

川西北晚三叠世盆-山耦合过程与古地理演化

闫心宇¹, 刘磊^{1,2,3*}, 王小娟⁴, 朱淑玥¹, 赵菲¹, 郑超⁴,
马贤成¹, 张蕊¹

1. 成都理工大学 沉积地质研究院, 成都 610059;

2. 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;

3. 自然资源部深时地理环境重建与应用重点实验室, 成都 610059;

4. 中国石油西南油气田公司 勘探开发研究院, 成都 610041

[摘要] 川西北地区上三叠统须家河组物质来源以及周缘造山带供源时序存在较大争议, 多物源体系下的构造-沉积模式有待进一步揭示。本文基于野外露头、钻、测井资料, 通过岩屑、重矿物组合特征、古水流及碎屑锆石年龄特征进行物源综合分析, 通过阐明须家河组沉积期充填过程, 聚焦碎屑物质分布及迁移规律, 进而揭示川西北周缘造山带的盆-山耦合关系与古地理演化。四川盆地西北部在须家河组沉积时期存在松潘—甘孜褶皱带、龙门山冲断带、南秦岭 3 个源区。根据研究区须家河组砂岩样品岩屑、重矿物百分含量统计分析, 划分出岩屑组合与重矿物组合类型的分区: 须一段和须二段划分出 2 类组合区域, 须三段和须四段划分出 3 类组合区域。在物源综合分析基础上, 结合研究区碎屑岩分布、沉积演化, 认为须一段至须二段沉积时期, 西部松潘—甘孜褶皱带和龙门山冲断带为主要物源区, 供给盆内发育的辫状河三角洲; 须三段沉积时期, 龙门山中北段发生强烈隆升, 为研究区西北部发育的扇三角洲供源, 米仓山低幅隆升, 开始为研究区东部发育的辫状河三角洲供源; 须四段沉积时期, 龙门山中北段隆升幅度增高, 米仓山—大巴山进一步推覆抬升, 研究区东部的辫状河三角洲规模逐渐扩大。物源供给早期西强北弱, 后期转变为西北联合供砂。龙门山冲断带和米仓山—大巴山的演化主导了川西北构造-沉积格局的变化及物质分布规律。通过探讨川西北盆-山耦合过程及其约束下的砂体展布规律与古地理演化, 为须家河组成藏物质基础研究提供新的视角。

[关键词] 四川盆地; 碎屑物质分布; 须家河组; 物源体系; 古地理演化

[分类号] P512.2

[文献标志码] A

Basin-orogen coupling process and paleogeographic evolution of the northwestern Sichuan Basin during the Late Triassic

YAN Xinyu¹, LIU Lei^{1,2,3*}, WANG Xiaojuan⁴, ZHU Shuyue¹, ZHAO Fei¹,
ZHENG Chao⁴, MA Xiancheng¹, ZHANG Rui¹

收稿日期: 2024-11-08; **改回日期:** 2025-02-24。 **责任编辑:** 魏 巍。

基金项目: 四川省青年科技创新研究团队项目(22CXTD0064)。

第一作者: 闫心宇(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 地质学, E-mail: yanxinyu088@163.com。

***通信作者:** 刘磊(1988—), 男, 研究员, 研究方向: 含油气盆地分析, E-mail: liulei@cdut.edu.cn。

引用格式: 闫心宇, 刘磊, 王小娟, 等, 2026. 川西北晚三叠世盆-山耦合过程与古地理演化 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 53(3): 512—533.

Yan X Y, Liu L, Wang X J, et al., 2026. Basin-orogen coupling process and paleogeographic evolution of the northwestern Sichuan Basin during the Late Triassic[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 53(3): 512—533.

1. *Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;*
2. *State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;*
3. *Key Laboratory of Deep-Time Geography Reconstruction and Environment Reconstruction and Applications of Ministry of Natural Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;*
4. *Exploration and Development Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu 610041, China*

Abstract: The provenance of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the northwestern Sichuan Basin and the temporal evolution of sediment supply of the surrounding orogenic belt are controversial research topics. Moreover, tectonic sedimentary models based on multi-source systems need to be further studied. Based on field outcrops and drilling and logging data, we comprehensively analyzed the Xujiahe Formation's provenance through the characteristics of rock debris, heavy mineral assemblages, paleocurrents, and age characteristics of detrital zircons. By clarifying the filling process of the Xujiahe Formation during the sedimentary period, focusing on the distribution and migration of detrital materials, the basin–mountain coupling relationship and paleogeographic evolution of the orogenic belt around the northwest of Sichuan Basin were revealed. There were three major source areas in northwestern Sichuan Basin during the deposition of the Xujiahe Formation, including the Songpan-Ganzi fold belt, the Longmenshan thrust belt, and the South Qinling Mountains. According to a statistical analysis of the percentage of debris and heavy minerals in sandstone samples from the Xujiahe Formation, the debris and heavy mineral assemblages were classified as follows: the first and second members of the Xujiahe Formation can be divided into two types of combination areas, and the third and fourth members of the Xujiahe Formation can be divided into three types of combination areas. Based on the comprehensive analysis of provenance, combined with the distribution and sedimentary evolution of clastic rocks in the study area, it is considered that during the sedimentary period of the first and second members of Xujiahe Formation, the western Songpan-Ganzi fold belt, and the Longmenshan thrust belt are the main source areas, which supplied a braided river delta that developed in the basin. During the deposition period of the third member of the Xujiahe Formation, a strong uplift occurred in the north–central section of the Longmenshan, which was the source of a fan delta that developed in the northwest of the study area. The low-amplitude uplift of the Micang Mountains began to supply a braided river delta that developed in the eastern part of the study area. During the sedimentary period of the fourth member of the Xujiahe Formation, uplift of the middle and northern sections of the Longmenshan increased, and the Micang–Daba Mountains further overturned and uplifted; meanwhile, the scale of the braided river delta in the eastern part of the study area gradually expanded. The source supply was strong in the west and weak in the north in the early stage, and changed to a northwest joint sand supply in the later stage. The evolution of the Longmenshan thrust belt and Micang–Daba Mountains were dominated by changes in the tectonic sedimentary pattern and material distribution in northwestern Sichuan. By discussing the basin–mountain coupling process in northwestern Sichuan and the sand body distribution law and paleogeographic evolution under various constraints, this study provides a new perspective for the study of the material basis of the Xujiahe Formation.

Key words: Sichuan Basin; distribution of clastic material; Xujiahe Formation; source system; palaeogeographic evolution

四川盆地是中国天然气最富集的沉积盆地之一, 上三叠统须家河组是致密砂岩气藏勘探开发的主要层系, 有巨大的勘探开发潜力(唐大海等, 2020; 郑和荣等, 2021)。须家河组发育多套厚层三角洲砂体, 多期砂体叠置广泛分布优质储层, 三角洲平原分流河道、三角洲前缘水下分流

河道储集层控制气藏的规模与分布(朱如凯等, 2009; 李伟等, 2010; 张道伟和杨雨, 2022)。通过对须家河组物源、沉积古地理的研究, 可以进一步明确沉积相控制的优质储层分布规律, 有效支撑致密气藏的勘探开发, 提高开发效率。

晚三叠世四川盆地西北部周缘构造带构造

活动较为复杂,松潘—甘孜褶皱带、龙门山冲断带和秦岭造山带相继隆升为须家河组提供物源(李阔, 2012; 余世花, 2016)。众多学者根据沉积物岩屑类型、重矿物含量变化、古水流方向和碎屑锆石年龄特征等,对须家河组各时期主要物质来源和不同造山带供源时序、隆升强弱等问题持有不同观点(表 1),同时龙门山逆冲推覆构造活动如何影响碎屑物质供给需进一步研究。对须家河组物源供源时序的争议制约了盆—山耦合过程的恢复。相比盆地其他区域,盆地西北部沉积体系和物源时空配置更为复杂(表 1),经历了从海相碳酸盐岩到陆相碎屑岩的转变,受龙门山和米仓山—大巴山等多物源体系的影响(陈洪德等, 2011; 李国辉等, 2012)。晚三叠世是四川盆地构造转换的关键时期,发生汇聚构造环境向碰撞构造环境的转变(Weislogel et al., 2006, 2010; Zhang et al., 2022),局限残留海相沉积逐渐向河流—三角洲沉积体系演化,海陆转换过程中沉积中心

逐渐向西迁移至西秦岭和松潘—甘孜地区(朱如凯等, 2009; Tang et al., 2018; 王小娟等, 2023; Peng et al., 2024)。尽管前人已取得诸多成果,但对上扬子西部在海陆转换过程中从海相到陆相转变的构造沉积模式仍缺乏系统研究,亟需开展对川西北地区须家河组沉积充填过程和盆—山耦合关系的研究,以进一步重建川西北晚三叠世古地理演化过程。本文以四川盆地西北部须家河组为研究对象,基于野外露头、钻、测井资料,通过古水流、薄片岩屑统计及重矿物组合特征分析进行物源研究,结合前人物源研究成果进行讨论,阐明四川盆地西北部须家河组物源供源时序,结合本区沉积古地理演化揭示研究区与周缘造山带的盆—山耦合关系。

1 区域地质背景

川西北地区位于扬子板块西北部,松潘—甘孜褶皱带东缘与南秦岭南缘交汇之处,北起广

表 1 四川盆地西北部晚三叠世须家河组物源与沉积相研究观点对比表

Table 1 Comparative table of provenance and sedimentary facies of the Late Triassic Xujiahe Formation in the northwest Sichuan Basin

	前人研究观点对比	参考文献
晚三叠世 须家河组 物源研究	自须三段开始, 龙门山成为须家河主要物源	谢继容等, 2006; 郭旭升, 2010
	须二段龙门山冲断带北段已初始形成, 并暴露地表处于剥蚀状态提供物源	邓康龄, 2007; 施振生等, 2011
	须四段开始松潘—甘孜复理石地层和龙门山冲断带才成为主要物源	邓飞等, 2008
	须家河组沉积早期松潘—甘孜褶皱带为物源区, 至须四段龙门山成为物源区	李勇等, 2010; 罗启后, 2011
	须一段~须三段, 大部分碎屑物质来自秦岭和扬子地块, 须四段~须五段, 龙门山供源	Gou et al., 2024
晚三叠世 须家河组 沉积相研究	晚三叠世物源来自秦岭造山带和华北克拉通, 少量来自扬子克拉通	余世花, 2016; Tang et al., 2018; 木红旭, 2020; Zhang et al., 2022
	须家河组沉积环境主要为陆相的河流—湖泊沉积, 共发育 5 类沉积体系, 包括冲积扇、辫状河、曲流河、三角洲和湖泊	Liu et al., 2015; 李英娇和邵龙义, 2017
	须二段为海相沉积, 须三段至须六段为海陆过渡相沉积, 主要以海相三角洲为主	陈杨等, 2011
	须二段至须三段主要发育海—陆过渡环境的三角洲沉积, 须三段末期转变为陆相沉积环境。须四段至须五段为冲积扇、湖泊三角洲和湖泊体系	郭旭升, 2010; 谢小平等, 2021; 施振生等, 2021; Gou et al., 2024
	须一段至须二段, 龙门山冲断带与松潘—甘孜褶皱带为主要物源, 南秦岭为次要物源; 须三段龙门山北中段提供大量物源, 米仓山开始成为主要物源; 须四段, 为龙门山冲断带与松潘—甘孜褶皱带, 包括米仓山—大巴山在内的南秦岭提供主要物源。须一段主要为海湾沉积环境, 须二段至须四段发育扇三角洲、辫状河三角洲和湖泊沉积体系	本次研究

