



# 川西北地区须家河组古环境分析与沉积演化特征

芦刚<sup>1,2</sup>, 王长城<sup>1,2</sup>, 邓宾<sup>1,2</sup>, 杨荣军<sup>3</sup>, 刘四兵<sup>2</sup>, 刘重江<sup>2</sup>, 金鑫<sup>1,4</sup>, 苟明星<sup>2</sup>

1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室 成都理工大学, 四川 成都 610059;
2. 成都理工大学 能源学院, 四川 成都 610059;
3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083;
4. 成都理工大学 沉积地质研究院, 四川 成都 610059

中图分类号: P534.51 文献标志码: A

文章编号: 1001-6872(2024)04-0166-12

DOI: 10.19719/j.cnki.1001-6872.2024.04.13

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/51.1143.TD.20240801.1714.002>

引用格式: 芦刚, 王长城, 邓宾, 等. 川西北地区须家河组古环境分析与沉积演化特征[J]. 矿物岩石, 2024, 44(4): 166-177.

LU Gang, WANG Changcheng, DENG Bin, *et al.* Analysis of the paleowater property of the Xujiahe Formation in northwest Sichuan and its geological significance[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2024, 44(4): 166-177.

**【摘要】** 关于川西北地区须家河组古环境特征与沉积演化模式一直存在争议。弄清该问题不仅有助于理解印支运动对川西拗陷形成的控制作用, 而且对于须家河组致密砂岩气藏的勘探具有重要的指导意义。本次研究基于野外露头剖面、岩石标本和薄片鉴定等资料, 结合主量元素、微量元素及硼锶元素等多种地球化学手段, 对川西北地区晚三叠世须家河组沉积环境和沉积特征进行了研究, 进而探讨周缘造山带的构造演化对盆内沉积体系的控制作用。结果表明, 在晚三叠世, 川西北地区须家河组自下向上发育海相-海陆过渡相-陆相沉积, 海水逐渐从北向南退出的过程。须一段沉积期, 川西北地区与外海相通, 样品古盐度平均值为 11.9‰, 古水体以咸水-半咸水为主, 分析为海相沉积环境。龙门山造山带由北向南逐渐隆升, 沉积体系向南迁移。须二段样品古盐度平均值为 6.0‰, 整体有所降低, 但存在 3 个古盐度值较大的样品, 表明该时期盆地仍有海水注入, 可能与间歇性的海侵有关, 分析为海陆过渡相沉积。龙门山的大规模隆升使得湖盆具有一定的封闭性, 盆内逐渐以陆相沉积为主。须三段—须四段样品古盐度平均值为 5.7‰, 分析为正常陆相沉积环境。龙门山造山带的隆升与古水体性质的变化, 影响了川西北地区晚三叠世须家河组的沉积演化过程。

**【关键词】** 川西北地区; 须家河组; 古环境特征; 造山带隆升; 沉积演化

## 0 引言

在晚三叠世期间, 由于印支运动的影响, 华北克拉通与扬子地台与自东向西呈剪刀式的汇聚挤压<sup>[1]</sup>, 古特提斯洋东缘逐渐关闭, 龙门山水下古陆开

始隆升, 川西拗陷形成雏形。川西拗陷从海相碎屑岩到陆相碎屑岩的转换主要发生在晚三叠世诺利期至瑞替期<sup>[2]</sup>, 对应的地层单位为须家河组<sup>[3]</sup>。须家河组作为印支运动在川西拗陷最直接的沉积记录, 正确判断其沉积环境并分析其演化规律, 不仅有助于晚三叠世川西拗陷古地理格局的恢复, 而且对龙

收稿日期: 2024-03-19; 改回日期: 2024-07-20

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(批准号: 42002122); 四川省自然科学基金重点项目(编号: 2024NSFSC0008)

第一作者简介: 芦刚, 男, 38岁, 副教授(博士), 地质学专业, 研究方向: 储层地质学. E-mail: lugang19@cdut.edu.cn

通信作者: 王长城, 男, 45岁, 教授(博士), 地质学专业, 研究方向: 油气地质学. E-mail: wcc-126@163.com

门山的形成和隆升研究具有重要的意义。此外,近年来,四川盆地须家河组先后发现了多个大型气田<sup>[4]</sup>,新增天然气三级储量近万亿方,勘探前景良好<sup>[5]</sup>。

关于须家河组地层的沉积环境,部分学者认为川西坳陷须一段为海陆过渡沉积<sup>[6]</sup>,须二段至须六段发育陆相沉积<sup>[7]</sup>,但是部分学者通过岩心观察、野外剖面特征<sup>[8]</sup>、黏土矿物、硼元素含量、有机地球化学特征等分析<sup>[9]</sup>,推断川西坳陷须一段至须三段主要发育海相沉积;而须四段至须六段沉积期间,川西坳陷受龙门山抬升的影响,盆内主要发育陆相沉积<sup>[10]</sup>。晚三叠世川西坳陷古地理面貌总体呈东南高、西北低,西侧与外海连通,随着龙门山造山带的差异隆升,海水波及至川西坳陷的不同地区,导致须家河组陆相地层中夹有某些海相岩层。从须家河组须一段时期到须三段时期,海水逐渐从川西坳陷西南侧退出,海相地层的沉积范围也逐渐变小。古地理研究表明,须四段时期以后,龙门山造山带南段仍未完全隆升的,川西坳陷西南部可能与松潘—甘孜海仍然保持连通,但盆地整体也具有了一定的封闭性,盆内以三角洲沉积为主。因此,晚三叠世川西坳陷是一个与外海密切相关的“陆缘近海宽浅型敞流”湖盆<sup>[11]</sup>。

前人对四川盆地须家河组沉积环境的研究运用

了多种的分析方法,由于样品大多来自不同地区的零散地层,缺少对须家河组系统的研究。因此,本次研究选择了广元工农镇须家河组剖面进行高精度分析,该剖面不仅是须家河组的定名剖面,而且经过了数十年不断的细致研究,其地层划分、岩石特征及沉积体系划分,已取得丰硕成果。本次研究在前人的基础上,通过精细的剖面测量和样品测试分析,应用构造学、沉积学和地球化学等研究方法,对须家河组的古水体性质进行分析,从而探讨须家河组沉积时期的古环境特征与沉积演化模式。

## 1 区域地质背景

### 1.1 盆地构造特征

川西坳陷整体上呈南北向展布,北隔米仓山与秦岭造山带相望,西侧与龙门山逆冲带相邻,南连康滇古陆,东邻川中隆起带(图1)。川西坳陷的构造型式是以逆冲推覆构造为主,主体以彭州—灌口断裂为界,其西北为突变型的盆山耦合结构(龙门山—川西坳陷,米仓山—川北坳陷),其南为渐变型的盆山耦合结构(大凉山—川西南缓褶区)<sup>[12]</sup>。四川盆地沉积演化大致可分为两个阶段:从新元古代末到中三叠世晚期,盆内主要发育海相碳酸盐岩沉积,从晚三叠世开始,盆内主要发育陆相碎屑岩沉积<sup>[13]</sup>。

