

文章编号: 0253-2697(2009)03-0379-07

油气资源分布的分形特征及应用

郭秋麟¹ 谢红兵^{1,2} 米石云¹ 陈宁生¹ 梁 坤¹ 胡素云¹

(1. 中国石油勘探开发研究院油气资源规划所 北京 100083; 2. 中国地质大学 北京 100083)

摘要: 根据南堡凹陷 543 个油藏、大民屯凹陷 911 个油藏、徐家围子凹陷 16 个气藏和全国 43 个大型油田储量的分布,发现不仅油气藏储量规模分布具有分形特征,储量丰度分布和储量空间分布也同样具有分形特征。据此,提出了基于随机模拟技术和傅立叶变换功率谱方法的油气资源空间分布的二维分形模型,用于描述区带油气资源的分布。利用该模型修正资源丰度、排除高风险区域、设置丰度经济界限,既可以预测不同含油气概率地区的资源量,又能够指出资源空间分布位置。在徐家围子凹陷预测出剩余天然气资源主要分布在凹陷东南部,为下步勘探指明了方向。

关键词: 油气资源; 空间分布; 资源丰度; 分形模型; 随机模拟

中图分类号: TE16

文献标识码: A

Fractal model for petroleum resource distribution and its application

GUO Qiulin¹ XIE Hongbing^{1,2} MI Shiyun¹ CHEN Ningsheng¹ LIANG Kun¹ HU Suyun¹

(1. Department of Resources Evaluation and Planning, PetroChina Exploration and Development

Research Institute, Beijing 100083, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The reserves distribution of 543 oil pools in Nanpu Sag, 911 oil pools in Damintun Sag, 16 gas pools in Xujiaweizi Sag and 43 large oilfields in China indicates that the distribution of scale, abundance and spatial of reserves have fractal characteristics. A two-dimensional fractal model for characterizing the geographic distribution of hydrocarbon accumulation was proposed on the basis of the stochastic simulation procedure and power spectrum approach. This model can be used to amend the resource abundance, truncate the high-risk areas and shift some areas in less economy limit. The model can also be used to predict the resource potential in different exploration risks and provide information of possible geographic locations of undiscovered petroleum resources. The application of the model to Xujiaweizi Sag suggests that the gas residual resources mostly locate in the southeast of the sag. The predictions provide the useful information for future gas exploration in this area.

Key words: petroleum resource; spatial distribution; resource abundance; fractal model; stochastic simulation procedure

油气资源规模评估与空间分布预测是油气资源评价的两个核心内容。其中,在规模评估方面,类比法、统计法和成因法都已发展成熟并已投入应用^[1-3]。相比之下,在油气资源空间分布预测方面的研究方法还不很成熟,能真正投入应用的方法也很少。目前,国内外主要采用油气成藏有利性分析方法定性预测区带氧气的空间分布^[4],定量预测方法较少。笔者通过研究油气资源分布的分形特征,探索出油气资源丰度的空间分布规律,并运用分形模拟技术和条件模拟技术,定量预测油气资源的空间分布。

1 分形理论在油气资源评价中的应用

1967年, Mandelbrot 首次提出了分形的概念^[5],并于 1975 年创立了分形几何学,并逐步形成了研究分

形性质及其应用的分形理论。自相似原则和迭代生成原则是分形理论的重要原则,表征了分形在通常的几何变换下具有不变性,即标度无关性。分形体中的自相似性可以是完全相同,也可以是统计意义上的相似,这里主要指统计意义上的相似。

分形理论作为一种方法论和认识论,其启示是多方面的,既可以通过认识部分来认识整体,又可以从有限中认识无限。在油气勘探开发中,分形理论主要应用于地震信号滤波、岩石破碎和地质构造的定量解释,储集层非均质性与渗透率评价,油气运聚过程的定量评价和油气资源评价等方面。

国外学者 Houghton^[6]、Poon^[7]、Barton^[8]等,根据油气田数量和储量随勘探工作量增加而增加的特点,认为油气田数量与储量规模之间存在幂函数关系,即

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA06Z116)部分成果。

作者简介: 郭秋麟,男,1963年10月生,1985年毕业于石油大学,现为中国石油勘探开发研究院首席专家、高级工程师,主要从事油气资源评价、盆地评价等研究工作。E-mail: qlguo@petrochina.com.cn

