

数值沉积模拟在澳大利亚 W 区块 沉积储层研究中的应用

王 颖¹, 吕 明¹, 王晓州²

(1. 中海油研究总院 勘探研究院, 北京 100027; 2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘 要: 利用古环境、古生物年龄、钻井岩性、岩心等资料, 应用 Dinosos 软件对澳大利亚 W 区块的 Elang-Frigate 组进行了数值沉积模拟。研究区重点层位 Elang-Frigate 组共划分为 3 个层序, 海平面为向上脉动加深变化形式, 东南方为主要物源方向, 通过各个层序的构造图以及井资料读取的各个层序的残留厚度, 利用软件自动恢复古地貌、古构造的功能, 得到了相对真实的沉积背景, 利用这些参数进行了三维数值模拟, 进一步得到了本地区沉积体系的时空展布特征。结果显示, 该区的三角洲-河口湾沉积体系, 具有早期浪控、晚期潮控, 近源扇三角洲、相对远源三角洲的复合型沉积特点。

关键词: 澳大利亚; Bonaparte 盆地; 沉积模拟; 储层快速评价

中图分类号: P618.13

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2012)02-0010-08

Application of Numerical Simulation in Research of Sedimentary Reservoirs of W Zone in Australia

WANG Ying¹, LÜ Ming¹, WANG Xiaozhou²

(1. Research Institute of Exploration, Central Research Institute of China National Offshore Oil, Beijing 100027, China;

2. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China)

Abstract: The numerical depositional simulation in Elang to Frigate formations of W block in Australia was presented by means of Dinosos software and by utilizing such data as paleoenvironment, paleontological age, borehole lithologic characters and cores, etc. The key horizon i. e. Elang to Frigate formations in study area was divided into three sequence boundaries, step rising relative sea-level curve and major provenance in southeast direction, etc. Based on residual strata thickness got from logging data and structural maps of each sequence, the sedimentary background was figured out by palaeostructure and palaeogeomorphology reconstruction. A 3-D numerical simulation was carried out by means of these parameters, further, obtaining the time-spatial distribution characters of depositional system in the area. The results show that the study area is characterized by a deltaic and estuarine depositional system with wave-dominant delta in the early stage and tide-dominant delta in the late stage. There are near provenance fan-delta surround local highs and far provenance delta along the bay axis.

Key words: Australian; Bonaparte basin; depositional simulation; fast reservoir evaluation

随着计算机技术的发展, 对于各类作用过程的模拟已在工业和科研领域得到广泛的应用, 成效显著。如对油藏的生排烃及运移、圈闭成藏方面的模拟, 已成为油气勘探的重要手段, 但由于影响沉积作用的地质因素多且复杂, 对于同一地质现象, 不同的地质家可得出完全不同的“合理”解释。因此, 目前对于层序特别是沉积地质方面的模拟进展缓慢。

收稿日期: 2011-10-19

作者简介: 王 颖(1976—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 高级工程师, 博士, 主要从事层序、沉积、储层方面的研究。

E-mail: wangying8@cnooc.com.cn

现代地层和沉积学研究的任务,除了描述以外,还要从少量不规则分布的样品中来预测岩石类型、结构、分布、岩石物理性质等,如果没有客观标准和方法来评估多种解释的可能性或不确定性,那么这种预测的可信度就会大打折扣。对于是否存在这种客观标准和方法,能否通过模拟的方法来进行验证,长期以来一直存在争议。Burton 等^[1]认为地层的数值模拟在理论上是不可能的。因为地层资料的信息量不足和存在非唯一性,不同作用参数的组合会产生同样的结果,即使根据传统层序地层学理论的假设和原则^[2],这种反演也是不可能的。但 T. A. Cross^[3]认为在一定条件下反演是可能的。

Bonaparte 盆地位于澳大利亚西北陆架区中段,面积约 27 万 km²(图 1)。该盆地是典型的古生界和中生界叠合裂谷盆地,内部为凹凸相间的构造格局。早期构造线呈 NW 向,晚古生代后转为 NE 向^[4]。研究区主体在其中的 Sahul 向斜,东部为 Sahul 台地,东南部为 Petrel 次盆,南部为 Londonderry 高地^[5]。盆地自下而上依次发育石炭、二叠、三叠、侏罗、白垩、第三系^[6]。本次研究层段为中生界侏罗系至白垩系。区域上早期为浅海—三角洲沉积,中—晚期为河流三角洲—边缘海沉积^[7]。研究区 W 区块位于盆地西北靠近陆架边缘处,主体位于 Bonaparte 盆地的 Sahul 凹陷,面积约 4 200 km²,水深大部分在 200 m 以内(图 1)。

