文章编号: 1009-3850(2009) 02-0025-08

# 苏北盆地高邮凹陷晚白垩世-新生代构造 沉降史分析与构造演化

能源1,杨桥2,张克鑫3,任红民4,郑元财4

(1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249, 2 中国石油大学(北京)资源与信息学院,北京 102249, 3. 中油国际海外研究中心,北京 100034, 4. 中石化江苏油田分公司地质科学研究院,江苏扬州 225009)

摘要:本文应用回剥法及地层骨架厚度不变模型对苏北盆地高邮凹陷沉积地层进行了去压实校正,利用声波时差及 镜质体反射率法对三垛期末盆地剥蚀量进行恢复,用艾里公式对盆地的构造沉降量及总沉降量进行估算,进而对苏 北盆地高邮凹陷晚白垩世一新生代沉降史进行分析。研究表明:高邮凹陷为典型的裂陷盆地,经过了拗断期 断拗 期 断陷期 拗陷期的盆地演化阶段。演化过程经历了三期沉降和两期隆升。在不同的阶段凹陷的沉降中心略有不 同,其受主边界断层的控制,围绕着边界断层呈串珠状分布。

关 键 词: 高邮凹陷; 晚白垩世一新生代; 剥蚀量; 沉降史; 构造演化 中图分类号: TE121 3 文献标识码; A

盆地沉降史的研究是含油气盆地分析的一项重 要内容<sup>[1]</sup>。沉降史分析立足于现今盆地内不同时 期的沉积地层,通过回剥技术对盆地沉积层进行反 演,力求恢复不同时期原始地层的沉积厚度及盆地 的构造沉降量,从而对盆地的形成演化及沉积 沉降 过程进行分析,结合对盆地内主要断裂系统的演化 过程分析,可以建立起不同期次盆地的原型,更好的 指导油气勘探。

1 区域地质概况

高邮凹陷位于苏北盆地东台凹陷东部,是苏皖 南黄海盆地西部陆上部分,也是江苏油田主力的生 油凹陷。真武、吴堡断层为凹陷的南部边界断层,控 制着凹陷的形态。汉留断层为凹陷内的二级断层, 其与真武断层一起控制了深凹带的分布。凹陷整体 上为南断北超的箕状断陷(图 1)。钻井资料揭示,





Fig 1 Simplified tectonic map of the Gaoyau depression 1 = northward-dipping fault 2 = southward-dipping fault $3 = \text{low_reliefboundary}$ 

收稿日期: 2009-01-18

作者简介: 能源 (1982—), 男, 博士生, 从事含油气盆地分析与油区构造解析。 E-mail nengyuar@ fxcmail com

		-				-		
界	系	统	组	段	代号	距今 年龄 /Ma	延续 时间	主要构 造运动
	第四系	全新统 更新统	东台组		Qd	- 2 -	2	
	新行	上新统	盐城组	1	$N_2 y^2$	- 11 3 -	9.3	
新	近系	中新统	111-744-11		$N_{\nu}y^{1}$	- 24.6 -	13.3	盐城运动
		渐新统				24.0	13.4	
生		始	二世祖	11	$E_2 s^2$	- 38 -	7	三垛运动
	古	新			$E_2 s^1$	- 50 5 -	5.5	
_	近	统	載歯缃	<u> </u>	$E_2 d^2$	- 53.0 -	2.5	直武运动
界					$E_2 d^1$	- 54.9-	1.9	
	系			四	$E_{J}f^{4}$	- 56.0 -	1.1	
		古新	阜宁组	11	$E_1 f^3$	- 58.0-	2	
		统			$E_1 f^2$	- 60.2 -	2.2 吴堡运动	吴堡运动
				_	$E_{1}f^{1}$	- 65.0 -	4.8	
中生	白亚		泰州组	<u> </u>	$K_2 t^2$	- 75.0-	10	
,界	书系		赤山组		$\mathbf{K}_2 t$ $\mathbf{K}_2 c$	- 83.0-	8	仪征运动

