第 53 卷　第 4 期　　成都理工大学学报（自然科学版）　　Vol. 53　No. 4
2026 年 8 月　　JOURNAL OF CHENGDU UNIVERSITY OF TECHNOLOGY（Science & Technology Edition）　　Aug. 2026

DOI：10.12474/cdlgzrkx.2026043001

川西晚三叠世陆缘海形成演化与四川盆地须家河组油气勘探

刘树根[1,2*]，孙　玮[1]，邓　宾[1]，宋金民[1]，冉　波[1]，张闻林[3]，罗　平[4]，吕正祥[1]，叶玥豪[1]，杨荣军[5]，王天瑞[1]，徐宏远[1]，郭　冉[6]，刘重江[1]

1. 油气藏地质及开发工程全国重点实验室（成都理工大学），成都 610059；
2. 西华大学，成都 610039；
3. 中国石油西南油气田公司，成都 610051；
4. 中国石油勘探开发研究院，北京 100083；
5. 成都北方石油勘探开发技术有限公司，成都 610213；
6. 中国石油川庆钻探工程有限公司地球物理勘探公司，成都 610213

[摘要] 本文通过野外露头和钻井岩心资料，基于构造地质学与沉积学、沉积盆地和邻近造山带的协同研究，阐述了川西晚三叠世陆缘海的形成演化，并对四川盆地海相上三叠统的油气勘探前景进行了探讨。研究结果表明：(1)晚三叠世四川盆地西部不是前陆盆地(湖盆)，而是陆缘海；(2)上三叠统须家河组须一段沉积时，西秦岭造山带自北东向南西冲断隆升，在其前缘形成北西-南东向的前陆盆地，四川盆地西缘茂汶断裂(扬子板块边界)发生被动左旋走滑和隆升，在现今四川盆地西部形成陆缘海(海湾)(川西陆缘海)，此时松潘—甘孜地区多为深海(扇)沉积，川西陆缘海为浅海沉积；(3)须家河组须二段至须五段沉积时，西秦岭造山带和松潘—甘孜造山带自北东向南西持续冲断隆升，其前缘形成北西—南东向的前陆盆地，川西陆缘海西北缘沿茂县—汶川断裂(扬子板块边界)被动左旋走滑和隆升，川西陆缘海为浅海沉积，发育潮汐沉积构造，并不断向东扩大沉积范围。在须家河组须六段仍可见潮汐沉积构造。晚三叠世末期，古特提斯洋与四川盆地通道关闭，川西陆缘海消亡；(4)川西陆缘海须家河组及其须一段、须二段、须四段沉降中心(厚度最大地区)均在都江堰—绵阳地区，未发生向东的明显迁移，龙门山由北西向南东的冲断作用较弱；(5)受川西陆缘海控制，须家河组发育多套烃源岩和储集层，保存条件佳，具备形成大中型油气田的条件，其油气勘探前景广阔。建议基于陆缘海和海相碎屑岩沉积观点，重新梳理四川盆地须家河组的油气地质条件和油气分布规律，调整油气勘探思路，实现新的油气勘探发现。

[关键词] 四川盆地；晚三叠世；陆缘海；须家河组；油气勘探

[分类号] P618.13　　[文献标志码] A

收稿日期：2026-04-30；**改回日期：**2026-06-02。　**责任编辑：**黄维婷。　**期刊主页：**https://xbzrkx.cdut.edu.cn/

基金项目：国家自然科学基金重点项目（42230310）。

***通信作者：**刘树根（1964—），男，博士，教授，研究方向：石油地质学、构造地质学，E-mail：lsg@cdut.edu.cn。

引用格式：刘树根，孙玮，邓宾，等，2026. 川西晚三叠世陆缘海形成演化与四川盆地须家河组油气勘探 [J]. 成都理工大学学报（自然科学版），53(4)：813—839.

Liu S G, Sun W, Deng B, et al., 2026. Formation and evolution of the west Sichuan Late Triassic Epoch pericontinental sea and hydrocarbon exploration of the Upper Triassic Series Xujiahe Formation in Sichuan Basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 53(4): 813—839.

Formation and evolution of the west Sichuan Late Triassic Epoch pericontinental sea and hydrocarbon exploration of the Upper Triassic Series Xujiahe Formation in Sichuan Basin

LIU Shugen[1, 2*], SUN Wei[1], DENG Bin[1], SONG Jinmin[1], RAN Bo[1], ZHANG Wenlin[3], LUO Ping[4], LÜ Zhengxiang[1], YE Yuehao[1], YANG Rongjun[5], WANG Tianrui[1], XU Hongyuan[1], GUO Ran[6], LIU Chongjiang[1]

1. *State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China*;

2. *Xihua University, Chengdu 610039, China*;

3. *PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu 610051, China*;

4. *PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China*;

5. *Chengdu Northern Petroleum Exploration and Development Technology Co., Ltd., Chengdu 610213, China*;

6. *Sichuan Geophysical Company of CNPC Chuanqing Drilling Engineering Company Limited, Chengdu 610213, China*

Abstract: Based on field outcrop and drilling core data, and synergistic studies between tectonics, sedimentology, basins, and adjacent orogenic belts, this present paper expounds the formation and evolution of the Late Triassic Epoch pericontinental sea in the western Sichuan region, and discusses the hydrocarbon exploration prospects of the Upper Triassic Series marine sequence in Sichuan Basin. The results indicate the following: (1) the western Sichuan Basin was not a foreland basin (i.e., a lacustrine basin) but a pericontinental sea during the Late Triassic Epoch. (2) During the deposition of member 1 of the Upper Triassic Series Xujiahe Formation, west Qinling orogen thrusted and uplifted from the northeast to the southwest, forming a northwest–southeast trending foreland basin in its front. The Maowen Fault at the western margin of Sichuan Basin (the boundary of the Yangtze block) underwent passive sinistral strike-slipping and uplifting, forming a pericontinental sea (bay) in the present western Sichuan Basin. At that time, deep-water marine deposits (fans) widely developed in the Songpan–Ganzi domain, while shallow marine deposits dominated in the western Sichuan pericontinental sea. (3) During the deposition of members 2 to 5 of the Upper Triassic Series Xujiahe Formation, the west Qinling and Songpan–Ganzi orogenic belts experienced continuous thrusting and uplifting from the northeast to southwest, with a northwest–southeast trending foreland basin developed in the frontal zone. The Maowen Fault on the northwestern margin of the pericontinental sea (i.e., the boundary of the Yangtze block) remained in passive sinistral strike-slipping and uplifting modes. The western Sichuan pericontinental sea was dominated by shallow marine deposits with well-developed tidal sedimentary structures, and the sedimentary area continuously expanded eastward. Tidal sedimentary structures can still be observed in member 6 of the Upper Triassic Series Xujiahe Formation. At the end of the Late Triassic Epoch, the passage between the Paleo-Tethys Ocean and Sichuan Basin was completely closed, and the western Sichuan pericontinental sea eventually disappeared. (4) In the range of the western Sichuan pericontinental sea, the subsidence centers (i.e., areas with the maximum stratum thickness) of the Upper Triassic Series Xujiahe Formation and its members 1, 2, and 4 were all located in the Dujiangyan–Mianyang area and did not undergo obvious eastward migration, indicating that the thrust of the Longmenshan Mountains from northwest to southeast was weak during this period. (5) Controlled by the formation and evolution of the western Sichuan pericontinental sea, the Upper Triassic Series marine Xujiahe Formation in Sichuan Basin contains multiple sets of high-quality source rocks and reservoirs with favorable preservation conditions, possessing the geological conditions necessary for large and medium-sized oil and gas fields, showing broad hydrocarbon exploration potential. It is suggested that, based on this new understanding of pericontinental sea and marine clastic deposition, the hydrocarbon geological conditions and hydrocarbon distribution regularities of the Upper Triassic Series Xujiahe Formation in Sichuan Basin should be re-analyzed and exploration plans be adjusted, so that new breakthroughs in oil and gas exploration can be achieved.

Key words: Sichuan Basin; Late Triassic Epoch; pericontinental sea; Xujiahe Formation; oil and gas exploration

20 世纪 70—80 年代，中国西部造山带与毗邻盆地系统受到地质学家广泛关注与研究，“盆-山系统”或“盆-山耦合”等成为中国油气地质学家创新阵地和前沿热点领域（朱夏等，1983；刘树根，1993；刘树根等，1995a，1995b，2003；Liu et al.，1996；刘和甫，2001）。基于龙门山和四川盆地西部地区晚三叠世构造变形与沉积建造等，认为四川盆地西部在晚三叠世为前陆盆地，龙门山为冲断推覆构造带（刘树根，1993；刘树根等，1995a，1995b）。此后，冲断带-前陆盆地（湖盆）理论成为龙门山和四川盆地西部地区研究的主流认识（刘树根等，1995b，2003；刘和甫，2001；Hubbard and Shaw 2009；Roger et al.，2010；Yan et al.，2011）。

但是，赵霞飞等（2008）依据沉积岩各种特征的深入细致研究，从沉积学角度提出了四川盆地上三叠统须家河组均为海相潮汐作用沉积的认识，否定了多数学者持有的须家河组（大部分）为陆相湖盆沉积的认识；刘树根等（2009a）依据造山带构造地质学和盆-山耦合的综合研究，从盆地分析角度提出四川盆地西部晚三叠世为陆缘海（海湾），否定了多数学者（包括作者本人）坚持的前陆盆地（湖盆）的认识。上述两方面从不同学科和角度独立提出的创新性认识长期以来均未得到学术界和工业界的广泛重视。这些创新性认识，不仅对全面认识和理解晚三叠世四川盆地的性质、须家河组的沉积分布、龙门山造山带的形成和古特提斯洋的演化等基础地质问题具有重要的理论意义，而且对四川盆地须家河组油气成藏要素的展布和油气分布规律的把握，确定正确的油气勘探思路等均有十分重要的实践意义。

本文将造山带与沉积盆地研究相结合，通过构造地质学和沉积学的协同研究，揭示晚三叠世川西陆缘海的形成演化与四川盆地海相上三叠统的沉积分布；在此基础上，从陆缘海和海相碎屑岩视角，探讨须家河组的油气勘探前景。

1　川西晚三叠世陆缘海的发现

中—晚三叠世，松潘—甘孜地区为深海碎屑岩复理石建造为主（Liu et al.，2013a；李祥辉等，2016；龚大兴等，2019），而四川盆地中三叠世为碳酸盐台地相（Liu et al.，2021；徐康和宫晗凝，2023；何利等，2023；宋金民等，2024）、晚三叠世以碎屑岩建造为主（刘树根，1993；Liu et al.，2021）。基于松潘—甘孜地区构造特征等研究表明，晚三叠世印支期近南北向或北东-南西向挤压构造变形导致中-上三叠统复理石层系（扎尕山组、杂谷脑组、侏倭组、新都桥组等）发生多层次滑脱拆离构造、地层重复和叠加构造等（刘树根，1993；Dirks et al.，1994；Harrowfield and Wilson，2005；Liu et al.，2013a），同时沿茂县—汶川韧性剪切带发生强烈左旋走滑构造变形与强变质作用，形成松潘—甘孜褶皱带内的系列弧顶向南或南西的弧形构造带（刘树根，1993；Worley and Wilson，1996；Deng et al.，2012，2013；Liu et al.，2013a，2013b；李智武等，2021）。据此，发现晚三叠世龙门山中北段印支期构造活动较早较强，龙门山由北东向南西逐渐扩展并发生强烈的左旋走滑构造变形和隆升作用，导致四川盆地西部马鞍塘组生物礁消亡、须家河组同构造沉积砾岩由北东向南西逐渐迁移等特征；并且认为晚三叠世龙门山由北西向南东的冲断作用并不强烈，四川盆地西部在晚三叠世不是前陆盆地。晚三叠世古特提斯洋西撤和关闭是个渐进过程，四川盆地在晚三叠世中—晚期可能仍为与古特提斯洋东段相连接的陆缘海沉积环境，须家河组主要为海相沉积（刘树根等，2009a；Deng et al.，2012；Liu et al.，2013b；Chen et al.，2020）。据此，研究发现了川西晚三叠世陆缘海（刘树根等，2009a；Deng et al.，2012；Liu et al.，2013b）。

川西晚三叠世陆缘海的发现是一个长期的过程，基于盆-山系统对松潘—甘孜造山带、龙门山造山带和四川盆地长期研究成果融会贯通的结果。其最重要的成果有以下三方面：（1）20 世纪 90 年代初开始，在罗志立教授带领下，团队与澳大利亚墨尔本大学 Wilson 教授团队开展了 15 年的合作，对松潘—甘孜造山带和龙门山造山带进行了系统和深入研究，其两项成果对川西晚三叠世陆缘海的发现非常重要。一是明确了松

潘—甘孜造山带晚三叠世挤压变形作用的驱动力来自西秦岭造山带,区域应力方向为南北向或北东—南西向;二是发现了协调松潘—甘孜造山带和龙门山造山带(四川盆地)构造变形的晚三叠世茂县—汶川韧性剪切带,确定其东界为茂县—汶川断裂,并以左旋走滑作用为主(刘树根,1993; Dirks et al., 1994; 刘树根等, 1995b; Worley and Wilson, 1996; Harrowfield and Wilson, 2005; Liu et al., 2013b; Deng et al., 2013)。(2)自 2003 年起,在王成善院士和马永生院士指导下,团队对松潘—甘孜造山带,尤其是若尔盖(松潘)地区和红参 1 井三叠系西康群复理石层系开展了深入全面的沉积学和构造地质研究,明确了西康群复理石层系主要为深海(扇)沉积,并进一步明确了松潘—甘孜造山带晚三叠世挤压变形作用的驱动力来自西秦岭造山带,区域应力方向为南北向或北东-南西向(Liu et al., 2013a; 李祥辉等, 2016)。(3)2006—2011 年,在张国伟院士和罗志立教授的指导下,团队对龙门山造山带的四维结构构造(走向、倾向、深度和时间)开展了全面深入的研究,尤其发现晚三叠世龙门山造山带的形成和隆升是一个从北东向南西递进的过程,古特提斯洋向西的退出是一个渐进过程。在上述成果的基础上,研究发现了川西晚三叠世陆缘海(刘树根等, 2009a; Deng et al., 2012; Liu et al., 2013b),并预测:①四川盆地上三叠统应以浅海沉积环境为主,与松潘—甘孜造山带西康群深海复理石层系构成自东浅海向西深海的完整序列;②松潘—甘孜造山带晚三叠世西康群复理石层系与四川盆地上三叠统为同期沉积。后文将述,这两项预测均得到后期研究证实。

四川盆地须家河组沉积相的研究,观点众多,从陆相到海相,众说纷纭。有学者将须一段—须四段的砂岩均划为曲流河的边滩,将须五段—须六段的砂岩判定为辫状河的心滩(张宏等, 2009);或者将须一段划分为陆相湖泊相,须二段及以上的砂岩断定为曲流河—三角洲沉积,并将川东地区的须家河组按照岩性划出须七段(周倩羽等, 2016)。四川盆地上三叠统马鞍塘组—须三段为海相沉积,须四段—须六段沉积时期,由于龙门山南段的隆升,四川盆地与外海逐渐失去联系,但川西和川中地区仍受到海侵作用的影响(施振生等, 2012)。目前认为整个须家河组为陆相的学者已经很少,其主流认识是将须一段划为海相沉积,须二段—须六段划为陆相的冲积扇-湖泊相沉积。其中,根据香二段、香四段砂岩“矿物和结构成熟度高,较厚砂岩层大多呈逆粒序构造,常发育冲洗层理和互成 180°交角的楔形或板状斜层理,风暴岩频繁发育等沉积构造特征”,将其划为湖相滩坝沉积(侯方浩等, 2005)。自从王金琪(1990, 2003)提出安县运动后,陆续有学者将须家河组划分为须上盆(须上段)和须下盆(须下段)(林良彪等, 2006; 蒋裕强等, 2011; 赵军寿等, 2013; 钱利军等, 2016; 陈洪德等, 2021),并认为须下段为海相;钱利军等(2016)将须二段—须四段划归海相,其上划为陆相。上述学者的研究,无论持海相观点,还是陆相观点,均是基于四川盆地西部晚三叠世为前陆盆地的认识,并在晚三叠世后期发育湖盆。

根据 Visser(1980)提出的双黏土层概念及赵霞飞(1989)在德国 Amrum 岛海岸的潮汐沉积特征及其演化研究成果,赵霞飞等(2008, 2013, 2019)、赵霞飞和张闻林(2011)发现须家河组(须二段—须六段)潮汐作用的双黏土层诊断性标识,提出须家河组(须二段—须六段)为海相潮汐作用沉积,其沉积构造证据包括反向交错层理、双黏土层、潮汐成因砂泥薄互层、冲洗交错层理、楔状交错层理、风暴沉积特征等;古生物方面存在半咸水-淡水化石组合带;矿物学与地球化学方面,海绿石、菱铁矿结核的存在,硼元素含量及碳氧同位素数据均指示水体为正常海水-半咸水环境;已发现了河口湾、潮控三角洲等亚相。这些研究成果从沉积学角度证实了川西晚三叠世陆缘海的存在。

