

文章编号: 1000-0550(2016)01-0168-13

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2016.01.016

建南地区飞仙关组三段白云岩分布与成因 ——基于三维地震、岩石学和地球化学综合分析

王广伟¹ 李平平¹ 郝芳^{1,2} 邹华耀¹ 余新亚¹

(1.中国石油大学(北京)地球科学学院 北京 102249; 2.中国地质大学(武汉) 武汉 430074)

摘要 建南地区飞三段是现今研究区重要的产气层,储层类型主要为致密颗粒灰岩和细晶白云岩,然而,相对优质储层均发育于白云岩中。因此,对飞三段白云岩分布规律的研究是预测优质储层的基础。本研究基于录井、测井、岩芯和三维地震等资料,在构建单井白云石含量曲线的基础上,利用多属性转换分析建立三维地震属性与白云石含量曲线的关系,反演白云石含量在平面和剖面上的分布,结合岩石学、地球化学和沉积相对白云岩化流体的性质与来源进行了分析。

建南地区飞三段白云岩以细晶、平面自形—半自形为主,非平面它形晶少量分布。阴极发光下白云石为暗红色,无或少量环带状结构。利用多属性转换方法建立地震属性与白云石含量的关系,当选取5个地震属性组合时对白云石含量的预测最佳,预测误差为9%。五个属性分别为 Amplitude Weighted Frequency、Amplitude Weighted Cosine Phase、Derivative Instantaneous Amplitude、Quadrature Trace 和 Integrate。将预测的白云岩分布与沉积相叠合显示白云岩主要分布于台内洼地的两侧,向台地内部规模和厚度逐渐减小。综合地球化学数据和白云岩的分布特征说明,白云岩化流体主要来源于台内洼地的泥灰岩和泥晶灰岩的压实海源流体。随埋深的加大,洼地沉积物中的富 Mg 流体优先侧向运移至洼地两侧的孔隙性颗粒滩中并发生白云岩化作用。因此,洼地边缘颗粒滩是优质白云岩储层的有利勘探区。

关键词 白云岩化 白云岩化流体 地震属性 飞仙关组 建南地区

第一作者简介 王广伟 男 1986年出生 博士 碳酸盐岩成岩与孔隙演化 E-mail: wanggw_86@qq.com

通讯作者 李平平 男 博士 讲师 E-mail: lpp@cup.edu.cn

中图分类号 P588.24⁺5 **文献标识码** A

0 引言

四川盆地是中国大型富天然气盆地之一,其大中型气田主要集中分布于二叠系和三叠系海相礁滩相储层中^[1-2]。大量勘探及研究表明,优质储层的发育和分布与白云岩(化)密切相关^[3-7]。在碳酸盐岩层系中,尤其在深埋藏环境,白云岩因其常具有比周围灰岩更好的孔渗性而成为油气勘探的优选目标^[8-10]。然而,受白云岩化流体运移方向和交代过程的影响,不同成因的白云岩体常具有特征性的几何形态和分布特征^[11],如,准同生白云岩化作用常形成侧向广泛分布的层状白云岩,而热液白云岩化作用则形成沿断层两侧成线性分布的白云岩体^[12]。因此,研究白云岩化机理,尤其是白云岩化流体来源和运移方向是预测白云岩分布的基础和前提^[9]。

白云岩虽经历了200多年的研究,但现今仍是沉积学中的一个难题,即著名的“白云岩问题”^[13-15]。总体来说,对白云岩化作用的研究主要集中于两个方面:①白云岩化流体的来源,即有充足的Mg²⁺离子供应;②具有能够运移Mg²⁺离子的水文动力机制^[9]。其研究则主要基于地层组合和接触关系^[16-20],岩石学特征^[21-26]和地球化学特征^[27-30]。

然而,白云岩在盆地中的产状与分布是白云岩化发生时盆地古流体活动特征的直接标志^[11],并可用于恢复白云岩化流体的运移特征^[31]。因此,对白云岩宏观展布特征的精细刻画,是认识白云岩化流体来源和运移方向的基础。Longman等^[32]利用中子—密度测井曲线计算了单井白云石含量的垂向变化,构建了白云岩的剖面分布特征,并以此用于解释威利斯顿盆地奥陶系红河组白云岩的成因。然而,基于单井白

收稿日期: 2014-11-03; 收修改稿日期: 2015-02-08

基金项目: 国家科技重大专项课题(2011ZX05005-003-009HZ); 国家自然科学基金项目(41103020); 中国博士后科学基金项目(2015M580600)
[Foundation: National Science and Technology Major Project, No.2011ZX05005-003-009HZ; National Natural Science Foundation of China, No.41103020; China Postdoctoral Science Foundation, No.2015M580600]

云岩展布特征难以有效预测,白云岩分布变化。相比,三维地震资料具有较好的连续性,然而,现今在白云岩的分布与成因研究中应用极少,如, Sagan 和 Hart^[33] 和 Ogiesoba^[34] 曾利用测井曲线与三维地震资料预测了孔隙度的分布,间接的用于指示高孔隙性白云岩储层的分布。

建南地区位于四川盆地东部(图 1a)。现今钻井多集中分布于建南南、茶园和新店子滩体中,其他滩体如太平、乐福店等仅有少量或无探井(图 1b),制约了对白云岩储层分布规律的认识。本文首次将三维地震资料直接应用于白云岩的分布预测中,并结合岩石学和地球化学数据,探讨白云岩化流体的来源与运移方向,拓宽了研究白云岩化的方法和思路,对川东及其他地区白云岩储层的预测与成因分析具有一定的借鉴意义。

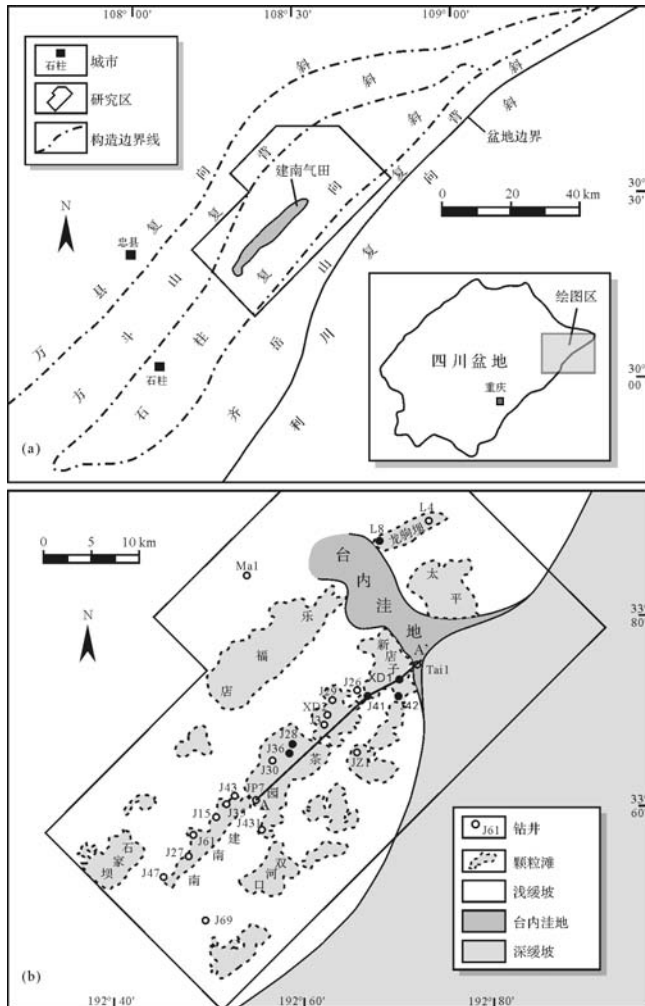


图 1 建南地区构造位置(a)与飞三段沉积期古地理分布(b)

注:实心圆为钻遇层状白云岩的钻井,剖面 AA' 见图 3

Fig.1 The location (a) and general paleogeography (b)

of the Jiannan area during deposition of T_3f^3

1 区域地质背景

建南地区位于四川盆地东缘,构造位置处于川东褶皱带与湘鄂西褶皱带的结合部位。受应力条件和边界条件的控制,川东与湘鄂西为典型的侏罗山式褶皱变形区,包括利川复向斜、齐岳山复背斜、石柱复向斜、方斗山复背斜和万县复向斜 5 个二级构造单元^[35](图 1a)。研究区则位于石柱复向斜上(图 1b)。建南地区在前震旦系基底之上依次沉积了震旦系、寒武系、奥陶系、志留系、泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系和侏罗系^[36]。总体上,盆地经历了海相沉积阶段和陆相沉积阶段^[37]。以中三叠统巴东组顶部为界,之下为海相的碳酸盐岩和泥岩沉积,之上为陆相的河流和湖泊沉积^[38]。

