

文章编号:1000-0550(2014)05-0930-11

川西坳陷中段上侏罗统蓬莱镇组物源及沉积体系研究^①

叶素娟¹ 李 嵘² 张 庄¹

(1.中石化西南油气分公司勘探开发研究院 成都 610041;2.成都地质矿产研究所 成都 610081)

摘要 作为川西坳陷主要的油气勘探目的层,上侏罗统蓬莱镇组物源区及物源方向的研究是明确沉积体系、砂体及储层空间展布的基础。由于缺乏针对性的系统研究,对于川西坳陷中段蓬莱镇组物源方向及沉积体系展布的研究,长期以来存在较大争议。根据碎屑组分、重矿物、微量元素以及古地貌分析结果,对研究区蓬莱镇组物源及沉积体系进行了重新认识。结果表明,川西坳陷中段蓬莱镇组存在龙门山中段、北段、米仓山多个物源区。其中,研究区西部物源主要来自龙门山中段,发育呈北西—南东向展布的近源、短轴三角洲沉积体系,砂岩分选差、粒度相对较粗、矿物成分成熟度相对较低,储层不发育;研究区中东部沉积物则主要来自龙门山北段以及米仓山,发育北东—南西向展布的远源、长轴三角洲沉积体系,砂岩分选好、粒度相对较细、长石含量及矿物成分成熟度较高,物性条件较好。同时,蓬莱镇组不同时期主要物源体系存在差异。自蓬一段至蓬四段,主物源方向由西、北西向北、北东方向转变,主物源区由龙门山中段向龙门山北段迁移。

关键词 物源及沉积体系 上侏罗统蓬莱镇组 川西坳陷 岩石学及地球化学方法

第一作者简介 叶素娟 女 1969年出生 博士 高级工程师 沉积与储层地质 E-mail:sujuan_je@hotmail.com

通讯作者 李 嵘 男 教授级高级工程师 E-mail:545210420@qq.com

中图分类号 TE121.3 **文献标识码** A

0 引言

川西坳陷上侏罗统蓬莱镇组是川西地区陆相天然气勘探开发的重点层位之一,已经发现和开发了马井、新都—洛带、孝泉—新场等多个大、中型气田。近几年来,随着川西地区勘探的不断推进,在成都凹陷低洼、斜坡地带的什邡、广汉、金堂等地区中浅层(中、上侏罗统)取得了天然气勘探的重大突破,表明凹陷区发育大型岩性圈闭。作为该区主要的油气勘探目的层,蓬莱镇组物源区及物源方向的研究对明确砂体、沉积体系空间展布以及砂体的侧向连通性,预测有利岩性圈闭发育带,指导川西蓬莱镇组气藏的精勘探、开发具有十分重要的意义。

前人针对川西蓬莱镇组开展了较多的研究工作,主要集中在层序地层、沉积、储层方面^[1-7],对主物源区位置和物源方向等方面的研究还相对较少。基于龙门山前冲积扇的分布、砾石定向排列以及沉积相类型的区域变化情况,前人研究提出川西蓬莱镇组主要受西部龙门山物源控制,其中龙门山北段物源主要影响北部凹陷地区,其对川西坳陷中、南段的影响较小^[4-6]。同时,前人研究成果表明从龙门山前缘到坳

陷东部主要发育冲积扇、河流、辫状河三角洲以及湖泊沉积,沉积相带及砂体均呈北西—南东向展布,坳陷内部以近源、短轴三角洲沉积为主,三角洲分布范围局限,坳陷中、东部大部分地区主要为滨浅湖沉积^[1-7]。但是,随着坳陷中东部德阳、广汉、金堂等地区蓬莱镇组勘探的逐步深入,显示前期认识与实际勘探实践不相符合,前期认识已经不能满足该区的勘探需求。该区究竟存在几个物源?哪一个主物源区?不同物源的影响范围如何?砂体及沉积体系的空间展布如何?坳陷内部是否发育大型浅水三角洲沉积?是否具备形成大型岩性油气藏的地质基础?这些关键问题的正确认识直接制约了川西地区蓬莱镇组岩性油气藏的精勘探以及进一步的勘探部署。

物源分析方法较多,目前应用较为广泛的包括碎屑组分分析、重矿物分析、沉积法、原始地层厚度分析、地球化学和同位素法等^[8-14]。由于单一研究方法存在多解性和不确定性,因此本次研究采用碎屑组分分析、重矿物分析手段,结合古地貌分析和微量元素分析等多种研究方法,综合分析了川西蓬莱镇组四个层段砂岩的物源体系,对川西坳陷中段蓬莱镇组物源、沉积体系进行了重新认识。

^①国家科技重大专项(编号:2011ZX05002-004)资助
收稿日期:2013-10-24;收修改稿日期:2014-02-26

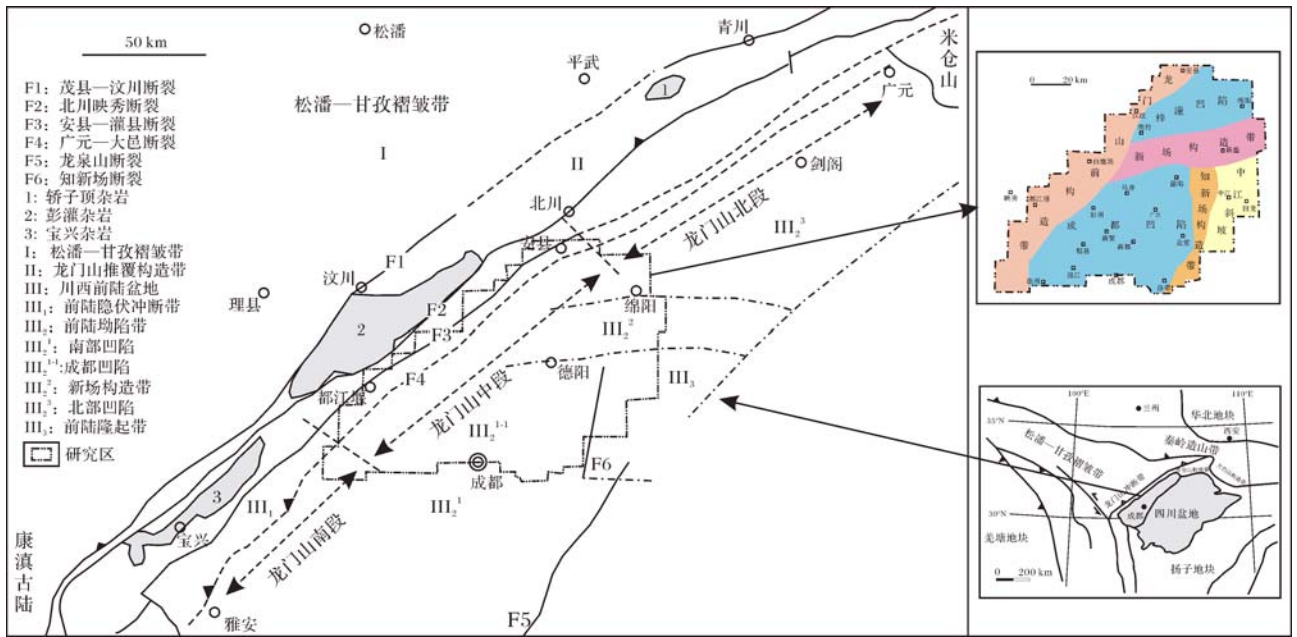


图 1 川西前陆盆地构造背景 (据刘树根等,2009 修改;杨克明等,2012 修改)

