

# 基于排出一聚集一成藏的石油资源潜力评价方法： 以南堡IV油气成藏体系为例

范柏江<sup>1</sup>, 董月霞<sup>2</sup>, 庞雄奇<sup>1</sup>, 姜福杰<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油天然气股份有限公司冀东油田公司, 河北 唐山 063200)

**摘要:**不同的油气资源评价方法具有不同的特点,将不同的评价方法相结合对于提高评价结果的准确度具有重要意义。基于油气排出一聚集一成藏的地质历史过程,同时结合油气勘探的数学规律来建立油气资源的定量预测模型,以此进行石油资源潜力评价。具体研究可分为4个步骤:①对研究区进行油气成藏体系的划分并定量研究其排烃强度,确定排烃量;②确定该油气成藏体系的石油聚集系数,进而确定该成藏体系的石油资源量;③利用石油资源量与最大油藏规模的统计关系,确定研究区的最大油藏规模;④拟合研究区K值,确定油藏个数及油藏规模。对南堡IV油气成藏体系的应用研究结果表明:南堡IV油气成藏体系的累积排烃量达到 $12.50 \times 10^8$  t,石油聚集系数为27.64%,其石油资源量总计 $3.45 \times 10^8$  t,K值拟合结果为1.02,最大油藏规模达到 $0.568 \times 10^8$  t,预测油藏个数总计337个。评价结果表明南堡IV油气成藏体系具有较好的石油资源前景。

**关键词:**成藏体系; 资源评价; 方法研究

**中图分类号:** P624.7

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7849(2012)02-0050-05

油气资源评价方法主要有成因法、类比法和统计法3类<sup>[1-3]</sup>。成因法能给出油气资源量,但无法预测油气藏个数及规模,缺乏对勘探目标的有效指导。类比法由于类比参数受人为因素的影响,从而降低了其评价结果的可靠度。随着我国东部盆地勘探程度的提高,对其石油地质条件的认识逐渐深入,同时深化了对勘探统计规律的认识,利用统计法进行资源评价也逐渐普遍<sup>[4-7]</sup>,但由于盆地内各次级构造或层位的勘探程度存在差异而导致统计法不能全面应用。如何充分利用高勘探程度盆地的勘探规律,同时又不偏离其石油地质过程的研究,这是资源评价研究不变的主题<sup>[3-4]</sup>。为此,笔者将采用图1所示的

技术路线并基于油气排出一聚集一成藏的地质原理结合勘探统计规律来进行油气资源评价。

## 1 南堡IV成藏体系概况

油气成藏体系是地下油气成藏的自然体系,包括形成油气藏的一切必要元素(要素),如烃源体(含烃流体)、输导体系和圈闭以及这些元素之间有效的配置结构。它以油气聚集带或圈闭的形成、演化为为主线,以烃源岩(源岩)的形成、分布与演化规律为基础进行油气成藏规律的系统分析<sup>[8-9]</sup>。

由于从源岩排出的油气在储层中的运移方向多受盖层底面的形态控制,即受到分隔槽的控制<sup>[8-9]</sup>。分隔槽常表现为盖层底面或储集层顶面的最低构造等高线连线(即谷线)(图2),在古今地形变化差异不大的情况下,即油气运聚期后没有发生大的构造变动(我国东部大多数新生代复杂断陷盆地具有这一特点),就可以利用现今区域性盖层的构造底界作为底图来进行成藏体系的划分。

南堡凹陷位于渤海湾盆地,其北部与燕山相连,南部和东部与渤海相接,凹陷面积为 $1\ 932\text{ km}^2$ <sup>[10-11]</sup>。依据油气成藏体系的划分原则,把南堡凹陷划分为5个油气成藏体系(图3),各油气成藏

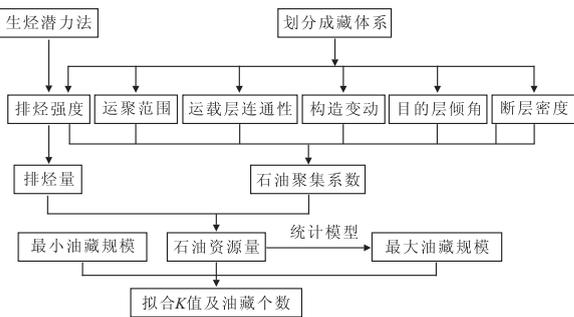


图1 石油资源潜力研究技术路线图

Fig. 1 The technology flow of studying the petroleum resource potential

收稿日期: 2011-06-21

编辑: 禹华珍

基金项目: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2011ZX05006-006); 国家重大专项“新一轮全国油气资源评价”(ZP-002)

