DOI:10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202510160105

四川盆地德阳—安岳槽盆东侧台缘断裂特征及其形成演化

王家木[1]，马兵山[1]，李偲瑶[2]，梁 瀚[2]，邹 禺[2]，邬光辉[1]，唐 浩[1]，张 晨[2]，何 阳[1]，冯明炜[1]，熊清爽[1]

（1. 西南石油大学地球科学与技术学院，四川 成都 610500；2. 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院，四川 成都 610051）

摘要：四川盆地震旦系—下寒武统发育大型近南北向德阳—安岳槽盆，其盆地属性与形成机制存在争议，制约油气资源的勘探与开发。基于三维地震资料，聚焦四川盆地安岳槽盆东侧高磨段台地边缘（台缘）部位断裂，通过解译台缘地区断层发育情况与断裂结构特征，分析台缘部位断层性质与断层演化过程，进一步探索其与槽盆形成机制的内在联系。研究结果表明：（1）在南北向、东西向、北西—南东向3个不同走向的台缘上分别发育微小正断层、高陡贯通双断走滑及花状走滑断层等断裂结构类型，在不同时期断裂性质发生改变；（2）断裂在晚震旦世—二叠纪经历弱—强—弱的活动特征，震旦系灯影组沉积期至早寒武世筇竹寺组沉积期断裂活动性增强，由孤立分段逐渐连锁，后至二叠纪继承性活动并发生活动性迁移；空间上断裂呈现南北向段活动性弱、过渡段活动性强的分段差异活动特征；（3）台缘断裂经历前震旦纪先存断裂形成、晚震旦世灯影组沉积期孤立断层发育、早寒武世筇竹寺组沉积期生长成熟、早寒武世—二叠纪多期弱活化等演化阶段；（4）断层格架受控先存基底构造差异，之后受控区域应力场的转变发生多期次差异性活化影响台缘形态及活动性迁移。

关键词：台缘断裂；断裂结构；形成演化；安岳槽盆；四川盆地

中图分类号：P542. 3；P618. 13 **文献标志码：**A **文章编号：**1000-8527(2026)02-0387-16

Characteristics and Formation Evolution of the Platform Margin Fault on the Eastern Side of the Deyang-Anyue Trough Basin, Sichuan Basin

WANG Jiamu[1], MA Bingshan[1], LI Siyao[2], LIANG Han[2], ZOU Yu[2], WU Guanghui[1], TANG Hao[1], ZHANG Chen[2], HE Yang[1], FENG Mingwei[1], XIONG Qingshuang[1]

(1. *School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan* 610500, *China*; 2. *Exploration and Development Research Institute of Southwest Oil & Gasfield Company, PetroChina, Chengdu, Sichuan* 610041, *China*)

Abstract: A large N-S trending Deyang-Anyue Trough Basin developed in the Sinian to Lower Cambrian strata of the Sichuan Basin. Its basin attributes and formation mechanisms remain debated, constraining hydrocarbon exploration. Using 3D seismic data, this study examines faults along the eastern platform margin (Gaomo section) of the Anyue Trough. By interpreting fault development and structural features, we analyze their nature,

收稿日期：2025-10-16；**修回日期：**2026-03-10；**编辑：**赵宇。

基金项目：四川省自然科学基金项目（2024NSFSC0814）；国家自然科学基金重点基金项目（U24B2019）；国家自然科学基金青年基金项目（42402163）。

作者简介：王家木，男，硕士，2001年生，主要从事构造地质学研究。Email：wangjm121615@163. com。

＊通信作者：马兵山，男，博士，副研究员，1991年生，主要从事构造地质与石油地质研究。Email：mabingshan09@163. com。

引用格式：王家木，马兵山，李偲瑶，等. 四川盆地德阳—安岳槽盆东侧台缘断裂特征及其形成演化［J］. 现代地质，2026，40（2）：387-402. DOI：10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202510160105.

WANG Jiamu, MA Bingshan, LI Siyao, et al. Characteristics and Formation Evolution of the Platform Margin Fault on the Eastern Side of the Deyang-Anyue Trough Basin, Sichuan Basin［J］. GEOSCIENCE, 2026, 40（2）: 387-402. DOI: 10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202510160105.

evolution, and relationship with trough formation. Results show: (1) Various fault types developed on platform margins of different orientations (N-S, E-W, NW-SE), including minor normal faults, steep through-going double faults with strike-slip features, and flower-structure strike-slip faults, with properties changing over time. (2) Fault activity from Late Sinian to Permian followed a weak-strong-weak pattern, intensifying from Dengying Formation to Early Cambrian Qiongzhusi Formation deposition, evolving from isolated segments to linked systems. During the Permian, faults showed inherited activity with spatial migration. Spatially, activity varied segmentally, weaker in N-S segments and stronger in transitional zones. (3) Platform margin faults evolved through stages: pre-Sinian inherited basement fault formation, isolated fault development during Late Sinian Dengying deposition, growth and maturation in Early Cambrian Qiongzhusi deposition, and multiple weak reactivations from Early Cambrian to Permian. (4) The fault framework was initially controlled by pre-existing basement heterogeneity. Subsequent shifts in regional stress drove multiple episodes of differential reactivation, influencing platform margin morphology and fault activity migration.

Key words: platform margin fault; fault architecture; formation and evolution; Anyue Trough; Sichuan Basin

0 引 言

四川盆地震旦系—下古生界发育南北向大型德阳—安岳槽盆，台地边缘及其周边是重要的深层油气勘探区域[1-3]，台缘构造影响震旦系灯影组[4]、寒武系[5-9]、二叠系[10]等多层系油气聚集、成藏和富集[11]。近年来，众多学者解剖分析了安岳槽盆的结构、演化、构造属性、成因机制及对油气成藏的影响等，该槽盆形成机制仍存在“拉张槽”[12-14]、“裂陷槽”[15-21]、“侵蚀谷”[22-26]等争议认识。“裂陷槽”强调早古生代伸展构造作用为主要动力，与基底断裂活化共同形成克拉通内凹陷[27-29]，该认识具有震旦系至下寒武统大型正断层存疑、缺少规模火成岩[30-34]等的争议。“侵蚀谷”认为其在桐湾运动两幕大规模岩溶作用下侵蚀形成，但忽视底部正断层及灯影组一段(Z_2dn^1，灯一段)、灯影组二段(Z_2dn^2，灯二段)厚度变化不均等问题。也有学者认为是地壳运动与河流侵蚀下切作用的内、外动力共同作用[35-36]，在不同的位置其主控因素有差异[37]。相对来说，“克拉通内拗陷”可以较为合理解释槽盆中广泛发育的平坦地层填充以及缺乏广泛的张性断裂[38-43]。现有研究通过地震资料解析、地球化学特征、地震沉积相等解剖了安岳槽盆台地边缘的分段性[37]、灯影组减薄的机制以及裂陷槽发育的时限及动力机制[15, 19, 44]以及槽盆邻区走滑断裂的发育特征[31, 45-46]等，但对槽盆中断裂的发育特征、台地边缘的断裂特征缺乏精细解释与解剖，且对台缘的形成机制缺乏基底先存构造的考虑。

本文聚焦德阳—安岳台缘东侧台缘断裂系统，采用高精度三维地震资料，精细解释断裂结构特征并定量统计断裂相关参数，明确断裂分段性等基本特征，分析断裂活动强度与活动期次，重建台缘断层的时空演化规律并总结其成因机制，为德阳—安岳槽盆成因研究提供断裂研究基础，为深层油气勘探提供断裂发育理论依据。

1 区域地质概况

四川盆地位于华南板块西北侧，面积约 16×10^4 km^2，震旦系—第四系地层发育较齐全，是一个典型的叠合盆地[47]。四川盆地经历多期构造—沉积旋回，与原—新特提斯洋的开合密切相关，形成震旦系—志留系海相克拉通断陷盆地、石炭系—中三叠统海相克拉通拗陷盆地、晚三叠系—白垩系海陆交互相拗陷盆地、新生界前陆盆地等原型盆地的有序叠合[48-51]。研究区地层沉积相对完整，缺失志留系、泥盆系和石炭系地层，震旦系灯影组三段(Z_2dn^3，灯三段)整段均为泥岩，与上覆灯影组四段(Z_2dn^4，灯四段)形成了整合接触[52]，灯四段主要由一套完整的白云岩地层构成；灯四段与其上方主要以泥页岩为主的麦地坪组和筇竹寺组则形成不整合接触。台缘断裂主要发育在震旦系灯影组—二叠系中。在这一区域内，灯影组四段在台缘带充填得相对较厚，向台内方向则逐渐变薄[53]，龙王庙组沉积白云岩夹页岩、粉砂岩，二叠—三叠系以灰岩沉积为主。

研究区在元古代—古生代经历多期构造运动，主要包括兴凯地裂运动、桐湾运动一幕、桐湾运

动二幕和峨眉地裂运动等区域性构造运动，造成了震旦系—寒武系、寒武系/奥陶系—二叠系、二叠系—三叠系等多个区域不整合，形成多个伸展—挤压构造旋回，形成古隆起叠覆深槽盆的独特地质构造。研究区遭受中、晚元古代强伸展、弱挤压，兴凯地裂运动沉积震旦系灯影组[37]，震旦纪末期桐湾运动一幕、二幕使灯二段和灯四段地层被抬升侵蚀[23]。晚震旦世、早寒武世至中寒武世，四川盆地再次伸展。在中寒武世末，拉张运动结束，在四川盆地中西部长宁—内江—德阳一线形成了近南北向展布、北宽南窄、分段性强的德阳—安岳槽盆[37, 41-43]（图1）。该时期四川盆地正处于扬子板块的核心区域，扬子板块受到Rodinia超大陆裂解的影响[54]，但尚未与Gondwana大陆完成聚合[55]。槽盆北部向北西开口，边界特征易于识别，东侧陡、西侧缓，南部向南开口，边界特征不明显。近年研究发现，川中地区发育与槽盆走向大角度斜交的走滑断裂体系[56]（图1）。