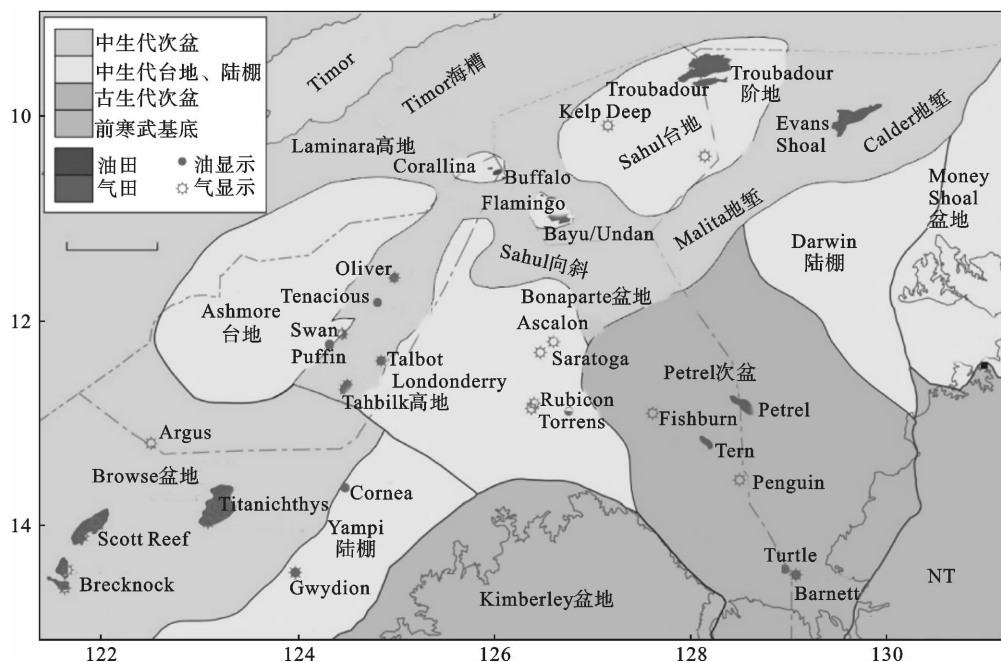


图 1 Bonaparte 盆地 W 区块位置图

Fig. 1 The block location of W in Bonaparte basin

1 研究思路

针对研究层段下白垩—中侏罗统(即 Flamingo-Plover 组)的现状,以钻井层序研究为重点,结合地震资料进行区域层序分析,建立区域层序格架,进而开展单井相、连井相、岩心相和砂岩厚度图的分析,为数值沉积模拟提供数据,同时根据沉积相的类型可以确认沉积搬运类型,结合盆地构造演化,利用数值沉积模拟的方法进行沉积储层分析。

数值模拟采用 Dionisos 软件,它是第一个为沉积过程建模的工业应用软件。通过模拟沉积物的沉积过程,定量评估可容空间、沉积供给和沉积搬运之间复杂的相互作用关系。它提供沉积盆地中沉积建造、地层岩相、古水深在空间和时间上的演化,为沉积盆地的发展提供完全合理的地质历史模型。通过对地震地层边

界、地层岩相、测井等地质资料的常规分析,可以获得现今关键层位的深度图和厚度图,并在 Dionisos 中赋予相应的地层年代,而且还能在 Dionisos 中进行编辑和定义古地形、盆地沉降图、沉积供给(物源位置、载荷、矿物含量),海平面变化(海平面升降曲线)和沉积搬运等参数。Dionisos 考虑海平面升降、沉积供给和盆地沉降速率,能够模拟计算沉积剥蚀、搬运和沉积过程,以及局部沉积产率。用实际数据可以标定地层模拟结果。通过重复改变控制沉积供应、搬运和产率等参数,确保模拟结果更加逼近实际观察数据。最终提供以层序厚度、古环境和沉积相图为特点的 4D 定量沉积地层模型。

2 综合地质分析

2.1 地质背景分析

古生代至中生代晚期全球绝对海平面呈长期脉动上升趋势,最高点出现在白垩纪中部;此后转为长期脉动下降(图 2)^[8]。本区的相对海平面变化与此不尽一致,从海平面变化曲线和区域地震剖面层序综合分析的结果看^[9],从三叠纪到早白垩世,海平面处于长期旋回上升期,之后海平面开始下降,研究的目层位为晚侏罗统到早白垩统底部,处于海平面上升长期旋回中的次一级小旋回内。随着海平面的变化,沉积中心也发生改变,从侏罗系沉积中心在 Sahul 向斜内,随着海平面逐渐上升至最高点,沉积中心在早白垩系向陆上推进,随着海平面的下降,沉积中心又向盆地内推进。其中的转换点就是层序界面所在。