分形关系,并根据这一关系预测油气田数量及其规模。国内学者也把该理论应用于油田个数和规模的预测,并取得了一定的成效^[9-13]。

国内外油气田勘探开发的实践证明,运用分形理论预测油田的个数和规模是有依据的。在勘探初期,圈闭群中多数大的油气藏被发现;到了勘探中后期,发现的油气藏一般都是中小型的。另外,油气田储量级别(规模)越小,油气田的数量就越多^[14-15]。例如,美国 Powder River 盆地的 Minnelusa 圈闭群的油田^[6]、松辽盆地北部气田^[12]、苏北盆地金湖凹陷的油田^[13]等。

油气田累计数量与其储量规模之间的分形关系为

$$N(r) = C \cdot r^{-D} \quad (1)$$

式中: r 为油气田储量规模, 10^4t ; $N(r)$ 为储量规模在 r 以上的油气田累计数量, 个; D 为分形维数; C 为常数。在双对数坐标系下, 油气田累计数量 $N(r)$ 为纵坐标, 储量规模 r 为横坐标, 直线段为分形直线。直线段的斜率就是油气田储量规模分布的分形维数, 维数越大, 代表油气田规模序列中油气田规模由大变小的速度越快。

2 油气藏储量丰度分布与空间分布的分形特征

前人研究已证明油气田储量规模分布具有分形特征, 并将这一特征用于预测油田的个数和规模。但目前还没有人将其用于预测油田的空间分布和油气藏储量丰度分布。

2.1 油气藏储量丰度分布的分形特征

通过统计南堡凹陷 543 个油藏、大民屯凹陷 911 个油藏以及全国 43 个大型油田的储量丰度与油藏累积数量的关系, 发现油气田(藏) 储量丰度分布同样具有分形特征。

2.1.1 南堡凹陷

南堡凹陷经过近几年的快速勘探, 油气发现程度较高。截至 2007 年底, 已发现油藏 543 个, 平均探明储

量为 $127 \times 10^4\text{t}$, 平均探明储量丰度为 $100 \times 10^4\text{t}/\text{km}^2$ 。油藏累计数量与储量规模之间为线性关系, 即分形关系[图 1(a)], 分形维数为 1.2, 油藏规模经济界限为 $32 \times 10^4\text{t}$ 。油藏累计数量与储量丰度之间也为分形关系[图 1(b)], 分形维数为 2.4, 储量丰度经济界限为 $64 \times 10^4\text{t}/\text{km}^2$ 。

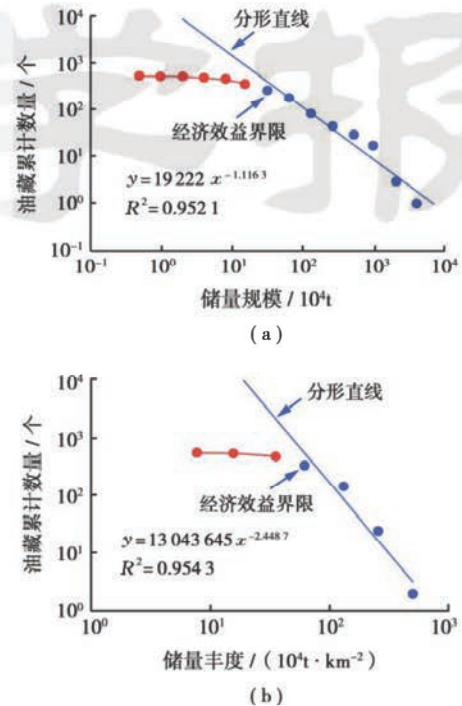


图 1 南堡凹陷油藏累计数量与储量规模、储量丰度的关系
Fig. 1 Relationship between reservoir accumulated number and reserve scale, reserve abundance in Nanpu Sag

2.1.2 大民屯凹陷

大民屯凹陷同样属于勘探程度较高的凹陷。截至 2007 年底, 已发现油藏 911 个, 平均探明储量为 $259 \times 10^4\text{t}$, 平均探明储量丰度为 $145 \times 10^4\text{t}/\text{km}^2$ 。油藏累计数量与储量规模也存在分形关系[图 2(a)], 油藏规模经济界限为 $32 \times 10^4\text{t}$; 油藏累计数量与储量丰度之间为分形关系[图 2(b)], 分形维数为 1.5, 储量丰度经济界限为 $64 \times 10^4\text{t}/\text{km}^2$ 。

