

doi: 10.11720/wtyht.2018.1.11

谈迎, 杨伟松, 李振生. 陆相页岩气资源评价中人工智能算法的探索——以苏北盆地溱潼凹陷为例[J]. 物探与化探, 2018, 42(1): 96-103. http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.1.11

Tan Y, Yang W S, Li Z S. The tentative application of artificial intelligence algorithm to evaluating continental shale gas resources: A case study of Qintong sag in Subei (North Jiangsu) Basin [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(1): 96-103. http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.1.11

## 陆相页岩气资源评价中人工智能算法的探索 ——以苏北盆地溱潼凹陷为例

谈迎<sup>1</sup>, 杨伟松<sup>2</sup>, 李振生<sup>3</sup>

(1. 江苏省有色金属华东地质勘查局, 江苏 南京 210000; 2. 江西科技师范大学通讯与电子学科, 江西 南昌 330013; 3. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 将下扬子区苏北盆地溱潼凹陷作为示范区, 探讨了人工智能该如何进行页岩气资源评价的问题。给出了可采用的运算方法的组合设计, 针对工区陆相页岩气资源评价参数进行了全过程的示范操作: 用变形结构分区的方法在平面上将溱潼凹陷分成 14 个样品区, 用模糊数学的方法对定性参数进行定量、半定量取值打分, 用因子分析方法对平面上 14 个样品区进行了单层评价; 以平面上 14 个样品区单层评价为基础, 给出了 14 个样品区 5 个页岩气目的层在垂向上的叠合评价。为了解决叠合评价时样品区各单层数据的等价性, 引入全零值和分级值进行评价、排优。这种针对页岩气资源评价的定性、定量和多层混合问题进行定量综合评价的组合运算方法, 可以被开发页岩气资源人工智能评价系统所借鉴。

**关键词:** 陆相页岩气; 溱潼凹陷; 模糊综合预测; 人工智能; 算法设计

**中图分类号:** P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2018)01-0096-08

### 0 引言

人类正在逐步进入人工智能时代, AlphaGo 及其升级版战胜人类围棋顶级高手的对局结果, 激发人们将人工智能尽快运用于更广泛科技领域的研究探索<sup>[1]</sup>。油气资源的评价从 20 世纪 80 年代计算机普及开始一直尝试着向人工智能的方向发展, 其探索的首要问题是如何选择设计科学、高效、恰当的预测评价运算方法<sup>[2-4]</sup>。页岩气是一种非常规的油气资源, 其资源成藏有着不同与常规油气的富集规律<sup>[5-9]</sup>, 资源评价的人工智能预测方法和参数设计必然有独特之处, 且要与页岩气的成藏规律相符合。

2005 年, 中国石油天然气股份有限公司开发出油气资源评价系统(PASYS)的软件, 作为第三次中石油油气资源评价的基础<sup>[10]</sup>。邱振等<sup>[11]</sup>分析了国内外代表性的非常规油气资源评价方法, 比较了 5

种主要类型方法——EUR 类比法、资源丰度类比法、体积法、随机模拟法和成因法的适用范围和优缺点, 指出了我国非常规资源评价发展的 4 种趋势; 郭秋麟等<sup>[12]</sup>在梳理国外常规与非常规油气资源评价方法现状的基础上指出: 多方法、多学科和多领域的知识综合是评价方法的发展方向, 油气资源空间分布定量预测与计算机可视化技术相结合是评价技术的发展方向, 并研发了包含 5 项技术(小面元法为核心的非常规油气资源评价技术、三维三相达西流模拟技术、基于刻度区解剖的类比评价技术、经济评价与环境评价技术和基于 WEB-GIS 的数据库管理)的常规与非常规油气资源评价系统。上述工作都属于地质专家系统, 可被称为油气资源人工智能评价的萌芽和基础。

2014 年, 国土资源部发布了《页岩气资源/储量计算与评价技术规范》(以下简称《规范》), 以此为制约, 借鉴 AlphaGo 系统的设计思想, 本文重点探索

收稿日期: 2017-10-20; 修回日期: 2017-11-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372194)

作者简介: 谈迎(1968-), 男, 博士, 副研究员, 从事油气地质、构造地质、地球化学方面的研究工作。Email: tanying9@ustc.edu

了页岩气资源人工智能评价中预测评价运算方法的组合设计方案。

### 1 AlphaGo 系统简介

AlphaGo 系统由 4 部分组成<sup>[1]</sup>:走棋网络(Policy Network)、快速走子(Fast rollout)、估值网络(Value Network)、蒙特卡罗树搜索(Monte Carlo Tree Search, MCTS),其中走棋网络采用的策略是对棋盘上所有可能的下一步给出一个分数。为了得到

分数,运用合理、高效的预测评价运算方法是关键。事实上,对给定研究区进行页岩气资源评价预测,和走棋网络需要解决的问题有相似之处。谈迎等<sup>[1]</sup>用变形结构分区的方法把研究区分割成棋盘网格状,每一格区块作为一个样品,针对页岩气资源相关的参数进行模糊数学法取分值,然后用因子分析法进行综合因子排队评价(图 1)。