表 1 江苏油田地质年代表 Table 1 Geo bg ic time scale of the Jiangsu () il Field

据胡望水,高邮及金湖凹陷构造断裂特征与油气成藏关系研究 报告,2004

盆地内晚白垩世一新生代沉积了泰州组、阜宁组、戴 南组、三垛组、盐城组、东台组 (表 1)。

### 2 盆地沉降史分析原理及计算方法

盆地的形成经历了漫长而复杂的过程,重力均 衡作用在盆地的形成过程起到重要的作用。盆地的 沉降包括构造沉降和非构造沉降,我们可以通过盆 地的沉降量和沉降速率两个参数来反映盆地的沉降 过程。关于沉降量的求取方法前人做了大量工 作<sup>[23]</sup>,本文主要采用回剥法恢复盆地的埋藏史和 构造沉降史。回剥法(backstipping mehod)利用岩 石骨架厚度不变模型,按照从新到老的顺序逐层去 掉各个时期上覆地层,通过去压实校正、剥蚀量校 正、古水深校正等一系列校正方法恢复出各年代地 层的原始沉积状况,从而对盆地在不同时期的沉降 量进行计算,进而可以做出沉降史图,以反映盆地沉 降量的变化情况<sup>[4]</sup>。

### 3 沉降量的计算

#### 3.1 地层分层数据

我们采用钻井资料和地震资料相结合的方式选取井点。除了实际钻井资料外,我们还选择了 200余

口的"人工井"(在地震剖面中选取的穿越各目的层的虚拟井),通过对比,钻井资料和人工井资料具有 很好的相似性(图 4)。利用不同构造部位的人工井 资料分层数据可以较好地反映盆地的差异沉降特 征。

研究区井位分布图如图 2所示, 地层绝对年龄 如表 1所示。

3.2 孔隙度随深度变化关系

通过声波时差曲线可以计算地层的孔隙度,表 达式为:

 $\Phi(\mathbf{z}) = (\Delta \mathbf{t}_{a} - \Delta \mathbf{t} \mathbf{z}) / (\Delta \mathbf{t}_{a} - \Delta \mathbf{t})^{[6]}$ 

式中,  $\Phi$ ( 3为测点的孔隙度,  $\Delta$  ( 3为测点的声 波时差,  $\mu > m \Delta \pm$ , 为岩石基质的声波时差;  $\mu > m \Delta \pm$ 为孔隙中流体的声波时差; 常见岩石的  $\mu > m$ 分别为: 砂岩为 185 $\mu > m$ ,石灰岩为 161 $\mu > m$ ,白云岩 为 145 $\mu > m$ ,孔隙 流体的 声波时 差 经 验 值 为 620 $\mu > m^{1/3}$ 。

在正常状态下, 地层中孔隙度的变化规律满足 下列关系<sup>[1]</sup>:

 $\Phi(z = \Phi_0 e^{cz})$ 

其中 Φ( <sup>3</sup>为深度 **%**处地层的孔隙度, Φ<sub>0</sub>表 示地表的孔隙度, <sup>c</sup>表示压实系数。通过对研究区 域100余口探井进行统计我们拟合了研究区域孔隙 度随深度变化关系式, 考虑到砂岩和泥岩孔隙度的 差异, 我们分别进行拟合, 具体公式如下:

 $\Phi_{s}(3) = 50.013^{\frac{9}{6}00054^{z}}$ 

$$\Phi_{\rm m}$$
 (  $3 = 41, 732^{e^{0.0043}}$ 



#### 图 2 高邮凹陷井点及测线位置图

1钻井; 2人工井; 3.测线

Fig 2 Location of well sites and traverses in the Gaoyou depression

1 = drilled well 2 = virtual well 3 = traverse line

其中 Ф<sub>s</sub>( <sup>3</sup>、Ф<sub>m</sub>( <sup>3</sup>表示在 <sup>2</sup>米处砂岩和泥岩 的孔隙度。通过拟合的结果显示砂泥岩孔隙度随深 度变化的差异不大。考虑到本次研究的目的是区域 沉降特征,因此我们拟合出了全区总孔隙度 (不计 砂泥岩差别的孔隙度)随深度的变化关系式:

 $\Phi_{\rm m}$  =46 071  $e^{0.0051 z}$ 

3.3 地层的剥蚀厚度:

地层剥蚀厚度的计算方法有泥岩声波时差法、 镜质体反射率法、地层趋势外推法、磷灰石裂变径迹 法等。本文主要采用泥岩声波时差法及镜质体反射 率法,通过对比估算高邮凹陷始新统一渐新统地层 剥蚀量(图 3,图 4):

结合镜质体反射资料<sup>[8]</sup>,我们可以推测高邮凹 陷始新统剥蚀规律。在三垛期末,高邮凹陷全区均 遭受剥蚀,剥蚀厚度 600~1600<sup>n</sup>左右;在吴堡低凸 起和柘垛低凸起上剥蚀量较大,均超过 1400<sup>m</sup>,最大 可达 1600<sup>m</sup>。而凹陷西南部的韦 8井、马 15井的剥 蚀量较小,只有 800<sup>n</sup>左右。而凹陷中部的剥蚀量因 所处的构造部位不同,剥蚀量在 600~1400<sup>n</sup>不等。 总体上看, 剥蚀量自凹陷的西南部向凹陷的东北部 增大。在不同的构造部位剥蚀量大小不同, 在南断 阶靠近边界主断层的区域, 因受构造运动的影响, 地 层剥蚀量较大, 达 1300~1500<sup>m</sup>, 而在深凹带, 地层 的剥蚀厚度较小。为 600~800<sup>m</sup>。在西斜坡和北斜 坡, 由于地层构造活动稳定, 剥蚀量较小。但是由于 斜坡处地层位于高部位, 因此地层的剥蚀量小于南 断阶而大于深凹带平均值, 在 1200<sup>m</sup>左右。

3.4 古水深

古水深可以根据古生物和古生态、自生矿物等 标志进行标定。在内陆断陷湖盆的沉降史分析中, 一般可以忽略古水深的影响<sup>[3]</sup>。苏北盆地晚白垩 世以来最大古水深为 20<sup>m</sup>,因此在计算沉降量的过 程中不考虑古水深的影响。

3.5 构造沉降量的计算

盆地的总沉降量减去盆地中地层负荷引起的沉 降量即是构造沉降量。盆地的总沉降量可以由盆地 的古厚度代替,盆地地层负荷引起的沉降量可以由 艾里均衡公式求取<sup>[1]</sup>。具体的构造沉降量求取公



图 3 高邮凹陷泥岩声波法剥蚀量恢复图

1. 古地表; 2 现今地表; 3. 剥蚀面

Fig 3 Estimates dvalues for the thickness of the denudational strata in the Gaoyou depression based on the time difference method of acoustic waves of mudstones

 $1 = \text{ancient surface} \quad 2 = \text{modern surface} \quad 3 = \text{denudational surface}$ 



#### 图 4 高邮凹陷始新统剥蚀量恢复图

#### 1 泥岩声波时差法; 2 Ro反演法

Fig 4 Distribution of the Eocene denudational strata in the Gaoyou depression

1 = time difference method of accustic waves of mudstones 2

 $= R_{o}$  inversion method

#### 式如下所示:

 $S_{j} = \frac{d \int \left(\rho m - \rho m g + (\rho m - \rho w) \phi_{0} \exp(-ch)\right)}{(\rho m - \rho w)} + H$ 

式中  ${}^{\circ}$  )表示构造沉降量,  ${}^{\circ}$  )表示地层古厚 度, ${}^{\circ}$ m表示地幔在  ${}^{\circ}$ C时的密度, ${}^{\circ}$ w为水在  ${}^{\circ}$ C时的密度。 ${}^{\circ}$ ,为沉积物原始孔隙度, ${}^{\circ}$ 为压实系数,