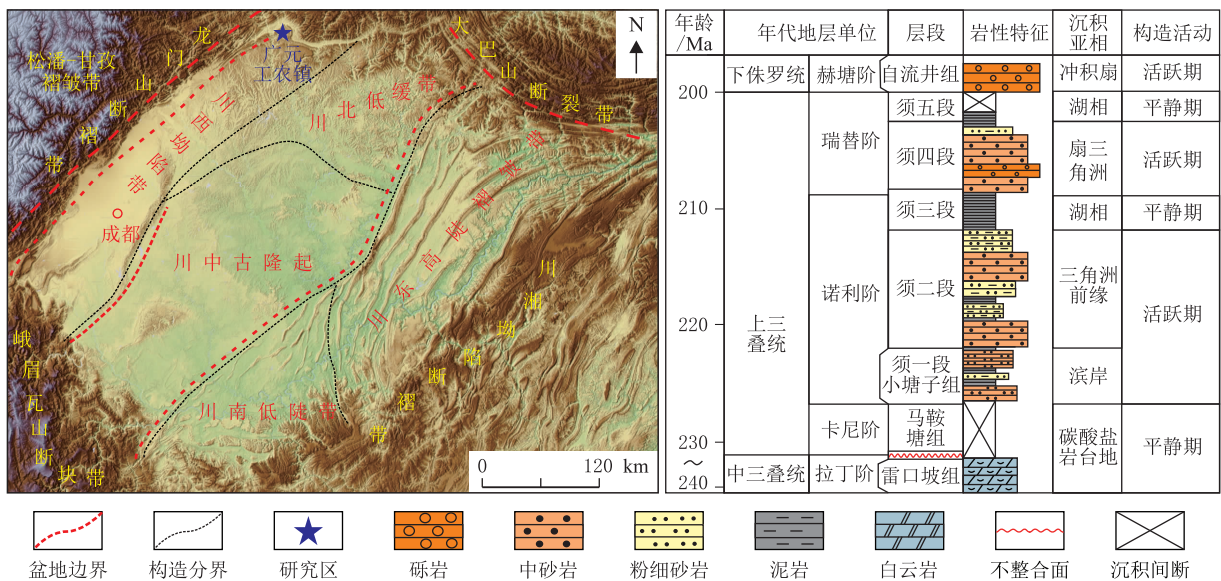


图1 川西坳陷周缘构造特征<sup>[14]</sup>与地层划分剖面(层段划分<sup>[3]</sup>;沉积相<sup>[13]</sup>;构造演化<sup>[11]</sup>)

Fig. 1 Surrounding Structure and Stratigraphic Division of Sichuan Depression

晚三叠世时期,龙门山开始隆升并被剥蚀,海水逐渐退出川西坳陷,盆内开始发育陆源碎屑沉积<sup>[15]</sup>。晚三叠世龙门山隆升以北段为主,南段变形

较弱,龙门山是由西北向东南逐渐推覆的。须一段时期,龙门山北段尚未完全抬升,川西坳陷依旧与海水连通。须二段时期,龙门山北段率先隆升;须四段

之后,南段才开始隆升<sup>[2]</sup>。

## 1.2 沉积演化特征

川西拗陷是在扬子板块被动大陆边缘的基础上,受印支造山运动影响而形成的,盆地中地层充填厚度巨大,包括中三叠统拉丁阶雷口坡组(顶部为天井山组)、上三叠统马鞍塘组、小塘子组(也称须一段)和须家河组(图1),持续时间达30 Ma,具有典型的由被动大陆边缘盆地向前陆盆地过渡演化的特点。被动大陆边缘盆地的充填序列为碳酸盐岩台地,前陆盆地的充填序列为底部不整合面-礁滩相-黑色页岩-碎屑岩夹碳酸盐岩<sup>[1]</sup>。

根据盆-山耦合理论<sup>[16]</sup>,川西拗陷须家河组可划分为“活跃造山沉积期”及“宁静构造沉积期”两个阶段<sup>[17]</sup>,其中须二段与须四段为活跃造山期,须一段、须三段与须五段为构造宁静期。基于野外露头地层剖面实测、大量钻井及岩心资料,前人研究认为川西拗陷在晚三叠世沿古特提斯域东缘发育了一系列从海陆交互相(滨岸)到陆相(辫状河三角洲相-湖泊相)过渡的沉积体系<sup>[7]</sup>。川西拗陷在区域上受到西北部龙门山、北部米仓一大巴山、东南部江南雪峰等造山带的逆冲推覆构造控制<sup>[15]</sup>。须二段沉积期间,龙门山造山带开始隆升,沉积相以三角洲平原及三角洲前缘亚相为主。须四段沉积期间,受“安县运动”影响,造山带强烈隆升,盆地边缘发育冲积扇、冲积平原沉积相。须三段及须五段沉积以滨浅湖和曲流河三角洲为主,受区域构造抬升的影响,川西拗陷须五段地层出现不同程度的缺失。

## 2 样品与分析

### 2.1 样品采集

在广元工农镇须家河组野外剖面进行样品采集(坐标:105°51′5.41″,32°29′38.71″),从须一段至须四段共采集新鲜的样品37件,其中须一段共8件,须二段共18件,须三段共5件,须四段共6件。

### 2.2 测试内容及方法

样品测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。对采集的岩石样品去除风化面后破碎成岩屑,在实验室用纯净水反复冲洗,后用5%的盐酸溶液浸泡10 min,加入去离子水在超声波洗槽中清洗15 min,并重复2~3次,烘干后用玛瑙研钵磨至200目进行地球化学分析,全岩主量元素测试采用电感耦合等离子体发射光谱仪(PE Optima 8300),微量元素测试采用电感耦合等

离子体质谱仪(Agilent Technologies 7700 Series ICP-MS)。岩石学分析是通过将砂岩样品薄片进行镜下鉴定并拍照,确定其岩石类型,然后对其中的颗粒及岩屑分类统计。

## 3 结果

### 3.1 沉积与岩石学特征

广元工农镇剖面位于四川省广元市工农镇小塘村一带,本剖面厚约1 000 m,沿嘉陵江东岸出露,地层出露雷口坡组白云岩,须一段至须四段,及白田坝组砾岩,缺失须五段;其中,须三段植被覆盖比较严重,须一段、须二段与须四段出露较为完整。须一段与下伏雷口坡组白云岩呈不整合接触,岩性以浅灰色中-薄层细砂岩、粉砂岩以及粉砂质泥岩为主,多见砂岩与泥岩的互层(图2a),上部发育薄层泥岩,中间夹一套极薄层黑色煤线,须一段整体厚度约200 m。须二段在野外出露较完整,厚度也较厚,约500 m,主要发育大套的块状砂岩夹薄层泥质粉砂岩,粒度呈向上变细的趋势,夹薄层的暗色泥质粉砂岩,中上部砂岩内部夹多套薄层的黑色碳质条带或碳屑纹层。须二段下部可见交错层理(图2b),及潮汐成因的波状层理。上段的块状砂岩分析为分流河道相,其内部夹薄层泥质粉砂岩(图2c)。须三段植被覆盖严重,以粉细砂岩或泥岩为主,多呈互层型沉积,横向上厚度较稳定延伸较远,多见水平层理。须四段与上覆下侏罗统白田坝组地层呈不整合接触,须四段岩石类型以厚层砾岩与块状粗砂岩为主,向上变细,砂砾岩成层性较好,砂岩以中粒长石岩屑砂岩为主,砾岩粒度中等,分选较差,次圆状(图2d),砾石以石英和燧石为主,推测为扇三角洲沉积。白田坝组的岩性也主要为砾岩,与须四段有所不同,其砾石成分主要为石英质,颗粒粒径也更大,杂基更多。

广元工农镇剖面须家河组须一段以浅灰色细粒石英砂岩为主,向上颗粒逐渐变细,石英颗粒较纯净,几乎不含长石与岩屑,具有颗粒支撑结构、分选较好,呈次圆状(图2e)。填隙物的含量为5%~10%,包括硅质及少量黏土,接触式胶结。须一段砂岩成分成熟度较高,属于典型的滨岸相砂岩。须二段以灰色中粒岩屑砂岩为主,含少量长石岩屑砂岩,夹薄层的泥质粉砂岩等,俗称“腰带层”。岩屑以碳酸盐岩岩屑、硅质岩屑为主(图2g),长石包括碱性长石亚族及微斜长石。颗粒粒径以0.1~0.2 mm