作者简介: 范柏江(1983—),男,现正攻读地质资源与地质工程专业博士学位,主要从事含油气盆地分析工作。E-mail: fanbj9@sina.com

体系的地质特征如表 1 所示。2007 年以来,南堡滩海地区的油气勘探取得了突破,在南堡 1 号、2 号及 5 号构造部署了大量钻井,油气藏不断被发现,但南

堡 3 号、4 号构造(Ⅳ成藏体系)的钻井较少且钻井均极浅,截至 2009 年底南堡Ⅳ成藏体系仅发现约 30 个油藏,石油资源潜力仍不明确。

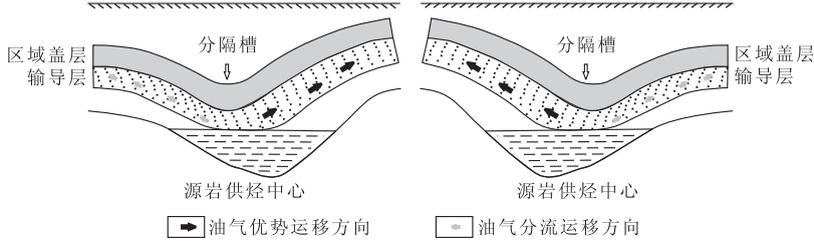


图 2 利用断陷盆地的分隔槽划分成藏体系示意图

Fig.2 The division of accumulation system by using the separation trough

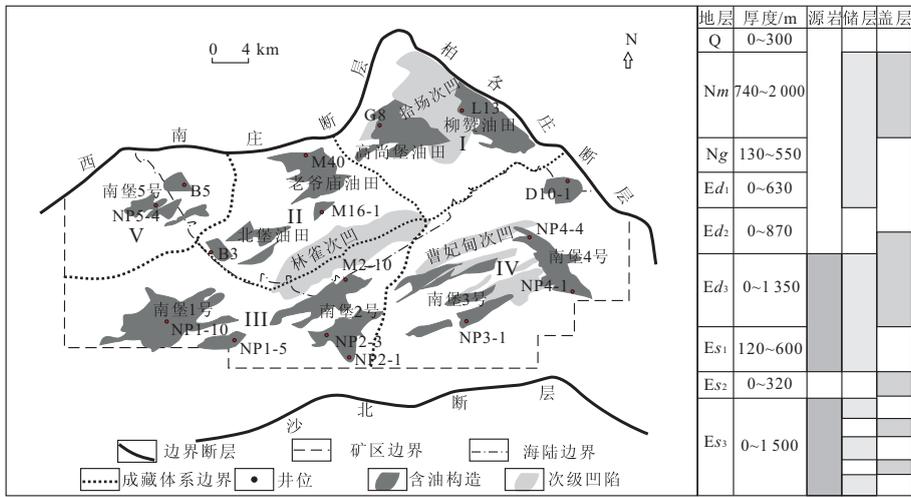


图 3 南堡凹陷油气成藏体系划分图

Fig.3 The division of accumulation system in Nanpu Sag

表 1 南堡凹陷各油气成藏体系特征

Table 1 The characteristics of accumulation systems in Nanpu Sag

成藏体系		地理环境	面积/km <sup>2</sup>	油气来源		主运移通道	有无气藏	主要含油层系	主要油气藏类型	
代号	次级构造			源岩层位	构造					主要次洼
I	高尚堡柳赞	陆地	300	高尚堡柳赞	拾场柳南	断裂砂体	无	Es <sub>3</sub> , Ed, Ng, Nm	断块、断鼻、构造—岩性	
II	老谷庙北堡	陆地	270	Ed <sub>3</sub>	老谷庙北堡	林雀新四场	断裂砂体	有	Ed, Ng, Nm	断块、断鼻、断背斜、背斜、构造—岩性
III	南堡 1 号南堡 2 号	滩海	490	Es <sub>1</sub> Es <sub>3</sub>	南堡 1 号南堡 2 号	林雀	断裂不整合	有	O, Ed, Ng, Nm	潜山、断块、断鼻、断背斜、披覆背斜
IV	南堡 3 号南堡 4 号	滩海	630		南堡 3 号南堡 4 号	曹妃甸柳南	断裂砂体	无	Es <sub>1</sub> , Ed Ng, Nm	断块、断鼻、披覆背斜、构造—岩性
V	南堡 5 号	滩海	242		南堡 5 号	五号	断裂、砂体	有	Ed, Ng	断块、断鼻、断背斜

## 2 排烃研究

### 2.1 排烃定量模型

源岩的排烃定量模型可采用生烃潜力法<sup>[12-13]</sup>。利用该方法,源岩的排烃强度  $E_{hc}$  可由下式来表达:

$$E_{hc} = \int_{z_0}^z q_e(z) \cdot H \cdot \rho(z) \cdot \omega(\text{TOC}) \cdot dz \quad (1)$$

式中:  $z$  为源岩埋深(m);  $z_0$  为源岩排烃门限(m);