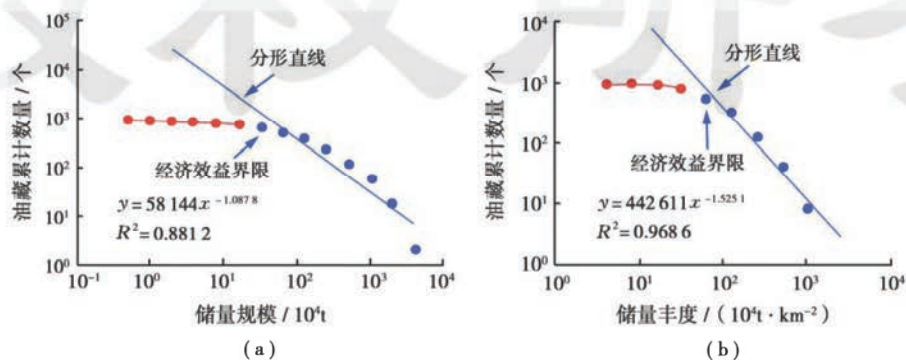


图 2 大民屯凹陷油藏累计数量与储量规模、储量丰度关系

Fig. 2 Relationship between reservoir accumulated number and reserve scale, reserve abundance in Damintun Sag

2.1.3 中国大型油田

根据 2005 年国家储量委员会公布的储量公报^[4], 中国 43 个大型油田的平均探明储量为 $39\,268 \times 10^4 \text{ t}$, 平均探明储量丰度为 $301 \times 10^4 \text{ t/km}^2$ 。43 个大型油田的储量统计结果揭示: 油田累计数量与油田储量规模之间为线性关系, 即分形关系[图 3(a)], 分形维数为 1.0, 因为没有统计小油田, 油田储量规模经济界限未

出现; 油田累计数量与油田储量丰度之间为分形关系 [图 3(b)], 分形维数为 1.3, 储量丰度经济界限为 $64 \times 10^4 \text{ t/km}^2$ 。

从以上 3 组统计数据得出: ①油气藏储量丰度分布同样具有分形特征; ②储量规模分形维数相对较小, 为 1~1.3, 储量丰度分形维数相对较大, 为 1.3~2.4; ③储量规模的经济界限约为 $32 \times 10^4 \text{ t}$, 储量丰度的经

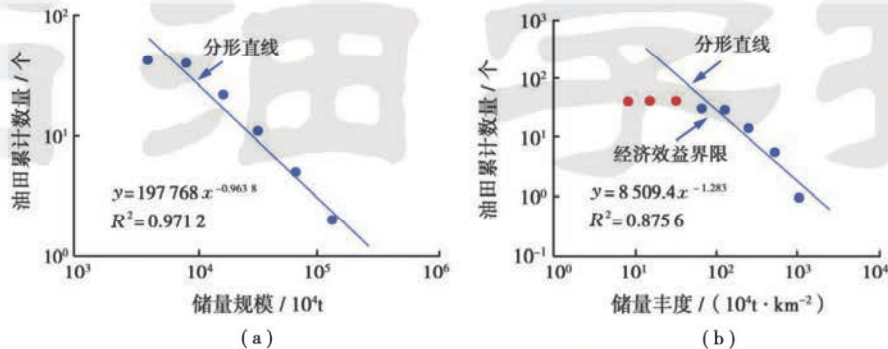


图 3 中国大型油田油藏累计数量与储量规模、储量丰度关系

Fig. 3 Relationship between reservoir accumulated number and reserve scale, reserve abundance in large oilfields of China

济界限约为 $64 \times 10^4 \text{ t/km}^2$ 。

2.2 油气藏储量空间分布的分形特征

Barton 等在 Denver 和 Powder River 盆地^[8]、Chen 等在西加拿大盆地的研究结果都证实了油气藏储量在空间上的分布同样具有分形特征^[16]。徐家围子凹陷气藏、深县凹陷古潜山油藏的空间分布特征, 也证实了这一点。

松辽盆地徐家围子凹陷气藏的分布(数据截至 2006 年)由 8 个网格密度不同的图片组成(图 4)。网格密度越大, 对应的单个矩形格子面积越小。以最

图, 发现两者之间具有幂律关系(双对数坐标中为直线), 即具有分形特征。

表 1 徐家围子凹陷不同网格密度下的网格面积和出现气藏的网格数

Table 1 Number of total cells and occupied cells in different grids in Xujiaweizi Sag

序号	总网格数/个	单个网格面积 (相对值)	出现气藏的网格数/个
a	2	128	2
b	4	64	4
c	8	32	6
d	16	16	9
e	32	8	12
f	64	4	19
g	128	2	30
h	256	1	46