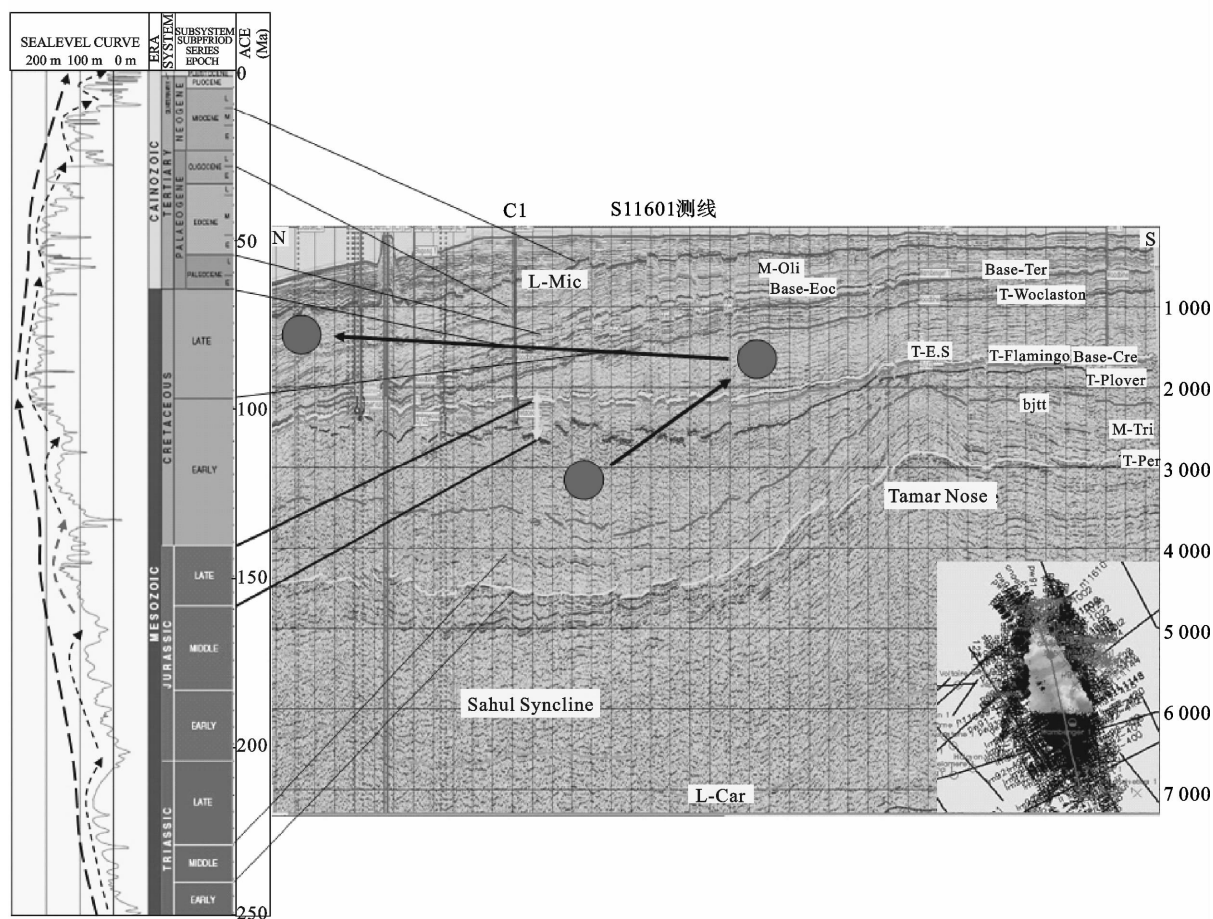


图 2 澳大利亚 Bonaparte 盆地层序演化特征及海平面变化图

Fig. 2 The sequence evolution character and sea level curve of Bonaparte basin in Australia

2.2 层序格架的建立

由于区域地震资料品质的限制,在本区利用地震资料建立层序格架,已经不能满足研究的精度要求。本区丰富的古生物(主要用沟鞭藻)年龄资料,为层序的划分与对比提供了较为可靠的依据,层序界面常表现为古生物年龄的间断面(如图 3 中的 T1 井)。

通过多种资料的综合分析,在研究区 22 口井的 Plover-Flamingo 组中识别出 6 个层序(表 1),重点研究层段为 Elang 组的 S2, S3, S4。层序 S2 与 S3 大致以 163 Ma 为界,层序厚度薄且侧向变化不大,反映当时盆地内地势起伏不大,属构造运动相对稳定期,但东部高地,由于后期构造运动的抬升,地层剥蚀严重,出现明显的地层缺失。S3 层序多表现为 1 个完整的中期旋回,在向斜边缘或凸起带相对较高的部位,主要保留下降半旋回,反映了三角洲前缘或滨海滩坝与浅海为主的沉积特征(如图 3, U1 井),而在凹陷部位或凸起带上相对较低的鞍部,则泥岩多位于层序上部,体现了分流河道或潮道与滨海为主的沉积特征(如图 3, I1, R1 井)。S4 层序厚度侧向变化开始增大,反映局部构造活动增强,凹陷处沉降加速,隆起处抬升强烈,东部高地具有明显的剥蚀作用,地层缺失严重,古生物间断 15 Ma 左右。

