

# 碳酸盐岩地震地貌学研究与应用

## ——以四川盆地东北部上二叠统长兴组为例

何金海<sup>1</sup>, 李国蓉<sup>2,3</sup>, 彭博<sup>2,3</sup>

(1 中海石油(中国)有限公司深圳分公司研究院)

(2 成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室; 3 成都理工大学能源学院)

**摘要** 以四川盆地东北部某区上二叠统长兴组海相碳酸盐岩台地沉积为例,综合应用钻井和地震资料,在层序划分和等时层序界面追踪的基础上,通过拉平东吴运动面来创建地震拉平数据体,并沿长兴组顶界面提取地层切片,得到长兴组地震古地貌图,据此获得沉积相带的大致分布范围。在井震标定和地震相精细解释的基础上,通过地震相向沉积相转换,对礁滩体的展布以及研究区的沉积相平面分布做了精细刻画。结果表明,碳酸盐岩地震地貌学是恢复沉积体系的一种有效方法。

**关键词** 四川盆地; 长兴组; 碳酸盐岩储层; 地震地貌学; 地震相; 沉积相

**中图分类号**: TE121.3<sup>14</sup>

**文献标识码**: A

地震地貌学通常是运用三维地震成像去研究沉积体系在平面上的展布,它在碎屑岩领域已形成了较成熟的关键技术和工作流程<sup>[1-3]</sup>。近年来,碳酸盐岩地震地貌学研究在岩溶古地貌、台缘生物礁等方面取得了一定进展<sup>[4-6]</sup>。由于碳酸盐岩受岩溶作用的影响,地震成像效果一般较差,因此,如何合理解析受岩溶作用改造后的碳酸盐岩沉积体系,是碳酸盐岩地震地貌学研究面临的挑战<sup>[7-13]</sup>。

本次研究以四川盆地东北部某区上二叠统长兴组为例,从碳酸盐岩的沉积特征入手,综合应用钻井和地震资料,通过层序地层学、层拉平及地层切片等碳酸盐岩地震地貌学技术方法,对研究区的沉积体系进行了探索。结果表明,地震古地貌分析可以有效地指导地震相解释,同时通过地震相解释可以精细刻画沉积相带边界,合理恢复沉积相的平面展布。

隆沉积为主要特征,沉积物的厚度基本反映了当时的沉积环境,即沉积厚度小,水体就相对较深,水动力弱;而沉积厚度大,水体就相对较浅,水动力强<sup>[14]</sup>。在近于水平的沉积底部条件下,碳酸盐岩沉积后的地貌特征可以反映当时的沉积环境。同时,碳酸盐岩沉积的同生期固结成岩和后期压实作用对岩石体积影响很小<sup>[15]</sup>,故可以用古地貌特征来反演碳酸盐岩的沉积环境。

以一条地质横剖面为例,若它受后期构造运动的影响而变形较大(图1a),则目的层的现今地貌已不能反映同生期的沉积特征,那么,可通过层序地层学、层拉平、地层切片等方法,拉平下伏邻近目的层的等时层序界面来获得地震古地貌图,以恢复沉积期的地貌特征,并用于分析沉积相带的展布(图1b)。

## 1 碳酸盐岩地震地貌学方法

### 1.1 原理

碳酸盐岩沉积主要是生物化学沉积,以原地建

### 1.2 工作流程

地震地貌学方法的工作流程可用图2所示,即以区域地质为基础,通过野外露头、岩心、薄片及录井岩屑等资料的观察,结合测井、录井和分析测试资

收稿日期: 2012-08-20; 改回日期: 2013-12-18

本文受国家科技重大专项“海相碳酸盐岩层系大中型油气田分布规律及勘探评价”(编号:2011ZX05005-002)资助

何金海: 1984年生,工程师。2007年本科毕业于长江大学地球物理专业,2013年硕士毕业于成都理工大学矿产普查与勘探专业。从事含油气盆地层序地层学、沉积学研究。通讯地址: 510240 广东省广州市江南大道中 168号; E-mail: jinhaihe2012@sina.com