Fig.1 Location and tectonic settings of the western Sichuan foreland basin (modified from Liu Shugen *et al.*, 2009, Yang Keming *et al.*, 2012)

1 地质背景

川西坳陷位于扬子地块西北缘,西邻龙门山造山带,向外过渡到松潘—甘孜褶皱带,北东与昆仑—秦岭东西向构造带相接,南抵峨眉、乐山,向南过渡到康滇南北向构造带,东连川中隆起,大致呈北东向延伸(图 1)。根据边界断裂、构造特征及位置,可以将川西盆山构造划分为松潘—甘孜褶皱带、龙门山推覆构造带和川西前陆盆地。其中,川西前陆盆地又可分为前陆隐伏冲断带、前陆拗陷带以及前陆隆起带^[13](图 1)。研究区位于川西前陆拗陷带中段,呈现“三隆两凹一坡”的构造格局,即龙门山前构造带、新场构造带、成都凹陷、梓潼凹陷、知新场构造带和中江斜坡(图 1)。

龙门山陆内复合造山带为川西坳陷侏罗系地层的主要物源区。自南西向北东,龙门山造山带可以分为南、中、北三段(图 1)。其中,龙门山中、北段古生界地层发育较全,二叠系少见玄武岩喷发,而龙门山南段缺失寒武系和石炭系,二叠系普遍含玄武岩。晚侏罗世龙门山北段发育大套冲积扇砾岩,同期龙门山中、南段亦见规模相对较小的砾岩体发育。

川西坳陷沉积了巨厚的晚三叠世—白垩纪地层,已发现的含气层系包括上三叠统须家河组,下侏罗统,中侏罗统上沙溪庙组、下沙溪庙组,以及上侏罗统

遂宁组和蓬莱镇组(莲花口组)。其中,上侏罗统蓬莱镇组平均厚度 1 300 m,与下伏遂宁组和上覆白垩系分别呈整合和假整合接触(表 1)。根据沉积旋回和内部标志层发育特征,自下而上可以将蓬莱镇组划分为四段(蓬一段(J_3p^1)~蓬四段(J_3p^4))(表 1)^[16]。

2 物源体系特征

2.1 碎屑组分分析

盆地陆源碎屑物是盆地构造演化、源区隆升剥蚀、沉积的直接证据和重要标志。作为大陆的风化—沉积旋回产物,砂岩的碎屑组分可以记录沉积物的母岩组合、改造强度、沉积环境等信息,因此可以作为反映物质来源的重要标志。在沉积物沉积过程中,沿着物源延伸方向,随着搬运距离的增加,砂岩中稳定组分(石英)含量增高,而不稳定组分(长石、岩屑)含量逐渐降低,即沿着物质搬运方向,砂岩应该显示成分成熟度增高的趋势。因此,根据砂岩的碎屑组分含量可以对物源方向进行分析。同时,碎屑岩中岩屑类型与源区母岩性质密切相关,通过分析碎屑岩中岩屑组合可以得到与母岩和物源方向相关的信息。

根据 220 口井近万个薄片分析资料统计,川西坳陷蓬莱镇组砂岩主要由岩屑砂岩、长石岩屑砂岩、岩屑长石砂岩和岩屑石英砂岩组成,并见少量长石石英砂岩(图 2),具有再旋回造山带和混合源区的特

表 1 川西坳陷上侏罗统蓬莱镇组地层划分

Table 1 Stratigraphic division of the Upper Jurassic Penglaizhen Formation in the western Sichuan

界		地层			地质年龄	岩性描述	
系	统	组	段	代号	/Ma		
中生界	白垩系	下统	苍溪组	K _{1c}	131	棕褐色(含砾)细—中粒岩屑砂岩与棕红色泥岩、棕褐色泥质粉砂岩不等厚互层,与下伏地层呈假整合接触。	
				侏罗系	上统	蓬莱镇组	四
	三	J _{3p} ³		绿灰、褐灰等色粉—细粒岩屑(石英)砂岩与紫红、棕褐等色(粉砂质)泥岩略等厚互层。顶部及上部偶见有绿灰、深灰色页岩及泥灰岩。			
	二	J _{3p} ²	145	紫红色(粉砂质)泥岩夹浅绿灰、褐灰色粉—细粒(长石)岩屑砂岩。顶部偶见绿灰及紫红色泥页岩			
	一	J _{3p} ¹		紫红色(粉砂质)泥岩与绿灰、褐灰色粉—细粒(长石)岩屑砂岩不等厚频繁互层,顶部偶见绿灰或浅紫色页岩薄层,与下伏地层整合接触。			
			遂宁组	J _{3sn}	152	棕、棕红色泥岩、粉砂质泥岩、褐灰色细—中粒岩屑砂岩、粉砂岩互层,与下伏地层整合接触。	

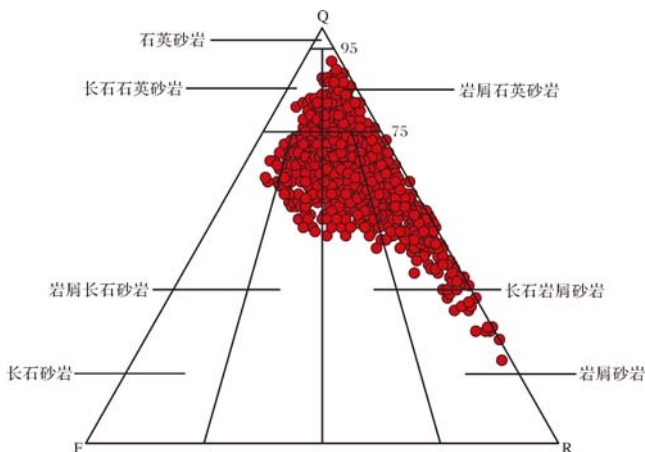


图 2 川西坳陷蓬莱镇组砂岩碎屑组成(据 Folk 命名^[17])

Fig.2 Detrital composition of the Penglaizhen Formation sandstones, western Sichuan

点^[9]。砂岩碎屑组成表现出明显的区域性特征。

蓬一段沉积时,石英含量低、岩屑含量高的砂岩主要分布在龙门山北段及中段,由龙门山北段、中段向东,砂岩类型逐渐由岩屑砂岩过渡为长石岩屑砂岩、岩屑长石砂岩、岩屑石英砂岩和长石石英砂岩,矿物成分成熟度(Q/F+R)呈递增趋势(图3)。岩屑组合也具有明显的分带性,在研究区北部以沉积岩岩屑为主,向南变质岩岩屑含量明显增加(图4)。因此,可以看出蓬一段沉积时期研究区北部与南部具有不同的物源体系,其中北部主要受龙门山北段物源控制,南部物源则主要来自龙门山中段“沉积岩+变质

