恢复)

Figure 2 Regional tectonic evolution map of the Tiangongtang area (Based on balanced cross-section restoration)

拉张断陷阶段形成的半地堑结构,其沉积中心靠近主断层下降盘,沉积了厚度较大的五峰组-龙马溪组页岩,为页岩气成藏提供了物质基础。同时,拉张环境有利于形成欠压实、高孔隙的优质储层。该阶段构造活动相对较弱,区域以稳定沉降为主,有利于有机质保存与热演化。

3.2 加里东末期挤压反转阶段

加里东末期,具体为志留纪末期,扬子板块受到来自华夏板块南东方向的持续推挤,使扬子板块和华夏板块最终拼合形成统一的华南古陆,并在扬子东南缘形成江南隆起带^[14]。四川盆地川西、川中、川东南地区发育

二叠系与震旦系、寒武系、奥陶系、志留系呈角度不整合接触。天宫堂地区受到南北向弱挤压应力作用,发生挤压反转,全区发育次级逆冲断层,造成一定的抬升和剥蚀作用,并在1号断层下盘向斜区域形成了二叠系底界与下部地层的不整合接触关系(图2b)。

挤压反转阶段主要表现为早期正断层的重新活动,断层性质由正转逆,断层上盘地层被抬升剥蚀,形成局部隆起。该阶段构造变形强度中等,以宽缓褶皱和小规模逆冲断层为主,未完全破坏早期地层结构。反转作用导致早期断陷结构部分被改造,但仍保留其基本形态,为后期构造演化奠定了基础。

3.3 中生代强烈挤压冲断阶段

中生代以来,随着华南板块与华北板块的碰撞拼接,以及特提斯构造域的演化,四川盆地周缘构造活动加剧。燕山期区域应力场转为以近东西向挤压为主,天宫堂地区开始发育规模较大的逆冲断层与褶皱,但变形强度相对较弱,地层整体仍保持较大范围的连续性和完整性。

新生代以来,受印藏碰撞作用的远程效应影响,天宫堂地区西侧大凉山块体向东强烈挤压,逐渐形成1号断层的强烈逆冲作用和天宫堂背斜(图2c,图2d)。该阶段构造变形最为强烈,早期构造被强烈改造,1号断层活动加剧,上盘地层大幅度逆冲抬升,形成典型的断层传播褶皱——天宫堂背斜。背斜核部地层遭受强烈剥蚀,翼部地层倾角增大,局部发育次级断层与裂缝系统。强烈挤压导致早期正断层完全反转,断层下盘地层被挤压抬升,形成构造高点,而上盘地层则形成陡倾甚至倒转的构造样式。

该阶段构造活动对页岩气保存条件影响显著:强烈的挤压褶皱与断层活动可能导致页岩层系破裂,形成裂缝网络,有利于游离气储集,但也可能破坏盖层完整性,导致气体散失。因此,该阶段构造活动的强度、期次及样式是评价页岩气保存条件的关键因素。

3.4 构造平衡恢复与运动学模型

为定量揭示天宫堂地区多期构造演化过程,本研究采用构造平衡恢复技术,对过天宫堂背斜的地震剖面进行逐层回剥与恢复。恢复过程遵循面积守恒原则,考虑地层压实、剥蚀等因素,依次恢复了喜山期、燕山期和加里东末期的构造形态。

恢复结果表明:(1)喜山期挤压导致地层缩短率约为15%~20%,天宫堂背斜形成于该阶段;(2)燕山期挤压较弱,地层缩短率不足5%,主要表现为区域性抬升与宽缓褶皱;(3)加里东末期反转阶段,早期正断层发生反转,地层局部抬升剥蚀,但整体构造样式仍以伸展为主;(4)加里东晚期拉张阶段,1号断层为控制性正断层,下降盘地层厚度明显增大,形成半地堑结构。

基于平衡恢复结果,建立了天宫堂地区“早期拉张-

中期反转-晚期强烈挤压”的三阶段运动学模型。该模型较好地解释了区内构造样式的时空分布,为页岩气成藏与改造过程分析提供了动态构造框架。

4 讨论:反转构造对页岩气成藏的影响

天宫堂地区多期构造叠加对页岩气成藏与保存具有重要控制作用。加里东晚期拉张断陷为优质页岩沉积提供了空间,同时同沉积断层可能成为后期气体运移的通道。加里东末期挤压反转导致局部抬升剥蚀,可能影响页岩热演化史与含气性。中生代强烈挤压构造则直接控制了页岩裂缝发育、储层改造与气体保存条件。

研究表明,天宫堂背斜翼部及断层下盘是页岩气富集的有利部位,该区构造相对稳定,裂缝适度发育,保存条件较好。而背斜核部及断层上盘由于构造活动强烈,裂缝过度发育,盖层可能遭到破坏,气体保存条件较差。因此,在页岩气勘探中应重点关注构造相对稳定、反转程度适中、晚期改造较弱的区域。未来研究应结合页岩气地球化学、储层物性及地层压力数据,进一步量化构造活动对页岩气成藏过程的影响,建立“构造-沉积-成藏”一体化评价模型,指导川南复杂构造区页岩气勘探部署。

