

文章编号:1000-0550(2018)04-0722-09

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2018.060

# 苏北东台坳陷阜宁组沉积演化数模物源分析

韩元红<sup>1,2</sup>, 徐旭辉<sup>1</sup>, 陆建林<sup>1</sup>, 朱建辉<sup>1</sup>, 彭金宁<sup>1</sup>, 武英利<sup>1</sup>, 邱岐<sup>1</sup>, 王东燕<sup>1</sup>

1. 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所, 江苏无锡 214151

2. 国土资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室, 西安 710021

**摘要** 采用国际最先进的三维地层沉积数值模拟的方法, 充分利用地层沉积演化相关研究资料, 以验证苏北东台坳陷目前存在争议的物源问题为目标, 开展了物源位置单因素数值对比模拟, 探讨不同物源观点下的地层沉积演化特征, 以及以北部滨海隆起为物源的苏北盆地整体沉积地层演化特征, 在此基础上讨论中央建湖隆起是否为阜宁组提供物源。最终, 建立了北偏东、南西两支物源输入的苏北盆地东台坳陷三维地层沉积演化数值模型, 模拟了阜宁组二段—阜宁组四段地层沉积演化过程, 得出与地质模型匹配良好的地层岩相展布特征, 并通过多口井岩性、地层厚度验证了模型的合理性。综合多组模拟结果, 分析讨论得出苏北盆地东台坳陷阜宁组物源来自于中央建湖隆起和西南张八岭隆起。

**关键词** 地层沉积演化; 三维地层演化模拟; 物源; 阜宁组; 苏北东台坳陷

**第一作者简介** 韩元红, 女, 1988年出生于, 博士, 油气地质, E-mail: hanyh.syky@sinopec.com

**中图分类号** P512.2 **文献标志码** A

## 0 引言

苏北盆地是我国南方陆上重要的含油气盆地, 古近系阜宁组是苏北盆地重要生油层系和勘探目的层<sup>[1]</sup>。对于苏北盆地油气勘探及研究工作早在上世纪五十年代已经展开, 在近半个世纪的研究中取得显著进展和丰富成果<sup>[2-7]</sup>。但是, 由于阜宁组湖盆边缘相缺失, 加之阜宁组原型盆地是受控凹边界断裂所制约的箕状断陷, 还是更广阔发育的统一陆相湖盆, 一直存在争议, 使得对于阜宁组物源的研究十分困难。目前, 对于苏北盆地东台坳陷古近系碎屑岩物源一直存在争议。邱旭明等<sup>[8]</sup>认为来自北或北东区域。徐田武等<sup>[9-10]</sup>通过重矿法和碎屑岩类分析法指出提出主物源来自于鲁苏隆起和通杨隆起, 次级物源来自于建湖隆起。周健等<sup>[11]</sup>通过对高邮凹陷古近系戴南组物源分析认为低凸起提供物源。王军等<sup>[12]</sup>通过碎屑岩岩屑类型分析, 认为张八岭隆起为古近系碎屑岩主要物源区。

层序地层学相关理论的得出和计算机技术的不断发展为数值模拟研究奠定了基础。20世纪70年代以来, 地层沉积演化数值模拟技术得到大力发展, 2000年以后, 出现了以法国石油研究院研发的DI-ONISOS和澳洲联邦科学与工业组织Griffiths团队研发的SEDISIM为代表的三维地层沉积演化模拟软件。三维地层沉积演化数值模拟技术的优势在于不

仅可以重现一定时期地层沉积演化过程, 精细刻画地层和岩相的时空展布, 还可以验证地质模型及地质推论的合理性。

本次研究尝试运用三维地层沉积演化模拟技术, 优化选取各类模拟参数, 以目前各流派物源观点为依据, 建立多组物源单因素对比模拟实验, 验证各类物源观点的合理性, 讨论苏北盆地东台坳陷阜宁组物源位置、方向及可能源区。

## 1 研究区概况

苏北盆地位于江苏省东北部, 属苏北—南黄海盆地西部的陆上部分(图1a), 总体走向北东, 延伸长度大于260 km, 面积约38 000 km<sup>2</sup>。苏北盆地南北分别由东台和盐阜两大坳陷组成, 西北临鲁苏隆起, 南邻通扬隆起(图1b), 北部的滨海隆起与南黄海盆地的中部隆起相连。陆上的盐阜坳陷、东台坳陷向海域延伸与南黄海盆地南部坳陷相接。这些隆起、坳陷与海域的北部坳陷及陆上的建湖隆起共同组成了统一的苏北—南黄海盆地。控制盆地发育演化的断裂与隆起主要为嘉山响水断裂、杨村断裂、六合断裂、江都—吴堡断裂、海安—南港断裂和建湖隆起。

阜宁组位于泰州组之上, 戴南组之下, 并进一步划分为四个岩性段, 自下而上分别为阜宁组一段( $E_1f_1$ )、二段( $E_1f_2$ )、三段( $E_1f_3$ )和四段( $E_1f_4$ ), 各岩性段之间大都为整合接触。阜宁组整体由下而