建南地区下三叠统飞仙关组为海相碳酸盐岩台地沉积(图 1b),与下伏长兴组和上覆嘉陵江组均为整合接触,厚度约为 400~550 m(图 2)。一般可将飞仙关组划分为四个段,自下向上一次为飞一、飞二、飞三和飞四段。飞一和飞二段主要为泥晶灰岩沉积;飞三段下部为泥晶灰岩沉积,向上逐渐演化为颗粒滩沉积,构成了建南地区主要的产气层;建南地区大致以 J28 井为界,以南为南高点,以北为北高点^[39]。颗粒滩在南高点主要分布于飞三段中一下部,向北逐渐抬升发育于中—上部^[40]。飞四段主要为局限台地相的膏质泥灰岩、泥晶云岩沉积,构成了该区飞三段气藏的直接盖层。

下三叠统飞仙关组是四川盆地重要的产气层^[41-42]。在川东北,其优质储层主要集中为飞仙关组一段和二段广泛分布的颗粒白云岩,如普光、罗家寨、铁山坡等气田。其白云岩的分布与白云岩化机理的研究较为丰富。建南地区主要的产气层则分布于飞仙关组三段,探明天然气地质储层占总探明储层的 50% 以上,产量占建南气田总产量的 80% 以上^[43]。然而,由于白云岩分布较局限,对白云岩的形成机理与分布特征的研究相对较少。现今已有钻井揭示,白云岩主要分布于建南气田北部 XD1 井和 L8 井附近(图 1b),显示从台内洼地向台地内部逐渐减薄的趋势(图 3)。

2 基础资料与研究方法

本研究所利用的资料主要包括岩芯、薄片、测井和三维地震体。岩芯以钻遇白云岩且取芯较连续的 XD1 和 L8 井为主。XD1 井飞三段取芯累计长度为

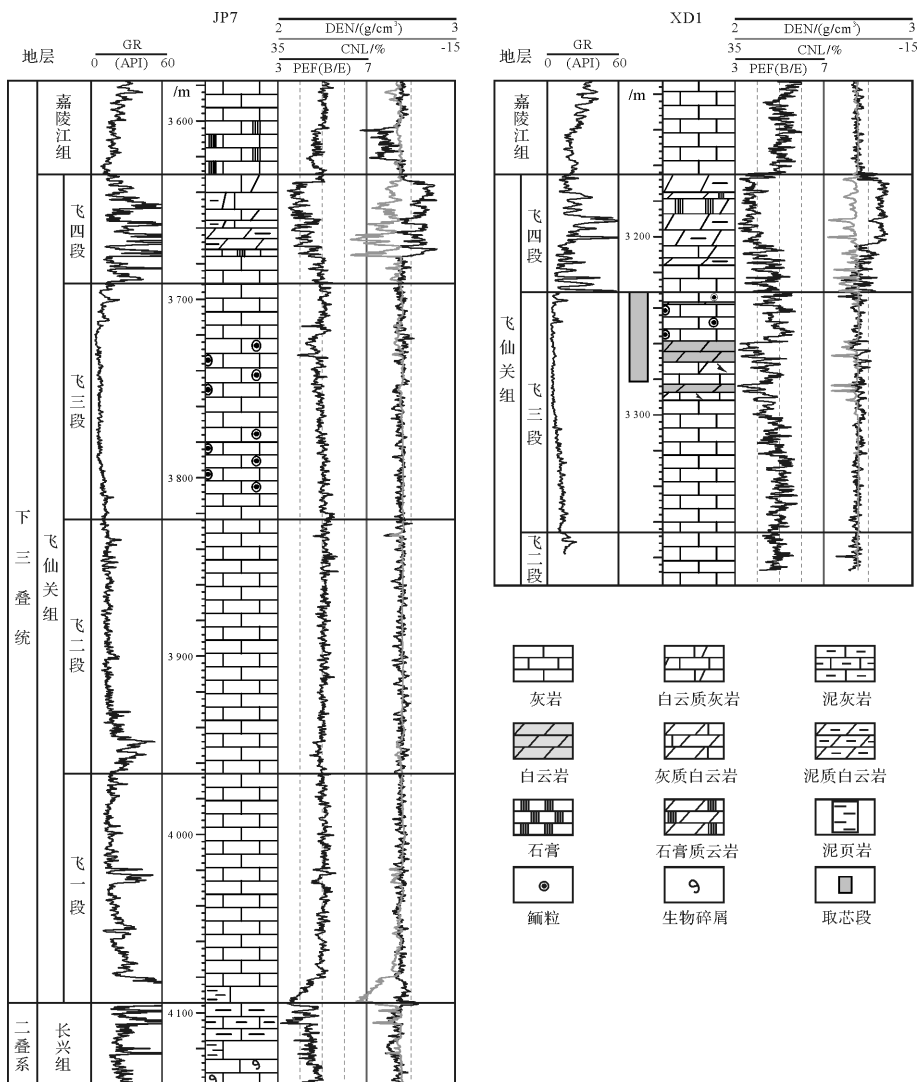


图2 建南地区JP7井和XD1井飞仙关组白云岩和灰岩的测井响应特征

注:PEF曲线在钻遇白云岩储层的XD1井显示明显的低值,一般小于4,而JP7井飞仙关组PEF值约为5,指示其岩性为灰岩。孔隙性储层发育处,DEN与CNL曲线显示分开,而非储层发育处两曲线重合。受泥质含量的影响,飞四段和飞一段底部亦显示PEF低值特征。

Fig.2 Lithofacies and well logs of the JP7 and XD1 wells showing the log response of limestone and dolostone in the Feixianguan Formation

49.7 m, L8井为30 m。共收集岩芯薄片649块以及相应的鉴定报告649份。其中, XD1和L8井薄片389块。岩芯薄片取样间距约0.3至0.5 m,薄片均采用茜苏红染色,用以区分白云石和方解石。此外,共收集了J26、J431、J69、JS1、JZ1、Tai1、XD1、JP2、JP7和L8井等15口井的常规测井(GR和电阻率)、孔隙度测井和PEF测井曲线。收集的三维地震采集于2007年,面积917 km²,测网密度25 m×25 m,主体位于石柱复向斜内^[44]。

基于岩石体积法,利用PEF测井曲线和岩芯标定构建单井白云石含量曲线。之后,利用多属性转换

分析方法^[45]进行三维地震属性的优选,并建立白云石含量曲线与地震属性的关系用于反演白云石含量在三维空间中的展布特征。

为了预测白云石含量在三维空间中的分布变化,首先构建单井目的层段白云石含量曲线。本文主要选择对碳酸盐岩地层中方解石和白云石有较强分辨能力的PEF曲线(密度测井的一种),并选择取芯段较连续的岩芯(XD1和L8)进行标定。如图2所示,PEF曲线在XD1井飞三段白云岩层段表现出明显的低值,一般小于4,而未钻遇白云岩的JP7井PEF曲线值一般为5左右。此外,泥质或黏土矿物会对岩石

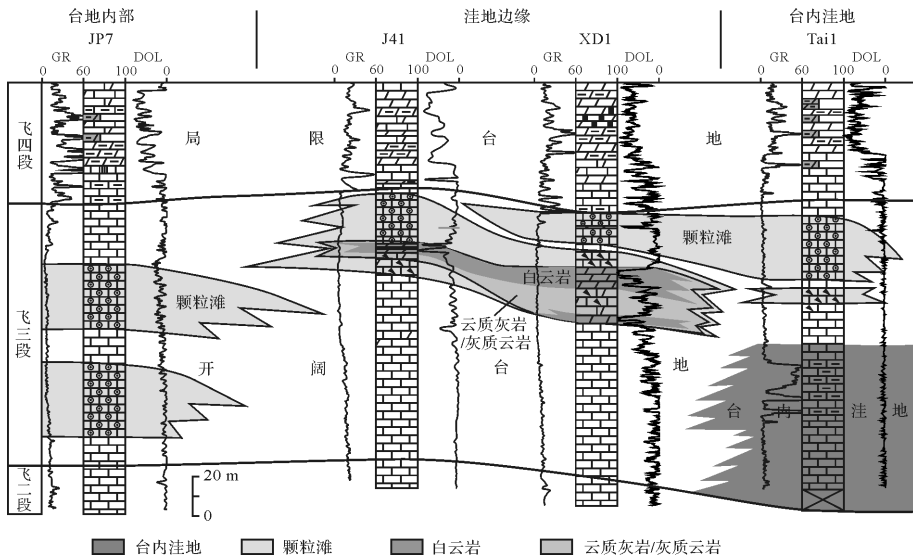


图 3 建南地区飞三段沉积相与白云岩分布

注:剖面显示白云岩从洼地边缘向台内逐渐较薄尖灭,GR 单位 API,DOL 为白云石含量(%),剖面位置参见图 1b。

Fig.3 Distribution of deposition facies and dolomite of the T_1f^3 in the Jiannan area