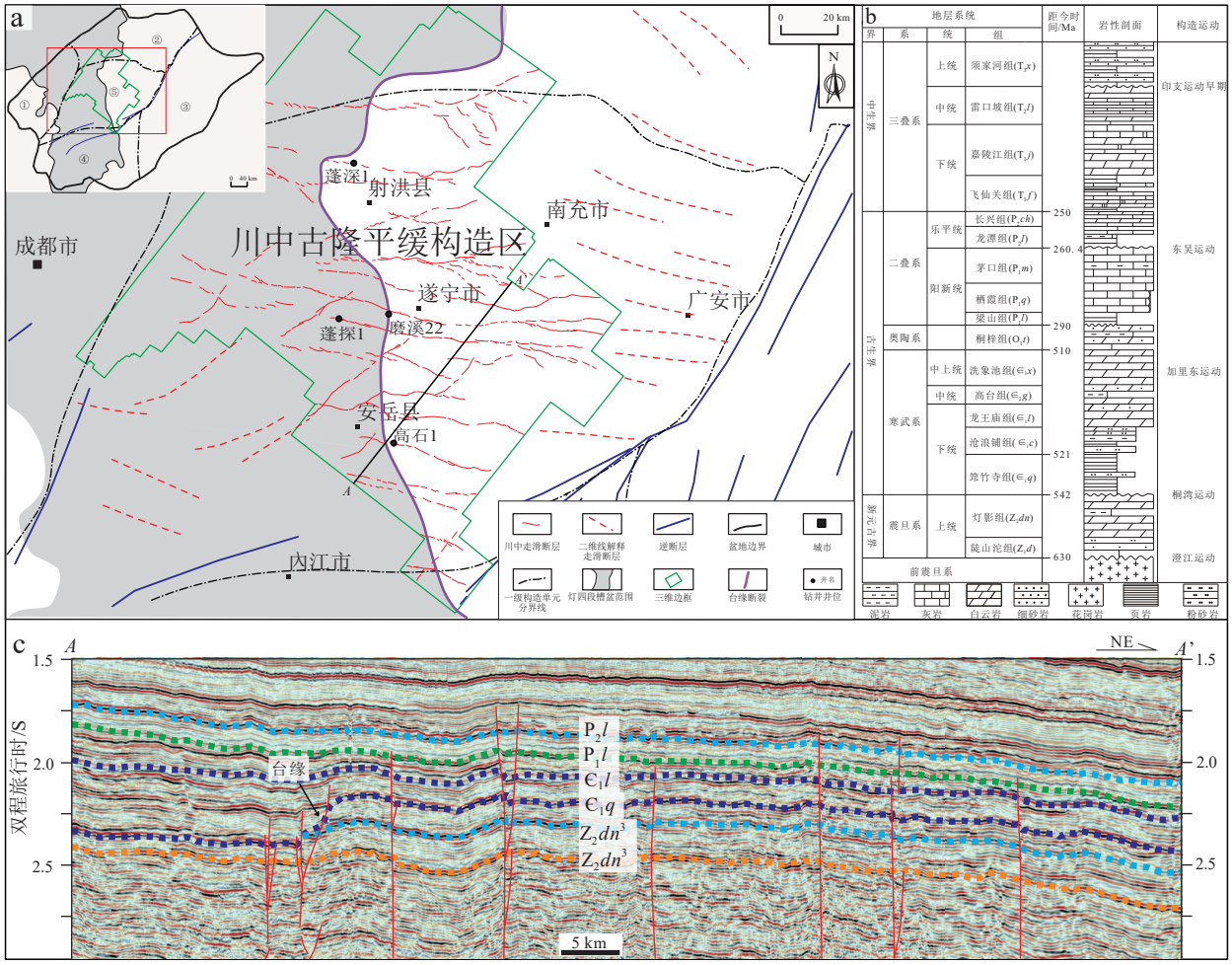


图1　四川盆地构造分区（a）、川中地区地层综合柱状图（b）和区域地震剖面图（c）（据文献［56］修改）

Fig. 1　Structural divisions of the Sichuan Basin（a）, comprehensive stratigraphic column（b）and typical seismic profile of the Central Sichuan Region（c）（modified after reference［56］）

图（a）：①川西低缓构造区；②川北低陡构造区；③川东高陡构造区；④川南低陡构造区；⑤川中古隆平缓构造区

本文选取安岳槽盆东段的高石梯—磨溪区块台缘断裂作为研究区，其构造位置处于四川盆地川中地区乐山至龙女寺古隆起的东隅（图1（a）），是在古隆起背景下的潜伏构造，是多期多类型构造叠加的较高区域[57-58]。研究区自西向东过渡的槽盆—台地呈现出盆地结构、剥蚀或侵蚀特征、台缘展布与断裂发育特征等南北差异性[37, 43]。

研究区基底呈现显著的隆坳起伏特征，航磁异常和基底岩性均呈现出明显的差异结构特征。基底航磁异常总体呈北东—南西向展布，发育多个正负异常高值，北东—南西方向航磁异常与北西—南东方向的异常交织，深部断裂处于正负异常过渡带并将基底切割为多个块体[59]。研究区航磁显示台缘断裂位于以南充为中心的局部高值

正异常和成都东南方向正异常之间，并穿过遂宁西北方向负异常（图2（a））。基底岩性以下部火成岩及深变质岩系和上部浅变质岩系共同组成[48]。研究区位于盆地西南部，岩性以峨边群的中等程度变质岩为主，夹杂大块中性岩浆杂岩体（图2（b））。航磁异常与基底岩性图显示出较强的吻合性，特别是北东向的航磁正异常构造与重庆—遂宁一线的负异常构造。台缘发育位置与航磁指示的基底变化和盆地岩性变化区域具有一定的吻合性，基本在结构变化的区域上部发育，其中北部北东东向台缘线与南充北部的航磁正异常结构和岩性变化界限较为吻合，南部遂宁一线也在航磁异常和岩性变化的过渡部位（图2）。

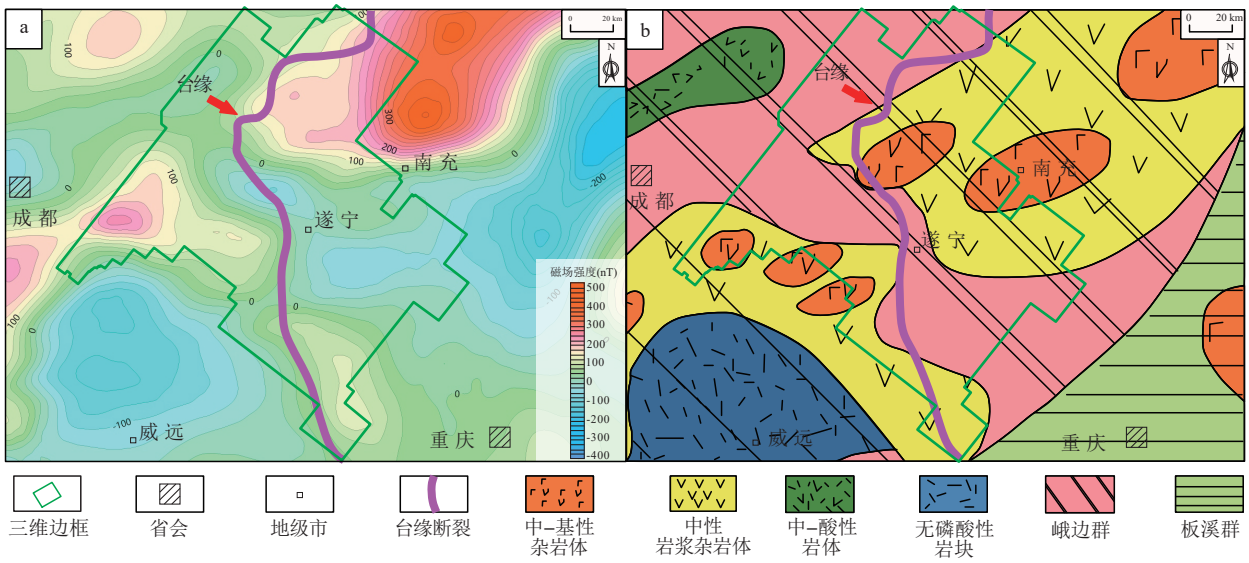


图2 四川盆地安岳槽盆高磨段台缘基底航磁化及异常（a）和前震旦系基底岩性分布（b）平面图（据文献［50，59］修改）

Fig. 2 Maps of the platform margin basement in the Gaomo Area，Anyue Through，Sichuan Basin：（a）aeromagnetic characterization and anomalies，and（b）Presinian basement lithology distribution（modified after reference［50，59］）

2 台缘断裂结构特征

2.1 台缘分段划分

结合相干和对称照明属性等，沿台缘线走向等间距（1 km）解释地震剖面，德阳—安岳槽盆东侧台地边缘整体呈“S”型南北向展布，总长约为234.5 km。按照走向差异可详细划分为9段（表1），在不同段地震剖面特征存在一定差异，断裂形态与发育地层随走向改变发生改变。A段为台缘带北端起始单元，呈近SN向短轴弧形展布，延伸21.6 km；B段继承A段走向，延伸22.2 km，近似EW向的宽缓弧形；C段为NE27°直线展布，延伸22.8 km；D段为EW向U型弯曲，长11.7 km；E段为NS向短直线段，延伸15.3 km；F段为NW向斜向延伸，长32.2 km；G段呈SE向直线延伸，总长25.1 km。H段为最长段，具有明显变化特征，长52.1 km；I段为尾部东偏的折线段，长31.5 km。综合不同走向的地震剖面，发现3类特征较为相似的台缘断裂特征，据此总结近南北向段（A、C、E、G段）、近东西向段（B、D段），北西—南东向段（F、H、I段）等3类差异的台缘结构（图3）。

表1 四川盆地安岳槽盆高磨段台缘分段统计表

Table 1 Statistical Table of the Tectonic Margin Segmentation in the Gaomo Section of Anyue Trough, Sichuan Basin

分段	长度(km)	走向
A	21.6	NE15°
B	22.2	NE82°
C	22.8	NE27°
D	11.7	E-W
E	15.3	N-S
F	32.2	NW30°
G	25.1	N-S
H	52.1	NW20°
I	31.5	NW20°

2.2 台缘断裂剖面特征

地震剖面显示台缘断裂主要发育在震旦系灯影组三段及寒武系底部的台缘带台阶处，部分断

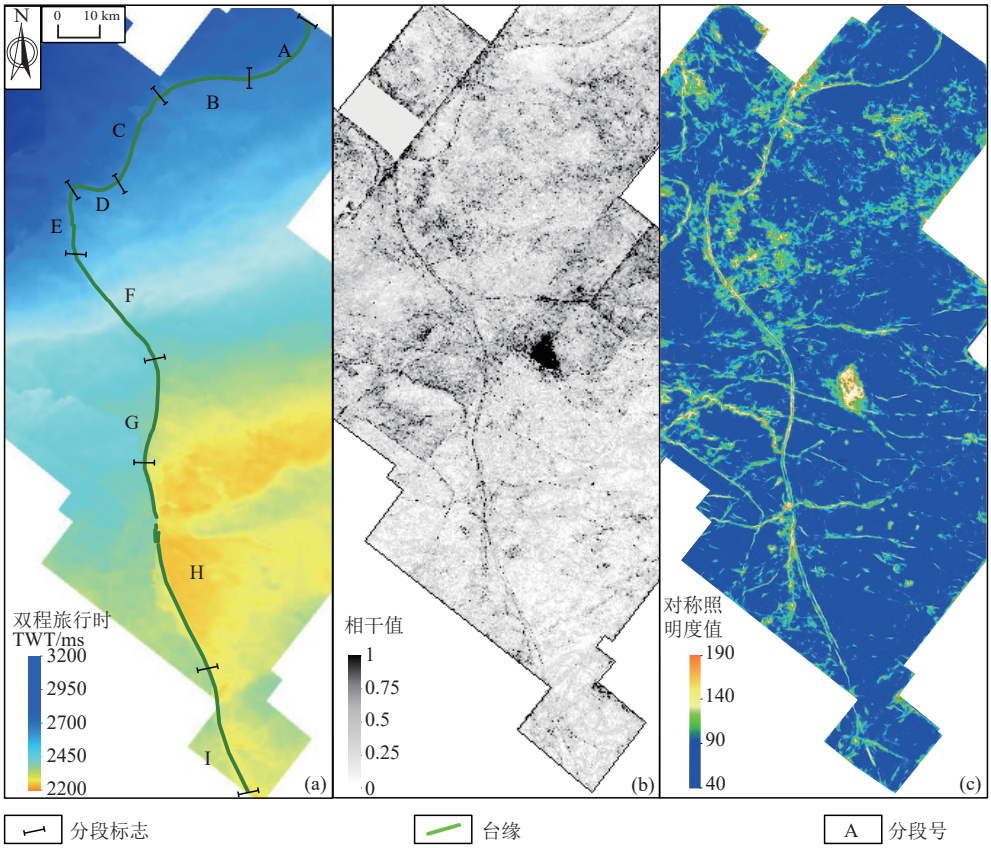


图 3　四川盆地安岳槽盆高磨段寒武系构造图（a）、相干（b）及对称照明度属性（c）平面图

Fig. 3　Maps of the Cambrian in the Gaomo Area, Anyue Trough, Sichuan Basin: (a) structure, (b) coherence attribute, (c) symmetry illumination attribute