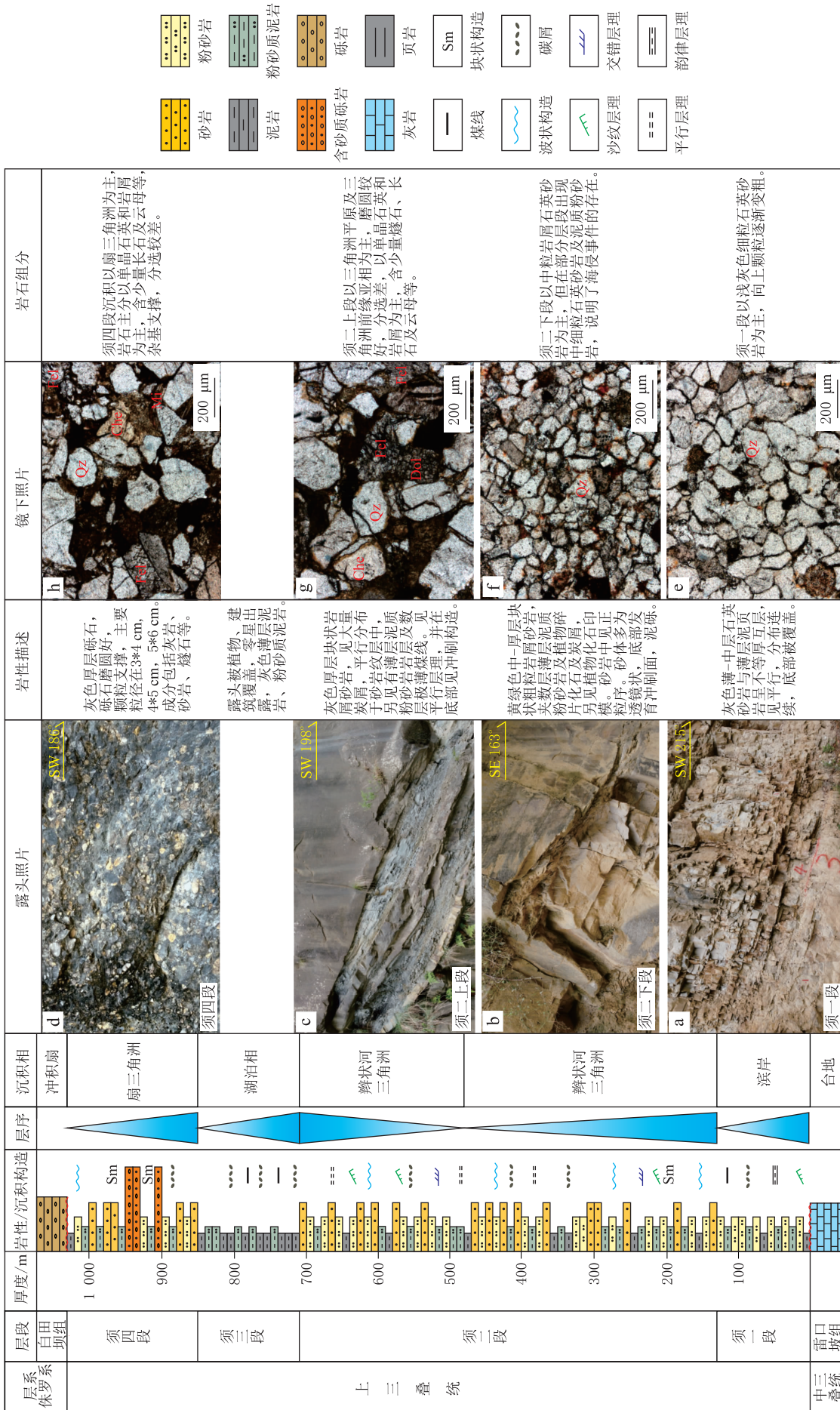


图 2 广元工农镇剖面须家河组岩性剖面与露头及镜下照片 (层段划分 [30]; 沉积相 [33])

a. 须一段以薄-中层石英砂岩为主, 分析为滨岸相沉积; b. 须二下段以中-厚层砂岩为主, 见大型交错层理, 分析为三角洲沉积; c. 须二上段, 长石岩屑砂岩, 含燧石等; d. 须四段以砾岩为主, 向上变细, 成层性较好; e. 须一段, 石英砂岩, 颗粒支撑; f. 须二下段, 岩屑石英砂岩, 含燧石等; g. 须二上段, 长石岩屑砂岩, 含燧石等; h. 须四段, 岩屑砂岩, 分选较差; Che. 燧石; Qz. 石英; Mi. 云母; Cal. 方解石; Dol. 白云石; 鉴定仪器: 尼康 E600FC + 偏光显微镜, 均为单偏光。

为主,分选中等,磨圆较好,杂基支撑。须二段以中粒岩屑砂岩为主,但在部分层段出现中细粒石英砂岩及泥质粉砂岩(图 2f),长石与岩屑含量较少,说明了其沉积环境发生了短暂的变化,外源碎屑物质输入较少,石英颗粒分选变好,推测可能存在短暂的海侵事件。须四段以岩屑石英砂岩为主(图 2h),砂岩层与砾岩层相互叠置,砾岩层横向分布较广,以颗粒支撑为主,分选中等、磨圆较好,成分以灰岩、硅质砾石为主,杂基以硅质为主,含量少,见云母条带。

### 3.2 元素地球化学特征

广元工农镇剖面须家河组样品主、微量元素含量(单位  $10^{-6}$  g)见表 1。其中,须一段样品 $w(\text{SiO}_2)$

为 53.63%~91.82%(平均值为 69.02%); $w(\text{K}_2\text{O})$ 为 0.97%~3.54%(平均值为 2.79%); $w(\text{Na}_2\text{O})$ 为 0.06%~0.16%(平均值为 0.12%); $w(\text{CaO})$ 为 0.09%~2.81%(平均值为 0.73%); $w(\text{MgO})$ 为 0.07%~2.48%(平均值为 1.17%); $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 1.97%~20.79%(平均值为 14.86%); $w(\text{B})$ 为  $7.98 \times 10^{-6}$ ~ $67.11 \times 10^{-6}$ (平均值为  $29.76 \times 10^{-6}$ ); $w(\text{Ga})$ 为  $5.35 \times 10^{-6}$ ~ $27.75 \times 10^{-6}$ (平均值为  $19.10 \times 10^{-6}$ ); $w(\text{Rb})$ 为  $24.84 \times 10^{-6}$ ~ $157.39 \times 10^{-6}$ (平均值为  $98.02 \times 10^{-6}$ ); $w(\text{Sr})$ 为  $40.50 \times 10^{-6}$ ~ $124.24 \times 10^{-6}$ (平均值为  $75.85 \times 10^{-6}$ ); $w(\text{Ba})$ 为  $132.16 \times 10^{-6}$ ~ $640.50 \times 10^{-6}$ (平均值为  $368.54 \times 10^{-6}$ )。

表 1 须家河组样品主量元素、微量元素含量  
Table 1 Major and trace element geochemistry of the Xujiahe Formation rock samples

层位	序号	主量元素/%						微量元素/ $10^{-6}$				
		SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	B	Ga	Rb	Sr	Ba
须一段	1	91.71	0.97	0.07	0.09	0.07	1.944	67.11	6.30	24.84	124.24	132.16
	2	60.66	4.62	0.16	0.85	2.48	20.79	7.98	24.84	157.39	74.39	549.89
	3	79.95	2.17	0.10	0.24	0.34	10.44	44.39	11.50	60.32	40.50	204.60
	4	56.52	3.35	0.14	0.51	1.12	26.60	14.91	26.55	124.16	55.65	386.85
	5	60.07	3.22	0.15	0.62	1.41	17.66	50.73	22.24	118.18	56.22	343.47
	6	57.82	3.41	0.15	0.56	1.85	20.33	9.69	27.75	138.19	60.75	507.73
	7	91.82	1.05	0.06	0.12	0.08	1.97	49.13	5.35	26.63	117.38	183.11
	8	53.63	3.54	0.14	2.81	1.98	19.18	14.49	28.27	134.42	77.68	640.50
	9	67.21	3.15	0.13	0.47	1.36	18.21	9.41	18.56	101.46	58.02	883.46
	10	59.58	1.83	0.18	1.48	0.74	30.48	8.14	29.19	81.76	54.50	291.88
须二段	11	60.75	1.37	0.50	8.55	1.58	8.71	23.34	11.64	40.04	87.18	179.06
	12	62.70	3.22	0.18	0.78	2.02	18.33	7.16	24.51	152.74	79.16	817.94
	13	57.51	3.57	0.22	6.28	2.56	15.44	9.32	22.82	159.61	121.75	556.31
	14	73.24	2.85	0.39	0.37	0.76	15.30	11.69	16.43	100.15	97.07	472.79
	15	59.65	2.12	0.69	8.70	1.39	11.17	9.67	12.00	66.07	117.79	1603.42
	16	60.06	3.31	0.37	5.58	2.25	14.80	8.23	18.14	112.46	86.83	664.69
	17	67.92	2.26	0.44	3.51	1.23	11.84	12.09	14.35	75.62	78.93	443.90
	18	69.49	2.24	0.41	5.19	1.07	9.93	9.27	9.27	62.22	88.41	427.12
	19	58.45	2.80	0.66	6.83	2.98	13.31	8.77	15.05	93.43	108.53	365.47
	20	40.12	1.45	0.84	23.49	1.44	7.45	25.83	6.84	45.91	314.84	326.84
须三段	21	54.31	3.06	0.43	6.21	3.78	13.78	6.24	17.49	121.74	104.06	417.08
	22	56.12	3.40	0.50	4.14	3.36	15.86	6.67	20.61	142.11	100.56	533.90
	23	41.19	1.21	0.76	22.42	2.17	8.08	34.96	6.52	40.85	286.65	188.09
	24	49.22	3.04	0.22	12.91	2.57	12.51	5.13	16.29	120.07	163.94	439.66
	25	76.74	2.13	0.67	0.50	0.79	9.90	13.54	10.83	63.52	53.59	467.91
	26	50.58	2.02	0.68	3.42	1.89	10.28	31.04	12.20	55.23	176.80	320.41
	27	52.35	2.78	0.49	6.69	3.18	13.74	12.85	16.32	93.75	124.17	460.12
	28	79.52	1.62	0.12	0.38	0.49	10.25	16.48	8.12	85.47	115.64	478.28
	29	77.45	1.48	0.09	0.27	0.31	9.78	17.84	7.98	102.54	135.46	452.19
	30	80.36	1.78	0.10	0.35	0.28	11.35	15.82	8.26	61.58	45.78	341.56
须四段	31	81.92	1.55	0.09	0.25	0.25	9.19	18.10	8.81	37.78	27.48	271.22
	32	77.62	2.26	0.12	1.49	0.85	10.15	19.09	9.98	53.55	53.68	530.61
	33	41.38	2.02	0.13	20.78	1.67	9.91	18.36	11.60	67.85	107.84	387.54
	34	51.52	3.39	0.16	10.91	2.44	13.99	3.44	19.92	132.08	172.25	640.33
	35	58.37	1.82	0.25	10.73	1.61	10.65	11.30	10.24	55.23	101.80	409.04
	36	55.30	2.95	0.16	6.19	3.07	15.52	8.70	17.38	107.79	94.11	614.25
	37	55.95	3.29	0.15	6.98	2.06	15.41	5.65	19.52	121.39	126.69	624.28

