

# 四川盆地上三叠统须家河组重矿物特征及物源区意义

施振生<sup>1,2</sup>, 王秀芹<sup>2</sup>, 吴长江<sup>3</sup>

1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083;
2. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院天然气地质所, 河北 廊坊 065007;
3. 中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院, 四川 成都 610051)

**摘要:**四川盆地上三叠统须家河组以超稳定型重矿物为主,不同层段重矿物组成差异不大。重矿物分析不仅有利于沉积体系及古水系的准确恢复和对远景区油气储层的准确预测,而且还可揭示龙门山等物源区的岩石—大地构造属性及其隆升历史。Q型聚类分析和主因子分析表明,须家河组母岩以沉积岩和低级变质岩为主,高级变质岩含量相对较低。由下至上,母岩中高级变质岩含量逐渐增加。ZTR指数分析表明,晚三叠世四川盆地主要发育4个物源,分别位于川西南部、川西北部、川东北部和盆地东南,物源分布位置具有继承性。结合造山带和前人沉积学研究成果认为,晚三叠世,龙门山褶皱带开始逐渐形成。须二期,龙门山北段已露出水面遭受剥蚀,但龙门山南段仍是水下隆起或尚未隆升。须四期,龙门山北段继续隆升遭受剥蚀,龙门山南段开始抬升遭受剥蚀,并向盆地提供物源。须六期,龙门山地区全面抬升遭受剥蚀,并向盆地提供物源。

**关键词:**四川盆地;上三叠统;重矿物;物源分析;构造演化

**中图分类号:**TE122.1<sup>+</sup>1      **文献标识码:**A      **文章编号:**1672-1926(2011)04-0618-10

**引用格式:**施振生,王秀芹,吴长江. 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, 2011, 22(4): 618-627.

## 0 引言

重矿物是指碎屑岩中密度大于  $2.86 \text{ g/cm}^3$  的陆源碎屑矿物。重矿物组成和丰度在搬运、沉积和成岩过程中往往受到多种因素的影响,如物理风化、机械破碎、层间溶解等<sup>[1]</sup>。目前对控制砂岩中重矿物组合因素的认识还存在许多问题,如对重矿物在成岩作用中的变化研究较少,对重矿物在物源区风化带中停留时,其受影响的作用形式了解也很少<sup>[2-3]</sup>。尽管如此,重矿物的组成特征仍可反映母岩的性质,沉积物搬运路径等。通过重矿物的矿物学及统计学分析,可以确定有成因联系的重矿物组合,并据此判断母岩类型;借助主要重矿物的相似性与亲疏关系判断属多物源或单物源,确定多物源的主

次关系,并评估各物源对盆地影响程度;应用重矿物或重矿物组合的稳定性,推测沉积物的搬运距离;利用主要重矿物、重矿物组合及不同稳定性的重矿物空间分布特征,确定物源方向;还可以应用重矿物及其组合的数量和性质在时间序列上的变化,推测物源区母岩岩性的演化<sup>[4-5]</sup>。

四川盆地位于川、渝地区东部,四周为高山环绕,面积约为  $18 \text{ 万 km}^2$ <sup>[6]</sup>。上三叠统须家河组是继二叠系一下三叠统长兴组—飞仙关组之后的又一重要勘探层系。上三叠统须家河组主要为岩性气藏,气藏的形成和分布主要受沉积相和优质储层展布的控制。物源分析作为沉积相研究的一项重要内容,其中碎屑岩中重矿物的物性特征(如颜色、形态、粒度、硬度和稳定性等)构成物源分析的一项重要手

收稿日期:2011-05-05;修回日期:2011-06-03.

基金项目:国家重点基础研究发展规划(“973”)项目(编号:2007CB209504)资助.

作者简介:施振生(1976-),男,安徽安庆人,高级工程师,博士,主要从事沉积学与层序地层学研究. E-mail: shizhen69@petrochina.com.cn.

段<sup>[7-8]</sup>。近年来,前人<sup>[9-14]</sup>对四川盆地上三叠统沉积相及物源研究已经获得了多方面进展,并通过碎屑岩中砾岩碎屑、砂岩骨架颗粒等资料系统分析了物源方向及源区构造属性,然而,由于晚三叠世四川盆地发育多个物源,各个物源之间相互影响较大,且周缘板块构造活动复杂,须家河组形成后又经历了后期抬升剥蚀,因此必须综合分析各种资料,探索造山带的构造活动过程及沉积盆地响应。本文在前期碎屑组分研究的基础上,系统探讨了上三叠统须家河组的重矿物组成,并分析源区母岩类型、沉积物搬运路径及其纵向演化。该研究不仅有利于沉积体系及古水系的准确恢复和对远景区油气储层的准确预测<sup>[4]</sup>,而且还为利用沉积学方法恢复周缘造山带的演化过程提供参考。

## 1 地质背景

四川盆地上三叠统是在中三叠世末印支早期运动的基础上形成的<sup>[6]</sup>。随着印支运动的发生,上扬子海盆结束了大规模的海侵活动。在经过一段时间的剥蚀以后,四川盆地仍然保持着东高西低的古地貌特征,随之进入了以内陆湖盆为主的发展阶段。晚三叠世早期,四川盆地北部为秦岭—大巴山造山带,西北部为龙门山造山带,西部为康滇古隆起,东南部为江南古隆起<sup>[14]</sup>。少量海水通过康滇古隆起与龙门山造山带间的缺口进入盆地西部,在不大的范围内沉积了一套浅海相的须一段沉积(小塘子组),当时广大东部地区地势较高,未接受沉积。以后,西侧海水逐渐后撤,盆内渐渐与外海隔绝,一个以四川盆地为中心的大型内陆湖盆逐渐形成,开始接受主要由厚层砂岩和泥页岩、粉砂岩夹煤层相间组成的上三叠统。

上三叠统须家河组由下至上划分为6个岩性段<sup>[14]</sup>,与下伏中三叠统碳酸盐岩呈假整合接触(图1)。须一段仅发育于川西北龙门山向盆地方向的前陆盆地中。须二段、须四段和须六段下部均以砂岩为主,间夹少量薄煤层、煤线或炭质泥岩、粉砂质泥岩;须三段和须五段以煤系地层为主夹砂岩层;须六段为砂岩、泥岩互层。因受印支晚期运动的影响,须六段在部分地区沉积较薄或仅为剥蚀残余,甚至被剥蚀殆尽。