岩母岩供给区”(图3,4)。

蓬二段砂岩碎屑组分的平面分布与蓬一段砂岩具有一定的相似性,但是岩屑砂岩的分布范围有所减小。石英含量低、岩屑含量高的砂岩主要分布在龙门山北段及中段,由西向东,石英、长石含量逐渐增加,岩屑含量逐渐降低,矿物成分成熟度呈递增趋势(图3)。长石相对高值区(达15%)主要分布在东北部合兴场、丰谷、中江一带,向西南成都凹陷区长石含量逐渐降低至5%,反映存在北东方向高长石砂岩的输入。岩屑组合在绵竹、孝泉地区以沉积岩岩屑为主,向东、南则出现较多变质岩岩屑,主要为沉积岩屑+变质岩屑,东部出现较多岩浆岩岩屑(图4)。由此可以推测蓬二段沉积物具有不同的物源体系,其中孝泉地区物源主要来自绵竹一带,文星、新场、马井、温江一带沉积物来自龙门山北段安县、江油和龙门山中段聚源一带,合兴场、丰谷、中江、广汉、洛带地区则主要受北部、北东方向物源控制。

蓬三段砂岩在绵竹一带具较高岩屑含量和最低成分成熟度,自西向东、向南,石英、长石含量逐渐增加,矿物成分成熟度由1增至3(图3)。与蓬一、二段比较,蓬三段可见较多岩屑长石砂岩分布,表明北东方向高长石物源的影响程度在逐渐增大。岩屑组合特征显示,研究区可以分为三个岩屑组合区,绵竹、孝泉一带以沉积岩岩屑为主,西南马井、新繁、温江一带为沉积岩屑+变质岩屑组合,东部则主要为沉积岩屑+变质岩屑+岩浆岩屑,岩浆岩屑含量明显增大(图

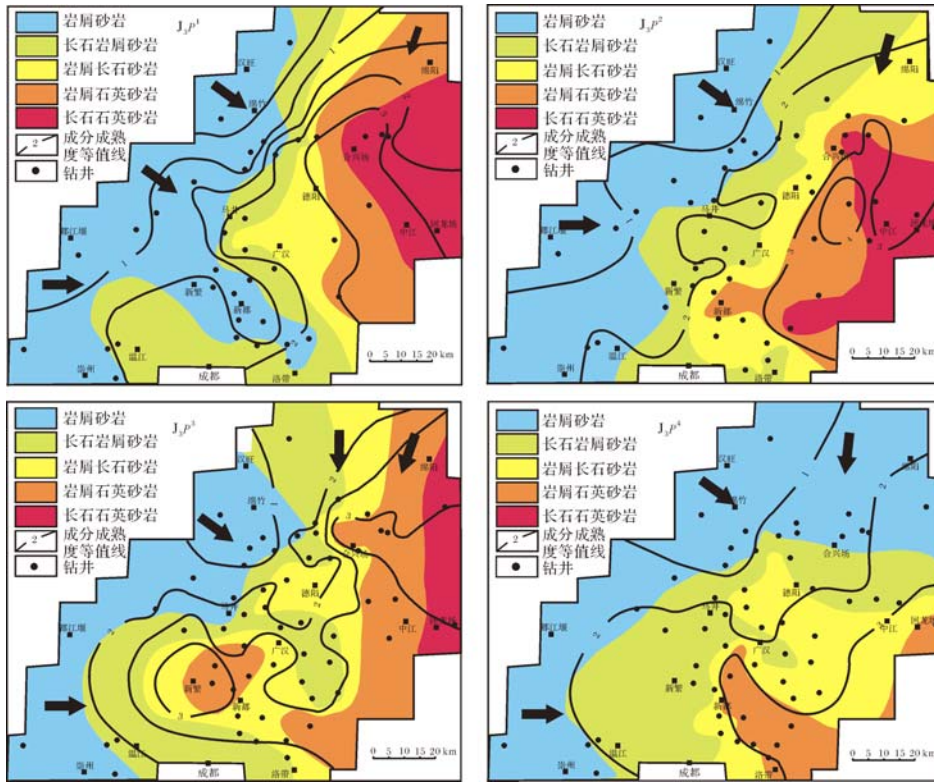


图 3 川西坳陷蓬莱镇组碎屑组分特征图

Fig.3 Regional variation in detrital composition in the Penglaizhen Formation sandstones, western Sichuan

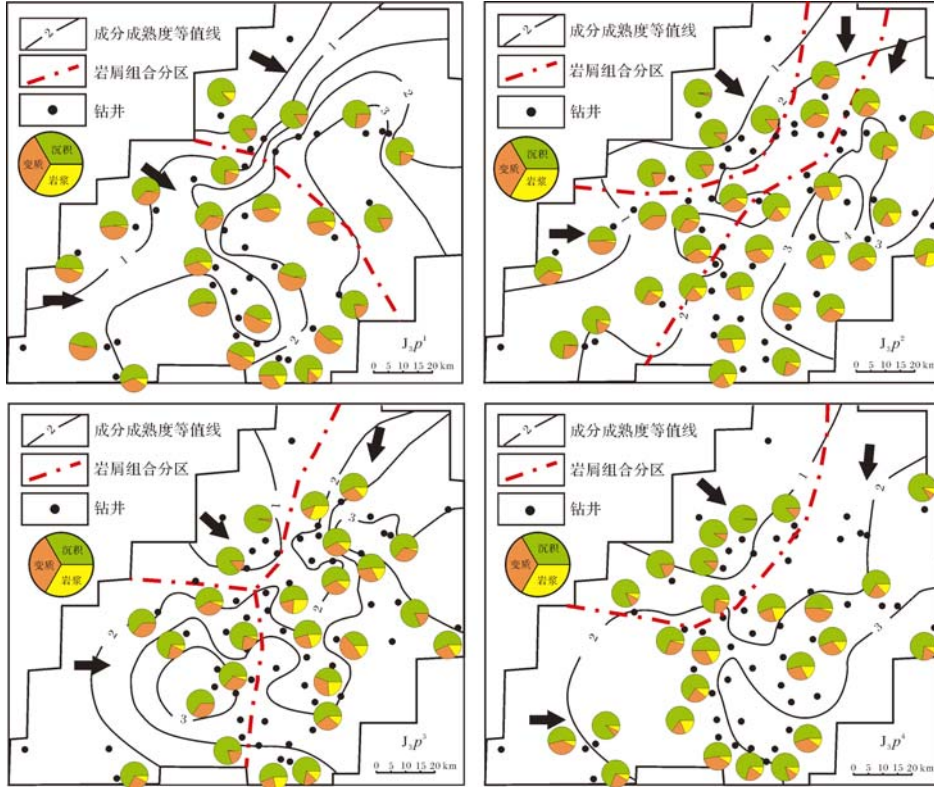


图 4 川西坳陷蓬莱镇组岩屑组合特征图

Fig.4 Compositional maturity and lithoclast composition of the Penglaizhen Formation sandstones, western Sichuan

4)。蓬三段碎屑组分及岩屑组合表明研究区存在龙门山中段、北段物源,其中孝泉地区受绵竹物源控制,马井、新繁、温江一带主要受龙门山中段物源影响,东部大部分地区物源则主要来自北部和北东方向。

