

文章编号: 1001- 6112(2006)03- 0225- 06

# 断陷—拗陷原型迭加系统的生烃史

## ——以苏北盆地溱潼凹陷为例

徐旭辉<sup>1,2</sup>, 江兴歌<sup>3</sup>, 朱建辉<sup>3</sup>

(1. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油大学, 北京 102249;

3. 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)

摘要: 断陷—拗陷型盆地中油气物质的生烃史, 势必受断陷—拗陷原型迭加的埋藏史约束和控制, 从油气源岩到圈闭建立油气成藏的观念, 必须纳入到盆地系统中, 明确盆地地质作用与油气响应之间的关系, 确立原型控制油气 P(压力)、V(体积)、T(温度)动态变化的边界条件, 同时利用 TSM 盆地模拟系统动态地进行生烃量计算和生烃史的分析, 从而为油气资源评价和勘查服务。

关键词: 原型迭加; 生烃史; TSM 盆地模拟; 苏北盆地

中图分类号: TE121.1

文献标识码: A

### 1 问题的提出

近年来的油气盆地动态成藏分析研究, 不断强调盆地才是具备边界和要素的系统, 系统中油气要素包括生、储、盖物质及其分布都受盆地沉降性质、结构与充填方式的控制。一切油气事件都发生在这一系统中, 而由构造—热体制对盆地地质作用要素、油气响应要素以及要素网络之间的相互作用进行约束。以原型并列迭加关系来表达系统边界条件的动态变化关系, 就是探索构成天然系统网络的动态整合, 探索原型特征及其并列迭加变化的地质作用如何动态地“联接”天然的压力、体积和温度(P—V—T)的变化, 认识油气物质转化为流体和运移聚集的功能关系。因此, 研究油气形成与分布的系统性不仅要分析积极的(active)“源岩到圈闭<sup>[1]</sup>”的作用关系, 更重要的是从盆地的全部要素去认识作用—响应这一动态变化的系统网络关系(图1)。目前在成熟盆地的研究中已经取得了大量油气成藏的进展, 认为干酪根不同组分具有不同的热成熟度和生烃门限, 地下孔隙流体压力实际具有四维应力配置关系, 而油气排烃和运移更是在盆地结构变化适宜的条件下发生的, 它们在不同体制变化的沉降空间实体中必然是相互联系而不可分割的。因此, 只有通过盆地这一自然系统的动态分析才能完整取得油气成藏条件的认识。

从活动论构造历史观<sup>[2]</sup>出发, 油气盆地在理念

和研究方法方面都取得了长足的进步。基于“盆地是不同原型组合”的认识, 一定层次特征体制的盆地沉降结构及其沉积实体, 既改造了先前存在的结构实体, 也被后续阶段的沉降体制所更迭。盆地动态演化的结果可以表述为盆地原型并列与迭加的组合, 而确认历史阶段原型的性质和分布, 分析不同原型并列迭加的效果, 本质上就是进行盆地动态

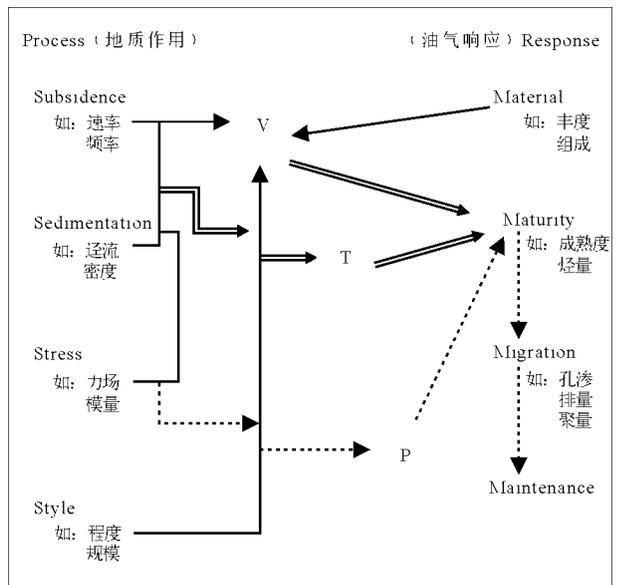


图 1 地质作用(S) — 油气响应(M) 关系

单线代表体积相关作用; 双线代表热场相关作用; 虚线代表压力相关作用

Fig. 1 Relationship between geologic process(S) and its response(M)