## 2 重矿物特征

### 2.1 样品和方法

本文研究统计了45口井的147块样品,并按构

造单元进行分类整理(表1)。重矿物分析样品主要取自上三叠统须家河组须二段、须四段和须六段中一细砂岩中,少量取自粉砂岩中。单样重一般为600~1 100 g。先将原样破碎为5~2 mm的碎块,然后称取20~30 g。把称取的样品放入250 mL烧杯中,加入浓度为10%的盐酸溶液浸泡。盐酸浸泡8 h后,研磨、洗净、烘干,然后通过套筛分离出0.063~0.25 mm粒级的碎屑。并用电子天平对碎屑称重(精度为0.1 mg),凡多于5 g的样品称取5 g,不足5 g的样品全部称取。利用三溴甲烷(密度为2.89 g/cm<sup>3</sup>)进行轻重矿物分离,分离出来的重矿物用酒精反复冲洗后烘干并称重。然后在显微镜下具体进行矿物鉴定并将同种矿物归集称重。含量太少无法直接称重者,根据矿物数量、粒径及密度换算成质量。根据重矿物与原样质量之比求取重矿物含量。矿物统计过程中,要求陆源矿物的统计总数在400颗以上,不足者,将矿物全部数完。在此基础上编制重矿物丰度对比图(图2),以确定各构造单元重矿物组成及分布特征。然后进行Q型聚类分析,从而确定重矿物组合分区。并利用主因子分析法确定各构造单元重矿物组合类型,从而判断母岩类型。最后,依据重矿物ZTR指数判断物源方向和沉积物搬运路径。

### 2.2 重矿物类型及含量

四川盆地须家河组重矿物主要有锆石、电气石、磁铁矿、赤铁矿、褐铁矿、白钛矿、绿泥石、石榴子石、绿帘石、黝帘石和硬绿泥石等。其中,最主要的重矿物为锆石(8.57%~66.3%)、白钛矿(10.44%~61.19%)、电气石(0~25.13%)、磁铁矿(0~27.43%)、绿帘石(0~14.47%)和绿泥石(0~11.94%)。锆石为粒状、单锥柱状或双锥柱状,无色及烟色,部分具有磨圆外形;白钛矿为粒状,反射光下呈瓷白色;电气石为片柱状,烟色,多色性明显,正交光下具环带;磁铁矿为粒状,反射光下呈钢灰色;绿帘石为粒状,黄绿色,具鲜艳干涉色;绿泥石为片状,墨绿色。

平面上,不同地区重矿物组成表现出不同的特征(图2,表1)。须二段,LV1井区以白钛矿、锆石、电气石和磁铁矿为主,其次为绿泥石和褐铁矿等;H5井区以锆石、白钛矿和电气石为主,其次为磁铁矿、绿泥石和绿帘石等;G1井区以锆石、电气石和白钛矿为主,其次为绿帘石、绿泥石和磁铁矿等。G19井区以白钛矿、锆石和电气石为主,其次为磁铁矿和绿泥石等。整体上,LV1井区和G19井区重矿物组