至灯一段。为排除后期构造（褶皱）影响作用，使用拉平二叠系底界的地震剖面来解释不同分段的剖面断裂特征。

2.2.1　近南北向段

近南北向段（A、C、E、G段）主要发育在研究区中部—北部小段（图 4），长度相对较短，走向变化较快。例如 G 段连锁了两条 NW 向的大断层，C 段衔接近东西向段。以 C 段为例，断裂长约 23 km，走向近 NE30°，呈线型展布。断裂为高角度正断层，性质以正断层为主，兼具部分走滑分量。向上切穿寒武系底，向下延伸至灯影组。多断于台缘中上部灯影组三段内，且形态为单根主干断层，无分支，唯分段 I 中呈现双断，形态略有不同。断裂剖面上呈高角度近直立状发育，向上继承性发育较少，多消亡于筇竹寺组内部，向下多断至灯一段内。部分贯穿台缘中部并于台缘顶筇竹寺组底出现部分间断（图 4（d）），少部分出现继承性发育正断层（图 4（e）），部分断于台缘区筇竹寺组底界（图 4（f））。随台缘断裂平面上向南变化，剖面显示断裂左倾程度逐渐加深且向台缘部分收缩，表明应力环境由东西向剪切走滑分量转变为拉张。

2.2.2　近东西向段

近东西向段（B、D 段）主要分布于研究区北部（图 5），在平面起转换调节作用，链接各段。其中 B 段延伸较长，走向的转变过渡较平滑，D 段较短且连接两段近南北向段，整段呈 U 型展布。该断裂在地震剖面断距较小，倾角高陡，特征表现以走滑为主，推断为伸展背景下，连接初始正断层的调节走滑断层。以 B 段为例，断裂长约 22 km，走向近 NE80°，呈略微弯曲的半圆形展布。断裂主要发育在台缘斜坡中部$\in_1 q$层位，呈负花状构造，向下收敛，向上发散在筇竹寺组内部。主干断裂高陡直立，顶部切穿二叠系底部，底部贯穿灯影组同相轴，灯一段至寒武系底多发育小地堑。分支呈花状散布并交汇于台缘顶底，于灯影组三段下部收敛（图 5（e））。图 5f 中主干向下收缩，分支增多但不发育，收敛于灯影组二段。

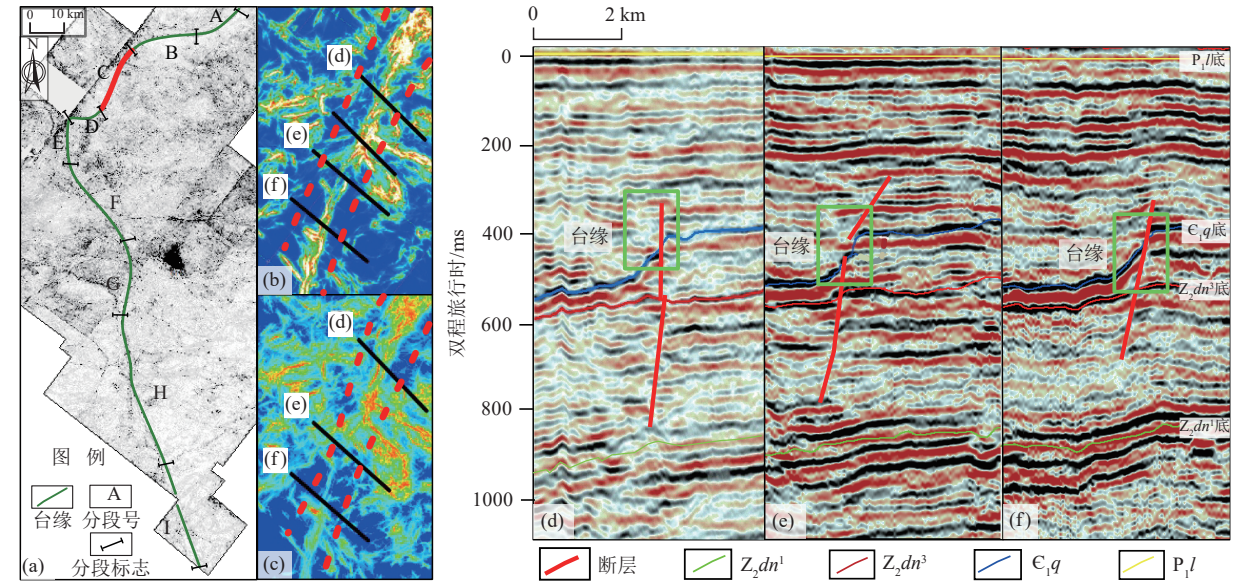


图4 C段台缘断裂综合图

Fig. 4 Comprehensive map of segment-C platform margin faults

（a）相干属性示台缘；（b）寒武系底面对称照明属性图；（c）灯三段底面对称照明属性图；（d）（e）（f）过台缘地震横剖面图，位置见（b）（c）

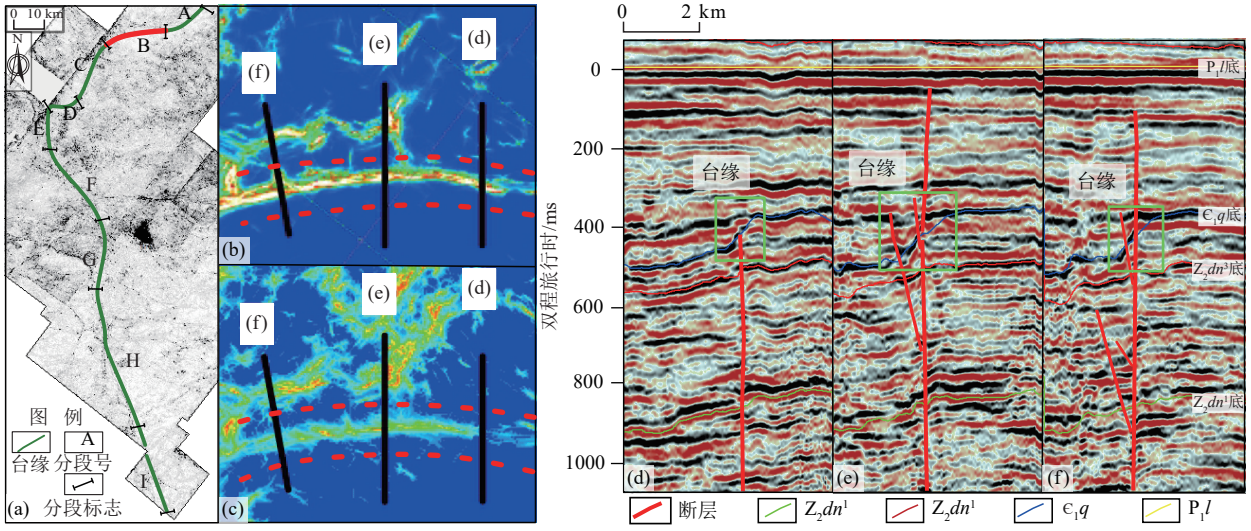


图5 B段台缘断裂综合图

Fig. 5 Comprehensive map of segment-B platform margin faults

（a）相干属性示台缘；（b）寒武系底面对称照明；（c）灯三段底面对称照明属性图；（d）（e）（f）过台缘地震横剖面图，位置见（b）（c）

2.2.3 北西—南东向段

北西—南东向段（F、H、I段）位于研究区中下部，延伸长且由南至北断距呈现鲜明的规律性变化（图6）。断裂多断于筇竹寺组，以G段为界，向南延伸断裂跨度增大，H段达到峰值后向南逐渐减小直至尾端消失。以H段为例，断裂长约52 km，走向近NW30°，呈直线型展布。剖面上呈直立双断，分别发育于灯三段底与筇竹寺组底。断裂向下贯穿灯影组，向上多止步于龙王庙组。断裂随台缘向南部延伸，右侧断裂逐渐向上消亡，左侧主干断裂上部逐渐向下收缩。断裂继承先存断裂后期重新激活，向上发育至二叠系，呈现明显的继承性（图6（e）、（f））。

2.2.4 台缘断裂剖面结构类型

台缘断裂发育类型共计3种，其空间分布与构造特征存在显著差异。南北向段断于台缘北部，以正断层特征为主；东西向段断于台缘中部，以走滑断裂特性为主，多呈现负花状构造；北西向

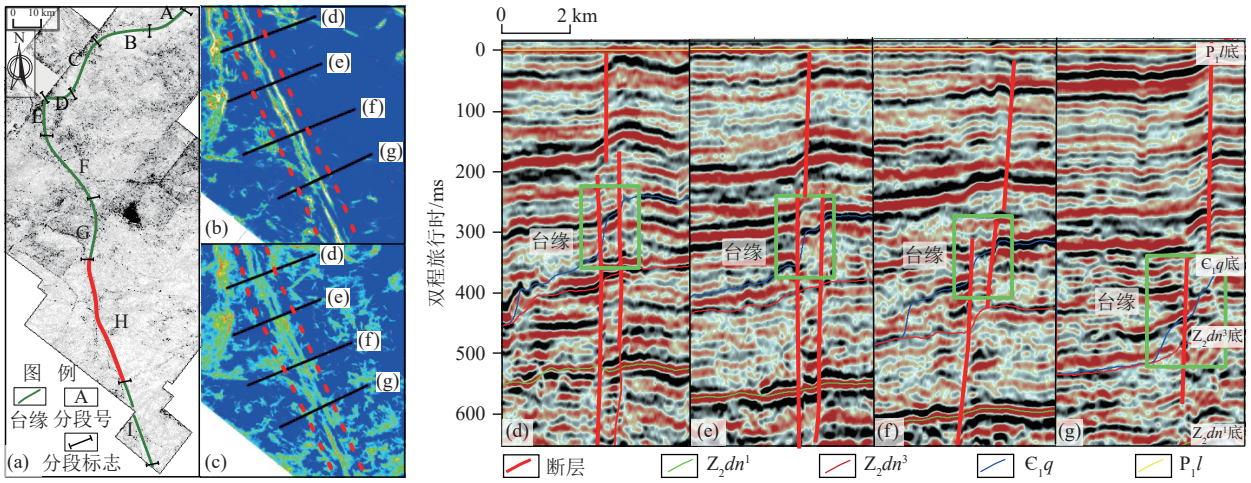


图6　H段台缘断裂综合图

Fig. 6　Comprehensive map of segment-H platform margin faults

(a) 相干属性示台缘；(b) 寒武系底面对称照明属性图；(c) 灯三段底面对称照明属性图；(d) 、(e) 、(f) 和 (g) 过台缘地震横剖面图,位置见 (b) 、(c)