收稿日期: 2006- 01- 20; 修订日期: 2006- 04- 28。

作者简介: 徐旭辉(1964—), 男(汉族), 浙江永康人, 在站博士后、教授级高级工程师, 主要从事盆地分析和盆地模拟研究。

基金项目: 中国石化集团公司科技项目(P01025)。

分析的基本内容,也就是以盆地系统动态地进行油气形成和聚集规律分析的基本方法<sup>[3-6]</sup>。本文以苏北盆地溱潼凹陷为例,进行了以原型地质分析为建模基础的作用—响应 TSM 模拟,分析断—拗原型转化约束下的生烃史动态演化过程,从而为预测油气潜力和指导油气勘探部署打下基础。

## 2 溱潼凹陷断—拗结构分析

苏北溱潼凹陷属于苏北南黄海盆地,是一个古近纪断陷和新近纪以来拗陷的迭加,具有典型的断—拗转化的盆地结构<sup>[7]</sup>。溱潼凹陷的形成、发展经历了 8 次构造运动,其中仪征运动(相当于燕山尾幕)、吴堡运动(相当于喜山幕)、三垛运动(相当于喜山幕)是 3 次主要的构造运动。从平面上看,溱潼凹陷断陷是呈北东向展布的不对称半地堑沉积凹陷,基本结构具南深北浅、南断北超、南厚北薄、中间开阔、东西收敛的箕状凹陷特点,自南向北具有断阶带、深凹带、内斜坡带、坡垒带和外斜坡带(图 2)。由此可知,溱潼凹陷的沉降结构主要受古新世末的吴堡运动及渐新世末的三垛运动制约,从而在纵向上发育有泰州—阜宁组、戴南—三垛组、盐城组—第四系 3 大构造层。上构造层由新近系东台组和盐城组组成拗陷原型结构( $T_2^0$  波以上),沉积分布广泛稳定,构造不发育;中构造层由古近系三垛组、戴南组组成( $T_3^0-T_2^0$  波);下构造层由古近系阜宁组、泰州组组成( $T_4^0-T_3^0$  波)。中、下构造层都是断陷结构,是 2 期断陷的迭合。因此,在纵向上溱潼凹陷存在着断陷—断陷—拗陷的迭加关系,各构造层之间存在剥蚀。

## 3 原型结构与烃源岩分布

原型盆地的沉降、沉积发育控制了烃源岩的分布。从现今保存状况分析,古新世时,溱潼凹陷沉积为统一大湖盆发展时期的张裂深凹充填物。泰州组、阜宁组沉积可分为 2 大沉积旋回,即泰州组早期—阜一段和阜二段—阜四段。前期旋回以快

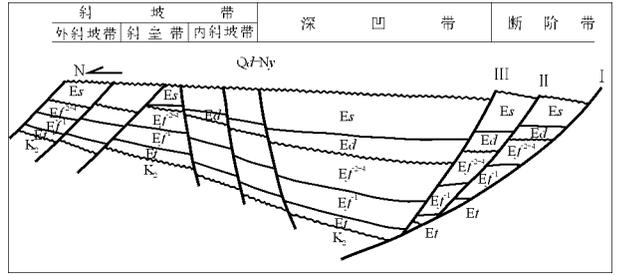


图 2 苏北盆地溱潼凹陷结构剖面  
Fig. 2 Tectonic profile of the Qintong Sag in the North Jiangsu Basin