2 川西陆缘海形成演化与四川盆地海相上三叠统沉积

须家河组命名于四川广元城北工农镇须家河村,其主体为一套黄灰色、灰白色含砾砂岩、砂岩、粉砂岩与黑色泥岩夹煤层的沉积序列。该组地层与下伏中三叠统雷口坡组碳酸盐岩地层呈超覆不整合接触,自西向东、向南逐层超覆于雷口坡组不整合面之上,与上覆下侏罗统红层碎屑岩则为整合或不整合接触(王金琪, 2003; 邓康龄, 2007)。

依据野外露头及钻录井资料,按沉积厚度、

岩石学及古生物特征，须家河组被划分为须一段至须六段（何鲤等，2011；郑荣才等，2011）。其中，须一段因具海相或海陆过渡相特征，曾被称为马鞍塘组或小塘子组；经罗启后和王世谦（1996）研究，将其统归为须一段。鉴于须家河组岩性、古生物等方面的高度复杂性，其在四川盆地内的划分与对比长期存在争议（章顺利，2020），本次研究参考中国石化西南油气分公司（何鲤等，2011）及中国石油西南油气田公司（王小娟等，2023）确定的统一划分方案（图 1），将原川中地区的“香溪群”改称“须家河组”，并将原香一段至香六段分别对应于须一段至须六段。

基于前陆盆地的认识，众多学者认为四川盆地西部须家河组的物源是其西侧松潘—甘孜造山带的西康群，西康群的年龄应老于须家河组（陈斌等，2016）。然而，通过系统研究发现西康群和须家河组是同时期沉积产物（图 2）。针对四川盆地须家河组时代归属的研究历程可以分为三个阶段：（1）2016 年之前的定性研究，古生物约束须家河组沉积时限跨越了诺利阶–瑞替阶（冉波等，2016）；（2）2016—2022 年的定量研究，首次在须家河组中识别出火山灰夹层，针对火山灰中锆石的 U-Pb 同位素年代学分析获得了须家河组须五段的（214.7±1.6）Ma 精确年龄（冉波等，2016），但这一结果明显与磁性地层年代格架（207.2～201.3 Ma）相悖（Li et al.，2017）；（3）2023 年的综合解释，Jiang et al.（2023）综合了火山灰中锆石 U-Pb 同位素年代学结果与磁性地层年代格架，约束了须家河组的沉积年龄范围 223～210 Ma。本次研究厘定了须家河组须五段的火山灰锆石 U-Pb 同位素年龄值为（210.9±1.9）Ma，结合磁性地层格架，构建了须家河组沉积年龄为 224.0～206.3 Ma（图 2）。

在松潘—甘孜造山带，与四川盆地对应的须家河组海相碎屑岩主要为西康群，殷鸿福等（1992）根据稀少的化石证据认为其沉积时代大

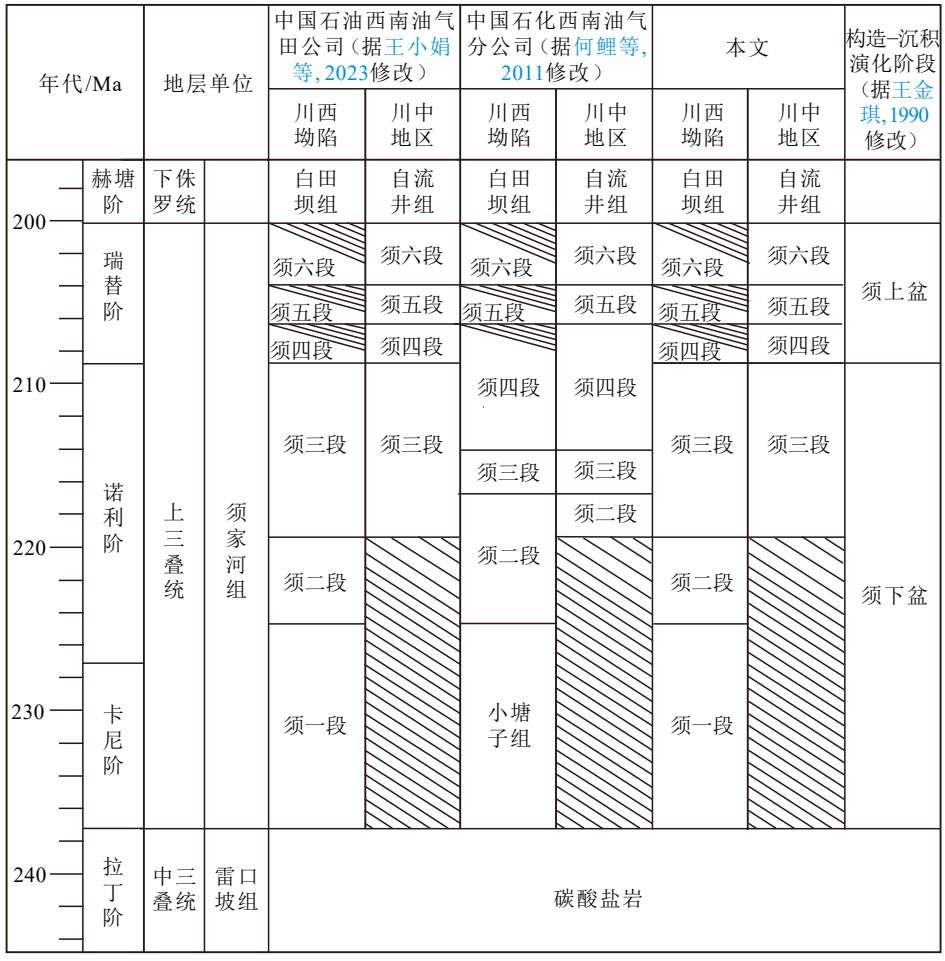

图 1　四川盆地上三叠统须家河组地层划分与对比

Fig. 1　Stratigraphic correlation of the Upper Triassic Series Xujiahe Formation in Sichuan Basin

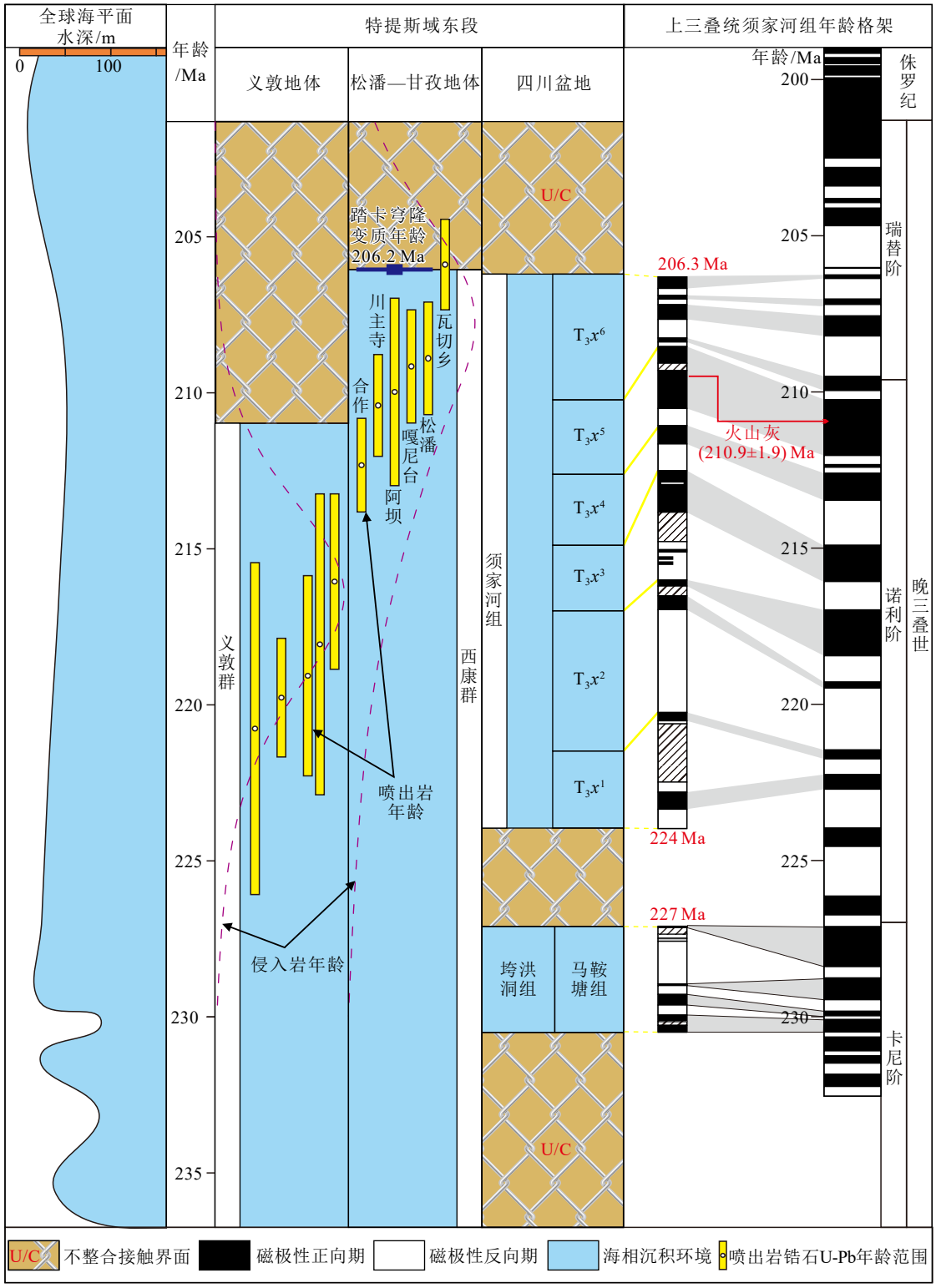

图 2 晚三叠世特提斯域东段义敦地体、松潘—甘孜地体和四川盆地海相沉积地层对比图

Fig. 2 Correlation of marine sedimentary strata of the Yidun Terrane, Songpan−Ganzi Terrane, and Sichuan Basin in the eastern segment of the Late Triassic Epoch Tethyan realm

注：全球海平面资料和磁性地层年龄参考标准引自 Ogg et al., 2016；义敦地体和松潘—甘孜地体的侵入岩年龄资料引自 Hu et al., 2026；松潘—甘孜地体的喷出岩年龄资料引自蔡宏明等, 2010；李祥辉等, 2016；踏卡穹隆变质年龄资料引自 Zhang et al., 2025；须家河组中火山灰的锆石 U-Pb 同位素年龄资料引自 Jiang et al., 2023；须家河组磁性地层年龄资料引自 Li et al., 2017；马鞍塘组磁性地层年龄资料引自 Shi et al., 2017。

致为晚三叠世的卡尼期—诺利期。本次研究系统梳理了在西康群中识别的火山岩夹层的锆石U-Pb同位素年龄和松潘—甘孜造山带南部踏卡穹隆的初始变质年龄（蔡宏明等，2010；李祥辉等，2016；Zhang et al., 2025），可约束西康群沉积时限应在206 Ma前结束（图2）。但据目前的研究程度，还无法将西康群的扎尕山组、扎谷脑组、侏倭组、新都桥组等与须家河组各段一一对应。

鉴于湖盆环境和海相环境的沉积特征有许多相似之处，但在盆地面积、水化学、物理过程（operating physical process）和生物过程（biologic process）有重要区别，尤其是湖盆没有明显的潮汐作用（Jain, 2025）。为了突出重点，下文以海相标准化石和潮汐沉积构造为主，论述四川盆地须家河组的海相（海陆过渡相）沉积特征。

2.1　上三叠统须一段

四川盆地须一段沉积期（卡尼晚期—诺利早期），阿尼玛卿—勉略一带的古特提斯分支洋盆已经关闭，松潘—甘孜与西秦岭持续碰撞挤压，区域构造应力以北东-南西向挤压应力为主（刘树根，1993；刘树根等，2003；Harrowfield and Wilson, 2005；骆必继等，2012；骆必继，2013；杨维刚等，2025），导致西秦岭向南西冲断隆升，形成北西-南东向的活动海岸（leading-edge coast, collision coast）并成为主要物源区；位于其前缘的松潘—甘孜北部地区成为北西-南东向的前陆盆地，接受碎屑物质沉积（刘树根等，2009a；Chen et al., 2020；Wang et al., 2024）。此时，松潘—甘孜的大部分地区被古特提斯洋海水覆盖为残留洋，多为深海（扇）沉积。此时龙门山尚未隆升，仅发育一系列水下高地和岛链，未在地貌上将扬子西缘与松潘—甘孜外海隔开。受松潘—甘孜地区北东—南西向构造挤压影响，处于松潘—甘孜与扬子地块边界的茂汶断裂发生被动左旋走滑（刘树根，1993；刘树根等，2009a；Liu et al., 2013b），川西地区成为陆缘海（海湾），本文称为川西陆缘海（海湾），其东部边界地区为不活动的海岸带（trailing-edge coast, passive coast）（图3-A）。

川西陆缘海须一段上超于中三叠统雷口坡组之上，发育马鞍塘组礁（海绵礁）滩和小塘子组浅海碎屑沉积（Wendt et al., 1989；孙玮等，2011；宋金民等，2024），完成了四川盆地从海相碳酸盐岩（清水环境）到海相碎屑岩（浑水环境）的转变（刘树根等，2009b）。据Wendt et al.（1989）的研究，马鞍塘组（须一段）海绵礁发育于其西北侧的甘孜—阿坝深海槽（deep marine trough）与南东侧的浅海环境之间（图3-A），水深在几十米至一百米；海绵礁的死亡和未发育浅水珊瑚礁，均可能是由于周缘陆源碎屑供给增多所致。王运生（1992）在马鞍塘组（须一段）发现菊石化石，也指示为浅海环境。川西陆缘海须一段的物源与松潘—甘孜上三叠统西康群的碎屑物源一样，主要受西秦岭隆升剥蚀区供给，且受古特提斯洋的海水搬运所控制（longshore drift）（谢继容等，2006）。川西陆缘海中三叠统天井山组（雷五段）是典型的碳酸盐岩（白云岩）清水沉积，上三叠统马鞍塘组（须一段下部）已有一定的陆源碎屑，而小塘子组（须一段上部）已是典型的陆源碎屑沉积，这反映了西秦岭造山带对川西陆缘海上三叠统碎屑岩沉积的影响逐步增强。

据四川盆地钻井资料，并参考西秦岭造山带前缘前陆盆地的展布特征，研究绘制了川西陆缘海及其邻区须一段（马鞍塘组和小塘子组）厚度图，须一段总体呈北西-南东向展布，其沉降中心位于阿坝—黑水—汶川—都江堰一带，最大厚度在400 m以上；在川西陆缘海内，须一段分布范围较小，仅分布在广元—成都—雅安一线以西地区（图4-A）。

2.2　上三叠统须二段

须二段沉积期（早—中诺利期），受松潘—甘孜与西秦岭碰撞持续挤压和西秦岭向南西持续冲断隆升的影响，松潘—甘孜带北部逐渐隆升成为活动海岸带，其前缘的北西向前陆盆地也随之向南西迁移，茂汶断裂被动左旋走滑也向南西递进发展和隆升（图3-B）。西秦岭向南西冲断隆升前锋位置的确定有一定的人为性，但茂汶断裂向南西的左旋递进前锋是据须二段砾岩的分布确定的，从而也对西秦岭向南西递进冲断隆升前锋位置有所限制。川西陆缘海整体上延续须一段沉积期的构造-沉积格局。松潘—甘孜地区古特提斯残留洋的范围整体上由北东向南西持续缩减，海水持续涌入川西陆缘海，川西陆缘海范围逐渐向东扩展至苍溪—安岳一带。在须二段岩心中发现众多的与潮汐作用有关的沉积构造，如川丰563井须二段的脉状和透镜状层理，岳2井须二段的潮汐双向层理，威东8井须二段的潮间