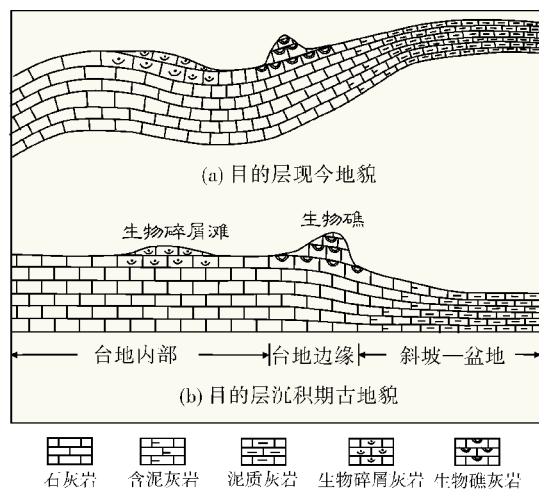


图 1 碳酸盐岩地震地貌学原理示意图

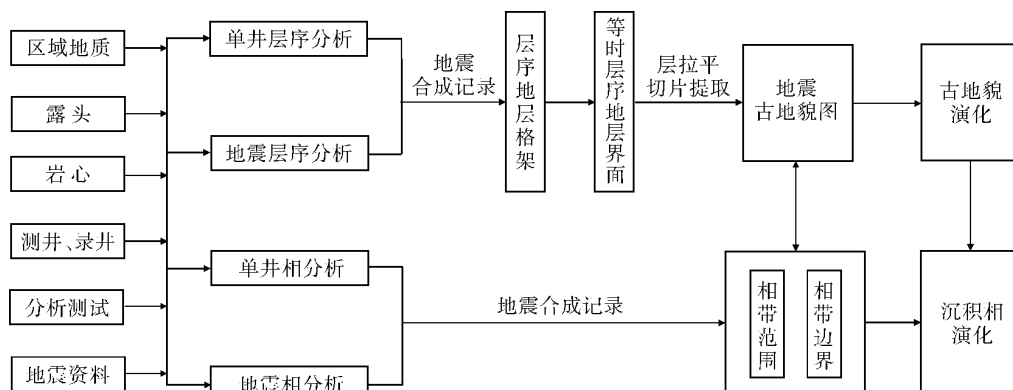


图 2 碳酸盐岩地震地貌学工作流程图

## 2 应用实例

本次研究选择的四川盆地东北部某区,目的层为上二叠统长兴组,礁滩相储层是主要勘探目标。由于印支期以来研究区构造变形较复杂<sup>[16]</sup>,如何有效地在平面上识别礁滩体的分布范围和空间演化就显得尤为重要<sup>[17-19]</sup>。为此,本文开展了地震地貌学研究。

### 2.1 层序地层学分析

四川盆地东北部长兴组的三级层序一般划分为下部( $SQ_1$ )和上部( $SQ_2$ )两个部分,在台地区均只发育海侵体系域(TST)和高水位体系域(HST)<sup>[20]</sup>(图3),该方案适用于本研究区。在单井三级层序划分(图3)的基础上,通过削截、上超、下超等反射终止现象的识别,可在地震剖面(图4)上解释三级层序界面。通过地震合成记录标定与连井对比,可以

料,充分利用地震资料,以分析研究区的层序和沉积相;在建立研究区等时层序地层界面的基础上,通过层拉平、地层切片等技术手段获得原始地震古地貌图(选取一个下伏邻近目的层且沉积期近水平的等时层序界面作为层拉平面,通过层拉平处理创建一个地震拉平体,在地震拉平数据体内沿等时层序界面和体系域界面提取等时地层切片,即为地震古地貌图);在地震合成记录标定和地震相分析的基础上,利用原始地震古地貌图刻画沉积相带的范围和边界,与地震相交交互验证,并通过地震相向沉积相转换,即可精细地去刻画沉积相平面展布,以进一步研究沉积相的演化特征。同时,沉积相带的刻画也可用于完善地震古地貌图,以进行古地貌演化分析。