速饱和沉积为主,后期旋回以扩展不饱和沉积为主并受到不同程度的海水侵漫影响。前期旋回本身呈粗—细—粗、红—黑—红的岩性特征,其中泰州组下部表现为游荡性河、低弯度河、滨湖冲积扇等沉积岩相特征,而中上部主要为浅湖沉积岩相特征,阜一段沉积特征为河流三角洲—滨湖冲积扇—滨浅湖沉积。后期旋回细夹粗,主要为湖进、湖退沉积,其中阜三段以三角洲沉积为主。古新世末期的吴堡运动发生了重要的剥蚀,之后沉积进入了受控于断层充填性极强的河流—三角洲发育时期。戴南组沉积时,湖盆逐渐萎缩,戴一段为一套三角洲—滨浅湖沉积,戴二段自东向西依次为洪积平原、网状河流及滨、浅湖亚相沉积。三垛组沉积时,湖盆消失,形成一套以河流泛滥平原及河间洼地为主的红色砂泥岩沉积。渐新世末的三垛运动使溱潼凹陷沉积又一次经受重要剥蚀,三垛运动后断裂运动减弱消失,沉积物填平补齐,形成了区域性拗陷沉积,在此沉积背景下,以阜宁组和泰州组为主的烃源岩发育。根据溱潼凹陷地化资料,凹陷内深灰—灰黑色泥岩(通称为暗色泥岩)有机碳含量一般大于 0.5%~1%,氯仿沥青“*A*”含量一般大于 100  $\mu\text{g/g}$ ,为较好的生油岩,主要发育于阜二段、阜四段及泰二段;其次为灰绿—灰色泥岩,有机碳含量一般为 0.1%~0.5%,生油潜力较低。凹陷内各层段暗色泥岩厚度、有机质含量和丰度不同(表 1),

表 1 苏北盆地溱潼凹陷生油岩概况

Table 1 Outline of hydrocarbon source rock in the Qintong Sag, the North Jiangsu Basin

层位	分区	主要干酪根类型	有机碳含量, %	暗色泥岩厚度/m	有机碳平均, %	生油岩厚度百分比平均值, %
$E_t$			0.6~1.3	50~150	0.98	42.6
$E_f^2$			0.5~2.0	100~350	1.55	97.0
$E_f^3$			0.5~1.0	50~250	0.97	55.9
$E_f^4$			0.5~2.0	50~500	1.10	100.0
	西区					58.0
$E_d^1$	中区		0.2~2.4	50~200	0.87	72.4
	东区					32.6

但生油母质多以陆源有机质为主, 其次为水生有机质, 基本上属于  $\text{I}_1$  型干酪根。平面上分布受凹陷的沉降沉积中心控制(图 3, 4), 由东向西