表 1 研究区层序关系表

Tab. 1 The sequence of research area

时代		地层	年龄/ Ma	地震 界面	层序 界面	层序
纪	世	组				
白 垩	早	Echuca Shoals	115~125	KA		
			136~138	KV	SB6	S6
侏 罗	晚	Flamingo	139~143		SB5	S5
			143~158	JT	SB4	S4
			158~162	JO	SB3	S3
罗	中	Elang	163		SB2	S2
			163~165	JC	SB1	S1
			177		SB0	
	早					

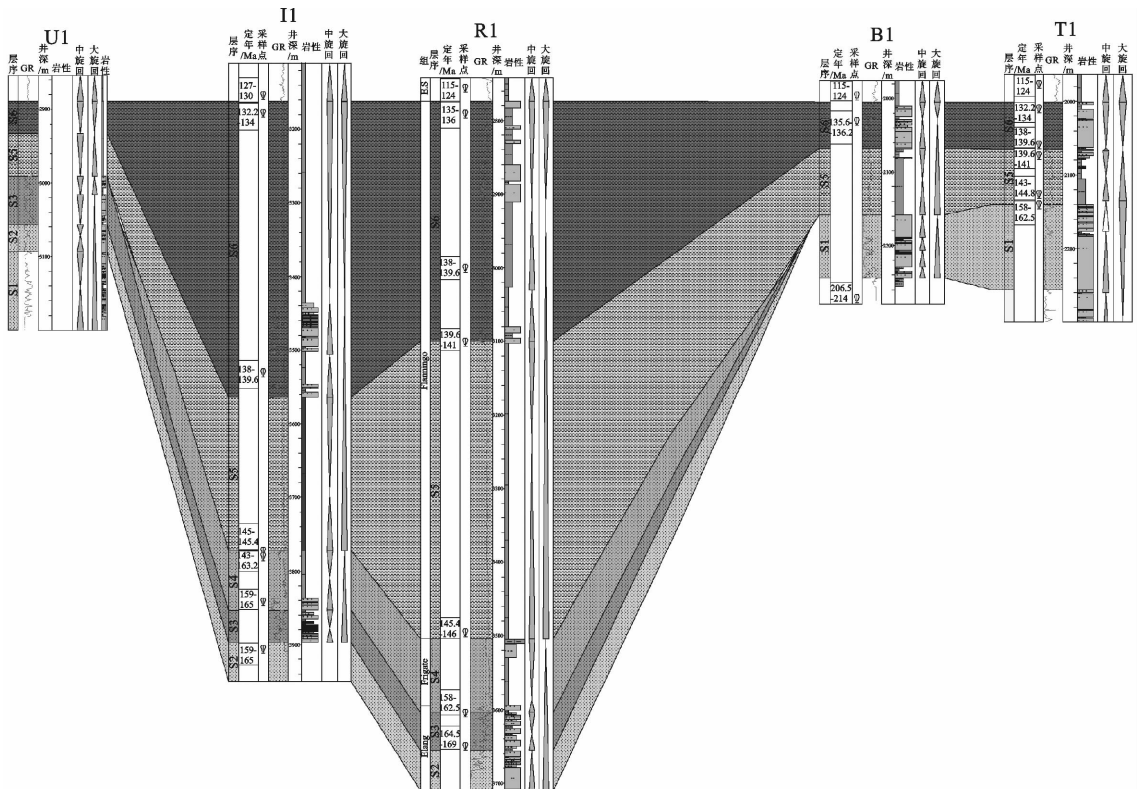


图 3 U1-I1-R1-B1-T1 连井层序分析图

Fig. 3 The sequence analysis of multiwells U1-I1-R1-B1-T1

2.3 沉积模式分析

据前人研究^[4], Bonaparte 盆地中生代是一个从冈瓦纳古陆边缘破裂出来的裂陷盆地, 沉积中心在三叠纪偏北靠近蒂汶海; 侏罗纪南移至 Sahul 向斜、Malita 地堑区。由于古生代 Petrel 次盆的影响, 盆地的南界向陆凹入约 250 km, 形成一倒三角形的喇叭口状海湾地貌形态。

喇叭形海岸形态会造成潮水的聚能作用, 使潮差增大、潮流加强, 同时较为宽阔的陆架缓坡也使波浪作用相对减弱, 容易发育潮控型三角洲, 湾内三角洲在潮流的作用下被冲刷成若干垂直岸线分布的长条形潮流砂坝或砂脊。钻井岩心中见到具槽状交错层理的分流河道充填(图 4(a))、潮汐改造的分流河口坝砂岩(图 4(b))和受到强烈生物扰动的潮坪(图 4(c))。