本文把苏北盆地溱潼凹陷作为下扬子陆相页岩气资源评价的一个次一级的评价示范区,设计、操作了一个完整的人工智能评价运算过程。

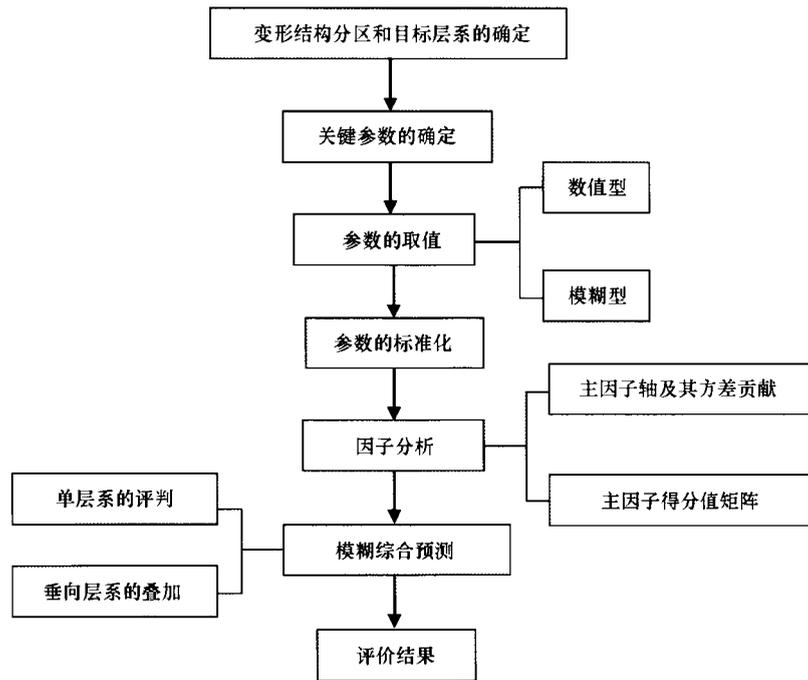


图 1 页岩气资源评价算法设计流程

### 2 溱潼凹陷陆相页岩气资源的人工智能模拟评价

苏北盆地溱潼凹陷位于下扬子区的东部,是下扬子区最先钻遇工业油气流的地方,1965 年苏 20 井首次突破出油关,也是下扬子区陆相页岩气资源存在较大潜力的区域。

关于油气资源模糊综合评价的方法,笔者曾在 1992 年苏北盆地溱潼凹陷常规油气资源评价时使用过<sup>[1]</sup>,评价结果经过后来实践验证比较符合实际,说明这种方法具有科学性和实效性。将这种方法改进应用于页岩气资源评价,可以让我们系统地考察、比较页岩气成藏和常规油气成藏规律的差异,为页岩气资源评价的人工智能化做些探索。

人工智能评价初步设计目标定为:对研究区内

页岩气资源的潜力、分布、富集规律作出评价、预测,为研究区页岩气勘探部署作预研究。设计总体技术路线是:先粗后细,明确研究尺度;从盆地尺度的资料分析开始到分区带进行评价;根据页岩气成藏的自身特点,增加大比例尺的实物工作量,逐步细化,达到甜点尺度的优选。

需要运用的算法及操作流程主要包括:变形结构分区、评价参数提炼、模糊综合取值、全零值和分级值的设定、单层评价、多层叠合评价(图 1)。

#### 2.1 变形结构分区

变形结构分区工作的目的是为了将整个研究区分化为棋盘网格状的样品区,划分的方案可以依据资料状况和研究程度的高低有各种选择,过去多采用构造分区的方案。笔者依靠研究区深部的构造变形和地质结构的差异设计划分方案——变形结构分区<sup>[13-14]</sup>。变形结构分区以变形结构理论为依

据<sup>[13]</sup>,揭示与页岩气相关的复杂构造盆地沉积埋藏史、构造演化史和热演化史。盆地尺度变形结构分区的客观依据有三个来源:地球物理综合剖面和高精度地震剖面、钻孔数据和盆地周边造山带露头的实测数据(包括地质构造和地球化学研究的结果)<sup>[14]</sup>。

通过变形结构的研究可知,溱潼凹陷变形结构格局是由NNW的箕状断陷及其伴生的断隆与NEE向断裂带、EW向断裂带组成;由一组NEE向同生

断裂构成箕状断陷断阶带,界线明确;斜坡带与深凹带并没有严格的界线,由两组破裂结构面交切形成网格状(图2)。溱潼凹陷存在4条NEE向构造带,作为II级构造单元,经5条EW向断裂分隔,可以在研究区范围内划分出14个III级含油气构造单元(图2、表1)。在变形结构分区的基础上,把每个区带作为一个样品,可以针对提炼出的页岩气评价参数进行模糊数学取值<sup>[12]</sup>。