可分为 6 个次一级深凹, 依次为大凡庄次凹、时堰次凹、储家楼次凹、俞垛次凹、港口次凹和石冯庄次凹。

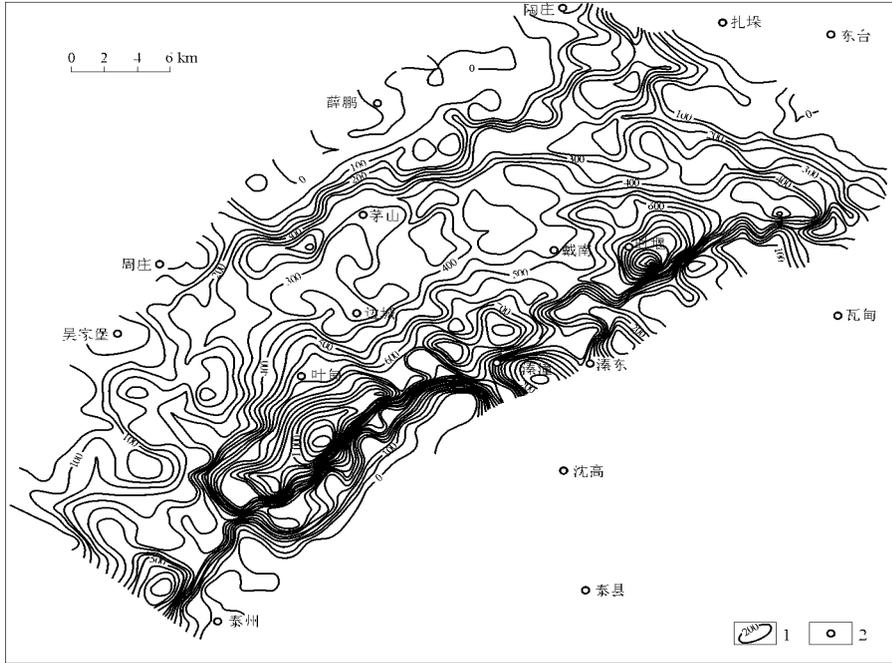


图 3 苏北盆地溱潼凹陷阜三段沉积时(56.3 Ma)古近系阜宁组二段( $T_3^3-T_3^2$ 波)厚度  
1. 等厚线/m; 2. 地名

Fig. 3 Thickness of  $E_f^2$  when the third member of Funing Formation depositing(56.3 Ma) in the Qintong Sag, the North Jiangsu Basin

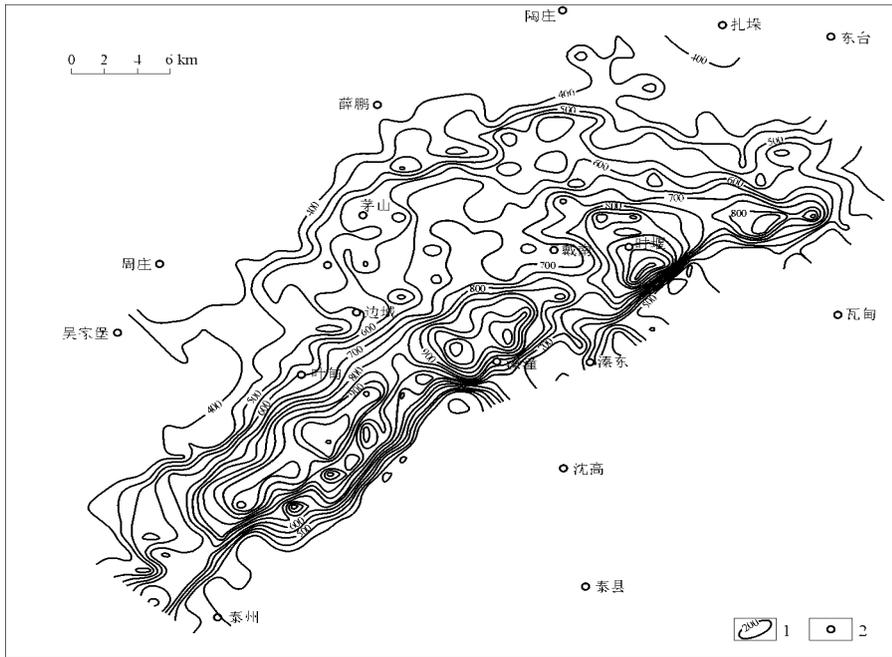


图 4 苏北盆地溱潼凹陷阜宁组沉积末(剥前, 52.1—47.8 Ma)古近系阜宁组四段( $T_3^1-T_3^0$ 波)厚度  
1. 等厚线/m; 2. 地名

Fig. 4 Thickness of  $E_f^4$  at the end of the Funing Formation depositing (before denudation, 52.1–47.8 Ma) in the Qintong Sag, the North Jiangsu Basin

## 4 原型迭加与油气成藏

原型盆地迭加促进生油物质的成熟。TSM 盆地模拟反映了自 89.2 Ma 以来泰州组、阜二段、阜三段、阜四段等地层中源岩随时间的成熟演化过程, 以及各层位在某一时期内的生烃量和某一时期内的累计生烃量, 最终统计得出总的生烃量, 从而系统、动态、定量地认识了凹陷的生烃史。