$q_e(z)$  为源岩排烃率(mg/g);  $\rho(z)$  为源岩密度(g/cm<sup>3</sup>);  $\omega(\text{TOC})$  为有机碳质量分数(%);  $H$  为源岩的厚度(m)。

上述模型中,  $\omega(\text{TOC})$ 、 $\rho(z)$ 、 $H$  等参数可利用研究区的实测资料来确定,均属于已知参数。 $q_e$  为未知参数,可通过进行原始生烃潜力的恢复<sup>[12-13]</sup>来确定。恢复原理是基于有机物质在排烃过程中的不

断损耗量,具体的计算模型如下:

$$q_e(z) = HCl_o - HCl_p = \mu \cdot HCl_p - HCl_p = (\mu - 1) \cdot (S_1 + S_2) / w(\text{TOC}) \quad (2)$$

$$\mu = \frac{1 - 0.083 \times (S_1 + S_2) / [100 \cdot w(\text{TOC})]}{1 - 0.083 \times (S_1^0 + S_2^0) / [100 \cdot w(\text{TOC}^0)]} \quad (3)$$

式中: $(S_1 + S_2) / w(\text{TOC})$ 为进入排烃门限的源岩的剩余生烃潜力(mg/g); $(S_1^0 + S_2^0) / w(\text{TOC}^0)$ 为位于排烃门限深度的源岩的生烃潜力(mg/g); $\mu$ 为生烃潜力系数; $HCl_o$ 为进入排烃门限后的源岩的原始生烃潜力(mg/g); $HCl_p$ 为进入排烃门限后的源岩的剩余生烃潜力(mg/g); $S_1$ 为源岩的游离烃量(mg/g); $S_2$ 为源岩的热解烃量(mg/g)。

### 2.2 研究区排烃分析

地质条件下,源岩不可避免地存在非均质性,该非均质性不但包括源岩本身的地球化学特征例如有机质丰度、有机质类型、成熟度的非均质性,还包括

源岩临界排烃条件如自身吸附、孔隙水溶、油溶、毛细管封闭的非均质性<sup>[14]</sup>。为了消除源岩非均质性的影响,在建立生烃潜力指数剖面过程中,需要对不同深度(如每隔100 m)源岩的生烃潜力指数进行加权平均,利用该加权平均后的生烃潜力指数能合理地反映源岩排烃特征的变化(图4-A,B,C)。如图4-A,B,C所示,对大量数据点经加权处理后,得到南堡凹陷东三段、沙一段、沙三段源岩排烃门限对应的 $R_o$ 。分别为0.85%、0.90%、0.86%,本区3套源岩的排烃率随埋深变化关系如图4-D,E,F所示。

利用排烃强度计算模型,结合南堡IV号油气成藏体系源岩的空间展布特征及各项烃源岩参数,得到南堡IV号油气成藏体系的排烃强度为 $1.98 \times 10^6$  t/km<sup>2</sup>,累积排烃量为 $12.50 \times 10^8$  t。结合源岩层系的埋藏历史得到各源岩层系排烃历史的综合评价图见图5。