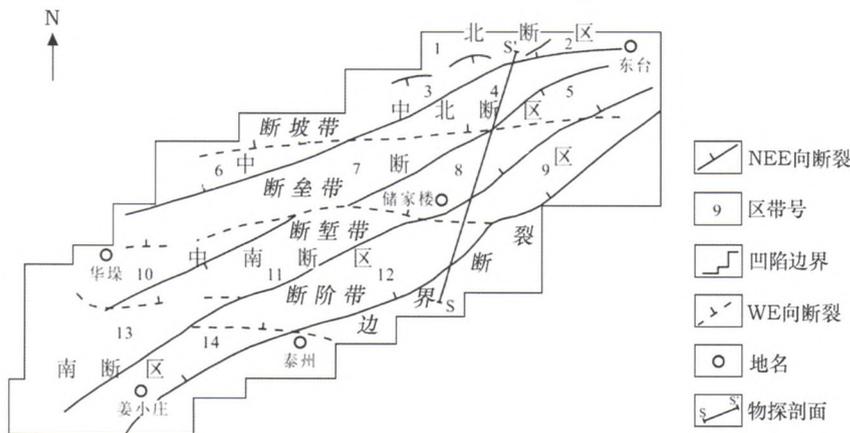


图2 溱潼凹陷变形结构分区平面示意

表1 溱潼凹陷变形结构分区和评价样品区

位置	断坡带	断垒带	断阶带	断阶带
北断区	唐刘断坡1	练家断垒2		
中北断区	茅山断坡3	沐庄断垒4	溪南断阶5	
中断区	吴堡断坡6	边城断垒7	储家断阶8	草舍断阶9
中南断区		华垛断垒10	港南断阶11	洲城断阶12
南断区			郭村断阶13	姜庄断阶14

## 2.2 页岩气资源评价参数的模糊数学取值

对页岩气资源评价参数的选择,借鉴了2014年国土资源部发布的《页岩气资源/储量计算与评价技术规范》。《规范》指出:页岩气储量综合评价是对储量规模、储量丰度、产能、埋藏深度、物性、有机碳含量、热演化程度、脆性矿物含量等储量品值的分类和评价。由于研究区内虽然常规油气勘探程度很高,但页岩气勘探程度当前只能定为“未发现原地可采页岩气资源量”级别,因此,将评价参数名称中的“储量”用“资源量”替换,表示勘探程度级别较低。

选定的评价参数根据取值类型分为数值型和模糊型,根据参数内涵分为生气参数和采气参数两大类<sup>[15]</sup>:生气参数包括资源规模、资源丰度、有机碳含量(TOC)、热演化程度,采气参数包括埋藏深度、脆性矿物含量、物性。

### 2.2.1 数值型取值

数值型参数指具有实测数值型数据的参数,例如资源规模、资源丰度、有机碳含量(TOC)、埋藏深度、脆性矿物含量、物性等参数,这类参数本身就是量化的,只需要用科学的方法在各样品区获得平均值,然后进行面积加权。取值方法是绘出研究区等值线图,然后用面积法加权取各样品区内的平均值。

数值型取值以有机碳含量(TOC)为例。第一步,根据溱潼凹陷148口井中暗色泥页岩段的实测TOC数据绘出溱潼凹陷有机碳含量(TOC)等值线图;第二步,按照公式(1),对各样品区做平均值面积加权:

$$TOC_i(\%) = R_1 \times \text{烃源岩厚度}_i \times S_i, \quad (1)$$

式中: $i$ 为样品区编号, $R_1$ 为样品区内的TOC平均值, $S_i$ 为样品区面积。

所有数值型参数取值用类似的方法,其中资源

规模用样品区的生气量表示,取值公式为:

$$\text{资源规模}_i = R_2 \times \text{烃源岩厚度}_i \times S_i, \quad (2)$$

式中: $R_2$ 为样品区经验常数,单位体积生气油当量( $10^4 \text{ t/km}^3$ )。

### 2.2.2 模糊型取值

模糊型参数指只能定性分类而没有实测数值的评价参数,比较典型的如热演化程度、含气物性中的沉积相<sup>[16-17]</sup>、成岩相等。这类参数的取值需要根据定性参数各自的特点,设计模糊取值的方案。

#### 1) 热演化程度取值

研究区内源岩成熟度划分为4个阶段:A——高成熟阶段,埋深 $>4200 \text{ m}$ , $R_0 > 1.2\%$ ;B——成熟阶段,埋深 $<4000 \text{ m}$ , $R_0 = 0.8\% \sim 1.2\%$ ;C——低成熟阶段,埋深 $<2760 \text{ m}$ , $R_0 = 0.5\% \sim 0.8\%$ ;D——未成熟阶段,埋深 $<2000 \text{ m}$ , $R_0 < 0.5\%$ 。由于各层段源岩有机质类型不同,使得成熟阶段的埋深有差别。相应成熟度分区以各深度区带在平面的展布作为依据,在各样品区内分别求出属于A类、B类、C类、D类成熟度的面积,然后以权值( $A=1, B=0.75, C=0.5, D=0$ )加权平均得该样品区的平均成熟度,再除以样品区面积得成熟度评分,公式为:

$$\text{成熟度} = \frac{S_A A + S_B B + S_C C + S_D D}{S_{\text{样品区}}} \times 100\%, \quad (3)$$