的 PEF 值产生影响,PEF 值随泥质含量的增加而减小。然而,飞三段 GR 曲线普遍为低值,表明碳酸盐岩中泥质含量极少,对目的层段的影响较小,故本文未作泥质含量的校正。泥质含量在飞仙关组底部较高(图 2),因此,在反演结果中应注意区分。Wang *et al.*^[46] 对建南飞三段岩芯样品的 X 衍射分析同样也显示样品均为方解石和白云石组成。因此,构建白云石含量与 PEF 曲线关系时可采用双矿物模型(岩石仅由方解石和白云石两种矿物组分组成)。当构建完白云石含量曲线后,即可利用多属性转换法建立白云石含量与三维地震属性的关系,主要包括三步^[34,45]:①逐步回归;②验证分析;③神经网络训练和应用。

第一步主要是通过最小二乘法原则优选地震属性组合。例如,存在 n 个地震属性和 m 口钻井的目标曲线(本文为白云石含量曲线),存在一个“分析算法”用于选取最佳的属性组合用于预测目标曲线,达到预测误差最小。该算法首先寻找第一个最优属性,确定后即开始寻找第二个;当第二个与第一个属性组合后可以更好的预测目标曲线。随后再寻找第三个属性,当这个属性与前两个组合时则具有更低的预测误差。依次类推,逐渐增加用于预测目标曲线的地震属性个数。然而,并非属性越多,预测的效果越好。因此,需要一个“验证算法”用于确定最佳属性数量,以达到属性组合的最优化,即第二步的验证测试。例如,当程序已选择两个最佳属性时,验证算法会隐藏

第一口井的目标曲线,用 $m-1$ 口井的目标曲线和 2 个最佳属性拟合,预测被隐藏的第一口井的目标曲线。之后,隐藏第二口井,用另外的 $m-1$ 口井和 2 个最佳属性拟合,预测第二口井的目标曲线;依次隐藏各口井,用另外 $m-1$ 口井的目标曲线和属性组合,预测被隐藏井的目标曲线;最后求取这 m 口井的平均预测误差。之后,再依次计算 3 个属性组合、4 个属性组合等的平均预测误差。当增加属性个数,验证误差却开始增大时,第二步结束,此时便确定了最佳地震属性个数和组合。第三步,即利用选取的最优属性组合进行神经网络训练,建立目标曲线与地震属性的拟合关系,完成目标曲线在三维地震中的反演。

3 结果

3.1 白云岩的岩石学与分布特征

建南地区飞三段白云岩依据晶体大小可划分为泥—粉晶白云岩和细晶白云岩(图 4a)。已有钻井资料显示,泥粉晶白云岩仅在 XD1 井飞三段上部发育,累计厚度小于 1 m,为准同生白云岩^[46],本文不做详细的分析。细晶白云岩是建南地区最为发育的白云岩类型,构成了本区最为优质的储层(图 4a)。

细晶白云岩主要分布于建南地区北高点飞三段颗粒滩的中下部,顶界面相对突变,底界面为渐变面,并与白云质灰岩、灰岩互层分布(图 4a)。作为对比,图 4b 给出了德克萨斯侏罗系 Smackover 组渗透回流

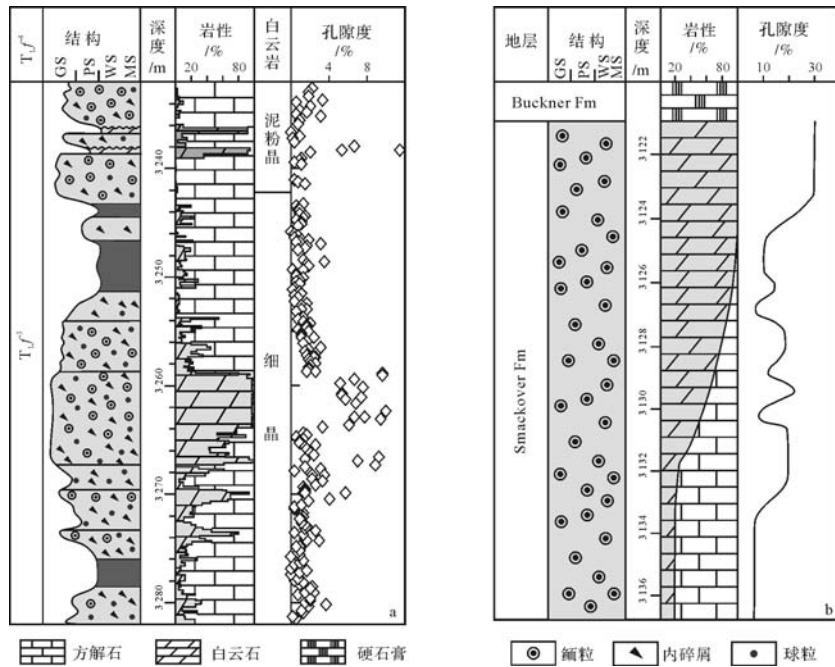


图4 建南地区飞三段(a)和德克萨斯侏罗系 Smackover 组(b)白云石含量和孔隙度剖面分布特征

注: XD1 岩芯位置见图2。图b引自文献47;GS:颗粒岩;PS:泥粒岩;WS:粒泥岩;MD:灰泥岩。

Fig.4 Vertical profiles showing the variations of dolomite content and porosity in the T₁f³ in the Jiannan area (a) and in the Upper Jurassic Smackover Formation (b) in the Texas

白云岩作用形成的白云岩分布特征^[47]。Smackover 组白云岩化流体来源于上部 Buckner 组蒸发卤水, 随卤水距离的增加, 白云石含量向下逐渐减少。孔隙度的变化则受白云岩化之前灰岩母岩的影响^[47]。

依据 Sibley 和 Gregg^[21] 的白云石晶体分类, 细晶白云岩主要由平面自形一半自形晶体组成, 他形晶少量分布(图 5a)。孔隙类型以晶间孔和晶间溶孔为主(图 5a, b), 局部发育少量的溶孔(图 5b)。在部分白云岩化层段可见白云石优先交代颗粒灰岩中的鲕粒或内碎屑^[39]。阴极发光下, 白云石晶体为暗红色光, 无或少量的环带结构(图 5c, d)。

3.2 白云岩的平面预测与展布

研究区 XD1 井和 L8 井共取芯约 80 m, 并进行了大量的岩芯薄片鉴定, 对岩芯矿物成分有了精细的统计(图 6)。同时, 两口探井均进行了 GR、电阻率和 PEF 测井, 为构建白云石含量曲线提供了基础资料。在碳酸盐岩地层中, PEF 测井对灰岩和白云岩具有较强的识别能力(图 2), 是判断白云岩与灰岩最为可靠的测井之一^[33-34]。理论上, 纯白云岩 PEF 值为 3.14, 纯灰岩 PEF 值为 5.15。灰质云岩和云质灰岩 PEF 值介于两者之间, 随白云石含量的增加而减小。利用岩芯与 PEF 测井曲线并参考 GR 曲线确定白云石含量

与 PEF 值的关系曲线为: $Y = -48.29x + 248.84$; Y 为碳酸盐岩中白云石含量, x 为测量的 PEF 值。当 $x > 5.15$ 时, 为纯灰岩, 当 $x < 3.14$ 时为纯白云岩。利用公式计算的白云石含量与岩芯薄片的统计值具有较好的相关性(图 6), 因此, 可应用于其他钻井白云石含量曲线的构建。

本研究共构建了 15 口钻井的白云石含量曲线。将白云石含量曲线导入已建立时深关系的三维地震体中, 并利用多属性转化分析方法建立地震属性与白云石含量的关系, 确定最优属性组合。当属性增加至 6 个时, 验证误差 (Validation error) 开始增大(图 7a), 故选取 5 个地震属性时具有最优的预测效果, 预测误差为 9.08%。五个地震属性分别为 Amplitude Weighted Frequency、Amplitude Weighted Cosine Phase、Derivative Instantaneous Amplitude、Quadrature Trace 和 Integrate(图 7b)。最终反演得到白云石含量的三维数据体。