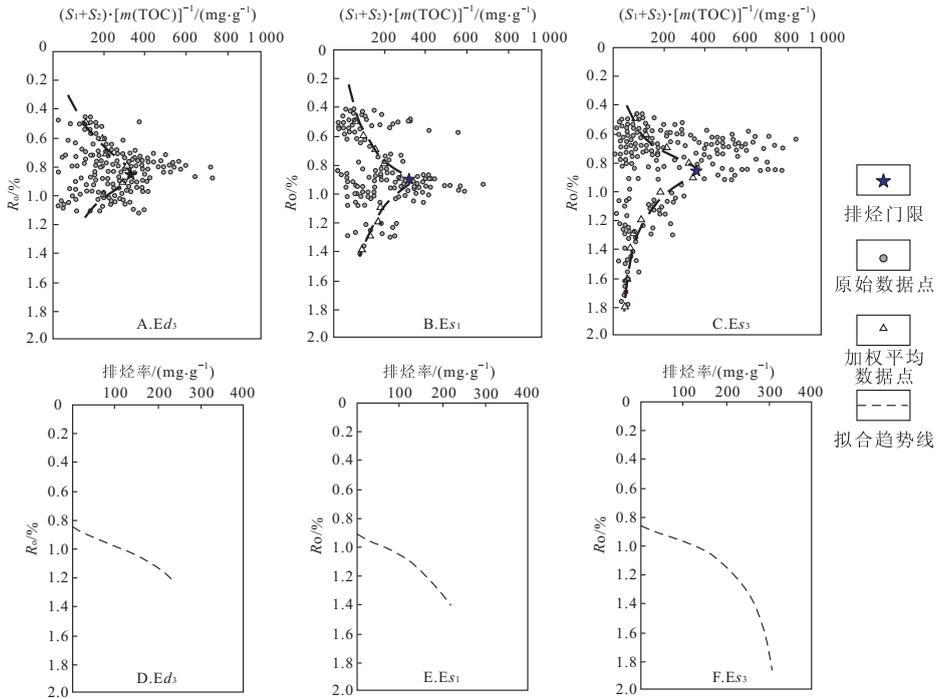


图4 南堡凹陷各源岩层剩余生烃潜力(A,B,C)、排烃率(D,E,F)对比图

Fig. 4 The remaining hydrocarbon generation potentials(A,B,C) and hydrocarbon expulsion ratios(D,E,F) of different source layers in Nanpu Sag

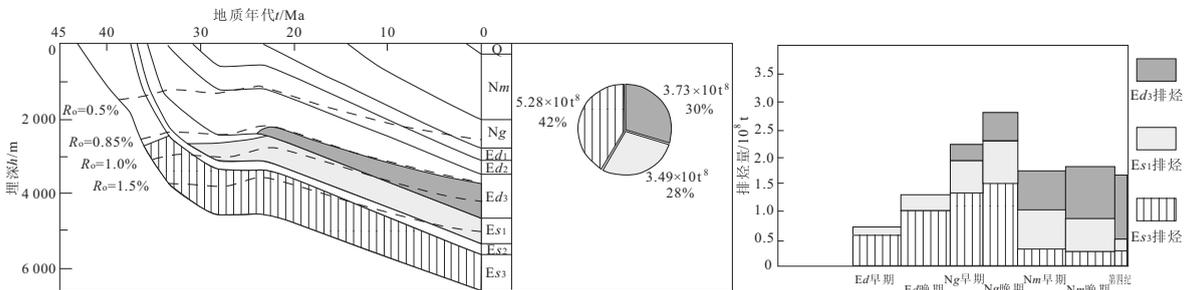


图5 南堡IV成藏体系烃源岩排烃历史综合评价图

Fig. 5 The comprehensive evaluation of hydrocarbon expulsion history in Nanpu IV accumulation system

东三段、沙一段、沙三段3套源岩的排烃门限 $R_o$ 分别为0.85%、0.90%、0.86%;3套源岩的排烃高峰分别为明化镇期、馆陶期—明化镇期、东营晚期—馆陶期;3套源岩的排烃量分别为3.73亿t、3.49亿t、5.28亿t。