而在低海平面期, 海湾的聚能作用减弱, 原来的陆架坡折区则成为三角洲前缘区, 岸坡变陡, 从而三角洲的类型变成浪控型三角洲。

综上所述, 港湾型的地貌在海平面发育的不同时期, 三角洲的类型有所不同(图 5)。在高海平面时, 湾口处沉积物供应量减少, 海水侵入地形平坦的海岸平原区, 水体的加深和岸坡的变缓使潮汐作用增强, 形成了潮控三角洲体系, 湾内的潮汐砂坝多垂直岸线分布。在低海平面时, 发育浪控三角洲, 波浪和沿岸流的改造作用使河口坝沿岸线呈条带状分布, 形成厚层、具有一定前积特征的三角洲前缘砂体; 同时在风暴等突发事件的触发下间歇性地发育以浊流为主的重力流沉积, 在前三角洲或凹陷部位形成低位盆底扇或斜坡扇。

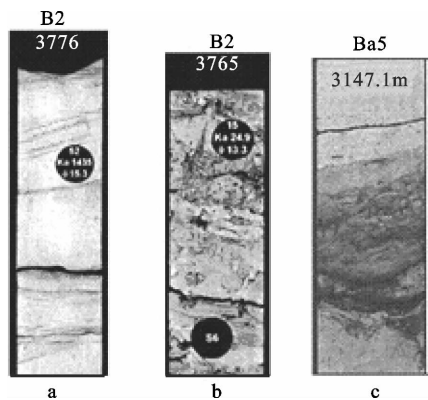


图 4 潮控三角洲岩心相特征图

Fig. 4 The core character of tide delta

3 数值模拟的沉积相分析

本研究以钻井岩性、年代、古生物环境和主要地震层序界面构造图等资料为基础, 利用 Dinosos 软件对澳大利亚 W 区块的 Elang-Frigate 组进行了沉积模拟。首先输入 Elang-Frigate 发育时期 151.5 ~ 163.5 Ma 的海平面变化曲线(图 6), 此时海平面为向上脉动加深变化形式; 然后按照地质分析的结果, 给定东南方为主要物源方向, 根据钻井资料的信息, 给定各个层序的物源供给量及砂泥岩的百分含量(图 7); 通过各个层序的构造图, 以及井资料上读取的各个层序在井点上的残留厚度图, 利用软件自动恢复古地貌、古构造的功能, 得到了相对真实的沉积背景, 开展沉积模拟。模拟结果的可靠性依赖于对研究区沉积背景的认识和给定参数的可靠性, 其模拟结果可通过一系列图件以三维的形式展示出来(图 8)。

由于 Dionisos 模拟软件, 是根据水平面升降、沉积供给和盆地沉降速率, 综合模拟计算沉积剥蚀、搬运和沉积过程, 因此, 在上述参数确定的情况下, 模拟出来的结果是不可控的, 具有一定的客观性。模拟结果不但可以直观反映各个时期古构造背景下沉积体的分布情况, 动态展示沉积演化过程, 同时还可以利用沉积模拟的结果, 结合钻井沉积相解释成果、参考地震属性分析图、构造图、地层厚度图等信息, 分析区块平面沉积相特征。