基于三维白云石数据体得到飞四段顶界面以下 10 ms(图 8a)和飞三段顶界面以上 2 ms(图 8b)两个飞四段内的顺层切片, 飞三顶界面以下 2 ms(图 8c)和界面以下 10 ms(图 8d)两个飞三段内部的顺层切片。总体而言, 建南地区飞四段白云岩较发育,

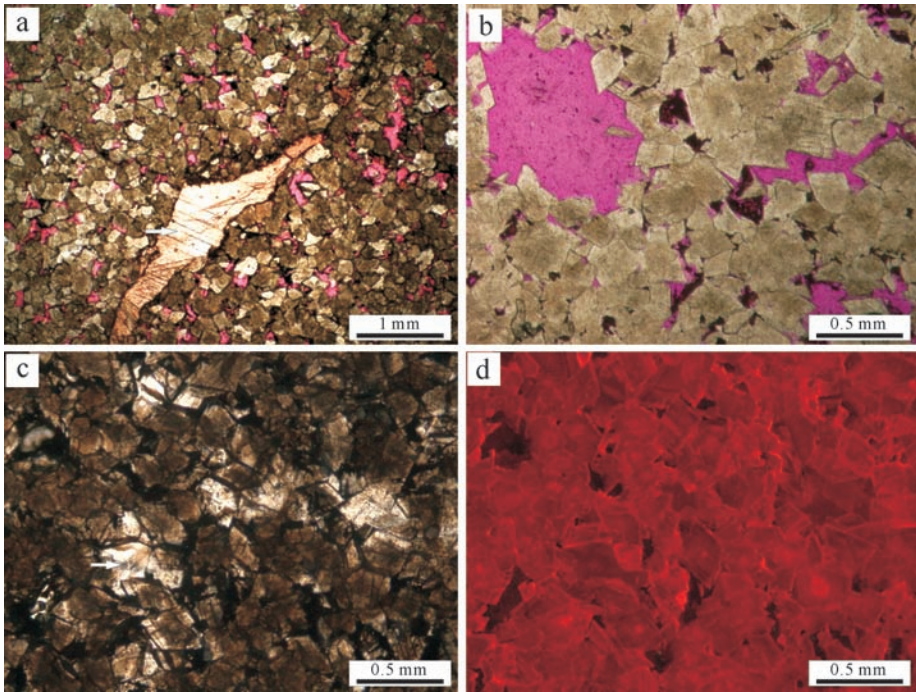


图 5 建南地区飞三段白云岩的镜下特征

a. 细晶白云岩, 晶体以自形一半自形为主, 晶间孔非常发育, 中部溶缝被方解石(箭头)全充填。单片光, 红色铸体, L8, 3 838.04 m; b. 细晶白云岩, 溶孔和晶间孔发育。单片光, 红色铸体, XD1, 3 262.41 m; c 和 d 同一视域, 白云石晶体成暗红色阴极发光, 无或少量环带结构。晶间方解石(箭头)为暗色阴极发光。c 为单偏光, d 为阴极发光。XD1, 3 263.71 m。

Fig.5 Photomicrographs showing the petrography of the T_1f^3 dolomite in the Jiannan area

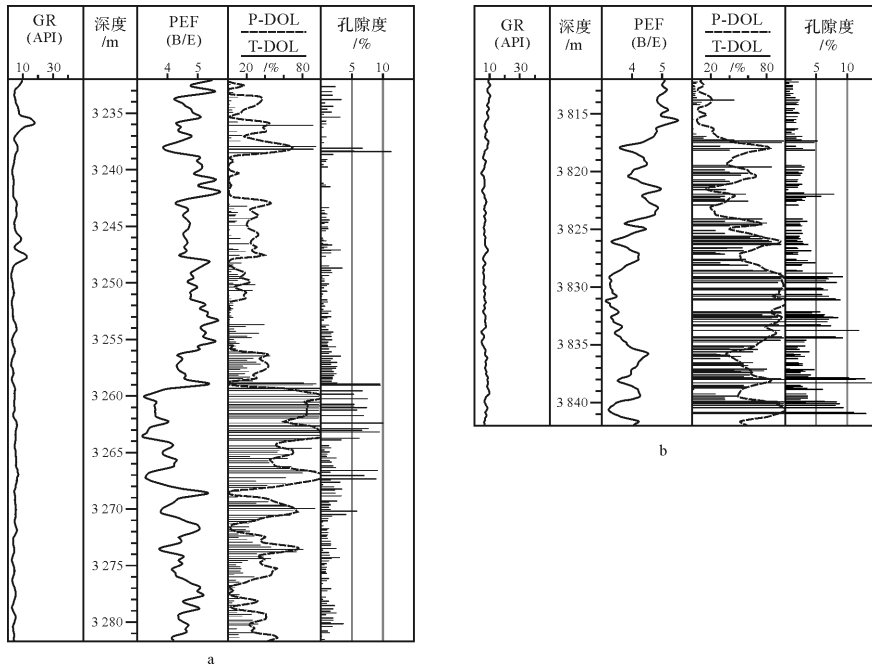


图 6 建南地区飞三段取芯段 PEF 计算的白云石含量与岩芯统计白云石含量关系
注: a 为 XD1 井, b 为 L8 井。P-DOL 为基于 PEF 计算的白云石含量, T-DOL 为基于薄片统计的白云石含量; 两种方法得到的白云石含量具有较好的相关性。

Fig.6 Profiles showing the correlations between dolomite contents calculated from PEF logs and thin-sections from the T_1f^3 cores in the Jiannan area