5 结论

(1) 天宫堂背斜前翼1号断层下盘残留加里东晚期断陷构造,构造平衡恢复后展现出典型的半地堑构造样式。地震资料显示五峰组-二叠系地层在断层下降盘明显增厚,呈楔形展布,指示加里东晚期拉张环境。

(2) 天宫堂地区自晚古生代以来主要经历加里东晚期拉张断陷,加里东末期挤压反转以及新生代强烈挤压3次主要构造变形。多期构造叠加导致早期构造被强烈改造,形成了现今复杂的构造格局。

(3) 基于三维地震解释与构造平衡恢复,建立了天宫堂地区“拉张-反转-挤压”三阶段运动学演化模型。该模型揭示了构造样式的时空转换过程,为理解页岩气成藏与保存提供了构造背景。

参考文献

- [1] 邹才能,赵群,丛连铸,等.中国页岩气开发进展、潜力及前景[J].天然气工业,2021,41(1):1-14.
- [2] 张烈辉,胡勇,李小刚,等.四川盆地天然气开发历程与关键技术进展[J].天然气工业,2021,41(12):60-72.
- [3] 刘树根,孙玮,宋金民,等.四川盆地海相油气分布的构造控制理论[J].地学前缘,2015,22(3):146-160.
- [4] 梁霄,徐剑良,王滢,等.川南地区渐变型盆—山

- 边界条件下龙马溪组页岩气(藏)富集主控因素:构造—沉积分异与差异性演化[J]. 地质科学, 2021, 56(1): 60–81.
- [5] 赵圣贤, 李博, 陈鑫, 等. 川南天宫堂构造带五峰组—龙马溪组页岩不同纹层内部结构差异及其控制机理[J]. 地学前缘, 2024(5): 75–88.
- [6] 马新华, 谢军, 雍锐, 等. 四川盆地南部龙马溪组页岩气储集层地质特征及高产控制因素[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(5): 841–855.
- [7] 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.
- [8] 张岳桥, 董树文, 李建华, 等. 中生代多向挤压构造作用与四川盆地的形成和改造[J]. 中国地质, 2011, 38(2): 233–250.
- [9] 何登发, 鲁人齐, 黄涵宇, 等. 长宁页岩气开发区地震的构造地质背景[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(5): 993–1006.
- [10] 公子龙, 李智武, 李金玺, 等. 川南长宁地区构造变形特征及演化过程[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2023, 50(3): 257–267, 332.
- [11] 朱逸青, 陈更生, 刘勇, 等. 四川盆地南部凯迪阶——埃隆阶层序地层与岩相古地理演化特征[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(5): 974–985.
- [12] 张梦琳, 李郭琴, 何嘉, 等. 川西南缘天宫堂构造奥陶系五峰组—志留系龙马溪组页岩气富集主控因素[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(2): 141–151.
- [13] 井翠, 陈珂磷, 邓夏, 等. 川南Y202地区构造变形特征及其与页岩气保存条件关系[J]. 石化技术, 2023, 30(8): 86–88.
- [14] 邓宾, 刘树根, 覃作鹏, 等. 扬子板内大娄山渐变型盆—山结构带多期构造特征及其对板内—板缘构造的响应[J]. 大地构造与成矿学, 2015, 39(6): 973–991.

Characteristics and Evolution of Reverse Structures in the Tiangongtang Area, Southern Sichuan

Chen Kelin¹ Chen Wei¹ Wen Ran² Fan Qicheng² Zhang Yu¹ Yu Yangli¹

1. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu;

2. Sichuan Changning Natural Gas Development Co., Ltd., Chengdu

Abstract: The Tiangongtang area, located on the southwestern margin of the Sichuan Basin, is a key target zone for marine shale gas exploration. The multiphase tectonic superimposition in this region has resulted in a complex tectonic evolution history. Through comprehensive interpretation and analysis of 3D seismic data, this study reveals for the first time that the area exhibited extensional fault-depression characteristics during the Late Caledonian. By integrating geometric analysis of tectonic deformation, it is determined that the Tiangongtang area underwent three major deformation periods: Late Caledonian extensional fault-depression, terminal Caledonian compressional inversion, and intense Mesozoic-Cenozoic compression. Additionally, the regional kinematic evolution process was established through kinematic reconstruction using balanced restoration techniques. This paper systematically identifies the seismic response characteristics of early fault depressions, elaborates on the geometric patterns and kinematic mechanisms of inverted structures, and discusses the influence of multi-stage structural superposition on the preservation and enrichment of shale gas, thereby providing an important geological basis for shale gas exploration in the complex structural area of southern Sichuan Basin.

Key words: Southwestern Sichuan Basin; Tiangongtang; Extensional structure; Tectonic inversion; Structural evolution