南东过渡段集中于台缘南部，断距自两侧向中部递增。值得注意的是，部分连接南北向段与东西向段转折处，突然的高角度转变使应力迁移偏转，致使断裂多出现在台缘外右侧，部分台缘呈现单纯的地貌变化。其次，各类型中断裂在层系中的贯穿程度也不尽相同。南北向段断裂活动性强于东西向段。北西向南东过渡段的断距则有明显的变化趋势，随两侧向中部过渡，断距也随之增加，H段断距为整条台缘线最高值。

2.3　台缘断裂平面特征

结合对称照明属性图精细解释断裂平、剖面发育特征（图7），发现台缘断裂自灯影组底界至三叠系底界均有发育，平面形态呈规律性变化。灯一段规模较小，多段断裂局部发育；至寒武系底时断裂发育完整，各分段首尾勾连，与台缘形态基本耦合；龙王庙底为界，断裂规模开始急剧缩小，继承性发育为主，局部因应力变化而使断层迁移复活，直至三叠系底界消失。

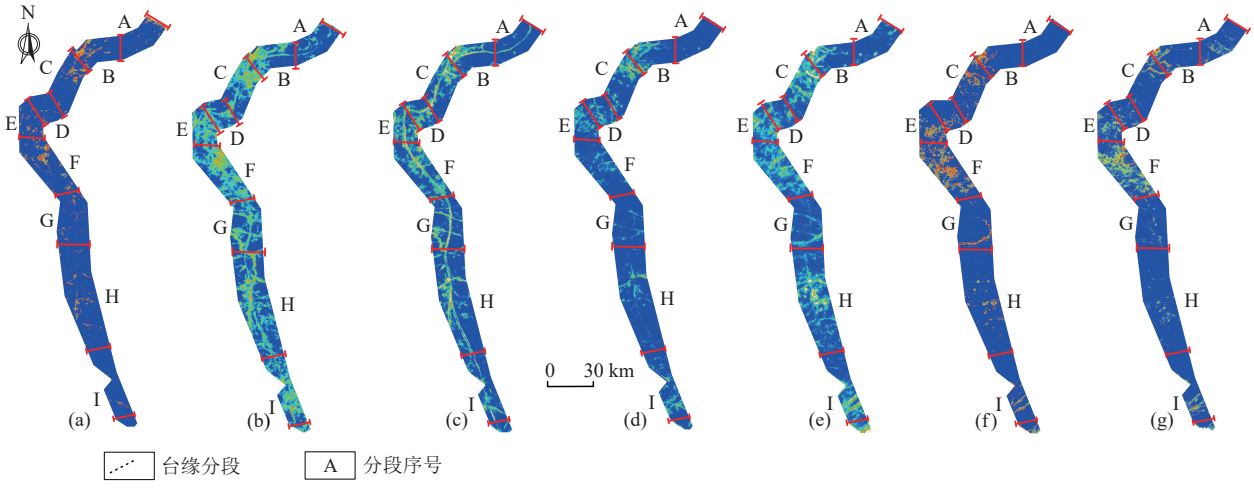


图7　安岳槽盆东段不同层系台缘地区对称照明属性平面图

Fig. 7　Symmetry attribute map of the different layers along the platform margin in the eastern Anyue Trough

(a) 灯影组一段底界；(b) 灯影组三段底界；(c) 筇竹寺组底界；(d) 龙王庙组底界；(e) 梁山组底界；(f) 龙潭组底界；(g) 飞仙关组底界

在灯一段底界，断裂大致以台缘边界分布。由南到北均有发育，总体表现为相对孤立的小段，分段性较强。奠定了台缘断裂的基本形态。在南部H段、中部E段和北部B段（图8（a）），地震属性具有较强的响应，可能是断层早期活动较强的位置，也即南部的NNW—SSE向段、中部的NW—

SE向段和北部的NEE—SWW向段可能是早期台缘断裂的格架段（图8（a））。与基底岩性及先存断裂位置进行对比，北部格架段发育在裂谷边界处，中，南部格架段发育在岩性交接边界部位（图2）。均为地层薄弱处，利于断层发育；在灯三段底界，台缘断裂继承灯一段格架并进一步发育。除A、I段外已可见清晰的断裂发育痕迹，呈现大段连续断裂，确定了台缘断裂的形态（图8（b））。仅在C、F、I段为散乱小段且与下部断裂响应表现出迁移现象，在应力条件下基于先前断裂形态发生偏移；在寒武系底界，地震响应达到最高值，台缘断裂每段分布特征清晰可见。台缘断裂发育完整，整体呈近南北向展布；在龙王庙组底界，北部南北向段响应大幅减弱，断裂走向有向东西方向转变的趋势。A段，中部F段，断裂响应大幅减弱，基本消失，C—E段出现干扰。南部由两侧开始消失，G、I段基本消失，H段依旧清晰可见但响应强度已大幅减弱（图8（d）），与分段剖面的断距特征相互印证（图6）；在二叠系底面，断裂继承龙王庙组形态发育，整体连通性进一步减小，分裂成多段小断裂。I、F段彻底消失，B、C、D段基本消失，其残余尾部发生迁移，整体断裂向南北向转变，G段激活重现，与H段进行连接（图8（e））。B、C、D、H等响应段中继承性发育部位与基底差异处相对应（图2）；在上二叠统底面，继承性残留断裂仅余B、H段，C、D段断裂发生迁移，迁移后的C段走向更偏向南北向，D段偏向东西向（图8（f）），且迁移后断裂更符合基底航磁分布（图2）；在下三叠统底界，断裂响应完全消失，台缘断裂发育结束。

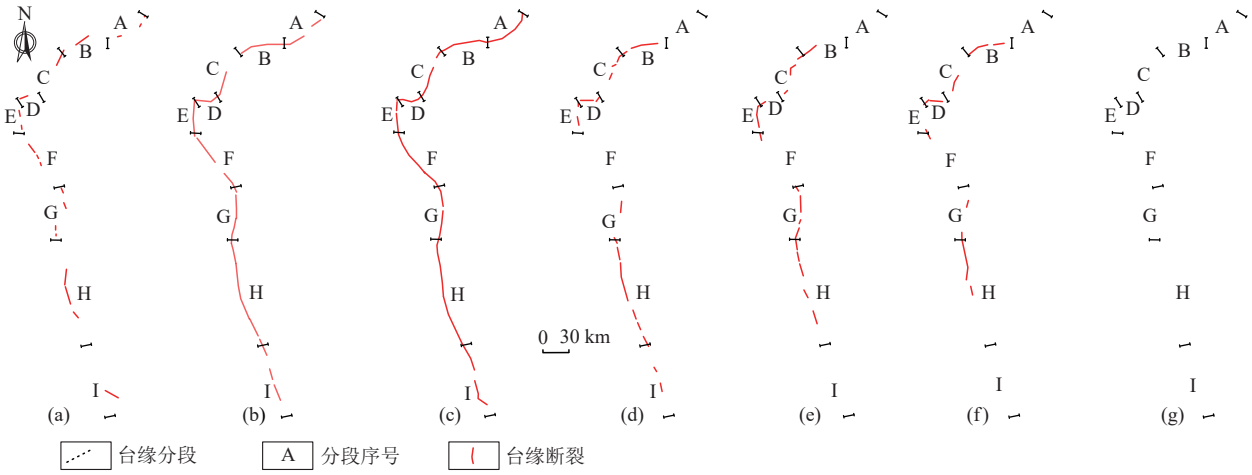


图8 安岳槽盆东段不同层系断裂平面图

Fig. 8 Fault plans of different layers along the platform margin in the eastern Anyue Trough

（a）灯影组一段底界；（b）灯影组三段底界；（c）筇竹寺组底界；（d）龙王庙组底界；（e）梁山组底界；（f）龙潭组底界；（g）飞仙关组底界

3 台缘断裂演化及其成因机制

3.1 台缘断层活动性

本文以1 km为间距对灯影组三段、沧浪铺组、龙王庙组、二叠系底部进行断距统计来反映台缘断层活动性的差异（图9），通过对比各层位台缘断裂断距来获取断裂纵向的发育特征与变化趋势。因灯四段顶部存在剥蚀，断层两盘的断点并不代表断层的原始断距，因此仅利用断层两盘的断距来指示断层的相对活动性。筇竹寺组底界面台缘断裂发育成熟，各段特征鲜明，因此以此层位来展示平面上各段断裂平面分布变化。以500 m为间距进行单独测量成图（图10）。灯影组至筇竹寺组断距增加，筇竹寺组之上发育断距逐级递减，沧浪铺组部分台缘断裂停止发育。A、C、F、G、H段表现继承性特征，G段最先消失，D转折段中部断距减少，两端出现高值。F段尾部出现异常高值，其原因可能为F段出现高角度偏转，应力未完全释放，传播至两段段尾，与D段特征吻合（图9）。

灯影组三段底界位于筇竹寺组下部，继承绝大部分断裂，最大断距为80 ms，大部分断距范围处于20 ~ 40 ms。F、I段最先消失，少数台缘分段中出现部分无断距；沧浪铺组底界断距最高值为65 ms，大部分分段断距为10 ~ 30 ms。B、D、I段部分断距开始消失；龙王庙组底界最大断距为80 ms，大部分分段断距为20 ms左右。H段自南

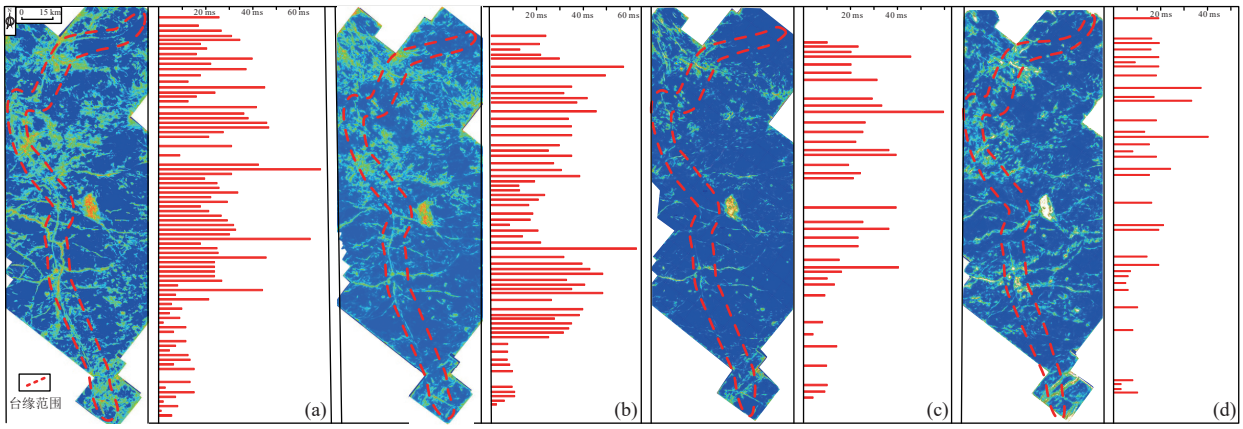


图 9　安岳槽盆东段不同层面台缘断裂断距变化图

Fig. 9　Variation of fault throws of different layers along the platform margin in the eastern Anyue Trough