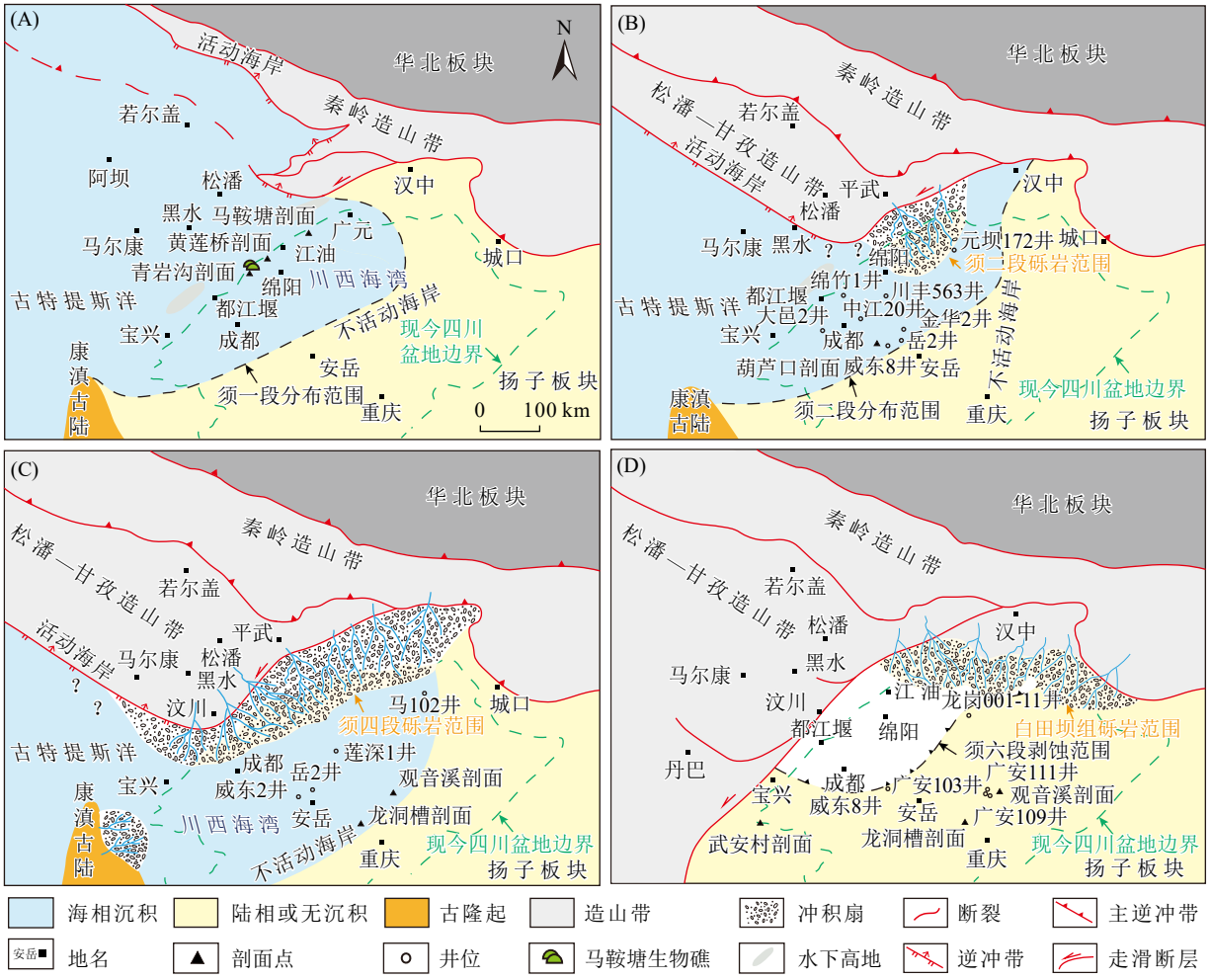

图 3 川西陆缘海及其邻区晚三叠世构造-沉积格架图

Fig. 3 Late Triassic Epoch tectonic–sedimentary framework in the west Sichuan pericontinental sea and its adjacent area

(A)川西陆缘海及其邻区须家河组一段沉积期;(B)川西陆缘海及其邻区须家河组二段沉积期;(C)川西陆缘海及其邻区须家河组四段沉积期;(D)川西陆缘海及其邻区须家河组沉积末期—下侏罗统沉积早期

(图中"? ?"表示位置不确定)

带透镜状层理及生物扰动构造,大邑 2 井须二段的潮汐韵律层,中江 20 井须二段的潮汐韵律层(含双黏土层)(图 5)。赵霞飞和张闻林(2011)在广安华蓥山桂兴剖面须二段亦观察到牛角炭和煤球,为海相潮汐作用成因。

龙门山在须二段沉积期仅北段有小幅度隆升露出水面,不足以作为主要物源区(施振生等,2012)。川西陆缘海须二段的主要物源应是西秦岭和松潘—甘孜带北部向南西递进前缘形成的活动海岸带,并由海水搬运至川西陆缘海内(图 3-B)。

据四川盆地钻井资料,并参考西秦岭和松潘甘孜造山带向南西递进前缘前陆盆地的展布特征,研究绘制了川西陆缘海及邻区须二段厚度分布图,须二段总体呈北西-南东-北东弧形展布,在川西陆缘海为北东向展布,其沉降中心位于马尔康—汶川—绵阳一带,最大厚度在 1 000 m 以上;在川西陆缘海,须二段分布范围较须一段向东有所扩大,并逐渐向东上超尖灭(图 4-B)。

2.3 上三叠统须三段

此次没有编制须三段沉积时的构造-沉积格架图和须三段厚度分布图。须三段沉积时,有理由认为西秦岭造山带和松潘—甘孜造山带向南西持续冲断隆升,其前锋为活动海岸带,其前缘的北西向前陆盆地也随之向南西迁移,茂县—汶川断裂被动左旋走滑也向南西递进发展和隆升。在川西陆缘海须三段发现了菊石化石和与潮汐作用相关的沉积构造。

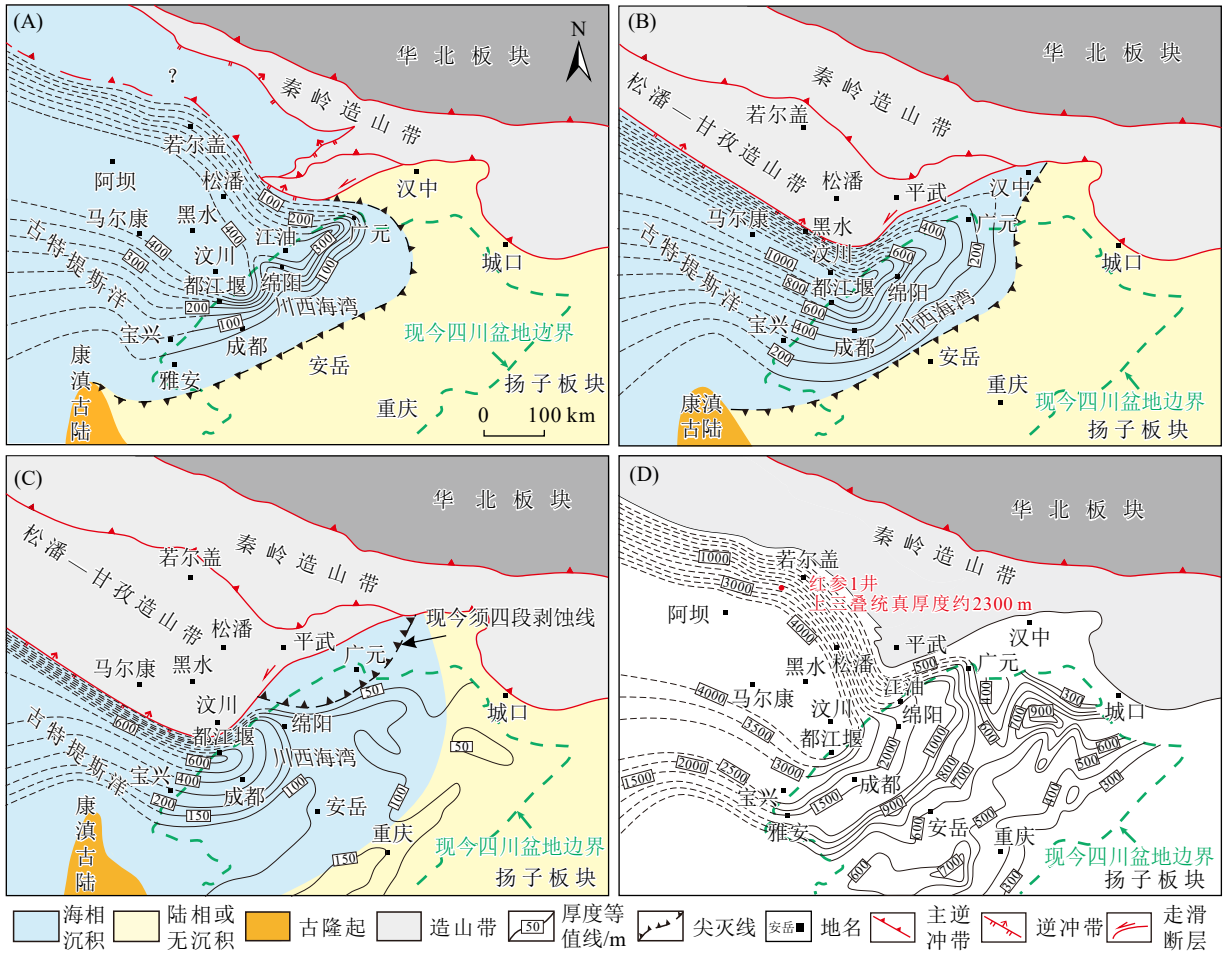

图 4　川西陆缘海及其邻区上三叠统须家河组厚度图

Fig. 4　Thickness map of the Upper Triassic Series Xujiahe Formation in the west Sichuan pericontinental sea and its adjacent area

（A）川西陆缘海及其邻区上三叠统须家河组一段；（B）川西陆缘海及其邻区上三叠统须家河组二段；（C）川西陆缘海及其邻区上三叠统须家河组四段；（D）川西陆缘海及其邻区上三叠统须家河组（图中“？”表示该区域资料不足）

威远葫芦口剖面须三^{2}亚段底部粉砂质泥岩中发现保存完整且数量较多的菊石化石，清晰可见菊石成排的瘤。经成都理工大学王运生教授鉴定，这些化石可能是 *Trachyceras echinatum*，其生活环境为浅海（图 6；坐标 29.604 89°N，104.620 01°E）。王运生（1992）在四川江油县马鞍塘、黄莲桥及绵竹县汉旺青岩沟等剖面（图 3-A）须一段（马鞍塘组）发现了菊石化石并进行了详细研究。

在绵竹 1 井须三段发现了潮汐韵律层和潮汐韵律层中的双黏土层，在大邑 2 井须三段观察到潮道泥砾和变形的潮汐韵律层（图 7）。

2.4　上三叠统须四段

须四段沉积期（早瑞替期），受西秦岭与松潘—甘孜碰撞持续挤压和向南西持续冲断隆升的影响，松潘—甘孜带北部隆升成为活动海岸带（主要的物源区），其前缘的北西向前陆盆地也随之向南西迁移，茂县—汶川断裂被动左旋走滑作用也向南西递进发展和隆升（图 3-C）。松潘—甘孜带北部向南西冲断隆升的前锋位置有一定的人为性，但茂县—汶川断裂向南西的左旋递进前锋是据须四段砾岩的分布确定的，从而也对松潘—甘孜带北部向南西递进冲断隆升前锋的位置有所限制。川西陆缘海整体上延续须一段—须三段沉积期的构造-沉积格局。松潘—甘孜地区古特提斯残留洋整体上自北东向南西持续缩减，海水持续涌入川西陆缘海，川西陆缘海进一步向东扩展至重庆一带。

本次研究在川西陆缘海钻井岩心中发现了众多的与潮汐作用相关的沉积构造（图 8），如马 102 井须四段的潮汐层理和双向水流，岳 2 井

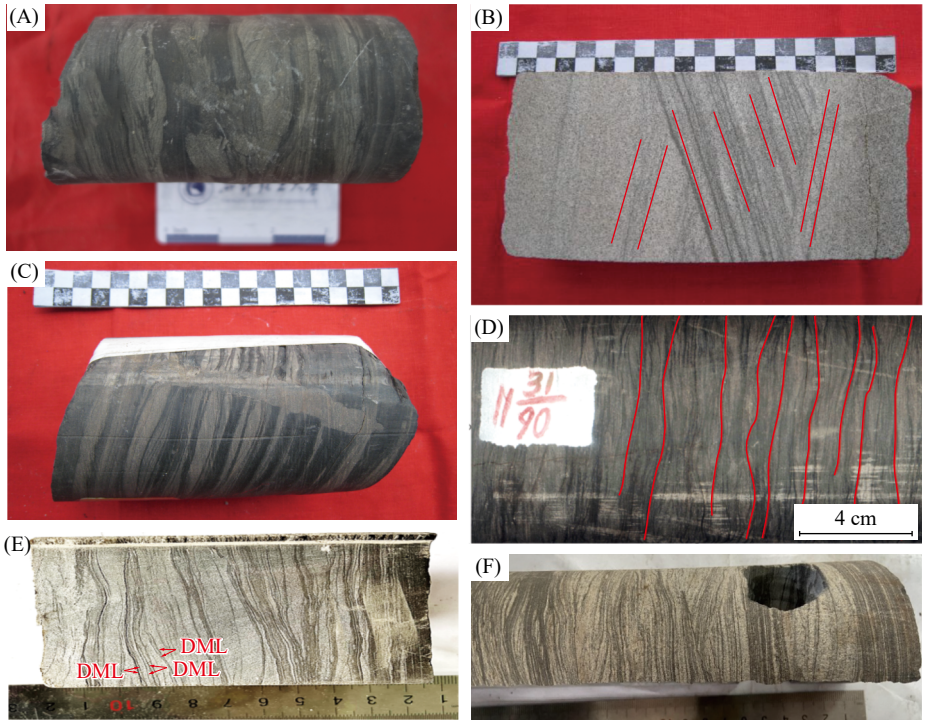

图 5 川西陆缘海须二段岩心中的潮汐成因沉积构造(钻井位置见图 3-B)

Fig. 5 Tidal sedimentary structures in the drilling cores of member 2 of the Upper Triassic Series Xujiahe Formation in the west Sichuan pericontinental sea

(A)脉状和透镜状层理,川丰 563 井,须二段;(B)潮汐双向层理,岳 2 井,须二段;(C)潮间带透镜状层理及生物扰动,威东 8 井,须二段;(D)潮汐韵律层,大邑 2 井,须二段;(E) 潮汐韵律层(含双黏土层),中江 20 井,须二段,DML 表示双黏土层;(F)潮汐韵律层,中江 20 井,须二段

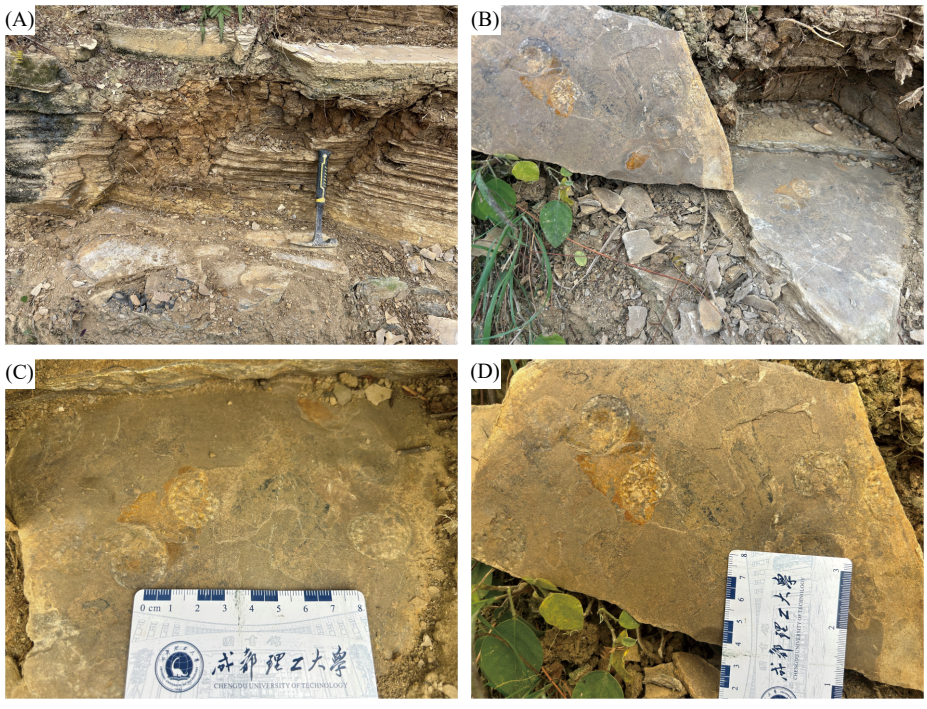

图 6 川西陆缘海威远葫芦口剖面须三^{2}亚段的菊石化石(剖面位置见图 3-B)

Fig. 6 Ammonite fossils in member 3 of the Xujiahe Formation in the Hulukou section, Weiyuan city, west Sichuan pericontinental sea