表2 溱潼凹陷成岩相评分结果

成岩相(权值)	样品区号													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
压实相(0.25)	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	16	0
胶结相(0.25)	0	0	0	0	0	0	0	18	8	1	0	0	12	0
溶蚀相(0.75)	0	0	0	57	70	0	66	72	0	13	33	10	0	0
填相(0.25)	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	72	22	0	0
有效面积/ $\text{km}^2$	0	0	0	57	70.0	0	66	90	26	14	105	32	38	0
总评分	0	0	0	0.75	0.75	0	0.75	0.65	0.25	0.72	0.41	0.42	0.25	0

### 2.3 全零值和分级值设置

全零值:指各参数取值都为零的值(表3中15号样品,各参数的初始取值都为零,经过矩阵转置运算后在各因子轴上的分值可以用来分析各因子轴的地质意义)。

分级值:指介入各单层中的、共同的设定具有特殊地质意义的值(表3中16、17号样品,是分级值经过矩阵转置运算后在各因子轴上的得分值)。分级值可以根据研究区的情况设定“好”“中”“差”的分界值(表3的样品区16、17),然后将分级值在评价集 $B = \{b_{ij}\}$ 中的评价值作为评定分界值。

全零值和分级值的提出起初是为了解决垂向目的层叠合评价时样品区值等价性的问题。引入全零值和分级值之后,发现在单层模糊综合评价中也能

发挥极好的作用,可以使评价更简便,使评价结果的油气地质意义更加清晰,评价结果也更可靠。

### 2.4 单层评价

在进行页岩气资源评价预测中,要解决两个方面的问题:在平面上要对每个勘探目标层作出合理的预测评价,我们把它叫作单层的模糊评价预测;在单层评价结果的基础上再进行垂向上多层的叠合。

溱潼凹陷内地球化学甄别出7套暗色泥岩<sup>[19-22]</sup>,自上而下分别为三垛组一段、戴南组一段、阜宁组四、三、二、一段和泰州组二段(图3),累计厚度 $1500 \text{ m}$ 。目前,已发现其中的4套对常规油气成藏有贡献;3套属坳陷广湖灰泥岩,分布广、质量稳定,岩电特征突出;1套属断陷湖的纯泥岩。

对于7个上下叠置的潜在烃源岩层,首先进行

式中: $S_{\text{样品区}}$ 为样品区面积, $S_A$ 、 $S_B$ 、 $S_C$ 、 $S_D$ 分别为样品区内A类、B类、C类、D类的成熟度面积, $A=1, B=0.75, C=0.5, D=0$ 。

2) 烃源岩储气物性  
为了反映目标层储气物性的优劣,可以取如下5个参数。

I. 孔隙度(%):取每个样品区的平均孔隙度,编制孔隙度等值线求算术平均。

II. 渗透率( $10^{-2} \mu\text{m}^2$ ):取每个样品区的平均渗透率值,编制渗透率等值线求算术平均值。

III. 储气层厚度(m):各层烃源岩的累计厚度。

IV. 沉积相分区面积( $\text{km}^2$ ):量取样品区内储层中各沉积相带的面积,然后用求和公式

$$D = \sum_i \frac{S_i}{S_{\text{样品区}}} D_i \quad (4)$$

求出沉积相的评分。式中: $S_i$ 为样品区内*i*类沉积相面积, $S_{\text{样品区}}$ 为样品区面积; $D_i$ 为*i*类沉积相评分。

V. 成岩相分区面积:量取样品区烃源岩中充填、胶结、压实、溶蚀4种成岩相面积<sup>[18]</sup>,然后用与式(4)相同的求和公式求取面积加权的平均值。根据已有的储气资料分析,溶蚀相最有利于储层的储气性,其他3种相储气性基本相似,因此取溶蚀相权值0.75,其它成岩相权值0.25(表2)。

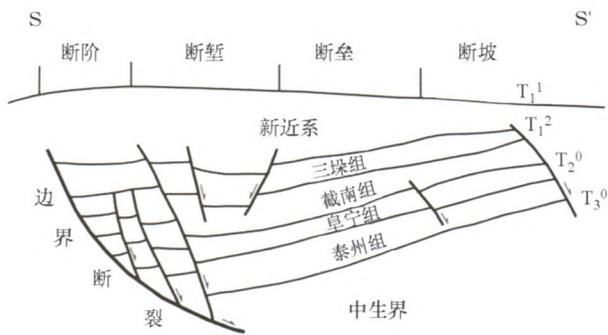


图3 溱潼凹陷 S-S' 剖面变形结构剖面示意

单层的模糊评价预测。进行单层的模糊评价预测时,把模糊取值法获得的样本总体,使用 R 型因子分析方法可以获得较客观的评价预测结果。

R 型因子分析方法将原始数据矩阵经过正交旋转得到方差贡献最大的主因子矩阵(表 3),减少了综合评价时参数的数目。参数之间相关性不好的样本总体要取 4、5 个主因子才能使累积方差贡献达 70%~80%。为了最大程度地反映样本总体的信息量,我们在评价中取了 6 个因子使累积方差达 90%左右,这样能反映样本总体 90%的信息量,以 6 个主