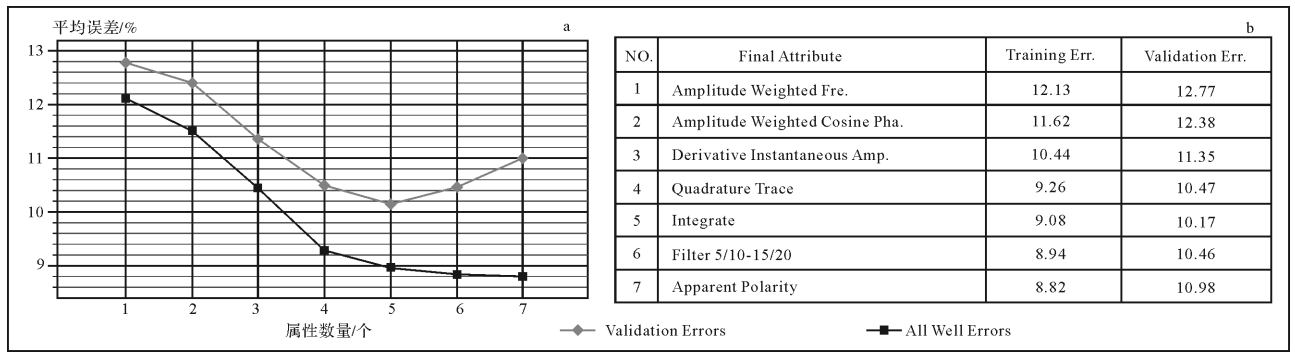


图7 地震属性优选 a 及相应的地震属性类型 b

注:当地震属性增加至六个时,验证误差开始增加,故选取前五个为最优属性组合。

Fig.7 The optimal number of attributes and associated seismic attributes

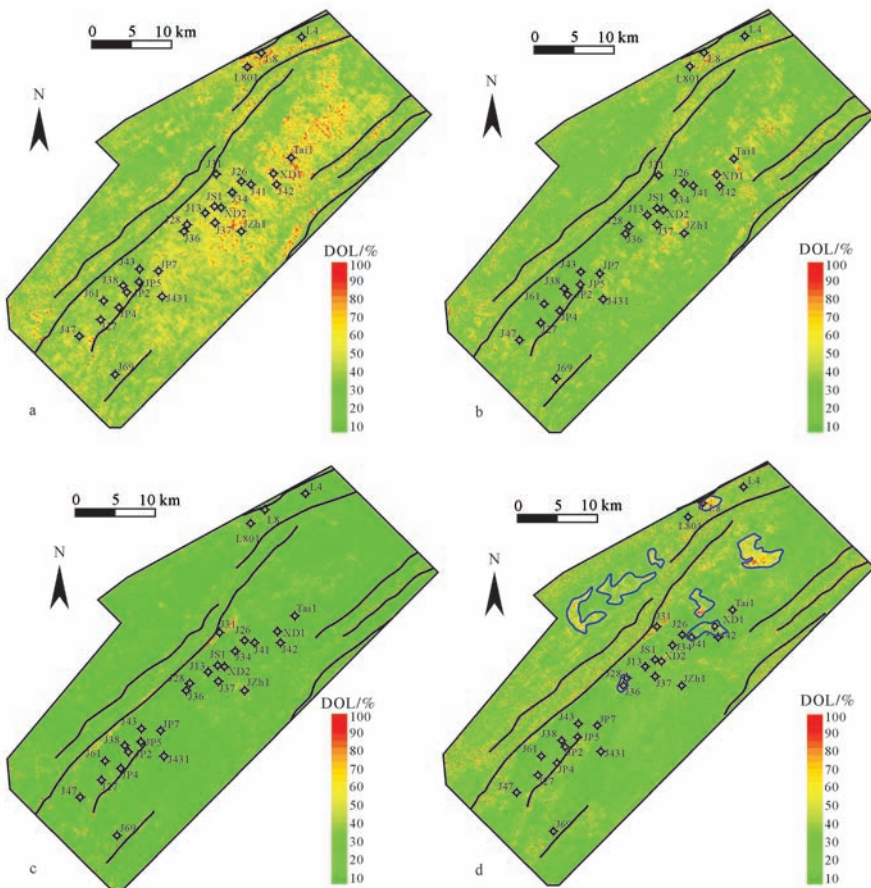


图8 不同时间切片的白云岩平面分布

注: a.为飞四顶界面向下 10 ms;b.为飞三顶界面上之 2 ms;c.为飞三顶界面之下 2 ms;d.为飞三顶界面之下 10 ms;黑色曲线为断层

Fig.8 Horizon slices from different times showing the dolomite distribution

分布范围较广(图 8a),这与四川盆地飞四沉积期普遍发育局限台地相准同生白云岩的特征相一致。向下近飞四段底部,白云岩分布范围逐渐减少(图 8b);至飞三段顶界面以下 2 ms 附近白云石含量普遍较低,主要发育灰岩;向下白云石含量和分布范围增加,

白云岩呈零星状分布于三维区的北部(图 8d)。在 J31 井附近,白云岩呈条带状沿断层带分布(图 8c, d)。这种现象存在两种可能性解释。第一种是受断层扰动的影响,地震属性在断层附近预测的白云石精度较差所致。第二种可能性为断层相关的热液白云

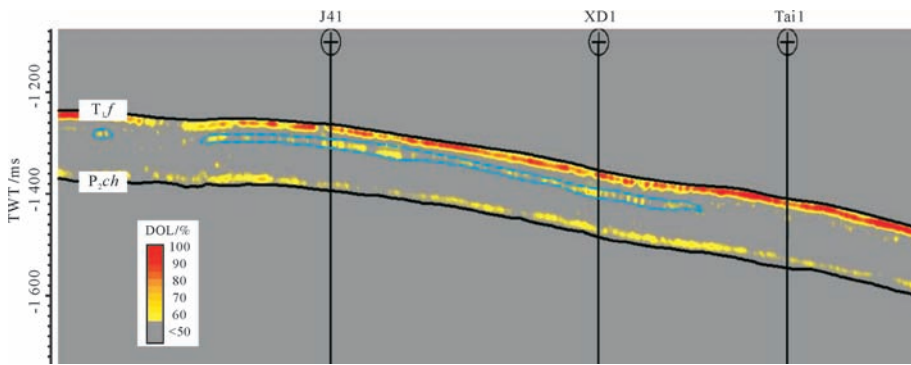


图9 建南地区飞仙关组白云岩的剖面分布特征

注:飞仙关组底部受泥质含量的影响,显示白云石含量较高的假象,可结合钻井并排除

Fig.9 Transect through dolomite-content volume showing dolomite distributions of T_{1f} in the Jiannan area

岩。热液白云岩常沿断层带分布,平面上成条带状,如 Appalachian 盆地的奥陶系的 Trenton-Black River 组^[48-49]、也门山的侏罗系^[12]以及塔里木盆地奥陶统^[50]热液白云岩。遗憾的是,本次研究未获得 J31 井的岩芯资料。因此,若为热液白云岩则有待进一步的研究。本文则主要研究块状细晶白云岩的分布。剖面上,细晶白云岩在 J41 井和 XD1 井间成断续状分布(图 9)。

4 讨论

基于岩石学和地球化学特征,不同学者对建南地区飞三段细晶白云岩成因给出了不同的解释。主要的观点包括渗透回流白云岩化作用、混合水白云岩化作用^[51-52]和埋藏白云岩化作用^[43,46]。然而,混合水白云岩化模式自提出就一直倍受质疑^[53-55],且对建南北高点颗粒滩成岩作用的研究并未显示强烈的大气淡水成岩作用特征^[46]。因此,较小的淡水透镜体和短暂的暴露时间并不能解释细晶白云岩的成因。本文基于前人研究的基础,结合岩石学和宏观展布特征探讨飞三段白云岩的流体来源和性质,进一步分析渗透回流白云岩化作用和浅埋藏白云岩化作用在建南地区飞三段白云岩形成中的可能性。

4.1 白云岩化流体来源

建南地区飞三段白云岩垂向上与飞四段局限台地相沉积较近。飞三段白云岩是否为飞四沉积期卤水渗透回流作用的产物,即白云岩化流体是否来自于飞四期蒸发海水? 对比建南地区飞三段与美国德克萨斯侏罗系 Smackover 组渗透回流白云岩的分布显示出明显的差异性。侏罗系 Smackover 组白云岩化流体来源于上部 Buckner 组蒸发卤水,白云石随离白

白云岩化流体源(Buckner 组)距离的增加向下含量逐渐减少(图 4b)。若飞三段细晶白云岩的云化流体来源于飞四段蒸发海水,则距飞四段最近的飞三段顶部应具有最高的白云石含量,即应与 Smackover 组的分布特征相似。然而,建南地区飞三段白云岩主要集中于颗粒滩的中下部(图 4a),现今已有钻井均显示飞三段白云岩与飞四段准同生白云岩之间均存在灰岩隔层,指示白云岩化流体并非来自于上部飞四段卤水。此外,为了消除因钻井分布范围的局限性带来的影响,可以通过三维白云石含量数据体的顺层切片检查研究区是否存在飞三段白云岩与飞四段直接相邻的现象。结果显示,白云岩在飞四段普遍发育(图 8a,b),然而,飞三段与飞四段垂向上并非连续分布,中间存在灰岩隔层(图 8c),因此,飞三段白云岩化流体并非来自于飞四段蒸发海水。

此外,基于 Sr 同位素的特征也可得到相同的结论。碳酸盐岩的 Sr 同位素具有很好的地层年代效应和较好的稳定性,不受蒸发作用、温度和生物作用的影响而发生分馏^[56-57],且碳酸盐岩能够继承其沉淀海水的 Sr 同位素组成特征^[58]。因此,Sr 同位素可用于分析白云岩化流体的性质。灰岩、白云岩与同期海水 Sr 同位素的对比发现(图 10),白云岩与灰岩的 Sr 同位素均与同期海水 Sr 同位素组成具有非常好的相关性,进一步说明了白云岩化流体来源于同期海水而非飞四段 Sr 同位素值较高的蒸发卤水。

基于白云岩的分布特征并结合地球化学数据可以较好的确定白云岩化流体的来源和运移方向。建南地区飞三段预测的白云岩分布与沉积相叠合显示(图 11),白云岩主要分布于台内洼地两侧的颗粒滩中,且向台地内部逐渐变薄尖灭(图 3),指示白云岩

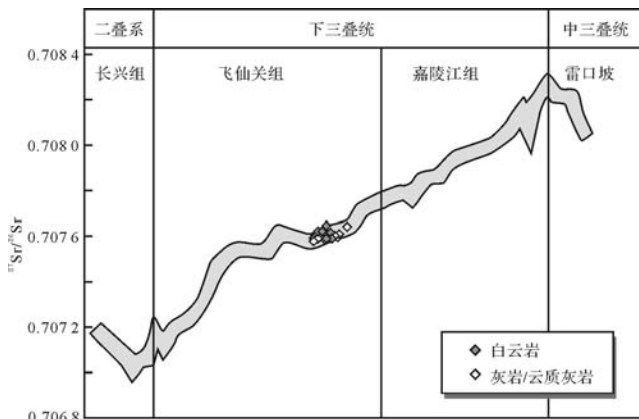


图10 飞三段白云岩、灰岩的Sr同位素与同期海水Sr同位素组成特征

注:海水Sr同位素演化曲线来自于文献[59]

Fig.10 Sr isotope ratios of T_1f^3 carbonates plotted on strontium curve of the Lower Triassic seawater