测试单位:中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室;测试日期:2022-07-01~2022-08-30;测试仪器:电感耦合等离子体发射光谱仪(PE Optima 8300),电感耦合等离子体质谱仪(Agilent 7700 Series ICP-MS)。

须二段样品  $w(\text{SiO}_2)$  为 40.12%~76.74% (平均值为 59.16%);  $w(\text{K}_2\text{O})$  为 1.21%~3.57% (平均值为 2.50%);  $w(\text{Na}_2\text{O})$  为 0.13%~0.84% (平均值为 0.46%);  $w(\text{CaO})$  为 0.37%~23.49% (平均值为 6.71%);  $w(\text{MgO})$  为 0.74%~3.78% (平均值为 1.89%);  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  为 7.45%~30.48% (平均值为 13.63%);  $w(\text{B})$  为  $5.13 \times 10^{-6}$ ~ $34.96 \times 10^{-6}$  (平均值为  $13.36 \times 10^{-6}$ );  $w(\text{Ga})$  为  $6.52 \times 10^{-6}$ ~ $29.19 \times 10^{-6}$  (平均值为  $15.71 \times 10^{-6}$ );  $w(\text{Rb})$  为  $40.04 \times 10^{-6}$ ~ $159.61 \times 10^{-6}$  (平均值为  $90.83 \times 10^{-6}$ );  $w(\text{Sr})$  为  $53.59 \times 10^{-6}$ ~ $314.84 \times 10^{-6}$  (平均值为  $121.03 \times 10^{-6}$ );  $w(\text{Ba})$  为  $188.09 \times 10^{-6}$ ~ $1\,603.42 \times 10^{-6}$  (平均值为  $522.22 \times 10^{-6}$ )。

须三段-须四段样品  $w(\text{SiO}_2)$  为 41.38%~81.92% (平均值为 64.70%);  $w(\text{K}_2\text{O})$  为 1.48%~3.39% (平均值为 2.27%);  $w(\text{Na}_2\text{O})$  为 0.09%~0.49% (平均值为 0.17%);  $w(\text{CaO})$  为 0.25%~20.78% (平均值为 5.91%);  $w(\text{MgO})$  为 0.25%~3.18% (平均值为 1.47%);  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  为 9.19%~15.52% (平均值为 11.81%);  $w(\text{B})$  为  $3.44 \times 10^{-6}$ ~ $19.09 \times 10^{-6}$  (平均值为  $13.42 \times 10^{-6}$ );  $w(\text{Ga})$  为  $7.98 \times 10^{-6}$ ~ $19.92 \times 10^{-6}$  (平均值为  $12.56 \times 10^{-6}$ );  $w(\text{Rb})$  为  $37.78 \times 10^{-6}$ ~ $132.08 \times 10^{-6}$  (平均值为  $83.55 \times 10^{-6}$ );  $w(\text{Sr})$  为  $27.48 \times 10^{-6}$ ~ $172.25 \times 10^{-6}$  (平均值为  $100.45 \times 10^{-6}$ );  $w(\text{Ba})$  为  $271.22 \times 10^{-6}$ ~ $640.33 \times 10^{-6}$  (平均值为  $473.58 \times 10^{-6}$ )。

## 4 古环境恢复

### 4.1 硼元素当量

硼元素(B)属于易溶元素,通常富集在各类岩石与水体中,因此能够一定程度上指示沉积环境与地质作用。王敏芳等<sup>[18]</sup>根据伊利石理论含钾量的8.5%来换算样品中的“相对硼元素当量=8.5×[硼元素含量( $10^{-6}$ )/ $\text{K}_2\text{O}$ (%)]”<sup>[19]</sup>;其研究认为,在硼元素当量大于  $400 \times 10^{-6}$  时古海水为超盐度环境,  $(300 \sim 400) \times 10^{-6}$  为正常海水环境,  $(200 \sim 300) \times 10^{-6}$  为半咸水环境,而硼元素当量小于  $200 \times 10^{-6}$  时则是低盐度环境的沉积产物。在广元工农镇剖面须家河组样品中,依据上述公式的计算结果表明(图3a),研究区须一段样品硼元素当量最小值为15,最大值为588,平均值为176,表明沉积环境为咸水与淡水频繁交替的过程;须二段样品硼元素当量最小值为14,最大值为246,平均值为60,表明沉积环境整体为淡水沉积,存在三次短暂的半咸水-咸水

沉积(151、246、131);须三段-须四段样品硼元素当量最小值为9,最大值为99,平均值为49,表明沉积环境完全变为淡水沉积。

### 4.2 古盐度分析

黏土矿物中B的含量能够反映其形成时古水体的盐度。黏土矿物能固定一定数量的硼,并且不会由于硼浓度的降低而解析。黏土矿物中硼含量与古水流的盐度呈线性关系,因此,可以通过样品的硼含量来恢复沉积时的古盐度。本次研究选取剖面不同层段的数十个泥岩样品,通过科奇公式  $\lg \text{Bk} = 1.28 \lg \text{Sp} + 0.11$  换算出古盐度,式中Bk为高岭石硼含量( $10^{-6}$ ),Sp为古盐度(‰),该公式适用于盐度变化范围较广及成岩过程中黏土矿物组分变化不大的沉积盆地。

在广元工农镇剖面中,须一段样品古盐度值较大,样品古盐度最大值为21.9‰,最小值为4.2‰,平均值为11.9‰(图3a)。须一段古水体盐度较高,分析为海相沉积环境。从须二段到须四段,古盐度值逐渐降低。须二段样品最大值13.2‰,最小值为2.9‰,平均值为6.0‰。须二段古水体盐度整体有所降低,但存在3个古盐度值较大的样品,推测可能与短暂海侵有关。须三段-须四段样品最大值8.2‰,最小值为2.2‰,平均值为5.7‰,表明沉积环境整体为淡水沉积。