*"*为深度,<sup>H</sup>。为古水深。在陆相盆地古水深变化不 大的时候一般不考虑古水深的影响。

### 4 高邮凹陷沉降史分析

### 4.1 高邮凹陷沉降史的演化特征

从图 5.图 6可以看出,盆地演化的阶段性在盆 地沉降史曲线上的反映十分明显。泰州组和阜宁组 一段沉积时期 (83.0~54.9 $M^{a}$ ), 盆地的沉降逐渐加 速,最大沉降速率达到 200<sup>m/Ma</sup>。阜宁组沉积后盆 地区发生了区域性的降起, 阜宁组局部遭受剥蚀, 由 于剥蚀时间短,且盆地抬升幅度较小,造成阜宁组地 层的剥蚀量较少,因此在图中并没有表现不同构造 部位剥蚀量的差异。戴南组和三垛组沉积时期 (54.0~38.0<sup>M</sup>9,盆地凹陷中心的沉降速率更快, 与斜坡、凸起部位差异性增大,柘垛低凸起等正向构 造单元上缺失戴南组,盆地内凹凸相间的构造格局 更加明显。三垛组沉积时期较戴南组沉积时期的沉 降速率有所变慢,但总体上还是很快。渐新世 (38.0~24.6<sup>M</sup>9盆地以隆升为主,存在一定的差 异,高邮凹陷北部抬升幅度更大,地层剥蚀量相应也 更大。盐城组和东台组沉积时期(24,6~0,0Ma)盆 地沉降显著减弱,而且表现为整体沉降特征,表明盆 地沉降由伸展断陷沉降转为热拗陷沉降,沉降速率 明显减慢,该时期沉降量大幅减少,平均在600~ 1000<sup>m</sup>左右。



图 5 马 9井埋藏史与沉降史曲线图 F g 5 Curves showing the burial (left, and subsidence (right, history of the Mag well

图 7 高邮凹陷主干测线人工井构造沉降史曲线图 ª 91<sup>g</sup>5测线构造沉降史曲线图; b 86<sup>g</sup>3+ <sup>zhongbu</sup>27+ <sup>zs</sup><sup>1</sup>84<sup>2</sup>测线构造沉降史曲线图; <sup>c</sup> d<sup>ongbu</sup>199测线构造沉降史曲线图 Fg 7 Curves showing the tectonic subsidence history of the virtual wells along the main traverses in the Gaoyou depression



图 6 91 g 5(09) 井埋藏史与沉降史曲线图 Fig 6 Curves showing the burial (left) and subsidence (rBht) history of the 91 g 5(09) well



#### 4.2 高邮凹陷沉降量的分布特征

通过选取不同构造部位具有代表性的沉降史曲 线对盆地沉降量平面分布规律进行分析,进而判断 构造活动对盆地沉降情况的影响(图 7)。

91 <sup>g</sup>5 测线 (图 2)位于高邮凹陷南部, 09 井位于 真武断层附近,而06井则靠近斜坡位置,在沉降史曲 线图上(图 7 9,我们可以看到在高邮凹陷南部,盆 地沉降量普遍较小,只有2000<sup>m</sup>左右,而靠近主断裂 的 09井 沉 降 量 稍 大, 最 大 沉 降 量达 到 3000<sup>m</sup>。 86 93+ zhongb 127+ zsh842侧线位于高邮凹陷中部. 因为所处构造部位不同,三口井的沉降量不同 (图 7 b. 03井和 15井由于靠近高邮凹陷边界断层, 所以沉降量较大,而位于中部的09井的沉降量较少。 但是三口井的沉降速率非常接近,反映了凹陷的南 北共同经历了盆地由裂陷期一坳陷期的演化过程。 Dongbu199则线位于高邮凹陷西北部,02井位于柘垛 低凸起上,08井位于吴堡断层控制的深凹带处。吴 堡事件不但造成了柘垛低凸起上缺失了戴南组地 层,同时对该区沉降量的影响较大。从图 7 中可以 看到,在低凸起上最大沉降量只有 2000<sup>m</sup>,而在东部 深凹带,沉降量达到了4000<sup>m</sup>以上。