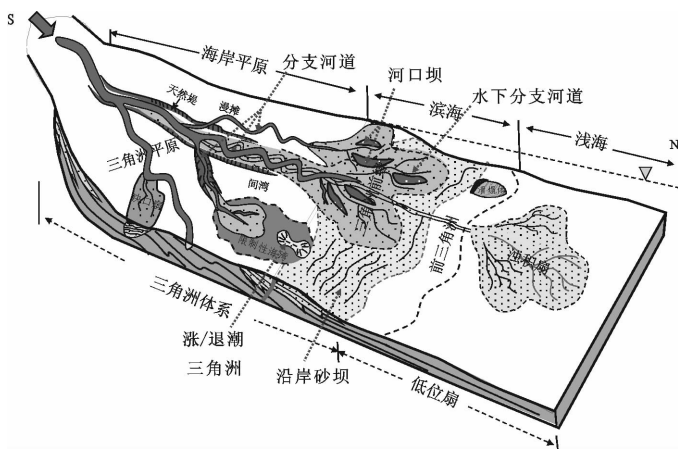


图 5 研究区沉积模式图

Fig. 5 The sedimentary model of research area

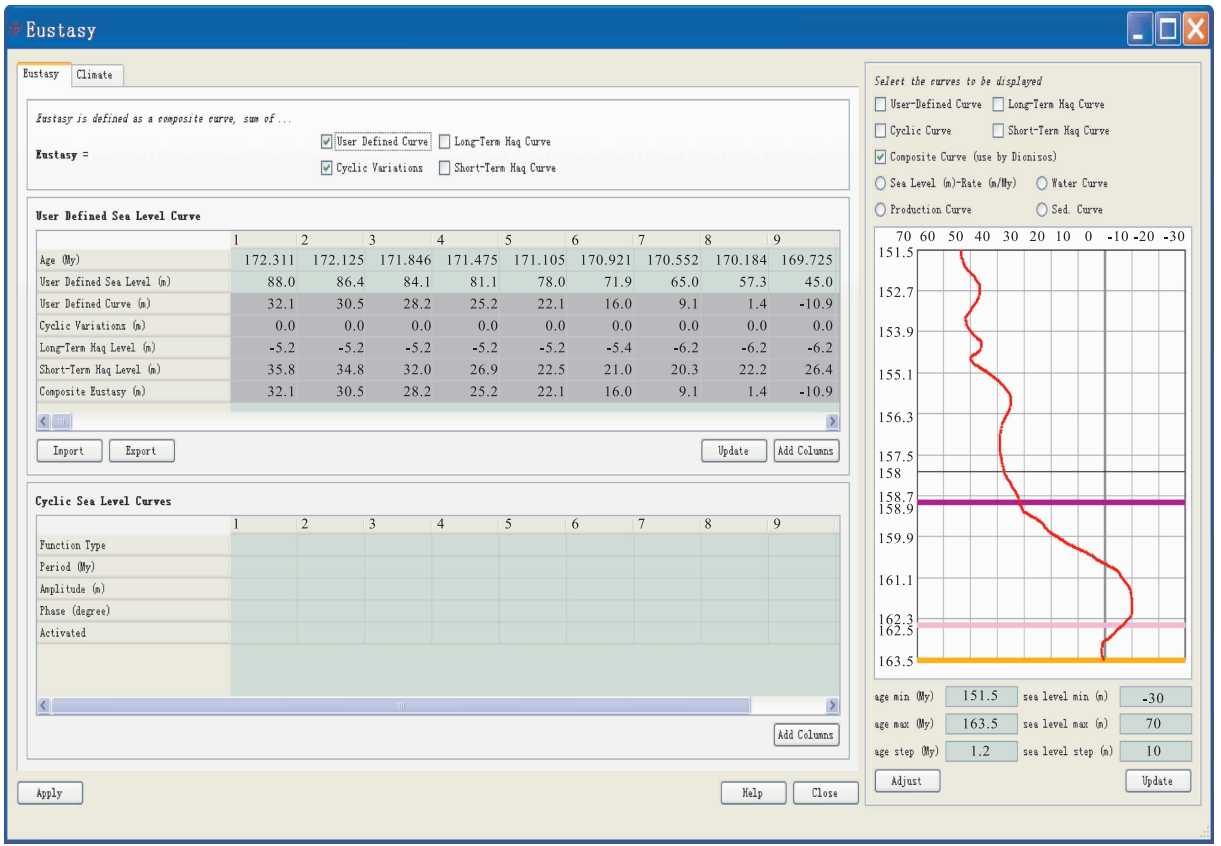


图 6 Elang-Frigate 海平面变化曲线界面图

Fig. 6 The sea level curve from Elang group to Frigate group

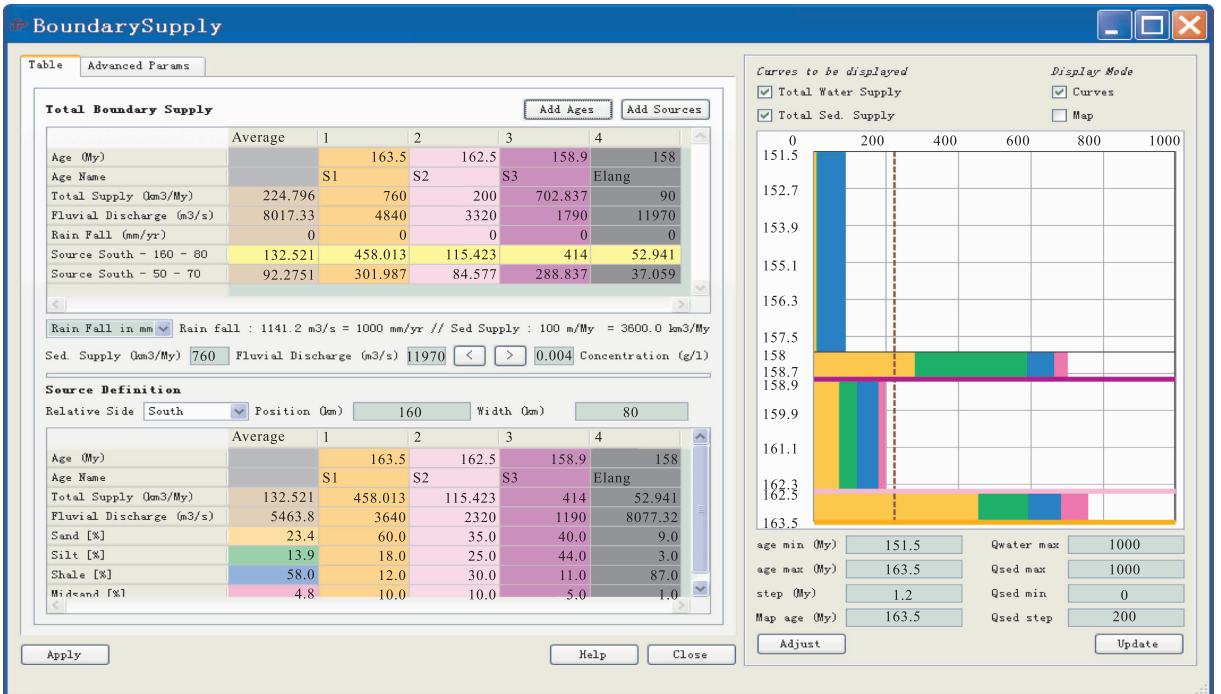


图 7 Elang-Frigate 组物源供应界面图

Fig. 7 The interface of material provenance supply from Elang group to Frigate group