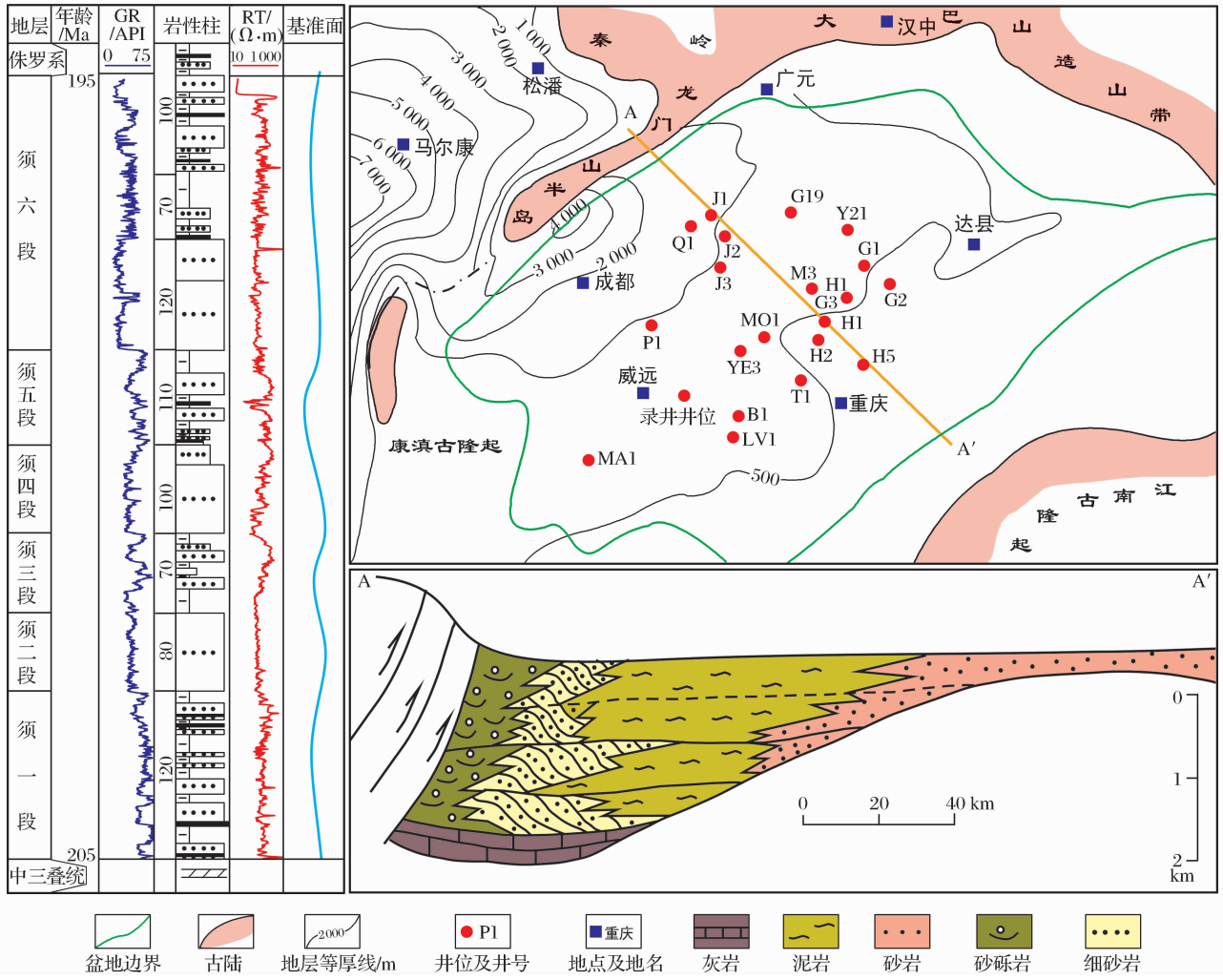


图1 四川盆地上三叠统地层及古构造背景特征

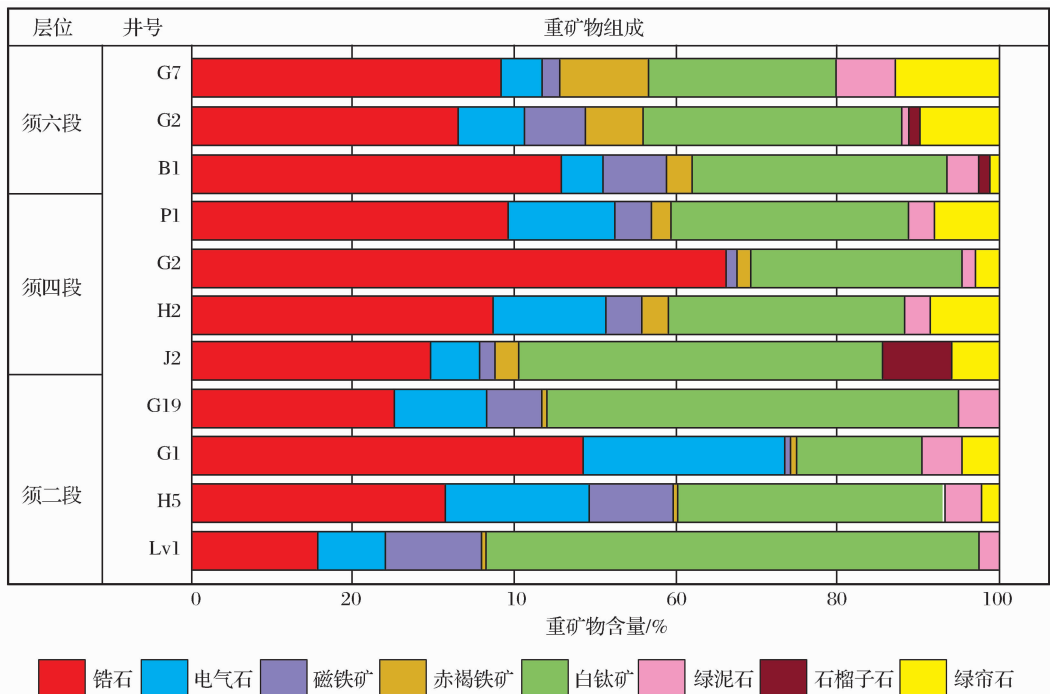


图2 四川盆地上三叠统重矿物含量对比

表 1 四川盆地上三叠统重矿物含量统计

井号	构造单元	层位	ZTR /%	锆石 /%	电气石 /%	磁铁矿 /%	赤铁矿 /%	褐铁矿 /%	白钛矿 /%	绿泥石 /%	石榴子石 /%	绿帘石 /%	黝帘石 /%	硬绿泥石 /%
B1	荷包场	须二段	32.84	8.57	22.86	7.14	0.00	0.00	57.14	4.29	0.00	0.00	0.00	0.00
G19	公山庙	须二段	37.91	24.77	11.26	6.76	1.80	0.00	50.45	4.95	0.00	0.00	0.00	0.00
G1	广安	须二段	73.81	48.68	25.13	0.79	0.00	0.26	15.61	5.03	0.00	4.50	0.00	0.00
G2	广安	须二段	63.16	55.92	7.24	1.32	0.00	1.32	17.11	2.63	0.00	14.47	0.00	0.00
H5	合川	须二段	51.75	31.38	17.99	10.46	0.00	0.00	33.47	4.6	0.00	2.09	0.00	0.00
LV1	龙女寺	须二段	24.46	15.52	8.36	11.94	0.00	0.60	61.19	2.39	0.00	0.00	0.00	0.00
MO1	磨溪	须二段	63.84	48.21	15.64	1.30	0.00	1.63	26.06	2.28	0.00	4.89	0.00	0.00
T1	潼南	须二段	33.00	23.06	8.98	27.43	0.00	3.40	33.50	2.91	0.00	0.73	0.00	0.00
Y21	营山	须二段	35.32	26.61	8.72	0.00	0.00	9.17	45.87	0.00	0.00	9.63	0.00	0.00
YE3	安岳	须二段	38.56	21.04	16.09	7.43	0.00	0.00	49.01	3.71	0.00	2.72	0.00	0.00
M3	庙高寺	须二段	29.73	16.43	11.97	18.31	0.23	0.00	44.60	4.46	0.00	3.99	0.00	0.00
B1	荷包场	须六段	52.89	45.63	5.16	7.94	3.17	0.00	31.75	3.97	1.19	1.19	0.00	0.00
G6	广安	须六段	58.41	50.79	7.61	1.47	0.05	6.59	14.08	11.94	0.00	6.41	1.05	0.00
G7	广安	须六段	43.07	37.89	5.18	1.89	0.00	11.40	22.76	7.41	0.00	12.74	0.73	0.00
G2	广安	须六段	41.32	32.86	8.46	7.42	0.00	7.07	32.16	0.80	1.26	9.97	0.00	0.00
G4	广安	须六段	49.28	41.53	7.75	3.31	1.65	0.83	41.12	3.82	0.00	0.00	0.00	0.00
G5	广安	须六段	50.35	40.66	8.84	4.15	0.41	0.79	40.65	2.50	0.00	1.13	0.00	1.69
YE3	安岳	须六段	48.51	39.18	9.33	10.07	0.00	0.00	38.43	2.99	0.00	0.00	0.00	2.99
G8	广安	须六段	40.83	31.65	5.57	12.66	0.51	0.76	39.49	8.86	0.00	0.51	0.00	0.00
MA1	麻柳场	须六段	40.22	31.55	8.46	7.77	0.22	4.07	37.62	1.46	1.22	7.31	0.00	0.51
J2	八角场	须四段	35.71	29.48	5.93	1.79	0.19	2.86	44.90	0.07	8.50	5.74	0.00	0.00
Q1	秋林	须四段	36.98	28.30	6.42	2.26	0.00	0.74	45.91	0.50	9.20	6.43	0.00	0.00
J1	八角场	须四段	40.21	35.53	3.95	10.53	1.32	0.00	45.26	1.84	0.00	1.58	0.00	0.00
J3	金华	须四段	38.51	30.13	4.68	7.53	0.00	1.82	44.68	9.61	1.04	0.52	0.00	0.00
H1	合川	须四段	51.78	38.42	13.35	4.83	0.37	2.46	29.76	3.05	0.00	7.19	0.50	0.00
H2	合川	须四段	51.20	36.99	14.21	4.62	0.00	3.22	29.37	3.21	0.00	8.38	0.00	0.00
P1	平泉	须四段	52.42	38.95	13.47	4.48	1.49	1.00	29.37	3.24	0.00	8.00	0.00	0.00
G2	广安	须四段	66.30	66.30	0.00	1.10	0.00	1.66	26.52	1.66	0.00	2.76	0.00	0.00
G1	广安	须四段	64.49	62.71	1.78	2.80	0.00	0.00	13.08	7.48	0.00	8.41	3.74	0.00
G3	广安	须四段	74.74	65.88	8.86	1.31	0.47	4.90	14.99	1.35	0.00	1.18	0.00	1.50
Y21	营山	须四段	67.45	64.45	3.01	6.03	1.40	3.61	10.44	5.61	3.05	2.40	0.00	0.00

成相似,且由 LV1 井区到 G1 井区,锆石和电气石含量增加,白钛矿含量减少,且次要矿物绿泥石和绿帘石含量增加。

须四段,J2 井区以白钛矿和锆石为主,其次为石榴子石、电气石、绿帘石、褐铁矿、磁铁矿等;H2 井区以锆石、白钛矿和电气石为主,其次为绿帘石、磁铁矿、褐铁矿和绿泥石等;G2 井区以锆石和白钛矿为主,其次为绿帘石、绿泥石、褐铁矿和磁铁矿等。P1 井区重矿物组成与 H2 井区相似,以锆石、白钛矿和电气石为主,其次为绿帘石、磁铁矿、褐铁矿和绿泥石等。J2 井区相对于其他地区,石榴子石含量明显加大(达 8.5%),表明存在着不同性质的母岩。