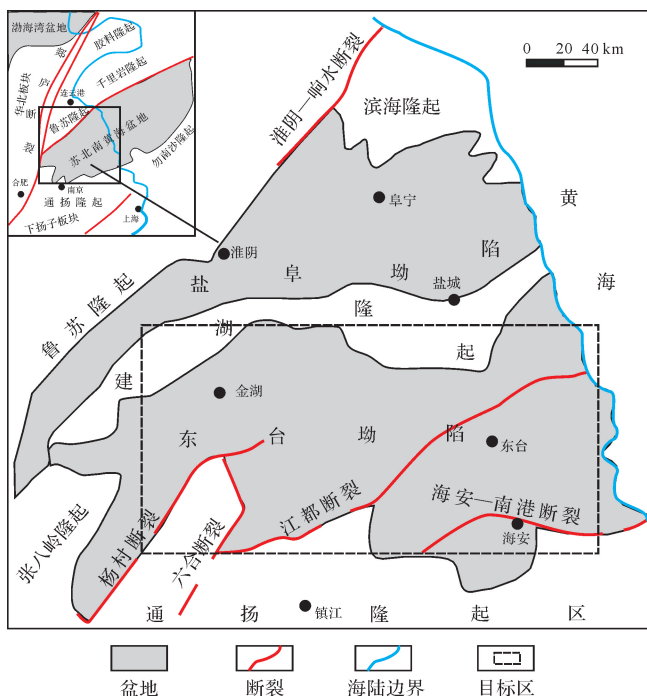


图1 苏北盆地构造位置与格架图

Fig.1 Map showing regional location and tectonic framework of Subei Basin

上呈砂—泥—砂—泥的韵律变化。

## 2 模拟方法及参数

先进可靠模拟方法的使用和优化合理模拟参数的选取是搭建理想模型,获取可靠结果的基础。

### 2.1 模拟方法

本次研究借助 DIONISOS 展开对苏北盆地东台坳陷阜宁组的沉积演化模拟。DIONISOS 是目前国际上最成熟的 3D 地层沉积演化正演模拟软件,可以按照勘探或地质评价的尺度,定量描述各类环境下的碎屑岩系统盆地三维层序地层格架。它的优点在于在层序地层分析的过程中,可以采用实验的方法去考虑更多控制层序发育的因素,这有助于研究在地层概念模拟中体现不出来的或被假设的一些因素对层序的控制作用。DIONISOS 中控制地层和岩相展布的因素主要包括三个方面,每一方面又由若干要素控制。第一方面为可容空间变化,主要受控于水平面变化和沉降。第二方面为沉积物供应,要素包括物源位置、物源供应速率、河流流量、碳酸盐产率和剥蚀率。第三方面沉积物搬运,包括河流搬运、波浪搬运和重力流搬运三方面。近年来,利用 DIONISOS 定量分析控制地层和沉积相展布的主控因素的论著十分常见<sup>[13-18]</sup>。

### 2.2 参数获取

模拟成果的可靠性取决于地质模型的合理性以及模拟参数的可靠性,本次研究经过多次调试,多组对比模拟实验的调试,选取合适合理的数据参数搭建模型,获得最终模拟成果并进行讨论。数据参数主要包括可容空间、沉积物供应和沉积物搬运三方面。

本次研究选取了  $E_{1f_2} \sim E_{1f_4}$  为模拟层段。 $E_{1f_1}$  与  $E_{1f_2}$  之间的界面为构造界面,是从地震剖面明显识别所得的界面,而  $E_{1f_2}$ 、 $E_{1f_3}$ 、 $E_{1f_4}$  之间的界面为岩性界面,在地震剖面上没有明显可识别的界面,是由研究人员根据地质录井分层所得。因此,以  $E_{1f_2} \sim E_{1f_4}$  作为模拟研究层段,内部连续性更强,可使模拟结果更可靠。以  $E_{1f_2}$ 、 $E_{1f_3}$  和  $E_{1f_4}$  为主要目的层系讨论物源,不影响结果分析。

#### 2.2.1 可容空间

可容空间是指沉积物表面与沉积物基准面之间可供沉积物充填的所有空间。此次研究所用地层沉积演化模型中,可容空间主要参数包括起始水深、沉降和相对湖平面变化。

##### (1) 起始水深

起始水深决定着起始可容空间的大小,是模拟开始的关键。目前,对于古水深恢复大多是水深相对趋势或半定量水深的尝试。常用恢复方法:1) 根据沉积相图<sup>[19]</sup>;2) 根据地层厚度图<sup>[20]</sup>;3) 根据古生物分布特征<sup>[21]</sup>;4) 根据录井资料,如自然伽马<sup>[22]</sup>;5) 元素地球化学方法<sup>[23]</sup>。本次研究模拟  $E_{1f_2} \sim E_{1f_4}$  的沉积演化过程,模拟起始水深即为  $E_{1f_2}$  沉积开始前湖泊水深。此次模拟所用的水深数据以地层厚度图、前人研究所得沉积相图(图 2a)、地球化学指标(V/V+Ni)面上等值线图(图 2b)为依据,设置了东深西浅的水深(图 2c)。

##### (2) 阜宁组二段—阜宁组四段沉降

一定时期内,沉降是影响盆地可容空间变化最重要的因素,控制着盆地内沉积物供应和搬运,从而决定着地层构架和沉积演化。沉降包括构造沉降和压实沉降,本次模拟的层段为  $E_{1f_2} \sim E_{1f_4}$ ,层内部为岩性界面,没有明显的不整合面(剥蚀界面),因此用压实恢复过的原始地层厚度来表示盆地演化沉降。前期数据准备过程中,分别统计了  $E_{1f_2}$ (275 口)、 $E_{1f_3}$ (514 口)、 $E_{1f_4}$ (462 口)钻井残余地层厚度(图 3),并根据压实曲线(图 4)进行压实恢复作为沉降数据。

##### (3) 相对湖平面变化

相对湖平面变化是影响可容空间的另一重要因

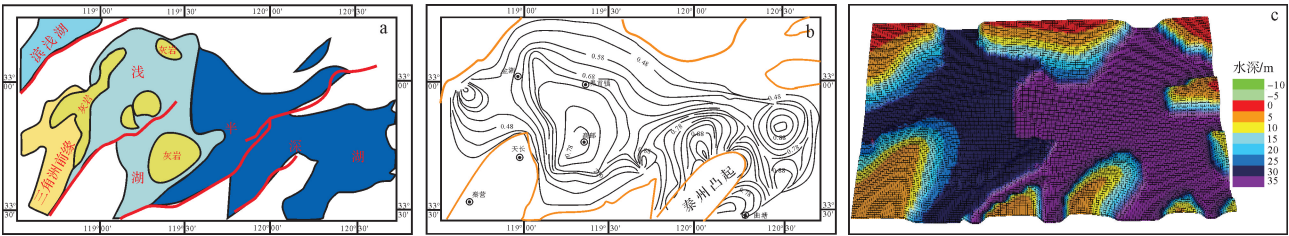


图2 模拟起始水深及其依据图件

Fig.2 Sedimentary facies(a) , isoline of V/V+Ni(b) and its indicating initial bathymetry(c) of  $E_{1f_2}$  in Dongtai depression, Subei Basin