模拟结果显示在晚白垩世—古新世断陷期, 源岩基本上未成熟。但是该区在渐新世—始新世断陷迭加时, 由于戴一段、戴二段的沉积, 使得在 47.8~35.3 Ma 期间泰州组、阜二段进入了生烃门限。从表 2 中看, 该两层位的成熟度( $R_o$ ) 值不大, 但往深凹会变大一些。此时段泰州组有  $718.92 \times 10^4$  t 的生烃量(表 3), 且集中分布在淤溪、溱潼两深凹(图 5a); 阜宁组二段  $169.43 \times 10^4$  t 的生烃量分布主要集中在淤溪、溱潼和时堰 3 个深凹(图 5b)。在三垛组沉积时(35.3 Ma), 阜三段源岩还未成熟, 阜四段源岩虽有  $0.01 \times 10^4$  t 的生烃量, 但

量还非常小。由于渐新世—始新世的进一步拉张, 尤其是厚度超过 1 000 m 的三垛组沉积时期的较大拉张, 使得该时期基底处在高热流传导状态, 凹陷内地温高。三垛组地层的覆盖、古地温的上升导致了该区深凹部位的泰州组、阜宁组二段、三段、四段和戴一段源岩的  $R_o$  分别大于 1.2%, 0.9%, 0.8%, 0.7% 和 0.5%, 从而进入了一次规模较大的生烃期(表 3), 其分布集中在溱潼、淤溪、时堰 3 个深凹部位及其周缘(图 6a, b)。三垛运动的剥蚀作用使得该区古新统埋深均变浅, 各层古地温均有微弱下降(表 2)。因此, 此阶段虽持续生烃, 但烃的增量不大。到盐城组沉积时(23.2 Ma), 该区渐新世—始新世断陷活动结束, 由于该断陷的迭加促使古新统地层中源岩成熟生烃。至此, 受埋深、地温的综合影响, 溱潼凹陷中泰州组、阜二段、阜三段、阜四段、戴一段等源岩累计生烃量分别达到  $2.2135 \times 10^8$ ,  $2.088 \times 10^8$ ,  $236.18 \times 10^4$ ,  $8646.9 \times 10^4$ ,  $137.55 \times 10^4$  t, 其分布范围与前期相仿。断陷期合计生烃约达  $5.2036 \times 10^8$  t。

表 2 不同时期溱潼深凹附近(S175 井处)各层源岩演化情况

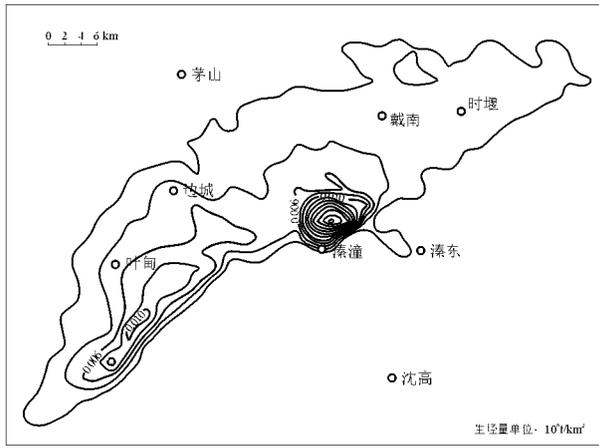
Table 2 Evolution of hydrocarbon source rock near Qintong deep sag(at Well S175) in different times