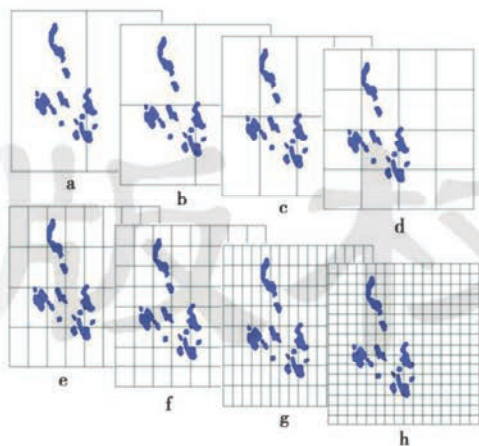


图 4 徐家围子凹陷气藏分布网格

Fig. 4 Distribution grids of gas pools in Xujiaweizi Sag

小矩形格子面积为 1 个单位计, 采用“数格子”的方法, 计算出 8 个图片中各出现气藏的格子数(表 1), 然后绘制出“格子面积”与“出现气藏的格子数”之间的关

系。通过统计国内外 16 个不同类型的盆地、凹陷和区带的分形维数, 发现储量规模分布的分形维数大多为 0.69~1.35; 储量丰度分布的分形维数大多为 1.3~2.4; 储量空间分布的分形维数大多为 0.84~1.86。从以上实例中可得出: ①储量丰度分布的分形维数与储量规模分布和储量空间分布的分形维数相近; ②在南堡凹陷的实例中, 储量丰度的分形维数 2.4 偏大, 可能是还有一些储量丰度较高的油藏未被发现。

分形维数大小与地质单元(盆地、凹陷和区带)级别无关, 即标度无关性。这意味着在不同的统计尺度下, 油气藏储量的分布具有局部模式与整体模式的相

似性,同样具有统计意义上的自相似性。因此,不同级别地质单元储量分布的分形特征是一样的,具有可比性。同一级别不同的地质单元中分形维数大小可能不一样,即分形维数大小主要受不同地区的油气地质特点控制。

储量丰度分布和储量空间分布也具有分形特征,其分形维数除南堡凹陷外均集中在0.69~1.86。根据这一特点,可以设计相关模型来模拟油气资源丰度。

3 油气资源丰度的分形模拟技术

2003年 Cheng 等^[17]根据固体矿床群聚分布的特点,用分形滤波技术建立了S-A预测模型,预测了加拿大 Nova Scotia 省西南地区金矿异常分布。2006年 Chen 等^[16]运用功率谱方法预测西加拿大盆地 Rainbow 石油区带的油气藏分布。笔者借鉴了这两种方法,并做了改进,加入了勘探风险约束和资源丰度经济下限等条件,提出基于随机模拟技术和傅立叶变换功率谱方法的油气资源分布二维分形模型。

3.1 二维分形模型

由于地质过程的复杂性,无法将油气资源空间分布以某一精确解析式的形式来描述。另外,已知油气藏本身并不包含未发现油气藏的直接信息,因此用常规地质统计学的随机模拟方法,直接从已知油气藏中提取空间统计信息,预测油气资源空间分布,其结果往往不尽人意。但是,如果把已知油气资源分布和地质变量在空间的相关特征作为随机模拟的限制条件,用统计的方法将这种相关特征以概率密度函数近似地表达出来,就可提高预测的准确性。

油气资源空间分布的二维分形模型基于随机模拟技术和傅立叶变换功率谱方法建立,即通过傅立叶变换,把具有分形特征的油气藏分布空间(空间域)转化到傅立叶空间(频率域)中,用功率谱方式来表述油气资源的空间相关特征。

根据分形理论,分形模型研究对象的空间相关特征可由功率谱函数来表达。对于具有分形特征的时间序列,其功率谱函数可表达为时间序列频率的幂函数:

$$S(f) \propto \frac{1}{f^\beta} \quad (2)$$

式中: f 为频率; S 为功率谱密度; β 为幂因子,称为频谱指数。

式(2)表述的这种随机过程相当于 Hurst 空间维数 $H = (\beta - 1)/2$ 的一维分形布朗运动(fBm)。选择不同的 β 值,即可产生不同分形维数的 fBm 。