须六段,B1 井区以锆石、白钛矿和磁铁矿为主,其次为磁铁矿、电气石、绿泥石和绿帘石等;G2 井区以锆石和白钛矿为主,其次为绿帘石、电气石、磁铁矿、褐铁矿等;G7 井区以锆石、白钛矿、绿帘石、褐铁矿为主,其次为绿泥石、电气石和磁铁矿等。与须二段相比,须四段和须六段中赤褐铁矿和绿帘石含量明显增加(达 11.55%),电气石含量明显减少。

整体上,须家河组以超稳定型重矿物为主,重矿物磨圆性较好,不同层段重矿物组成差异不大,表明晚三叠世源区相对稳定,沉积物遭受了长距离的搬运。平面上,不同地区重矿物组成稍有差异,这可能与受到不同物源区的影响有关。

### 3 母岩类型及物源位置

#### 3.1 母岩类型

为了确定母岩类型,研究过程中采用了聚类分析方法。聚类分析又称簇分析或群分析,是多元统计中的一种数字分类方法。其实质是根据样本或变量之间的相似程度或亲疏关系把它们逐步分类的方法<sup>[15-16]</sup>。根据研究目的和对象的不同,分为Q型和R型聚类分析。Q型聚类分析是研究样本间的相互关系,而R型聚类分析是研究变量之间的相互关系。在进行重矿物组合分区时,运用了Q型聚类分析进行辅助,通过确定样本间的相似程度而对样本进行分类,类之间的距离采用离差平方和法、相似性系数、欧氏距离等相似性统计量(图3)。Q型聚类可以显示聚类过程,可以看出各分区之间的相关性,从而比较客观地划分出重矿物组合分区<sup>[15-17]</sup>。在确定各地区的重矿物组合类型时,运用了多元统计中的因子分析法。它用少数几个因子,去描述许多因素之间的关系,即将相互之间关系比较密切的几个变量归在同一个类别之中,每一类变量成为一个因子。运用因子分析的方法来研究重矿物的组合关系是比较客观的方法<sup>[18-20]</sup>。

须家河组由于物源众多,同一地区不同时期受到不同物源的影响<sup>[14]</sup>,故必须要对样品按层段分析。分析过程中,为了排除重矿物取样和鉴定过程中人为因素的影响,对同一井位同一层段的数据去除异常值后求平均值,再进行聚类分析。分析结果若与地质背景或其他分析方法统计结果完全不吻合,则对该点进行剔除。对于样品点较少的井,则首先进行试分析,再对分析结果进行分析。

须二段聚类谱系图(图3)表明,当相似性水平为40时,所有样品聚为3类:T2A类包括B1井、LV1井、G19井、YE3井和Y21井,T2B类包括H5井、T1井和M3井,T2C类包括G1井、MO1井和G2井。运用主因子分析方法得出须二段重矿物组合以锆石+电气石组合和白钛矿+磁铁矿+电气石组合为主,其次为磁铁矿+绿泥石+绿帘石组合。第一种类型的重矿物组合反映的母岩可能为沉积岩,第二种组合为低级变质岩,第三种组合为高级变质岩<sup>[21-22]</sup>,因此该地区的母岩以沉积岩和低级变质岩为主,其次为高级变质岩。其中,T2A类以白钛矿+磁铁矿+电气石组合和锆石+电气石组合为主,磁铁矿+绿泥石+绿帘石组合含量较少,表明LV1-B1井区和YE3-G19-Y21井区母岩以低级变

质岩和沉积岩为主。T2B类以锆石+电气石组合和白钛矿+磁铁矿+电气石组合为主,表明T1-H5-M3井区母岩以沉积岩和低级变质岩为主。T2C类以锆石+电气石组合为主,磁铁矿+绿泥石+绿帘石组合含量增加,白钛矿+磁铁矿+电气石组合含量减少,表明G1-G2-MO1井区母岩中沉积岩和高级变质岩含量增加,低级变质岩含量减少。

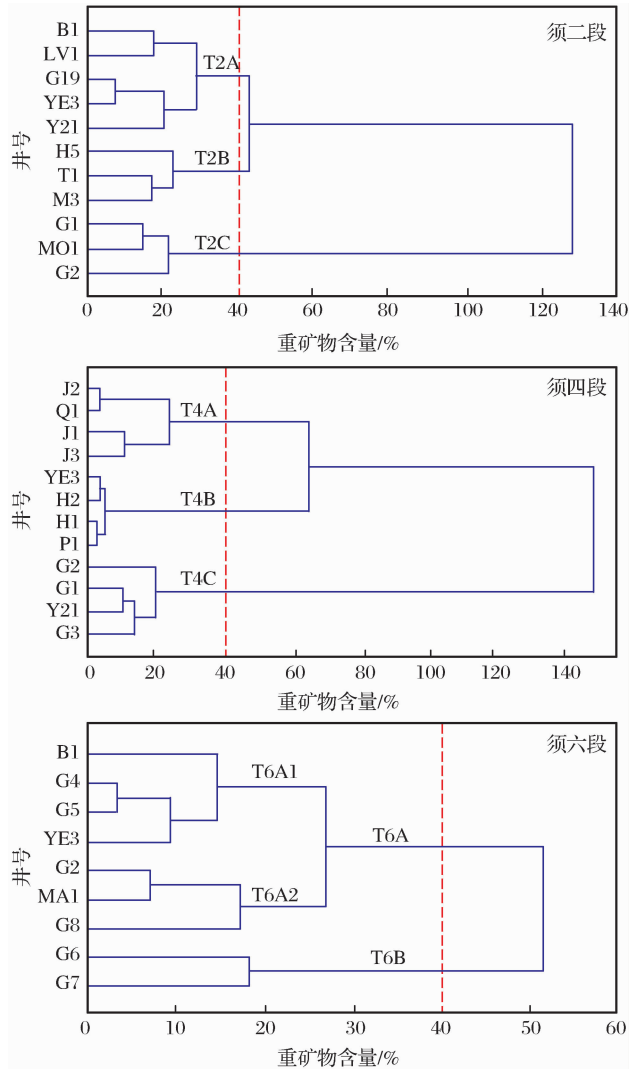


图3 四川盆地上三叠统须家河组Q型聚类谱系特征

须四段聚类谱系图(图3)表明,当相似性水平为40时,所有样品亦可聚为3类:T4A类有J2井、Q1井、J1井和J3井,T4B类有YE3井、H1井、H2井和P1井,T4C类有G1井、G2井、Y21井和G3井。运用主因子分析方法得出须四段重矿物组合主要为锆石+电气石组合和白钛矿+磁铁矿+电气石组合,其次为石榴子石+绿帘石+磁铁矿组合,反映母岩类型主要为沉积岩和低级变质岩,其次为高级变质岩。其中,T4A类白钛矿+磁铁矿+电气石组合含量较高,锆石+电气石组合和石榴子石+绿帘