(A)须三^{2}亚段底部薄层粉砂质泥岩,化石产出层位;(B)~(D)粉砂质泥岩层面上的菊石化石和印模

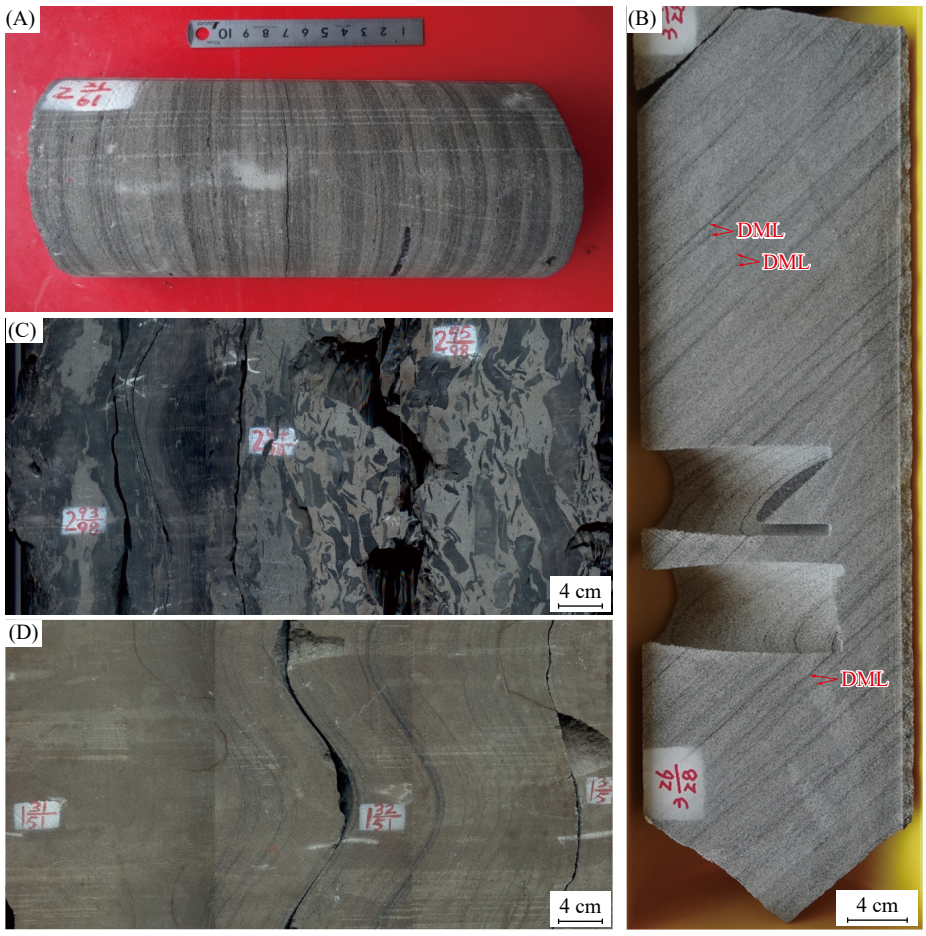

图 7　川西陆缘海须三段岩心中的潮汐作用相关沉积构造（钻井位置见图 3-B）

Fig. 7　Tidal sedimentary structures in the drilling cores of member 3 of the Upper Triassic Series Xujiahe Formation in the west Sichuan pericontinental sea

（A）潮汐韵律层，绵竹 1 井，须三段；（B）潮汐韵律层中的双黏土层，绵竹 1 井，须三段；（C）潮道泥砾，大邑 2 井，须三段；（D）变形的潮汐韵律层，大邑 2 井，须三段

须四段的潮汐水道内的扁平泥砾，威东 2 井须四段潮汐韵律层中的双黏土层，马 102 井须四段潮汐韵律层、双黏土层和滨线砾岩。此外，在龙洞槽剖面须四段也观察到潮汐韵律层（含双黏土层）（图 8）。施振生等（2012）报道了华蓥山观音溪剖面须四段的羽状交错层理，莲深 1 井和岳 2 井须四段岩心中的双黏土层等海相沉积构造。

据四川盆地钻井资料，并参考西秦岭和松潘—甘孜带向南西递进前缘前陆盆地的展布特征，研究绘制了川西陆缘海及邻区须四段厚度分布图，须四段总体呈北西—南东—北东弧形展布，在川西陆缘海为北东向展布，其沉降中心位于马尔康之南—都江堰一线，最大厚度在 1 000 m 以上；川西陆缘海内须四段厚度最大值约 700 m，向东须四段逐渐上超尖灭（图 4-C）。值得指出的是，川西陆缘海西北角，即龙门山北段前缘地区的须四段可能遭到了剥蚀。

2.5　上三叠统须五段和须六段

须五段至须六段沉积期（中—晚瑞替期），松潘—甘孜带中南部逐渐褶皱隆升，茂县—汶川断裂被动左旋走滑作用持续向南西递进发展和隆升，古特提斯洋中的海水持续涌入川西陆缘海，此阶段川西陆缘海继续向东、南扩展。须五段以泥岩为主并分布广泛，须六段以砂岩为主。推测在须五段沉积期川西陆缘海向东达到最大范围。在川东华蓥山观音溪剖面须五段下部观察到潮下潮汐韵律层以及生物潜穴、潮汐层理、双向交错层理和波痕（图 9），指示滨海潮坪沉积环境。

此外，在川西南天全武安村剖面须五段观察到潮汐层理（脉状、波状和透镜状层理）、鱼骨状



图 8 川西陆缘海须四段典型的与潮汐作用相关的沉积构造(钻井或剖面位置见图 3-C)

Fig. 8 Tidal sedimentary structures in member 4 of the Upper Triassic Series Xujiahe Formation in the west Sichuan pericontinental sea

(A)潮汐层理和双向水流,马 102 井,须四段;(B)潮汐水道内的扁平泥砾,岳 2 井,须四段;(C)潮汐韵律层中的双黏土层,威东 2 井,须四段;(D)双黏土层及滨线砾岩,马 102 井,须四段;(E)潮汐层理及滨线砾岩,马 102 井,须四段;(F)潮汐韵律层,龙洞槽剖面,须四段;(G)潮汐韵律层(含双黏土层),龙洞槽剖面,须四段

交错层理、鲍玛序列 T_a-T_b-T_c-T_d 段沉积层、生物潜穴、波痕和干裂等沉积构造(图 10),指示滨海潮坪至深海斜坡沉积环境。天全地区须家河组须五段浊流沉积的发现可能表明,海水最终经由川西南地区逐渐向南退出。

赵霞飞和张闻林(2011)报道了龙洞槽剖面须六段砂岩中的大型反向交错层理和双黏土层,认为其指示海相潮汐沉积。在广安 103 井、广安 109 井、威东 8 井、龙岗 001-11 井须六段分别观察到潮汐束、再作用面、风暴或潮道泥砾、双向交错层理、双黏土层等海相沉积构造(图 11),表明此时川西陆缘海仍具有较大沉积范围。鉴于目前四川盆地侏罗系没有任何海相沉积的报道,推测应在须六段沉积晚期至侏罗纪,古特提斯洋与四川盆地通道关闭,川西陆缘海消亡,其北部须六段被剥蚀(图 3-D)。值得指出的是,川西晚三叠世陆缘海的消亡不是由于海平面降低,海水逐步退出所致,而是其与广海的通道关闭而造成的。川西陆缘海的关闭过程不是持续海退的过程,而是由于构造作用(西秦岭造山带和松潘—甘孜造山带自北东向南西持续冲断隆升,川西陆缘海西北缘沿茂县—汶川断裂左旋走滑和隆升)造成的海进过程。与广海的通道完全关闭后,川西地区开始向湖盆(陆相)转变,时间可能在晚三叠世末。早侏罗世,四川盆地北缘广元—城口一带发育冲积扇沉积(白田坝组砾岩),向南过渡为河流相和滨湖、浅湖沉积(钱涛等,2016)。

据四川盆地钻井和松潘地区红参 1 井的实钻资料,并参考西秦岭和松潘—甘孜带向南西递进前缘前陆盆地的展布特征,研究绘制了川西陆缘海及其邻区上三叠统厚度分布图,上三叠统总体呈北西-南东-北东弧形展布,在川西陆缘海为北

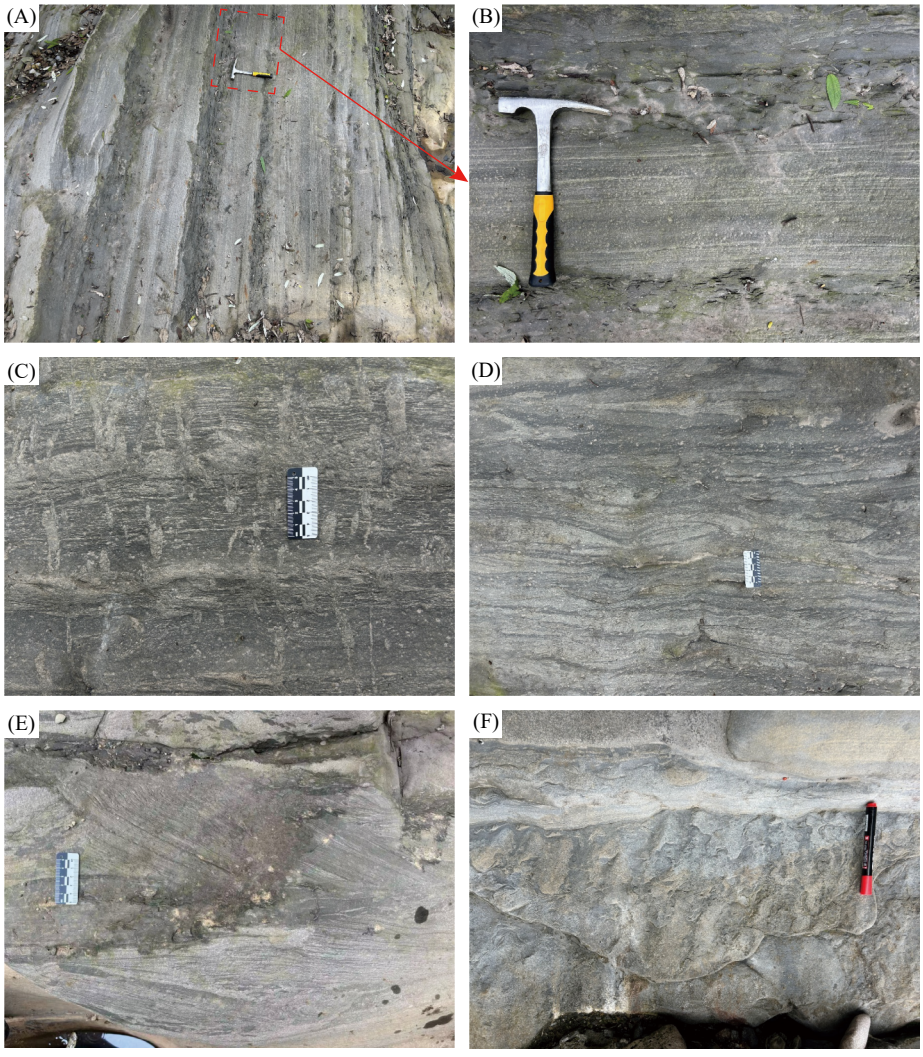

图 9　华蓥山观音溪须家河组剖面须五段沉积构造（剖面位置见图 3-D）

Fig. 9　Sedimentary structure in member 5 of the Upper Triassic Series Xujiahe Formation in the Guanyinxi section, Huaying City

（A）、（B）须五段潮汐韵律层宏观露头和局部特征；（C）潮汐韵律层中的生物潜穴；（D）潮汐层理；（E）潮汐成因双向交错层理；（F）潮坪中的波痕

东向展布，其沉降中心位于阿坝—黑水—都江堰—成都一线，最大厚度在 4 000 m 以上；川西陆缘海内上三叠统厚度最大值在 3 000 m 左右，且自西向东厚度逐渐变薄（图 4-D）。

综上可知：（1）四川盆地西部晚三叠世为陆缘海，其须家河组与松潘—甘孜造山带西康群为卡尼期—瑞替期同期地层，须家河组主要物源来自新形成的西秦岭和松潘—甘孜造山带活动海岸（leading-edge coast），由海洋作用（longshore current 等）输送到川西陆缘海（当然还有盆地北部、东部和南部通过河流输送的物源，但本文只论述海相沉积）。（2）川西陆缘海从须一段至须六段可能有几个海侵—海退旋回，但总趋势是海进。（3）晚三叠世末期，古特提斯洋与四川盆地通道关闭，川西陆缘海消亡；四川盆地北部和东部较早时期可能就发育了陆相河流和三角洲沉积，但晚三叠世大部分时间四川盆地中西部可能未发育过湖盆，以海相和/或海陆过渡相沉积为主，潮汐和海浪对上三叠统的沉积和分布有较大的控制作用。（4）晚三叠世茂县—汶川断裂带（龙门山）是从北东逐渐向南西递进而形成的，其主要的构造作用是被动左旋走滑和隆升作用，由北西向南东的逆冲作用较弱；陆缘海须家河组及其须一段、须二段、须四段沉降中心（厚度最大地区）均在都江堰—绵阳地区，未发生向东的明显迁移，这也说明晚三叠世龙门山由北西向南东的冲断作用和挠曲作用较弱，其前缘不是前陆盆地。

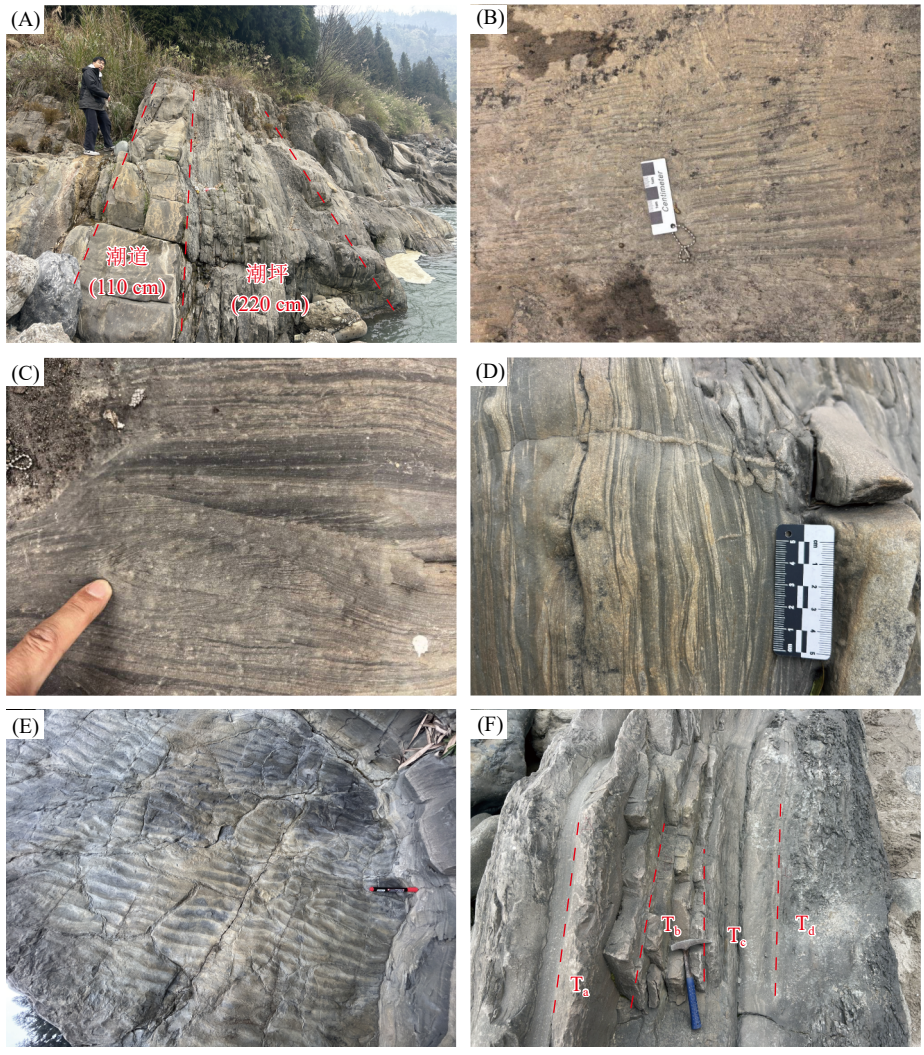

图 10 川西陆缘海天全武安村须家河组剖面须五段沉积构造(剖面位置见图 3-D)

Fig. 10 Sedimentary structure in member 5 of the Upper Triassic Series Xujiahe Formation in Wu'an Village, Tianquan City in the west Sichuan pericontinental sea

(A)潮汐沉积层宏观露头;(B)潮道中的潮汐韵律层;(C)潮坪中的反向交错层理;(D)潮坪中的脉状层理、波状层理、透镜状层理及生物潜穴;(E)潮坪中的波痕和干裂;(F)重力流(浊流)沉积鲍玛序列

3 四川盆地海相上三叠统油气勘探前景展望

长期以来,四川盆地须家河组油气勘探的主要指导思想是前陆盆地和陆相沉积(湖盆)的相关理论(贾承造等, 2025; 罗冰等, 2026)。四川盆地须家河组天然气勘探历史悠久,自 20 世纪 50 年代以来,历经了:(1)构造气藏勘探阶段(1956—2005 年),立足山前带,开展构造气藏勘探;(2)岩性气藏勘探阶段(2006—2017 年),在前陆盆地和岩性气藏地质理论指导下,以岩性、构造-岩性复合圈闭勘探为主要目标,由川西前陆冲断带转向川中前陆隆起带;(3)致密气规模增储上产阶段(2018 年至今),以"坳陷-斜坡带"致密气为勘探目标(罗冰等, 2026)。

四川盆地天然气资源十分丰富。截至 2024 年底,四川盆地天然气探明地质储量约 7.44×10^{12} m^3,探明率 30%(贾承造等, 2025);据"十三五"油气资源评价结果,须家河组致密砂岩气资源量为 6.79×10^{12} m^3,探明储量超 $9\,000\times10^8$ m^3,探明率 13.25%(郭彤楼等, 2024)。2025 年四川盆地上三叠统天然气产量为 18×10^8 m^3。考虑到须家河组勘探层段多(须一段至须六段)、厚度大(最厚可达 4 000 m)、勘探面积广(全盆地均发育须家河组)、埋藏相对较浅和勘探历史悠久(70 多年),至今获得天然气探明地质储量,尤其是探明率和