对于二维图像或序列,其功率谱 S 有 x 和 y 两个方向的频率变量(u 和 v)及对应的频谱指数(β_x 和 β_y)。对统计特性来说, xy 平面上的所有方向都是等价的,当沿着 xy 平面上的任一方向切割功率谱 S 时,可用 $\sqrt{u^2 + v^2}$ 代替频率 f 。因此,由式(2)可推出各向同性的二维对象随机过程的表达式为:

$$S(u, v) = \frac{1}{(u^2 + v^2)^{H+1}} \quad (3)$$

对于各向异性的对象,可定义 H 为方位角 θ 的函数,则其二维分形模型的表达式可写成:

$$S(u, v) = \frac{1}{(u^2 + v^2)^{H(\theta)+1}} \quad (4)$$

$$H(\theta) = \sqrt{(\beta_x \cdot \cos\theta)^2 + (\beta_y \cdot \sin\theta)^2} \quad (5)$$

式中: β_x 和 β_y 分别代表功率谱中 x 和 y 方向的频谱指数。通过式(5)就能模拟出油气藏分布空间的新功率谱。

3.2 修正资源丰度

二维分形模型中的指数函数 $H(\theta)$ 可以通过实际数据拟合 β_x 和 β_y 后获得。功率谱在 x 和 y 方向的切片图显示:能量(资源丰度)越高的油藏,出现的频率越低,反之亦然(图5)。这一特点与油气勘探结果相吻合。因此,如果以能量较高的若干数据点为基础进行

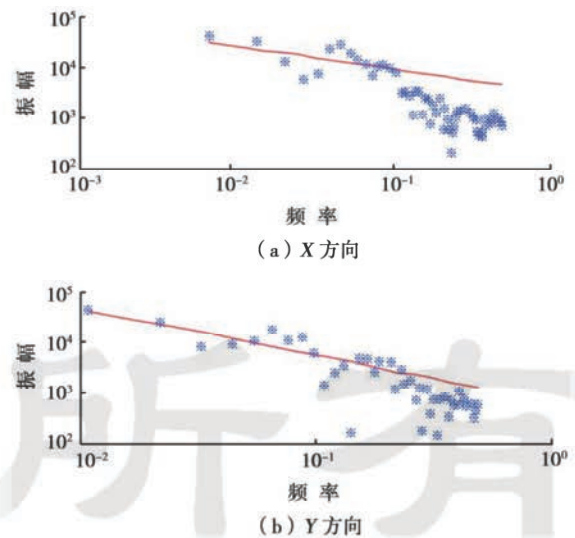


图5 功率谱切片图中振幅与频率的关系

Fig. 5 Relationship between amplitude and frequency in x and y directions of power spectrum sections

拟合,结果基本能代表该方向上油气资源的分布趋势(分形直线)。拟合的直线斜率(绝对值)即为该方向上的频谱指数。分别确定 x 方向和 y 方向上的频谱指数 β_x 和 β_y 后,代入二维分形模型中,就能模拟出新的

功率谱 S 。新功率谱已修正了原始功率谱的不足, 包含了所有油气藏资源丰度的信息。

3.3 资源丰度空间分布模拟

确定油气藏在空间的分布位置是油气勘探的首要任务。目前, 有许多方法可以预测油气勘探风险, 绘制勘探风险图^[18-19]。勘探风险图包含了油气藏可能出现的位置等方面信息。为了把这一信息和资源丰度信息综合起来, 需要做如下信息处理:

(1) 空间域转化为频率域。同样, 用傅立叶空间变换, 把勘探风险图从空间域转化到频率域。这时除了得到以上提到的功率谱外, 还能得到相位谱 Φ 。相位谱中包含着油气藏位置信息。

(2) 从频率域回到空间域。用傅立叶逆变换, 把新的资源丰度功率谱 S 和勘探风险图的相位谱 Φ 结合起来, 形成空间域中的油气资源分布图, 该图不仅提供了油气藏的位置, 也指出了资源丰度。

在具体实现中, 还需要在一些细节上做技术改进。比如, 设置经济界限, 排除丰度低的没有经济价值的油气藏; 用已钻井数据验证和修正等。

4 实例

松辽盆地徐家围子凹陷划分为西部断阶带、徐中火山岩隆起带、东部斜坡带、丰乐低隆起、宋站低隆起等多个正向构造单元。经过近年的快速勘探, 徐家围子凹陷已成为松辽盆地深层勘探程度最高、发现天然气最多的凹陷。该凹陷深层的勘探面积为 $5\,350\text{ km}^2$, 基本实现全区三维地震覆盖。截至 2007 年, 已钻探井 86 口, 其中工业气流井 35 口, 低产气流井 28 口, 探明地质储量为 $2\,663 \times 10^8\text{ m}^3$ 。已发现的气藏主要分布于北部的安达次凹、东部的徐东斜坡带、中部的兴城、丰乐隆起带和升平、汪家屯凸起、西部的徐西和肇州地区(图 6)。