### 4.3 锶钡比值

锶(Sr)和钡(Ba)是碱土金属中化学性质较相似的2个元素,锶的迁移能力比钡的迁移能力强,在淡水环境中,水体的酸性比较强,矿化度较低,锶和钡均以碳酸盐的形式保留在湖水中。当湖水盐度不断咸化、矿化度逐渐增高时,钡首先以硫酸钡形式沉淀出现,当湖水或海水浓缩到一定程度后才能产生硫酸锶的沉淀,因此,可以使用锶钡比值作为古盐度的标志。通常淡水沉积物中锶钡比值 $<1$ ,而海相沉积物中锶钡比值 $>1$ ,半咸水相为 $0.5 \sim 1.0$ <sup>[20]</sup>。在广元工农镇剖面须家河组样品中,须一段样品锶钡比最小值为0.1,最大值为0.9,平均值为0.3,表明沉积环境为半咸水沉积环境;须二段样品锶钡比最小值为0.1,最大值为1.5,平均值为0.3,表明沉积环境为咸水与淡水交替的过程;须三段-须四段样品锶钡比最小值为0.1,最大值为0.3,平均值为0.2,表明沉积环境整体为淡水沉积环境。

### 4.4 硼镓比值

硼镓比值也被认为是判断古盐度的一种证据。硼(B)和镓(Ga)的化学性质差别较大,硼酸盐溶解

度大,较易迁移,仅蒸发后才能析出;镓的活动性相对较低,较易沉淀。因此,可以通过硼/镓比值反映沉积古水体的盐度。前人研究认为硼/镓比值小于4属于淡水沉积,大于7属于咸水沉积。

在广元工农镇剖面须家河组样品中,须一段样品硼镓比最小值为0.3,最大值为10.7,平均值为3.5,表明沉积环境为半咸水沉积环境(图3a);须二段样品硼镓比最小值为0.3,最大值为5.4,平均值为1.2,表明沉积环境整体为淡水沉积,存在两次短暂的半咸水-咸水沉积(3.8,5.4);须三段-须四段样品硼镓比最小值为0.2,最大值为2.1,平均值为1.1,表明沉积环境整体为淡水沉积环境。这与硼元素当量、古盐度分析和铷锶比确定的沉积环境变化是一致的。

#### 4.5 铷锶比值

铷(Rb)元素相对较稳定,在风化作用中遭受淋

滤散失较少,而锶(Sr)元素相对容易散失<sup>[21]</sup>。气候相对湿润时,降水增多、风化作用增强,导致Sr更易流失,Rb/Sr值有所增大;相反,气候相对干旱时,降水减少、风化作用变弱,母岩中残留的Sr增多,Rb/Sr值相对较低。因此,高Rb/Sr值代表湿润的沉积环境,低Rb/Sr值代表干旱的沉积环境。

在广元工农镇剖面须家河组样品中,须一段样品Rb/Sr值主要分布在0.2~2.3,平均值为1.5,表明为湿润与干旱交替的古气候特征;须二段样品Rb/Sr值主要分布在0.1~1.9,平均值为1.0,表明沉积环境整体为半湿润气候,存在三次短暂的半干旱-干旱气候(0.1,0.1,0.3);须三段-须四段样品Rb/Sr值主要分布在0.5~1.4,平均值为0.9,表明为半湿润-半干旱的古气候特征。Rb/Sr值的变化趋势与CIA指数一致(图3b)。

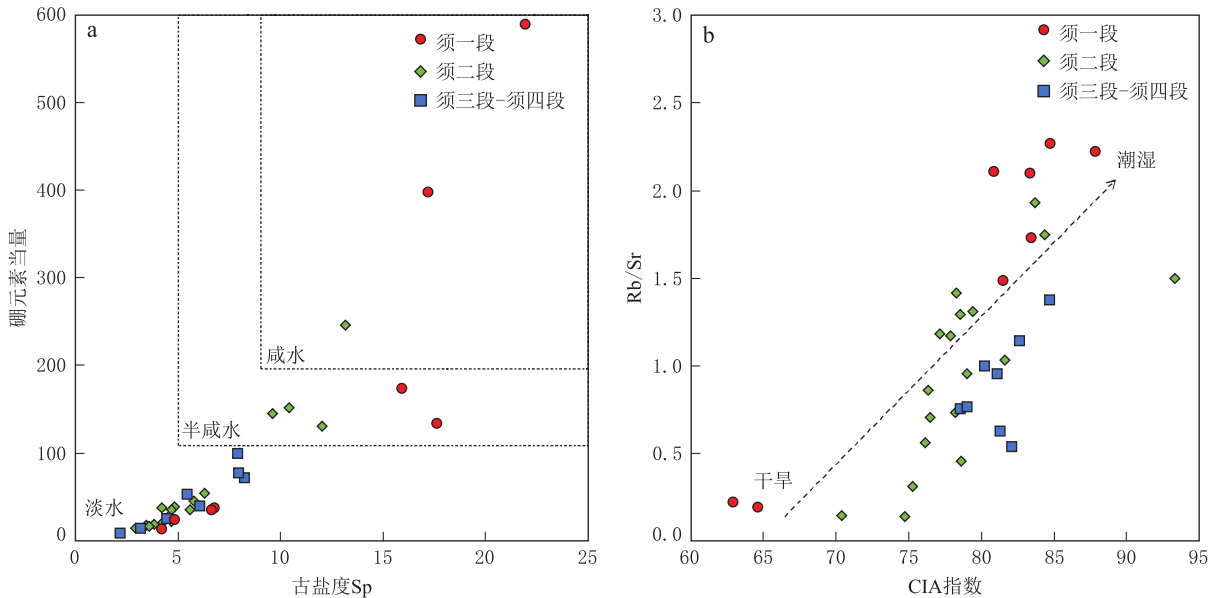


图3 相关元素的交汇图  
Fig. 3 Crossplot of related elements  
a. 硼元素当量-古盐度 Sp; b. Rb/Sr-CIA。

通过古水体性质分析,须一段下部古盐度值较高,古水体盐度计算结果与现代海水相近,判断早期为海相沉积,上段古盐度逐渐降低,认为其过渡到陆相沉积,这可能与盆地与外海脱离联系,周缘淡水注入有关。须二段整体古盐度较低,局部有所增加,大于正常淡水湖泊水体,表明该时期盆地仍有海水注入,可能与间歇性的海侵有关。须三段至须四段古盐度较低,分析为正常陆相沉积环境,高铷锶比值也说明须二段存在短暂的海侵事件(图4)。

#### 4.6 构造环境

前人通过主量元素(二元函数 F1-F2 图解)来判断广元工农镇须家河组母岩区岩石类型<sup>[22]</sup>。须

家河组样品落点区域以石英质物源区为主,中性岩物源区次之,指示须家河组物源区以克拉通边缘与陆内造山带为主。须一段与须二段大部分样品位于石英质物源区,推测物源来自上扬子板块边缘;须四段样品主要落在长英质和中性岩物源区,推测物源来自龙门山造山带。

根据 Th-Sc-Zr/10 构造环境判别图解(图5),在广元工农镇剖面中,须一段大部分样品落在活动大陆边缘区域及附近,小部分落在大陆岛弧区域内,说明该时期物源区构造背景主要为活动大陆边缘,有少量来自大陆岛弧的碎屑物质。须二段样品主要落在活动大陆边缘区域内,少数落在大陆岛弧边缘

附近,说明该时期物源区构造背景主要为活动大陆边缘。须四段部分样品落在活动大陆边缘区域内,部分落在活动大陆岛弧区域内,说明该时期物源区构造背景介于活动大陆边缘与大陆岛弧区域之间。

### 5 沉积模式建立

晚三叠世是川西坳陷形成的关键时期<sup>[24]</sup>,扬子板块和华北之间的陆-陆碰撞导致了印支运动的开

始及周缘造山带的剥露。根据岩石学和地球化学特征,川西坳陷的构造背景为活动大陆边缘,沉积中心主要分布在坳陷北部。随着龙门山从北往南的隆升,川西坳陷逐渐与松潘甘孜外海分割开来,但仍受到间歇性海侵作用的影响。对露头岩石薄片进行观察分析,须一段岩性主要以石英质粉砂岩及粉砂质泥岩,沉积环境以滨岸相为主<sup>[8]</sup>;在研究区由于构造抬升而暴露在地表,但在川西坳陷内部可存在上倾方向向东尖灭的储层,该套石英砂岩成熟度较高,具