图 11　川西陆缘海须六段岩心中的海相沉积构造（钻井位置见图 3-D）

Fig. 11　Marine sedimentary structures in the drilling cores of member 6 of the Upper Triassic Series Xujiahe Formation in the west Sichuan pericontinental sea

（A）脉状层理，广安 103 井，须六段；（B）风暴或潮道泥砾，广安 103 井，须六段；（C）潮汐束和再作用面，广安 103 井，须六段；（D）再作用面，广安 103 井，须六段；（E）双向交错层理，威东 8 井，须六段；（F）双黏土层，龙岗 001-11 井，须六段

产量均不理想。本文基于四川盆地须家河组为陆缘海沉积的认识，展望其油气勘探前景。

3.1　陆缘海与前陆盆地（湖盆）油气地质条件发育的差异性

前陆盆地指受控于板缘负载挠曲形成的毗邻造山带前缘的线状沉积区，其构造沉积过程受控于邻近造山带的逆冲挠曲和剥蚀充填作用；陆缘海通常发育于被动大陆边缘，其沉降主要受控于构造、热及沉积负载的三元耦合驱动，且对全球海平面波动响应极度敏感（Summa et al., 2003）。前陆盆地通常经历多幕挤压冲断挠曲沉积充填演化过程，发育叠瓦状冲断层、双重构造、断层三角带、断层相关褶皱等，形成非对称性楔状沉积充填体系和坳陷盆地结构形态，且伴随冲断层构造活动，沉积中心发生动态迁移演化。陆缘海盆地伴随被动大陆边缘岩石圈减薄与破裂作用过程，通常经历稳态热沉降构造沉积演化，后期普遍经历断陷、坳陷等拉张构造演化过程，逐渐演化为裂谷盆地体系。因此，陆缘海通常形成宽缓坳陷或台地、陆架和坡折带结构特征（Fang et al., 2023），且普遍具弱构造变形和贫岩浆活动特征。然而，由前文可知川西晚三叠世陆缘海发育于挤压和左旋走滑环境。

陆缘海发育于大陆边缘，被大陆、半岛或岛屿与广海（洋）分隔，如白令海、南海、东海等，通过宽阔海峡或水道与大洋相连接，受控于潮汐和洋流作用与大洋水体自由交换。陆缘海光照充足、盐和有机质丰富，同时在水体环境和沉积充填等受邻近陆地物源供给所影响，可能导致盐度偏低、有机质输入形成丰富沉积物等；波浪、潮汐、陆架宽度和沉积物通量等共同控制着陆缘海沉积物分布和细粒沉积带（Walsh and Nittrouer, 2009），形成潮汐或波浪作用为主的复合型三角洲沉积体系，导致宽阔水下台地可达 100～150 km，波浪作用越强、台地越宽，越发育侧向延伸平行于海岸的前积层系（Peng et al., 2020），沉积物堆

积沿水深等深线分布(潮汐型以潮汐分流河道为主)。同时,受控于古地貌和障壁等作用,陆缘海局部发育礁滩等碳酸盐岩沉积,垂向上以蒸发环境膏盐和白云岩层系逐渐变化为生物灰岩和礁灰岩等(Corlett and Jones, 2011)。基于黄河、珠江、亚马孙河和恒河等陆架研究表明,其约 10% 陆源输入在陆缘海沉积,其中 1/3 的物源供给量沉积于远端底积层,为被动大陆边缘陆缘海提供丰富的有机质(Alexander et al., 1991; Owen, 2005)。陆缘海有机质来源涵盖海洋水生生物与部分陆源高等植物,通常以Ⅰ-Ⅱ型干酪根类型为主,快速堆积于水下斜坡带或沉积中心。在特定陆缘近海环境下,常发育非典型海相烃源岩,有机质以陆源占优且富含不具生烃能力的“死碳”(Requejo et al., 1994; 陈晓东等, 2021)。前陆盆地负载挠曲过程中,从下向上由深水沉积物、浅海沉积物、三角洲沉积物变化到陆相沉积物,早期快速加速沉降阶段前缘地区常发育海底扇和复理石沉积,逐渐变化为浅海磨拉石和河流三角洲沉积占主体,同时发育浅水碳酸盐台地沉积,但常常局限在盆地远端边缘地区。因此,前陆盆地主要烃源岩以陆源供给的深湖-半深湖相优质页岩为主,且富含煤层夹层等,干酪根类型以Ⅱ-Ⅲ型为主(王伟明等, 2025)。

陆缘海受深部岩石圈板块动力学和全球海平面变化共同驱动,其沉积过程主要受控于潮汐和洋流等作用,形成跨越陆架、陆坡至深海平原的源-汇系统,但沉积物通量受陆架坡折带的强烈调节,通常发育潮汐砂坝、海相礁灰岩和深水重力流砂体(如复合浊积水道、斜坡扇)等优质储层,其封盖层多为区域性大规模海侵形成的深海页岩(秦雁群等, 2014),海岸(坡折)带控储-控藏作用明显,有利于形成大规模岩性油气藏聚集带。前陆盆地湖盆沉积过程对降雨与蒸发平衡所引起的高频气候变化具极高敏感性,发育多物源混合型前积砂体或河道砂体,形成三角洲砂岩、河道砂体等优质储层,受控于构造冲断和湖盆前积迁移作用过程,更易于形成构造-岩性油气藏。但在前陆盆地山前带受控于断层多期活化输导作用,易于形成构造相关的油气多期立体成藏。

由上可知,陆缘海油气地质条件的形成分布与前陆盆地差异较大(表 1),今后要重视从陆缘海角度探讨四川盆地须家河组油气地质条件的形成与分布规律。

3.2 川西陆缘海上三叠统烃源及保存条件

3.2.1 须家河组烃源岩发育特征

基于前陆盆地和湖盆的认识背景,众多学者

表 1 陆缘海与前陆盆地(湖盆)油气地质条件特征对比

Table 1 Geological features of the pericontinental seas and foreland basins

端元	类别	陆缘海/海湾	前陆盆地(湖盆)
构造特征	构造动力学	被动大陆边缘岩石圈动力学机制控制,对全球海平面波动响应极度敏感	岩石圈负载挠曲沉降动力学机制控制,常具前展式扩展变形过程
	变形样式	宽缓台地或坳陷、陆架和坡折带结构,弱变形和贫岩浆活动	叠瓦状冲断层、双重构造、断层三角带、断层相关褶皱等
沉积特征	沉降动力学	受构造、热及沉积负载沉降共同作用,全球海平面升降及潮汐/波浪控制明显	负载挠曲沉降机制,湖盆水体受局域降雨/蒸发驱动高频变化控制
	沉积特征	发育潮汐海峡、潮汐三角洲和河口湾、障壁岛及深海扇沉积体系	发育湖泊/扇三角洲、滩坝及叠置河道沉积体系
油气特征	烃源岩	海相烃源岩或海陆过渡相烃源岩为主,以Ⅰ-Ⅱ型干酪根为主,生烃中心常受海湾沉积格局控制	以陆相或海陆过渡相烃源岩为主,以Ⅱ-Ⅲ型干酪根为主,生烃中心受湖盆沉积中心控制
	储集层	三角洲砂体、礁滩、重力流砂岩及潮汐砂坝等储层为主,储层规模连续	三角洲砂体、河道砂体储层为主,沉积相变化快、储层非均质性强
	圈-运-保	海岸(坡折)带控储-控藏作用明显,发育区域性海相泥岩盖层的岩性油气藏聚集带	发育构造-岩性油气藏,易于形成断层输导相关的油气立体成藏

已对四川盆地须家河组烃源岩开展了研究（王玲辉等，2007；车国琼等，2007；谢继容等，2008；杨阳等，2009；王君泽等，2011；童小俊，2016；潘珂，2019；欧奎，2019；吴小奇等，2022；刘于民等，2024；成镱娜等，2025；罗冰等，2026）。目前认为须家河组烃源岩主要发育于须一段+须二段、须三段和须五段。这三套烃源岩具有厚度大、有机质丰度高、热演化程度适中、生气强度大等特征（罗冰等，2026）。这三套烃源岩厚度中心均位于川西一带，且厚度中心有向西南迁移的特征。目前发现须一段/小塘子组有机质类型以Ⅱ$_1$、Ⅱ$_2$型为主，须二段、须三段有机质类型以Ⅲ型为主，须五段以Ⅱ$_2$、Ⅲ型为主；须家河组R_o变化范围为0.64%～3.20%，多数地区<2%，处于成熟期至高成熟期，局部深埋区可达过成熟早期。须家河组w(TOC)较高，其中须一段+须二段为0.83%～13.28%，平均1.87%；须三段w(TOC)为0.47%～24.30%，平均2.12%；须五段w(TOC)为0.25%～29.66%，平均2.54%。有机质丰度呈现须五段>须三段>须一段+须二段的特征（罗冰等，2026）。须家河组生烃强度以川西地区最高，各段生烃中心（生气强度>20×10^8 m^3/km^{2}区域）也主要分布于川西地区，但须五段生烃中心面积最广，烃源岩从川西至川中均有分布（图12）。

从图12可知，川西陆缘海须一段至须五段烃源岩分布范围逐步向东扩大（须五段烃源岩向东分布范围已超出现今四川盆地范围），而在陆缘海西北角烃源岩尖灭区也从须三段至须五段向东扩大；生烃中心主要位于陆缘海西南部并有向西南迁移的趋势。这些特征与前文论述的川西陆缘海形成演化、茂县—汶川断裂从北东向南西递进走滑和龙门山从北东向南西递进隆升特征一致。从川西陆缘海形成演化可推测，须家河组烃源岩应比目前所认识的品质更优，可能发育具

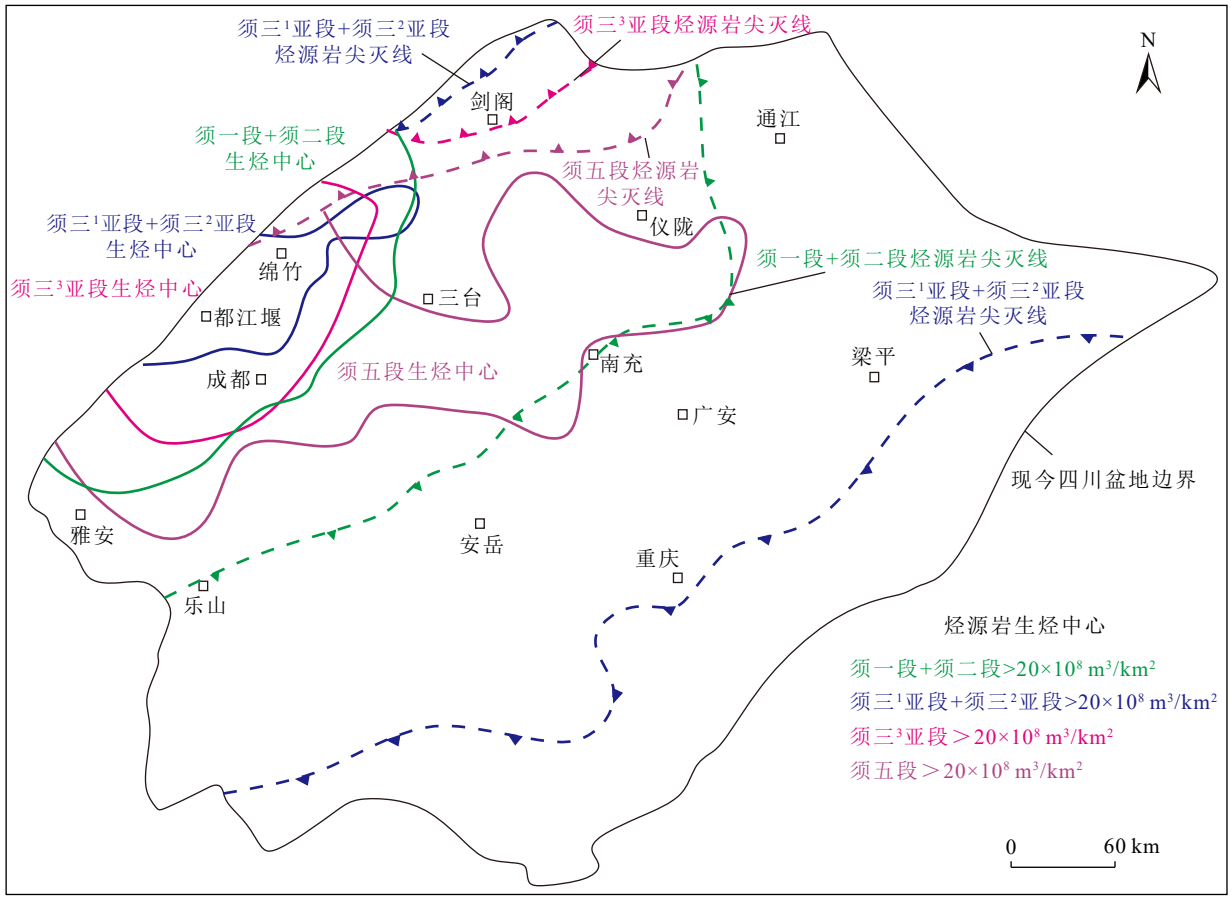

图 12　川西陆缘海上三叠统须家河组各段生烃中心分布图

Fig. 12　Distribution of hydrocarbon generation centers of the different members of the Upper Triassic Series Xujiahe Formation in the west Sichuan pericontinental sea

（据罗冰等，2026编绘）

有一定厚度和分布范围的Ⅰ-Ⅱ型干酪根的烃源岩,其分布地区应位于陆缘海西南地区。这值得今后油气勘探和研究重视。

3.2.2 四川盆地须家河组保存条件

须家河组泥岩层系是重要的直接盖层,由泥质岩、煤岩、粉砂质泥岩构成。上述烃源层发育段也是重要的泥质岩发育段,也是非常好的纵向直接盖层。按泥质烃源岩统计,其展布趋势与总厚度一致,即中西部厚度超过 600 m,向东南减薄至 150 m 左右。除直接盖层外,须家河组上覆侏罗系泥岩厚度大,一般超过 1 300 m,封盖能力较强,形成非常好的间接盖层(易士威等, 2013)。在四川盆地中西部地区,须家河组在大部分地区储层致密化程度高,气藏压力系数高,表现出超压特征,由西北向东南降低,一般压力系数 1.20~2.02(李伟等, 2023),属高压-超高压气藏,揭示其保存条件较好。四川盆地中西部喜马拉雅期构造稳定,地表隆升剥蚀幅度小。四川盆地最大抬升剥蚀过程发生在喜马拉雅构造期,普遍具 1 000 m 以上的剥蚀量,但剥蚀的低值区位于中西部地区(刘树根等, 2008; 邹云, 2010)。这也说明盆地内中西部构造相对稳定,隆升剥蚀幅度小,活动性弱,保存条件破坏小。

综上,川西陆缘海(四川盆地中西部)上三叠统须家河组烃源岩发育,其生气强度>20×10^8 m^3/km^2 的区域面积大,具备形成大中型油气田的条件(戴金星, 2003),且油气保存条件佳。因此,川西陆缘海须家河组生成的油气大部分仍保留在须家河组内,其油气勘探潜力大。

3.3 川西陆缘海须家河组生储(盖)组合发育特征初探

长期以来,四川盆地须家河组的油气勘探是基于前陆盆地湖相-河流沉积的认识。本文提出的川西晚三叠世陆缘海的认识,突出了以潮汐作用为主的海相/海陆过渡相海湾沉积体系。这一构造-沉积格局的重大认识转变,须对四川盆地须家河组烃源岩发育、储集体形成、盖层展布到生储盖时空配置等重新认识。最值得关注和思考的问题有:(1)四川盆地须家河组是否发育具一定厚度和分布范围的Ⅰ或/和Ⅱ型干酪根的规模优质烃源岩;(2)四川盆地须家河组是否形成了高孔隙性的规模优质储层;(3)四川盆地须家河组是否有成带成片的原生的孔隙性岩性(构造)油气藏。

本文认为四川盆地须家河组形成于受龙门山水下高地遮挡、与古特提斯洋连通的半封闭海湾环境。受全球海平面变化与区域构造演化(西秦岭和松潘—甘孜造山带由北东向南西递进冲断隆升作用和龙门山从北东向南西被动走滑递进隆升作用)共同控制,须一段至须六段虽经历多期次海侵-海退旋回,但整体为持续海侵背景。稳定的浅海-海湾环境为有机质保存与富集提供了良好条件,阳光充足、水体盐度稳定、还原环境持续发育、物源丰富,为有机质富集与保存提供了有利的地质条件。陆缘海/海湾内部沉积分异明显,沿水下高地内侧沉积条带状展布的沼泽相厚层泥页岩;在海岸线内侧海湾泥微相则形成横向连片分布的泥(页)岩。有很大的可能性发育形成具一定厚度和分布范围的Ⅰ或/和Ⅱ型干酪根的规模优质烃源岩。