建立起研究区的三级层序地层格架,同时利用地震同相轴的等时性原理,可以追踪研究区的等时层序地层界面(图4)。

### 2.2 单井沉积相分析

研究区内的长兴组沉积期为碳酸盐岩台地沉积背景,发育了台地内部、台地边缘、台缘斜坡和陆棚四个相区<sup>[21]</sup>。通过岩心观察、薄片鉴定和岩屑分析,结合地球化学测试资料分析和测井曲线分析,建立了对应井的岩性解释剖面,进行了沉积微相分析,主要发育的微相有生物礁、生物碎屑滩、滩间、潮坪、潟湖等(图3)。通过对研究区多口井的单井沉积相分析,就可以控制沉积格局,为沉积相平面分析奠定基础。

### 2.3 地震相分析

对已知地质体进行模型正演,可以为地震相分

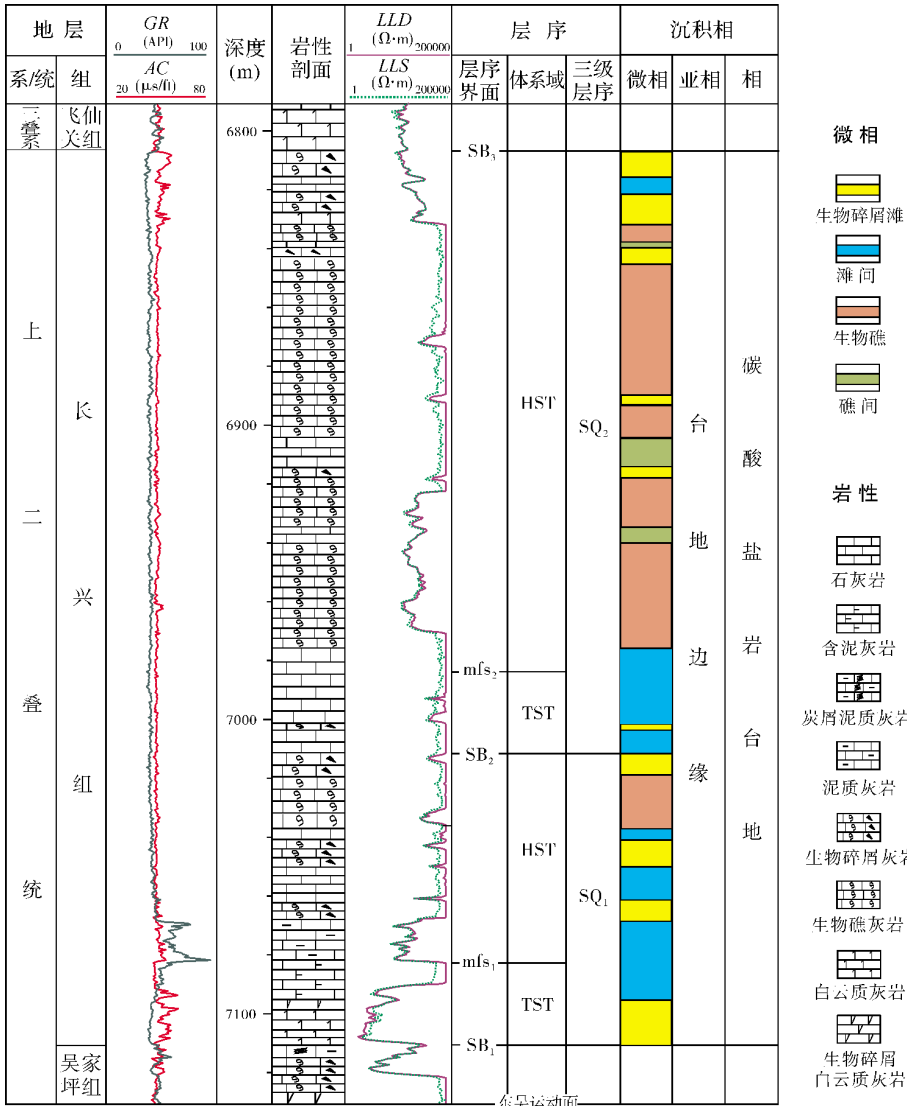


图3 研究区D井上二叠统长兴组沉积-层序综合柱状图

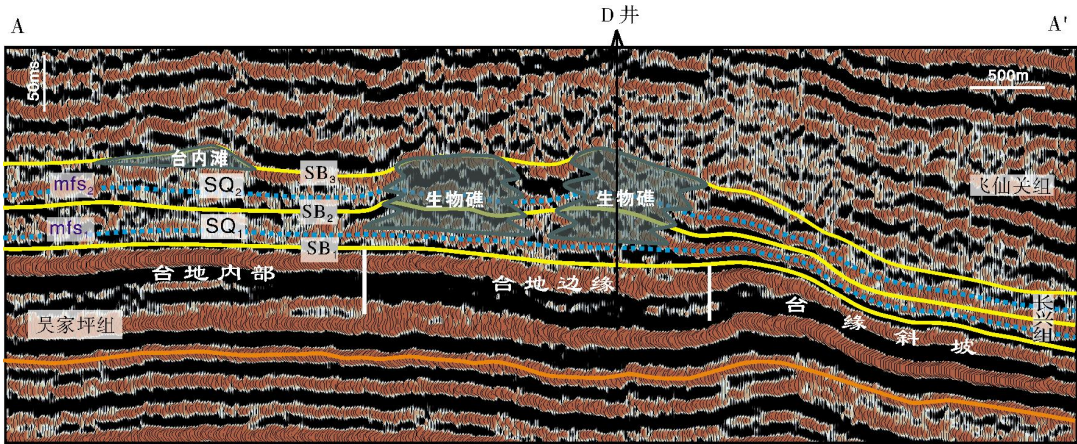


图4 过D井的层序界面与地震相解释剖面(剖面位置见图5c)



析提供依据;同时,结合不同地质体的沉积特征,就能总结出一些特定的地震反射特征用来进行地震相解释。礁的地震反射特征为丘状外形,内部为近空白杂乱反射<sup>[22]</sup>(图 4);而滩的地震反射特征为低幅的丘状外形,内部也为近空白反射(图 4)。通过对研究区的剖面解释,可以得到礁、滩地震相图(图 5a)。结合单井相分析,通过合成记录可以约束地震相解释,并为地震相转换成沉积相奠定基础。