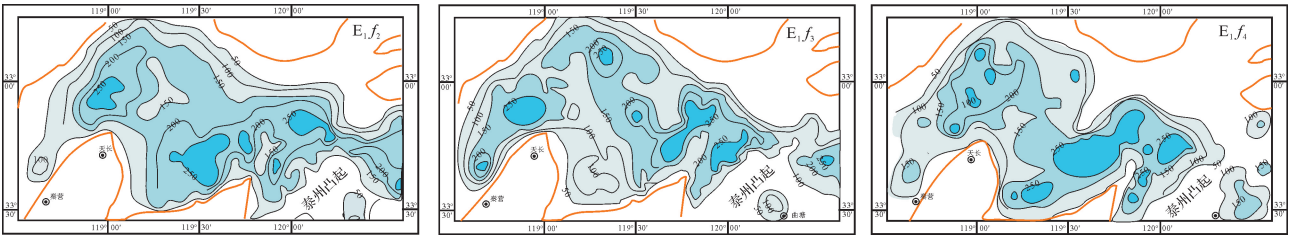


图3 苏北盆地东台坳陷  $E_{1f_2}$ 、 $E_{1f_3}$ 和  $E_{1f_4}$ 残余地层厚度图

Fig.3 Map showing stratum thickness of  $E_{1f_2}$ 、 $E_{1f_3}$ and  $E_{1f_4}$  in Dongtai depression, Subei Basin

素。本次研究借鉴前人通过古生物等手段对湖平面升降和气候周期性变化的分析<sup>[8]</sup>; $E_{1f_2}$ 和  $E_{1f_4}$ 是全盆相对湖平面最大上升期, $E_{1f_4}$ 发生的湖平面上升(亦称湖侵)的规模比  $E_{1f_2}$ 大, $E_{1f_3}$ 中期具有局部性的或湖平面相对上升幅度较小的湖平面上升。模拟设置  $E_{1f_2}$ 、 $E_{1f_3}$ 和  $E_{1f_4}$ 时间间隔分别是 60.5~58 Ma,58~56 Ma和为 56~55 Ma,设置相对湖平面变化如图5。

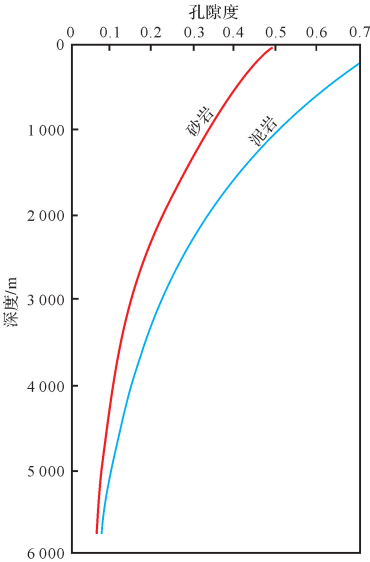


图4 苏北盆地东台坳陷阜宁组孔深曲线

Fig.4 Relation between porosity and depth of Funing Formation in Dongtai depression, Subei Basin

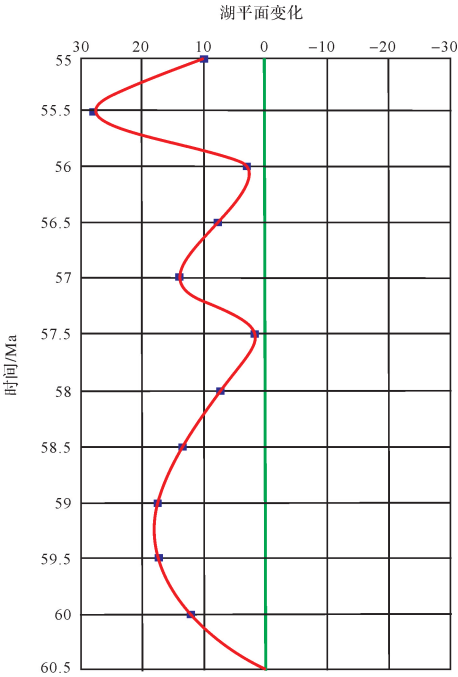


图5 苏北盆地  $E_{1f_2}$  ~  $E_{1f_4}$ 相对湖平面变化<sup>[8]</sup>

Fig.5 Changes of lacustrine level during  $E_{1f_2}$  to  $E_{1f_4}$ , Subei Basin<sup>[8]</sup>

2.2.2 沉积物供应

沉积物供应是沉积演化过程的物质基础,主要包括物源供应量、物源供应位置和物源砂体组成三部分



内容。

(1) 物源供应位置

本次模拟物源位置最终设定是在文献资料的查阅、常规方法物源研究的基础上,还进行了对比模拟,优选选取,具体可见下文第三部分内容的分析。最终模型设置了北东区域和西南张八岭区域两支物源,且模拟过程中  $E_{lf_2} \sim E_{lf_4}$  整个过程中物源供应位置的设置保持不变。

(2) 物源供应量

本次模拟按照  $E_{lf_2}$ 、 $E_{lf_3}$  和  $E_{lf_4}$  三个阶段进行物源输入设置。上文统计所得  $E_{lf_2}$ 、 $E_{lf_3}$ 、 $E_{lf_4}$  的地层厚度,并经过压实矫正,得出原始地层厚度,并经过“供应量=平均地层厚度×面积”计算,得出每一时期总供应量。同时,上文提到此次模拟设置物源两支(北偏东一支和南西一支),物源总供应量按照常规方式研究所得扇体大小进行分配,西南支占 35%,北东一支占 65%。

(3) 物源岩性(砂体)组成

本次研究根据面上多口井阜宁组各层段岩性观察,得出阜二、阜四泥岩为主,含少量粉砂和细砂岩。阜三段以砂岩为主,包括粉砂、细砂和中砂,泥岩含量少于阜二、阜四段。因此,本次模拟研究设置了砂、粉砂和泥三种碎屑岩类型。同时,此次模拟运用的是碎屑岩和砂岩混合系统,除了物源设置的碎屑岩物源外,还有自生灰岩的生成。