在陆缘海沉积-构造格局控制下,川西地区北段三角洲体系发育,形成潮控三角洲储集砂体;在川西地区中段至南段,通过潮道沟通与搬运,在海湾内形成潮汐砂脊、滨岸砂坝、潮道砂、滨岸砂等多类型储集砂体;川东地区则发育海陆过渡相的河口湾、河道砂体。这构成了四川盆地须二段与须六段广泛分布的储集砂体(苏加亮等, 2023)。受陆缘海格局控制,川西北段地区物源供给充足,三角洲砂体更为发育,储层横向连通性较好;川西中部及南部地区则以潮汐砂与滨岸砂为主,储层叠置关系稳定,纵向多层叠置、横向相互补给,呈大面积连续分布的特征。

在陆缘海多期旋回演化下,须家河组沉积期的海湾内形成“海退期富砂、海侵期富泥”的纵向沉积结构,伴生沼泽、潮道、滨岸砂坝、三角洲等多类型沉积微相(图 13)。海侵期广泛发育的海湾泥质烃源岩与海退期持续进积的潮汐-三角洲砂体,在纵向上形成了多套稳定的“烃源岩-储集层-盖层”三位一体的成藏组合,横向上呈现出自生自储、上生下储、下生上储、旁生侧储等多种源储配置类型,其中以须一段、须三段、须五段海侵期泥岩为烃源岩和盖层,以须二段、须四段、须六段海退期砂体为储集层的多套互层式生储盖组合为核心成藏组合,源储直接接触、垂向紧密叠置,油气充注效率较高。陆缘海厚层海相泥岩与砂岩储层协同发育,在盆地内形

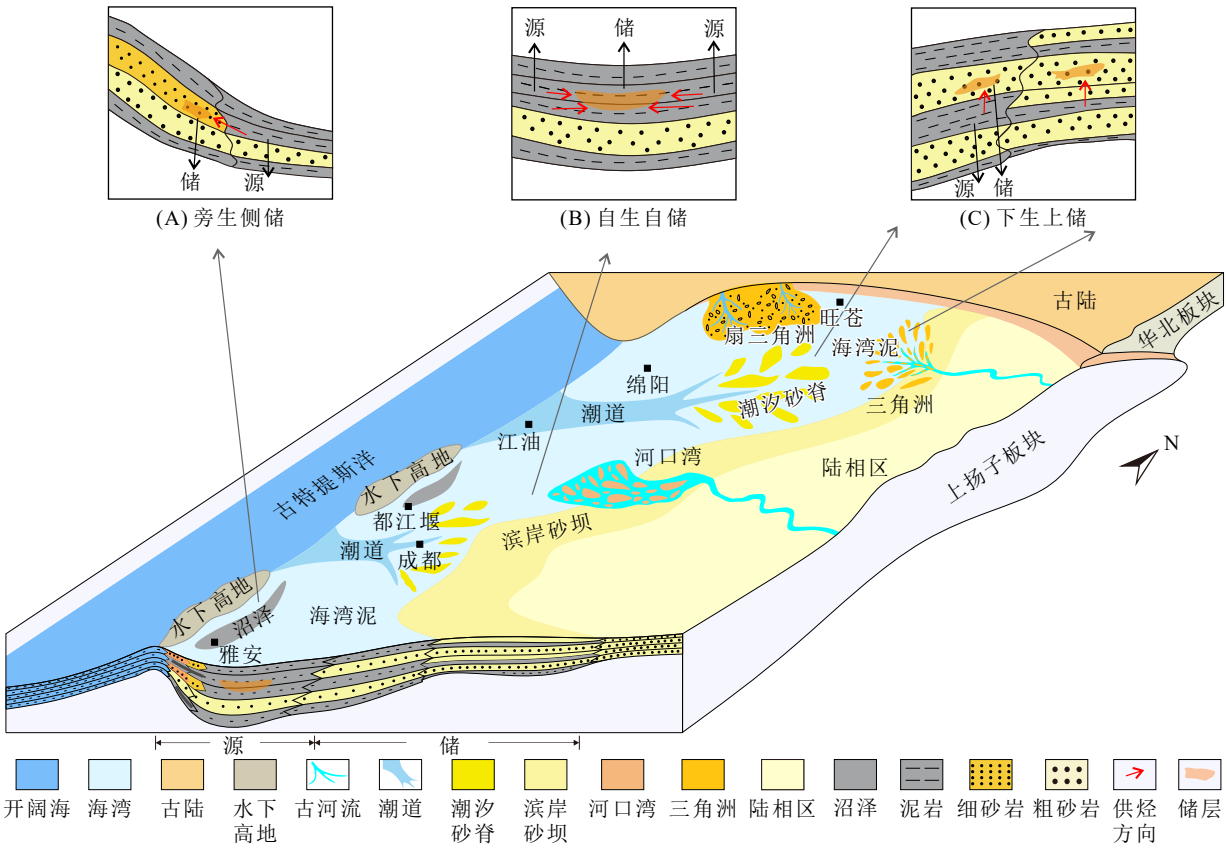

图 13　川西陆缘海上三叠统须家河组沉积模式及源储配置模式图

Fig. 13　Schematic diagram of the sedimentary model and source–reservoir assemble patterns of the Upper Triassic Series Xujiahe Formation in the west Sichuan pericontinental sea

成了大范围的超高压–高压封闭体系，为油气聚集提供了流体封闭条件。燕山中晚期，伴随区域快速沉降深埋，强烈的成岩压实与胶结作用导致须家河组储层发生广泛、快速的致密化，形成了“边致密、边成藏”的成藏特征（赵承锦等，2021），限制了油气的长距离侧向运移，使得油气主要以短距离垂向、侧向运移为主，优先在近源的岩性圈闭中聚集成藏。在陆缘海背景下，晚三叠世龙门山主体以被动左旋走滑作用为主，由北西向南东的冲断作用较弱，川西—川中地区构造相对稳定，有效保障了区域性泥岩盖层的连续性与完整性，阻断了油气的垂向散失，形成了“近源充注、超压封闭、原位保存”的高效成藏体系，为须家河组大规模油气聚集提供了关键保障。

3.4　印支期挤压走滑构造与须家河组油气聚集

被动型走滑断裂实际上是伸展作用或挤压作用的应变协调或调节带（accommodation zone），其作用是承载由伸展或挤压应变所造成的不同地块之间几何学上不相容的剪切应变（许志琴等，2004）。在川西陆缘海形成演化过程中，茂县—汶川断裂带（龙门山）即是一条协调松潘—甘孜造山带（或西秦岭）由北东向南西递进冲断和其东侧刚性稳定扬子板块（地块）构造变形的被动左旋走滑构造带。通过对世界走滑构造的调研，发现阿拉伯板块北西缘与此相似。叙利亚构造带西侧受土耳其块体向南的运动形成弧顶向南的弧形构造带，其东侧发育北东–南西走向大型左旋走滑断层，断层东侧发育一系列与走滑断层有一定夹角的北东东向的隆起和盆地构造，且斜列展布的隆起和盆地之间发育系列走滑构造调节带（图 14；Frisch et al., 2011；Asfahani, 2025）。

四川盆地西部现今主要构造可以归纳为北东向和近东西向两组。北东向以雾中山、大邑、彭州为主，靠近龙门山且走向与龙门山一致；另一组则以孝泉—新场—合兴场—丰谷为代表，构造走向近东西向，而且该构造带位于龙泉山构造的北端，限制了龙泉山构造向北发展（图 15-A），其形成应早于新生代构造成因的龙泉山构造（于佳男，2014）。这与阿拉伯板块北西缘左旋走滑构造导致盆内一系列与断裂斜交的、呈斜列展

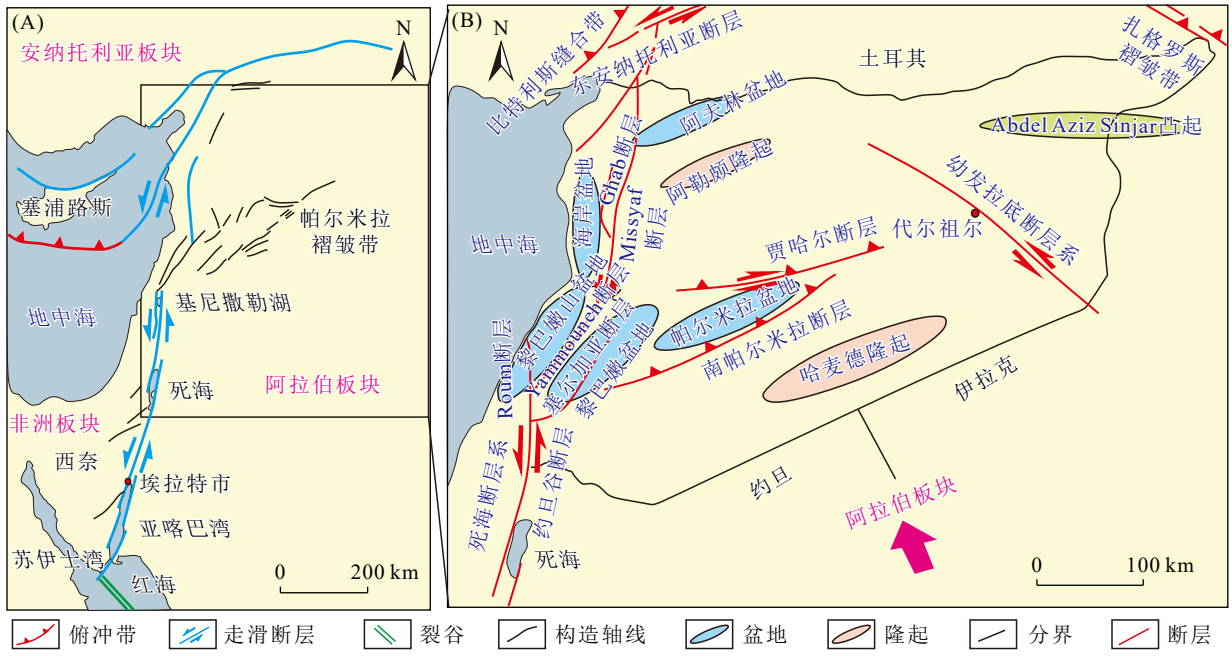

图 14 叙利亚大地构造与被动走滑断裂带体系构造特征

Fig. 14 Tectonic features of the Syrian and passive strike-slip fault zone system

(图 A 据 Frisch et al., 2011 修改；图 B 据 Asfahani, 2025 修改)

布的隆起构造特征相似。

龙门山冲断带和四川盆地西部大部分构造均是在上三叠统大量生烃和排烃后的喜马拉雅期形成的(Wilson et al., 2006; 李智武等, 2021)。印支期形成的古构造早于主生烃时间，更有利于须家河组油气的早期聚集。邹云(2010)通过对合兴场构造研究发现，川西地区印支期为近东西向的直立褶皱，燕山期转为北北东向，喜马拉雅期叠加形成现今构造。王峥嵘(2014)从力学角度对新场构造进行分析后发现川西地区印支中期区域主应力为 S-N 向，至晚期向北西向偏转。因此，有理由推测四川盆地西部北东东向或近东西向构造形成于印支期，与川西陆缘海和茂县—汶川左旋走滑断裂带(龙门山)的形成演化有关。结合现今构造分析表明，川西地区可能主要发育三排印支期构造带(图 15-B)：(1)中坝—黎

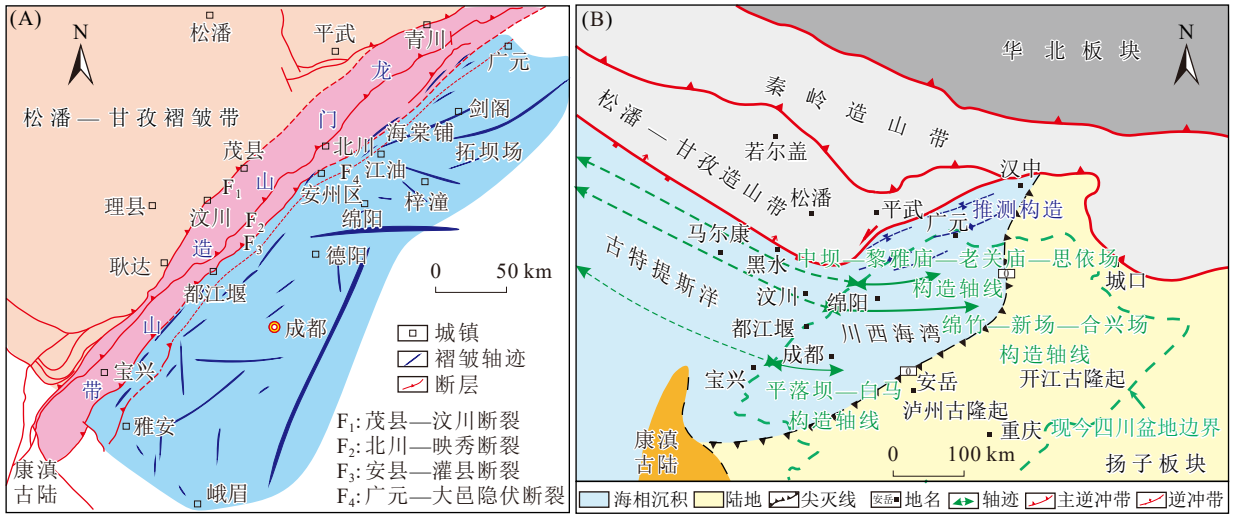

图 15 推测的川西陆缘海及其邻区印支晚期构造发育特征图

Fig. 15 Speculated Late Indosinian Period structural characteristics in the west pericontinental sea and its adjacent area

(A)四川盆地西部现今构造形迹；(B)须二段沉积时推测的古构造发育特征

雅庙—老关庙—思依场；(2)绵竹—新场—合兴场；(3)平落坝—白马构造带。这些印支期构造带(隆起带)对须家河组油气运聚起着非常重要的控制作用。建议将来加强在四川盆地寻找与川西陆缘海和茂县—汶川左旋走滑断裂带(龙门山)的形成演化有关的印支期构造带，它们应是川西地区须家河组的油气聚集带。

4　结论与建议

(1)晚三叠世四川盆地西部不是前陆盆地(湖盆)，而是陆缘海。须家河组须一段至须六段沉积时，西秦岭造山带和松潘—甘孜造山带自北东向南西持续冲断隆升，其前缘形成北西—南东向的前陆盆地，川西陆缘海西北缘沿茂县—汶川断裂左旋走滑和隆升，川西陆缘海为浅海沉积，发育潮汐沉积构造。

(2)川西陆缘海须家河组及其须一段、须二段、须四段沉降中心(厚度最大地区)均在都江堰—绵阳地区，未发生向南东的明显迁移，说明该时期龙门山由北西向南东的冲断作用较弱。

(3)受川西陆缘海控制，四川盆地海相须家河组发育多套烃源岩和储集层，保存条件佳，具备形成大中型油气田的条件，其油气勘探前景广阔。

(4)建议基于陆缘海和海相碎屑岩沉积观点，重新梳理四川盆地须家河组的油气地质条件和油气分布规律；加强在四川盆地寻找与川西陆缘海和茂县—汶川左旋走滑断裂带(龙门山)的形成演化有关的印支期构造带，它们应是四川盆地中西部须家河组的油气聚集带；据此，调整四川盆地须家河组的油气勘探思路，有望实现新的油气勘探发现。

利益冲突声明：本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

作者贡献声明：刘树根、孙玮、邓宾、宋金民、冉波、张闻林、罗平、吕正祥负责论文构思、数据分析、研究方法和论文写作；叶玥豪、杨荣军、王天瑞、徐宏远、郭冉、刘重江参与数据分析、研究方法和修改。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

致谢：本文的研究和编写得到了中石油和中石化众多领导、专家和同行的指导和帮助，在此深表谢意！

[参 考 文 献]

蔡宏明，张宏飞，徐旺春，等，2010. 松潘带印支期岩石圈拆沉作用新证据：来自火山岩岩石成因的研究[J]. 中国科学：地球科学，40(11)：1518—1532.

Cai H M, Zhang H F, Xu W C, et al., 2010. Petrogenesis of Indosinian volcanic rocks in Songpan−Garze fold belt of the northeastern Tibetan Plateau: new evidence for lithospheric delamination[J]. Science China Earth Sciences, 53(9): 1316—1328.

车国琼，龚昌明，汪楠，等，2007. 广安地区须家河组气藏成藏条件[J]. 天然气工业，27(6)：1—5.

Che G Q, Gong C M, Wang N, et al., 2007. Gas accumulation condition in the Xujiahe Group of Guang'an area[J]. Natural Gas Industry, 27(6): 1—5.(in Chinese)

陈斌，李勇，王伟明，等，2016. 晚三叠世龙门山前陆盆地须家河组物源及构造背景分析[J]. 地质学报，90(5)：857—872.

Chen B, Li Y, Wang W M, et al., 2016. The provenance and tectonic setting of Late Triassic Xujiahe Formation in the Longmenshan Foreland Basin, SW China[J]. Acta Geologica Sinica, 90(5): 857—872.(in Chinese)

陈洪德，刘磊，林良彪，等，2021. 川西坳陷西部龙门山隆升时期上三叠统须家河组沉积响应[J]. 石油与天然气地质，42(4)：801—815.