因子作为主成份进行模糊综合评价的运算。

苏北盆地溱潼凹陷阜宁组二段以灰黑色、黑色泥岩为主,中下部夹薄层泥灰岩、鲕灰岩、生物碎屑灰岩和油页岩,平均泥岩厚度 131.87 m,暗色泥岩主要分布在凹陷深凹带,是苏北盆地陆相烃源岩中有希望最先取得页岩气突破的优质烃源岩。对其进行分区评价的具体步骤为:

1) 评价对象因素集的确定:取正交因子解中方差贡献最大的 6 个主因子作为主成份,组成评价对象的因素集  $F, F = \{F_1, F_2, \dots, F_6\}$  (表 3)。对应的方差贡献值组成向量  $A: A = \{a_1, a_2, \dots, a_6\}$ 。

2) 建立评价集  $B: B = \{“页岩气富集条件好的隶属度值”\}$ 。

3) 建立各因素评价结果的模糊集合:首先,根据主成份的参数值(即表 3 的值,其中样品 15、16、17 分别是全零值、全中值、全优值),将 17 个样品进行倒序排队,形成评分矩阵  $D = \{d_{ij}\}$ ,然后将评分矩阵  $D = \{d_{ij}\}$  转化为模糊矩阵  $R = \{r_{ij}\}$ 。

4) 评价结果:将主成份的方差贡献作为权值,加权求和转换为综合评价集  $B$  (表 4),相当于作矩阵乘法  $B = B \times A$ 。

表 3 溱潼凹陷阜二段评价时主因子得分矩阵

样品区号	主因子					
	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	$F_6$
1	-1.21	-0.09	-0.12	-0.49	-0.80	-0.58
2	-1.25	-0.13	-0.25	-0.20	0.11	-0.25
3	-1.09	0.12	-0.11	-0.80	0.72	-1.01
4	0.81	0.01	1.49	-0.25	0.33	0.93
5	0.88	0.47	0.52	0.01	-0.35	1.39
6	-1.16	-0.42	0.91	0.17	1.11	0.07
7	0.62	-0.08	1.26	-1.15	0.69	0.02
8	1.31	0.82	0.31	-1.99	-0.87	-1.78
9	0.66	1.42	-2.53	-0.73	1.62	1.49
10	0.24	-0.80	1.27	0.63	0.48	1.09
11	0.48	-0.03	-0.40	-0.04	-2.06	0.68
12	0.61	2.18	0.42	2.69	0.44	-1.41
13	-0.61	0.33	0.08	0.32	-1.71	0.74
14	-1.00	0.26	-0.72	0.10	-1.22	-0.47
15(全零值)	-1.36	-0.32	-0.42	0.21	-0.57	0.34
16(全中值)	0.57	-1.66	-0.97	1.08	0.25	0.10
17(全优值)	1.50	-2.11	-0.98	0.45	0.20	-1.36

表 4 溱潼凹陷阜二段评价时综合评价集 B

样品区号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
综合评价值 B	0.27	0.20	0.35	0.71	0.76	0.33	0.60	0.73	0.67	0.99	0.46	0.66	0.46	0.51	0.17	0.48	0.68

5) 以综合评价集中介入的分级样品 15、16、17 的值将所有样品区划为 3 类,得到最终评价结果(表 5),其中  $b_{17} = 0.68, b_{16} = 0.48, b_{15} = 0.17$ 。以样品 15、16、17 的值为划分值的原因,详见下面全零值和分级值设定的讨论。

表 5 溱潼凹陷阜二段评价结果

样品区分区	样品区号
I 类区	4、5、8、10
II 类区	7、9
III 类区	1、2、3、6、11、13、14

由表 5 可以看到:阜二段目的层, I 类区 4、5、8、10 区,可以作为下一阶段勘探首选区和重点区,其评价值大于 0.68,反映出综合页岩气富集条件良好,其中 8 区中有已形成工业规模的常规油气田,10 区、5 区、4 区也有钻探揭示的良好的油气显示,可优先加大勘探投入; II 类区的评价值小于 0.68,大于 0.48,可作为勘探的预备区; III 类区的评价值小于 0.48,建议暂时不要进行勘探投入。