元、南至三台一带、西始江油、东至旺苍。晚三叠世盆地周缘发育的造山带主要为:西部的松潘—甘孜褶皱带、龙门山冲断带,北部的南秦岭造山带、米仓山—大巴山冲断带(付建晔, 2016; 曹正林等, 2023)(图1)。松潘—甘孜褶皱带广泛出露巨厚的中—晚三叠世复理石沉积岩,并伴有明显的花岗岩岩浆侵入活动(刘祥等, 2021; Hu et al., 2022)。龙门山冲断带为扬子板块与松潘—甘孜褶皱带之间的界线,经历了复杂的构造活动和多期次运动变形,并以北川—安县一线和卧龙—怀远一线为界划分为3段(邓康龄, 2007; 李智武等, 2008)。龙门山在印支—燕山期经历过强烈的岩浆活动,广泛分布花岗岩以及寒武系和奥陶系火山岩、碳酸盐岩和硅质岩(Yan et al., 2018; 陈洪德等, 2021)。扬子板块与华北板块的碰撞挤压导致南秦岭强烈岩浆活动,南秦岭的结晶基底主要由斜长角闪岩和片麻岩等中高级变质岩构成(李三忠等, 2003; 戴朝成等, 2014; 王磊, 2020; Dong et al., 2021)。南秦岭的构造挤压导致米仓山—大巴山发生差异性隆升,大巴山的构造变形程度相对较弱(李建华等, 2010; Shi et al., 2012; 淡永等, 2013; Li et al., 2015)。米仓山—大巴山主要岩石组成为中新元古代的变质岩、多期侵入的

岩浆岩以及中生代沉积岩(何政伟等, 1997)。

2 地层特征与沉积背景

四川盆地西北部晚三叠世须家河组,自下而上主要发育须一段至须五段(陈斌等, 2016; 李祥辉等, 2016)。整体地层厚度变化较大(530~3 600 m),与上覆地层呈不整合接触(李英娇, 2014)。须一段为黑色页岩和砂质页岩互层,含少量钙质砂岩,超覆线位于元坝—三台地区(图1-B);须二段地层厚度为35~800 m,为中—厚层细砂岩、粉砂岩夹泥岩,向南东方向逐渐超覆减薄,超覆线位于南充地区,沉降中心在西南部梓潼—成都地区发育;须三段在全区均有分布,地层厚度变化与须二段趋势一致,为150~900 m,但靠近盆地边缘的剑阁地区存在剥蚀,沉降中心向南西方向迁移,北部发育中—厚层砂岩夹砾岩,西南部泥岩增多,为厚层泥夹薄层砂岩,东南部泥岩、页岩夹细砂岩较为发育(图2);须四段地层厚度为25~480 m,旺苍—江油以北地区遭受剥蚀,以中—厚层砂岩夹泥岩、泥质细砂岩、碳质页岩和泥岩为主(图2);研究区西北部安县—剑阁一带须五段地层发生整体抬升剥蚀,残余厚度约15~450 m(赵正望等, 2012; 魏中仁, 2021),主

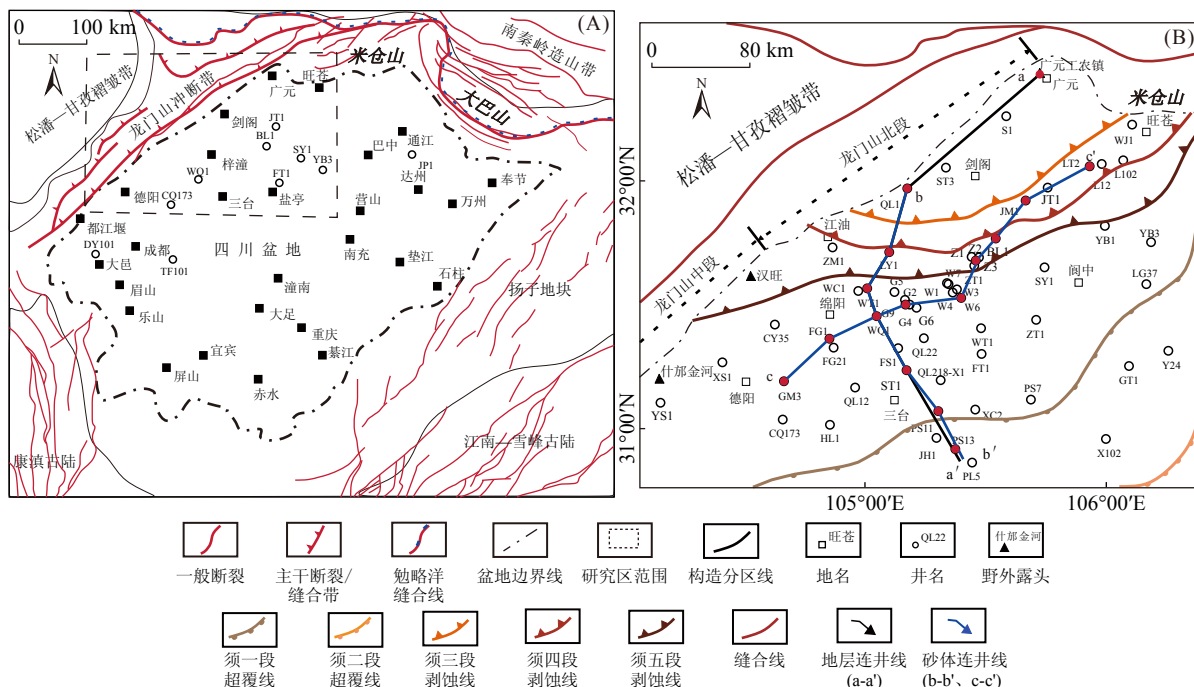


图1 四川盆地西北部区域地质背景图

Fig. 1 Regional geological background map of the northwestern Sichuan Basin

(A)四川盆地西北部区域地质概况图(据李忠权等, 2014 修改);(B)四川盆地西北部构造分区图

要为细砂岩、粉砂岩与碳质页岩、粉砂质泥岩互层,含少量砾岩(图2)。由于地层抬升剥蚀,须五段在研究区内残余地层较少,目标层段以须一段~须四段为主。

研究区须家河组主要划分为三角洲和湖泊2种沉积体系类型(木红旭, 2020; 陈洪德等, 2021; 王兴龙, 2021),经历了海相-海陆过渡相-陆相环境的转变。须一段~须二段沉积时期发育海湾、辫状河三角洲前缘亚相,沉积体系由海相转变为海陆过渡相,底部发育黑色页岩和砂质页岩互层与下伏马鞍塘组区分(郑荣才等, 2011; 李英娇, 2014)(图3、图4);通过测井曲线特征将须三段划分为须三下亚段和须三上亚段,须三下亚段底界面之上以低GR值砾岩及砂岩为特征,底部发育薄层泥岩。须三上亚段底界面之上测井曲线特征为高GR值泥岩和中低GR值薄层砂砾岩,发育典型箱形砾岩段。须三段底部发育泥岩和薄层砂砾岩与须二段分界,以扇三角洲和滨-浅湖相沉积为主(图3、图4),已完全转变为陆相环境(徐胜林, 2010; 陈洪德等, 2021);须四段底部发育厚层砂岩与须三段的区分,广泛发育冲积扇-扇三角洲和浅湖相沉积,以发育扇三角洲前缘为特征(图3、图4);须五段沉积时期,主要为湖泊三角洲沉积体系。

3 物源体系分析

3.1 样品采集与测试方法

本文研究的样品采自四川盆地西北部广元工农镇、旺苍、宝轮镇、白田坝、汉旺等7条野外剖面及90余口钻井岩心,采样点覆盖整个研究区。选择风化蚀变作用弱的97件砂岩样品,在成都理工大学油气藏地质与开发工程国家重点实验室进行重矿物分析和镜下薄片鉴定。实测获得德阳、三台、射洪等地的野外地层产状及古流向数据,应用软件Stereonet对地层倾角大于10°的古流向数据进行校正,校正后的数据用PC99软件生成古水流玫瑰花图。受研究区野外实际勘探情况影响,实测数据量较少,结合前人的古水流数据绘制玫瑰花图。

3.2 样品测试结果

3.2.1 岩屑组合与古水流

挑选具有代表性的样品生成岩屑体积分数饼状图,在平面图上可见有明显的分布规律

(图5-A、C、E)。根据岩屑平均体积分数的差异,将须一段和须二段划分出2个岩屑组合区域,I区(北部)和II区(西部)。须三段和须四段划分出3个岩屑组合区域,I区(北部)、II区(西部)和III区(东部)(表2、图5-A、C、E)。

研究区须一段和须二段7个野外露头 and 19个钻井岩心样品分析表明:I区位于剑阁—元坝地区,碳酸盐岩岩屑占绝对优势,岩屑组成为碳酸盐岩(体积分数为54.18%)、其他沉积岩(体积分数为25.07%)、变质岩(体积分数为20.74%);II区位于剑阁以南,其他沉积岩岩屑占优势,岩屑组成为其他沉积岩(体积分数为73.32%)、变质岩(体积分数为16.94%)、火成岩(体积分数为8.83%)(表2、图6、图5-A)。

须三段6个野外露头 and 28个钻井岩心样品分析表明,I区范围向南扩大至梓潼—盐亭地区,为碳酸盐岩(体积分数为44.91%)、其他沉积岩(体积分数为34.84%)、变质岩(体积分数为9.36%);II区范围缩小至江油—梓潼—中江地区以西一带,岩屑组成为其他沉积岩(体积分数为71.95%)、变质岩(体积分数为13.73%)、碳酸盐岩(体积分数为13.55%);III区为阆中—三台—射洪以东地区,变质岩岩屑为主,岩屑组成为变质岩(体积分数为67.61%)、其他沉积岩(体积分数为17.60%)、火成岩(体积分数为9.34%)(表2、图6、图5-C)。

须四段4个野外露头 and 37个钻井岩心样品的研究表明,I区向西南方向扩大至绵阳地区,岩屑组成为碳酸盐岩(体积分数为95.25%)、其他沉积岩(体积分数为56.25%)、变质岩(体积分数为47.29%);II区向西缩小至绵阳—中江地区,岩屑组成为其他沉积岩(体积分数为65.84%)、变质岩(体积分数为21.48%);III区变质岩岩屑为主,岩屑组成为变质岩(体积分数为45.80%)、火成岩(体积分数为20.69%)、其他沉积岩(体积分数为20.68%)(表2、图6、图5-E)。

须一段至须二段5个野外露头测量得到的古水流数据表明,研究区整体古流向为自北向南,沉积物主要来自盆地北部。II区德阳与中江地区存在北西至南东方向的古水流流向(图5-A),可以观察到不对称的流水波痕、舌状槽模等沉积构造。而在三台地区部分古水流流向为北东至南西方向(图5-A),推测来自东部物源区。须三