项目	戴一段沉积时 (47.8 Ma)	戴二段沉积时 (41.3 Ma)	三垛组沉积时 (35.3 Ma)	三垛组沉积末 (35.3—23.2 Ma)	盐城沉积时 (23.2 Ma)	现今	
泰州组	埋深/m	2 402.151	2 591.128	2 854.82	4 133.127	3 924.228	5 390.441
	地温/℃	60.548	67.683	75.846	190.069	187.946	216.708
	$R_o$ , %	0.374	0.431	0.487	1.282	1.358	1.646
阜二段	埋深/m	1 185.093	1 366.653	1 623.743	2 880.713	2 672.448	4 119.43
	地温/℃	42.227	46.895	54.025	145.223	142.709	174.89
	$R_o$ , %	0.158	0.240	0.303	0.919	0.995	1.303
阜三段	埋深/m	889.906	1 069.525	1 326.533	2 539.818	2 331.035	3 733.550
	地温/℃	35.269	39.099	45.567	124.974	122.043	154.540
	$R_o$ , %	0.071	0.167	0.233	0.756	0.831	1.138
阜四段	埋深/m	635.458	811.292	1 051.709	2 202.270	1 998.257	3 393.750
	地温/℃	23.407	28.847	34.142	100.010	96.275	130.817
	$R_o$ , %	0.060	0.134	0.134	0.810	0.821	0.972
戴一段	埋深/m		364.275	579.301	1 723.710	1 515.112	2 903.572
	地温/℃		18.489	24.700	81.774	77.031	114.056
	$R_o$ , %		0.031	0.411	0.411	0.480	0.805

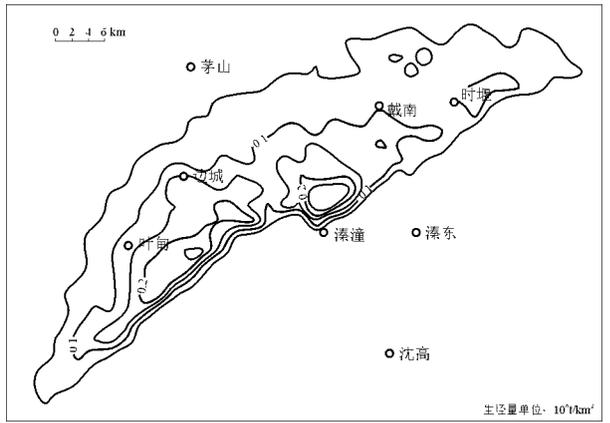
表 3 苏北盆地溱潼凹陷模拟生烃量

Table 3 Simulated hydrocarbon-generation quantity in the Qintong Sag, the North Jiangsu Basin  $10^4$  t

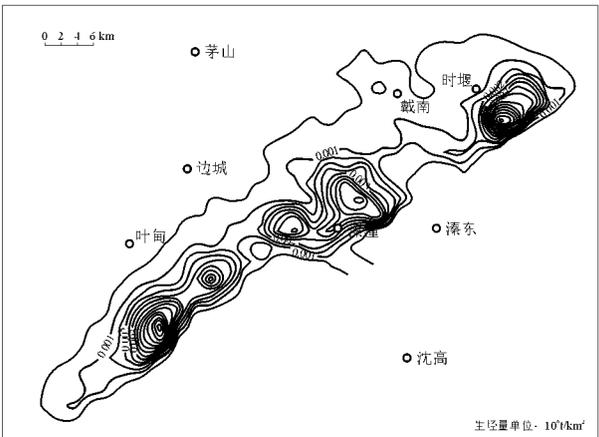
地质时间/ Ma	泰州组		阜二段		阜三段		阜四段		戴一段	
	当时	累计	当时	累计	当时	累计	当时	累计	当时	累计
47.8	247.57	247.57								
41.3	213.04	460.61	40.84	40.84						
35.3	258.31	718.92	128.59	169.43	0.01	0.01				
35.3—23.2	18 010.00	18 729.00	16 461.00	16 630.00	200.53	200.53	7 667.90	7 667.90	78.14	78.14
23.2	3 406.00	22 135.00	4 250.00	20 880.00	35.65	236.18	979.00	8 646.90	58.81	137.55
现今	17 562.00	39 697.00	37 120.00	58 000.00	560.28	796.46	15 731.00	24 378.00	1 262.10	1 399.60