石+磁铁矿组合含量较少,表明其受低级变质岩物源影响较多,沉积岩含量相对较少。T4B类和T4C类锆石+电气石组合含量较高,白钛矿+磁铁矿+电气石组合和石榴子石+绿帘石+磁铁矿组合含量减少,表明母岩中沉积岩含量增加。而对于T4A,石榴子石+绿帘石+磁铁矿组合明显高于其他地区,表明其受到高级变质岩母岩的影响较大。

须六段聚类谱系图(图3)表明,当相似性水平为40时,所有样品聚为2类,其中T6A类可进一步细分为T6A1亚类和T6A2亚类。其中T6A1亚类有B1井、G4井、G5井和YE3井,T6A2亚类有G2井、MA1井和G8井。T6B类有G6井和G7井。与须二段和须四段相似,该段重矿物主要为锆石+电气石组合和白钛矿+磁铁矿+电气石组合,其次为石榴子石+绿帘石+磁铁矿组合,反映母岩类型主要为沉积岩和低级变质岩,其次为高级变质岩。其中,T6A2

亚类和T6B类石榴子石+绿帘石+磁铁矿组合含量较高,表明受高级变质岩源区影响较多。

总之,须家河组须二段、须四段、须六段母岩类型以沉积岩和低级变质岩为主,高级变质岩含量相对较低。平面上,盆地西北部母岩中沉积岩和低级变质岩含量相对较高,而盆地东北部和东南部低级变质岩和高级变质岩含量相对较高。纵向上,母岩中低级变质岩和高级变质岩的含量逐渐增加,沉积岩的含量逐渐减少,反映了盆地周缘造山带的“脱顶历史”。

### 3.2 物源位置

本文选取研究区45口井147块样品数据(表1),结合砂岩厚度资料和前人<sup>[6,14,23]</sup>物源分析成果,编制了ZTR指数平面等值线图(图4)。

重矿物依据风化稳定性的不同,可划分为稳定重矿物和不稳定重矿物2类。稳定重矿物抗风化能力强、分布广,随着离母岩区的距离越来越远其含量

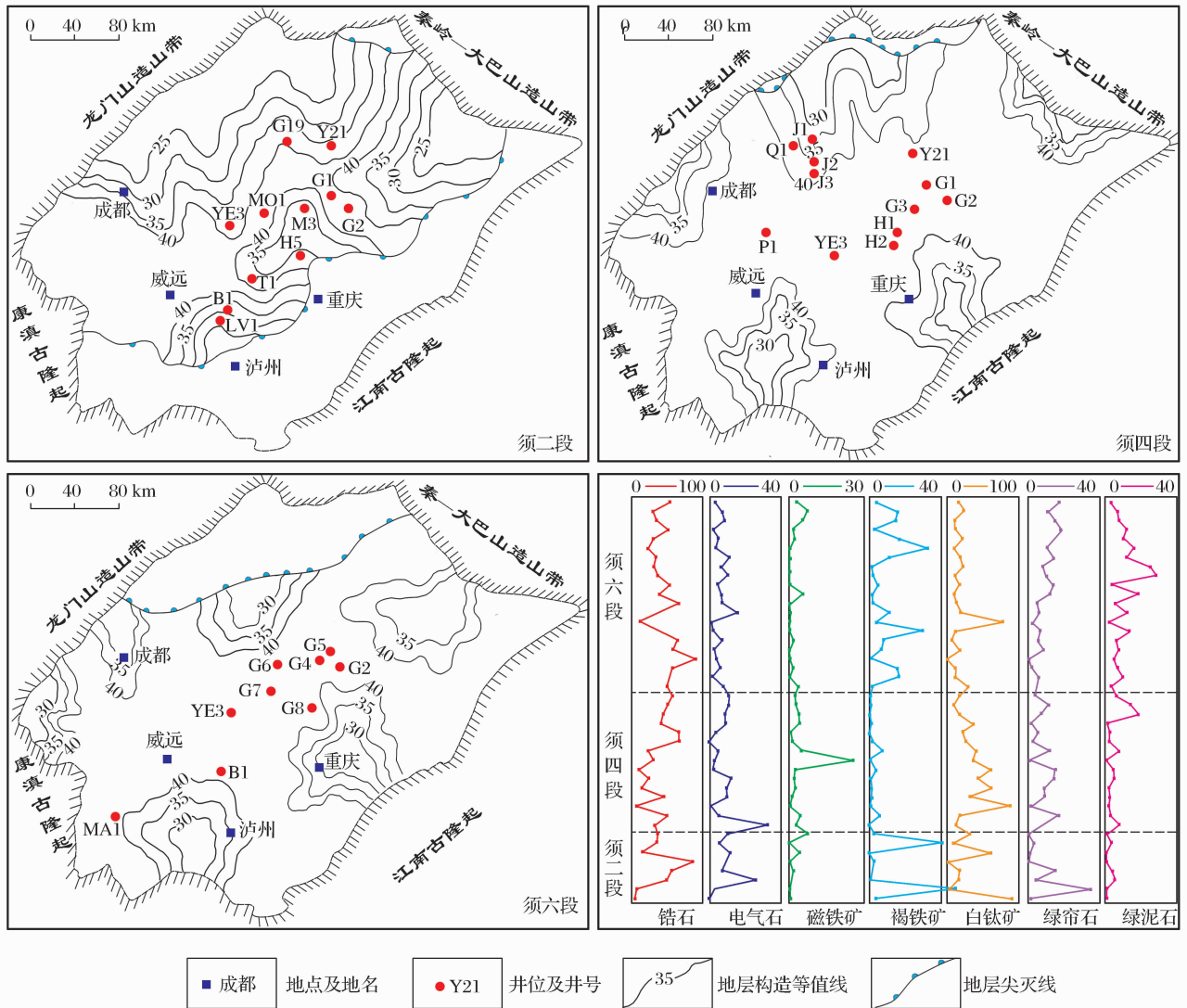


图4 四川盆地上三叠统须家河组重矿物 ZTR 指数等值线

也会相对升高;而不稳定重矿物抗风化能力弱、分布局限,且远离母岩区含量逐渐减少<sup>[24]</sup>。ZTR 指数是指样品中由稳定型重矿物锆石(Z)、电气石(T)和金红石(R)组成的透明矿物组合的百分含量。重矿物 ZTR 指数可以反映物源区的位置和沉积物的搬运方向。ZTR 指数越大,重矿物成分成熟度越高,离物源区则越远。从图 4 中可以看出,晚三叠世四川盆地主要发育 4 大物源体系,不同时期 ZTR 指数分布特征存在继承性。

须二段发育 5 个 ZTR 指数低值分布区,分别位于川西北部、川东北部和盆地东南。

(1)川西北部 ZTR 指数低值区分布范围较大,由西北向东南逐渐增大,表明物源由西北向东南方向进入盆地。该地区以白钛矿+磁铁矿+电气石组合和锆石+电气石重矿物组合为主,磁铁矿+绿泥石+绿帘石组合含量较少,表明物源以低级变质岩和沉积岩为主。