(a)为灯影组三段底；(b)为沧浪铺组底；(c)为龙王庙组底；(d)为梁山组底

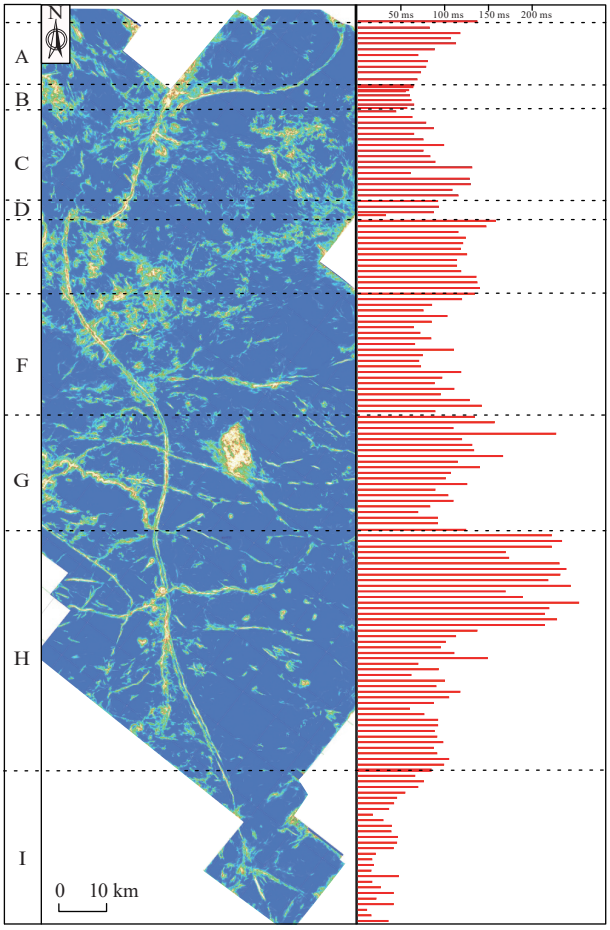


图 10　安岳槽盆东段台缘寒武系底界高差分段图

Fig. 10　Height variation of the Cambrian bottom along the platform margin in the eastern Anyue Trough

部开始降低。I段零星响应；二叠系底界断距最高为 40 ms，多段无断距。作为距台缘断裂最远的地层，受断裂影响已基本消失，唯 A、C、D、H 等段出现断裂且断距也大幅降低（图 9）。

在灯三段底，断裂断距表现出明显的分段特征。近南北向的 G 段断距较大，最大可到达 60 ms，向两端辐射性降低，断距逐渐降低到 20 ms 以下，该段构造活动强烈，发育一系列高角度正断层；在沧浪铺底界，构造变形格局发生显著改变，变形带整体向南、北两侧迁移，走向由 N—S 向转为至 NW—SE 向段，C、H 段断距最大，达到 60 ms，北部向南北过渡降低，保持在 30 ms 左右，南部向南北过渡骤降至 20 ms 以下；龙王庙底界，南部的变形中心向北迁移，在近南北向断距最大，北部的断裂落差开始增强，整体断裂断距大幅降低，保持在 10 ~ 40 ms 之间；在梁山组底界的构造活动具有明显的继承性特征，南部小段继续发育早期构造格局，但活动强度相对较弱，断距在 20 ms 以下，断层活动主要集中在北部，断裂落差较大，少部分达到 40 ms。

筇竹寺组断距达到最大值，以 500 m 为间隔进行加密测量，得到台缘断裂各段间的走势与差值。因此时发育完整地貌台缘，对台缘断裂断距的测量具有极大影响，此时期测量下的数据已不能单独表示为断裂断距，应为断距与地貌落差的综合体现，故在此界面用高差分析台缘沿其走向的综合变化特征。寒武系筇竹寺组高差最小为 25 ms，最大达到 250 ms。大部分分段高差处于 50 ~ 150 ms。A 至 B 段过渡高差减少，B 向 C 段转变随分段走向变换高差增加。台缘北部 D 段转折部分由两侧向中部过渡高差减弱。E 至 F 段高差逐渐减少，G 段高差增加，H 段达到整条台缘线高差最大值后逐渐缩小直至消失。综合结果表示台缘断裂 N—S 向时高差大于 E—W 向，以 E 段前后变化最为明显。

3.2 台缘断层差异演化特征

德阳—安岳槽盆在震旦纪—早寒武世发育[43]，呈北宽南窄的喇叭口形态，但两侧的台缘曲折多变，台缘断裂的发育可能限制了槽盆的形态，另外该时期也是走滑断裂发育的关键时期（图11-12）。综合台缘断裂平剖面解释以及区域构造演化背景，槽盆东侧的台缘断裂具有在不同时期、不同位置表现出不同的结构特征，具有较强的继承性与一定的迁移性。断裂结构与断裂断距的变化证实断裂的演化具有明显的多期活动特征，在槽盆发育时期活动性最强，随后仍有分段激活的特征。台缘断裂的形成可能早于灯影组，在槽盆发育时期一定程度改造台缘的形态，结束时间也晚于寒武纪，在后期继续激活，影响油气运聚与成藏。总体来看，台缘断裂的演化可以分为前震旦纪先存断裂形成、晚震旦世灯影组沉积期孤立断层发育、早寒武世筇竹寺组沉积期生长成熟、早寒武世—二叠纪断层多期弱活化等演化阶段。

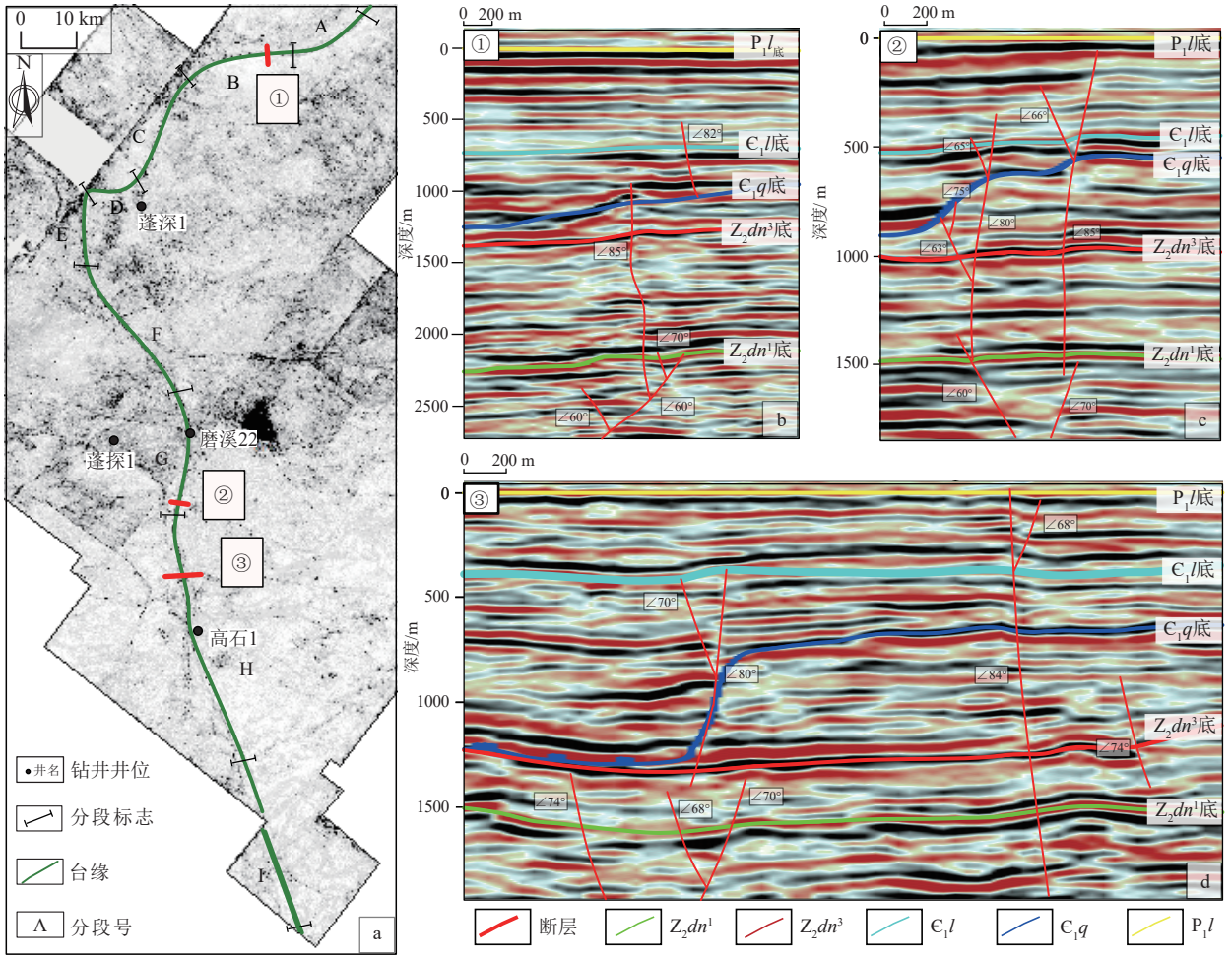


图11 安岳槽盆东段台缘不同区域断裂结构特征剖面图

Fig. 11 Fault characteristics of different areas along the platform margin in the eastern Anyue Trough

（1）前震旦纪先存断层形成阶段。四川盆地在南华纪发育NE、NEE向裂谷体系[60-61]。震旦纪兴凯地裂运动导致该地区处于伸展环境[55, 62-64]，中上扬子地区已经形成碳酸盐岩台地沉积面貌[65]，早期的裂谷可能转入裂陷或拗陷阶段[66]，但震旦系并未出现明显的大型正断层系统，在地震剖面上出现部分小正断层（图11），呈现为局部线性段。四川盆地航磁图和基底岩性图显示（图2），台缘发育的部位是基底结构变化以及岩性变化较大的部位，台缘断裂的激活与发育受控于基底差异结构。正是这种基底先存构造的存在导致台缘断裂在早期形成的过程中具有明显的分段性和走向差异性，台缘的形态与航磁反映的结构变化和基底岩性的变化都具有一定的吻合，形成研究区台缘南部NNW—SSE向和北部NEE—SWW向为主导的断裂格架（图2、13（a））。