碳酸盐岩以生物化学沉积为主,沉积环境越稳定,沉积物的横向变化就越小,地震反射的连续性也越好。深水沉积往往以低频、光滑、连续、强反射为特征,而浅水沉积往往以高频、连续性差、相对弱反射为特征<sup>[23]</sup>,据此可在地震剖面上划分出大的沉积相带(图 4)。

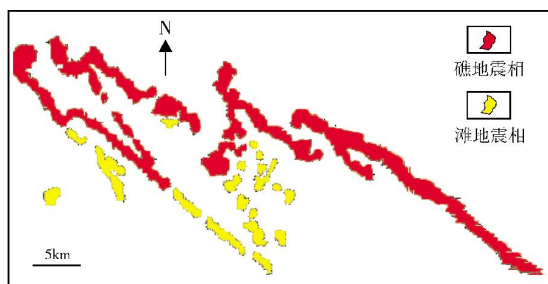
## 2.4 地震古地貌与平面沉积相分析

四川盆地东北部上二叠统长兴组与下伏吴家坪组呈整合接触,吴家坪组底界为中、上二叠统之间的平行不整合面(又称东吴运动面)<sup>[24]</sup>。本次研究中,选取东吴运动面为层拉平面。由于吴家坪组沉积时期研究区为碳酸盐岩台地内部沉积环境,沉积分异不明显,厚度变化不大,故可用层拉平面之上的地层厚度作为古地貌来辅助分析目的层长兴组的沉积相。

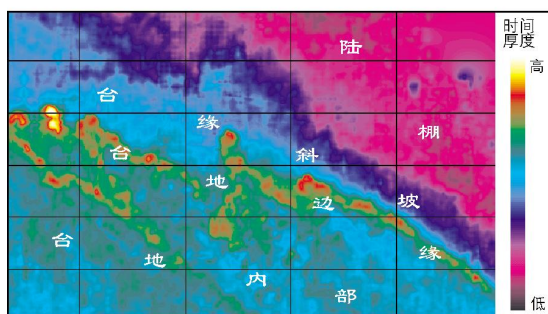
通过拉平东吴运动面来创建地震拉平数据体,然后在拉平数据体中沿等时层序界面提取地层切片,即为地震古地貌图。在该地震拉平数据体中沿不同的层序和体系域界面提取切片,可以得到不同时期的地震古地貌图,用于分析长兴期的古地貌演化。