蓬四段砂岩在龙门山前以及拗陷北部具较低石英含量以及较高岩屑含量,岩屑砂岩的分布范围较广,研究区东南部广汉、金堂、新都、洛带及中江地区为石英、长石相对高值区,砂岩具较高成分成熟度,反映存在西北、北部、东北、西南多物源供给(图3)。岩屑组合可以分为两个区,其中绵竹、孝泉及马井北部地区以沉积岩岩屑为主,向东、向南则见较多变质岩和岩浆岩岩屑,表明研究区主要存在西北沉积岩母岩供给区和北部、东北、西南沉积、变质及岩浆岩母岩供给区(图4)。

2.2 重矿物分析

重矿物因其耐磨及较强稳定性,能够较多地保留母岩特征,在物源分析中占有重要地位。重矿物中,锆石、金红石和电气石的性质最稳定,它们在重矿物中所占比例称为 ZTR 指数,可以代表重矿物的成熟

度。一般来说,来自同一物源的样品通常具有相似的重矿物组合,且随着搬运距离的增加,样品中稳定重矿物的数量及 ZTR 指数将随之逐渐增大。此外,不同母岩类型具有不同的重矿物组合。因此,通过采用统计分析手段,如聚类分析,可以根据不同的重矿物组合对样品进行分组、分区。同时,根据重矿物 ZTR 指数分析,可以有效地判断沉积物的搬运方向和距离,从而判断出物源方向和物源区位置。

根据川西地区蓬莱镇组 24 口井 472 个岩芯样品及 7 个野外露头剖面 19 个样品的重矿物分析数据统计,重矿物以锆石、石榴石、电气石和钛磁铁矿为主,同时见有少量金红石、锐钛矿、板钛矿和白钛石。

根据蓬一段样品的聚类分析结果,可以划分出 2 个重矿物组合区(图 5),包括①拗陷外围“钛磁铁矿+白钛石+锆石”重矿物组合区;②拗陷中央“锆石+电气石+石榴石”重矿物组合区(表 2)。ZTR 含量高值区主要位于成都凹陷马井、温江一带,表明蓬一段沉积时期物源主要来自龙门山中段和北段(图 5),其中西部龙门山中段物源的影响范围较广。

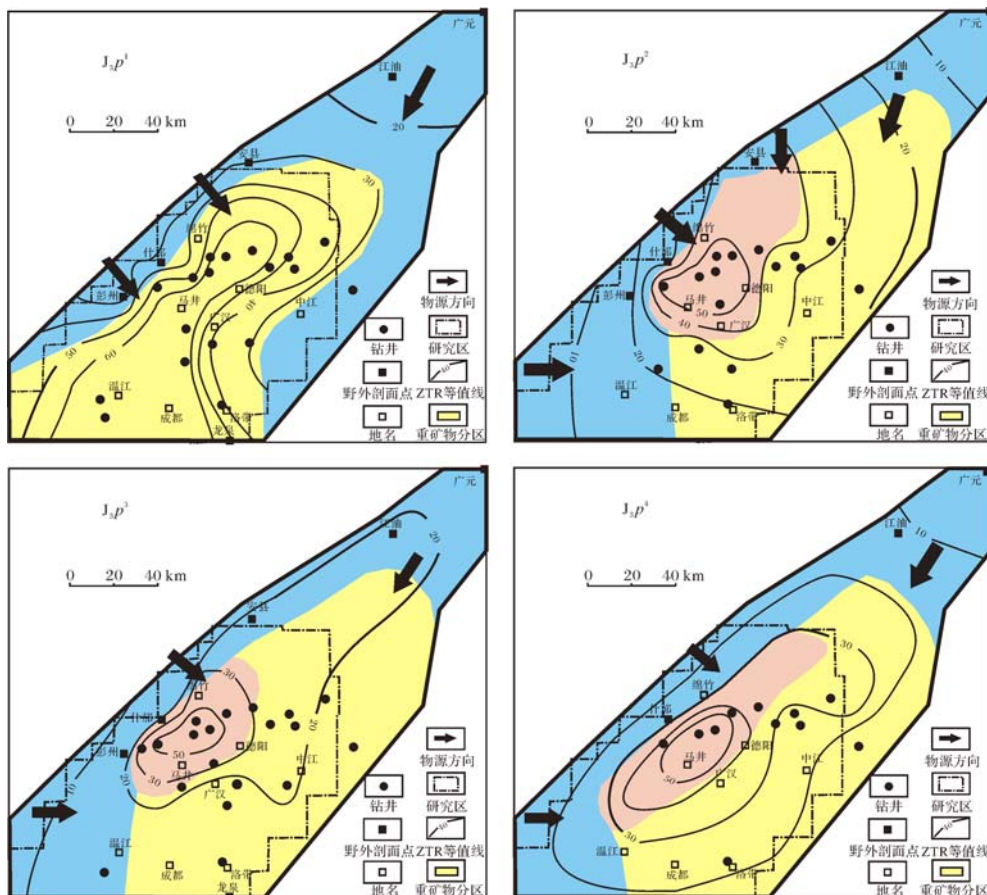


图 5 川西拗陷蓬莱镇组重矿物组合分区及 ZTR 含量等值线图

Fig.5 Distributions of different types of heavy mineral assemblages and content of ZTR of the Penglaizhen Formation sandstones, western Sichuan

表2 川西坳陷蓬莱镇重矿物组合特征

Table 2 Heavy mineral assemblages of the Penglaizhen Formation sandstones, western Sichuan

层位	分区	重矿物组合(%)
蓬四段	西区	锆石(10.1)+石榴石(17.8)+白钛石(8.5)+钛磁铁矿(50.1), ZTR = 14.0
	中区	锆石(36.1)+电气石(20.4)+石榴石(22.8)+钛磁铁矿(9.9), ZTR = 59.5
	东区	锆石(13.7)+电气石(13.4)+石榴石(48.2)+钛磁铁矿(16.7), ZTR = 28.5
蓬三段	西区	锆石(15.0)+白钛石(11.4)+钛磁铁矿(45.0), ZTR = 18.4
	中区	锆石(36.4)+电气石(18.8)+石榴石(24.4)+钛磁铁矿(14.4), ZTR = 58.2
	东区	锆石(11.4)+电气石(11.7)+石榴石(54.9)+钛磁铁矿(15.7), ZTR = 24.7
蓬二段	西区	锆石(22.2)+石榴石(8.7)+白钛石(19.9)+钛磁铁矿(41.1), ZTR = 24.6
	中区	锆石(31.9)+电气石(24.5)+石榴石(23.2)+钛磁铁矿(14.2), ZTR = 59.1
	东区	锆石(7.5)+电气石(11.6)+石榴石(40.7)+钛磁铁矿(28.5), ZTR = 20.2
蓬一段	坳陷外围区	锆石(20.4)+白钛石(21.9)+钛磁铁矿(37.9), ZTR = 24.2
	坳陷中央区	锆石(33.4)+电气石(23.4)+石榴石(18.9)+钛磁铁矿(14.3), ZTR = 61.6