碎屑岩组成随着时间的不同设置不同。整体而言,阜三段砂岩含量最高,阜二和阜四泥岩含量相对较高。整个阜二段起始砂岩含量最高,随后慢慢开始降低,阜四段仅在起始段含砂岩,后期基本全为泥岩。阜三段按照三分法的原则,分为三个旋回。

2.2.3 沉积物搬运

沉积物搬运由搬运系数、流量和坡度共同决定的。坡度是工区和地形的参数。流量是浓度的参数,在中国,浓度最小的河流在阿尔泰山脉,在旱季浓度为 0.1 g/L。由于湖泊的扩散效应,水下分流河道浓度应低于 0.1 g/L。因此,我们此次取值浓度为 0.065 g/L。搬运系数由沉积物组成决定,沉积物组成参考各层段沉积相分析<sup>[8]</sup>。本次研究,物源供应速率为 0.36 km<sup>3</sup>/Ma,因此,河流流量为 3.6 m<sup>3</sup>/s。

3 结果及验证

在其他参数一定的条件下,通过不同物源方向的设定,模拟各流派物源方向条件的砂体展布特征,从

而讨论物源方向。同时,建立了以北部滨海隆起为物源的全盆地层沉积演化模型,讨论中央建湖隆起是否为南部东台拗陷提供物源。最终,以物源位置单因素对比模拟和全盆滨海物源模拟结果为参考,建立了以北偏东和南西两支沉积物输入的三维地层沉积演化模型,并将模拟结果进行了验证。

3.1 物源位置单因素对比模拟

建立多组物源单因素对比模拟,模拟不同观点物源设置下的沉积相展布特征,并将其与常规方法做出的沉积相展布图对比分析,选择最正确的物源作为本次模拟的物源方向,验证物源。以不同学者研究主张的不同物源方向为依据,共设计了如表 1 所示的 4 组对比模拟,分别设定物源来自于 N、SW、NE 和 NW 方向的区域,且每组分别选用物源宽度为 50 km 和 90 km 进行模拟,各组对比模拟之间除物源方向有差异之外,其余参数均相同。

对比模拟得出砂体展布图(图 6),对应上述表 1 中各组模拟,自左至右分别为物源来自于 N、SW、NE 和 NW 模拟所得,第一列均为物源宽度为 50 km 模拟所得砂岩展布图,第二列则为物源宽度为 90 km 模拟所得砂岩展布图。

表 1 对比模拟设计一览表

Table 1 Design scheme of comparative simulation

对比模拟	1		2		3		4	
方向	N	N	SW	SW	NE	NE	NW	NW
宽度	50	90	50	90	50	90	50	90

3.2 滨海隆起供源模拟

东台拗陷阜宁组源区的确定一直是本区研究的难点问题,有部分研究者认为阜宁期东台拗陷与盐阜凹陷为统一的盆地,物源来自于北、北东区域,滨海隆起可能提供物源<sup>[8]</sup>,也有研究者<sup>[9-10]</sup>则认为建湖隆起提供物源。因此,建湖隆起在古近系对苏北盆地盐阜拗陷和东台拗陷的分割作用大小,建湖隆起是否为其南部东台拗陷就近提供物源,尚未得到有利的解释。本研究设计了以滨海隆起作为物源区的全盆模拟,以期为这一争议的问题提供依据。

全盆模拟所用参数获取方式与东台拗陷所获参数一致,模型设定建湖隆起和其他低凸起为水下隆起,设定物源来自于北部滨海隆起。

模拟得出若使得南部东台拗陷有砂体的展布,物源量设置须不断调试增大,使得足够物源供应。北部盐阜拗陷将演变为陆上部分,阜三段水深演变如图7



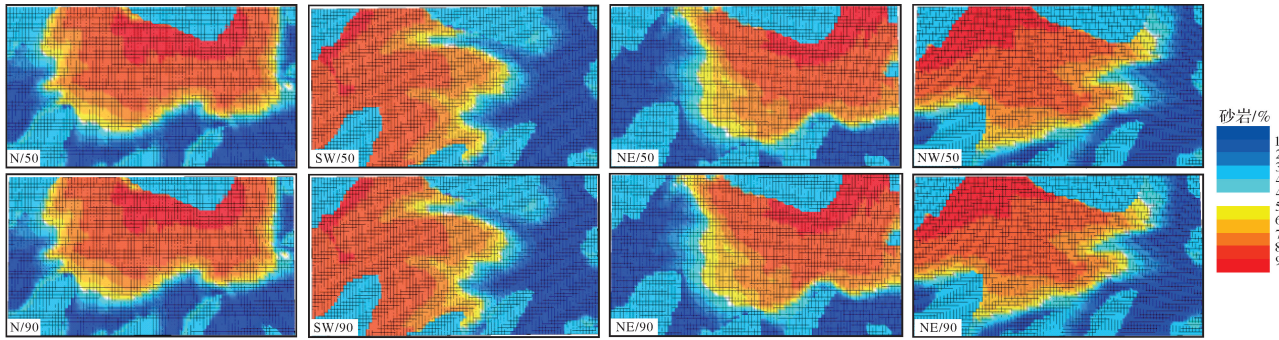


图 6 对比模拟所得苏北盆地东台坳陷阜三段砂岩展布

Fig.6 Sandstone distribution of  $E_1f_3$  in Dongtai depression, Subei Basin from the comparative simulation