在长兴组顶面的地震古地貌图(图 5b)中,由地貌高处到低处,红色和黄色区为可能的生物礁分布范围,绿色区为可能的生物碎屑滩分布范围,这与地震相解释的礁滩体发育区(图 5a)大致吻合;淡蓝色区为可能的局限台地,蓝到深蓝色区为可能的台缘斜坡,粉红色和紫色区为陆棚。图 5b 中各个相带大体呈北西—南东向展布,从西南到东北依次为台地内部—台地边缘—台缘斜坡—陆棚,各相带分布范围清晰,这为地震相和沉积相解释提供了依据和指导。

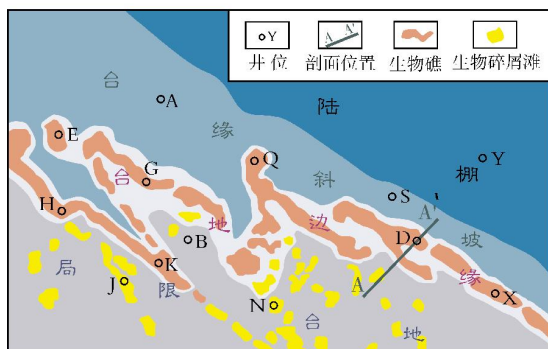
笔者注意到,在地震古地貌图中未发育礁滩的地区,精细解释和扫描也很难再有新的发现;同时,并不是地震古地貌图中所有的礁滩体在地震剖面上都有响应。通过区内 13 口井(图 5c)的地震合成记录标定,可以约束地震相解释和将地震相转换为沉积相;通过地震相的精细解释,可以减少地震古地貌



(a) 地震相解释平面图



(b) 地震古地貌平面图



(c) 沉积相平面图

图 5 研究区长兴组顶面地震古地貌图及沉积相平面图

图的多解性(如人为色标的调整会造成相带边界误差),精细地刻画沉积相带边界,最终得到的研究区沉积相平面分布如图 5c。

## 3 结语

以四川盆地东北部某区上二叠统长兴组碳酸盐岩台地沉积为例,通过拉平东吴运动面来创建地震拉平数据体,并沿长兴组顶界面提取地层切片而得到长兴组地震古地貌图,据此可以获得沉积相带的大致分布范围,有效指导地震相解释;在井震标定和地震相精细解释的基础上,通过地震相向沉积相转换,可以精细刻画礁滩体的展布以及研究区的沉积相平面分布。