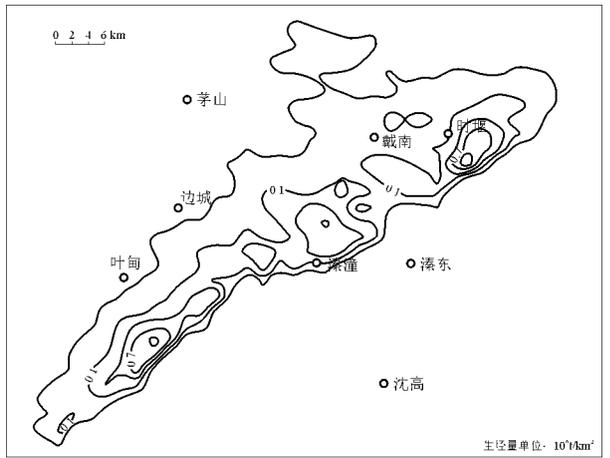
a 上白垩统泰州组



a 上白垩统泰州组



b 古近系阜宁组二段



b 古近系阜宁组二段

图 5 苏北盆地溱潼凹陷三垛组沉积时 (35.3 Ma) 源岩生烃量等值线

Fig. 5 Contour of hydrocarbon-generation quantity of source rock when Sanduo Formation depositing in the Qintong Sag, the North Jiangsu Basin

图 6 苏北盆地溱潼凹陷三垛组沉积末 (剥前, 35.3—23.2 Ma) 源岩生烃量等值线

Fig. 6 Contour of hydrocarbon-generation quantity of source rock at the end of Sanduo Formation depositing (before denudation, 35.3–23.2 Ma) in the Qintong Sag, the North Jiangsu Basin

至现今, 巨厚的盐城组和第四系披盖, 使得下伏地层大大加深, 溱潼凹陷的基底最大埋深已达 5 800 m, 因此, 古新统源岩进一步演化。该期间凹陷约有  $7.2235 \times 10^8$  t 生烃量 (表 3), 是该区最强的生烃期, 达到了生烃史上的最高峰。

模拟生烃史表明, 泰州组、阜二段、阜三段、阜四段、戴一段分别累计生烃  $3.9697 \times 10^8$ ,  $5.8 \times 10^8$ ,  $796.46 \times 10^4$ ,  $2.4378 \times 10^8$ ,  $1399.6 \times 10^4$  t, 溱潼凹陷总生烃量约为  $12.4271 \times 10^8$  t。该区主力生油层为阜二段, 其次为泰州组和阜四段。从时间域上看, 凹陷在戴南组沉积时, 泰州组烃源岩已经进入生油门限, 三垛组沉积末期 (35.3—23.2 Ma) 凹陷的泰州组、阜二段和阜四段主力烃源岩均已进入大量生烃期; 盐城组—第四系 (23.2 Ma—现今) 的披盖使得该区进入了一个持续的生烃高峰期。

### 5 结论

1) 从盆地原型分析出发, 能够全面地认识油气成藏系统的压力、体积和温度 (P—V—T) 等各要素, 并通过基于该思想的 TSM 盆地模拟系统进行整合, 从而得出原型盆地的发育控制了烃源物质的分布, 原型盆地的迭加控制了油气的生成与成藏。

2) 在溱潼凹陷生烃史方面, 泰州组—阜宁组断陷控制了凹陷中泰州组及阜二段等主要烃源岩的发育及分布, 戴南组—三垛组断陷和盐城组—东台组拗陷的迭加, 为烃源物质的成熟、成藏提供了系统边界条件。