4.3 高邮凹陷沉降中心分布特征

根据 200余口钻进和人工井资料,我们恢复了 高邮凹陷全区各时期地层的古厚度,从而对高邮凹 陷的沉降中心进行了标定。各时期沉降中心的迁移 规律反映了高邮凹陷的构造活动特征(图 8)。

高邮凹陷沉降中心围绕着凹陷主要断裂带分 布,南侧的真武断裂带及与真武断裂带反向的汉留 断层和北侧的吴堡断裂带共同控制了深凹带的分 布。从图 8中可以看到,沉降中心围绕着断层呈串 珠状分布,从凹陷南侧一直延伸到盆地东北侧的吴 堡低凸起和柘垛低凸起之间,深凹带的长轴方向与 凹陷内的一级断裂的走向具有很好的相似性,均呈 南西 北东向展布,表明断层的活动对盆地的沉降具 有强烈的控制作用。

### 5 高邮凹陷构造演化特征

根据前述沉降史分析结果,结合高邮凹陷断裂 系统的几何学和运动学特征分析表明,苏北盆地高 邮凹陷自晚白垩世至新生代经历了完整的裂陷盆地 演化阶段(图 9),即早期拗断 断拗 断陷 晚期拗陷。 泰州组二段 阜宁组一段沉积时期,盆地处于裂陷盆 地演化阶段早期。该时期盆地由于地壳裂陷伸展引 起盆地沉降,沉降速率快,沉降量大。但是盆地沉降 量在全区分布较均匀,仅有边界断层发育,且活动性 较弱,表明该时期盆地处于拗断期。在阜宁组二段-阜宁组四段沉积时期,盆地的裂陷程度进一步加大, 构造活动增强,在凹陷南部形成了与真武断层倾向 相反的汉留断层,两条倾向相反的断层控制了高邮 凹陷深凹带的雏形,此时的盆地进入断拗演化阶段。



#### 图 8 高邮凹陷沉降中心分布图

### <sup>。</sup>高邮凹陷戴南组地层古厚度及沉降中心分布图:1. 地层古厚度; 2 沉降中心。 b 高邮凹陷沉降中心迁移图: 1. 盐城期盆地沉降中心; 2 三 支垛期盆地沉降中心; 3 戴南期盆地沉降中心; 4 阜二一阜四期盆地沉降中心; 5. 泰二一阜一期盆地沉降中心;

Fig. 8 Distribution of the depocenters in the Gaoyou depression

a Stratigraphic thickness of the Dainan Formation and the distribution of the depocenters in the Gaoyou depression 1 = stratigraphic thickness, 2 = depocenter, b Migration of the depocenters in the Gaoyou depression. Depocenters in individual stages 1 = Yanchengian, 2 = Sanduoan, 3 = Dainanian, 4 = Funingian 2 - 4, 5 = Taizhouan 2 - Funingian 1



Fig 9 Tectonic evolution in the central sections of the Gaoyou depression

1 = Yancheng Formation + Dongtai Formation 2 = Sanduo Formation 3 = Dainan Formation 4 = second member + fourth member of the Funing Formation 5 = second member of the Taizhou Formation + first member of the Funing Formation 6 = fault 7 = denudation

戴南组沉积时盆地进入断陷期,在凹陷一、二级断裂 的共同控制下,沉积了巨厚的戴南组,凹陷的基本构 造格局形成。三垛组沉积时期盆地处于裂陷 拗陷 转换期,三垛组沉积早期,在先期已存在一、二级断 裂的影响下,盆地进一步沉降,形成了复杂的三级断 裂。而三垛组晚期全盆发生隆升造成了剥蚀。新近 系及第四系盆地演化进入了晚期拗陷阶段。构造活 动趋于停止,全盆沉积了盐城组、东台组地层,且地 层分布均匀。

# 6 结 论

(1)基于高邮凹陷钻井的泥岩声波时差及镜质 体反射率资料对高邮凹陷始新统剥蚀量的计算结果 表明,剥蚀厚度为600~1600<sup>m</sup>,剥蚀量自南西向北 东方向增加,不同构造部位剥蚀量不同,深凹带较 小,北斜坡及低凸起上剥蚀量较大。