(2)在四川盆地东北部,ZTR 指数由东北向西南逐渐增大,表明物源由东北向西南流入盆地。该地区以锆石+电气石组合为主,磁铁矿+绿泥石+绿帘石组合含量增加,白钛矿+磁铁矿+电气石组合含量减少,反映母岩中沉积岩和高级变质岩含量增加,低级变质岩含量减少。

(3)四川盆地东南部,ZTR 指数有 2 个分支,均由东南向西北逐渐增大,表明物源来自于东南方向,可能与江南古陆有关<sup>[24]</sup>,但主要沿着 2 条河道流入盆地。盆地东南地区重矿物组成相对复杂,对于上一个分支,以锆石+电气石组合和白钛矿+磁铁矿+电气石重矿物组合为主,表明母岩以沉积岩和低级变质岩为主。而对于下一个分支,以白钛矿+磁铁矿+电气石组合和锆石+电气石重矿物组合为主,磁铁矿+绿泥石+绿帘石组合含量较少,表明母岩以低级变质岩和沉积岩为主。该时期盆地中部和川西南部 ZTR 指数均较大( $>60\%$ ),表明龙门山南段尚未隆升,多物源在该地区汇聚。

须四段发育 5 个 ZTR 指数低值区,分别位于川西南部、川西北部、川东北部和盆地东南。

(1)川西南部位于成都以西地区,ZTR 指数由西向东逐渐增大,表明物源由西向东进入盆地。该地区重矿物组合以锆石+电气石为主,含有少量白钛矿+磁铁矿+电气石组合,反映母岩主要为沉积岩,夹杂有少量低级变质岩。

(2)川西北部 ZTR 指数低值区分布范围相对较大,ZTR 值由西北向东南逐渐增大,反映物源从西

北方向进入盆地。该地区以锆石+电气石组合和白钛矿+磁铁矿+电气石组合为主,含有少量石榴子石+绿帘石+磁铁矿组合,表明母岩以低级变质岩和沉积岩为主,少量高级变质岩开始出现。

(3)川东北部 ZTR 指数低值区分布范围较小,ZTR 值由东北向西南方向逐渐增大,反映物源从东北方向进入盆地。

(4)四川盆地东南部位发育 2 支 ZTR 指数低值区,上支 ZTR 值由东南向西北逐渐增大,反映物源从东南方向进入盆地,下支 ZTR 值由南向北进入盆地,代表物源来源于南方。

川东北部和盆地东南部均以白钛矿+磁铁矿+电气石组合和锆石+电气石重矿物组合为主,石榴子石+绿帘石+磁铁矿组合含量较少,表明母岩主要为以低级变质岩和沉积岩为主,高级变质岩含量较低。但相对于川东北部,母岩中高级变质岩含量相对增多。盆地内部 ZTR 指数值较高( $>40\%$ ),以锆石+电气石组合为主,白钛矿+磁铁矿+电气石组合和石榴子石+绿帘石+磁铁矿组合含量较低,这可能与川西北部沉积岩先遭受剥蚀有关。

须六段也主要发育 6 个 ZTR 指数低值区,分别位于川西南部、川西北部、川东北部和盆地东南。

(1)川西南部存在 2 个 ZTR 指数低值区,分别位于成都以西和盆地的西南角,ZTR 值由西向东逐渐变大,反映物源主要来自于西部。该地区以锆石+电气石重矿物组合为主,含有少量白钛矿+磁铁矿+电气石组合。但与须四段相比,白钛矿+磁铁矿+电气石组合明显增加,表明母岩仍以沉积为主,但低级变质岩含量明显增加。

(2)川西北部 ZTR 指数低值区位于 G6 井以北,ZTR 值由北向南逐渐增大,反映物源来自于盆地西北部。该地区以锆石+电气石重矿物组合为主,含有少量白钛矿+磁铁矿+电气石组合。表明母岩以沉积岩为主,含有少量低级变质岩。

(3)川东北部 ZTR 值分布与须四段基本相似,表明源区位置基本没有变。

(4)四川盆地东南部仍发育 2 个 ZTR 指数低值区,分布特征与须四段基本一致。

与须四段相似,川东北部和盆地东南部均以白钛矿+磁铁矿+电气石组合和锆石+电气石重矿物组合为主,石榴子石+绿帘石+磁铁矿组合含量较少,表明母岩主要为以低级变质岩和沉积岩为主,高级变质岩含量较低。

总之,须家河组发育时期,主要发育 4 个物源,

分别位于川西南部、川西北部、川东北部和盆地东南方向,物源位置具有明显的继承性。母岩以沉积岩、低级变质岩为主,在川东北部和盆地东南地区高级变质岩也是一种重要的母岩类型。

为了解重矿物组成的纵向演化,编制了广安地区重矿物组成纵向分布图(图3)。整体上,重矿物以锆石和白钛矿为主,含有少量的电气石、绿帘石、绿泥石、磁铁矿和褐铁矿,表明母岩以沉积岩和低级变质岩为主,并含有少量的高级变质岩。其中,锆石和磁铁矿含量纵向分布稳定,白钛矿和电气石含量则逐渐降低。须二段,白钛矿含量在40%~60%之间,电气石含量在25%~35%之间,须四段中部,白钛矿含量高达60%~70%,须四段中部之上,白钛矿和电气石含量逐渐降低,到了须六段,白钛矿含量平均只有25%左右。白钛矿和电气石含量逐渐降低可能与须四段之后母岩中低级变质岩含量逐渐减少有关。纵向上,绿帘石、绿泥石和褐铁矿则呈逐渐增加的趋势,须二段和须四段含量均较低,须六段含量突然增加,这可能与母岩中高级变质岩含量突然增多有关。

## 4 讨论

四川盆地是在晚三叠世华南板块和华北板块碰撞基础上形成的,华南板块和华北板块的相互碰撞造成龙门山褶皱带的形成<sup>[14,25-31]</sup>。然而,关于龙门山褶皱带的具体形成过程及形成机理,尤其对于龙门山北段和龙门山南段的形成过程,尚存在很多争议。研究认为,晚三叠世,龙门山褶皱带开始逐渐形成,龙门山北段在须二期已露出水面遭受剥蚀,而龙门山南段在须四期才开始露出水面遭受剥蚀。

须二期,龙门山北段已经隆升遭受剥蚀,但龙门山南段仍是水下隆起或尚未隆升,四川盆地与外海仍保持着联系。主要证据有:①川西北部发育ZTR低值区,ZTR值由西北向东南逐渐增大,龙门山南段ZTR低值区不发育,ZTR值均在40%之上。②川西北部出现了厚度达7.5~28.5m的砾岩、砂砾岩层,以及厚度不等的含砾砂岩,砾岩的砾石成分主要为石灰岩、白云岩,另有少量燧石、石英岩等;龙门山南段尚未出现上述砾岩<sup>[29]</sup>。该时期龙门山北段母岩中低级变质岩的出现,表明盆地远端上覆的碳酸盐岩沉积已消耗蚀尽,基底开始遭受剥蚀。