化流体来源于台内洼地。白云岩的Sr同位素与同期海水相似的Sr同位素指示细晶白云岩的云化流体为同期海源流体。因此,白云岩化流体应为台内洼地泥晶灰岩和泥灰岩沉积期封存的同期海水。此外,白云石晶体的生长受成核速率与温度的控制,平面晶一般形成于相对较低的温度(晶面弯曲温度约 50°C),而非平面晶的生长温度一般相对较高^[11,21]。建南地区飞三段白云岩主要由平面自形一半自形晶组成,非平面—它形晶少量分布,说明白云石形成深度与晶体从平面晶向非平面晶转化的深度范围相重合。这与Wang *et al.*^[46]基于氧同位素计算的白云岩形成于 $44^{\circ}\text{C}\sim 53^{\circ}\text{C}$ 之间的结果一致。

相对于近地表,埋藏环境中较高的温度更有利于白云岩化作用的发生^[60]。随埋藏深度的增加,台内洼地泥晶灰岩和泥灰岩更容易压实,差异性压实作用促使洼地沉积物中封存的海水优先侧向汇聚于洼地两侧的孔隙性颗粒滩中,并发生白云岩化作用^[46]。

4.2 白云岩的分布与控制因素

建南地区飞三段白云岩平面上成斑状分布(图11),剖面上呈断续状分布(图9),说明受压实流体即白云岩化流体规模的影响,飞三段白云岩化作用程度较低。这也反应了压实流体并不能提供大规模的白云岩化作用。这可能也是建南地区飞三段白云岩与川东北地区相比规模较小的主要原因。受压实流体规模的影响,建南地区飞三段白云岩规模整体较小,紧邻洼地的颗粒滩白云岩厚度较大,向台内方向白云岩化作用受颗粒灰岩母岩物性的影响成零星断续分

布。受压实流体汇聚和运移方向的影响,白云岩主要分布于台内洼地两侧的颗粒中,且向台地内部逐渐变薄尖灭。然而,图11显示白云岩的分布并非完全受控于滩体和台内洼地的距离,这可能与白云岩化作用的影响因素相关(如云化流体规模和运移方向、距云化流体源的距离,以及灰岩母岩的孔渗性或几个因素的组合)。基于露头资料,Garcia-Fresca等^[61]模拟了新墨西哥二叠系San Andres组的白云岩化过程。结果显示,当白云岩化流体充足时,模拟的白云岩分布与露头分布特征相似。当白云岩化程度仅达到50%时,白云岩受灰岩母岩渗透率的影响明显;近流体来源处白云岩化程度相对较高,随白云岩化流体向前运移,渗透率相对较高的区域优先发生白云岩化作用。因此,平面上的斑状分布特征反应了飞三段白云岩化流体的不足,同时也说明了白云石化流体的体积是控制建南地区飞三段埋藏白云岩规模的主要因素之一。

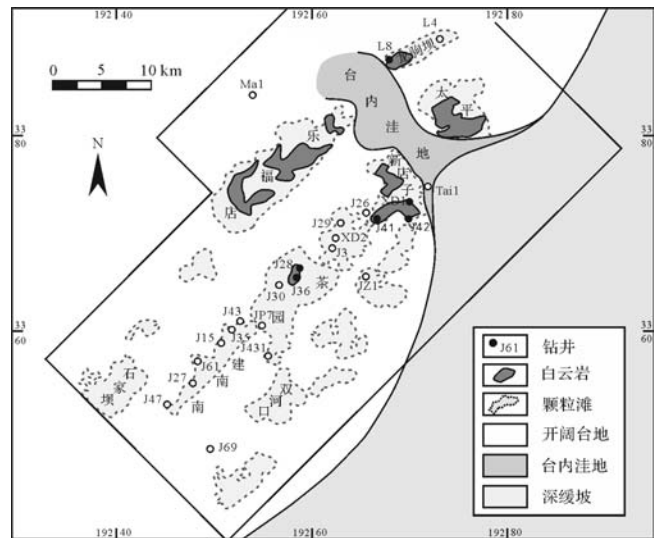


图11 建南地区飞三段白云岩的分布与沉积相关关系
Fig.11 Correlation between T_1f^3 dolomite and associated paleogeography in the Jiannan area

4.3 白云石含量预测方法的应用与影响因素

本研究共构建了15口井的白云石含量曲线,利用多属性转化分析方法建立地震属性与白云石含量的关系,达到预测飞三段白云石含量分布的目的。当选取5个地震属性组合时预测效果最佳。虽然预测误差约为9%,但整体仍能较好的反应白云石的宏观分布特征,可用于指导优质白云岩储层的勘探。川东北地区二叠—三叠系白云岩较发育,为优质的天然气储层,因此,对白云岩分布规律的认识是寻找优质储层的基础。因此,本文采用的测井、岩芯和地震相结

合的预测方法对川东北及其他地区白云岩储层的勘探具有一定的借鉴意义。

然而,该方法在应用时应注意泥质含量的影响。本文利用 PEF 测井曲线拟合白云石含量的计算公式,进行单井白云石含量曲线的构建。由于建南地区目的层 GR 值整体较低,非碳酸盐矿物含量较少,以及避免引入新的误差,因此,未对 PEF 测井曲线值进行泥质含量的校正。总体来说,白云石 PEF 值较低,方解石 PEF 值较大。然而,随碳酸盐岩中泥质含量的增加,PEF 值逐渐变小,表现出白云石含量增加的假象,进而出现预测的白云石含量较大的假象(图9)。因此,对可能受泥质影响较大的准同生成因白云岩进行预测时,应注意泥质含量的影响并进行必要的校正。

5 结论

(1) 建南地区飞三段白云岩主要由细晶、平面自形一半自形晶组成,以晶间孔和晶间溶孔为主,并发育少量的溶孔,构成了本区最为优质的储层。

(2) 当选取5个地震属性组合时具有最佳的预测效果,白云石含量的预测误差为9.08%。五个地震属性分别为 Amplitude Weighted Frequency、Amplitude Weighted Cosine Phase、Derivative Instantaneous Amplitude、Quadrature Trace 和 Integrate。

(3) 建南地区飞三段白云岩主要分布于台内洼地两侧的颗粒滩中,向台内方向厚度逐渐减薄并成零星断续状分布,表现出明显的相控特征,指示白云岩化流体来源于台内洼地的同期海源压实流体。

参考文献 (References)

- 1 Ma Y S, Guo X S, Guo T L, et al. The Puguang gas field: New Giant discovery in the mature Sichuan Basin, southwest China [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(5): 627-643.
- 2 马永生,蔡勋育,赵培荣,等. 四川盆地大中型天然气田分布特征与勘探方向[J]. 石油学报,2010,31(3):347-354. [Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong, et al. Distribution and further exploration of the large-medium sized gas fields in Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(3): 347-354.]
- 3 Zhao W Z, Luo P, Chen G S, et al. Origin and reservoir rock characteristics of dolostones in the Early Triassic Feixianguan Formation, NE Sichuan Basin, China: Significance for future gas exploration [J]. Journal of Petroleum Geology, 2005, 28(1): 83-100.
- 4 黄思静, Qing Hairuo, 胡作维, 等. 四川盆地东北部三叠系飞仙关组碳酸盐岩成岩作用和白云岩成因的研究现状和存在问题[J]. 地球科学进展, 2007, 22(5): 495-503. [Huang Sijing, Qing Hairuo, Hu