Chen H D, Liu L, Lin L B, et al., 2021. Depositional responses of Xujiahe Formation to the uplifting of Longmenshan during the Late Triassic, Western Sichun Depression[J]. Oil & Gas Geology, 42(4): 801—815.(in Chinese)

陈晓东，蒋一鸣，漆滨汶，等，2021. 东海丽水凹陷古新统非典型湖相烃源岩及油气特征[J]. 海洋地质前沿，37(4)：25—38.

Chen X D, Jiang Y M, Qi B W, et al., 2021. An atypical lacustrine source rock and its petroleum characteristics in the Lishui Sag of the East China Sea[J]. Marine Geology Frontiers, 37(4): 25—38.(in Chinese)

成镱娜，孙玮，刘明，等，2025. 川北元坝西地区须二段烃源特征与下亚段源储关系研究[J]. 四川地质学报，45(2)：263—270.

Cheng Y N, Sun W, Liu M, et al., 2025. Research on the characteristics of hydrocarbon sources in the second member of Xujiahe Formation and the source-reservoir relationship in the lower sub-section in the west Yuanba area of northern Sichuan[J]. Acta Geologica Sichuan, 45(2): 263—270.(in Chinese)

戴金星，2003. 加强天然气地学研究勘探更多大气田[J]. 天然气地球科学，14(1)：3—14.

Dai J X, 2003. Enhance the studies on natural gas geology and find more large gas fields in China[J]. Natural Gas Geoscience, 14(1): 3—14.(in Chinese)

邓康龄，2007. 龙门山构造带印支期构造递进变形与变形时

序[J]. 石油与天然气地质, 28(4): 485—490.

Deng K L, 2007. Indosinian progressive deformation and its chronogenesis in Longmengshan structural belt[J]. Oil & Gas Geology, 28(4): 485—490. (in Chinese)

龚大兴, 郭佳, 罗俊峰, 等, 2019. 川西马尔康—金川地区晚三叠世松潘甘孜残留洋盆复理石建造沉积特征与沉积模式[J]. 沉积学报, 37(6): 1210—1223.

Gong D X, Guo J, Luo J F, et al., 2019. Sedimentary characteristics and model of the Triassic Songpan−Ganzi Flysch Basin, in Maerkang−Jinchuan Area, western Sichuan[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 37(6): 1210—1223. (in Chinese)

郭彤楼, 熊亮, 杨映涛, 等, 2024. 从储层、烃源岩到输导体勘探——以四川盆地须家河组致密砂岩气为例[J]. 石油学报, 45(7): 1078—1091.

Guo T L, Xiong L, Yang Y T, et al., 2024. From reservoir, source to carrier beds exploration: a case study of tight sandstone gas in Xujiahe Formation, Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 45(7): 1078—1091. (in Chinese)

何鲤, 李梅, 熊亮, 等, 2011. 再谈四川盆地上三叠统层序地层划分方案[J]. 天然气工业, 31(6): 28—33.

He L, Li M, Xiong L, et al., 2011. Re-discussion on the sequence division schemes of Upper Triassic formations in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 31(6): 28—33. (in Chinese)

何利, 刘建清, 隆轲, 等, 2023. 川西北地区中三叠统雷口坡组沉积相再认识[J]. 海相油气地质, 28(4): 371—380.

He L, Liu J Q, Long K, et al., 2023. New understanding of sedimentary facies of the Middle Triassic Leikoupo Formation in northwestern Sichuan Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 28(4): 371—380. (in Chinese)

侯方浩, 蒋裕强, 方少仙, 等, 2005. 四川盆地上三叠统香溪组二段和四段砂岩沉积模式[J]. 石油学报, 26(2): 30—37.

Hou F H, Jiang Y Q, Fang S X, et al., 2005. Sedimentary model of sandstone in second and fourth members of Xiangxi Formation in the Upper Triassic of Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 26(2): 30—37. (in Chinese)

贾承造, 赵文, 宋岩, 等, 2025. 常规−致密过渡型砂岩气地质特征与成藏机制——以四川盆地须家河组—沙溪庙组为例[J]. 天然气工业, 45(12): 53—65.

Jia C Z, Zhao W, Song Y, et al., 2025. Geological characteristics and hydrocarbon accumulation mechanisms of conventional-tight transitional sandstone gas reservoirs: a case study of the Xujiahe Formation and Shaximiao Formation in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 45(12): 53—65. (in Chinese)

蒋裕强, 陶艳忠, 沈妍斐, 等, 2011. 对大川中地区上三叠统须家河组二、四、六段砂岩沉积相的再认识[J]. 天然气工业, 31(9): 39—50.

Jiang Y Q, Tao Y Z, Shen Y F, et al., 2011. A new understanding of sedimentary facies of sandstones in the 2nd, 4th, and 6th members of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the large-scale Middle Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 31(9): 39—50. (in Chinese)

李伟, 谢武仁, 王雪珂, 2023. 四川盆地中西部区域性超压特征与天然气大规模聚集的关系[J]. 天然气工业, 43(12): 1—13.

Li W, Xie W R, Wang X K, 2023. Relationship between regional overpressure characteristics and large-scale natural gas accumulation in the central and western Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 43(12): 1—13. (in Chinese)

李祥辉, 王成善, 刘树根, 等, 2016. 松潘—甘孜褶皱带复理石火山岩夹层时代及其地质意义[J]. 地质通报, 35(6): 879—886.

Li X H, Wang C S, Liu S G, et al., 2016. Chronology of the volcanic rock intercalations within the flysch of the Songpan-Ganzi folded belt and its geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 35(6): 879—886. (in Chinese)

李智武, 宋天慧, 王自剑, 等, 2021. 川西−龙门山盆山系统走向差异演化的变形、隆升和沉积记录及关键构造变革期讨论[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 48(3): 257—282.

Li Z W, Song T H, Wang Z J, et al., 2021. Strike variation evolution of the basin-mountain system in western Sichuan-Longmenshan as recorded by deformation, exhumation and deposition and discussion on the period of key structural transformation[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 48(3): 257—282. (in Chinese)

林良彪, 陈洪德, 姜平, 等, 2006. 川西前陆盆地须家河组沉积相及岩相古地理演化[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 33(4): 376—383.

Lin L B, Chen H D, Jiang P, et al., 2006. Sedimentary facies and litho-paleogeographic evolution of the Upper Triassic Xujiahe Formation in West Sichuan foreland basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 33(4): 376—383. (in Chinese)

刘和甫, 2001. 盆地−山岭耦合体系与地球动力学机制[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 26(6): 581—596.

Liu H F, 2001. Geodynamic scenario of coupled basin and mountain system[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 26(6): 581—596. (in Chinese)

刘树根, 1993. 龙门山冲断带与川西前陆盆地的形成演化[M]. 成都: 成都科技大学出版社.

Liu S G, 1993. The formation and evolution of Longmenshan thrust zone and western Sichuan Foreland Basin, Sichuan, China[M]. Chengdu: Press of Chengdu University of Science and Technology. (in Chinese)

刘树根，李智武，曹俊兴，等，2009a. 龙门山陆内复合造山带的四维结构构造特征[J]. 地质科学，44(4)：1151—1180.

Liu S G, Li Z W, Cao J X, et al., 2009a. 4-D textural and structural characteristics of Longmen intracontinental composite orogenic belt, southwest China[J]. Chinese Journal of Geology, 44(4): 1151—1180. (in Chinese)

刘树根，罗志立，戴苏兰，等，1995a. 龙门山冲断带的隆升和川西前陆盆地的沉降[J]. 地质学报，69(3)：205—214.

Liu S G, Luo Z L, Dai S L, et al., 1995a. The uplift of the Longmenshan thrust belt and subsidence of the western Sichuan Foreland Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 69(3): 205—214. (in Chinese)

刘树根，罗志立，赵锡奎，等，2003. 中国西部盆山系统的耦合关系及其动力学模式——以龙门山造山带—川西前陆盆地系统为例[J]. 地质学报，77(2)：177—186.

Liu S G, Luo Z L, Zhao X K, et al., 2003. Coupling relationships of sedimentary basin-orogenic belt systems and their dynamic models in West China: a case study of the Longmenshan orogenic belt-West Sichuan foreland basin system[J]. Acta Geologica Sinica, 77(2): 177—186. (in Chinese)

刘树根，孙玮，李智武，等，2008. 四川盆地晚白垩世以来的构造隆升作用与天然气成藏[J]. 天然气地球科学，19(3)：293—300.

Liu S G, Sun W, Li Z W, et al., 2008. Tectonic uplifting and gas pool formation since Late Cretaceous Epoch, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 19(3): 293—300. (in Chinese)

刘树根，童崇光，罗志立，等，1995b. 川西晚三叠世前陆盆地的形成与演化[J]. 天然气工业，15(2)：11—15.

Liu S G, Tong C G, Luo Z L, et al., 1995b. The formation and evolution of Late Triassic Foreland Basin in West Sichuan[J]. Natural Gas Industry, 15(2): 11—15. (in Chinese)

刘树根，杨荣军，吴熙纯，等，2009b. 四川盆地西部晚三叠世海相碳酸盐岩-碎屑岩的转换过程[J]. 石油与天然气地质，30(5)：556—565.

Liu S G, Yang R J, Wu X C, et al., 2009b. The Late Triassic transition from marine carbonate rock to clastics in the western Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 30(5): 556—565. (in Chinese)

刘于民，谢小敏，王志宏，等，2024. 四川盆地须家河组烃源岩成烃生物组成特征及潜力评价[J]. 天然气地球科学，35(10)：1833—1846.

Liu Y M, Xie X M, Wang Z H, et al., 2024. Biocomposition characteristics and potential evaluation of hydrocarbon generation in the Xujiahe Formation source rocks in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 35(10): 1833—1846. (in Chinese)

骆必继，2013. 西秦岭造山带印支期岩浆作用及深部过程[D]. 武汉：中国地质大学(武汉)：85—96.

Luo B J, 2013. Petrogenesis and geodynamic processes of the Indosinian magmatism in the West Qinling orogenic belt, Central China[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan): 85—96. (in Chinese)

骆必继，张宏飞，肖尊奇，2012. 西秦岭印支早期美武岩体的岩石成因及其构造意义[J]. 地学前缘，19(3)：199—213.

Luo B J, Zhang H F, Xiao Z Q, 2012. Petrogenesis and tectonic implications of the Early Indosinian Meiwu Pluton in West Qinling, central China[J]. Earth Science Frontiers, 19(3): 199—213. (in Chinese)

罗冰，冉崎，王小娟，等，2026. 川西-川中地区须家河组致密砂岩气成藏特征及有利勘探方向[J]. 天然气地球科学，37(1)：59—77.

Luo B, Ran Q, Wang X J, et al., 2026. Reservoir characteristics and favorable exploration directions of tight sandstone gas in the Xujiahe Formation in western-central Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 37(1): 59—77. (in Chinese)

罗启后，王世谦，1996. 四川盆地中西部三叠系重点含气层系天然气富集条件研究[J]. 天然气工业，16(增刊 1)：40—54.

Luo Q H, Wang S Q, 1996. Research on natural gas enrichment conditions of the main coal-bearing strate of Triassic in the centre-west part of Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 16(S1): 40—54. (in Chinese)

欧奎，2019. 鸭子河地区须家河组烃源岩地球化学特征[J]. 石化技术，26(2)：103.

Ou K, 2019. The research about the geochemical characters of source rock of Xujiahe Formation in Yazihe Region[J]. Petrochemical Industry Technology, 26(2): 103. (in Chinese)

潘珂，2019. 川东北地区须家河组烃源岩特征及其对天然气富集的影响[D]. 青岛：中国石油大学(华东)：1—71.

Pan K, 2019. Characteristic and controlling effect on natural gas accumulating of Xujiahe Formation source rock in northeast Sichuan Basin[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China): 1—71. (in Chinese)

钱利军，郝强，林良彪，等，2016. 川南地区上三叠统须家河组沉积特征与沉积演化模式[J]. 科学技术与工程，16(3)：28—35.

Qian L J, Hao Q, Lin L B, et al., 2016. Sedimentary characteristics and evolution model of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the southern Sichuan[J]. Science Technology and Engineering, 16(3): 28—35. (in Chinese)

钱涛，刘少峰，王宗秀，等，2016. 四川盆地北缘下侏罗统白田坝组砾岩发育特征及对南大巴山隆升时间的制约[J]. 中国科技论文，11(21)：2402—2408.

Qian T, Liu S F, Wang Z X, et al., 2016. Characteristics of the

Baitianba Formation conglomerate of Lower Jurassic in the northern Sichuan Basin and its constraint to the uplift of the south Dabashan[J]. China Science Paper, 11(21): 2402—2408.(in Chinese)

秦雁群, 张光亚, 梁英波, 等, 2014. 低勘探程度被动陆缘深水油气聚集研究方法: 以赤道大西洋波蒂瓜尔盆地深水油气远景勘探为例[J]. 地学前缘, 21(3): 187—194.

Qin Y Q, Zhang G Y, Liang Y B, et al., 2014. Research methods of low-degree exploration in the deep water hydrocarbon accumulation of passive margin: case study on deep water oil and gas prospecting exploration of Potiguar Basin in the Equatorial Atlantic[J]. Earth Science Frontiers, 21(3): 187—194. (in Chinese)

冉波, 刘树根, 李智武, 等, 2016. 川西须家河组火山岩夹层时代及其地质意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 43(6): 727—736.

Ran B, Liu S G, Li Z W, et al., 2016. Chronology of the pyroclastic layer from Xujiahe Formaton in the western Sichuan Basin and its geological significance[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 43(6): 727—736. (in Chinese)

施振生, 谢武仁, 马石玉, 等, 2012. 四川盆地上三叠统须家河组四段–六段海侵沉积记录[J]. 古地理学报, 14(5): 583—595.

Shi Z S, Xie W R, Ma S Y, et al., 2012. Transgression sedimentary records of the members 4-6 of Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 14(5): 583—595. (in Chinese)

宋金民, 刘树根, 李智武, 等, 2024. 川西地区中三叠统雷口坡组四段古海湾特征及其油气地质意义[J]. 石油勘探与开发, 51(6): 1291—1303.

Song J M, Liu S G, Li Z W, et al., 2024. Characteristics and hydrocarbon geological significances of paleo-bay in the fourth member of Middle Triassic Leikoupo Formation, western Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 51(6): 1291—1303. (in Chinese)

苏加亮, 林良彪, 余瑜, 等, 2023. 川西新场地区上三叠统须家河组二、四段物源及储层特征差异对比研究[J]. 沉积学报, 41(5): 1451—1467.

Su J L, Lin L B, Yu Y, et al., 2023. Comparative study on the provenance and reservoir characteristics of the second and fourth members of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the Xinchang Area, western Sichuan, China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 41(5): 1451—1467. (in Chinese)

孙玮, 吴熙纯, 刘树根, 等, 2011. 川西前陆盆地上三叠统马鞍塘组生物礁的研究和预测[J]. 桂林理工大学学报, 31(2): 185—191.

Sun W, Wu X C, Liu S G, et al., 2011. Study and prediction of Ma'antang reef in Upper Triassic Foreland Basin of West Sichuan[J]. Journal of Guilin University of Technology, 31(2): 185—191. (in Chinese)

童小俊, 2016. 四川盆地中部须家河组气、源地化特征及烃源岩生烃能力综合评价[D]. 成都: 成都理工大学.

Tong X J, 2016. Geochemical characteristics of the gas and source and the hydrocarbon generation potential of Xujiahe Formation in Middle of Sichuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology. (in Chinese)

王金琪, 1990. 安县构造运动[J]. 石油与天然气地质, 11(3): 223—234.

Wang J Q, 1990. Anxian tectonic movement[J]. Oil & Gas Geology, 11(3): 223—234. (in Chinese)

王金琪, 2003. 龙门山印支运动主幂辨析——再论安县构造运动[J]. 四川地质学报, 23(2): 65—69.

Wang J Q, 2003. Recognition on the main episode of Indo-China movement in the Longmen Mountains—a re-review on the Anxian tectonic movement[J]. Acta Geologica Sichuan, 23(2): 65—69. (in Chinese)

王君泽, 刘四兵, 陈婷, 等, 2011. 川西坳陷孝–新–合地区须家河组烃源岩地化特征对比及评价[J]. 四川文理学院学报, 21(5): 67—69.

Wang J Z, Liu S B, Chen T, et al., 2011. Comparison and evaluation on the characteristics of geochemistry on Xujiahe Formation hydrocarbon source rocks in Xiao−Xin−He region of western Sichuan Depression[J]. Journal of Sichuan University of Arts and Science, 21(5): 67—69. (in Chinese)

王玲辉, 沈忠民, 赵虎, 2007. 川西坳陷中段须家河组烃源岩地球化学特征[J]. 西部探矿工程, (11): 66—70.

Wang L H, Shen Z M, Zhao H, 2007. The characteristics of geochemistry in hydrocarbon source rock of the Middle Part of Xujiahe Formation in West Sichuan Depression[J]. West-China Exploration Engineering, (11): 66—70. (in Chinese)

王伟明, 胡美硕, 焦立新, 等, 2025. 三塘湖盆地下石炭统新层系石油地质条件及勘探潜力[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 55(5): 1401—1419.