4.1 油气勘探风险评价

前人研究表明, 徐家围子凹陷具有以下特点:

(1) 气源较充足, 主力生烃区内普遍含气, 气源不存在风险。2006 年李景坤等^[20]采用盆地模拟法计算出徐家围子凹陷的生气量为 $30\,50 \times 10^{12}\text{ m}^3$, 排气量为 $24.79 \times 10^{12}\text{ m}^3$, 采用 2% ~ 3% 作为徐家围子凹陷深层天然气的聚集系数, 计算出徐家围子凹陷深层可探明的天然气地质资源量为 $(4\,958 \sim 7\,437) \times 10^8\text{ m}^3$ 。

(2) 烃源岩分布控制气藏发育。气藏主要分布在烃源岩发育区, 反映出天然气以垂向运移为主。沟通气源的断裂是否存在, 是风险评价的关键。

(3) 气藏分布受火山岩控制。凹陷内火山岩储层

较发育, 纵向上多圈闭叠置, 圈闭内多为上气下水, 总体上没有统一的气水界面; 平面上气层连通性差, 受不同火山岩体控制。火山喷发中心附近, 即构造相对高部位(圈闭), 一般为高储量丰度区。因此, 确定火山岩山头的分布是风险评价的关键。

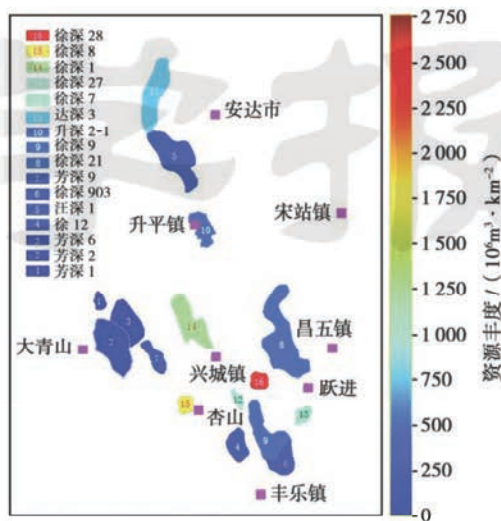


图 6 徐家围子凹陷已发现气藏分布

Fig. 6 Discovered gas pools and their abundance in Xujiawazi Sag

根据以上特点, 运用马氏距离判别法, 将烃源岩分布等信息进行集成, 然后建立含油气概率预测模板, 并预测出徐家围子凹陷的油气勘探风险^[18-19]。勘探风险用含油气概率值表示, 含油气概率值分布在 0 ~ 1 区间, 对应的勘探成功率为 0% ~ 100%, 对应的风险为 100% ~ 0%。

4.2 油气资源丰度模拟

对已发现的气藏分布(图 6)进行傅立叶空间变换, 拟合资源丰度功率谱, 得到 x 方向和 y 方向上的分形维数分别为 1.23 和 0.96。以油气勘探风险作为约束条件, 以 $2 \times 10^7\text{ m}^3/\text{km}^2$ 作为丰度值的经济界限(已发现气藏的最小丰度的 1/2), 运用二维分形模型模拟(表 2 和图 7)发现剩余天然气资源主要分布在徐家围子凹陷东南部地区(图 8)。

4.3 结果对比

用含油气概率 0.5 作为勘探风险限制值, 用 $2 \times 10^7\text{ m}^3/\text{km}^2$ 作为丰度值的经济界限, 模拟出的总资源量为 $6\,689 \times 10^8\text{ m}^3$, 在常规的资源评价方法的预测范围 $(4\,958 \sim 7\,437) \times 10^8\text{ m}^3$ 之内, 说明总资源量具有一定的可比性。

如果不考虑勘探风险或是降低成功率限制值, 则计算出的总资源量与常规的资源评价方法相比会偏大一些。比如, 如果不作限制, 则计算出的总资源量为

$9418 \times 10^8 \text{ m}^3$; 如果用含油气概率 0.4 作限制, 计算出的总资源量为 $8393 \times 10^8 \text{ m}^3$ (表 2)。

表 2 徐家围子凹陷不同含油气概率的天然气资源量
Table 2 Predicted gas resource of different probability
in Xujiaweizi Sag