蓬二段重矿物组合平面上可以分为3个区(图5):西、北部区为高白钛石、高钛磁铁矿、低锆石区;中区的重矿物组合为高锆石、高电气石、高石榴石;东区的重矿物组合为高石榴石、高钛磁铁矿、低锆石(表2)。ZTR含量等值线图显示,孝泉、新场、成都凹陷马井地区具有较高稳定重矿物含量,物源主要来自西部龙门山中段,而东部合兴场、丰谷、中江、洛带地区稳定重矿物含量低于中部地区,物源主要来自龙门山北段(图5)。

蓬三段、蓬四段的重矿物组合分区相似,平面上均具有西、中、东分区的特点,自西区→中区→东区,稳定重矿物含量呈现先增加再降低的趋势,表明研究区受北西、北东多个方向物源控制(图5)。其中孝泉、马井、成都凹陷西部地区构成的中区具有较高的锆石和电气石含量(表2),为龙门山中段、北段多个物源的汇水区;东部地区为石榴石富集区(表2),物源主要来自龙门山北段。与蓬一、二段比较,蓬三、四段沉积时期龙门山北段物源的影响范围相对较广,西部龙门山中段物源的影响范围则相对有限(图5)。

2.3 微量元素分析

沉积物中某些微量元素(特别是稀土元素REE)在风化、搬运、沉积、成岩过程中表现出较好的稳定性,可以作为反映物源区母岩的重要标志^[18,19]。

根据川西蓬莱镇组砂岩的微量元素组成及特征参数统计结果可以看出, $\omega(\Sigma\text{REE})$ 为88.5~215.9 $\mu\text{g/g}$,总体相对富集REE(表3)。蓬莱镇组不同层段具有相似的稀土元素分布特征,均表现出轻稀土元素富集、重稀土元素亏损、轻重稀土元素分馏明显、明显Eu负异常、无Ce异常的特点(表3),具有与上地壳相似的稀土分布特征,反映碎屑母岩主要源自再旋回沉积和变质岩组成的大陆上地壳,同时可能有花岗岩

的混入。

蓬三段的微量元素平面分布特征略有差异。相对于东部地区,西部温江、崇州地区砂岩具有较低的La/Co、Th/Co、Th/Sc值(表3)。沉积岩中La/Co与Th/Co的比值是很好的区分长英质和镁铁质源岩的指标。长英质岩中不活动元素La、Th的含量高于基性岩,而Sc、Co的含量则相对较低。温江、崇州地区蓬三段数值较低,与汶川泥盆系的样品接近(表3),物源可能来自西部龙门山中段镁铁质成分较高的源区。而中东部广汉、德阳、丰谷、龙泉山样品则具有较高La/Co、Th/Co值,与广元、江油、北川志留、泥盆系样品相似(表3),表明源区母岩可能为广元、江油、北川地区长英质组分较高的岩石。新都地区蓬三段的La/Co、Th/Co和Th/Sc比值介于坳陷西部和东部地区之间,反映该区同时受龙门山中段、北段物源影响。

成都凹陷蓬一段的微量元素分布特征相近,均具有较高的LREE/HREE、 $(\text{La/Yb})_N$ 、La/Co、Th/Co值,轻重稀土分异程度明显较广元、江油地区高,与什邡、彭州蓬一段和理县三叠系样品近似(表3),表明凹陷区具有相近的来源,且物源可能来自龙门山中段长英质组分较高的物源区。

2.4 古地貌分析

现今川西前陆坳陷带包括北部凹陷、新场构造带和南部凹陷^[13](图1),其中形成于印支早期新场运动^[13]的新场构造带近EW向展布,由西部孝泉向东延伸至丰谷地区。新场构造带的存在是龙门山北段物源引起争议的原因之一。蓬莱镇组沉积时期是否存在这个近EW向的隆起带?隆起幅度如何?来自北部龙门山北段的沉积物能否越过该隆起带在川西坳陷中、南段形成沉积?

本次研究在恢复喜山期剥蚀厚度的基础上,根据

表 3 川西坳陷蓬莱镇组砂岩样品微量元素含量 (μg/g) 及特征参数表

Table 3 Trace element composition of the Penglaizhen Formation sandstones, western Sichuan

层位	地区	样品号	$\omega(\Sigma\text{REE})$	$\omega(\text{LREE})/\omega(\text{HREE})$	$\omega(\text{La})/\omega(\text{Co})$	$\omega(\text{Th})/\omega(\text{Co})$	$\omega(\text{Th})/\omega(\text{Sc})$	$(\text{La}/\text{Yb})_N^{**}$	δEu^{**}	δCe^{**}	
蓬三段	丰谷	FG3-1	180.6	8.78	3.36	1.08	1.49	10.55	0.64	0.99	
	J_3p^3	温江	WJ2-1	144.7	9.26	1.88	0.78	0.99	10.48	0.61	0.96
		新都	DS29-1	215.9	9.50	2.47	0.90	1.18	11.36	0.61	1.01
		广汉	GJ7-1	194.7	9.01	3.04	1.00	1.19	10.84	0.63	0.98
		德阳	SF56-1	189.8	8.78	3.00	1.00	1.18	10.64	0.64	0.97
		崇州	CZ1-1	187.3	8.66	2.69	0.89	1.08	10.30	0.63	0.98
		马井	MJ19-1	200.8	9.14	3.14	0.99	1.17	11.25	0.63	0.99
		广元	GY1-1*	90.1	6.67	3.17	1.15	0.99	7.90	0.53	1.09
		彭州	PZ1-1*	118.8	8.55	3.29	0.81	0.70	10.65	0.56	1.00
		什邡	SF1-1*	115.1	9.15	3.41	0.66	0.64	11.50	0.52	1.09
	龙泉	LQ1-1*	144.8	10.0	7.62	1.99	1.11	12.3	0.48	1.00	
蓬一段	J_3p^1	新都	DS29-2	196.1	9.45	2.74	0.97	1.20	10.5	0.62	0.99
		马井	CM600-1	178.1	9.06	2.62	1.01	1.22	9.80	0.59	1.00
		温江	WJ2-2	207.6	9.46	2.95	1.02	1.04	10.83	0.62	0.99
		崇州	CZ1-2	179.4	8.54	2.64	0.94	1.13	10.08	0.64	1.00
		广汉	GJ13-1	186.9	8.63	2.85	0.97	1.14	10.16	0.63	0.98
		广汉	GJ12-1	173.1	8.56	2.68	0.97	1.15	9.88	0.65	1.00
		江油	JY1-1*	93.7	6.97	3.09	1.07	0.96	8.34	0.50	1.07
		广元	GY1-2*	102.0	7.97	3.74	1.02	0.82	9.41	0.52	1.04
		彭州	PZ1-2*	102.5	9.75	2.86	0.85	0.81	11.62	0.50	1.01
		什邡	SF1-2*	88.5	8.96	3.90	0.93	0.87	11.75	0.57	1.06
		龙泉	LQ1-2*	135.8	9.59	4.67	1.14	0.87	12.30	0.54	1.02
		汶川泥盆系 ^[20]		113.7	8.71	1.80	0.55	1.16	9.00	0.61	1.01
		北川志留系 ^[20]		99.7	6.60	8.71	3.85	3.15	6.60	0.62	0.97
		广元志留系 ^[20]		156.7	10.15	9.03	2.73	0.87	10.68	0.66	0.98
		江油泥盆系 ^[20]		106.7	8.85	18.02	7.35	2.44	9.32	0.57	1.00
	理县三叠系 ^[20]		137.0	8.17	3.81	1.37	1.45	8.56	0.62	1.00	