Wang W M, Hu M S, Jiao L X, et al., 2025. Petroleum geology conditions and exploration potential of new stratigraphic series in Lower Carboniferous of Santanghu Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 55(5): 1401—1419. (in Chinese)

王小娟, 王昌勇, 陈小二, 等, 2023. 川西—川中地区上三叠统地层对比及沉积充填特征[J]. 沉积学报, 41(2): 435—449.

Wang X J, Wang C Y, Chen X E, et al., 2023. Stratigraphic correlation of the Upper Triassic and its sedimentary filling characteristics in the western and central Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 41(2): 435—449. (in Chinese)

王运生, 1992. 龙门山晚三叠世早期菊石[J]. 成都地质学院学

报，19(4)：28—35.

Wang Y S, 1992. The earlier Late Triassic ammonites from Longmen Mountains[J]. Journal of Chengdu College of Geology, 19(4): 28—35. (in Chinese)

王峥嵘，2014. 川西凹陷新场须二段深部地应力场特征及岩体破裂规律研究[D]. 成都：成都理工大学.

Wang Z R, 2014. Study on the characteristics of deep geostress field and patterns of rock burst in the second member of Xujiahe Formation in Xinchang area, of western Sichuan Depression[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology. (in Chinese)

吴小奇，周小进，陈迎宾，等，2022. 四川盆地川西坳陷上三叠统须家河组烃源岩分子地球化学特征[J]. 石油实验地质，44(5)：854—865.

Wu X Q, Zhou X J, Chen Y B, et al., 2022. Molecular characteristics of source rocks in Upper Triassic Xujiahe Formation, western Sichuan Depression, Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 44(5): 854—865. (in Chinese)

谢继容，李国辉，唐大海，2006. 四川盆地上三叠统须家河组物源供给体系分析[J]. 天然气勘探与开发，29(4)：1—3.

Xie J R, Li G H, Tang D H, 2006. Analysis on provenance-supply system of Upper Triassic Xujiahe Formation, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 29(4): 1—3. (in Chinese)

谢继容，张健，李国辉，等，2008. 四川盆地须家河组气藏成藏特点及勘探前景[J]. 西南石油大学学报(自然科学版)，30(6)：40—44.

Xie J R, Zhang J, Li G H, et al., 2008. Exploration prospect and gas reservoir characteristics of Xujiahe Formation in Sichuan Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 30(6): 40—44. (in Chinese)

徐康，宫晗凝，2023. 四川盆地雷口坡组岩相古地理特征及有利储集相带[J]. 古地理学报，25(4)：841—855.

Xu K, Gong H N, 2023. Lithofacies palaeogeographic characteristics and favorable reservoir facies of the Leikoupo Formation in Sichuan Basin[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 25(4): 841—855. (in Chinese)

许志琴，曾令森，杨经绥，等，2004. 走滑断裂、“挤压性盆-山构造”与油气资源关系的探讨[J]. 地球科学——中国地质大学学报，29(6)：631—643.

Xu Z Q, Zeng L S, Yang J S, et al., 2004. Role of large-scale strike-slip faults in the formation of petroleum-bearing compressional basin-mountain range systems[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 29(6): 631—643. (in Chinese)

杨维刚，李永胜，任文秀，等，2025. 西秦岭九寨沟县下草地村含金花岗斑岩特征及其金矿找矿指示意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，55(5)：1506—1524.

Yang W G, Li Y S, Ren W X, et al., 2025. Characteristics and indicative significance in gold exploration of the gold-bearing granite porphyry in Xiacaodi Village of Jiuzhaigou County, West Qinling[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 55(5): 1506—1524. (in Chinese)

杨阳，王顺玉，黄羚，等，2009. 川中—川南过渡带须家河组烃源岩特征[J]. 天然气工业，29(6)：27—30.

Yang Y, Wang S Y, Huang L, et al., 2009. Features of source rocks in the Xujiahe Formation at the transitional zone of central-southern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 29(6): 27—30. (in Chinese)

易士威，林世国，杨威，等，2013. 四川盆地须家河组大气区形成条件[J]. 天然气地球科学，24(1)：1—8.

Yi S W, Lin S G, Yang W, et al., 2013. Condition of Xujiahe Formation large gas province formation in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 24(1): 1—8. (in Chinese)

殷鸿福，杨逢清，黄其胜，等，1992. 秦岭及邻区三叠系[M]. 武汉：中国地质大学出版社.

Yin H F, Yang F Q, Huang Q S, et al., 1992. Triassic System in Qinling and adjacent areas[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press.

于佳男，2014. 川西地区龙泉山构造带构造特征及含油气条件评价[D]. 成都：成都理工大学：26—41.

Yu J N, 2014. Longquan Mountain tectonic zone structural features and hydrocarbon condition evaluation[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology: 26—41. (in Chinese)

张宏，佘晓宇，马永强，2009. 石柱复向斜上三叠统须家河组沉积相特征[J]. 内江科技，30(11)：108.

Zhang H, She X Y, Ma Y Q, 2009. Sedimentary facies characteristics of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the Shizhu synclinorium[J]. Neijiang Science and Technology, 30(11): 108. (in Chinese)

章顺利，2020. 四川盆地中西部上三叠统须家河组二段孔隙型致密砂岩储层特征与形成机理[D]. 成都：成都理工大学：18—22.

Zhang S L, 2020. Characteristics and formation mechanism of porous tight sandstone reservoir in the second member of Xujiahe Formation, Upper Triassic, Central and Western Sichuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology: 18—22. (in Chinese)

赵承锦，蒋有录，刘景东，等，2021. 基于正演与反演结合的孔隙度演化恢复方法——以川东北地区须家河组为例[J]. 石油学报，42(6)：708—723.

Zhao C J, Jiang Y L, Liu J D, et al., 2021. A recovery method of porosity evolution based on forward and inverse analyses: a case study of the tight sandstone of Xujiahe Formation, northeast Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 42(6): 708—723. (in Chinese)

赵军寿, 陈洪德, 林良彪, 等, 2013. 通南巴地区上三叠统须家河组沉积体系及其主控因素[J]. 煤田地质与勘探, 41(2): 1—7.

Zhao J S, Chen H D, Lin L B, et al., 2013. Sedimentary system and main controlling factors of the Upper Triassic Xujiahe Formation in Tongnanba area[J]. Coal Geology & Exploration, 41(2): 1—7. (in Chinese)

赵霞飞, 1989. 联邦德国 Amrum 岛海滩和潮坪沉积环境[J]. 成都地质学院学报, 16(3): 73—80.

Zhao X F, 1989. Sedimentary environments of the beach and tidal-flats Arouno island Amrum, FRG[J]. Journal of Chengdu College of Geology, 16(3): 73—80. (in Chinese)

赵霞飞, 胡东风, 张闻林, 等, 2013. 四川盆地元坝地区上三叠统须家河组的潮控河口湾与潮控三角洲沉积[J]. 地质学报, 87(11): 1748—1762.

Zhao X F, Hu D F, Zhang W L, et al., 2013. Tide-dominated estuarine and deltaic deposition of the Upper-Triassic Xujiahe Formation in the Yuanba Area, Sichuan Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 87(11): 1748—1762. (in Chinese)

赵霞飞, 吕宗刚, 张闻林, 等, 2008. 四川盆地安岳地区须家河组——近海潮汐沉积[J]. 天然气工业, 28(4): 14—18.

Zhao X F, Lv Z G, Zhang W L, et al., 2008. Paralic tidal deposits in the Upper Triassic Xujiahe Formation in Anyue area, the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 28(4): 14—18. (in Chinese)

赵霞飞, 张闻林, 2011. 再论四川盆地须家河组的海相潮汐成因——进一步论证与层序分析[J]. 天然气工业, 31(9): 25—30.

Zhao X F, Zhang W L, 2011. A re-discussion on the origins of tidal deposits in the Xujiahe Formation of the Sichuan Basin: further evidences and sequence analysis[J]. Natural Gas Industry, 31(9): 25—30. (in Chinese)

赵霞飞, 赵拓宇, 张闻林, 2019. 潮汐韵律岩研究进展及对须家河组沉积相的启示[J]. 天然气勘探与开发, 42(2): 29—38.

Zhao X F, Zhao T Y, Zhang W L, 2019. An introduction to the developments of tidal rhythmite studies and its implication to the natual gas exploration of Xujiahe Formation[J]. Natural Gas Exploration and Development, 42(2): 29—38. (in Chinese)

郑荣才, 戴朝成, 罗清林, 等, 2011. 四川类前陆盆地上三叠统须家河组沉积体系[J]. 天然气工业, 31(9): 16—24.

Zheng R C, Dai C C, Luo Q L, et al., 2011. Sedimentary system of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the Sichuan foreland basin[J]. Natural Gas Industry, 31(9): 16—24. (in Chinese)

周倩羽, 邵龙义, 陈照雄, 等, 2016. 四川华蓥山北段上三叠统须家河组沉积环境及聚煤特征[J]. 煤炭学报, 41(3): 703—711.

Zhou Q Y, Shao L Y, Chen Z X, et al., 2016. Depositional environments and coal-accumulation characteristics of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the northern segment of Huaying Mountain, Sichuan Basin[J]. Journal of China Coal Society, 41(3): 703—711. (in Chinese)

朱夏, 陈焕疆, 孙肇才, 等, 1983. 中国中、新生代构造与含油气盆地[J]. 地质学报, (3): 235—242.

Zhu X, Chen H J, Sun Z C, et al., 1983. The Mesozoic-Cenozoic tectonics and petroliferous basins of China[J]. Acta Geologica Sinica, (3): 235—242. (in Chinese)

邹云, 2010. 川西坳陷合兴场、东泰、罗江地区构造演化及断裂活动期次[D]. 北京: 中国地质大学(北京): 21—63.

Zou Y, 2010. Tectonic evolution and fracture stage in Hexingchang, Dongtai and Luojiang Area of the western Sichuan Depression[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing): 21—63. (in Chinese)

Alexander C R, DeMaster D J, Nittrouer C A, 1991. Sediment accumulation in a modern epicontinental-shelf setting: the Yellow Sea[J]. Marine Geology, 98(1): 51—72.

Asfahani J, 2025. Merging and fractal techniques applied on gamma-ray spectrometric datasets for characterizing the radionuclide distribution in Syria[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 334(2): 1167—1181.

Chen H L, Zhu M, Chen S Q, et al., 2020. Basin-orogen patterns and the Late Triassic foreland basin conversion process in the western Yangtze Block, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 194: 104311.

Corlett H, Jones B, 2011. The influence of paleogeography in epicontinental seas: a case study based on Middle Devonian strata from the MacKenzie Basin, Northwest Territories, Canada[J]. Sedimentary Geology, 239(3/4): 199—216.

Deng B, Liu S G, Jansa L, et al., 2012. Sedimentary record of Late Triassic transpressional tectonics of the Longmenshan thrust belt, SW China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 48: 43—55.

Deng B, Liu S G, Liu S, et al., 2013. Progressive Indosinian N-S deformation of the Jiaochang structure in the Songpan−Ganzi fold-belt, Western China[J]. PLoS One, 8(10): e76732.

Dirks P H G M, Wilson C J L, Chen S F, et al., 1994. Tectonic evolution of the NE margin of the Tibetan Plateau: evidence from the central Longmen Mountains, Sichuan Province, China[J]. J. SE Asian Earth Sci., 9(1/2): 181—192.

Fang P G, Ding W W, Wei X D, et al., 2023. Unravelling rift propagation from Cenozoic subsidence patterns: examples from the dangerous grounds, South China Sea[J]. Basin Research, 35(5): 1856—1879.

Frisch W, Meschede M, Blakey R C, 2011. Plate tectonics and mountain building[M]//Frisch W, Meschede M, Blakey R C.

Plate tectonics: continental drift and mountain building. Berlin: Springer: 149—158.

Harrowfield M J, Wilson C J L, 2005. Indosinian deformation of the Songpan Garzê Fold Belt, northeast Tibetan Plateau[J]. Journal of Structural Geology, 27(1): 101—117.

Hu X M, Wen D J, Pan Y D, et al., 2026. Syn-collisional origin of Yidun arc-like magmas and northern provenance of Songpan–Ganzi Turbidites (Eastern Tibet)[J]. Terra Nova, 38(3): 149—162.

Hubbard J, Shaw J H, 2009. Uplift of the Longmen Shan and Tibetan Plateau, and the 2008 Wenchuan (*M*=7.9) earthquake[J]. Nature, 458: 194—197.

Jain S, 2025. Fundamentals of sedimentology[M]. Boca Raton: CRC Press: 269.

Jiang Z R, Ran B, Li Z W, et al., 2023. A Late Triassic depositional age for the Xujiahe Formation, Sichuan Basin: implications for the closure of the Paleo-Tethys Ocean[J]. Marine and Petroleum Geology, 155: 106346.

Li M S, Zhang Y, Huang C J, et al., 2017. Astronomical tuning and magnetostratigraphy of the Upper Triassic Xujiahe Formation of South China and newark Supergroup of North America: implications for the Late Triassic time scale[J]. Earth and Planetary Science Letters, 475: 207—223.

Liu S G, Deng B, Jansa L, et al., 2013a. Late Triassic thickening of the Songpan–Ganzi Triassic flysch at the edge of the northeastern Tibetan Plateau[J]. International Geology Review, 55(16): 2008—2015.

Liu S G, Deng B, Li Z W, et al., 2013b. Geological evolution of the Longmenshan intracontinental composite orogen and the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Earth Science, 24(6): 874—890.

Liu S G, Luo Z L, Dai S L, et al., 1996. The uplift of the Longmenshan thrust belt and subsidence of the West Sichuan Foreland Basin[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 9(1): 16—26.

Liu S G, Yang Y, Deng B, et al., 2021. Tectonic evolution of the Sichuan Basin, Southwest China[J]. Earth-Science Reviews, 213: 103470.

Ogg J G, Ogg G M, Gradstein F M, 2016. A concise geologic time scale 2016[M]. Amsterdam: Elsevier.

Owen R B, 2005. Modern fine-grained sedimentation-spatial variability and environmental controls on an inner pericontinental shelf, Hong Kong[J]. Marine Geology, 214(1/2/3): 1—26.

Peng Y, Olariu C, Steel R J, 2020. Recognizing tide- and wave-dominated compound deltaic clinothems in the rock record[J]. Geology, 48(12): 1149—1153.

Requejo A G, Wielchowsky C C, Klosterman M J, et al., 1994. Geochemical characterization of lithofacies and organic facies in Cretaceous organic-rich rocks from Trinidad, East Venezuela Basin[J]. Organic Geochemistry, 22(3/4/5): 441—459.

Roger F, Jolivet M, Malavieille J, 2010. The tectonic evolution of the Songpan–Garzê (North Tibet) and adjacent areas from Proterozoic to present: a synthesis[J]. Journal of Asian Earth Sciences 39: 254—269.

Shi Z Q, Preto N, Jiang H S, et al., 2017. Demise of Late Triassic sponge mounds along the northwestern margin of the Yangtze Block, South China: related to the Carnian Pluvial Phase?[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 474: 247—263.

Summa L L, Goodman E D, Richardson M, et al., 2003. Hydrocarbon systems of Northeastern Venezuela: plate through molecular scale-analysis of the genesis and evolution of the Eastern Venezuela Basin[J]. Marine and Petroleum Geology, 20(3/4): 323—349.

Visser M J, 1980. Neap-spring cycles reflected in Holocene subtidal large-scale bedform deposits: a preliminary note[J]. Geology, 8: 543—546.

Walsh J P, Nittrouer C A, 2009. Understanding fine-grained river-sediment dispersal on continental margins[J]. Marine Geology, 263(1/2/3/4): 34—45.

Wang T R, Ran B, Wang C S, et al., 2024. Evidence of detrital spinel geochemistry for depositional response to the Paleo-Tethyan closure recorded in the Songpan–Ganzi Terrane, eastern Tibetan Plateau[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 270: 106191.

Wendt J W, Wu X C, Reinhardt J W, 1989. Deep-water hexactinellid sponge mounds from the Upper Triassic of northern Sichuan (China)[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 76(1/2): 17—29.

Wilson C J L, Harrowfield M J, Reid A J, 2006. Brittle modification of Triassic architecture in eastern Tibet: implications for the construction of the Cenozoic plateau[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 27(3): 341—357.

Worley B, Wilson C J L, 1996. Deformation partitioning and foliation reactivation during transpressional orogenesis, an example from the Central Longmen Shan, China[J]. Journal of Structural Geology, 18(4): 395—411.

Yan D P, Zhou M F, Li S B, et al., 2011. Structural and geochronological constraints on the Mesozoic–Cenozoic tectonic evolution of the Longmen Shan thrust belt, eastern Tibetan Plateau[J]. Tectonics, 30: TC6005.

Zhang H C, Zhou H B, Yan B, et al., 2025. Zircon U-Pb dating of metagabbro masses from the Liwu Group Complex within the Taka dome: geochronological constraints on the Indosinian–Yanshanian tectonic events in western Sichuan, China[J]. China Geology, 8(4): 865—868.