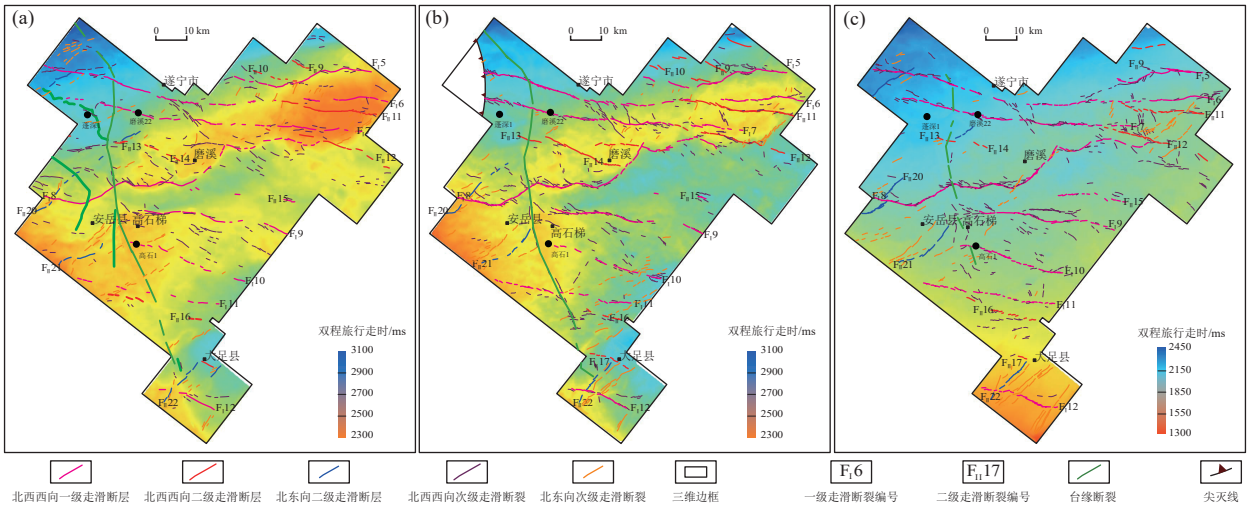


图 12　安岳槽盆东段台缘不同层系断裂平面分布图（据文献［68］修改）

Fig. 12　Planar distribution map of faults along the platform margin in the eastern Anyue Trough for different stratigraphic intervals （modified after reference ［68］）

（a）灯影组三段底；（b）筇竹寺组底；（c）梁山组底

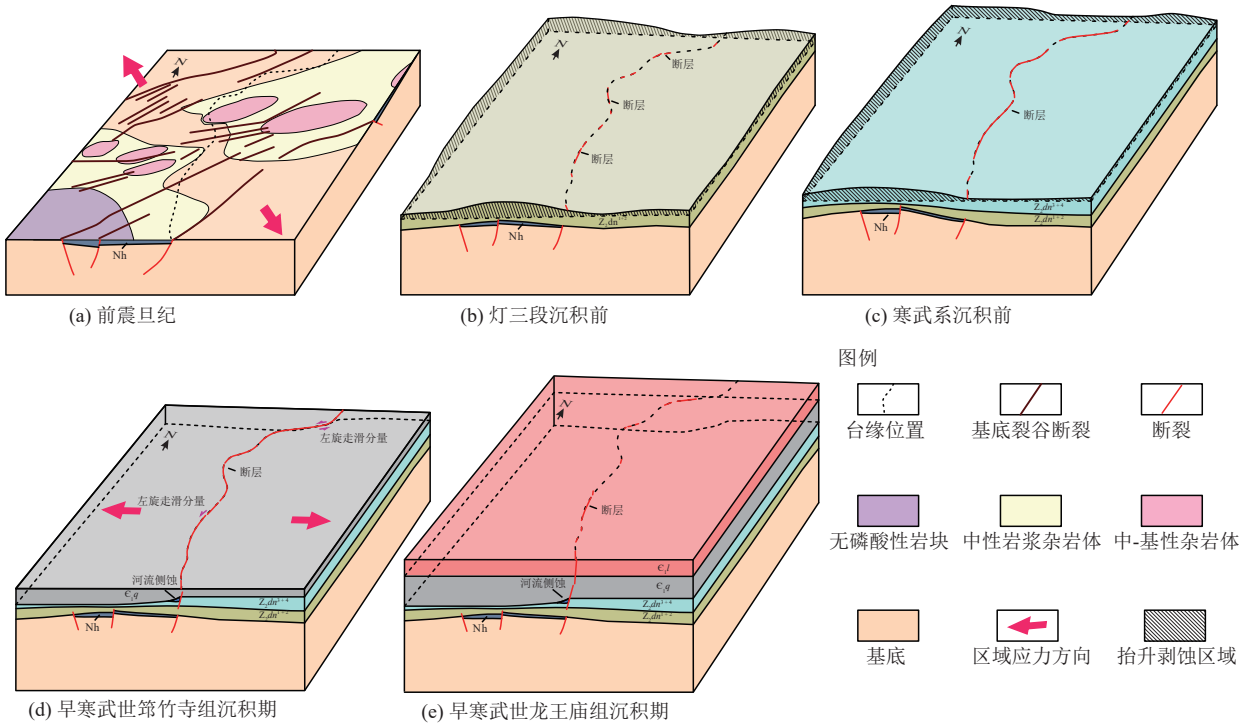


图 13　安岳槽盆东段台缘断裂多阶段分布与演化图（剥蚀特征、基底特征据文献［23，73］）

Fig. 13　Multi-stage fault distribution and evolution in the platform margin of the eastern Anyue Trough （erosion and basement characteristics according to reference ［23，73］）

（2）震旦纪灯影组孤立断层发育阶段。该时期伸展作用增强，台缘断层开始出现。德阳—安岳槽盆受区域拉张影响，克拉通盆地内部因同沉积断裂活动而产生构造沉降分异现象[67]，中上扬子克拉通被近南北向展布的德阳—安岳槽盆及城口—鄂西台内断陷所分割，形成了“三隆两凹”的构造格局。结合槽盆南北向走向，区域构造背景主要表现为东西向伸展。与南部相比，北部台缘的走向变化大，整体呈现出强烈的弯曲状态，分段则主要表现为北东向和东西向，这种复杂的弧形台缘伴随断裂发育。据此判断，北部的弧形台缘是断裂影响与地貌共同作用形成。断裂发育

位置与下部裂谷边界正断层及岩浆岩岩性变化边界相结合，断裂发育在由基底岩性差异与裂谷的先存断层改造后形成的薄弱带（图13（a）），故认为早期断裂的形成受到岩性及先存构造双重影响。在灯影组台缘断裂发育初期出现疑似正断层的断裂响应，台缘断裂发育可能继承南华系先存正断层，此时断裂倾角高陡，具有一定的走滑分量。东西向先存断裂在东西向伸展背景下激活，以走滑分量为主，控制形成宽缓低幅的台缘，近南北向则是伸展背景下发育的以正断层主控的台缘，二者在同一伸展背景下连接生长，组成北部复杂的弧形台缘形态，这也和平面上展示的特征一致（图9）。因此，推测近东西向断裂体系可能与北部裂谷边界断层重合，断层被激活后限制了台缘发育。该时期在伸展构造背景下，断裂格架伴随着德阳—安岳槽盆的形成开始出现，同时也在区域范围内形成了大规模的走滑断裂（图12（a））。该时期台缘限定了安岳槽盆的构造—沉积格局，断裂在台缘部位的发育影响着台缘的形态与结构，在伸展构造背景下，近南北向断层主要表现为正断层性质，断层作为台地与槽盆的边界。断层的下盘是有利的碳酸盐岩沉积期，上盘深水区不利于高能相带的发育，正断层在断层下盘的掀斜作用使其成为相对高点，在高石1井区和磨溪22井区形成较好的高能镶边台地，而近东西向的台缘主要受控于先期的近东西向断层（图12）。在该时期具有调节变换的构造特征，控制形成幅度较低的台缘。北部水体相对较深，高能相带相较南部发育规模小。然而，在靠近台缘断层的部位（如蓬深1井区），由于断裂的活动会衍生大量的裂缝，控制形成裂缝型或裂缝—孔洞型储层（图12）。

（3）早寒武世生长成熟阶段。早寒武世德阳—安岳槽盆规模最大，伸展作用最强，断裂系统基本继承了晚震旦世的断裂格架，进一步控制影响着台缘的空间展布，该时期安岳槽盆展现了完整的台缘轮廓，而走滑断裂在该时期持续继承性发育并形成规模最大的断裂格架。四川盆地在寒武纪沿商丹带古秦岭洋拉开[65]，北缘形成被动大陆边缘盆地，盆地西缘在寒武纪呈伸展裂陷沉积环境，发育龙门山裂陷海，为克拉通边缘伸展裂陷盆地。研究区在早寒武世沉积了巨厚的碟形的筇竹寺组地层[69]，不发育区域性正断层，整体表现为克拉通内凹陷结构特征，在局部地区发育活动性较弱的小规模正断层。在地震剖面上巨厚的筇竹寺组地层内部发育张扭性的高陡直立断层，整条台缘线在平面上具有较强的属性显示，在地震剖面上解释发现，几乎所有的台缘位置都发育断层体系，但不同位置断层的性质有差异。断裂在寒武系底部多呈现高陡的倾角且在台缘发育部位出现明显的楔形增厚（图13（c），（d）），台缘发育部位与下部正断层位置具有对应继承性。台缘带附近可能更易发育伸展—走滑断裂或者走滑—伸展断裂，该种断裂的倾角较陡，其角度介于正断层与走滑断层之间。寒武系底界正断层活化使上部地层中发育调节走滑断裂将正断层连接形成完整台缘，德阳—安岳槽盆分布贯穿盆地南北。

（4）早寒武世—二叠纪断层多期弱活化。该时期开始，台缘断裂活动性开始减弱。龙王庙组沉积期槽盆已经被筇竹寺组及沧浪铺组的碎屑沉积物填平补齐[70]，北东—南西方向的构造活跃程度增加。构造背景由弱拉张转变为弱挤压[71]，应力激活下断裂在基本继承寒武系断裂位置的同时发生部分迁移，断裂有向南北向转变的趋势（图8（d））。至沧浪铺期沉积格局已明显异于筇竹寺组沉积期，此时四川盆地整体具有西浅东深的水体特征。台缘断裂的连接过渡部分率先停止活动，随后南部消失。此时仅部分活动性较强分段保留台缘形态，未表现出明显挤压环境下的断裂特征。地震剖面显示，南部断裂延伸至二叠系（图6、13（d）），可能受控于中、晚二叠世峨眉山地幔柱抬升引起的东吴构造运动。断裂局部激活后，四川盆地整体抬升剥蚀[72]，德阳—安岳槽盆演化至此结束（图13）。