注: * 野外剖面样品,其它为钻井岩芯样品; ** 球粒陨石标准化参数。

地层厚度、岩性等资料,采用盆地模拟软件 Petro-Mod11 对研究区蓬莱镇组沉积时期的古地貌进行了恢复。结果显示,川西坳陷在蓬莱镇组沉积时期的古地貌呈现西高东低、北高南低的特征。西部、北部龙门山中段、北段是主要物源区。同时,坳陷内部海拔相差不大,新场构造带在蓬莱镇组沉积时期为相对低洼部位,来自北部的沉积物可以通过该地区向南在成都凹陷沉积(图 6)。

3 物源及沉积体系综合分析

综合上述多属性物源分析结果可以看出,蓬莱镇组沉积时期研究区存在西部龙门山中段都江堰、彭州、汉旺物源,同时还存在龙门山北段安县、江油、广元物源。不同物源在不同时期的影响范围既具继承性,又存在一定的差异。其中,蓬一段沉积时期物源主要来自龙门山中段都江堰地区,影响范围包括新场构造带以南的成都凹陷。龙门山中段北部汉旺和龙

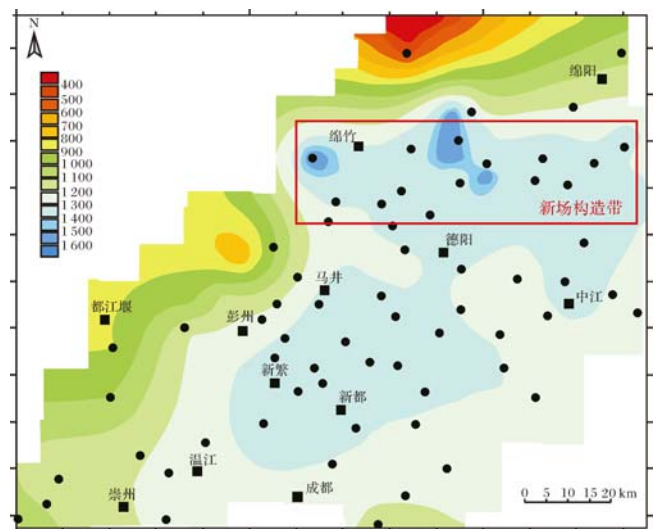


图 6 川西坳陷蓬莱镇组沉积时期古地貌
Fig.6 Paleogeomorphology of the Penglaizhen Formation, western Sichuan

门山北段安县地区为次级物源,影响范围相对较小,

主要影响新场构造带及以北梓潼凹陷地区。物源方向总体呈北西至南东向,沉积物搬运距离较短。蓬二段时期存在龙门山中段都江堰、绵竹物源以及龙门山北段安县、江油、广元物源,龙门山北段物源的影响开始显现,孝泉地区沉积物来自绵竹物源,文星、新场地区沉积物主要来自安县物源,成都凹陷西部郫县、温江地区沉积物来自都江堰物源,研究区东部绵阳、丰谷、中江地区物源来自江油、广元地区,物源方向包括北西—南东、北—南和北东—南西向。蓬三段沉积时期存在龙门山中段都江堰、彭州、汉旺物源以及龙门山北段安县、江油、广元物源,龙门山北段物源的影响范围较蓬二段有所增大,物源方向总体呈北东—南西向,研究区西部孝泉、马井、郫县、温江地区沉积物主要来自西部龙门山中段,沉积物具有近物源的特点。蓬四段时期主物源区和主物源方向与蓬三段相似,具有龙门山中段都江堰、彭州、汉旺以及龙门山北段安县、江油、广元多个物源区,其中龙门山北段物源的影响范围较蓬三段又进一步增大。

龙门山造山带的冲断隆升始于晚三叠世末期的印支运动,其隆升变形具有由北东向南西递进发展并逐渐减弱的特征^[15,16]。自晚侏罗世至早白垩世,龙门山北段沉积大套冲积扇砾岩,而同期龙门山中段砾岩体规模相对较小^[15,21]。米仓山早期隆起形成于晚三叠世—早侏罗世,晚侏罗世—早白垩世时期是米仓

山前陆冲断带的主要活动时期,边缘发育大量的冲积扇沉积^[22,23]。龙门山北段和米仓山在晚侏罗世强烈隆升,物源供给充足,在川西坳陷北部及东部形成规模较大、延伸较远的河流、三角洲沉积,砂岩碎屑组分以较高石英和长石为特点,物源区主要为克拉通区、石英质再旋回区和混合源区。同时,龙门山中段也可以为坳陷西部马井、郫县、温江地区提供短轴物源,碎屑组分以高岩屑为特点,物源区具有石英质—过渡再旋回造山带的特点。

受龙门山推覆构造带及北部米仓山的影响,川西坳陷蓬莱镇组沉积相带大体呈北西—南东向及北东—南西向展布,以后者为主。由盆地边缘向盆地中心,沉积物由粗变细,各种沉积相类型的变化及平面配置关系也呈现有规律的变化。主体沉积样式为:冲积扇—河流(冲积平原)—三角洲—滨浅湖模式(图7)。

龙门山及米仓山冲断推覆构造带是川西前陆盆地主要物源区。由于推覆构造带周期性的强烈活动,造成物源区与前陆盆地间强烈的地形反差以及西高东低、北高南低的古地形特点,从而导致川西坳陷沉积相带呈北西—南东及北东—南西向展布。坳陷西部地形坡度较陡,各相带变化较快、相带分布范围较窄;而北部地形相对较缓,洪水期由山区河流携带的大量碎屑物质没有直接进入湖泊水体,之间发育地形