### 3 石油资源潜力分析

#### 3.1 石油资源量

在基于生排烃理论求取资源量的研究中,柳广弟等<sup>[15]</sup>最早提倡把油气运聚系数的研究与主要地质因素相结合。对于同一个构造单元,其次级构造的油气运聚成藏条件具有一定的相似性。通过渤海湾盆地高勘探程度区(济阳坳陷、辽东湾坳陷、南堡陆地)近年来的研究,断陷盆地石油聚集系数  $K$  可按下表表征:

$$K_{\text{聚集}} = 1.666 2 + 0.014 89X_1 - 0.000 260 51X_2 + 0.916 86X_3 - 0.176 07X_4 - 0.015 674X_5 -$$

$$0.335 25X_6 \quad (4)$$

式中: $X_1$  为排烃强度( $10^6 \text{ t/km}^2$ ),为各成藏体系的排烃量与排烃面积的比值; $X_2$  为石油运聚范围( $\text{km}^2$ ),即各油气成藏体系的面积; $X_3$  为运载层连通性( $0\sim 1$ ),主要考虑砂层、断层、微裂隙和不整合面,其中断层尤其是油源断层对石油纵向运移的输导能力最强,不整合面次之,砂层与微裂隙最弱; $X_4$  为构造变动次数,南堡凹陷主要经历 3 次构造变动,分别在沙一段沉积末期、沙二段沉积期以及中生代; $X_5$  为目的层倾角( $^\circ$ ),依据构造等值线的距离和高差计算; $X_6$  为断层密度(条/ $\text{km}^2$ )。

表 2 南堡Ⅳ成藏体系石油聚集系数研究参数

Table 2 The parameters for studying the accumulation factor in Nanpu Ⅳ accumulation system

成藏体系	平均排烃强度/ ( $10^6 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ )	油气运聚范围/ $\text{km}^2$	运载层连 通性( $0\sim 1$ )	构造变动 次数 $N$	目的层 倾角/ $^\circ$	断层密度/ (条· $\text{km}^{-2}$ )	排烃量/ $10^8 \text{ t}$	聚集系数/ %	资源量/ $10^8 \text{ t}$
Ⅳ	1.98	630.00	0.60	3	8.75	3.40	12.50	27.64	3.45

通过对南堡Ⅳ油气成藏体系地质特征的表征(表 2),得出其石油聚集系数为 27.64%,石油地质资源量为 3.45 亿 t。

#### 3.2 最大油藏规模预测

在渤海湾断陷盆地中,能形成中型油田的油气成藏体系的资源量一般需要超过  $1.7 \times 10^8 \text{ t}$ ,形成大型油田的油气成藏体系的资源量一般需要超过  $5 \times 10^8 \text{ t}$ (图 6)。如在渤中、黄河口、歧口、辽西等油气成藏体系均能形成大型油田。对渤海湾盆地内油气成藏体系的资源量  $Q$  与最大油藏规模  $Q_{\text{max}}$  的关系进行回归,可建立二者之间的定量关系:

$$Q_{\text{max}} = \exp(1.486 071 791 \cdot \ln Q - 2.407 673 405) \quad (5)$$

将南堡Ⅳ号油气成藏体系的资源量代入上述定量模式,得到其最大油藏规模为  $5 684.37 \times 10^4 \text{ t}$ 。

#### 3.3 油藏个数预测

油藏个数预测最常见的方法是油藏规模序列法,其表达式可简化为:

$$\frac{\lg Q_{\text{max}} - \lg Q_n}{\lg 1 - \lg n} = -K \quad (6)$$

式中: $Q_n$  为序号为  $n$  的油藏规模; $K$  为实数,为双对数坐标中的斜率,即油藏规模变化率; $n$  为整数序列中的任一数值,即油藏规模序列号。

在双对数坐标纸上作图,则数据点的连线为斜率等于  $-K$  的直线。传统方法是根据已发现的油藏资料来拟合  $K$  值。但利用该方法的缺点在于已发现油藏的个数和规模对  $K$  值的影响较大。南堡Ⅳ油气成藏体系已发现的油藏个数较少(仅发现约 30 个小型油藏),因此该方法受到极大限制。针对南堡Ⅳ油气成藏体系,本次研究参考新一轮全国油气资源评价成果,以  $15 \times 10^4 \text{ t}$  规模的油藏作为滩海地区商业油藏规模下限,以最大油藏规模为初