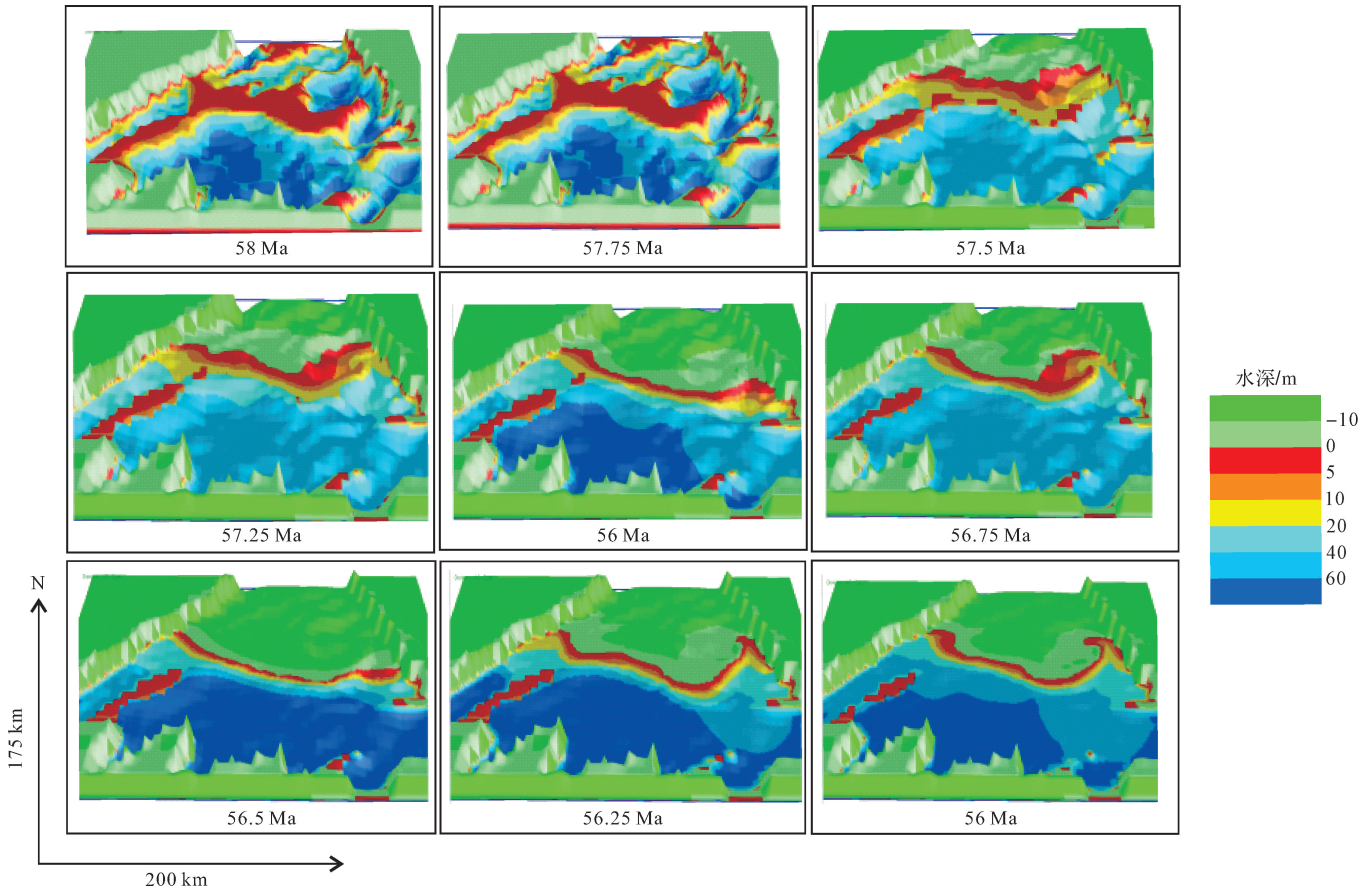


图 7 滨海隆起为物源模拟得出全盆水深演化

Fig.7 Bathymetry evolution of Subei Basin from simulation when material sources from Binhai uplift

所示。且砂体展布沿着湖盆北边缘展布,很难得出与沉积相图一致的砂体展布图。

3.3 北偏东和南西双物源模拟

以物源位置单因素对比模拟和全盆滨海物源模拟结果为参考,模拟最终建立了以北偏东、南西两支物源供应的模型。最终模拟得到苏北东台坳陷  $E_1f_2 \sim E_1f_4$  三维地层构架(图 8)、剖面(图 8)、单层岩相图

(图 9a)和单井岩性柱状图(图 10)等。

3.4 模型验证

鉴于沉积演化模拟一些参数本身存在一定的不确定性,例如水深只能基于沉积环境和沉积相分析等给出的相对特征值。目前国际上对于模拟结果的验证多采用单井岩性对比和地层厚度而展开<sup>[19]</sup>。

选取自东至西 6 口井模拟所得单井岩性与实际

录井岩性进行对比(图 10),得出单井岩性模拟所得与录井岩性较为一致,模拟设置水深特征与实际录井和测井特征匹配较好。拉平连井对比分析,得出地层厚度和旋回性也与实际地质模型十分一致。另外,通过对模拟与实测单井地层厚度对比,得出地层厚度误差值均在±10%以内(表 2),在误差范围以内。同时,模拟所得岩相图(图 9a)与实测沉积相图(图 9b)十分一致。综合验证了模拟的合理性。

表 2 单井模拟与录井地层厚度对比

Table 2 Comparison of simulated thickness with well data			
井号	录井地层厚度/m	模拟地层厚度/m	误差/%
C2	513	468	-8.7
T5	382	413	8.1
T2	538.5	516	-4.17
FS1	686	702	2.3
W8	808	785	-2.8
S256	724	660	-8.8

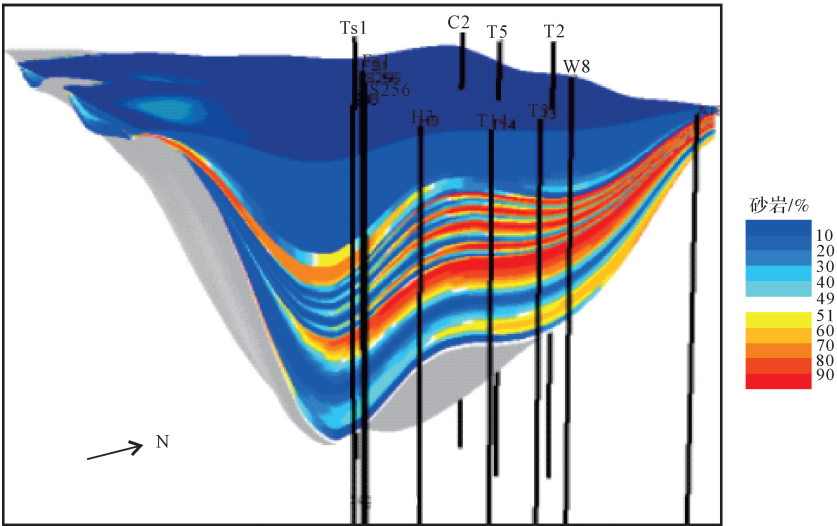


图 8 模拟所得苏北东台坳陷  $E_1f_2 \sim E_1f_4$  三维地层构架

Fig.8 3D strata structure of  $E_1f_2 \sim E_1f_4$  in Dongtai depression, Subei Basin