## 2.5 多层叠合评价

完成各单层的评价后,在评价集合进行垂向叠合时,必须要解决各层评价值的等价性问题。我们根据常规油气区带评价中的经验,在页岩气区带预测评价中使用了全零值和分级值介入法。

苏北盆地烃源岩的研究已有 60 多年的积累,成果丰富。整个研究区新生界为陆相河湖碎屑岩沉积主,厚达 5 800 m,层序完整。溱潼凹陷底为中生代末仪征运动不整合面( $T_3^0$ ),顶为古近纪末三垛运动

不整合面( $T_1^0$ ),中部有古新世末吴堡运动不整合面( $T_2^0$ )。以这 3 个不整合面为界(图 3),油气组合中地化甄别有 7 套暗色泥岩,累积厚超过 2 200 m,可以分成拗陷广湖油气组合(泰州组、阜宁组),断陷湖油气组合(戴南组、三垛组)。

根据地温梯度值和时间温度指数 TTI 的研究,苏北盆地的烃源岩需要埋深 > 2 760 m、镜质体反射率  $R_o > 1\%$  以上才有可能进入“生气门限”,因此此次页岩气资源评价主要将上下叠置的 5 个勘探目的层阜四段、阜三段、阜二段、阜一段和泰二段列为页岩气潜力层进行单层资源评价,然后垂向叠合。

表 6 中, B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、B<sub>3</sub>、B<sub>4</sub>、B<sub>5</sub> 是每个评价层单层的评价结果,这 5 个评价层的每个同号样品在空间位置上上下叠置的。实际上,同样是“I 类区”, B<sub>1</sub> 中的“I 类区”可能比 B<sub>2</sub> 中的“I 类区”更有价值,甚至 B<sub>1</sub> 中的“II 类区”就能好于 B<sub>2</sub> 中的“I 类区”,即各单层的评价集 B 中的相同的值是不等价的。

表 6 溱潼凹陷页岩气目的层评价结果

目的层	样品区号																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
阜宁组四段 B <sub>1</sub>	0.30	0.33	0.41	0.46	0.67	0.36	0.46	0.70	0.79	0.43	0.49	0.66	0.41	0.26	0.33	0.32	0.67
阜宁组三段 B <sub>2</sub>	0.27	0.26	0.35	0.71	0.76	0.33	0.60	0.73	0.67	0.99	0.46	0.66	0.46	0.37	0.17	0.48	0.68
阜宁组二段 B <sub>3</sub>	0.31	0.21	0.32	0.73	0.59	0.23	0.57	0.74	0.69	0.49	0.58	0.61	0.40	0.41	0.16	0.64	0.71
阜宁组一段 B <sub>4</sub>	0.40	0.48	0.44	0.48	0.47	0.44	0.52	0.63	0.46	0.56	0.56	0.36	0.35	0.46	0.11	0.49	0.66
泰州组二段 B <sub>5</sub>	0.46	0.63	0.46	0.61	0.45	0.36	0.36	0.50	0.67	0.37	0.46	0.56	0.36	0.35	0.25	0.66	0.72
$\Sigma B_i$	1.74	1.91	1.88	2.99	2.94	1.72	2.51	3.30	3.28	2.50	2.55	2.85	1.98	1.85	1.02	2.79	3.44
$B_{总}$	0.35	0.38	0.37	0.59	0.59	0.34	0.50	0.66	0.66	0.47	0.51	0.57	0.40	0.37	0.20	0.56	0.69

为了解决这个问题,引进了全零值和分级值的样品区。使用时,将全零值和分级值参加各层系的 R 型因子分析和模糊综合评价。在各评价集中都有全零值的评价值(如表 3 样品区 15 的值)和分级值

的评价值(如表 3 中样品区 16、17 的值)。再用分级值的评价值对各评价集 B 加权即可得到同一标准等价的评价集 B,即将表 5 中的 B 除以各行中的样品 17 的值就可得到表 7。

表 7 溱潼凹陷多层评价时综合评价集 B

综合评价值 B	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
阜宁组四段	0.54	0.50	0.62	0.69	1	0.53	0.70	1.06	1.18	0.65	0.73	0.99	0.61	0.39	0.49	0.79	1
阜宁组三段	0.39	0.29	0.50	1.04	1.11	0.48	0.87	1.06	0.97	1.25	0.67	0.96	0.07	0.54	0.25	0.70	1
阜宁组二段	0.43	0.34	0.45	1.03	0.83	0.33	0.81	1.04	0.97	0.69	0.81	0.86	0.57	0.58	0.22	0.89	1
阜宁组一段	0.61	0.73	0.68	0.74	0.71	0.61	0.68	0.80	0.96	0.70	0.84	0.86	0.53	0.70	0.17	0.74	1
泰州组二段	0.64	0.87	0.64	0.84	0.62	0.50	0.50	0.67	0.92	0.51	0.64	0.78	0.50	0.49	0.84	0.92	1
$\Sigma B$	2.61	2.73	2.89	4.34	4.27	2.51	3.56	4.65	5.0	3.76	3.69	4.85	2.88	2.70	1.47	4.09	5
$B_1$	0.52	0.55	0.58	0.89	0.85	0.50	0.71	0.93	1	0.79	0.74	0.89	0.58	0.54	2.94	0.81	1