3.3 德阳—安岳槽盆属性与台缘断裂机制探讨

关于德阳—安岳槽盆的成因机制，众多学者开展地震解剖、钻井分析、古地貌恢复等，提出“裂陷槽”[14]、“侵蚀槽”[23]、“侵蚀—裂陷槽”[37]等观点，也有学者提出其构造属性属于克拉通内凹陷[43]。台缘附近地震上显示同相轴的错断具有明显的侵蚀特征，且槽盆内部也被证实存在灯影组的缺失，而内部与台缘可能不属于同种类型的侵蚀，内部可能是构造造成的一定区域的规模剥蚀[23]。然而，按照台缘沉积相展布认为晚震旦世已经发育槽盆，槽内水体较深而与台地上碳酸盐岩沉积出现同期异相现象，因此认为槽内可能受控于震旦末期区域暴露而发育的区域剥蚀作用，

台缘部分可能受控于河流侧蚀作用，在不同的台缘位置具有不同的地震响应特征。这种外动力地质作用对于改变、塑造地貌形态作用巨大[74]，对于安岳槽盆这种大规模、区域性的、并具一定走向和规模形态的地质结构必定受控于特殊的内动力作用[37]。

如果不考虑侵蚀、剥蚀的外动力作用，安岳槽盆的构造属性究竟如何仍需进一步讨论。因为槽盆与典型的裂陷盆地结构特征有诸多不同，如缺少岩浆物质发现、不发育明显的边界正断层、且无向台缘楔形增厚的沉积体系出现等等。另一方面，正断层是裂陷盆地最为发育也是最基本的元素，而槽盆一般不具备一定规模且连续性较好的正断层系统。研究区地震剖面显示，在震旦系内部、寒武系槽盆中发现一些小尺度的同相轴错断、挠曲形成的下凹结构特征，在平面上规模极小，可能是一些微弱的正断层的响应。通过本次针对台缘地区断层结构的系统性研究，认为台缘断层具有明显的分段性，但不具备明显的张性特征，其断面陡直，一侧无明显楔形增厚，暗示其可能具有走滑性质[75]。根据近期震旦系—寒武系走滑断裂的大规模研究发现，综合认为其为调节槽盆不均匀伸展发育的[56]，由此可见台缘位置的发育的断层也可能具有一定的走滑性质，特别是台缘走向扭动的位置。其次，有学者对台缘带东侧取样进行古地温恢复，其结果也指向在灯影组沉积后可能出现早期走滑断层活化[31]。另外，一些台缘断层的深部具有明显的同相轴错断、下凹响应，与上覆寒武系内断层结构具有分层性，可能是先存小断裂激活造成的，这种小断层的不规则发育造成了台缘线总体走向呈南北向但局部发生弯曲的现象。

在震旦系深部的地层中可见类似断面反射，可能为南华系裂谷边界，并通过深部地球物理方法预测了其走向及位置[76]，但其以 NE 向、NNE 向为主的线性特征与安岳槽盆近南北向的展布不一致（图 13（a）），深部的大型正断层与震旦系—寒武系小型正断层并没有空间上的一致性，但不排除深部断裂系统一些次级的横向断层再激活诱导产生浅部断裂系统。上下两层断层发育的不一致也一定程度上反映深部南华裂谷与浅部槽盆的分层性，可能是受控不同的内动力条件的影响，但可以明确的是浅部安岳槽盆并非南华系裂谷后期热沉降作用下叠合盆地[47]。

综合来看，德阳—安岳槽盆属于低拉张强度和低拉张应变速率下形成的克拉通内凹陷，但其又具有代表差异伸展的喇叭口形态，可能形成于深部地幔的差异活动，也可能是板块边缘斜向俯冲的差应力造成的。近些年，诸多学者通过对云南西部地区的岩浆岩进行详细的物源与地球化学分析，指示原特提斯洋向扬子板块西缘之下发生俯冲，并证实了在晚震旦世存在着岩浆弧活动[31, 33]。四川盆地在新元古代发育在超大陆外缘，板块边缘具备大陆岛弧背景，具有长期俯冲的构造背景[55, 71, 77]。德阳—安岳槽盆的喇叭口形态与伸展—走滑复合应力场密切相关，晚震旦世扬子板块西缘受原特提斯洋斜向俯冲（俯冲角 ~ 30°）影响，产生北西—南东向主压应力（σ1）与北东—南西向主张应力（σ3）。差异伸展导致基底断裂优先活化，而走滑分量进一步加剧断裂分段性。因此，德阳—安岳槽盆可能是晚震旦世扬子板块边缘受原特提斯洋斜向俯冲作用下造成的盆地内部的弱伸展，动力从板缘向板内传递的衰减造成了伸展的不均一性，差异伸展导致基底断裂优先活化，而走滑分量进一步加剧断裂分段性。这一机制东非裂谷北段的“剪刀式扩张”模式[78]具有可比性，但走滑调节作用更为显著（走滑位移占比 > 30%），从而造成喇叭口式的槽盆以及斜向发育的走滑断裂系统[4, 79, 80]。

4　结　论

（1）台缘的平面整体形态呈近南北向展布，北部表现出多转折的复杂形态，中南部呈现向东部偏转的弧形特征。台缘断裂综合走向及平剖面特征可分为三种主要结构类型：以高角度正断层为特征的南北向段，断点多位于台缘顶部筇竹寺组地层内；东西向段性质更偏向调节走滑断层，断点位于台缘中部灯影组顶部；北西—南东段显示出过渡性特征，兼具伸展和走滑双重性质，呈双断形态，同时错断台缘顶底。平面上南北向与东西向段于台缘北部交错分布，北西—南东段位于台缘南部。

（2）台缘断裂活动具有分段差异变化的特征，各时期均表现出南北向断裂大于东西向特征；呈继承性发育，活动中心随地层沉积由中南部向北部迁移；平均断距由 20 ms 变化到 10 ms。峰值为

筇竹寺组地貌台缘时期，平均高差为120 ms；台缘断裂的演化可以分为前震旦纪先存断裂形成、晚震旦世灯影组沉积期孤立断层发育、早寒武世筇竹寺组沉积期生长成熟、早寒武世—二叠纪断层多期弱活化等主要演化阶段。

（3）德阳—安岳槽盆属于低拉张强度和低拉张应变速率下形成的克拉通内凹陷，台缘断裂格架受控基底先存构造的差异影响形成南北走向差异较大的断裂系统，影响着槽盆的形态，随着区域构造演化经历弱伸展—走滑分量的转换而造成不同分段断裂结构的差异性。

参考文献：

[1] 杨宪彰,能源,徐振平,等. 塔里木盆地三大构造旋回油气成藏特征[J]. 现代地质. 2024, 38(2): 287－299.

[2] 杨跃明,杨雨,杨光,等. 安岳气田震旦系、寒武系气藏成藏条件及勘探开发关键技术[J]. 石油学报. 2019, 40(4): 493－508.

[3] 邹才能,杜金虎,徐春春,等. 四川盆地震旦系—寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现[J]. 石油勘探与开发. 2014, 41(3): 278－293.

[4] 邬光辉,邹禺,徐伟,等. 四川盆地川中古隆起北斜坡震旦系走滑断裂分布及其勘探意义[J]. 天然气工业. 2023, 43(7): 35－43.

[5] ZHANG Z N, LIN M R, XI K L, et al. Pore development characteristics and controlling factors of Lower Cambrian Qiongzhusi shale gas reservoir in Sichuan Basin, China[J]. Unconventional Resources. 2024, 4: 100100.

[6] 贾鹏,黄福喜,林世国,等. 四川盆地及其邻区中上寒武统洗象池群沉积相与沉积模式特征研究[J]. 现代地质. 2021, 35(3): 807－818.

[7] 缪欢,姜振学,龚训,等. 川中地区筇竹寺组深层—超深层页岩孔隙结构与分形特征[J]. 现代地质. 2025, 39(5): 1305－1315.

[8] 李彦佑,吴娟,周志鹏,等. 四川盆地德阳—安岳裂陷槽中段寒武系筇竹寺组页岩气差异富集过程——来自裂缝脉体与流体包裹体的证据[J]. 石油实验地质, 2025, 47(5): 988－1002.

[9] 蔡振忠,徐帆,杨果,等. 塔里木盆地下寒武统玉尔吐斯组沉积特征及有机质富集模式[J]. 现代地质. 2024,38(05): 1258－1269.

[10] 唐浩,邬光辉,马兵山,等. 川中地区二叠系走滑断裂特征及成藏意义[J]. 现代地质. 2025, 39(4): 884－897.

[11] QIANG X, JIANFENG C, YUE Z, et al. The Early Cretaceous structural features and its influence on hydrocarbon accumulation in the southern Hurenbuqi depression, Erlian Basin[J]. Unconventional Resources. 2024, 4: 100061.

[12] HUANG J Q. On the polycyclic evolution of geosynclinal foldbelts[J]. Scientia Sinica. 1980, 23(4): 475－491.

[13] 刘鸿允,胡华光,胡世玲,等. 从Rb—Sr及K—Ar年龄测定讨论某些前寒武系及中生代火山岩地层的时代[J]. 地质科学. 1981(4): 303－313.

[14] 罗志立. 略论地裂运动与中国油气分布[J]. 中国地质科学院院报. 1984(3): 93－101.

[15] 宋泽章,金世贵,罗冰,等. 四川盆地德阳——安岳裂陷槽东西两侧震旦系灯影组天然气地球化学特征差异及其成因[J]. 石油勘探与开发. 2025, 52(2): 374－384.

[16] 杨一茗,石学文,刘文平,等. 四川盆地德阳—安岳裂陷槽中段筇竹寺组沉积演化模式与有利相带优选[J]. 天然气地球科学. 2024, 35(12): 2106－2120.

[17] 刘珍,刘鹏,王鹏,等. 德阳-安岳裂陷槽南段特征及成藏意义[C]. 中国石油学会石油物探专业委员会, 第二届中国石油物探学术年会论文集(中册),武汉: 2024.

[18] 马腾霄. 川中地区早寒武世盆地沉积充填特征与裂陷槽演化[D]. 成都:成都理工大学, 2023.

[19] 黎荣,王永骁,汪泽成,等. 四川盆地晚震旦世—早寒武世德阳—安岳裂陷槽南段地质特征[J]. 石油勘探与开发. 2023, 50(2): 285－296.

[20] 董帅. 四川盆地德阳-安岳裂陷槽发育特征与形成演化[D]. 青岛:中国石油大学(华东), 2022.

[21] 王贝. 四川盆地中部震旦纪—早寒武世多幕裂陷作用及其成因机制[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2017.

[22] 李春阳,李书兵,冯晓明,等. 绵阳-长宁“侵蚀槽”发育特征及其对油气成藏的控制作用[J]. 石化技术. 2024, 31(7): 281－283.

[23] 杨雨,黄先平,张健,等. 四川盆地寒武系沉积前震旦系顶界岩溶地貌特征及其地质意义[J]. 天然气工业. 2014, 34(3): 38－43.

[24] 汪泽成,姜华,陈志勇,等. 中上扬子地区晚震旦世构造古地理及油气地质意义[J]. 石油勘探与开发. 2020, 47(5): 884－897.

[25] 刘宏,罗思聪,谭秀成,等. 四川盆地震旦系灯影组古岩溶地貌恢复及意义[J]. 石油勘探与开发. 2015, 42(3): 283－293.