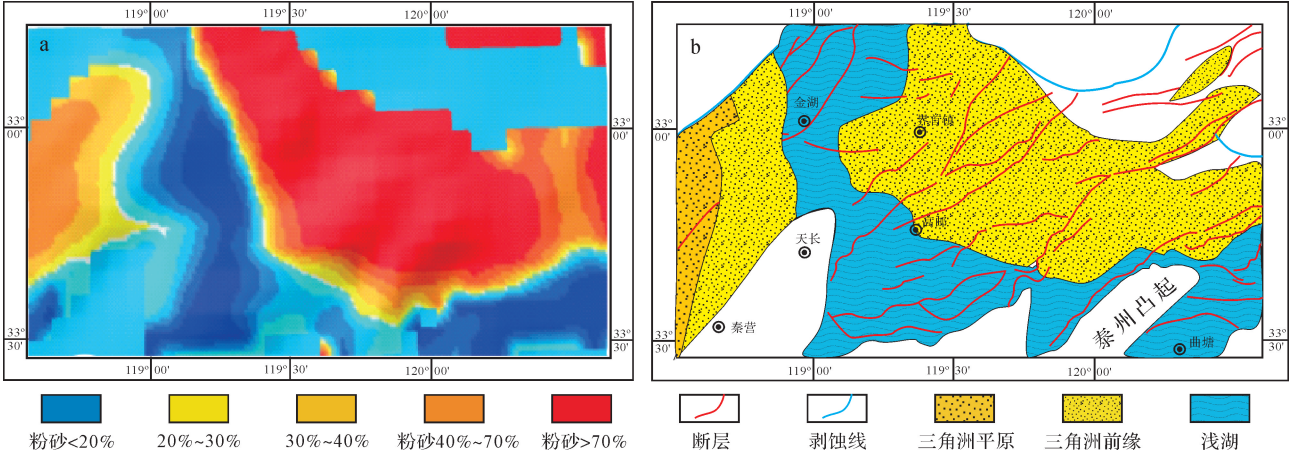


图 9 阜三段砂体展布图

a.模拟砂体展布;b.常规分析得沉积相图<sup>[18]</sup>

Fig.9 Sandstone distribution of  $E_1f_3$  in Dongtai depression, Subei Basin from the final simulation

4 讨论

通过分析物源位置单因素对比模拟得出的砂体展布特征(图 6),得出同位置方向的两组模拟设置的

物源宽度都足够大,使得砂体可以在垂直物源流向方向上扩散到最大,故宽度只在较小程度上影响砂体展布特征,砂体整体展布特征主要由物源位置和方向控制。同时,分别将四组模拟所得阜三段砂岩展布特征



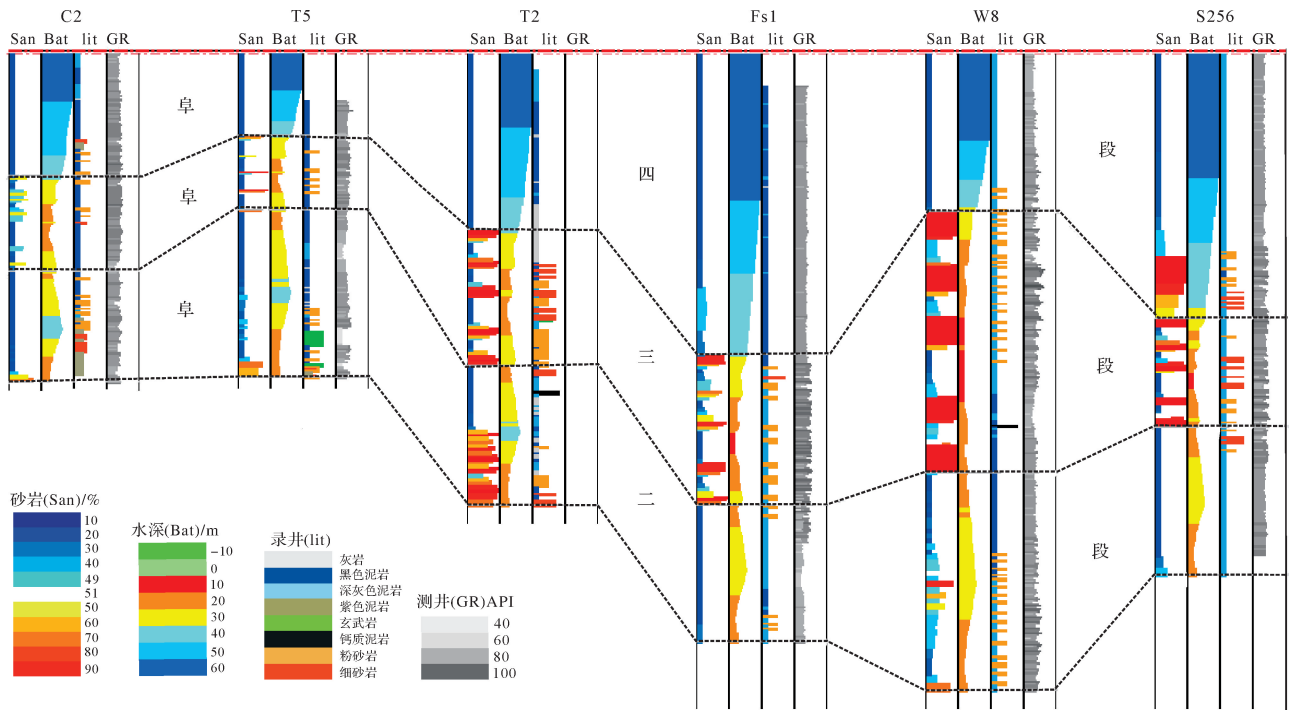


图 10 苏北东台拗陷  $E_1f_2 \sim E_1f_4$  水深、岩性连井图

Fig.10 Bathymetry and lithology features of wells of  $E_1f_2 \sim E_1f_4$  in Dongtai depression, Subei Basin