须四期,龙门山北段继续隆升遭受剥蚀,龙门山中段和南段也开始抬升遭受剥蚀,并向盆地提供物源。该时期川西北段和川西南段均发育ZTR低值

区,ZTR值分别由西北向东南和由西向东逐渐增大。对于川西北部,母岩仍以低级变质岩和沉积岩为主,但重矿物中石榴子石含量突然增大(达8.5%),表明随着龙门山北段的继续抬升,下伏的古老变质基底也逐渐暴露。对于川西南部,母岩则以沉积岩为主,低级变质岩基本没有出现,这可能与龙门山南段刚开始抬升,下伏基底尚未暴露有关。

须六期,龙门山地区已全面抬升,随着周缘板块由西北向东南挤压,川西北段剥蚀范围扩大。该时期川西北段母岩以沉积岩为主,含有少量的高级变质岩,高级变质岩没有出现,这可能与其搬运距离较远有关。龙门山南段母岩仍以沉积岩为主,低级变质岩开始出现,这反映了上覆沉积岩已剥尽,下伏变质岩基底开始遭受剥蚀。

## 5 结论

(1)晚三叠世,四川盆地以超稳定型重矿物为主,磨圆性较好,不同层段重矿物组成差异不大,表明晚三叠世源区相对稳定,沉积物经历了长距离的搬运。

(2)晚三叠世,四川盆地母岩类型以沉积岩和低级变质岩为主,高级变质岩含量相对较低。由下至上,母岩中低级变质岩和高级变质岩的含量逐渐增加,沉积岩含量逐渐减少,反映了盆地周缘造山带的“脱顶历史”。

(3)晚三叠世,四川盆地主要发育4个物源,分别位于川西南部、川西北部、川东北部和盆地东南方向,物源位置具有明显的继承性。

(4)晚三叠世,龙门山褶皱带开始逐渐形成。须二期,龙门山北段已露出水面遭受剥蚀,但龙门山南段仍是水下隆起或尚未隆升。须四期,龙门山北段继续隆升遭受剥蚀,龙门山南段也开始抬升遭受剥蚀,并向盆地提供物源。须六期,龙门山地区全面抬升遭受剥蚀,并向盆地提供物源。

## 参考文献(References):

- [1] Wu Chaodong, Lin Changsong, Shen Yanping, *et al.* Sandstone composition and heavy mineral assemblages manifesting attributes of source areas in Jurassic Kuche depression[J]. *Advances of Natural Science*, 2005, 15(3): 291-297. [吴朝东, 林杨松, 申延平, 等. 库车坳陷侏罗系砂岩组分和重矿物组合特征及其源区属性[J]. *自然科学进展*, 2005, 15(3): 291-297.]
- [2] Morton A C. Influences of provenance and diagenesis on detrital garnet suites in the forties sandstone, paleocene, central North Sea[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1987, 57:



- 1027-1032.
- [3] Dill H G. Can REE patterns and U-Th variations be used as a tool to determine the origin of apatite in elastic rocks[J]. *Sedimentary Geology*, 1994, 92(3/4): 175-196.
- [4] Jiao Yangquan, Li Zhen, Zhou Haiming. The integrated study of sediment sources in sedimentary basins: An example from the Eocene Nanpu rift subbasin[J]. *Lithofacies Palaeogeography*, 1998, 18(5): 16-20. [焦养泉, 李珍, 周海明. 沉积盆地物质来源综合研究——以南堡老第三纪亚断陷盆地为例[J]. *岩相古地理*, 1998, 18(5): 16-20.]
- [5] Sun Xiaoxia, Li Yong, Qiu Dongzhou, *et al.* The heavy minerals and provenances of the Neogene Guantao Formation in the Huanghua depression[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2006, 26(3): 61-66. [孙小霞, 李勇, 丘东洲, 等. 黄骅坳陷新近系馆陶组重矿物特征及物源区意义[J]. *沉积与特提斯地质*, 2006, 26(3): 61-66.]
- [6] Wang Bijun. *Petroleum Geology of China: Vol. 10* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1987: 67-69. [王宓君. *中国石油地质志: 卷十* [M]. 北京: 石油工业出版社, 1987: 67-69.]
- [7] He Zhonghua, Liu Zhaojun, Zhang Feng. Latest progress of heavy mineral research in the basin analysis[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2001, 20(4): 29-32. [和钟铨, 刘招君, 张峰. 重矿物在盆地分析中的应用研究进展[J]. *地质科技情报*, 2001, 20(4): 29-32.]
- [8] Liu S F, Liu W C, Dai S W. Thrusting and exhumation processes of a bounding mountain belt: Constraints from sediment provenance analysis of the Hefei basin[J]. *Geologica Sinica: English Edition*, 2001, 75(2): 144-150.
- [9] Hou Fanghao, Jiang Yuqiang, Fang Shaoxian. Sedimentary model of sandstone in second and fourth members of Xiangxi Formation in the upper Triassic of Sichuan basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 26(2): 30-37. [侯方浩, 蒋裕强, 方少仙. 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.]
- [10] Zhang Jian, Li Guohui, Xie Jirong. Stratigraphic division and correlation of upper Triassic in Sichuan basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(1): 12-16. [张健, 李国辉, 谢继容. 四川盆地上三叠统划分对比研究[J]. *天然气工业*, 2006, 26(1): 12-16.]
- [11] Zhao Xiafei, Lv Zonggang, Zhang Wenlin, *et al.* Paralic tidal deposits in the upper Triassic Xujiahe Formation in Anyue area, the Sichuan basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2008, 28(4): 14-18. [赵霞飞, 吕宗刚, 张闻林, 等. 四川盆地安岳地区须家河组—近海潮汐沉积[J]. *天然气工业*, 2008, 28(4): 14-18.]
- [12] Shi Zhensheng, Yang Wei, Jin Hui, *et al.* Study on sedimentary facies of the upper Triassic in central and south Sichuan province[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(2): 211-220. [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.]
- [13] Lin Liangbiao, Chen Hongde, Zhai Changbo, *et al.* Sandstone compositions and paleogeographic evolution of the upper Triassic Xujiahe Formation in the western Sichuan basin, China[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2006, 28(6): 511-517. [林良彪, 陈洪德, 翟常博, 等. 四川盆地西部须家河组砂岩组分及其古地理探讨[J]. *石油实验地质*, 2006, 28(6): 511-517.]
- [14] Shi Zhensheng, Yang Wei, Xie Zengye, *et al.* Upper Triassic clastic composition in Sichuan basin, southwest China: Implication for provenance analysis and the Indosinian orogeny[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(3): 387-397. [施振生, 杨威, 谢增业, 等. 四川盆地晚三叠世碎屑组分对源区分析及印支运动的指示[J]. *地质学报*, 2010, 84(3): 387-397.]
- [15] Wu Fadong, Lu Yongchao, Ruan Xiaoyan. Application of heavy minerals cluster analysis to study of clastic sources and stratigraphic correlation[J]. *Geoscience*, 1996, 10(3): 397-403. [武法东, 陆永潮, 阮小燕. 重矿物聚类分析在物源分析及地层对比中的应用——以东海陆架盆地西湖凹陷平湖地区为例[J]. *现代地质*, 1996, 10(3): 397-403.]
- [16] Zhao Pengda, Hu Wangliang, Li Zijin. *Statistics and Forecast of Mineral Deposits* [M]. Beijing: Geological Press, 1983: 126-134. [赵鹏大, 胡旺亮, 李紫金. *矿床统计预测* [M]. 北京: 地质出版社, 1983: 126-134.]
- [17] Wang Kunshan, Shi Xuefa, Lin Zhenhong. Assemblages, provinces and provenances of heavy minerals on the shelf of the southern yellow sea and northern East China Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2003, 21(1): 31-40. [王昆山, 石学法, 林振宏. 南黄海和东东北部陆架重矿物组合分区及来源[J]. *海洋科学进展*, 2003, 21(1): 31-40.]
- [18] Li Zhen, Jiao Yangquan, Liu Chunhua, *et al.* Source analysis of heavy minerals in Gaoliu area, Huanghua depression[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1998, 25(6): 5-7. [李珍, 焦养泉, 刘春华, 等. 黄骅坳陷高柳地区重矿物物源分析[J]. *石油勘探与开发*, 1998, 25(6): 5-7.]
- [19] Ma Feng, Liu Li, Yan Hua. Application of the statistical analysis in researching the type of mother rock in the west strata of Songliao basin[J]. *Global Geology*, 2003, 22(4): 331-338. [马峰, 刘立, 阎华. 统计分析在松辽盆地西部地层母岩类型研究中的应用[J]. *世界地质*, 2003, 22(4): 331-338.]
- [20] Chang Zhaoguang, Wang Qinghe, Song Daicai, *et al.* *Management Method of Random Data* [M]. Dongying: Petroleum University Press, 1997: 281-299. [常兆光, 王清河, 宋岱才, 等. *随机数据处理方法* [M]. 东营: 石油大学出版社, 1997: 281-299.]
- [21] Ge Dingyi, Tian Huixin, Zeng Ruogu. *Concise Course of Mineralogy* [M]. Beijing: Geological Press, 1989: 127-142. [戈定夷, 田慧新, 曾若谷. *矿物学简明教程* [M]. 北京: 地质出版社, 1989: 127-142.]
- [22] Li Zhong, Wang Daoxuan, Lin Wei, *et al.* Mesozoic-Cenozoic clastic composition in Kuqa depression, northwest China: Implication for provenance types and tectonic attributes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(3): 655-666. [李忠, 王道轩, 林伟, 等. 库车坳陷中—新生界碎屑组分对物源类型及其构造属性的指示[J]. *岩石学报*, 2004, 20(3): 655-666.]
- [23] Guo Zhengwu, Deng Kangling, Han Yonghui. *Formatin and Evolution of Sichuan Basin* [M]. Beijing: Geological Publishing