[26] 周慧,李伟,张宝民,等. 四川盆地震旦纪末期—寒武纪早期台盆的形成与演化[J]. 石油学报. 2015, 36(3): 310－323.

[27] 杨志如,王学军,冯许魁,等. 川中地区前震旦系裂谷研究及其地质意义[J]. 天然气工业. 2014, 34(3): 80－85.

[28] 杜金虎,邹才能,徐春春,等. 川中古隆起龙王庙组特大型气田战略发现与理论技术创新[J]. 石油勘探与开发. 2014, 41(3): 268－277.

[29] 杜金虎,汪泽成,邹才能,等. 上扬子克拉通内裂陷的发现及对安岳特大型气田形成的控制作用[J]. 石油学报. 2016, 37(1): 1－16.

[30] MA Z, ZHU C, LI K, et al. Heat production rate of deep rocks in Bohai Bay Basin and its relationship with terrestrial heat flow[J]. Unconventional Resources. 2024, 4: 100072.

[31] 施亦做,汪泽成,徐秋晨,等. 叠合盆地古老地层热史恢复及应用——以四川盆地川中古隆起震旦系——寒武系为例[J]. 天然气工业. 2024, 44(8): 29－43.

[32] 白富正,王一伟,罗绍强,等. 四川茂县渭门组凝灰岩锆石

SHRIMPU-Pb测年及地质意义[J]. 高校地质学报. 2015, 21(1): 163 - 167.
[33] 徐晓尹,蔡志慧,陈希节,等. 保山地体寒武纪基性火山岩及其大地构造意义[J]. 地质通报. 2017, 36(7): 1104 - 1117.
[34] SHAN H, LIU J, DING X, et al. Subduction initiation of the Proto-Tethys Ocean that facilitated climate change and biodiversification[J]. Earth and Planetary Science Letters. 2022, 600: 117874.
[35] 田鹏,周青云,白仙富,等. 滇西南把边江断裂带流域地貌特征与构造活动的关系[J]. 现代地质. 2025, 39(4): 898 - 907.
[36] 李忠权,刘记,李应,等. 四川盆地震旦系威远—安岳拉张侵蚀槽特征及形成演化[J]. 石油勘探与开发. 2015, 42(1): 26 - 33.
[37] 马奎,文龙,张本健,等. 四川盆地德阳——安岳侵蚀裂陷槽分段性演化分析和油气勘探意义[J]. 石油勘探与开发. 2022, 49(2): 274 - 284.
[38] 马明,刘池洋,王建强,等. 鄂尔多斯地块庆阳—鄂托克旗古隆起地质特征及其形成与演化[J]. 现代地质. 2024, 38(6): 1431 - 1444.
[39] 姜鹍鹏,刘亚雷,周新桂,等. 塔里木盆地柯坪断隆早古生代断裂构造特征:以柯坪南地区为例[J]. 现代地质. 2024, 38(5): 1248 - 1257.
[40] 杨少航,罗良,马诗杰,等. 川南长宁地区构造变形特征及对页岩气保存条件的影响[J]. 现代地质. 2024, 38(6): 1458 - 1472.
[41] 魏国齐,杨威,杜金虎,等. 四川盆地高石梯—磨溪古隆起构造特征及对特大型气田形成的控制作用[J]. 石油勘探与开发. 2015, 42(3): 257 - 265.
[42] 魏国齐,谢增业,白贵林,等. 四川盆地震旦系—下古生界天然气地球化学特征及成因判识[J]. 天然气工业. 2014, 34(3): 44 - 49.
[43] 刘树根,王一刚,孙玮,等. 拉张槽对四川盆地海相油气分布的控制作用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版). 2016, 43(1): 1 - 23.
[44] 张本健,彭思桥,陈骁,等. 德阳—安岳裂陷槽北段西边界地震识别及油气地质意义[J]. 特种油气藏. 2025, 32(1): 32 - 39.
[45] 周刚,罗冰,张新,等. 四川盆地德阳—安岳凹槽形成机理及灯影组沉积新格局[J]. 天然气工业. 2024, 44(8): 13 - 28.
[46] 江同文,田威振,唐青松,等. 四川盆地川中地区深层碳酸盐岩走滑断层控藏作用[J]. 石油学报. 2024, 45(8): 1174 - 1186.
[47] 鲁国,何登发,开百泽. 四川盆地构造沉降特征及成因机制分析[J]. 地质科学. 2023, 58(1): 86 - 104.
[48] 包茨,杨先杰,李登湘. 四川盆地地质构造特征及天然气远景预测[J]. 天然气工业. 1985(4): 1 - 11.
[49] 何骁,唐青松,邬光辉,等. 四川盆地安岳气田震旦系走滑断裂控储作用[J]. 石油勘探与开发. 2023, 50(6): 1116 - 1127.
[50] 梁瀚,唐浩,冉崎,等. 四川盆地川中地区走滑断裂的分布、类型与成因[J]. 地质学报. 2023, 97(8): 2609 - 2620.
[51] AN L J, SAMMIS C G. Development of strike-slip faults: shear experiments in granular materials and clay using a new technique[J]. Journal of Structural Geology. 1996, 18(8): 1061 - 1077.
[52] TAN L, LIU H, CHEN K, et al. Sequence sedimentary evolution and reservoir distribution in the third and fourth members of Sinian Dengying Formation, Gaomo area, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development. 2022, 49(5): 1004 - 1018.
[53] GU Z, LONERGAN L, ZHAI X, et al. The formation of the Sichuan Basin, South China, during the Late Ediacaran to Early Cambrian[J]. Basin Research. 2021, 33(4): 2328 - 2357.
[54] 郭春丽,王登红,陈毓川,等. 川西新元古代花岗质杂岩体的锆石SHRIMP U-Pb年龄、元素和Nd-Sr同位素地球化学研究:岩石成因与构造意义[J]. 岩石学报. 2007(10): 2457 - 2470.
[55] LI S, ZHAO S, LIU X, et al. Closure of the Proto-Tethys Ocean and Early Paleozoic amalgamation of microcontinental blocks in East Asia[J]. Earth-Science Reviews. 2018, 186: 37 - 75.
[56] 马兵山,梁瀚,邬光辉,等. 四川盆地中部地区多期次走滑断层的形成及演化[J]. 石油勘探与开发. 2023, 50(2): 333 - 345.
[57] 杨平,丁博钊,范畅,等. 四川盆地中部高石梯地区柱状下拉异常体分布特征及成因[J]. 石油勘探与开发. 2017, 44(3): 370 - 379.
[58] 谷明峰,刘冉,张豪,等. 四川盆地加里东期构造运动特征及其地质响应[J]. 天然气工业. 2023, 43(2): 32 - 43.
[59] 李洪奎. 四川盆地地质结构及叠合特征研究[D]. 成都:成都理工大学, 2020.
[60] 谷志东,汪泽成. 四川盆地川中地块新元古代伸展构造的发现及其在天然气勘探中的意义[J]. 中国科学:地球科学. 2014, 44(10): 2210 - 2220.
[61] 管树巍,吴林,任荣,等. 中国主要克拉通前寒武纪裂谷分布与油气勘探前景[J]. 石油学报. 2017, 38(1): 9 - 22.
[62] LIU Z, TAN S, HE X, et al. Petrogenesis of mid-Neoproterozoic (ca. 750 Ma) mafic and felsic intrusions in the Ailao Shan-Red River belt: Geochemical constraints on the paleogeographic position of the South China block[J]. Lithosphere. 2019, 11(3): 348 - 364.
[63] CAWOOD P A, STRACHAN R A, PISAREVSKY S A, et al. Linking collisional and accretionary orogens during Rodinia assembly and breakup: Implications for models of supercontinent cycles[J]. Earth and Planetary Science Letters. 2016, 449: 118 - 126.
[64] CAWOOD P A, WANG Y, XU Y, et al. Locating South China in Rodinia and Gondwana: A fragment of greater India lithosphere?[J]. Geology. 2013, 41(8): 903 - 906.
[65] 杨森楠. 秦岭古生代陆间裂谷系的演化[J]. 地球科学. 1985(4): 53 - 62.
[66] 何登发,李德生,张国伟,等. 四川多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. 地质科学. 2011, 46(3): 589 - 606.
[67] 李纯泉,陈红汉,唐大卿,等. 四川盆地高石梯—磨溪地区走滑断裂控制下的“层楼式”油气成藏模式:以震旦系—寒武系

为例[J]. 地球科学. 2023, 48(6): 2254 - 2266.
[68] 马兵山,王家木,唐浩,等. 四川盆地川中地区走滑断裂带特征及成因机制[J]. 地质学报. 2025, 99(10): 3303 - 3319.
[69] YANG W, WEI G, XIE W, et al. New understanding of the sedimentary model of Lower Cambrian Longwangmiao Formation reservoirs in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry B. 2019, 6(1): 86 - 94.
[70] 鲁国. 四川盆地震旦-寒武纪关键构造期构造-沉积响应[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2021.
[71] 张帅,罗冰,汪泽成,等. 四川盆地德阳—安岳克拉通内裂陷成因及其与原特提斯洋的联系[J]. 天然气工业. 2025, 45(2): 37 - 50.
[72] MO WULING, SU NAN, WEI GUOQI, et al. Structural control, seismic expression, and types of reefs of rifting margins in the late Permian Changxing Age, Sichuan Basin, China [J]. Arabian Journal of Geosciences. 2019, 12(24): 788.
[73] 文龙,周刚,孙峥,等. 四川盆地及周缘前震旦系裂谷特征与油气地质意义[J]. 天然气工业. 2024, 44(1): 26 - 39.
[74] TENG Z, ZHU P, WANG X, et al. Characteristics and model of meandering-river-delta reservoir architecture of member Chang-6 in Fuxian area, Triassic Ordos Basin[J]. Unconventional Resources. 2024, 4: 100084.
[75] CHRISTIE-BLICK N, BIDDLE K T. Deformation and Basin Formation along Strike-Slip Faults[J]. Strike Slip Deformation Basin Formation & Sedimentation. 1985.
[76] 谷志东,翟秀芬,江兴福,等. 四川盆地威远构造基底花岗岩地球化学特征及其构造环境[J]. 地球科学(中国地质大学学报). 2013, 38(S1): 31 - 42.
[77] 唐浩,邬光辉,温银宇,等. 四川盆地前震旦纪裂谷特征与成因探讨[J]. 地质学报. 2025, 99(7): 2451 - 2462.
[78] EBINGER C J, KEIR D, BASTOW I D, et al. Crustal Structure of Active Deformation Zones in Africa: Implications for Global Crustal Processes[J]. Tectonics. 2017, 36(12): 3298-3332.
[79] 吴永宏,刘嘉伟,冯亮,等. 四川盆地开江——梁平海槽东南台缘带走滑断裂特征及其控藏作用[J]. 海相油气地质. 2023, 28(3): 291 - 300.
[80] 吴永宏,陶夏妍,赵忠宇,等. 四川盆地开江-梁平海槽走滑断层的发现与启示[J]. 地质通报. 2025, 44(1): 117 - 128.