(图 6)与前人常规分析研究所得阜三段沉积相图(图 9b)对比分析,得出模拟所得第一(N)、三组(NE)砂体展布与沉积相图北部三角洲前缘相比较为符合,第三组最为相似,西南区域砂体展布规模小于第二组(SW)模拟所得砂体展布。第四组(NW)砂体展布与沉积相图存在很大差异,故物源来自于北西区域的观点不合理。因此,推测这一时期沉积物源主要来自于北偏东或北区域,另有部分来自于西南区域。

全盆以北部滨海隆起为物源,将中央建湖隆起作为水下隆起模拟,得出北部盐阜拗陷逐渐被砂岩填充,演变为陆上部分。这与北部盐阜拗陷阜宁组地层厚度与南部东台拗陷较为一致,泥岩广泛展布的沉积事实不符合。因此反证推测沉积物可能就来自于中央建湖隆起。

基于物源位置单因素模拟和滨海隆起作为物源的模拟结果分析,最终建立了北偏东和南西双物源模拟模型,得出模拟结果指示与地质模型地层沉积特征吻合度高,且模型验证显示良好。

综合上述三类模拟,推测苏北盆地东台拗陷阜宁组物源可能主要来自建湖隆起和西南区域张八岭隆起。东台拗陷阜三段砂岩沉积物粒度较细,整体以粉砂岩为主,可能与建湖隆起原始沉积物细粒有关。建湖隆起整体缺少阜宁组地层,以往对于其形态、规模

及隆起时间等一无所知。由于苏北盆地阜宁组砂体展布显示出东部区域宽且偏南,西部窄且偏北特征,误导有人认为物源来自于湖盆北东部的南黄海区域,而结合本次模拟过程及结果认为砂体的这一展布特征可能与建湖隆起的位置、形态和规模有关,推测建湖隆起东部位置偏南,宽度较大,中西部位置偏北,宽度较窄,建湖隆起中西部高度较小,东部隆起高度远大于中西部。苏北盆地北部盐阜拗陷物源来自于北部滨海隆起,而此次研究认为南部东台拗陷物源来自于中央建湖隆起,推测当时苏北盆地的构造格局为建湖隆起分割南北,盐阜拗陷和东台拗陷在阜宁期相对独立,各自有着相对独立的物源供应系统。

5 结论

通过三维地层沉积演化模拟验证东台拗陷阜宁组物源,认为苏北盆地东台拗陷阜宁组物源来自于拗陷北部建湖隆起和西南区域张八岭隆起。苏北盆地在阜宁期被建湖隆起分割,盐阜拗陷和东台拗陷相对独立,各自有着相对独立的物源供应系统。

参考文献 (References)

[1] 陈安定,唐焰. 苏北盆地热史、埋藏史研究及其对南黄海南部盆地油气勘探的启示[J]. 中国海上油气,2007,19(4):234-239.