在海平面低位期(S1,S2,S3 层序,图 8(a),(b),(c)),研究区内三角洲砂体主要由南向北沿 Sahul 向斜注入,砂质沉积物较为丰富,覆盖了南部和中部的部分地区。由于受波浪影响较大,三角洲前缘砂体沿岸线呈席状展布。在海平面高位期(S4 层序,图 8(d)),Londonderry,Tamar,Flamingo 等地对砂质沉积物的贡献增大,三角洲沉积中心向南迁移,研究区内砂质供应减少,Malita 地堑部位出现泥质沉积;Sahul 向斜部位仍有部分砂质充填,但多呈垂直直线的条带状或网状分布,高地的周缘形成了一些被潮汐改造、再搬运的砂体,成为 Sahul 向斜东翼很多构造目标的主要储层类型。

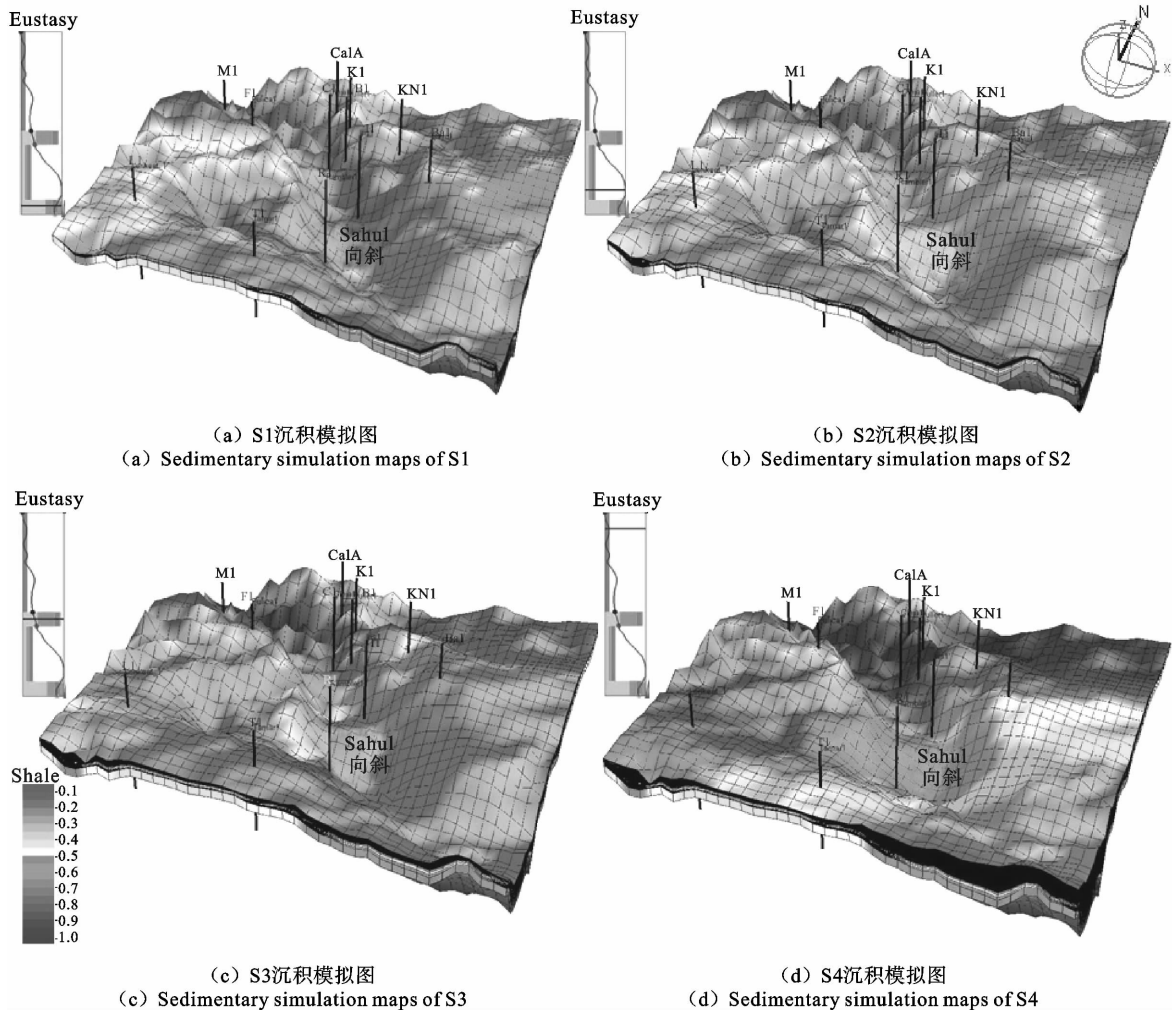


图 8 研究区沉积模拟图

Fig. 8 The sedimentary simulation maps of research area

纵观整个演化过程(图 8),Bonaparte 盆地 Plover 组晚期-Elang 组的三角洲砂体,为来自东南方向的主物源,三角洲呈继承性发育,沿 Sahul 向斜向盆地内推进,S1—S3(图 8(a),(b),(c))三角洲向盆地内进积,砂体分布范围逐渐扩大,在 S3 时期三角洲规模发育最大,由于地层的充填作用,Sahul 向斜周围的高地,构造幅度的降低,从而形成三角洲砂体的堆积。随着海平面的上升,到 S4 沉积时期,三角洲向盆地边缘退积,砂体分布范围有限,盆地内以泥质沉积为主。

4 结论

1) 利用地震剖面上的削蚀、上超等不整合层序界面的识别特征和钻井在盆地中的相对位置信息,利用古

生物年龄的间断面等资料,结合钻井剖面中的测井曲线(主要是自然伽马)反映的叠加方式、岩性组合及突变,进行基准面旋回和层序划分,将 Plover 组上部-Flamingo 组地层划分为 6 个层序,重点层位 Elang-Frigate 组识别出 3 个层序界面。

2)研究区属于限制海湾沉积类型。三角洲的类型在高位期与低位期不同。早期在低海平面时,河流和波浪的作用较强,潮汐的影响相对小,因此,形成了类似尖头型三角洲,波浪的改造作用使河口坝沿岸线呈条带状分布;晚期在高海平面时,沉积物供应量减少,同时海水侵入地形平坦的原三角洲平原区,水体的加深和岸坡的变缓使潮汐作用增强,形成了潮控三角洲体系,潮控砂坝垂直岸线分布。

3)通过沉积模拟分析,对三角洲砂体的分布特征及演化规律有清楚的认识。物源主要来自东南方向。总体为三角洲-河口湾沉积体系,早期在波浪改造下可侧向延伸成为河口坝复合体,晚期随相对海平面上升潮汐作用增强,在向斜中多有垂直岸线的潮汐砂坝发育;前三角洲与盆地内浅海泥呈过渡关系。三角洲在演化上呈逐步向陆退缩的水进型特征,有利于盖层的形成。

4)水进型三角洲有利于盖层及上倾方向侧封的形成,不但在构造区能形成良好成藏组合,在非构造部位形成岩性圈闭的可能性也大。

参考文献:

- [1]BURTON R,KENDALL C G C,LERCHE I. Out of our depth: On the impossibility of fathoming eustasy from the stratigraphic record[J]. *Earth-Science Reviews*,1987(24):237-277.