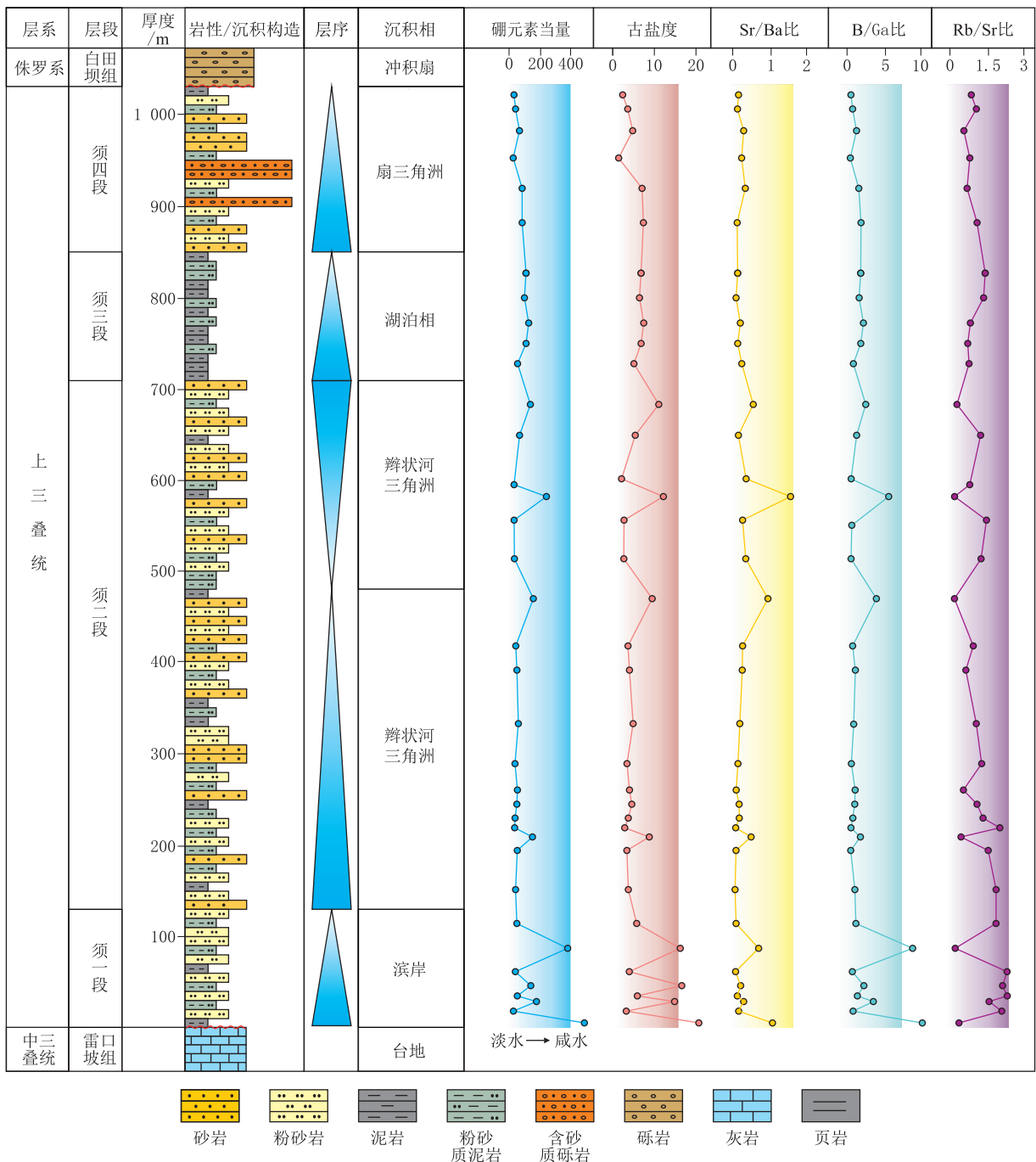


图4 广元工农镇剖面须家河组综合柱状图(层段划分<sup>[3]</sup>;沉积相<sup>[13]</sup>)  
Fig. 4 Comprehensive column of the Xujiahe formation of the Gongnongzhen profile

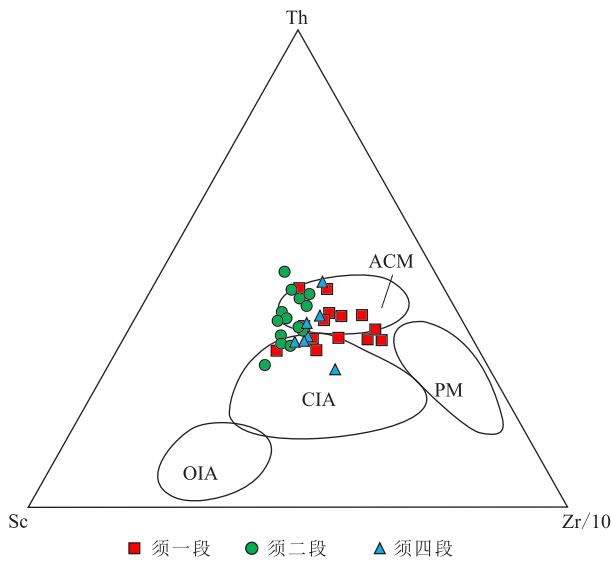


图 5 微量元素对构造环境判别示意图<sup>[23]</sup>

Fig. 5 Trace elements tectonic setting discrimination diagram

OIA. 大洋岛弧区域; CIA. 大陆岛弧区域; ACM. 活动大陆边缘区域; PM. 被动大陆边缘区域。

有较大的勘探潜力。须二段岩性以块状石英岩屑砂岩为主,夹薄层的暗色泥质粉砂岩,分析沉积环境为辫状河三角洲沉积,同时发现了分选与磨圆较好的石英砂岩,代表了短暂的海侵事件。该套石英砂岩具有良好的储集性能,勘探证实是一套较好的产气层位<sup>[25]</sup>。

须一段沉积早期,龙门山尚未抬升或仍为水下隆起,川西坳陷北部与松潘甘孜外海依旧相连(图 6a),因此发育大量潮汐成因沉积构造。从须一段沉积晚期开始,龙门山逐渐隆升,造成海水不断向西褪去,开始发育陆相沉积,其中须二段沉积晚期,龙门山活动有所减缓,受海平面上升的影响,川西坳陷出现短暂海侵沉积(图 6b),须三段至须四段沉积时期,板块间的进一步碰撞导致龙门山造山带的快速抬升,并逐渐将川西坳陷与古特提斯洋分离。龙门山造山带的强烈剥蚀导致了更多的碎屑物质沉积,并使得沉积中心往坳陷的南部迁移,川西坳陷也开始出现完全的陆相沉积。