- [Chen Anding, Tang Yan. A study on the geothermal and burial history of Subei Basin and its enlightenments on petroleum exploration in South Basin, the southern Yellow Sea[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2007, 19(4): 234-239.]
- [2] 李贤庆,包建平,熊波,等. 苏北盆地早第三纪烃源岩有机质热演化特征[J]. 江汉石油学院学报, 1996, 18(2): 40-46. [Li Xianqing, Bao Jianping, Xiong Bo, et al. Characteristics of thermal evolution of organic matter in Paleogene source rocks in Subei Basin[J]. *Journal of Jiangnan Petroleum Institute*, 1996, 18(2): 40-46.]
- [3] 徐佩芬,刘福田,王清晨,等. 大别—苏鲁碰撞造山带的地震层析成像研究:岩石圈三维速度结构[J]. 地球物理学报, 2000, 43(3): 377-385. [Xu Peifen, Liu Futian, Wang Qingchen, et al. Seismic tomography beneath the Dabie-Sulu collision orogen: 3-D velocity structures of lithosphere[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2000, 43(3): 377-385.]
- [4] 钱基. 苏北盆地油气田形成与分布:与渤海湾盆地比较研究[J]. 石油学报, 2001, 22(3): 12-21. [Qian Ji. Oil and gas fields formation and distribution of Subei Basin: Research compared to Bohai Bay Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2001, 22(3): 12-21.]
- [5] 刘洪林,王红岩,张建博. 渤海湾盆地与苏北盆地勘探潜力对比研究[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(1): 15-18. [Liu Honglin, Wang Hongyan, Zhang Jianbo. A comparison study on the exploration potential between Bohai Bay Basin and Subei Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2001, 28(1): 15-18.]
- [6] 徐旭辉. TSM 盆地模拟资源分级评价技术及其在苏北溱潼凹陷中的应用[D]. 上海:同济大学, 2004. [Xu Xuhui. TSM basin modeling for resource evaluation system and its application in Qintong sag, Subei Basin[D]. Shanghai: Tongji University, 2004.]
- [7] 邱旭明. 苏北盆地真武—吴堡断裂带的构造样式及圈闭类型[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2005, 27(3): 278-280, 295. [Qiu Xuming. Structural style and trap type of Zhenwu-Wubao fault zone in Subei Basin[J]. *Journal of Oil and Gas Technology (Journal of Jiangnan Petroleum Institute)*, 2005, 27(3): 278-280, 295.]
- [8] 邱旭明,刘玉瑞,傅强. 苏北盆地上白垩统一第三系层序地层与沉积演化[M]. 北京:地质出版社, 2006: 137-153. [Qiu Xuming, Liu Yurui, Fu Qiang, . Evolution of sequence stratigraphy and sedimentary during the upper Cretaceous to Tertiary in Subei Basin[M]. Beijing: Geology Publishing House, 2006: 137-153.]
- [9] 徐田武,王英民,曾灏辉,等. 苏北盆地泰州组一段重矿物组合特征及物源分析[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2007, 29(6): 43-48. [Xu Tianwu, Wang Yingmin, Zeng Jianhui, et al. Characteristics of heavy mineral source analysis in the 1st member of Taizhou Formation in Subei Basin[J]. *Journal of Oil and Gas Technology (Journal of Jiangnan Petroleum Institute)*, 2007, 29(6): 43-48.]
- [10] 徐田武,宋海强,况昊,等. 物源分析方法的综合运用:以苏北盆地高邮凹陷泰一段地层为例[J]. 地球学报, 2009, 30(1): 111-118. [Xu Tianwu, Song Haiqiang, Kuang Hao, et al. Synthetic application of the provenance analysis technique: A case-study of member 1 of Taizhou Formation in Gaoyou sag, Subei Basin[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2009, 30(1): 111-118.]
- [11] 周健,林春明,李艳丽,等. 苏北盆地高邮凹陷马家嘴地区古近系戴南组物源分析[J]. 沉积学报, 2010, 28(6): 1117-1128. [Zhou Jian, Lin Chunming, Li Yanli, et al. Provenance analysis of Dainan Formation (Paleogene) of Majiazui in Gaoyou sag, Subei Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(6): 1117-1128.]
- [12] 王军,王清晨,许长海,等. 苏北盆地东台坳陷古近系碎屑岩物源分析[J]. 地质科学, 2016, 51(4): 1277-1309. [Wang Jun, Wang Qingchen, Xu Changhai, et al. Provenance analysis of Paleogene sandstone in Dongtai depression of the Subei Basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2016, 51(4): 1277-1309.]
- [13] Berné S, Rabineau M, Flores J A, et al. The impact of quaternary global changes on strata formation: exploration of the shelf edge in the Northwest Mediterranean Sea[J]. *Oceanography*, 2004, 17(4): 92-103.
- [14] Rabineau M, Berné S, Aslanian D, et al. Sedimentary sequences in the Gulf of Lion: a record of 100,000 years climatic cycles[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2005, 22(6/7): 775-804.
- [15] Alzaga-ruiz H, Granjeon D, Lopez M, et al. Gravitational collapse and Neogene sediment transfer across the western margin of the Gulf of Mexico: insights from numerical models[J]. *Tectonophysics*, 2009, 470(1/2): 21-41.
- [16] Sømme T O, Helland-Hansen W, Granjeon D. Impact of eustatic amplitude variations on shelf morphology, sediment dispersal, and sequence stratigraphic interpretation: icehouse versus greenhouse systems[J]. *Geology*, 2009, 37(7): 587-590.
- [17] Csato I, Granjeon D, Catuneanu O, et al. A three-dimensional stratigraphic model for the Messinian crisis in the Pannonian Basin, eastern Hungary[J]. *Basin Research*, 2013, 25(2): 121-148.
- [18] Searid C, Borgomano J, Granjeon D, et al. Impact of environmental parameters on coral reef development and drowning: forward modelling of the last deglacial reefs from Tahiti (French Polynesia; IO-DP Expedition #310)[J]. *Sedimentology*, 2013, 60(6): 1357-1388.
- [19] Yin X D, Huang W H, Wang P F, et al. Sedimentary evolution of overlapped sand bodies in terrestrial faulted lacustrine basin: insights from 3D stratigraphic forward modeling[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 86: 1431-1443.
- [20] 董刚,何幼斌. 根据地层厚度恢复古水深度的研究[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2010, 7(3): 484-486. [Dong Gang, He Youbin. Research of paleobathymetry recovery according to stratigraphic thickness[J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 2010, 7(3): 484-486.]
- [21] 苏新,丁旋,姜在兴,等. 用微体古生物定量水深法对东营凹陷沙四上亚段沉积早期湖泊水深再造[J]. 地学前缘, 2012, 19(1): 188-199. [Su Xin, Ding Xuan, Jiang Zaixing, et al. Using of multi-microfossil proxies for reconstructing quantitative paleo-water depth during the deposit period of LST of Es<sub>4</sub> in Dongying depression[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(1): 188-199.]

[22] 万锦峰, 鲜本忠, 余源琦, 等. 基于伽马能谱测井信息的古水深恢复方法: 以塔河油田4区巴楚组为例[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(6): 98-103. [Wan Jinfeng, Xian Benzong, She Yuanqi, et al. Palaeobathymetric reconstruction based on natural Gamma ray spectrometry logging data: By taking Bachu Formation in region 4 of Tahe oilfield for example[J]. Journal of Oil and Gas Technol-

gy, 2011, 33(6): 98-103.]

[23] 吴智平, 周瑶琪. 一种计算沉积速率的新方法: 宇宙尘埃特征元素法[J]. 沉积学报, 2000, 18(3): 395-399. [Wu Zhiping, Zhou Yaoqi. Using the characteristic elements from Meteoritic must in strata to calculate sedimentation rate[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(3): 395-399.]

## Provenance System of Funing Formation in Dongtai Depression, Subei Basin: Insight from 3D stratigraphic forward modeling

HAN YuanHong<sup>1,2</sup>, XU XuHui<sup>1</sup>, LU JianLin<sup>1</sup>, ZHU JianHui<sup>1</sup>, PENG JinNing<sup>1</sup>, WU YingLi<sup>1</sup>, QIU Qi<sup>1</sup>, WANG DongYan<sup>1</sup>

1. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214151, China

2. Key Laboratory of Coal Resources Exploration and Comprehensive Utilization, Xi'an 710021, China

**Abstract:** To verify the controversial issue of provenance in the Dongtai depression, Subei Basin, several groups of single factor comparison modelings are carried out based mainly on the cores, logging and seismic data by utilizing the most internationally advanced three-dimensional stratigraphic forward modeling. The sedimentary evolution characteristics of stratigraphy are simulated under different provenance data from different viewpoints, and either the Jianhu uplift as the materials source for the Funing Formation in the Dongtai depression is also discussed. A well geologically actual matched simulation result is obtained from a three-dimensional stratigraphic forward modeling with two separated sources, of which one is from north by east and another from west by south. The rationality of the final model is verified through lithology and stratigraphic thickness of multiple logs. Combined with multigroup simulation results, it is showed that the Funing Formation sediments in the Dongtai depression, Subei Basin are mainly originated from the Jianhu uplift and Zhangbaling uplift.

**Key words:** strata depositional evolution; 3D stratigraphic forward modeling; provenance; Funing Formation; Dongtai depression of Subei Basin