- [2]VAIL P R,AUDEMARD E,BOWMAN S A, et al. The stratigraphic signatures of tectonics, eustasy, and sedimentology: An overview[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1991: 617-659.
- [3]CROSS T A. The scientific basis for stratigraphic inversion[J]. *Tecnología y Futuro Instituto Colombiano del Petróleo*,2000 (1):824-845.
- [4]PETER W B,TOM H F,ROBERT H, et al. Geological development of Eastern Indonesia and the northern Australia collision zone: A review[M]. Darwin: Northern Territory Geological Survey,2003:511-539.
- [5]BARRETT A G,HINDE A L,KENNARD J M. Undiscovered resource assessment methodologies and application to the Bonaparte basin[C]//Timor Sea Petroleum Geoscience, Proceedings of the Timor Sea Symposium. Darwin: Northern Territory, June, 2003: 19-20.
- [6]AMBROSE G J. Jurassic sedimentation in the Bonaparte and northern Browse basin: New models for reservoir-source rock development, hydrocarbon charge and entrapment[M]. Darwin: Northern Territory Geological Survey, 2004: 125-142.
- [7]LONGLEY I M, BUSSENSNSCHUETT C, CLYDSDALE L, et al. The northwest shelf of Australia woodside perspective [C]//The Sedimentary Basins of Western Australia. Perth: Petroleum Exploration Society of Australia, 2002, 3: 27-88.
- [8]HAQ B U, HARDENBOL J, VAIL P R. The chronology of fluctuating sea level since the Triassic[J]. *Science*, 1987, 235: 1156-1167.
- [9]吕明,王颖,徐微. 沉积模拟方法在 Bonaparte 盆地的应用[J]. *中国海上油气*, 2010, 22(2): 83-90.
LÜ Ming, WANG Ying, XU Wei. An application of sedimentation simulation in Bonaparte basin[J]. *China Offshore Oil And Gas*[J]. 2010, 22(2): 83-90.