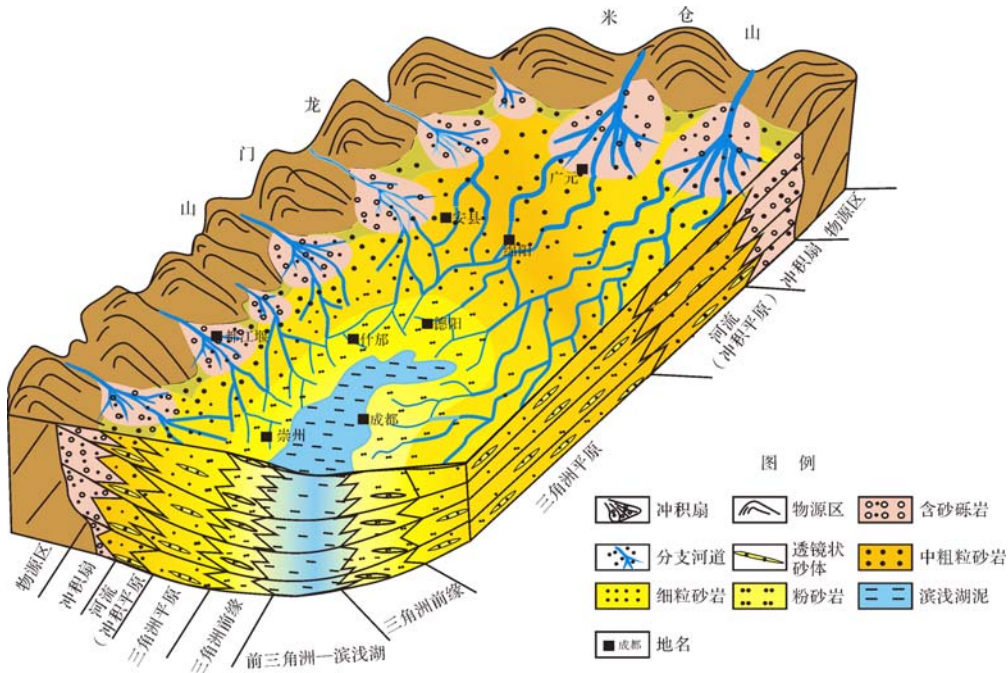


图 7 川西坳陷蓬莱镇组沉积模式图

Fig.7 Depositional model of the Penglaizhen Formation, western Sichuan

较为平坦的河流—冲积平原沉积,研究区以浅水三角洲相沉积为主,沉积物搬运距离较长,陆源碎屑物质以砂质为主,粒度较细,分选较好。

物源及沉积体系的差异决定了砂体及储层的发育和展布情况。川西坳陷在蓬莱镇组沉积时期,西部孝泉、马井、温江一带物源主要来自西部龙门山中段,沉积物搬运距离短,颗粒分选差、粒度较粗,以岩屑砂岩、长石岩屑砂岩为主,发育呈北西—南东向展布的近源、短轴三角洲沉积。由于西区砂岩分选差,长石含量及矿物成分成熟度相对较低,钙质胶结严重(碳酸盐胶结物含量普遍高于10%),砂岩物性条件较差,孔隙度一般低于5%;研究区中、东部地区物源主要来自龙门山北段,沉积物经历较长的搬运,发育北—南、北东—南西向展布的远源、长轴三角洲沉积。由于颗粒分选较好,长石及矿物成分成熟度较高,钙质胶结弱(碳酸盐胶结物含量普遍低于8%),砂岩物性条件较好,孔隙度平均达10%以上,从而使坳陷中东部地区成为蓬莱镇组勘探开发的主力目标区带。

4 结论

(1) 根据轻、重矿物及微量元素分析结果,并结合古地貌分析,明确川西坳陷蓬莱镇组存在龙门山中段、北段多个物源区。其中,坳陷西部孝泉、马井西部、温江一带物源主要来自西部龙门山中段;坳陷东部丰谷、中江、洛带地区沉积物主要来自龙门山中段北部及龙门山北段。坳陷中部新场、什邡、广汉、新都一带属于汇水区,同时具有龙门山中段、北段物源供给。源区母岩可能是志留系、泥盆系和三叠系的沉积岩及变质岩,其中龙门山北段物源区母岩具有较高的长英质组分。

(2) 蓬莱镇组不同时期主要物源体系存在差异。蓬一段物源主要来自西部龙门山中段,北部物源仅影响坳陷东坡丰谷、中江以北地区;蓬二段物源仍以龙门山中段为主,但在坳陷东部合兴场、成都凹陷以东地区开始出现较多长石和岩屑,龙门山北段物源的影响范围有所增大;蓬三段及蓬四段物源体系相似,物源主要来自龙门山北段,龙门山中段物源的影响范围进一步向西退至孝泉—马井西部—温江及其以西区域。总体上,自蓬一段至蓬四段,主物源方向由西、北西向北、北东方向转变,主物源区由龙门山中段向龙门山北段迁移。

(3) 不同物源及沉积体系控制了砂体及储层的分布。川西坳陷蓬莱镇组发育典型的浅水三角洲沉

积,水体相对较浅,分流河道发育,砂体叠合连片,是油气富集的基础。其中,坳陷西部地区发育呈北西—南东向展布的近源、短轴三角洲沉积体系,砂岩分选差、粒度相对较粗、矿物成分成熟度相对较低、物性较差;坳陷中、东部则主要发育北—南、北东—南西向展布的远物源、长轴三角洲沉积体系,砂岩分选好、粒度相对较细、长石含量及矿物成分成熟度较高、物性条件相对较好。

参考文献 (References)

- 1 赵永刚,雷卞军,杨跃明,等. 川西邛崃县白马庙气田上侏罗统蓬莱镇组沉积相及砂体展布研究[J]. 中国地质, 2004, 31(3): 284-288 [Zhao Yonggang, Lei Bianjun, Yang Yueming, et al. Sedimentary facies and sandbody distribution of the Upper Jurassic Penglaizhen Formation in the Baimamiao gas field, Qionglai county, western Sichuan [J]. *Geology in China*, 2004, 31(3): 284-288]
- 2 柳梅青,陈亦军,郑荣才. 川西新场气田蓬莱镇组陆相地层高分辨率层序地层学研究[J]. 沉积学报, 2000, 18(1): 50-56 [Liu Meiqing, Chen Yijun, Zheng Rongcai. High-resolution sequence stratigraphy of terrestrial Penglaizhen Formation of Xinchang gas field in western Sichuan [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(1): 50-56]
- 3 陈兆荣,候明才,董桂玉,等. 川西前陆盆地上侏罗统蓬莱镇组沉积特征[J]. 华东理工大学学报:自然科学版, 2008, 31(4): 326-331 [Chen Zhaorong, Hou Mingcai, Dong Guiyu, et al. The characteristics of sedimentary facies at Penglai Town Formation of Upper Jurassic in western Sichuan Foreland Basin [J]. *Journal of East China Institute of Technology*, 2008, 31(4): 326-331]
- 4 钱利军,陈洪德,时志强,等. 川西坳陷中段蓬莱镇组物源及沉积相展布特征[J]. 成都理工大学学报:自然科学版, 2013, 40(1): 15-24 [Qian Lijun, Chen Hongde, Shi Zhiqiang, et al. Provenance and sedimentary facies evolution of Penglaizhen Formation in the middle part of West Sichuan depression [J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2013, 40(1): 15-24]
- 5 叶茂才,易智强,李剑波. 川西坳陷蓬莱镇组沉积体系时空配置规律[J]. 成都理工学院学报, 2000, 27(1): 54-59 [Ye Maocai, Yi Zhiqiang, Li Jianbo. Distribution rule of sedimentary system of the Upper Jurassic Penglaizhen Formation in West Sichuan sag [J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2000, 27(1): 54-59]
- 6 朱志军,陈洪德,林良彪,等. 川西前陆盆地蓬莱镇组层序、岩相古地理特征及演化[J]. 地层学杂志, 2009, 33(3): 318-325 [Zhu Zhijun, Chen Hongde, Lin Liangbiao, et al. Sequence-based lithofacies and paleogeographic characteristics and evolution of the Penglaizhen Formation in West Sichuan Foreland Basin [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2009, 33(3): 318-325]
- 7 徐强,朱同兴,牟传龙. 川西晚三叠世—晚侏罗世层序岩相古地理编图[J]. 西南石油学院学报, 2001, 23(1): 1-5 [Xu Qiang, Zhu Tongxing, Mou Chuanlong. Sequence-paleogeographic mapping of Upper Triassic Xujiahe Formation and Upper Jurassic Penglaizhen Forma-