表 3 南堡Ⅳ油气成藏体系油藏个数及  $K$  值拟合表

Table 3 The simulation results of petroleum reservoir and parameter  $K$  in Nanpu Ⅳ accumulation system

序号	$K$	$1/n$	$(1/n)^K$	最大油藏 规模/ $10^4 \text{ t}$	第 $n$ 个油藏 规模/ $10^4 \text{ t}$	油藏资源 量/ $10^4 \text{ t}$
1	1.02	1.00	1.00	5 684.37	5 684.37	5 684.37
2		0.50	0.49		2 803.06	8 487.43
3		0.33	0.33		1 853.61	10 341.04
4		0.25	0.24		1 382.23	11 723.27
5		0.20	0.19		1 100.86	12 824.13
6		0.17	0.16		914.05	13 738.18
7		0.14	0.14		781.06	14 519.23
8		0.13	0.12		681.60	15 200.84
9		0.11	0.11		604.44	15 805.28
10		0.10	0.10		542.85	16 348.13
⋮		⋮	⋮		⋮	⋮
337		0.002 9	0.002 6		15.01	34 527.48

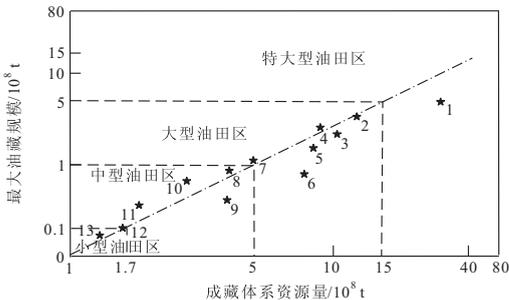


图 6 渤海湾盆地主要成藏体系资源量与最大油藏规模关系图

Fig. 6 The relationship between the resources and the largest petroleum reservoirs in a accumulation system in Bohai Bay Basin

1. 渤中; 2. 黄河口; 3. 歧口; 4. 辽西; 5. 渤东; 6. 莱州湾; 7. 南堡Ⅰ;
8. 南堡Ⅲ; 9. 秦南; 10. 南堡Ⅱ; 11. 沙南; 12. 辽东; 13. 青东。

始油藏,以任意  $K$  值来拟合, $K$  值的最终选取要使得最大序号油藏的规模接近  $15 \times 10^4$  t,同时使所有油藏的规模总量接近该油气成藏体系的资源量。研究表明,南堡Ⅳ油气成藏体系的拟合  $K$  值为 1.02,拟合油藏个数为 337 个(表 3)。整体而言,本区为中型油田发育区,油藏规模以小型及中小型油藏规模为主。

## 4 评价结果分析

南堡Ⅳ油气成藏体系现今已发现的最大油藏的规模为  $5\,011.71 \times 10^4$  t,与预测最大油藏规模( $5\,684.37 \times 10^4$  t)的误差为 11.8%,表明最大油藏已被发现。已发现的第二大油藏的规模为  $1\,768.87 \times 10^4$  t,与预测第二大油藏( $2\,803.06 \times 10^4$  t)的误差为 36.9%;与预测第三大油藏( $1\,853.61 \times 10^4$  t)的误差为 4.6%,表明已发现的第二大油藏应为地质条件下的第三大油藏,而第二大油藏尚未发现。已发现的第三大油藏的规模为  $1\,139.68 \times 10^4$  t,与预测第四大油藏( $1\,382.23 \times 10^4$  t)的误差为 21.3%;与预测第五大油藏( $1\,100.86 \times 10^4$  t)的误差为 3.41%,表明已发现的第三大油藏为地质条件下的第五大油藏。

本次研究得出南堡Ⅳ油气成藏体系油藏规模变化率  $K$  的数值为 1.02,而南堡滩海全区已发现的近 300 个油藏的拟合  $K$  值为 1.11,本方法得出的结果相对其误差为 8.1%;相对于样本统计规律而言,达到了表征油藏规模的要求。

### 参考文献:

[1] 《油气资源评价方法研究与应用》编委会. 油气资源评价方法研

究与应用[M]. 北京:石油工业出版社,1988:25-29.