本次研究证实,碳酸盐岩地震地貌学是恢复沉积体系的一种有效方法。

#### 参考文献

- [1] POSAMENTIER H W. Seismic stratigraphy into the next millennium: A focus on 3D seismic data[C]. New Orleans: AAPG Annual Conference, 2000: A118.
- [2] POSAMENTIER H W, DAVIES R J, CARTWRIGHT J A, et al. Seismic geomorphology: An overview[G]// DAVIES R J, POSAMENTIER H W, WOOD L J, et al. Seismic geomorphology: Applications to hydrocarbon exploration and production. London: Geological Society, Special Publication 277, 2007: 1-14.
- [3] 曾洪流. 地震沉积学在中国:回顾和展望[J]. 沉积学报, 2011, 29(3): 417-426.
- [4] EBERLI G P, MASAFERRO J L, SARG F J. Seismic imaging of carbonate reservoirs and systems[G]//AAPG Memoir 81, 2004: 1-9.
- [5] ZENG H, LOUCKS R, JANSON X, et al. Three-dimensional seismic geomorphology and analysis of the Ordovician paleokarst drainage system in the central Tabei Uplift, northern Tarim Basin, western China[J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(12): 2061-2083.
- [6] 黄鸿光, 陆永潮, 邹卓超. 琼东南盆地松南三维区台缘礁地震沉积学研究[J]. 石油实验地质, 2012, 34(1): 25-29.
- [7] 林闻, 程岳宏. 地震地貌学研究的现状与展望[J]. 海相油气地质, 2012, 17(4): 1-7.
- [8] 蒋韧, 樊太亮, 徐守礼. 地震地貌学概念与分析技术[J]. 岩性油气藏, 2008, 20(1): 33-38.
- [9] ZENG H, KERANS C. Seismic frequency control on carbonate seismic stratigraphy: A case study of the Kingdom Abo sequence, west Texas[J]. AAPG Bulletin, 2003, 87(2): 273-293.
- [10] 张宏, 董宁, 宁俊瑞, 等. 利用地震地貌学刻画古喀斯特地貌[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(增1): 125-129.
- [11] 阳孝法, 张学伟, 林畅松. 地震地貌学研究新进展[J]. 特种油气藏, 2008, 15(6): 1-5.
- [12] CREVELLO P, POSAMENTIER H W, WARMATH A, et al. Paleo-geomorphology of carbonate systems: Unraveling sedimentary geobodies and facies from karst overprint[J]. Geophysical Research Abstracts, 2005, 7(1): 05986.
- [13] RAFAELSEN B. Three-dimensional seismic geomorphology: New methods providing new geological models[D]. Norway: University of Troms, 2006: 1-60.
- [14] 姜在兴. 沉积学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 403-405.
- [15] 侯方浩, 方少仙. 碳酸盐岩中的压实作用[J]. 石油勘探与开发, 1981, (4): 18-25.
- [16] 舒姚, 胡明. 四川盆地东北部地区构造特征及变形期次探讨[J]. 复杂油气藏, 2010, 3(2): 17-20.
- [17] 范小军. 超深层礁滩岩性气藏中高产井成因分析——以四川盆地东北部元坝地区长兴组礁滩相储层为例[J]. 石油实验地质, 2014, 36(1): 70-76.
- [18] 戴建全. 四川盆地东北部元坝地区长兴组—飞仙关组气藏勘探潜力评价[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2010, 37(4): 419-423.
- [19] 郭彤楼. 元坝气田长兴组储层特征与形成主控因素研究[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2381-2391.
- [20] 陈洪德, 钟怡江, 侯明才, 等. 四川盆地东北部地区长兴组—飞仙关组碳酸盐岩台地层序充填结构及成藏效应[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(5): 539-547.
- [21] 马永生, 牟传龙, 郭旭升, 等. 四川盆地东北部长兴期沉积特征与沉积格局[J]. 地质论评, 2006, 52(1): 26-30.
- [22] 张艳艳. 海相生物礁的地震识别模式研究及应用[D]. 东营: 中国石油大学, 2011.
- [23] FONTAINE J M, CUSSEY R, LACAZE J, et al. Seismic interpretation of carbonate depositional environments[J]. AAPG Bulletin, 1987, 71(3): 281-297.
- [24] 李蔚洋, 刘杰, 何幼斌, 等. 四川地区上二叠统吴家坪组条带状硅质岩成因分析[J]. 海相油气地质, 2011, 16(2): 61-65.

编辑:董庸, 金顺爱

## Research and Application of Seismic Geomorphology: A Case of Changxing Carbonate Depositional System in the Northeast of Sichuan Basin

He Jinhai, Li Guorong, Peng Bo

**Abstract:** Based on the principle of sequence stratigraphy and seismic geomorphology, an analysis of seismic geomorphology is successfully applied in reconstructing the depositional system of the Upper Permian Changxing marine carbonate rock at some study area in the northeast part of Sichuan Basin. Base on regional geological information and synthetic seismogram, a seismic paleogeomorphic map is acquired by means of determining the time-equivalent sequence framework and surfaces, flattening layers and extracting the strata slices along the time-equivalent top boundaries of Changxing Formation. After transformation of seismic facies to depositional facies, the characterization of Changxing depositional plane distribution is depicted.

**Key words:** Upper Permian; Changxing Formation; Carbonate rock; Seismic geomorphology; Depositional facies; Sichuan Basin

He Jinhai: male, MSc., Geophysics Engineer. Add: Shenzhen Branch Company of CNOOC Ltd., 168 Jiangnan Dadao Zhong, Guangzhou, Guangdong, 510240, China