从表 7 中可以看到:5 个目的层的模糊综合预测结果,9 号样品区是最佳勘探区,其总评价值( $B_i$ )为 1,在其阜四段评价值为 1.18,已经证实有工业油气流,其阜三段(0.97)、阜二段(0.97)、阜一段(0.96)和泰二段(0.92)单层都有良好的评价结果,评价值大于 0.90。因此在页岩气勘探阶段应该增加设计探井深度,对该区下部泥页岩层位进行资源量探明和估

算;4、5、8、12、10 号样品区是勘探的 II 类区,可根据评价结果对各自的最佳目的层增加高精度的勘探实物工作量,并可参考评价结果安排勘探投入的优先顺序。如 8 号样品区好于 12、4、5 号样品区。

最后用设计介入的样品区 15、16、17 值将前 14 个样品区划分成 3 类,得到最终的多层叠合评价结果(表 8)。

表 8 溱潼凹陷多层叠合评价结果

样品区分区	样品区号
I 类区	9
II 类区	4、5、8、12、10
III 类区	1、2、3、6、7、13、14

### 3 结语

#### 3.1 组合算法的有效性问题的

组合算法的要点可以归结为:变形结构分区、模糊数学取值、多元统计运算合成判别因子、分级值(全零值)做评价预测。这 4 部分内容的客观性和信息处理的保真性决定了这套方法评价预测结果的有效性。相信通过一定量工区的实践、调整和改进,这种组合算法预测的有效性将越来越大。这种运算方案可以被资源评价人工智能专家预测系统选择性地加以采用。

探索过程中得到的认识主要有:①采用变形结构分区或者构造区带的划分使得能以各区带为样品点进行取值,这是将定性评价发展为半定量或定量评价的不可或缺的一步<sup>[1]</sup>;②评价结果的可信度首先取决于选取尽可能多的可靠参数;③参数取值时模糊数学方法的运用,这次探索了对于只能定性描述的地质条件如何参加定量的数学评价,进一步的工作可以针对资料充足的页岩气相关的地质条件在求隶度函数和隶属度方面作进一步探索,以使得参数取值更加客观;④取参数值时选取恰当的方法求样品区内的平均值,是影响评价结果很关键的一步,也是可以深入探讨的内容;⑤区带综合评价时,垂向上如何叠合是一个很困难的问题,提出设定全零值或分级值,和原始数据一同参加分析,以其分析结果作为标定和刻度,将各层段平面上的数据转换成等价的数值,然后进行垂向叠合,这种方法可以推广到其他专家系统评价的运算中,我们在运用过程中证实其非常简明、有效。

#### 3.2 解决了主因子轴的实际意义的难题

传统因子分析方法中经矩阵转置运算后得到主因子轴,其数学意义是方差贡献最大的因子轴,一般要求方差贡献大于 80%,则可以用少量的主因子轴的得分值代表整个样本总体的数据分布情况,但对每个主因子轴代表的实际意义的解释则会有比较大的争议。全零值和分级值的引入可以比较明确地确定每个因子轴的油气地质意义,譬如,本次运算中等得到的表 3 中的 6 个主因子,  $F_1$  中样品 15(-1.36)、样品 16(0.57)、样品 17(1.50)成正序排列,可以知

道  $F_1$  轴的数据分布表征的是油气资源富集有利的综合因子;同理可以知道  $F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_6$  表征的是油气资源富集不利的综合因子,  $F_4$ 、 $F_5$  表征的是油气资源富集中干扰因素的综合因子。全零值和分级值的引入,解决了因子轴实际意义不确定的难题,可以直接给出分级评价结果。

#### 3.3 页岩气模糊预测和常规油气区带评价的关联

页岩气模糊预测和常规油气区带评价的关联主要表现在评价参数取舍的异同。在这次陆相页岩气模糊预测的过程中,通过和常规油气区带评价取舍参数的对比,我们发现页岩气富集条件和常规油气聚集条件的在生烃、封盖、保存三个方面参数选取可以借鉴,但在储集、运移、圈闭三个方面有着极大的差别。

这是由页岩气不同于常规油气的成藏机制所决定的。目前已经开发的工业级的页岩气藏都是自生自储的,页岩气以少量游离、大部分吸附的状态富集在泥页岩中,因此其储、运、圈参数和常规油气截然不同,也决定了页岩气勘探和开发的技术方法和手段与常规油气是有很区别的。

致谢:成文过程中,南京大学樊敬亮博士后提出了许多重要的建议,中国科技大学刘德良教授、中石油勘探开发研究院陶士振教授也给予了许多宝贵的指导,在此致以衷心的感谢!