- Zuowei, et al. The diagenesis and dolomitization of the feixianguan carbonates of triassic in NE Sichuan Basin: an overview [J]. Advances in Earth Science, 2007, 22(5): 495-503.]
- 5 Ma Y S, Zhang S C, Guo T L, et al. Petroleum geology of the Puguang Sour Gas Field in the Sichuan Basin, SW China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2008, 25(4/5): 357-370.
- 6 张学丰,刘波,蔡忠贤,等. 白云岩化作用与碳酸盐岩储层物性[J]. 地质科技情报,2010,29(3):79-85. [Zhang Xuefeng, Liu Bo, Cai Zhongxian, et al. Dolomitization and carbonate reservoir formation [J]. Geological Science and Technology Information, 2010, 29(3): 79-85.]
- 7 Cai C F, He W X, Jiang L, et al. Petrological and geochemical constraints on porosity difference between Lower Triassic sour- and sweet-gas carbonate reservoirs in the Sichuan Basin [J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 56: 34-50.
- 8 Tucker M E, Wright V P. Carbonate Sedimentology [M]. Oxford: Blackwell, 1991: 1-482.
- 9 Allan J R, Wiggins W D. Dolomite Reservoirs: Geochemical Techniques for Evaluating Origin and Distribution [M]. Michigan: American Association of Petroleum Geologists, 1993: 1-129.
- 10 Sun S Q. Dolomite reservoirs: porosity evolution and reservoir characteristics [J]. AAPG Bulletin, 1995, 79(2): 186-204.
- 11 Warren J. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations [J]. Earth-Science Reviews, 2000, 52(1/3): 1-81.
- 12 Vandeginste V, John C M, van de Flierdt T, et al. Linking process, dimension, texture, and geochemistry in dolomite geobodies: A case study from Wadi Mistal (northern Oman) [J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(7): 1181-1207.
- 13 Fairbridge R W. The Dolomite Question [C]// Le Blanc R J, Breeding J G. Regional Aspects of Carbonate Deposition-A Symposium Sponsored by the Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. Wisconsin: George Banta Company., 1957, 5: 125-178.
- 14 梅冥相. 从3个科学理念简论沉积学中的“白云岩问题”[J]. 古地理学报,2012,14(1):1-12. [Mei Mingxiang. Brief introduction of “dolostone problem” in sedimentology according to three scientific ideas [J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(1): 1-12.]
- 15 李红,柳益群. “白云石(岩)问题”与湖相白云岩研究[J]. 沉积学报,2013,31(2):302-314. [Li Hong, Liu Yiqun. “Dolomite problem” and research of ancient lacustrine dolostones [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(2): 302-314.]
- 16 Kaufman J K, Hanson G N, Meyers W J. Dolomitization of the Devonian Swan Hills Formation, rosevear field, Alberta, Canada [J]. Sedimentology, 1991, 38(1): 41-66.
- 17 Saller A H, Lounsbury K, Birchard M. Facies control on dolomitization and porosity in the Devonian Swan Hills Formation in the Rosevear area, west-central Alberta [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2001, 49(4): 458-471.
- 18 Green D G, Mountjoy E W. Fault and conduit controlled burial dolomitization of the Devonian west-central Alberta Deep Basin [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2005, 53(2): 101-129.
- 19 成晓崧,李平平,邹华耀,等. 川东兴隆场地区长兴组白云岩地球

- 化学特征及流体来源[J]. 地质学报, 2013, 87(7): 1-10. [Cheng Xiaozhuan, Li Pingping, Zou Huayao, et al. Geochemical characteristics and fluid origin of the Changxing Formation dolomitic rock in the Xinglongchang area of East Sichuan Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(7): 1-10.]
- 20 郑剑锋, 沈安江, 刘永福, 等. 塔里木盆地寒武系与蒸发岩相关的白云岩储层特征及主控因素[J]. 沉积学报, 2013, 31(1): 89-98. [Zheng Jianfeng, Shen Anjiang, Liu Yongfu, et al. Main controlling factors and characteristics of cambrian dolomite reservoirs related to evaporite in Tarim Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(1): 89-98.]
- 21 Sibley D F, Gregg J M. Classification of dolomite rock texture [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1987, 57(6): 967-975.
- 22 Jones B. Dolomite crystal architecture: genetic implications for the origin of the tertiary dolostones of the Cayman Islands [J]. Journal of Sedimentary Research, 2005, 75(2): 177-189.
- 23 Jones B. Microarchitecture of dolomite crystals as revealed by subtle variations in solubility: Implications for dolomitization [J]. Sedimentary Geology, 2013, 288: 66-80.
- 24 高梅生, 郑荣才, 文华国, 等. 川东北下三叠统飞仙关组白云岩成因——来自岩石结构的证据[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2007, 34(3): 297-304. [Gao Meisheng, Zheng Rongcai, Wen Huaguo, et al. Lithological characteristics of dolomite in the Lower Triassic Feixianguan Formation of the NE Sichuan Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2007, 34(3): 297-304.]
- 25 Huang S J, Huang K K, Lü J, et al. The relationship between dolomite textures and their formation temperature: A case study from the Permian-Triassic of the Sichuan Basin and the Lower Paleozoic of the Tarim Basin [J]. Petroleum Science, 2014, 11(1): 39-51.
- 26 张杰, 寿建峰, 张天付, 等. 白云石成因研究新方法——白云石晶体结构分析[J]. 沉积学报, 2014, 32(3): 550-559. [Zhang Jie, Shou Jianfeng, Zhang Tianfu, et al. New approach on the study of dolomite origin: The crystal structure analysis of dolomite [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(3): 550-559.]
- 27 郑荣才, 胡忠贵, 冯青平, 等. 川东北地区长兴组白云岩储层的成因研究[J]. 矿物岩石, 2007, 27(4): 78-84. [Zheng Rongcai, Hu Zhonggui, Feng Qingping, et al. Genesis of dolomite reservoir of the Changxing Formation of Upper Permian, Northeast Sichuan Basin [J]. Journal of Mineral and Petrology, 2007, 27(4): 78-84.]
- 28 强子同, 曾德铭, 王兴志, 等. 川东北下三叠统飞仙关组鲕粒滩白云岩同位素地球化学特征[J]. 古地理学报, 2012, 14(1): 13-20. [Qiang Zitong, Zeng Deming, Wang Kingzhi, et al. Isotopic geochemical characteristics of oolitic bank dolostones in the Lower Triassic Feixianguan Formation in northeastern Sichuan province [J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(1): 13-20.]
- 29 胡作维, 黄思静, 李志明, 等. 白云石—方解石氧同位素温度计在川东北地区飞仙关组白云岩成因研究中的尝试[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2012, 39(1): 1-9. [Hu Zuowei, Huang Sijing, Li Zhiming, et al. Preliminary application of the dolomite-calcite oxygen isotope thermometer in studying the origin of dolomite in Feixianguan Formation, Northeast Sichuan, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2012, 39(1): 1-9.]
- 30 张军涛, 胡文瑛, 王小林. 塔里木盆地寒武系鞍状白云石孔隙充填物差异与成因[J]. 沉积学报, 2014, 32(2): 253-259. [Zhang Juntao, Hu Wenuan, Wang Xiaolin. Difference and origin of cambrian saddle dolomite in Tarim Basin, Northwest China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(2): 253-259.]
- 31 Kaufman J K. Numerical models of fluid flow in carbonate platforms; implications for dolomitization [J]. Journal of Sedimentary Research, 1994, 64(1): 128-139.
- 32 Longman M W, Fertal T G, Glennie J S. Origin and geometry of Red River Dolomite Reservoirs, Western Williston Basin [J]. AAPG Bulletin, 1983, 67(5): 744-771.
- 33 Sagan J A, Hart B S. Three-dimensional seismic-based definition of fault-related porosity development: Trenton-Black River interval, Saybrook, Ohio [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11): 1763-1785.
- 34 Ogiesoba O C. Porosity prediction from seismic attributes of the Ordovician Trenton-Black River groups, Rochester field, southern Ontario [J]. AAPG Bulletin, 2010, 94(11): 1673-1693.
- 35 盛贤才, 王韶华, 文可东, 等. 鄂西渝东地区石柱古隆起构造沉积演化[J]. 海相油气地质, 2004, 9(1/2): 43-52, 2. [Sheng Xiancai, Wang Shaohua, Wen Kedong, et al. Tectonics and sedimentology of Shizhu Palaeohigh in western Hubei-eastern Chongqing area [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2014, 9(1/2): 43-52, 2.]
- 36 Li P P, Hao F, Zhang B Q, et al. Heterogeneous distribution of pyrobitumen attributable to oil cracking and its effect on carbonate reservoirs: Feixianguan Formation in the Jiannan gas field, China [J]. AAPG Bulletin, 2015, 99: 763-789.
- 37 Hao F, Guo T L, Zhu Y M, et al. Evidence for multiple stages of oil cracking and thermochemical sulfate reduction in the Puguang gas field, Sichuan Basin, China [J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(5): 611-637.
- 38 舒志国. 鄂西—渝东地区飞三段天然气成因与成藏阶段[J]. 现代地质, 2013, 27(1): 165-171. [Shu Zhiguo. Natural gas origin and accumulation stages of the third member of Feixianguan Formation in western Hubei and eastern Chongqing area [J]. Geoscience, 2013, 27(1): 165-171.]
- 39 易积正, 张士万, 梁希文. 鄂西渝东地区飞三段鲕滩储层及控制因素[J]. 石油天然气学报: 江汉石油学院学报, 2010, 32(6): 11-16. [Yi Jizheng, Zhang Shiwan, Liang Xiwen. E₃ oolitic shoal reservoirs and their control factors in Western Hubei-Eastern Chongqing area [J]. Journal of Oil and Gas Technology: J JPI, 2010, 32(6): 11-16.]
- 40 康红. 地震相精细刻画建南气田飞三气藏鲕滩体[J]. 江汉石油职工大学学报, 2012, 25(1): 4-6. [Kang Hong. Elaborating on Er beach body of Fei III gas reservoir in Jiannan gas field through seismic facies [J]. Journal of Jiangnan Petroleum University of Staff and Workers, 2012, 25(1): 4-6.]
- 41 王一刚, 文应初, 洪海涛, 等. 四川盆地三叠系飞仙关组气藏储层成岩作用研究拾零[J]. 沉积学报, 2007, 25(6): 831-839. [Wang