(2)通过剥蚀量资料及钻井、人工井数据,对高 邮凹陷晚白垩世一新生代沉降史进行的分析表明, 高邮凹陷为典型的裂陷盆地,经历了拗断 断拗 断 陷 拗陷的演化过程,构成了完整的裂陷盆地旋回。 不同构造部位沉降量不同,主要受断裂活动的影响。 主要沉降中心围绕着东部边界的真武和吴堡断裂带 呈串珠状分布。

(3)高邮凹陷的构造演化经历了拗断 断拗 断 陷 拗陷演化过程, 拗断期盆地均匀沉降, 形成了边 界一级断裂; 断拗期在一级断裂的基础上形成了与 一级断裂倾向相反的二级断裂, 形成盆地凹凸相间 的雏形; 断陷期边界断层强烈活动, 奠定了盆地的构 造格局; 过渡期在一级、二级断裂的控制下进一步形 成了盆地的三级断裂; 坳陷期构造活动较弱, 只有边 界断层的轻微活动。

- [1] 陆克政,朱筱敏,漆家福.含油气盆地分析[<sup>M</sup>].东营:石油大
  学出版社,2001 285-294.
- [2] WATTS A B, RYANW B F F lexure of the lithosphere and continental mangin basins [J. Tectonophysics, 1976, 36, 25-44.
- [3] 杜旭东,朱建伟. 沉降曲线原理及应用[J]. 世界地质, 1994, 13 (3): 104-113.
- [4] 费琪,范土芝,梅廉夫,等.成油体系分析与模拟[<sup>M]</sup>.武汉:中 国地质大学出版社,1997 255-257
- [5] 陆克政,漆家福.渤海湾新生代含油气盆地构造模式[<sup>M]</sup>.北 京:石油工业出版社,1997.155.
- [6] 雍世和,张超谟.测井数字处理与综合解释[<sup>M]</sup>.东营.石油大
  学出版社,1996 123-124.
- [7] 王子煜, 漆家福, 陆克政. 黄骅凹陷东部构造带新生代构造沉 降史分析[].石油与天然气地质, 2000, 21(2): 127-129
- [8] 杨立干, 陆英, 陈平原. 高邮凹陷上下第三系之间地层剥蚀量的研究[1]. 江汉石油学院学报, 2003, 25(增刊): 33-34
- [9] 钱基.苏北盆地油气田形成与分布一与渤海湾盆地比较研究
  [].石油学报, 2001, 22(3): 12-16.

# 参考文献:

Tectonic subsidence and evolution of the Gaoyou depression in northern Jiangsu Basin during the Late Cretaceous to the Cenozoic

NENG Yuan, YANG Qiao, ZHANG Kexin, REN Hong min, ZHENG Yuan can

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Explorator, China University of Petroleum, Beijing 102249 China, 2. College of Resources and Information, University of Petroleum, Beijing 102249, China, 3. International Research Center, PetroChina, Beijing 100034, China, 4. Research Institute of Geophysical Sciences, Jangsu Oil Field Company SNOPEC, Yangahou 225009, Jiangsu China)

Abstract The analysis of the subsidence history of the Gaoyou depression in northern Jiangsu basin during the Late Cretaceous to the Cenozoic is concerned with the decompaction correction based on the backstripping method and stratigraphic framework thickness model of the sedimentary strata in the Gaoyou depression, estimation of the thickness of the denudational strata in the depression during the latest Sanduoan based on the time difference of acoustic waves and vitrinite reflectivity and calculation of the tectonic subsidence and total subsidence in the depression based on the Airy isostasy hypothesis. The results of research show that the Gaoyou depression is a typical rift basin and has gone through the evolutionary stages of downwarping—faulting faulting—downwarping and rift faulting—downwarping including three phases of subsidence and two phases of uplifting. The depocenters in individual stages are all controlled by main boundary faults, and display a beaded alignment around the boundary faults

Key words Gaoyou depression, Late Cretaceous— the Cenozoic denudational thickness subsidence history tectonic evolution