#### 参考文献:

- [1] Silver D, Huang A, Maddison C, et al. Mastering the game of go with deep neural networks and tree search[J]. Nature, 2016, 529: 484-489.
- [2] 刘德良, 谈迎, 杨晓勇. 溱潼油气区带评价中的 R 型因子分析方法[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(4): 183-289.
- [3] 樊敬亮, 黄志全, 钱铮, 等. 模糊评价方法在圈闭地质评价中的应用[J]. 西南石油学院学报, 2003, 25(5): 12-15.
- [4] 谈迎, 李振生, 刘德良. CO<sub>2</sub> 的气源和成藏及其预测[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010.
- [5] 路坤桥, 孙玉学. 我国页岩气勘探开发的要点及层位[J]. 河南科学, 2015, 33(2): 257-260.
- [6] 陶士振, 刘德良, 李昌伟. 华北陆块新区新层页岩气潜在勘探新领域——南华北下寒武统马店组烃源岩及其含气系统[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(11): 1767-1780.
- [7] 王纳申, 张译丹, 黄家旋, 等. 用微地震技术评价姬塬油田体积压裂的效果[J]. 物探与化探, 2017, 41(2): 165-169.
- [8] 屈大鹏, 陈超, 王明飞, 等. 川东南地区基于海相泥页岩地层的压力系数预测[J]. 物探与化探, 2016, 40(2): 349-352.
- [9] 凌帆, 朱裕振, 周明磊, 等. 广域电磁法在南华北盆地长山隆起页岩气资源潜力评价中的应用[J]. 物探与化探, 2017, 41(2): 369-376.
- [10] 易庆. 油气资源评价系统的三层结构设计和实现[J]. 石油学

- 报, 2005, 26(增 B3): 16-21.
- [11] 邱振, 邹才能, 李建忠, 等. 非常规油气资源评价进展与未来展望[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(2): 123-129.
- [12] 郭秋麟, 陈宁生, 刘成林, 等. 油气资源评价方法研究进展与新一代评价软件系统[J]. 石油学报, 2015, 36(10): 33-38.
- [13] 陶士振, 刘德良, 李振生, 等. 无机成因天然气[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2014.
- [14] 谈迎, 邱旭明, 李亚辉. 下扬子区中、古生界变形结构分区[J]. 复杂油气藏, 2011, 4(1): 14-18.
- [15] 李昌伟, 陶士振, 董大忠. 国内外页岩气形成条件对比与有利区优选[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(5): 986-1000.
- [16] 贾贝贝, 陈世悦, 鄢继华, 等. 沧东凹陷孔二段细粒沉积岩沉积微相研究[J]. 河南科学, 2016, 34(3): 371-377.
- [17] 魏婷. 准噶尔盆地 W 井区西山窑组沉积微相类型及沉积模式模式[J]. 河南科学, 2017, 35(9): 1505-1512.
- [18] 魏孟吉, 张世奇, 徐云飞. 东濮凹陷卫城地区沙三段储层特征及成岩作用研究[J]. 河南科学, 2016, 34(6): 943-949.
- [19] 戴金星, 秦胜飞, 陶士振. 中国天然气工业发展趋势和天然气地质理论重要进展[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(2): 127-142.
- [20] 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.
- [21] 包建平, 梁星宇, 朱翠山, 等. 苏北盆地盐城凹陷朱家墩气藏凝析油中的金刚烷类及其意义[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(3): 505-511.
- [22] 方朝合, 张枝焕, 王义凤, 等. 苏北盆地溱潼凹陷第三系烃源岩地球化学特征[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2008, 23(6): 1-5.

## The tentative application of artificial intelligence algorithm to evaluating continental shale gas resources: A case study of Qintong sag in Subei (North Jiangsu) Basin

TAN Ying<sup>1</sup>, YANG Wei-Song<sup>2</sup>, LI Zhen-Sheng<sup>3</sup>

(1. East China Mineral Exploration & Development Bureau, Nanjing 21000, China; 2. Communication and Electronic School, Jiangxi Science & Technology Normal University, Nanchang 330013, China; 3. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Taking Qintong sag of Subei basin in lower Yangtze area as the demonstration area, the authors investigated the evaluation of shale gas resources with the artificial intelligence method. With the combination algorithm designs, the authors conducted the whole process of demonstration operation based on continental shale gas resources evaluation parameters of the work area. First, Qintong sag was divided into 14 sample areas by the method of deformation structure partition; then, using the fuzzy mathematics method, the authors obtained quantitative and half-quantitative parameter values; after that, using factor analysis method the authors conducted the evaluation of 14 sample areas in a single plane; finally, composite evaluation of five shale gas layers in vertical direction of 14 sample areas was made based on the evaluation of 5 single planes. In order to get the equivalence data of each single layer, the authors introduced the zero value and grading values. The practise of the combination algorithm designs has the reference value for the shale gas resources evaluation system of artificial intelligence.

**Key words:** continental shale gas; Qintong sag; fuzzy comprehensive prediction; artificial intelligence; algorithm design

( 本文编辑:沈效群)