- [2] 龙胜祥,王生朗,孙宜朴,等. 油气资源评价方法与实践[M]. 北京:地质出版社,2005:25-29.
- [3] 周总瑛,白森舒,何宏. 成因法与统计法油气资源评价对比分析[J]. 石油实验地质,2005,27(1):67-72.
- [4] 国土资源部油气资源战略研究中心. 新一轮全国常规油气资源评价报告[R]. 北京:国土资源部油气资源战略研究中心,2008.
- [5] 李晓光,鲁港,单俊峰. 油藏规模序列法的改进及应用[J]. 新疆石油地质,2009,30(1):106-108.
- [6] 张华义,金之钧. 油气藏规模概率统计法在资源评价中的应用[J]. 天然气工业,1997,17(1):19-23.
- [7] 廖前进,于学敏,何咏梅,等. 统计法在中一高成熟探区资源评价中的适用性研究[J]. 石油学报,2005,26(B3):102-105.
- [8] 周海燕,庞雄奇,姜振学,等. 塔里木盆地满加尔凹陷周缘成藏体系定量评价[J]. 新疆石油地质,2003,24(5):382-385.
- [9] 姜福杰,姜振学,庞雄奇,等. 东营凹陷油气成藏体系的划分与定量评价[J]. 地球科学:中国地质大学学报,2008,33(5):651-660.
- [10] 汪泽成,郑红菊,徐安娜,等. 南堡凹陷源上成藏组合油气勘探潜力[J]. 石油勘探与开发,2008,35(1):11-16.
- [11] 周海民. 断陷盆地油气成藏动力学与含油气系统表征:以渤海湾盆地南堡凹陷为例[M]. 北京:石油工业出版社,2005:10-39.
- [12] 庞雄奇,李素梅,金之钧,等. 排烃门限存在的地质地球化学证据及其应用[J]. 地球科学:中国地质大学学报,2004,29(4):384-390.
- [13] Takeda N, Sato S, Machihara T. Study of petroleum generation by compaction pyrolysis. 1: Construction of a novel pyrolysis system with compaction and expulsion of pyrolyzate from source rock[J]. Organic Geochemistry,1990,16(1/3):143-153.
- [14] McAulliffe C D. Oil and gas migration: Chemical and physical constrains[J]. AAPG Bulletin,1979,63(5):761-781.
- [15] 柳广弟,赵文智,胡素云,等. 油气运聚单元石油运聚系数的预测模型[J]. 石油勘探与开发,2003,30(5):53-55.
- [16] 国土资源部. 渤海湾盆地重点探区油气资源动态评价[R]. 北京:国土资源部,2009.

# A Study of the Petroleum Potential Appraisal Method Based on the Hydrocarbon Expulsion-Accumulation-Reservoir: An Example of the Nanpu Ⅳ Accumulation System

FAN Bo-jiang<sup>1</sup>, DONG Yue-xia<sup>2</sup>, PANG Xiong-qi<sup>1</sup>, JIANG Fu-jie<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Forming Mechanism, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Jidong Oil Company, PetroChina, Tangshan Hebei 063200, China)

**Abstract:** Each resource appraisal method has its own characteristics, thus utilizing the synthetic method based on these methods is of vital significance to the accuracy of appraisal results. Based on the geological process of hydrocarbon expulsion, accumulation, reservoir, and the mathematical regularity in the petroleum exploration, this paper established the quantitative model to study the petroleum resource potential. The concrete steps are as followed. The first step is to study the hydrocarbon expulsion intensity and the hydrocarbon expulsion quantity within the hydrocarbon accumulation system. The second step is to study the accumulation coefficient and the petroleum resources within the hydrocarbon accumulation system. The third step is to study the largest pool size, the  $K$  value and the pool sizes by using the statistic pattern. The research on the Nanpu Ⅳ accumulation system shows that, the hydrocarbon expulsion volume is  $12.50 \times 10^8$  t. The petroleum accumulation coefficient is 27.64%. The petroleum resources is  $3.45 \times 10^8$  t. The largest pool size is  $0.568 \times 10^8$  t. There are 337 pool sizes needed to be exploration. The petroleum potential of Nanpu is good.

**Key words:** accumulation system; resource assessment; method research