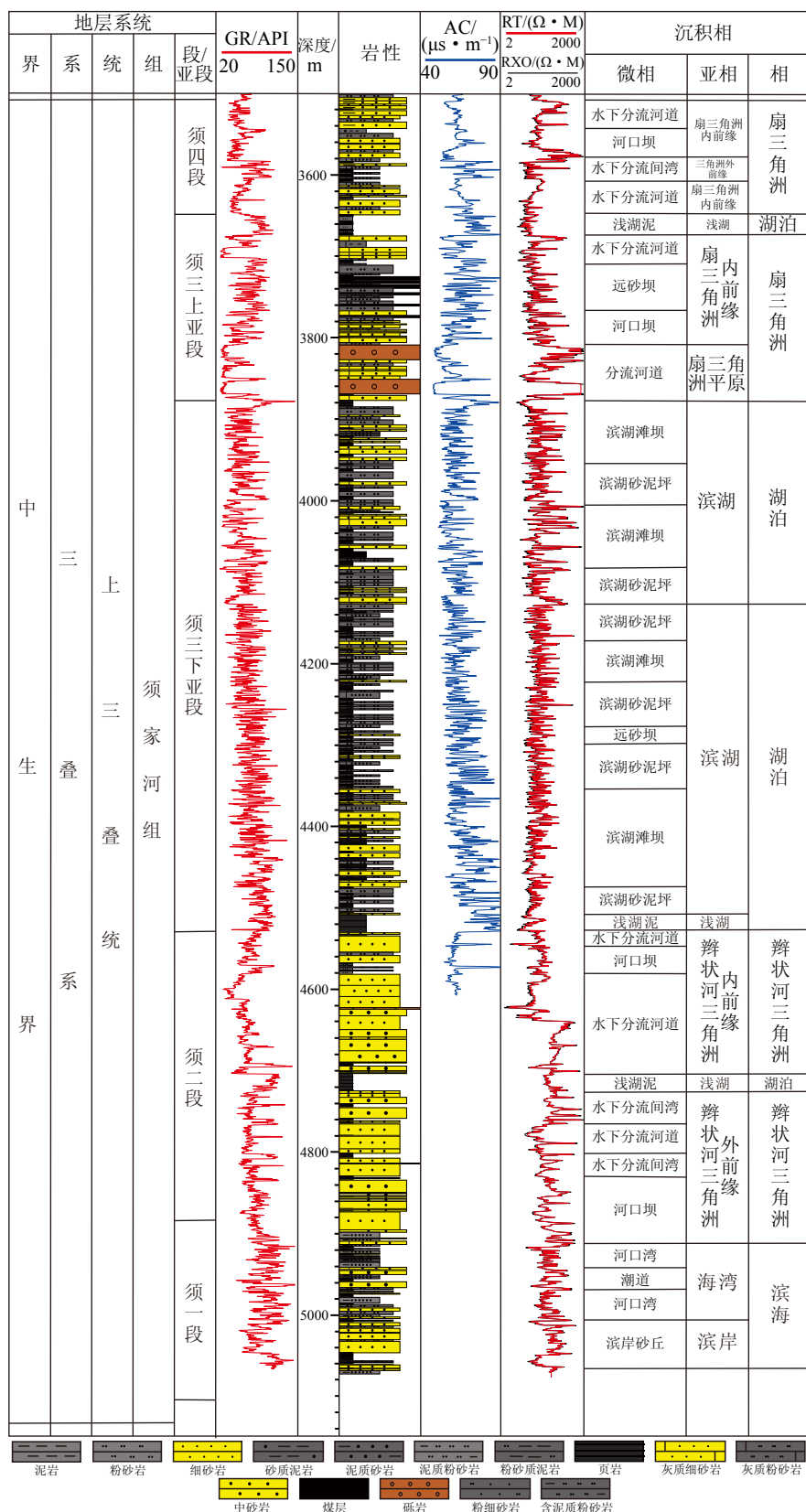


Fig. 3 Sedimentary microfacies comprehensive column chart of the Well WT1 of the first to fourth members of the Xujiahe Formation in the northwest Sichuan Basin

注: RT.地层真电阻率; RXO.冲洗带地层电阻率。

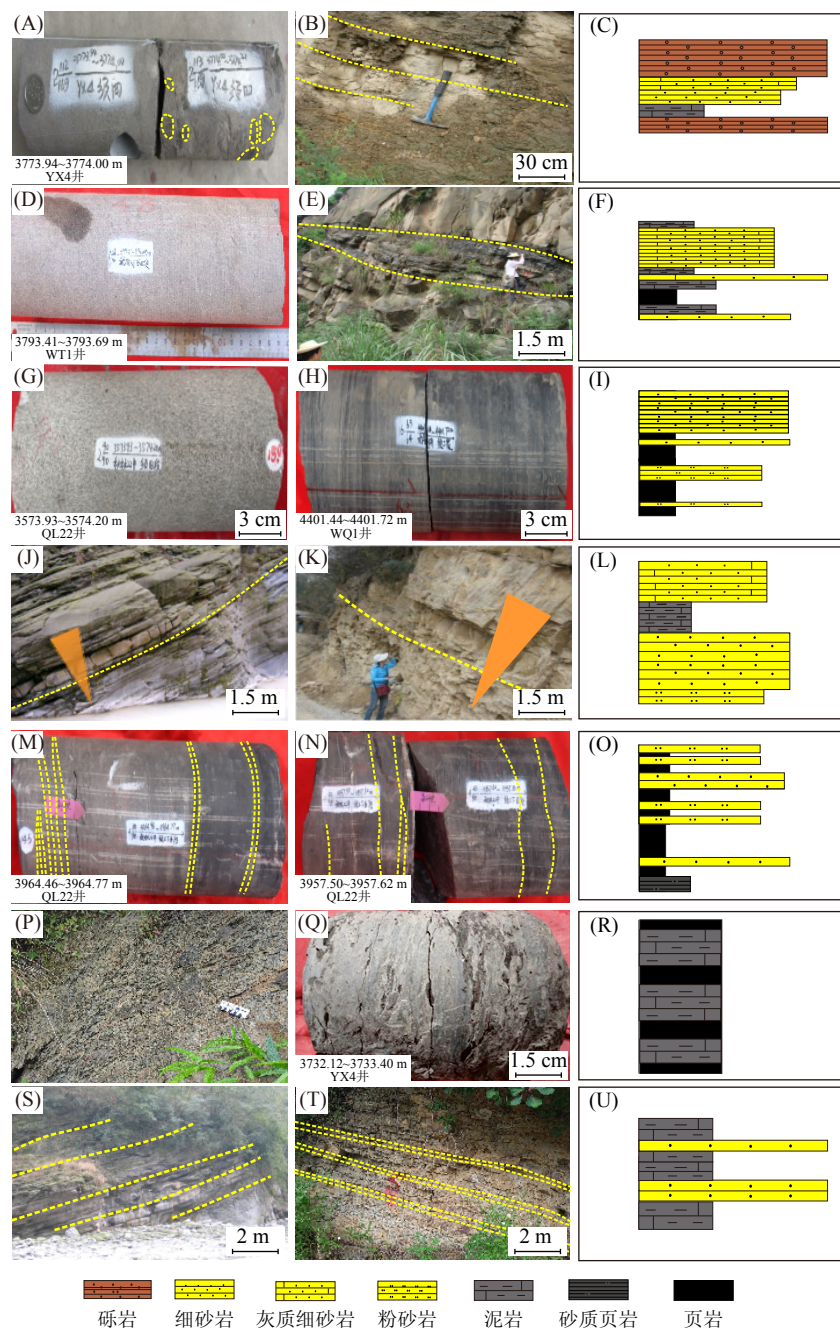


图4 川西北须家河组沉积特征图

Fig. 4 Sedimentary characteristics diagram of the Xujiahe Formation in the northwest Sichuan Basin

(A)粗砂岩含砾石,平行层理,正粒序,扇三角洲平原分流河道沉积微相;(B)泥岩、灰质细砂岩,扇三角洲平原分流河道间沉积微相,工农镇剖面;(C)图4-A、B的岩相组合综合柱状图;(D)灰色细-中砂岩,扇三角洲前缘水下分流河道沉积微相;(E)泥岩和页岩,槽状交错层理,扇三角洲前缘水下分流河道沉积微相,工农镇剖面;(F)图4-D、E的岩相组合综合柱状图;(G)细砂岩和中砂岩,辫状河三角洲前缘水下分流河道沉积微相;(H)页岩和碳质页岩,辫状河三角洲前缘水下分流间湾沉积微相;(I)图4-G、H的岩相组合综合柱状图;(J)细砂岩和粉砂岩,河口坝沉积微相,什邡金河剖面;(K)灰质细砂岩,远砂坝沉积微相,须家河剖面;(L)图4-J、K的岩相组合综合柱状图;(M)细砂岩、粉砂岩和砂泥互层,滨湖滩坝沉积微相;(N)细砂岩、页岩和碳质页岩,滨湖砂泥坪沉积微相;(O)图4-M、N的岩相组合综合柱状图;(P)泥页岩,宝轮镇剖面;(Q)页岩和泥岩,浅湖泥沉积微相;(R)图4-P、Q的岩相组合综合柱状图;(S)中层砂岩与薄层泥岩互层,低角度冲洗交错层理,滨岸相沉积,什邡金河剖面;(T)砂泥互层,滨岸相沉积,工农镇剖面;

(U)图4-S、T的岩相组合综合柱状图

表 2 四川盆地西北部须家河组岩屑组合统计表

Table 2 Statistical table of the lithic debris assemblage of the Xujiache Formation in the northwest Sichuan Basin

地层	分区		
	I 区	II 区	III 区
须四段 (N=37)	极高碳酸盐岩-低沉积岩-极低变质岩	高沉积岩-中变质岩-无碳酸盐岩	高变质岩-低火成岩-极低沉积岩
须三段 (N=28)	极高碳酸盐岩-中沉积岩-低变质岩	高沉积岩-中变质岩-极低火成岩	高变质岩-低沉积岩-极低火成岩
须一段~须二段 (N=19)	高碳酸岩-中变质岩-低沉积岩	高沉积岩-中变质岩-低火成岩	—

段 12 个野外露头测量得到的古水流整体流向为自北向南,推测物源来自北部物源区。III 区射洪地区测得古水流流向为南东至北西方向,受东部物源体系的影响(图 5-C)。须四段 4 个野外露头测得古水流结果表明,II 区德阳地区存在北西至南东方向古水流流向,受西部物源体系的影响,III 区盐亭、射洪和南充地区古水流流向为北东-南西向(图 5-E)。

3.2.2 重矿物

对研究区须家河组的砂岩样品进行重矿物含量统计分析,主要统计 9 种重矿物的体积分数,根据主要重矿物的类型、平均体积分数,划分出重矿物组合的分区图(附表 1、图 5-B、D、F)。

须一段和须二段 7 个野外露头 and 10 个钻井岩心样品分析结果表明,划分出 2 个重矿物组合分区, I 区(北部)重矿物组合为白钛石(体积分数为 42.65%)、锆石(体积分数为 16.24%)、电气石(体积分数为 11.97%)、磁铁矿(体积分数为 11.90%), 平均重矿物成熟度(ZTR)指数为 49%; II 区(西部)重矿物组合为锆石-电气石-锐钛矿-白钛石为主,非稳定重矿物绿帘石体积分数为 0.6%, 平均 ZTR 指数为 79%(附表 1、图 5-B)。

须三段 6 个野外露头 and 19 个钻井岩心样品分析结果表明: I 区(北部)重矿物组合为白钛石(体积分数为 40.86%)、锆石(体积分数为 20.36%)、金红石(体积分数为 13.80%), 非稳定重矿物绿帘石体积分数为 1%, 平均 ZTR 指数为 44%; II 区(西部)重矿物组合为锆石(体积分数为 53.43%)、电气石(体积分数为 21.66%)、金红石(体积分数为 10.17%), 非稳定重矿物占比较少,绿帘石体积分数为 0.2%, 榍石体积分数为 0.2%, 平均 ZTR 指数为 83%; III 区(东部)重矿物组合为白钛石(体

积分数为 38.96%)、锆石(体积分数为 22.70%)、电气石(体积分数为 8.21%), 绿帘石体积分数约为 1.3%, 平均 ZTR 指数为 62%(附表 1、图 5-D)。

须四段 4 个野外露头 and 14 个钻井岩心样品分析结果表明: I 区(北部)重矿物组合为锆石(体积分数为 29.33%)、磁铁矿(体积分数为 29.16%)、白钛石(体积分数为 17.60%)、电气石(体积分数为 10.25%), 稳定重矿物含量高, 矿物成熟度高; II 区(西部)重矿物组合为锆石(体积分数为 52.66%)、电气石(体积分数为 22.40%)、石榴石(体积分数为 7.09%)、金红石(体积分数为 6.82%), 平均 ZTR 指数为 77%, 绿帘石体积分数为 0.8%, 榍石体积分数为 0.2%; III 区(东部)重矿物组合为锆石(体积分数为 45.64%)、白钛石(体积分数为 25.61%)、电气石(体积分数为 15.17%), 平均 ZTR 指数为 75%, 绿帘石体积分数为 1.7%, 榍石体积分数为 0.3%(附表 1、图 5-F)。

I 区须一段~须四段重矿物组合特征以锆石和白钛石稳定重矿物为主,相较于 II 区和 III 区 ZTR 指数较低,约 52%; II 区须一段~须四段锆石占比最高,次之为电气石,存在区别于其他区域的锐钛矿,非稳定重矿物占比增大,平均 ZTR 指数约 80%; III 区须三段~须四段重矿物组合无明显变化,以锆石、白钛石和电气石为主,平均 ZTR 指数约 69%。

4 沉积充填过程

4.1 沉积相演化

川西北地区须一段时期为海相沉积环境,中西部分布点状滩坝砂体,东侧发育带状滨岸沉积(图 7-A、图 8、图 9)。须二段时期为海陆过渡相沉积环境,西北侧辫状河三角洲前缘向东南方向