- Yigang, Wen Yingchu, Hong Haitao, et al. Diagenesis of triassic Feixianguan Formation in Sichuan Basin, Southwest China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(6): 831-839.]
- 42 马永生,郭彤楼,赵雪凤,等. 普光气田深部优质白云岩储层形成机制[J]. *中国科学(D辑):地球科学*, 2007, 37(增刊II): 43-52. [Ma Yongsheng, Guo Tonglou, Zhao Xuefeng, et al. The formation mechanism of high-quality dolomite reservoir in the deep of Puguang Gas Field[J]. *Science China (Seri. D): Earth Sciences*, 2007, 37 (Suppl. II): 43-52.]
- 43 马登峰,康红. 建南气田飞仙关组飞三段储层特征及主控因素[J]. *江汉石油科技*, 2014, 24(1): 1-9, 15. [Ma Dengfeng, Kang Hong. The characteristics and controls of the third member of Lower Triassic Feixianguan Formation in the Jiannan Gas Field [J]. *Jiannan Petroleum Science and Technology*, 2014, 24(1): 1-9, 15.]
- 44 秦军,葛兰,陈玉明,等. 川东建南地区飞仙关组地震储层预测[J]. *海相油气地质*, 2011, 16(2): 9-17. [Qin Jun, Ge Lan, Chen Yuming, et al. Reservoir prediction of Lower Triassic Feixianguan Formation in Jiannan area, Sichuan Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2011, 16(2): 9-17.]
- 45 Hampson D P, Schuelke J S, Quirein J A. Use of multiattribute transforms to predict log properties from seismic data [J]. *Geophysics*, 2001, 66(1): 220-236.
- 46 Wang G W, Li P P, Hao F, et al. Origin of dolomite in the third member of Feixianguan Formation (Lower Triassic) in the Jiannan area, Sichuan Basin, China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 63: 127-141.
- 47 Moore C H, Chowdhury A, Chan L. Upper Jurassic Smackover Platform Dolomitization, northwestern Gulf of Mexico: A Tale of Two Waters [C]// Skula V, Baker P A. *Sedimentology and Geochemistry of Dolostones*. Tulsa: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication, 1988, 43: 175-189.
- 48 Smith L B, Jr, Davies G R. Structurally controlled hydrothermal alteration of carbonate reservoirs: Introduction [J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(11): 1635-1640.
- 49 Davies G R, Smith L B, Jr. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: an overview [J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(11): 1641-1690.
- 50 Dong S F, Chen D Z, Qing H R, et al. Hydrothermal alteration of dolostones in the Lower Ordovician, Tarim Basin, NW China: Multiple constraints from petrology, isotope geochemistry and fluid inclusion microthermometry [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 46: 270-286.
- 51 梁西文,郑荣才. 建南构造飞仙关组三段高精度层序地层学及南北高点储层差异原因探讨[J]. *沉积与特提斯地质*, 2006, 26(3): 45-50. [Liang Xiwen, Zheng Rongcai. High-resolution sequence stratigraphy and reservoir differences between the southern and northern culminations in the third member of the Feixianguan Formation in the Jiannan structure, Hubei [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2006, 26(3): 45-50.]
- 52 张柏桥,胡明毅. 鄂西渝东地区下三叠统飞仙关组鲕滩储层成岩作用及孔隙演化[J]. *石油天然气学报:江汉石油学院学报*, 2008, 30(6): 9-15. [Zhang Baiqiao, Hu Mingyi. Diagenesis and porosity evolution characteristics of Lower Triassic Feixianguan Formation in the eastern Sichuan and western Hubei [J]. *Journal of Oil and Gas Technology: J. JPI*, 2008, 30(6): 9-15.]
- 53 Hardie L A. Dolomitization: A critical view of some current views: PERSPECTIVES [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1987, 57(1): 166-183.
- 54 Luczaj J A. Evidence against the Dorag (mixing-zone) model for dolomitization along the Wisconsin Arch—a case for hydrothermal diagenesis [J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(11): 1719-1738.
- 55 Machel H G. Concepts and models of dolomitization: a critical reappraisal [C]// Braithwaite C J R, Rizzi G, Darke G. *The Geometry and Petrogenesis of Dolomite Hydrocarbon Reservoirs*. Geological Society, London: Special Publication, 2004, 235: 7-63.
- 56 Veizer J, Ala D, Azmy K, et al. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater [J]. *Chemical Geology*, 1999, 161(1/2/3): 59-88.
- 57 强子同. 碳酸盐岩储层地质学[M]. 东营:石油大学出版社, 1998: 1-477. [Qiang Zitong. *Carbonate Reservoir Geology* [M]. Dongying: China University of Petroleum Publication, 1998: 1-477.]
- 58 Saller A H. Petrologic and geochemical constraints on the origin of subsurface dolomite, Enewetak Atoll; an example of dolomitization by normal seawater [J]. *Geology*, 1984, 12(4): 217-220.
- 59 黄思静, Qing Hairuo, 黄培培, 等. 晚二叠世—早三叠世海水的锶同位素组成与演化——基于重庆中梁山海相碳酸盐的研究结果[J]. *中国科学(D辑):地球科学*, 2008, 38(3): 273-283. [Huang Sijing, Qing Hairuo, Huang Peipei, et al. Evolution of strontium isotopic composition of seawater from Late Permian to Early Triassic based on study of marine carbonates, Zhongliang Mountain, Chongqing, China [J]. *Science China (Seri. D): Earth Sciences*, 2008, 38(3): 273-283.]
- 60 Zenger D H. Burial dolomitization in the Lost Burro Formation (Devonian), east-central California, and the significance of late diagenetic dolomitization [J]. *Geology*, 1983, 11(9): 519-522.
- 61 Garcia-Fresca B, Lucia F J, Sharp J M Jr, et al. Outcrop-constrained hydrogeological simulations of brine reflux and early dolomitization of the Permian San Andres Formation [J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(9): 1757-1781.

Distribution and Origin of the Third Member of Feixianguan Formation in the Jiannan Area: Comprehensive analysis from three-dimensional seismic, petrography, and geochemistry

WANG GuangWei¹ LI PingPing¹ HAO Fang^{1,2} ZOU HuaYao¹ YU XinYa¹

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The third member of Feixianguan Formation (T_f^3) is an important gas reservoir in the Jiannan area which consists mainly of tight grainstones and crystalline dolostones. However, the high quality reservoir is limited in the dolostones. Therefore, understanding the distribution mechanism of dolostones is prerequisite to predict the distribution of high-quality reservoir. In this study, the dolomite-content logs were firstly constructed based on the well logs and cores. Secondly, the correlation between dolomite-contents and seismic attributes derived from 3-D seismic volume were defined using the method of multiattribute transforms to predict the distribution of dolomite in the Jiannan area. At last, the predicted dolomite distribution and paleogeography were integrated to explain the source and nature of the dolomitizing fluid.

The dolostone of T_f^3 in the Jiannan area consist mainly of fine-grained, planar-e to planar-s crystals, and minor nonplanar crystals. Under CL, dolomite crystals show zoned to uniform dull red luminescence. Five most effective attributes were selected based on the method of multiattribute transforms. These attributes are Amplitude Weighted Frequency, Amplitude Weighted Cosine Phase, Amplitude Envelope, Quadrature Trace and Instantaneous Phase. Integration dolomite distribution and paleogeography indicates that dolomites mainly occur along the opposing margins of a trough. During progressively burial, owing to the increase in pore pressure and different compactability of sediments, Mg-rich, seawater-derived, compaction flow from trough sediments moved laterally and preferentially through less rapidly compacting, trough-margin shoals, which caused extensive dolomitization in shoals. Shoals along margins of the trough can be recognized as important exploration targets.

Key words: dolomitization; dolomitizing fluid; seismic attribute; Feixianguan Formation; Jiannan area