- tion in western Sichuan, China [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2001, 23(1): 1-5]
- 8 赵红格,刘池洋. 物源分析方法及研究进展[J]. 沉积学报,2003, 21(3): 409-415 [Zhao Hongge, Liu Chiyang. Approaches and prospects of provenance analysis [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(3): 409-415]
- 9 徐亚军,杜远生,杨江海. 沉积物物源分析研究进展[J]. 地质科技情报,2007,26(3): 26-32 [Xu Yajun, Du Yuansheng, Yang Jianghai. Prospects of sediment provenance analysis [J]. Geological Science and Technology Information, 2007, 26(3): 26-32]
- 10 和钟铎,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 [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]
- 11 Morton A, Ellis D, Fanning M, *et al.* The importance of an integrated approach to provenance studies: A case study from the Paleocene of the Faroe-Shetland Basin, NE Atlantic [C]. E. Troy Rasbury, Sidney R. Hemming, and Nancy R. Riggs. Mineralogical and Geochemical Approaches to Provenance. Special Paper 487. Boulder: The Geological Society of America, 2012: 1-12
- 12 Riggs N R, Barth A P, González-León C M, *et al.* Provenance of Upper Triassic strata in southwestern North America as suggested by isotopic analysis and chemistry of zircon crystals [C]//E. Troy Rasbury, Sidney R. Hemming, Nancy R. Riggs. Mineralogical and Geochemical Approaches to Provenance. Special Paper 487. Boulder: The Geological Society of America, 2012: 13-36
- 13 Clements B, Sevastjanova I, Hall R, *et al.* Detrital zircon U-Pb age and Hf-isotope perspective on sediment provenance and tectonic models in SE Asia [C]//E. Troy Rasbury, Sidney R. Hemming, Nancy R. Riggs. Mineralogical and Geochemical Approaches to Provenance. Special Paper 487. Boulder: The Geological Society of America, 2012: 37-62
- 14 Rodríguez M P, Linoñir L P, Encinas A. Cenozoic erosion in the Andean forearc in Central Chile (33° - 34°S): Sediment provenance inferred by heavy mineral studies [C]//E. Troy Rasbury, Sidney R. Hemming, and Nancy R. Riggs. Mineralogical and Geochemical Approaches to Provenance. Special Paper 487. Boulder: The Geological Society of America, 2012: 141-162
- 15 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 [Liu Shugen, Li Zhiwu, Cao Junxing, *et al.* 4-D textural and structural characteristics of Longmen Intracontinental Composite Orogenic Belt, Southwest China [J]. Chinese Journal of Geology, 2009, 44(4): 1151-1180]
- 16 杨克明,朱宏权,叶军,等. 川西致密砂岩气藏地质特征 [M]. 北京: 科学出版社,2012: 1-146 [Yang Keming, Zhu Hongquan, Ye Jun, *et al.* Geological Characteristics of Tight Sandstone Gas Reservoirs in West Sichuan Basin [M]. Beijing: Science Press, 2012: 1-146]
- 17 Folk R L. Petrology of Sedimentary Rocks [M]. Austin: Hemphill, 1980: 170
- 18 Bhatia M R, Crook K A W. Trace element characteristics of graywacks and tectonic discrimination of sedimentary basin [J]. Contributed Mineralogy Petrology, 1986, 92: 181-193
- 19 韩吟文,马振东,张宏飞,等. 地球化学 [M]. 北京: 地质出版社, 2003: 181-212 [Han Yinwen, Ma Zhendong, Zhang Hongfei, *et al.* Geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003: 181-212]
- 20 苏本勋,陈岳龙,兰中伍,等. 松潘—甘孜地块前寒武—三叠系沉积地球化学研究 [J]. 沉积学报,2005,23(3): 437-446 [Su Benxun, Chen Yuelong, Lan Zhongwu, *et al.* Sedimentary and geochemical study on the Precambrian-Triassic Series of Songpan-Ganzi Block [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23(3): 437-446]
- 21 Meng Q R, Wang E, Hu J M. Mesozoic sedimentary evolution of the northwest Sichuan Basin: Implication for continued clockwise rotation of the south China block [J]. Geological Society of America Bulletin, 2005, 117(3/4): 396-410
- 22 孙东,刘树根,邓宾,等. 米仓山与龙门山接合部叠加褶皱特征及构造演化 [J]. 成都理工大学学报: 自然科学版,2011,38(2): 156-168 [Sun Dong, Liu Shugen, Deng Bin, *et al.* Superposed fold characteristics and structural evolution in the junction area of Longmenshan Mountains and Micangshan Mountains in the southwest of China [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2011, 38(2): 156-168]
- 23 陈竹新,贾东,魏国齐,等. 川西前陆盆地中—新生代沉积迁移与构造转换 [J]. 中国地质,2008,35(3): 472-481 [Chen Zhuxin, Jia Dong, Wei Guoqi, *et al.* Meso-Cenozoic sediment transport and tectonic transition in the western Sichuan foreland basin [J]. Geology in China, 2008, 35(3): 472-481]

Provenance Analysis and Depositional System of the Upper Jurassic Penglaizhen Formation in the Middle Part of Western Sichuan, China

YE Su-juan¹ LI Rong² ZHANG Zhuang¹

(1. Exploration and Production Research Institute, Sinopec Southwest Company, Chengdu 610041;

2. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610081)

Abstract: The Upper Jurassic Penglaizhen Formation constitutes important gas reservoir in western Sichuan and the study of provenance of the Penglaizhen sandstones is of great importance in determining the spatial distribution of depositional systems and reservoirs. Owing to the absence of systematic studies, the provenance and lateral distribution of Penglaizhen Formation in the middle part of Western Sichuan have long been speculated upon. Based on detrital mineral analysis, trace element geochemistry, and paleogeomorphology, this study reveals that the sediments of the Penglaizhen Formation were derived from the middle and northern segments of Longmen Shan orogenic belt and Micang Shan orogenic belt. The sediments in the western region of depression are mostly coarse-grained, poor-sorted sandstones with low compositional maturity and porosity, and were sourced from the middle segment of Longmen Shan, indicating southeastward delta depositions close to the source area. The deposits in the middle and eastern parts are generally fine-grained, well-sorted sandstones with high feldspar content, compositional maturity, and porosity, and were supplied from the northern segment of Longmen Shan and Micang Shan, suggesting northeast-to-southwest delta depositions far from their sources. Additionally, it is shown that there existed different provenances during different periods and the dominant provenance transferred from the middle to the northern segment of Longmen Shan from J_3p^1 to J_3p^4 .

Key words: provenance and depositional system; Upper Jurassic Penglaizhen Formation; Western Sichuan; petrographical and geochemical approaches