致谢: 该研究得到无锡石油地质研究所张渝昌教授的指导, 中国石化华东石油分公司研究院为本文研究提供资料和大力帮助, 谨表感谢。

- 参考文献:
- 1 Magoon L B, Dow W G. The petroleum system: from source to trap[M]. Tulsa: AAPG, 1994. 1~ 655
  - 2 朱 夏. 活动论构造历史观[J]. 石油实验地质, 1991, 13(3): 201~ 209
  - 3 张渝昌. 关于盆地油气动态成藏系统研究的理论问题[A]. 见: 周玉琦, 王金渝, 贾健谊等. 朱夏油气地质理论应用研讨文集[C]. 北京: 地质出版社, 2001. 207~ 220
  - 4 张渝昌. 盆地综合和模拟找油的探索[A]. 见: 朱夏学术思想研讨文集[C]. 北京: 石油工业出版社, 1992. 110~ 121
  - 5 张渝昌. 中国含油气盆地原型分析[M]. 南京: 南京大学出版社, 1997. 3~ 26
  - 6 张渝昌, 徐旭辉, 江兴歌等. 展望盆地模拟[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(1): 29~ 36
  - 7 张渝昌. 从盆地演化看江苏油气远景[J]. 石油实验地质, 1980, 2(3): 1~ 9

## HYDROCARBON-GENERATION HISTORY OF FAULT SUBSIDENCE-DEPRESSION PROTOTYPE SUPERIMPOSITION SYSTEM: A CASE STUDY OF QINTONG SAG IN THE NORTH JIANGSU BASIN

Xu Xuhui<sup>1,2</sup>, Jiang Xingge<sup>3</sup>, Zhu Jianhui<sup>3</sup>

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Production, SINOPEC, Beijing 100083, China;  
2. Petroleum University, Beijing 102249, China; 3. Wuxi Research Institute of  
Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214151, China)

**Abstract:** The hydrocarbon-generation history of the oil and gas materials in a fault subsidence-depression basin is certainly restricted and controlled by the burial history of fault subsidence-depression prototype superimposition. The idea of petroleum reservoir-forming from hydrocarbon source rock to trap must be brought into the basin system. Based on this idea, the relationship between geologic process and its response in a basin can be determined, and the boundary conditions that the prototype controls the dynamic changes of pressure(P), volume(V) and temperature(T) are established. At the same time, the TSM basin modelling system is used so as to calculate the hydrocarbon-generation quantity and analyze the hydrocarbon-generation history.

**Key words:** prototype superimposition; hydrocarbon-generation history; TSM basin modelling; the North Jiangsu Basin

### 维护科技道德 加强自律的联合公告

为了加强科技界精神文明建设,提高科技工作者与编辑部工作人员的职业道德水平,保障我国科技事业的健康发展,我们经过认真讨论,决定联合发表如下公告:

1. 提倡追求真理、实事求是、团结协作、诚实劳动;坚持学术民主,鼓励百家争鸣,尊重他人劳动成果,严肃政治纪律,坚决反对伪科学。
2. 严格执行审稿制度,不循私情,不登人情稿,公正廉洁。
3. 维护投稿人的权益,一般在规定的期限内(收到稿件的3个月内)对来稿是否采用予以答复。
4. 拒绝刊登署名争议、引用他人著述未注明出处、在上述规定的期限内一稿两投或多投的稿件。
5. 对弄虚作假、抄袭剽窃和一稿两投或多投者,一经查实,相关编辑部视其情节轻重给予书面警告、通知其所在单位、3年内拒绝刊登有其署名的任何稿件、在所有签署本公告的期刊上公开曝光等处理。
6. 鼓励对上述所列违反道德规范的行为进行据实举报。强调编者、作者的诚信,各编辑部保护举报人的合理要求。
7. 对于严重违反科技工作者职业道德、情节严重,影响极坏的事件,将转请有关部门进行严肃处理。并在签署本联合公告的期刊范围内建立情况通报制度。
8. 本联合公报欢迎国内能源界科技期刊加盟。

本联合公报于各期刊编辑部签署并在期刊上刊出后生效。

目前签署本联合公告的期刊有:《石油学报》、《石油勘探与开发》、《天然气工业》、《石油地球物理勘探》、《新疆石油地质》、《天然气地球科学》、《海相油气地质》、《特种油气藏》、《石油实验地质》。

《石油实验地质》编辑部