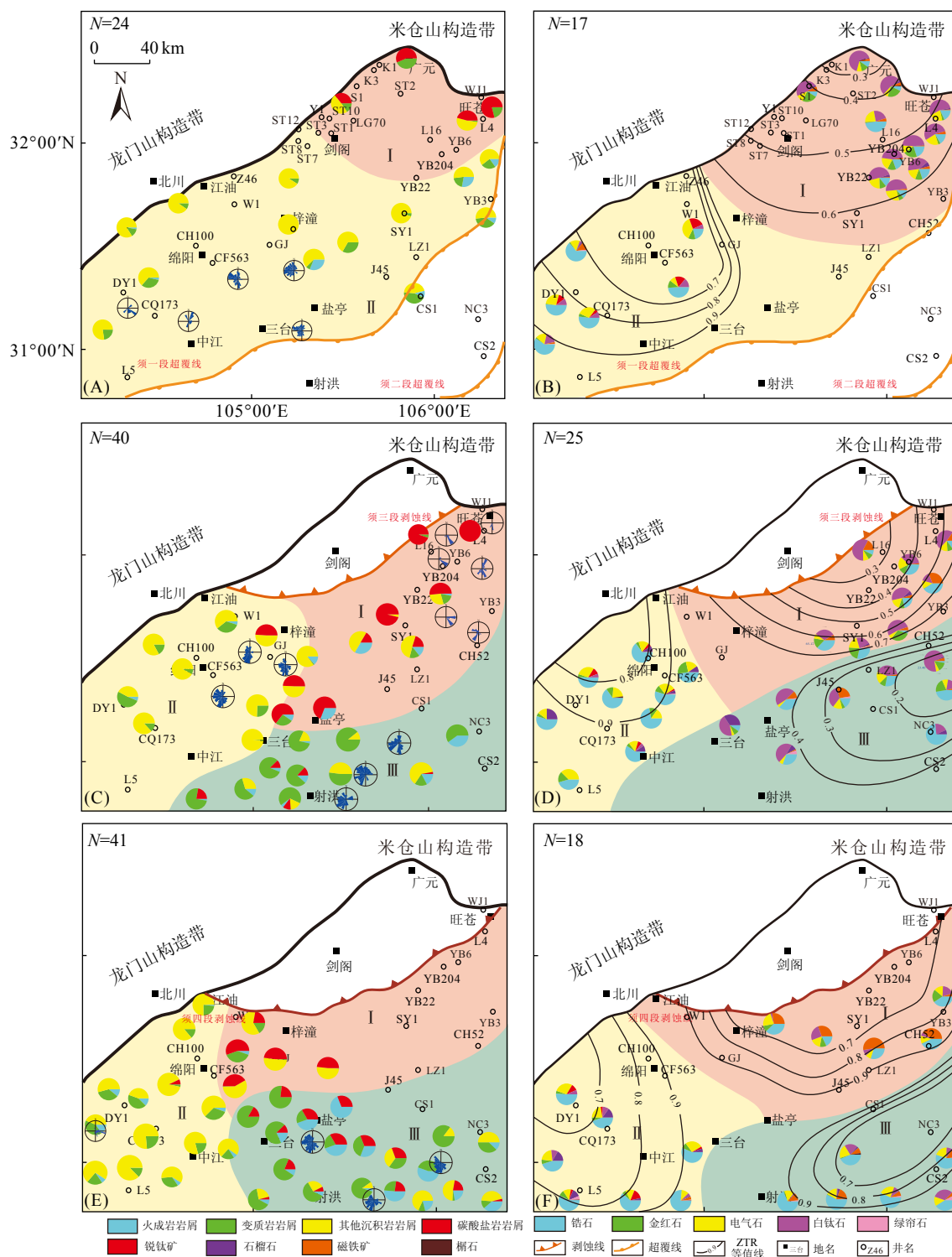


Fig. 5 Paleocurrent, lithic fragment assemblage, and heavy mineral distribution maps of the Xujiahe Formation in the northwest Sichuan Basin

(A) 须一段~须二段古水流与岩屑组合图; (B) 须一段~须二段重矿物分布图; (C) 须三段古水流与岩屑组合图;

(D) 须三段重矿物分布图; (E) 须四段古水流与岩屑组合图; (F) 须四段重矿物分布图

注: I 区, 北部; II 区, 西部; III 区, 东部。

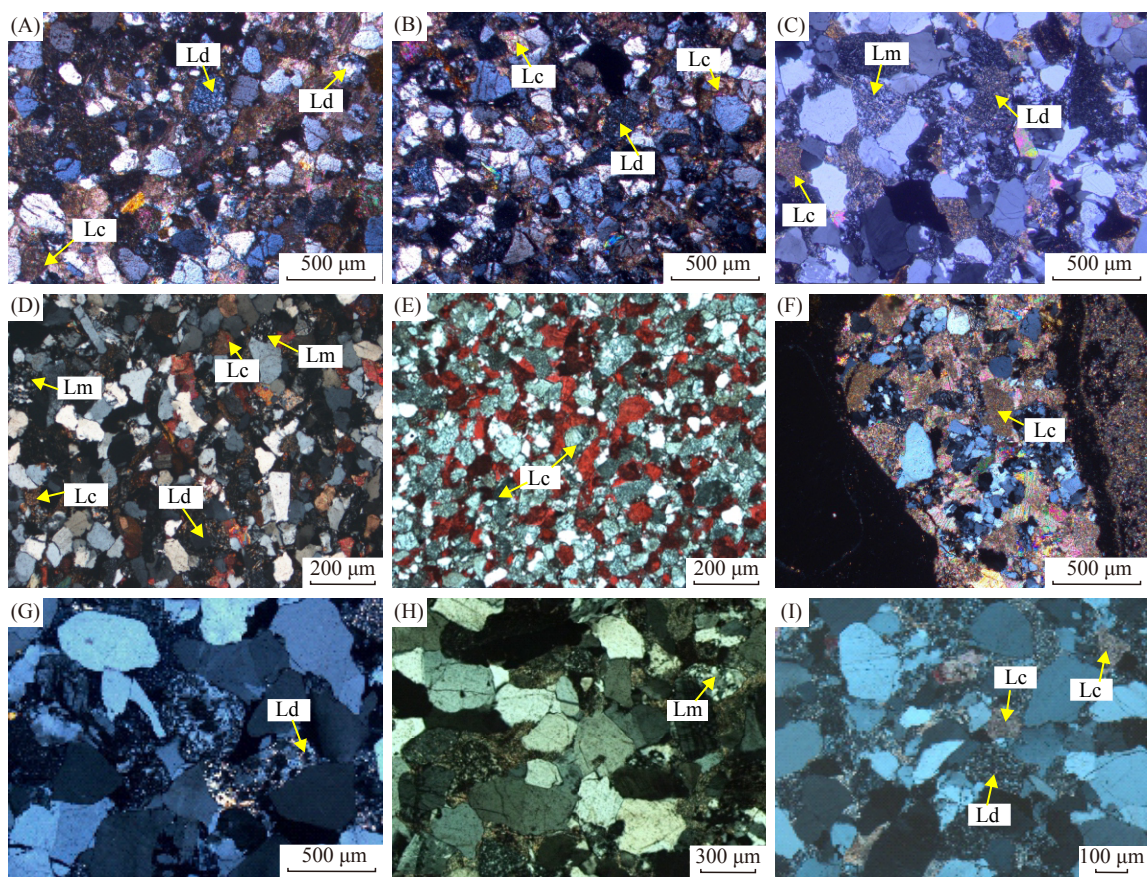


图 6 川西北地区须一段~须四段砂岩碎屑组分镜下特征

Fig. 6 Microscopic characteristics of detrital components of the first to fourth members of the Xujiahe Formation in the northwest Sichuan Basin

(A)中粒岩屑砂岩, 马鞍塘剖面, 见碎屑岩岩屑、碳酸盐岩岩屑和变质岩岩屑, $\times 20$, (+); (B)细粒岩屑砂岩, 汉旺剖面, 见碎屑岩岩屑和碳酸盐岩岩屑, $\times 20$, (+); (C)中粒岩屑砂岩, G6井, 深度4 282.53 m, 见碳酸盐岩岩屑、碎屑岩岩屑和变质岩岩屑; (D)中-细粒长石岩屑砂岩, G5井, 深度3 766.31 m, 见碳酸盐岩岩屑、变质岩岩屑和碎屑岩岩屑; (E)中-细粒钙屑砂岩, QL22井, 见碳酸盐岩岩屑; (F)中、细粒含钙屑岩屑砂岩, WT1井, 深度3 745.84 m, 见大量碳酸盐岩岩屑, $\times 40$, (+); (G)粗粒岩屑石英砂岩, QL22井, 深度3 553.59 m, 见碎屑岩岩屑; (H)中粒岩屑砂岩, Q1井, 深度3 267.46 m, 见变质岩岩屑, $\times 20$, (+); (I)细-中粒岩屑砂岩, W4井, 深度3 535.58 m, 见碳酸盐岩岩屑和碎屑岩岩屑

注: Lm.变质岩岩屑; Ld.碎屑岩岩屑; Lc.碳酸岩岩屑。

推进, 东南部发育水体较浅的滨湖相沉积, 分布点状滩坝(图 7-B、图 8、图 9)。

须三段时期川西北地区逐渐进入陆相沉积环境为主的演化期, 主要为三角洲沉积体系, 自北向南表现为由海相三角洲砂体沉积向滩坝砂体沉积过渡的特征(图 8、图 9)。须三下亚段北部冲积扇直接入湖形成扇三角洲平原与前缘砂体沉积, 向南逐渐演变为辫状河三角洲前缘沉积体系, 湖域范围向南部扩大, 以浅湖泥相为主(图 7-C、图 8、图 9)。须三上亚段北部以持续向南西方向推进的扇三角洲沉积砂体为主, 向南发育滨湖滩坝砂体(图 7-D、图 8、图 9)。

须四段沉积时期完全进入陆相沉积环境, 东南部辫状河三角洲沉积规模迅速增大, 与西北部扇三角洲在川中汇合。该时期由于水体变浅, 湖泊沉积范围缩小, 西南侧发育面积较小的滨湖相(图 7-E、图 8、图 9)。

4.2 物质分布规律

须一段至须二段, 无砾岩发育, 近龙门山冲断带堆积细粒沉积物, 泥岩厚度自西向东逐渐减薄, 须二段沉积中心范围为剑阁—梓潼—三台地区以西, 相较于须一段略有缩小, 沉积中心向西迁移至江油—安县—绵阳一带(图 10-A、B)。