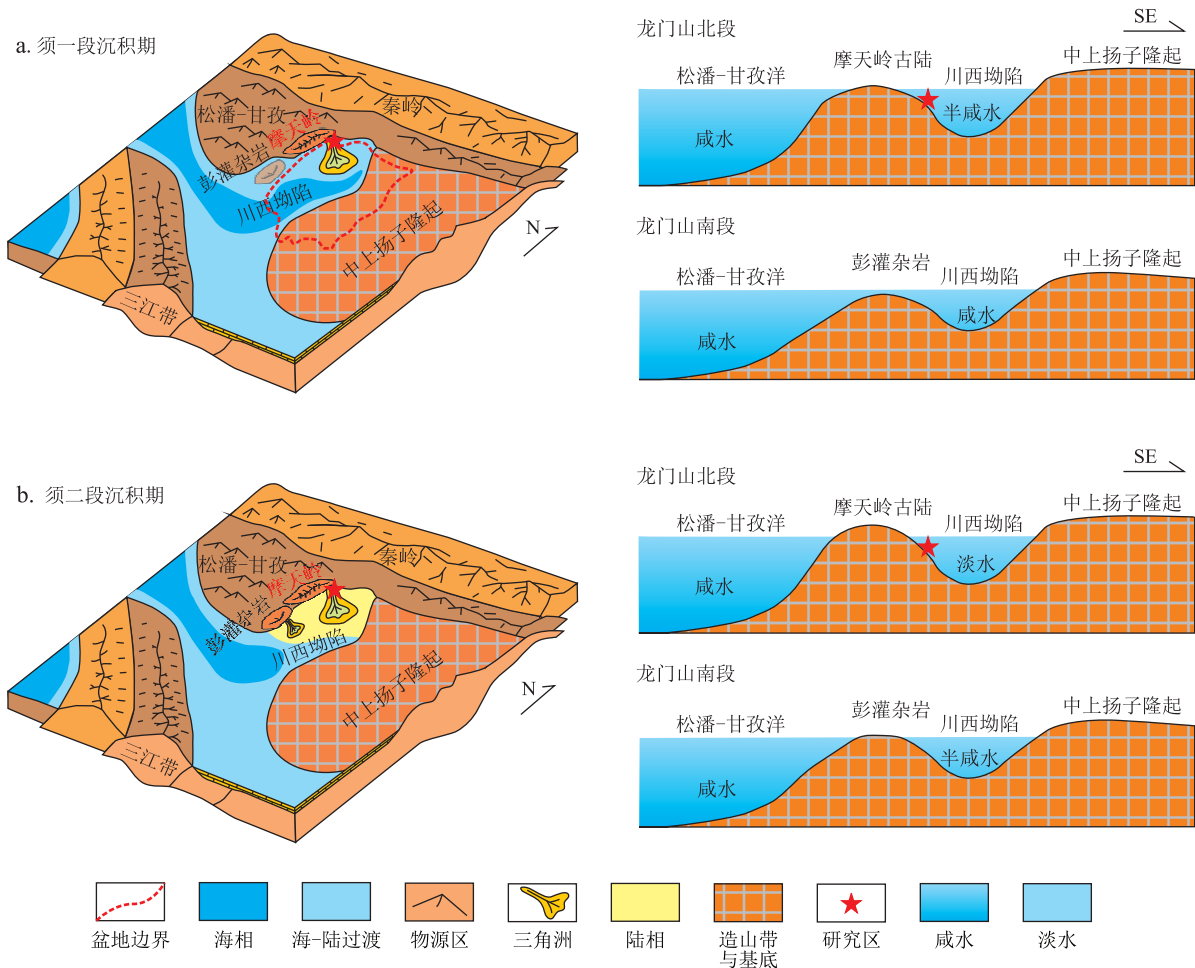


图 6 川西坳陷晚三叠世须一段至须二段沉积时期演化模式图<sup>[22]</sup>  
Fig. 6 Evolution model of the X1 and X2 members in the western Sichuan Depression

## 6 结 论

(1)在晚三叠世,川西北地区须家河组自下向上发育海相—海陆过渡相—陆相沉积,海水逐渐从北向南退出的过程。川西北地区须家河组沉积演化受龙门山造山带隆升与古沉积环境的共同控制。

(2)须一段沉积时期,古水体特征属于咸水—半咸水沉积环境,龙门山造山带尚未完全隆升,川西坳陷与外海依旧相连,沉积特征以海相为主;须二段沉积时期,古水体特征属于淡水—半咸水沉积环境,表明该时期仍有少量海水可以短暂侵入其中。随着龙门山造山带持续隆升,海水逐渐退出川西坳陷,须三段—须四段主要为陆相沉积为主,湖盆也逐渐闭合。

## 参考文献

- [1] 李 勇,苏德辰,董顺利,等. 龙门山前陆盆地底部不整合面:被动大陆边缘到前陆盆地的转换[J]. *岩石学报*,2011,27(8):2413-2422. DOI:CNKI:SUN:YSXB.0.2011-08-018.  
LI Yong, SU Dechen, DONG Shunli, *et al.* Bottom unconformity surface of Longmenshan foreland basin: transition from passive continental margin to foreland basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*,2011,27(8):2413-2242.
- [2] 贾 东,陈竹新,贾承造,等. 龙门山前陆褶皱冲断带构造解析与川西前陆盆地的发育[J]. *高校地质学报*,2003,9(3):402-410. DOI:10.3969/j.issn.1006-7493.2003.03.010.  
JIA Dong, CHEN Zhuxin, JIA Chengzao, *et al.* Structural analysis of the Longmenshan foreland fold thrust belt and the development of the western Sichuan foreland basin [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2003,9(3):402-410.
- [3] 王小娟,王昌勇,陈小二,等. 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*,2023,41(2):435-449. DOI:10.14027/j.issn.1000-0550.2021.087.  
WANG Xiaojuan, WANG Changyong, CHEN Xiaoer, *et al.* Stratigraphic correlation and sedimentary filling characteristics of the Upper Triassic in the western Sichuan central Sichuan region[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*,2023,41(2):435-449.
- [4] 黎 李,朱宜新,刘孟琦,等. 川东地区须四段致密砂岩储层特征与主控因素[J]. *矿物岩石*,2024,44(3):142-151. <https://link.cnki.net/urlid/51.1143.TD.20240403.1050.002>.  
LI Li, ZHU Yixin, LIU Mengqi, *et al.* Characteristics and main controlling factors of tight sandstone reservoirs in the X4 section of eastern Sichuan [J]. *Mineralogy and Petrology*,2024,44(3):142-151.
- [5] 郭彤楼,熊 亮,叶素娟,等. 输导层(体)非常规天然气勘探理论与实践-四川盆地新类型页岩气与致密砂岩气突破的启示[J]. *石油勘探与开发*,2023,50(1):24-37. DOI:10.11698 / PED. 20220759.  
GUO Tonglou, XIONG Liang, YE Sujuan, *et al.* Exploration Theory and Practice of Unconventional Natural Gas in Transport Layers (Bodies)-Insights from Breakthroughs in New Types of Shale Gas and Tight Sandstone Gas in the Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*,2023,50(1):24-37.
- [6] 侯方浩,蒋裕强,方少仙,等. 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*,2005,26(2):30-37. DOI:10.3321/j.issn:0253-2697.2005.02.007.  
HOU Fanghao, JIANG Yuqiang, FANG Shaoxian, *et al.* Sandstone sedimentary models of the second and fourth members of the Xiangxi formation in the Upper Triassic of the Sichuan basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*,2005,26(2):30-37.
- [7] 施振生,杨 威,金 惠,等. 川中-川南地区上三叠统沉积相研究[J]. *沉积学报*,2008,26(2):211-220. DOI:CNKI:SUN:CJXB.0.2008-02-007.  
SHI Zhensheng, YANG Wei, JIN Hui, *et al.* Study on the sedimentary facies of the Upper Triassic in the central southern Sichuan region[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*,2008,26(2):211-220.
- [8] 赵霞飞,张闻林. 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*,2011,31(9):25-30+133-134. DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2011.09.005.  
ZHAO Xiafei, ZHANG Wenlin. Further discussion on the marine tidal genesis of the Xujiuhe Formation in the Sichuan Basin-further demonstration and sequence analysis[J]. *Natural Gas Industry*,2011,31(9):25-30+133-134.
- [9] 施振生,谢武仁,马石玉,等. 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*,2012,14(5):583-595. DOI:10.7605/gdldb.2012.05.004.  
SHI Zhensheng, XIE Wuren, MA Shiyu, *et al.* Marine transgression sedimentary records of the fourth to sixth members of the Xujiuhe formation in the Upper Triassic of the Sichuan basin[J]. *Journal of Paleogeography*,2012,14(5):583-595.
- [10] 罗启后. 对四川盆地上三叠统沉积相的一些认识和思考[J]. *天然气工业*,2011,31(9):12-15+132. DOI:10.3787/j.