含油气概率/%	预测总资源量/ 10^8 m^3	预测剩余资源量/ 10^8 m^3
100	2663.11	0.00
95	2672.22	9.11
90	2766.50	103.39
85	2938.59	275.48
80	3084.91	421.81
75	3278.99	615.88
70	3491.97	828.86
65	3677.45	1014.34
60	3981.32	1318.21
55	5442.22	2779.12
50	6688.95	4025.84
45	7786.77	5123.66
40	8393.23	5730.13
35	8761.11	6098.00
30	8986.86	6323.75
25	9116.14	6453.04
20	9327.92	6664.81
15	9380.95	6717.84
10	9403.71	6740.60
5	9418.21	6755.11
0	9418.21	6755.11

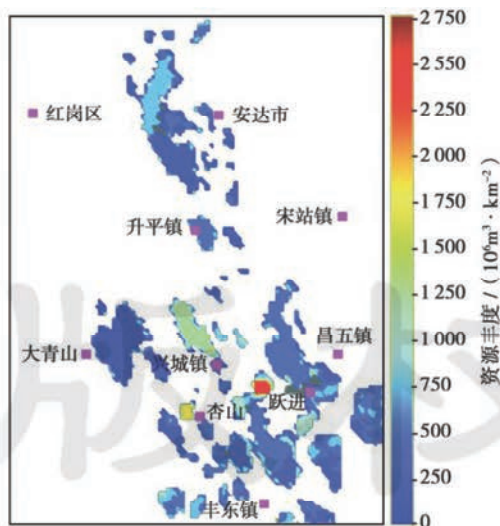


图 7 含油气概率为 0.5 时徐家围子凹陷预测资源分布
Fig. 7 Predicted gas resource in Xujiaweizi Sag when the hydrocarbon bearing probability being 0.5

该方法的优点是可以预测各区域不同含油气概率的资源量, 同时也可以指出剩余油气资源的空间分布位置, 这是传统方法所不能做到的。

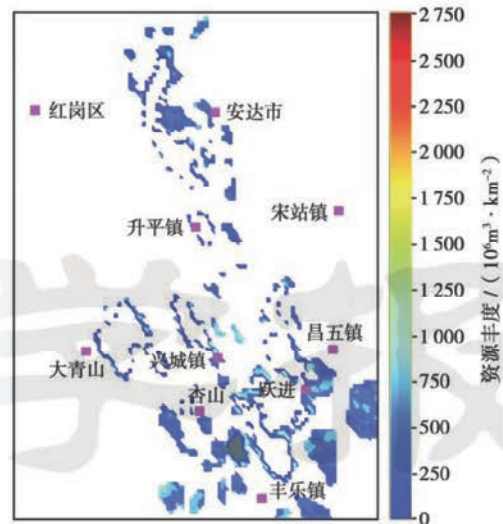


图 8 徐家围子凹陷预测剩余资源分布(含油气概率 0.5)
Fig. 8 Predicted remained gas resource in Xujiaweizi Sag when the hydrocarbon bearing probability being 0.5

5 结论

(1) 不仅储量规模分布具有分形特征, 储量丰度分布和储量空间分布同样也具有分形特征, 其分形维数集中在 0.69~1.86。根据这一特点, 可以设计相关的模型来模拟油气资源丰度, 预测油气资源量。

(2) 根据储量分布的分形特征和含油气盆地油气藏分布的群聚特性, 基于随机模拟技术和傅立叶变换功率谱方法, 设计出的二维分形模型和方法具有较好的可操作性。在徐家围子凹陷的应用证明, 该方法具有两个优点: 一是可以预测不同风险地区的资源量; 二是可以指出资源的空间分布位置, 这是传统方法不能实现的。

(3) 用含油气概率图作为勘探风险限制值, $2 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 作为丰度值的经济界限, 预测出的徐家围子凹陷深层天然气资源量为 $6689 \times 10^8 \text{ m}^3$, 未发现资源量为 $4026 \times 10^8 \text{ m}^3$, 主要分布在徐家围子凹陷东南部地区。

参考文献

- [1] 赵文智, 胡素云, 沈成喜, 等. 油气资源评价方法研究新进展[J]. 石油学报, 2005, 26(增刊): 25-29.
Zhao Wenzhi, Hu Suyun, Shen Chengxi, et al. New advancements of oil and gas resource assessment methods[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(Supplement): 25-29.
- [2] 金之钧, 张金川. 油气资源评价方法的基本原则[J]. 石油学报, 2002, 23(1): 19-23.
Jin Zhijun, Zhang Jinchuan. Fundamental principles for petroleum resources assessments[J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(1): 19-23.