须三段龙门山北段前缘出现厚层砾岩且分

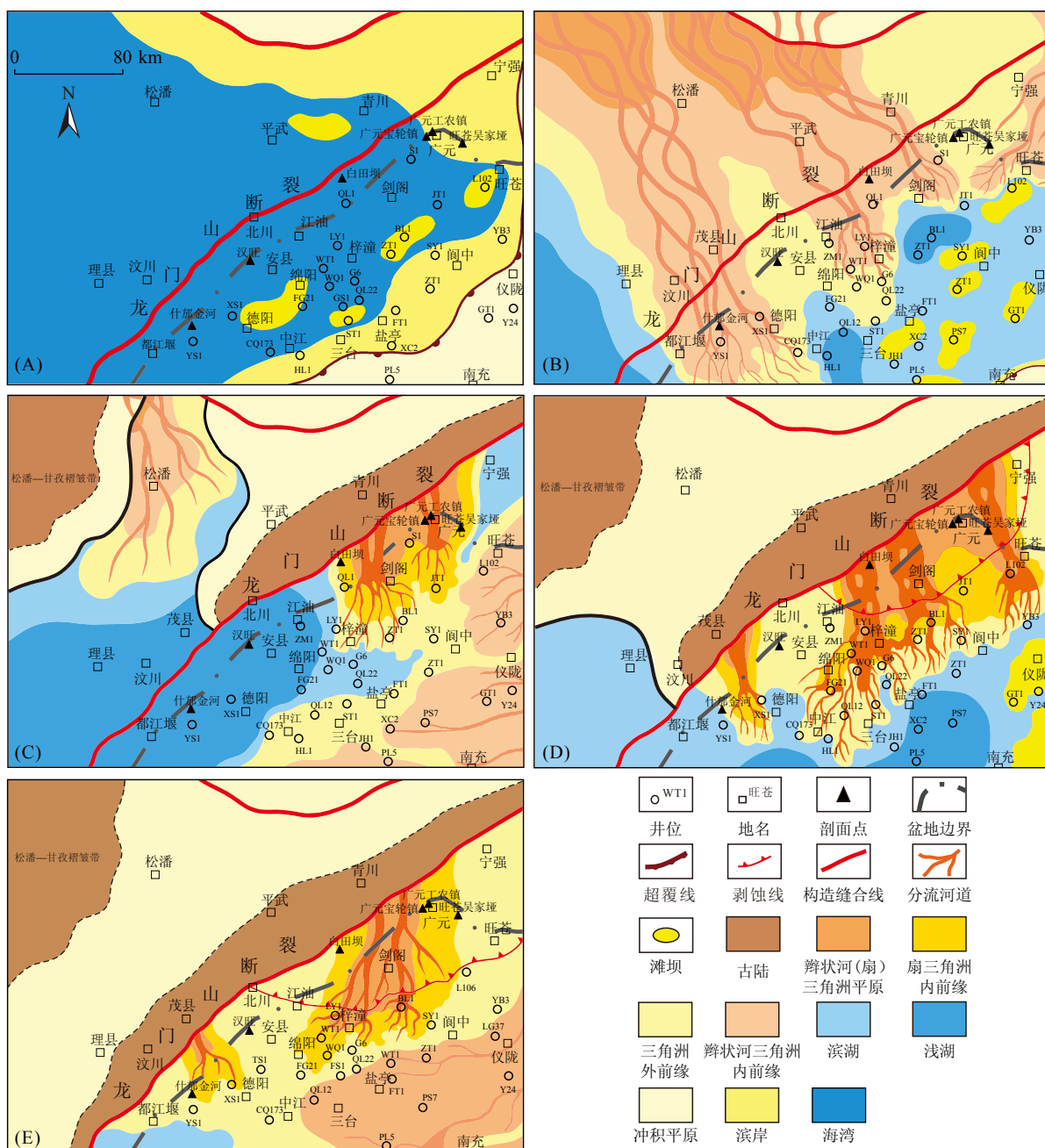


图7 川西北地区须一段~须四段沉积相图

Fig. 7 Sedimentary facies maps of the first to fourth members of the Xujiache Formation in the northwest Sichuan Basin

(A)须一段沉积相图;(B)须二段沉积相图;(C)须三下亚段沉积相图;(D)须三上亚段沉积相图;(E)须四段沉积相图

布范围较广。须三下亚段至须三上亚段时期砾岩逐渐变厚且分布范围向西南方向扩展至龙门山中段地区。沉积范围向西逐渐缩小,沉积中心迁移至西南部的德阳和绵阳等地(图10-C、D)。

须四段厚层砾岩的分布继续向南扩展。研究区砾岩发育面积比须三下亚段稍减,表现出平缓较稳定的供源特征。沉积中心迁移至安县以南、绵阳以西区域。粗粒碎屑岩和沉积中心分

布于米仓山和西侧龙门山前缘(图10-E)。

5 物源分析与盆-山耦合过程讨论

5.1 物源区综合分析

川西北地区须一段至须二段沉积时期,沉积中心主要位于龙门山冲断带前缘,德阳与中江地区古水流向为南东向,推测受西部物源体系影响。I区岩屑类型以碳酸盐岩岩屑为主,指示龙

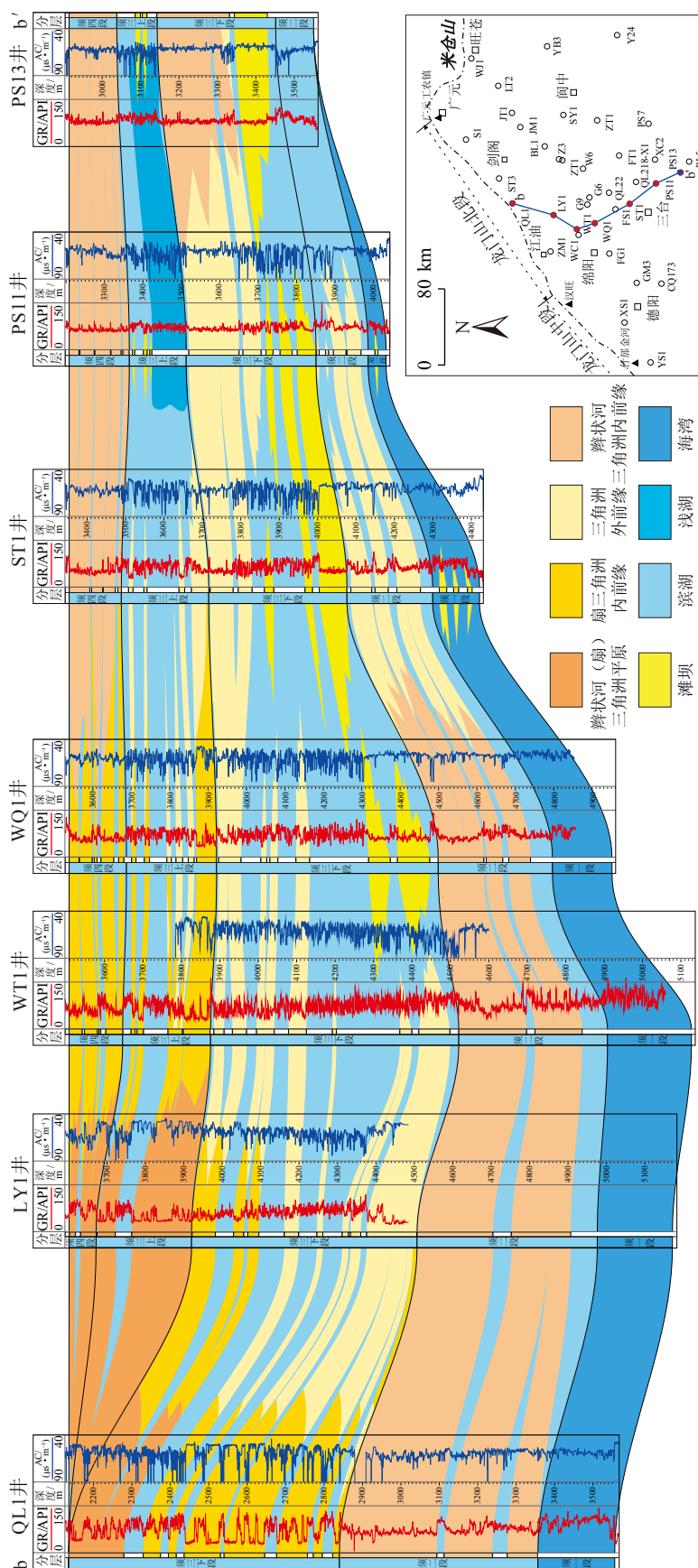


图 8 川西北须一段~须四段南北向沉积相对比图

Fig. 8 North-south sedimentary relative comparison map of the first to fourth members of the Xujiache Formation in the northwestern Sichuan Basin

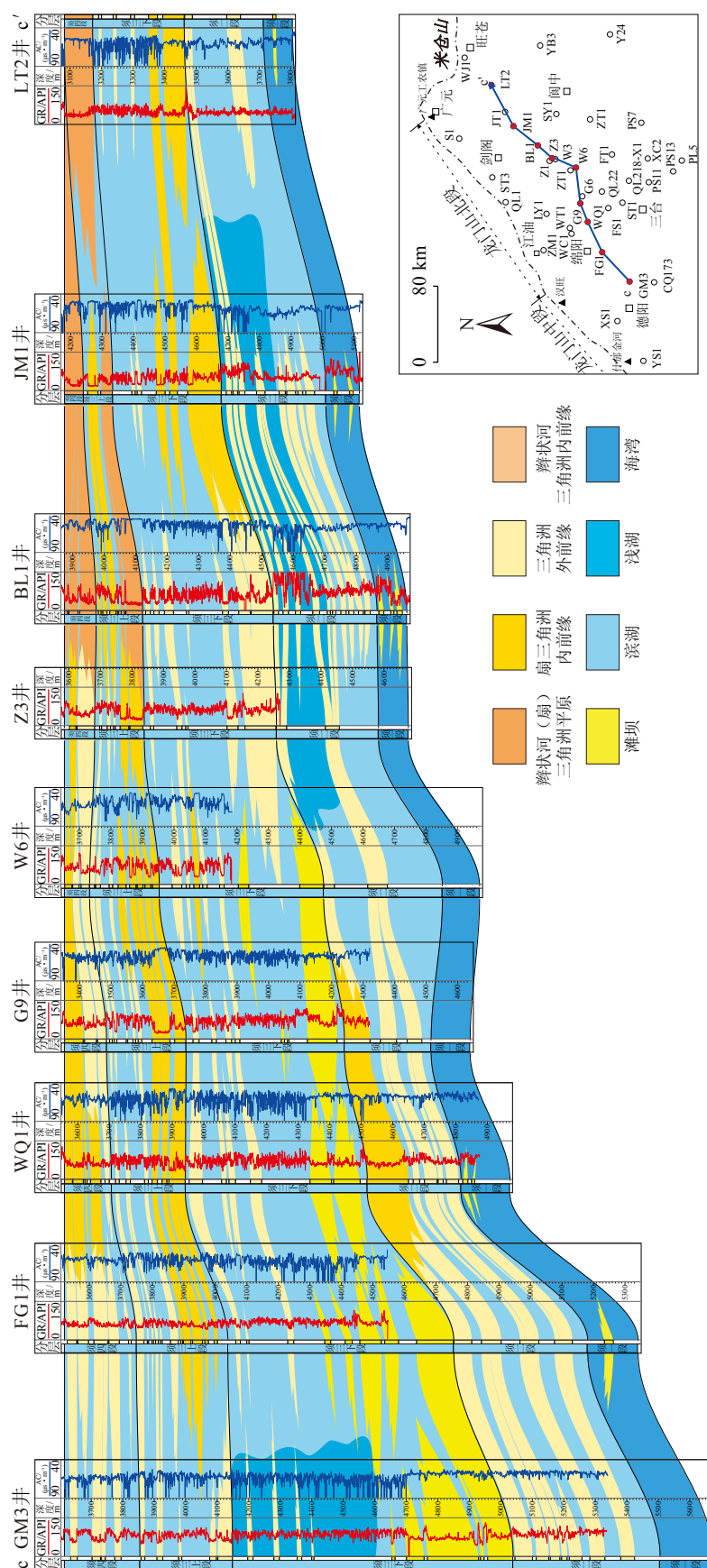


图 9 川西北地区须一段~须四段东西向砂体连井图

门山北段古生界海相碳酸盐岩地层受到剥蚀、搬运至盆内沉积(图 5-A)。Ⅱ区岩屑主要以其他沉积岩岩屑为主,其次为变质岩岩屑和岩浆岩岩屑(图 5-A),地层中重矿物以锆石和金红石为主,非稳定重矿物石榴子石含量自西向东减小,ZTR 值较高(图 5-B),反映除龙门山以外存在其他相对远源的物源区。前人的须家河组碎屑锆石 U-Pb 年龄研究表明,研究区北缘的广元、旺苍剖面砂岩样品具有与松潘—甘孜褶皱带三叠系浊积岩相似的年龄峰值:300~200 Ma, 500~400 Ma, 850~650 Ma, 1 950~1 750 Ma 和 2 600~2 400 Ma (Weislogel et al., 2010; 李祥辉等, 2016; 刘祥等, 2021), 指示大量的非碳酸盐碎屑物质来源于松潘—甘孜褶皱带碎屑岩的再旋回沉积。此外,研究区存在北东—南西方向古水流流向,反映受北部物源区影响。研究区的变质岩岩屑可能与南秦岭变质岩区具有亲缘性(Wang et al., 2013; 周玉等, 2022)(图 5-A、B), 因此南秦岭造山带也为研究区的须家河组提供了碎屑物质。综上,须一段至须二段沉积时期,西部的龙门山断裂带、松潘—甘孜褶皱带为主要物源区,北部的南秦岭为次要物源区。