- House, 1996; 70-116. [郭正吾, 邓康龄, 韩永辉. 四川盆地形成与演化[M]. 北京:地质出版社, 1996; 70-116.]
- [24] Feng Zengzhao. Sedimentary Petrography[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993; 54-58. [冯增昭. 沉积岩石学[M]. 北京:石油工业出版社, 1993; 54-58.]
- [25] Liu Hefu, Liang Huishe, Cai Liguang, *et al.* Structural systems of the Longmenshan thrust belt and evolution of the foreland basin in western Sichuan province, China[J]. Acta Geologica Sinica, 1994, 68(2): 100-117. [刘和甫, 梁慧社, 蔡立国, 等. 川西龙门山冲断系构造样式与前陆盆地演化[J]. 地质学报, 1994, 68(2): 100-117.]
- [26] Jia Dong, Chen Zhuxin, Jia Chengzao, *et al.* Structural features of the Longmenshan fold and thrust belt and the western Sichuan foreland basin, central China[J]. Geological Journal of China Universities, 2003, 9(3): 462-469. [贾东, 陈竹新, 贾承造, 等. 龙门山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): 462-469.]
- [27] Meng Qingren, Wang Erchie, Hu Jianmin. Mesozoic sedimentary evolution of the northwest Sichuan basin: Implication for continued clockwise rotation of the south China block[J]. GSA Bulletin, 2005, 17(3): 396-410.
- [28] Liu Shaofeng, Ronald Steel, Zhang Guowei. 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: 9-27.
- [29] Deng Kangling. Indosinian progressive deformation and its chronogenesis in Longmenshan structural belt[J]. Oil and Gas Geology, 2007, 28(4): 485-490. [邓康龄. 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, 2007, 28(4): 485-490.]
- [30] Yang Wei, Wei Guoqi, Li Yuegang. Diagenesis of second member reservoir of Xujiache Formation and its influence on the reservoir development, western Sichuan[J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(2): 188-192. [杨威, 魏国齐, 李跃纲. 川西地区须家河组二段成岩作用及其对储层发育的影响[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(2): 188-192.]
- [31] Yang Wei, Wei Guoqi, Li Yuegang. Main controlling factors and densification periods of the reservoir development of Xujiache Formation second member, western Sichuan[J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(6): 796-800. [杨威, 魏国齐, 李跃纲. 川西地区须家河组二段储层发育的主控因素和致密化时间探讨[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(6): 796-800.]

## The Heavy Minerals and Provenances of the Upper Triassic Xujiache Formation in Sichuan Basin

SHI Zhen-sheng<sup>1,2</sup>, WANG Xiu-qin<sup>2</sup>, WU Chang-jiang<sup>3</sup>

(1. China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;

2. Langfang Branch of PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Langfang 065007, China;

3. PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu 610051, China)

**Abstract:** Hyperstable heavy minerals with little diversity in different members were dominated in the upper Triassic Xujiache Formation of Sichuan basin. Heavy mineral measurement is not only helpful to accurate restoration of depositional systems and ancient water systems, but also reveal the rock-tectonic attribute of Longmen Shan and recovery of tectonic uplift history. Q-cluster and principal factor show that the parent rock in the Xujiache Formation is dominated by sedimentary rocks and low-level metamorphic rocks, as well as low content of high-grade metamorphic rocks. The content of high-grade metamorphic rocks increases from section bottom to top. ZTR index shows that 4 main source areas in the late Triassic Sichuan basin are located in south-west, north-west, north-east and south-east of Sichuan basin, respectively. The distribution of source areas exist inherited. Based on tectonic belt and sedimentology of previous research, the Longmen Shan fold belt begin to form at late Triassic Period. At the second phase of Xujiache Formation, the northern section of Longmen Shan had been exposed and eroded, but the southern section was still underwater or not yet uplifted. At the fourth phase, the northern section of Longmen Shan continued uplift and suffered erosion, whereas the southern section started uplift and erosion and provided the sediments toward the basin. At the sixth phase, the Longmen Shan was uplifted fully and provided sediments to the basin.

**Key words:** Sichuan basin; Upper Triassic; Heavy mineral; Provenance; Tectonic evolution.