- [3] 武守诚. 油气资源评价导论[M]. 第2版. 北京: 石油工业出版社, 2005: 251-289.
Wu Shoucheng. Introduction of petroleum resources assessment [M]. 2nd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005: 251-289.
- [4] 邹才能, 陶士振, 谷志东. 中国低丰度大型岩性油气田形成条件和分布规律[J]. 地质学报, 2006, 80(11): 1739-1751.
Zou Caineng, Tao Shizhen, Gu Zhidong. Formation conditions and distribution rules of large lithologic oil-gas fields with low abundance in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(11): 1739-1751.
- [5] Mandelbrot B B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension[J]. Science, 1967, 156(3775): 636-638.
- [6] Houghton J C. Use of the truncated shifted Pareto distribution in assessing size distribution of oil and gas fields[J]. Mathematical Geology, 1988, 20(8): 907-937.
- [7] Poon D C, McCormack M, Thim H F. The application of fractal geostatistics to oil and gas property evaluation and reserve estimates[J]. The Journal of Canadian Petroleum Technology, 1993, 32(10): 24-27.
- [8] Barton C C, La Pointe P R. Fractals in the earth sciences[M]. New York: Plenum Press, 1995: 13-33.
- [9] 曾怡. 分形法预测油气储量与资源量[J]. 石油实验地质, 1998, 20(2): 152-154.
Zeng Yi. A new method of petroleum resources estimation: Fractal method[J]. Experimental Petroleum Geology, 1998, 20(2): 152-154.
- [10] 郭黔杰, 康永尚, 朱强, 等. 支持石油勘探开发决策的新方法——分形几何与地质统计学[J]. 石油学报, 1998, 19(2): 36-39.
Guo Qianjie, Kang Yongshang, Zhu Qiang, et al. New method for supporting decision making in petroleum exploration and development: Fractal geometry and geostatistics[J]. Acta Petrolei Sinica, 1998, 19(2): 36-39.
- [11] 成秋明. 空间模式的广义自相似性分析与矿产资源评价[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2004, 29(6): 733-743.
Cheng Qiuming. Quantifying the generalized self-similarity of spatial patterns for mineral resource assessment[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2004, 29(6): 733-743.
- [12] 刘晓冬, 徐景祯, 杨勉. 油气资源预测统计模型及其应用[J]. 地质科学, 2004, 39(2): 245-250.
Liu Xiaodong, Xu Jingzhen, Yang Mian. Statistical models to predict oil and gas resources and their applications[J]. Chinese Journal of Geology, 2004, 39(2): 245-250.
- [13] 宋宁, 王铁冠, 刘东鹰, 等. 分形方法在苏北盆地金湖凹陷石油资源评价中的应用[J]. 地质科学, 2006, 41(4): 578-585.
Song Ning, Wang Tieguan, Liu Dongying, et al. Application of fractal method predicating oil resources in the Jinhu Sag, North Jiangsu Basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2006, 41(4): 578-585.
- [14] Divi R S. Probabilistic methods in petroleum resource assessment, with some examples using data from the Arabian region [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2004, 42(2/4): 95-106.
- [15] Laherrere J. Distribution of field sizes in a petroleum system: Parabolic fractal, lognormal or stretched exponential? [J]. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17(4): 539-546.
- [16] Chen Z H, Osadetz K G. Undiscovered petroleum accumulation mapping using model based stochastic simulation[J]. Mathematical Geology, 2006, 38(1): 1-16.
- [17] Cheng Q M. Fractal and multifractal modeling of hydrothermal mineral deposit spectrum: Application to gold deposits in the Abitibi area, Ontario, Canada[J]. Journal of China University of Geosciences, 2003, 14(3): 199-206.
- [18] 胡素云, 郭秋麟, 湛卓恒, 等. 油气空间分布预测方法[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(1): 113-117.
Hu Suyun, Guo Qiulin, Zhan Zhuoheng, et al. A method of predicting petroleum resource spatial distribution and its application [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(1): 113-117.
- [19] Guo Qiulin, Wu Na, Kong Fanzhi, et al. Oil and gas exploration risk evaluation and screening of favorable areas for future exploration in Shenxian Sag, Bohai Bay Basin, China[C]. Proceedings of IAMG'07, Beijing, 2007. Wuhan: China University of Geosciences Printing House, 2007: 624-628.
- [20] 李景坤, 冯子辉, 刘伟, 等. 松辽盆地徐家围子断陷深层天然气成藏期研究[J]. 石油学报, 2006, 27(增刊): 42-46.
Li Jingkun, Feng Zihui, Liu Wei, et al. Research on reservoir-forming time of deep natural gas in Xujiawazi faulted depression in Songliao Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(supplement): 42-46.