须三段沉积时期,古水流分析结果显示受北部物源区影响,且碳酸盐岩和沉积岩岩屑含量持续增多(图 5-C)。碳酸盐岩碎屑组分是龙门山物源的基本特征,磷灰石裂变径迹年龄沿龙门山走向具有自北西向南东减小的趋势,热史模拟结果表明北段隆升剥露的启动时间要早于中段(李智武等, 2010; Yan et al., 2018; 沈桐等, 2021; 金文正等, 2023), 因此须三段沉积时期,龙门山北段仍为研究区 I 区的主要物源区。Ⅱ区沉积岩岩屑含量较须一段~须二段有所减少(图 5-A、C), ZTR 指数自北西向南东增加(图 5-D), 而松潘—甘孜褶皱带覆盖有巨厚的三叠系浊积岩,能为研究区Ⅱ区提供大量非碳酸盐岩岩屑,松潘—甘孜褶皱带应为Ⅱ区的主要物源。米仓山发育的基底火成岩、侵入岩等,可能为 I-Ⅱ区提供变质岩、火山岩岩屑,作为研究区 I-Ⅱ区的次要物源。Ⅲ区古水流流向主要为北东—南西方向,变质岩岩屑含量最高,并且含火成岩岩屑(图 5-C),与南秦岭广泛发育的变质岩、火成岩直接相关(杨经绥等, 2009)。Ⅲ区的分布范围与米仓山—大巴山毗邻,其主要物源区应为包括米仓山—大巴山在内的南秦岭中东部地区。

须四段沉积时期,由于印支运动晚幕的影响,研究区周缘造山带抬升剥蚀形成充足的多物源供给。I 区碳酸盐岩岩屑仍然占绝对优势,其他沉积岩岩屑含量稍高于须三段,Ⅱ区仍主要为其他沉积岩和变质岩岩屑,含少量碳酸盐岩岩屑(图 5-E),古水流整体流向主要为自北西向东南方向,指示物源主要来自龙门山冲断带和松潘—甘孜褶皱带。Ⅲ区古水流流向存在北东—南西向,岩屑组合主要以变质岩岩屑为主,火成岩岩屑相对较高,重矿物以锆石—白钛石—电气石组合为主,含不稳定重矿物绿帘石和榍石,表明为近源沉积,ZTR 值自北东向南西方向增大(图 5-E、F),推测物源仍来自于米仓山源区和南秦岭变质杂岩带。同时大巴山部分裂变径迹年龄指示其发生一定程度的构造抬升剥蚀(张艳妮等, 2014; 付建晔, 2016; 李双建等, 2018), 因此米仓山—大巴山造山带仍为Ⅲ区的主要物源。

5.2 盆—山耦合过程

松潘—甘孜地块与扬子板块间的碰撞造成龙门山冲断带的强烈隆升。磷灰石裂变径迹表明须一段至须二段时期龙门山北段剥蚀速率提高,处于快速隆升阶段,但构造变形和抬升剥蚀作用有限,中段仍处于水下(刘树根等, 2011; 刘君龙等, 2015)。龙门山冲断带与松潘—甘孜褶皱带组成西部物源区,为研究区提供大量碎屑沉积物,供给向东部推进的辫状河三角洲(图 11-A)。须三下亚段时期龙门山北段发生强烈隆升,导致山前地形坡度变陡,发育近源扇三角洲朵体,山前分布大面积粗粒碎屑岩沉积(图 11-B)。须三上亚段沉积时期,龙门山中段隆升出水面开始供源,继承性发育源自龙门山冲断带的大型近源扇三角洲沉积,且向盆内大幅推进(图 11-C)。须四段沉积时期,随着构造活动的进一步增强,龙门山全面抬升出水,形成逆冲推覆体褶皱成山并提供稳定物源,以龙门山为物源的三角洲沉积规模略有缩小(图 11-D)。

须家河组沉积时期,川西北地区物源变化的主要特征为由早期的西部物源区为主体(须一段至须二段)转变为中晚期的西部、北部物源区联合供砂(须三段至须四段)。随着华南地块持续向北与华北板块碰撞,南秦岭的逐渐抬升剥蚀(张国伟等, 2013), 为研究区须三段~须四段提供丰富的碎屑沉积物,成为主要物源区。须一段~

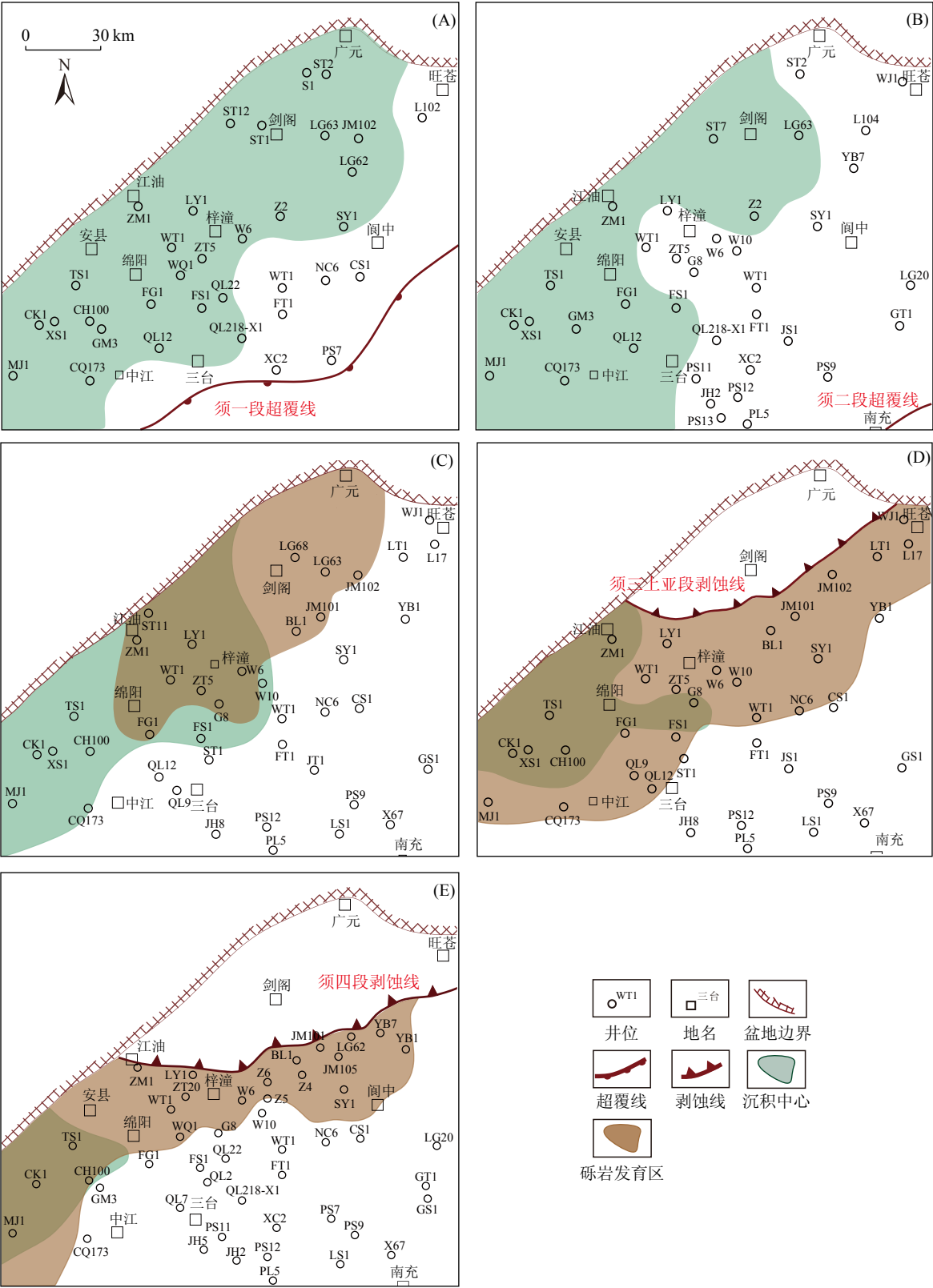


图 10 川西北地区须家河组物源供给中心与沉积中心演变图

Fig. 10 Temporal evolution map of the provenance supply center and depositional center of the Xujiache Formation, northwestern Sichuan Basin

(A) 须一段沉积中心图; (B) 须二段沉积中心图; (C) 须三下亚段砾岩发育区与沉积中心叠合图; (D) 须三上亚段砾岩发育区与沉积中心叠合图; (E) 须四段砾岩发育区与沉积中心叠合图

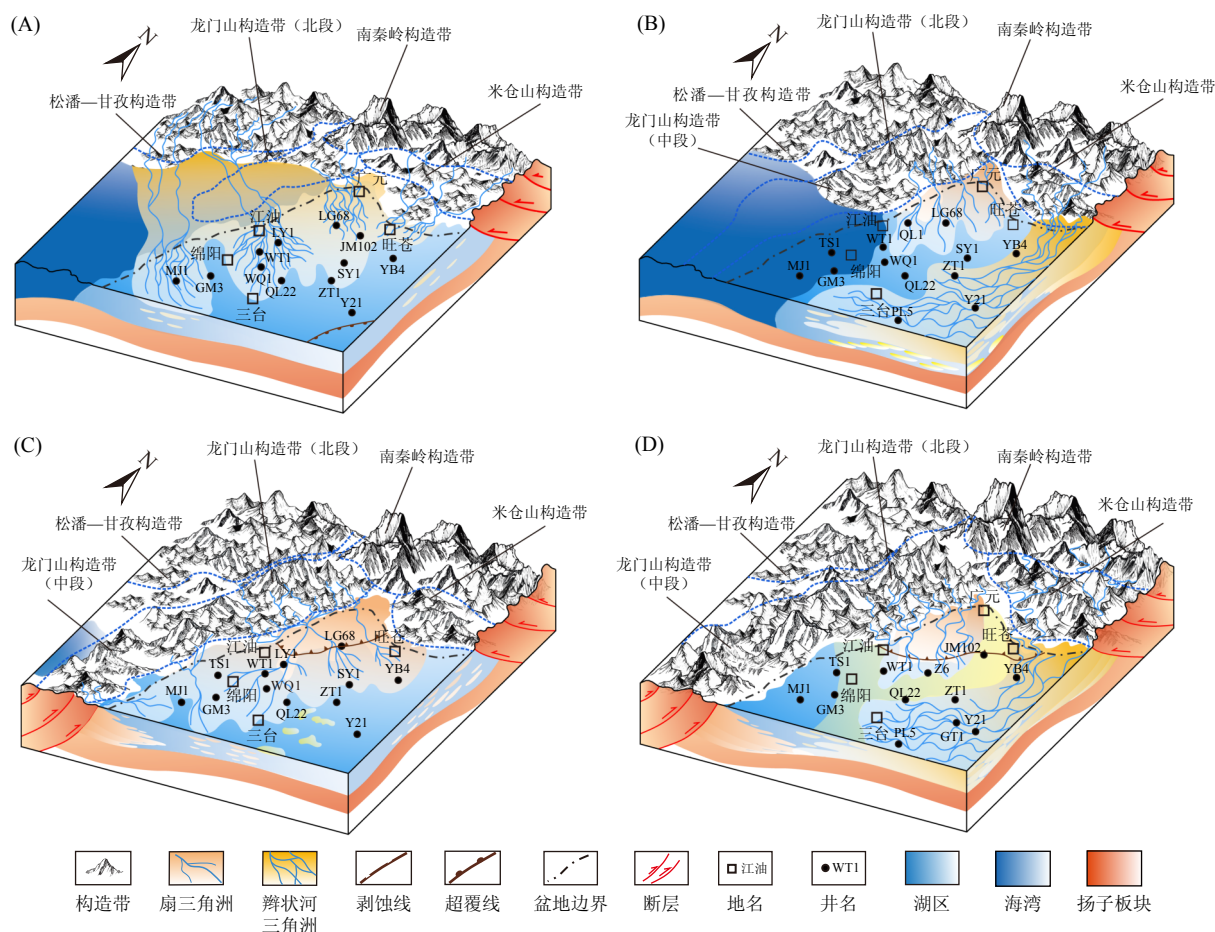


图 11 川西北地区须家河组沉积模式图

Fig. 11 Depositional model of the Xujiache Formation, northwestern Sichuan Basin

(A) 须一段~须二段沉积模式图; (B) 须三下亚段沉积模式图; (C) 须三上亚段沉积模式图; (D) 须四段沉积模式图

须二段沉积时期, 米仓山尚处于低幅稳定隆升状态, 大巴山前陆盆地的前隆表现不明显(何登发等, 2011)。南秦岭供给远源向南推进的海陆过渡相辫状河三角洲(图 11-A)。随着米仓山一大巴山逆冲推覆山链自北向南朝扬子地块推进(陈洪德等, 2011), 南秦岭构造带持续隆升。热年代学研究表明, 须家河组沉积时期, 米仓山发生构造抬升剥蚀(张艳妮等, 2014)。须三下亚段沉积时期米仓山前缘发育的辫状河三角洲自北东至南西方向进积(图 11-B)。须三上亚段沉积时期, 同时受到西部物源区影响(图 11-C)。须四段沉积时期, 米仓山一大巴山构造活动趋于活跃, 东北部发育源自米仓山的规模较大的辫状河三角洲扇体(图 11-D)。