- issn. 1000-0976. 2011. 09. 003.
- LUO Qihou. Some understanding and thoughts on the sedimentary facies of the Upper Triassic in the Sichuan Basin[J]. **Natural Gas Industry**, 2011, 31(9):12-15+132.
- [11] 刘 欣,叶芃馨. 四川盆地须家河组沉积格局及概念模式[J]. **石油天然气学报**, 2018, 40(4):6. DOI:10. 12677/JOGT. 2018. 404088.
- LIU Xin, YE Pengxin. Sedimentary pattern and conceptual model of Xujiahe Formation in Sichuan Basin [J]. **Journal of Oil and Gas Technology**, 2018, 40(4):6.
- [12] 刘树根,李智武,曹俊兴,等. 龙门山陆内复合造山带的四维结构构造特征[J]. **地质科学**, 2009, 44(4):1151-1180. DOI: 10. 3321/j. issn:0563-5020. 2009. 04. 010.
- LIU Shugen, LI Zhiwu, CAO Junxing, *et al.* Four dimensional structural characteristics of the Longmenshan intracontinental composite orogenic belt[J]. **Chinese Journal of Geology**, 2009, 44(4):1151-1180.
- [13] 木红旭. 川西晚三叠世前陆盆地的形成与演化[D]. 中国地质大学(北京), 2020. DOI:CNKI;SUN;TRQG. 0. 1995-02-002.
- MU Hongxu. Formation and Evolution of Late Triassic Foreland Basin in Western Sichuan [D]. China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [14] 郑荣才,李国晖,戴朝成,等. 四川类前陆盆地盆-山耦合系统和沉积学响应[J]. **地质学报**, 2012, 86(1):170-180. DOI:10. 3969/j. issn. 0001-5717. 2012. 01. 005.
- ZHENG Rongcai, LI Guohui, DAI Chaoheng, *et al.* Basin mountain coupling system and sedimentological response in Sichuan foreland basins [J]. **Acta Geologica Sinica**, 2012, 86(1):170-180.
- [15] LIU S, STEEL R, ZHANG G. Mesozoic sedimentary basin development and tectonic implication, northern Yangtze Block, eastern China: record of continent-continent collision[J]. **Journal of Asian Earth Sciences**, 2005, 25(1):9-27. DOI: 10. 1016/j. jseaes. 2004. 01. 010.
- [16] 林畅松,刘景彦,张燕梅,等. 库车坳陷第三系构造层序的构成特征及其对前陆构造作用的响应[J]. **中国科学(地球科学)**, 2002, 32(3):177-183. DOI:10. 3321/j. issn:1006-9267. 2002. 03. 001.
- LIN Changsong, LIU Jingyan, ZHANG Yanmei, *et al.* Composition characteristics of the Tertiary tectonic sequence in the Kuche depression and its response to foreland tectonic activity[J]. **Science China Earth Sciences**, 2002, 32(3):177-183.
- [17] 刘君龙,纪友亮,杨克明,等. 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)**, 2015, 39(6):11-23. DOI:10. 3969/j. issn. 1673-5005. 2015. 06. 002.
- LIU Junlong, JI Youliang, YANG Keming, *et al.* Structural sequence and sedimentary filling response characteristics of the Xujiahe formation foreland basin in western Sichuan[J]. **Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)**, 2015, 39(6):11-23.
- [18] 王敏芳,焦养泉,王正海,等. 沉积环境中古盐度的恢复-以吐哈盆地西南缘水西沟群泥岩为例[J]. **新疆石油地质**, 2005, 26(6):4. DOI:10. 3969/j. issn. 1001-3873. 2005. 06. 035.
- WANG Minfang, JIAO Yangquan, WANG Zhenghai, *et al.* Restoration of Paleosalinity in Sedimentary environments: A case study of the Shuixigou group mudstone in the southwest margin of the Turpan Hami basin[J]. **Xinjiang Petroleum Geology**, 2005, 26(6):4.
- [19] LI M, MO D, MAO L, *et al.* Paleosalinity in the Tianluoshan site and the correlation between the Hemudu culture and its environmental background[J]. **Journal of Geographical Sciences**, 2010, 20(3):441-454. DOI: 10. 1007/s11442-010-0441-1.
- [20] 史忠生,陈开远,史 军,等. 运用锶钡比判定沉积环境的可行性分析[J]. **断块油气田**, 2003, 10(2):12-16. DOI:10. 3969/j. issn. 1005-8907. 2003. 02. 004.
- SHI Zhongsheng, CHEN Kaiyuan, SHI Jun, *et al.* Feasibility analysis of using strontium barium ratio to determine sedimentary environment[J]. **Fault-Block Oil & Gas Field**, 2003, 10(2):12-16.
- [21] 刘子铭,付 斯,魏柳斌武,等. 鄂尔多斯盆地西缘中-晚奥陶世沉积演化特征及古环境分析[J]. **矿物岩石**, 2024, 44(2):177-193. DOI:10. 19719/j. cnki. 1001-6872. 2024. 02. 14.
- LIU Ziming, FU Si, WEI Liubinwu, *et al.* Sedimentary evolution characteristics and paleoenvironmental analysis of the middle late Ordovician in the western margin of the Ordos basin[J]. **Mineralogy and Petrology**, 2024, 44(2):177-193.
- [22] GOU Mingxing, LU Gang, DENG Bin, *et al.* Tectonic-paleogeographic evolution of the Late Triassic in the Sichuan basin, SW China: Constraints from sedimentary facies and provenance analysis of the Xujiahe Formation[J]. **Marine and Pe-**

**roleum Geology**, 2024, Vol. 160:106649. DOI:10.1016/j.marpetgeo.2023.106649.

- [23] PAUL D, RAY E. Major and trace element characteristics of the average Indian post-Archean shale: Implications for provenance, weathering, and depositional environment[J]. **ACS Earth and Space Chemistry**, 2021, 5(5): 1114-1129. DOI: 10.1021/acsearthspacechem.1c00030.
- [24] LU G, CHEN X, ZOU H, *et al.* Provenance of the first terrigenous sediments in the western Sichuan basin during the late Triassic: implications for basin evolution from marine to continental[J]. **Marine and Petroleum Geology**, 2023, 147. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2022.105992.
- [25] 陈波, 沈均均, 郝景宇, 等. 川东北元坝地区须家河组石英砂岩沉积与储层特征[J]. **沉积学报**, 2012, 30(1): 92-100. DOI: 10.14027/j.cnki.cjxb.2012.01.004.
- CHEN Bo, SHEN Junjun, HAO Jingyu, *et al.* Sedimentary and reservoir characteristics of the Xujiache formation quartz sandstone in the Yuanba area of northeastern Sichuan[J]. **Acta Sedimentologica Sinica**, 2012, 30(1): 92-100.

## ANALYSIS OF THE PALEOWATER PROPERTY OF THE XUJIAHE FORMATION IN NORTHWEST SICHUAN AND ITS GEOLOGICAL SIGNIFICANCE

LU Gang<sup>1,2</sup>, WANG Changcheng<sup>1,2</sup>, DENG Bin<sup>1,2</sup>, YANG Rongjun<sup>3</sup>, LIU Sibing<sup>2</sup>, LIU Chongjiang<sup>2</sup>, JIN Xin<sup>1,4</sup>, GOU Mingxing<sup>2</sup>

1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Development Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;
2. School of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;
3. China Petroleum Exploration and Development Research Institute, Beijing 100083, China;
4. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China

**Abstract:** This paper examines the debated sedimentary evolution of the Upper Triassic Xujiache Formation in the western Sichuan Depression, aiming to clarify the impact of the Indo-China movement on the development of the western Sichuan Depression and its role in controlling the Xujiache Formation tight sandstone gas reservoir. Sedimentary characteristics and paleo-water conditions in the northern part of the western Sichuan Depression were analyzed using sedimentary outcrop data, thin-section petrography, and whole-rock geochemistry. Additionally, the study explores how tectonic evolution in the surrounding orogenic belts influenced sedimentary systems within the basin. The findings indicate that the sedimentary evolution of the Xujiache Formation in the northern western Sichuan Depression was primarily shaped by tectonic activity in the Qinling and Longmen Mountain orogenic belts. During the initial sedimentary phase (the first member of the Xujiache Formation,  $T_3x^1$ ), marine sedimentation dominated, with a brackish paleo-water body and a restricted lake basin located in the northern study area. In the middle stage (the second member,  $T_3x^2$ ), the paleo-water body transitioned to a mix of brackish and fresh water. The uplift of the Longmen Mountain orogenic belt progressed from north to south, driving rapid southward expansion of the lake basin. In the later stages (the third to fifth members,  $T_3x^3$ - $T_3x^5$ ), the paleo-water body became predominantly fresh water. The significant uplift of the Longmen Mountain range eventually led to the complete closure of the lake basin, resulting in a fully continental depositional environment.

**Keywords:** Northwest region Sichuan; Xujiache formation; characteristics of paleoenvironment; uplift of orogenic belts; sedimentary evolution

ISSN 1001-6872(2024)04-0166-12; CODEN:KUYAE2

**Synopsis of the first author:** LU Gang, male, 38 years old, associate professor, majoring in geology. Now he is engaged in the geological research on reservoir.