6 结论

本文对川西北地区须家河组源-汇系统在物

源体系、沉积充填体系与物质分布、盆-山耦合过程等的系统分析, 取得以下几方面认识。

(1) 川西北地区须一段至须二段沉积时期, 西侧的龙门山冲断带与松潘-甘孜褶皱带为主要物源, 北侧的南秦岭为次要物源; 须三段沉积时期, 龙门山北中段相继发生强烈隆升且提供大量碎屑沉积物, 北部米仓山开始成为研究区东部地区的主要物源。须四段沉积时期, 研究区西部主要物源仍为龙门山冲断带与松潘-甘孜褶皱带, 包括米仓山一大巴山在内的南秦岭为研究区东部提供主要物源。

(2) 川西北地区须一段主要为海湾沉积环境, 发育滨岸和滩坝。须二段至须四段发育扇三角洲、辫状河三角洲和湖泊沉积体系。川西北早期为辫状河三角洲, 之后转换为扇三角洲, 后期辫状河三角洲规模逐渐扩大。龙门山由北向南的隆升控制了厚层砾岩与泥岩的南迁, 粗粒堆

积中心与细粒沉积中心相邻发育于西部,表现为湖泊-三角洲砂体频繁交互叠置发育。

(3)四川盆地晚三叠世为周缘多物源供给的前陆盆地演化阶段,经历了由海相-海陆过渡相-陆相的转换,其隆升时序及供源强弱的差异,共同控制了四川盆地须家河期的盆-山耦合过程与古地理演化,龙门山和南秦岭主导了川西北须家河期的构造-沉积格局。

附加材料:附表由作者提供,数据真实性由作者负责,在线查看网址:<https://xbzrkx.cdut.edu.cn/article/doi/10.12474/cdlgzrkx.2024110801>。

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:闫心宇、刘磊、王小娟参与论文构思、数据分析、研究方法和论文写作;郑超、张蕊参与野外调查和采样;闫心宇、朱淑玥、赵菲、马贤成参与了资料收集和技术手段的实践应用和绘图。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

致谢:感谢成都理工大学沉积地质研究院王志伟博士、李丹硕士对本文的建议和帮助!感谢审稿专家对论文进行评审并提供宝贵修改意见和建议!

[参 考 文 献]

- 曹正林,邓宾,胡欣,等,2023.川西北缘晚三叠世源-汇体系构造年代学与沉积响应特征[J].天然气地球科学,34(11): 1871—1886.
- Cao Z L, Deng B, Hu X, et al., 2023. Tectonic chronology and sedimentary response characteristics of the Late Triassic source-sink system in the northwestern margin of Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 34(11): 1871—1886. (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 Sichuan depression[J]. Oil & Gas Geology, 42(4): 801—815. (in Chinese)
- 陈洪德,徐胜林,林良彪,等,2011.龙门山造山带晚三叠世构造隆升的分段性及层序充填响应[J].沉积学报,29(4): 622—630.
- Chen H D, Xu S L, Lin L B, et al., 2011. Segmental uplift of Longmenshan orogen and sequence filling characteristic of western Sichuan foreland-like basin, Late Triassic[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 29(4): 622—630. (in Chinese)
- 陈杨,刘树根,李智武,等,2011.川西前陆盆地晚三叠世早期物源与龙门山的有限隆升-碎屑锆石 U-Pb 年代学研究[J].大地构造与成矿学,35(2): 315—323.
- Chen Y, Liu S G, Li Z W, et al., 2011. LA-ICP-MS detrital zircon U-Pb geochronology approaches to the sediment provenance of the Western Sichuan foreland basin and limited uplift of the Longmen Mountains during the early stage of Late Triassic[J]. Geotectonica et Metallogenia, 35(2): 315—323. (in Chinese)
- 戴朝成,郑荣才,任军平,等,2014.四川前陆盆地上三叠统须家河组物源区分析及其地质意义[J].吉林大学学报(地球科学版),44(4): 1085—1096.
- Dai C C, Zheng R C, Ren J P, et al., 2014. Provenance analysis of Xujiahe Formation of Upper Triassic in Sichuan foreland basin and its geology implications[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 44(4): 1085—1096. (in Chinese)
- 谈永,林良彪,钟怡江,等,2013.米仓山一大巴山前缘上三叠统须家河组四段砾岩特征及其对物源的指示[J].地质论评,59(1): 15—23.
- Dan Y, Lin L B, Zhong Y J, et al., 2013. The conglomerate composition of the Fourth Member of Xujiahe Formation, Upper Triassic, in the front of Micang-Daba Mountains, Sichuan, China: implication for provenance analysis[J]. Geological Review, 59(1): 15—23. (in Chinese)
- 邓飞,贾东,罗良,等,2008.晚三叠世松潘甘孜和川西前陆盆地的物源对比:构造演化和古地理变迁的线索[J].地质论评,54(4): 561—573.
- Deng F, Jia D, Luo L, et al., 2008. The contrast between provenances of Songpan-Garze and western Sichuan foreland basin in the Late Triassic: clues to the tectonics and palaeogeography[J]. Geological Review, 54(4): 561—573. (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 Longmenshan structural belt[J]. Oil & Gas Geology, 28(4): 485—490. (in Chinese)
- 付建晔,2016.大巴山-龙门山地区晚古生代-中生代盆地演

- 化及构造意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- Fu J Y, 2016. Late Paleozoic–Mesozoic basin evolution in the Longmenshan–Dabashan region and its tectonic implications[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese)
- 郭旭升, 2010. 川西地区中、晚三叠世岩相古地理演化及勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 31(5): 610–619.
- Guo X S, 2010. Litho-paleogeographic evolution in the Middle–Late Triassic in western Sichuan Province and its significance for petroleum exploration[J]. Oil & Gas Geology, 31(5): 610–619. (in Chinese)
- 魏中仁, 2021. 四川盆地晚三叠世至中侏罗世层序地层特征研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东).
- Guo Z R, 2021. Sequence stratigraphic characteristics from the Late Triassic through the Middle Jurassic in the Sichuan Basin[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China). (in Chinese)
- 何登发, 李德生, 张国伟, 等, 2011. 四川多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. 地质科学, 46(3): 589–606.
- He D F, Li D S, Zhang G W, et al., 2011. Formation and evolution of multi-cycle superposed Sichuan Basin, China[J]. Chinese Journal of Geology, 46(3): 589–606. (in Chinese)
- 何政伟, 刘援朝, 魏显贵, 等, 1997. 扬子克拉通北缘米仓山地区基底变质岩系同位素地质年代学[J]. 矿物岩石, 17(增刊 1): 86–90.
- He Z W, Liu Y C, Wei X G, et al., 1997. Isotopic geochronology of basement metamorphic rock series in the Micangshan area along the northern margin of Yangtze craton, China[J]. Mineralogy and Petrology, 17(S1): 86–90. (in Chinese)
- 金文正, 白万奎, 叶治续, 2023. 川西龙门山北段中生代差异构造隆升特征[J]. 华南地质, 39(4): 589–600.
- Jin W Z, Bai W K, Ye Z X, 2023. Characteristics of Mesozoic differential tectonic uplift of the north section of Longmen mountains, western Sichuan Basin[J]. South China Geology, 39(4): 589–600. (in Chinese)
- 李国辉, 李楠, 谢继容, 等, 2012. 四川盆地上三叠统须家河组前陆大气区基本特征及勘探有利区[J]. 天然气工业, 32(3): 15–21.
- Li G H, Li N, Xie J R, et al., 2012. Basic features of large gas play fairways in the Upper Triassic Xujiahe Formation of the Sichuan Foreland Basin and evaluation of favorable exploration zones[J]. Natural Gas Industry, 32(3): 15–21. (in Chinese)
- 李建华, 张岳桥, 董树文, 等, 2010. 北大巴山凤凰山基底隆起晚中生代构造隆升历史——磷灰石裂变径迹测年约束[J]. 地质科学, 45(4): 969–986.
- Li J H, Zhang Y Q, Dong S W, et al., 2010. Apatite fission track thermochronologic constraint on Late Mesozoic uplifting of the Fenghuangshan basement uplift[J]. Scientia Geologica Sinica, 45(4): 969–986. (in Chinese)
- 李阔, 2012. 川东北地区须家河组储层特征精细研究[D]. 武汉: 长江大学.
- Li K, 2012. Study on the reservoir characteristics of Xujiahe Formation in northeast Sichuan Basin[D]. Wuhan: Yangtze University. (in Chinese)
- 李三忠, 赖绍聪, 张国伟, 等, 2003. 秦岭勉(县)略(阳)缝合带及南秦岭地块的变质动力学研究[J]. 地质科学, 38(2): 137–154.
- Li S Z, Lai S C, Zhang G W, et al., 2003. Metamorphic dynamics of the Mian–Lue suture zone of Qinling orogenic belt and the southern Qinling block[J]. Scientia Geologica Sinica, 38(2): 137–154. (in Chinese)
- 李双建, 孙冬胜, 蔡立国, 等, 2018. 川北米仓山山前带碎屑锆石 U–Pb 年代学及盆山演化意义[J]. 大地构造与成矿学, 42(6): 1087–1107.
- Li S J, Sun D S, Cai L G, et al., 2018. Detrital zircon U–Pb geochronology of Micang mountain piedmont zone, northern Sichuan Basin and its significance to basin–mountain evolution[J]. Geotectonica et Metallogenia, 42(6): 1087–1107. (in Chinese)
- 李伟, 邹才能, 杨金利, 等, 2010. 四川盆地上三叠统须家河组气藏类型与富集高产主控因素[J]. 沉积学报, 28(5): 1037–1045.
- Li W, Zou C N, Yang J L, et al., 2010. Types and controlling factors of accumulation and high productivity in the Upper Triassic Xujiahe Formation gas reservoirs, Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 28(5): 1037–1045. (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.
- 李英娇, 2014. 四川盆地晚三叠世须家河组层序—古地理与聚煤规律[D]. 北京: 中国矿业大学(北京).
- Li Y J, 2014. Sequence-palaeogeography and coal accumulation of the Late Triassic Xujiahe Formation in the Sichuan Basin[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing). (in Chinese)
- 李英娇, 邵龙义, 2017. 四川盆地上三叠统须家河组层序格架下的岩相古地理演化[J]. 地球科学前沿, 7(1): 77–89.
- Li Y J, Shao L Y, 2017. Paleogeographic evolution of the Upper Triassic Xujiahe Formation within a sequence framework in the Sichuan Basin[J]. Advances in Geosciences, 7(1): 77–89.

- 77—89. (in Chinese)
- 李勇, 贺佩, 颜照坤, 等, 2010. 晚三叠世龙门山前陆盆地动力学分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 37(4): 401—411.
- Li Y, He P, Yan Z K, et al., 2010. Dynamics of Late Triassic Longmenshan foreland basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 37(4): 401—411. (in Chinese)
- 李智武, 陈洪德, 刘树根, 等, 2010. 龙门山冲断隆升及其走向差异的裂变径迹证据[J]. 地质科学, 45(4): 944—968.
- Li Z W, Chen H D, Liu S G, et al., 2010. Differential uplift driven by thrusting and its lateral variation along the Longmenshan belt, western Sichuan, China: evidence from fission track thermochronology[J]. Chinese Journal of Geology, 45(4): 944—968. (in Chinese)
- 李智武, 刘树根, 陈洪德, 等, 2008. 龙门山冲断带分段—分带性构造格局及其差异变形特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 35(4): 440—454.
- Li Z W, Liu S G, Chen H D, et al., 2008. Structural segmentation and zonation and differential deformation across and along the Longmen thrust belt, West Sichuan, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 35(4): 440—454. (in Chinese)
- 李忠权, 麻成斗, 应丹琳, 等, 2014. 川渝地区构造动力学演化与盆岭—盆山耦合构造分析[J]. 岩石学报, 30(3): 631—640.
- Li Z Q, Ma C D, Ying D L, et al., 2014. Tectonic dynamic evolution and analysis of basin-range coupling and basin-mountain coupling in Sichuan-Chongqing region, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 30(3): 631—640. (in Chinese)
- 刘君龙, 纪友亮, 杨克明, 等, 2015. 川西须家河组前陆盆地构造层序及沉积充填响应特征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 39(6): 11—23.
- Liu J L, Ji Y L, Yang K M, et al., 2015. Tectono-stratigraphy and sedimentary infill characteristics of Xujiahe Formation in western Sichuan foreland basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 39(6): 11—23. (in Chinese)
- 刘树根, 邓宾, 李智武, 等, 2011. 盆山结构与油气分布——以四川盆地为例[J]. 岩石学报, 27(3): 621—635.
- Liu S G, Deng B, Li Z W, et al., 2011. The texture of sedimentary basin-orogenic belt system and its influence on oil/gas distribution: a case study from Sichuan Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(3): 621—635. (in Chinese)
- 刘祥, 詹琮窠, 朱弟成, 等, 2021. 松潘—甘孜褶皱带南部上三叠统物源及构造抬升: 碎屑锆石年代学和 Hf 同位素证据[J]. 岩石学报, 37(11): 3513—3526.
- Liu X, Zhan Q Y, Zhu D C, et al., 2021. Provenance and tectonic uplift of the Upper Triassic strata in the southern Songpan-Ganzi fold belt, SW China: evidence from detrital zircon geochronology and Hf isotope[J]. Acta Petrologica Sinica, 37(11): 3513—3526. (in Chinese)
- 罗启后, 2011. 安县运动对四川盆地中西部上三叠统地层划分对比与油气勘探的意义[J]. 天然气工业, 31(6): 21—27.
- Luo Q H, 2011. Significance of the Anxian Movement to the stratigraphic division and correlation of the Upper Triassic formations and their hydrocarbon exploration in the western-central Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 31(6): 21—27. (in Chinese)
- 木红旭, 2020. 川西晚三叠世前陆盆地的形成与演化[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- Mu H X, 2020. Formation and evolution of the Late Triassic foreland basin in western Sichuan[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese)
- 沈桐, 孟立丰, 陈伟, 等, 2021. 龙门山中北段印支晚期构造活动: 来自构造解析及碎屑锆石年代学的证据[J]. 地球科学, 46(5): 1728—1736.
- Shen T, Meng L F, Chen W, et al., 2021. Tectonic activities in middle and north sections of Longmenshan thrust belt during Late Indosinian: evidence from structural analysis and detrital zircon geochronology[J]. Earth Science, 46(5): 1728—1736. (in Chinese)
- 施振生, 王秀芹, 吴长江, 2011. 四川盆地上三叠统须家河组重矿物特征及物源区意义[J]. 天然气地球科学, 22(4): 618—627.
- Shi Z S, Wang X Q, Wu C J, 2011. The heavy minerals and provenances of the Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 22(4): 618—627. (in Chinese)
- 施振生, 朱筱敏, 张亚雄, 等, 2021. 四川盆地上三叠统沉积储层研究进展与热点分析[J]. 石油与天然气地质, 42(4): 784—800.
- Shi Z S, Zhu X M, Zhang Y X, et al., 2021. Advances and trending topics in sedimentary reservoir research of the Upper Triassic Xujiahe Formation, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 42(4): 784—800. (in Chinese)
- 唐大海, 谭秀成, 王小娟, 等, 2020. 四川盆地须家河组致密气藏成藏要素及有利区带评价[J]. 特种油气藏, 27(3): 40—46.
- Tang D H, Tan X C, Wang X J, et al., 2020. Tight gas accumulation elements and favorable zone evaluation of Xujiahe Formation in Sichuan Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 27(3): 40—46. (in Chinese)
- 王磊, 2020. 南秦岭构造带旬阳坝地区角闪岩相变质岩系岩石学、地球化学特征及其地质意义[D]. 西安: 西北大学.
- 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 corre-

- lation 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)
- 王兴龙, 2021. 川西坳陷新场地区上三叠统须家河组沉积砂体展布及主控因素[D]. 成都: 成都理工大学.
- Wang X L, 2021. Sedimentary sand body distribution and main controlling factors of the Upper Triassic Xujiahe Formation in Xinchang area, western Sichuan Depression[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology. (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)
- 谢小平, 李姝臻, 鲁宁, 等, 2021. 川北广元须家河组一段沉积相与沉积环境演化分析[J]. *沉积学报*, 39(2): 493—505.
- Xie X P, Li S Z, Lu N, et al., 2021. Sedimentary facies and sedimentary environment evolution of first member of the Xujiahe Formation in Guangyuan area, northern Sichuan Province[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(2): 493—505. (in Chinese)
- 徐胜林, 2010. 晚三叠世—侏罗纪川西前陆盆地盆山耦合过程中的沉积充填特征[D]. 成都: 成都理工大学.
- Xu S L, 2010. Sedimentary filling characteristics within tectonic sequence of coupling between the western Sichuan foreland Basin and Longmenshan orogenic belt from Late Triassic to Jurassic[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology. (in Chinese)
- 杨经绥, 许志琴, 张建新, 等, 2009. 中国主要高压—超高压变质带的大地构造背景及俯冲/折返机制的探讨[J]. *岩石学报*, 25(7): 1529—1560.
- Yang J S, Xu Z Q, Zhang J X, et al., 2009. Tectonic setting of main high-and ultrahigh-pressure metamorphic belts in China and adjacent region and discussion on their subduction and exhumation mechanism[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(7): 1529—1560. (in Chinese)
- 余世花, 2016. 四川盆地西部晚三叠世须家河组物源分析及其构造意义[D]. 广州: 中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所).
- Yu S H, 2016. Provenance and its geological implication for the Upper Triassic Xujiahe Formation in western Sichuan Basin[D]. Guangzhou: University of Chinese Academy of Sciences (Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences). (in Chinese)
- 张道伟, 杨雨, 2022. 四川盆地陆相致密砂岩气勘探潜力与发展方向[J]. *天然气工业*, 42(1): 1—11.
- Zhang D W, Yang Y, 2022. Exploration potential and development direction of continental tight sandstone gas in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 42(1): 1—11. (in Chinese)
- 张国伟, 郭安林, 王岳军, 等, 2013. 中国华南大陆构造与问题[J]. *中国科学: 地球科学*, 43(10): 1553—1582.
- 张艳妮, 李荣西, 刘海青, 等, 2014. 四川盆地北缘大巴山前陆构造中—新生代构造隆升史[J]. *地球科学与环境学报*, 36(1): 230—238.
- Zhang Y N, Li R X, Liu H Q, et al., 2014. Mesozoic—Cenozoic tectonic uplift history of Dabashan foreland structure in the northern rim of Sichuan Basin[J]. *Journal of Earth Science and Environment*, 36(1): 230—238. (in Chinese)
- 赵正望, 谢继容, 吴长江, 等, 2012. 川西北地区须家河组碎屑组分特征与物源分析[J]. *天然气勘探与开发*, 35(4): 6—10.
- Zhao Z W, Xie J R, Wu C J, et al., 2012. Detrital composition of Xujiahe Formation and its source, north-western Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 35(4): 6—10. (in Chinese)
- 郑和荣, 刘忠群, 徐士林, 等, 2021. 四川盆地中国石化探区须家河组致密砂岩气勘探开发进展与攻关方向[J]. *石油与天然气地质*, 42(4): 765—783.
- Zheng H R, Liu Z Q, Xu S L, et al., 2021. Progress and key research directions of tight gas exploration and development in Xujiahe Formation, Sinopec exploration areas, Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 42(4): 765—783. (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 Z C, Luo Q L, et al., 2011. Sedimentary system of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the Sichuan Forelandoid Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 31(9): 16—24. (in Chinese)
- 周玉, 周雄, 张贻, 等, 2022. 川西苏地二长花岗岩地球化学、锆石年代学及 Lu-Hf 同位素特征——对松潘—甘孜地块构造背景的限定[J]. *中国地质*, 49(6): 1984—2001.
- Zhou Y, Zhou X, Zhang Y, et al., 2022. Geochemistry, zircon geochronology and Lu-Hf isotopic characteristics of the Sudi monzogranite in the Western Sichuan: implications for tectonic setting of the Songpan—Ganze terrane[J]. *Geology in China*, 49(6): 1984—2001. (in Chinese)
- 朱如凯, 赵霞, 刘柳红, 等, 2009. 四川盆地须家河组沉积体系与有利储集层分布[J]. *石油勘探与开发*, 36(1): 46—55.
- Zhu R K, Zhao X, Liu L H, et al., 2009. Depositional system and favorable reservoir distribution of Xujiahe Formation in Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 36(1): 46—55. (in Chinese)
- Dong Y P, Sun S S, Santosh M, et al., 2021. Central China orogenic belt and amalgamation of East Asian continents[J].

- Gondwana Research, 100: 131—194.
- Gou M X, Lu G, Deng B, et al., 2024. Tectonic-paleogeographic evolution of the Late Triassic in the Sichuan Basin, SW China: constraints from sedimentary facies and provenance analysis of the Xujiache Formation[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 160: 106649.
- Hu F, Wu F Y, Chen G H, et al., 2022. The critical factors of lithium enrichment in the metasedimentary wall rocks of granitic pegmatite-type lithium deposit: insights from the Ke'eryin area in the eastern Songpan-Ganzi Belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(7): 2017—2051.
- Li J H, Dong S W, Yin A, et al., 2015. Mesozoic tectonic evolution of the Dabashan thrust belt in the southern Qinling orogen, central China: constraints from surface geology and reflection seismology[J]. *Tectonics*, 34(8): 1545—1575.
- Liu S F, Qian T, Li W P, et al., 2015. Oblique closure of the north-eastern Paleo-Tethys in central China[J]. *Tectonics*, 34(3): 413—434.
- Peng H, Ding L, Liu C Y, et al., 2024. Middle Triassic transcontinental connection between the North China Craton and the Paleo-Tethys Ocean[J]. *Communications Earth & Environment*, 5(1): 775.
- Shi W, Zhang Y Q, Dong S W, et al., 2012. Intra-continental Dabashan orocline, southwestern Qinling, Central China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 46: 20—38.
- Tang Y, Zhang Y P, Tong L L, 2018. Mesozoic-Cenozoic evolution of the Zoige depression in the Songpan-Ganzi flysch basin, eastern Tibetan Plateau: constraints from detrital zircon U-Pb ages and fission-track ages of the Triassic sedimentary sequence[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 151: 285—300.
- Wang X X, Wang T, Zhang C L, 2013. Neoproterozoic, Paleozoic, and Mesozoic granitoid magmatism in the Qinling Orogen, China: constraints on orogenic process[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 72: 129—151.
- Weislogel A L, Graham S A, Chang E Z, et al., 2006. Detrital zircon provenance of the Late Triassic Songpan-Ganzi complex: sedimentary record of collision of the North and South China blocks[J]. *Geology*, 34(2): 97—100.
- Weislogel A L, Graham S A, Chang E Z, et al., 2010. Detrital zircon provenance from three turbidite depocenters of the Middle-Upper Triassic Songpan-Ganzi complex, central China: record of collisional tectonics, erosional exhumation, and sediment production[J]. *GSA Bulletin*, 122(11/12): 2041—2062.
- Yan D P, Zhou Y, Qiu L, et al., 2018. The Longmenshan tectonic complex and adjacent tectonic units in the eastern margin of the Tibetan Plateau: a review[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 164: 33—57.
- Zhang Y P, Chen X H, Shao Z G, et al., 2022. Ocean-continent transition of the northeastern Paleotethys during the Triassic: constraints from Triassic sedimentary successions across the Qinling Orogen, Central China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 232: 105264.