

基于灰色关联度分析法和主成分分析法对泥页岩储层评价方法的探讨

赵可英¹ 牟 凯²

(1. 内江师范学院数学与信息科学学院 四川内江 641100; 2. 四川商务职业学院 四川成都 610000)

[摘 要]泥页岩储层的影响因素众多,明确各因素间的内部联系才能更好地评价储层。为对比灰色关联法和主成分分析法在储层评价中的适用性,本文选取鄂尔多斯盆地东缘上古生界 Y88 井丰富的储层数据进行分析。通过对比两种多元统计方法的原理、算法和结果,认为主成分分析法把各项因子视为离散变量,通过降维后用三个综合评价指标来反映储层的优劣,是对各项指标的概括性分析;灰色关联法将参数分为参考数据列和比较数据列,参考数据列的有机碳含量高低与储层的优劣成正相关,参考数据列对评价对象具有可测性。因此,若是对评价对象的概括性分析,用主成分分析法比较合适;若是对评价对象的可测性分析,如有机碳含量的高低决定能不能形成泥页岩储层,则用灰色关联法评价更合理。

[关键词] 灰色关联法 主成分分析法 多元统计法 泥页岩储层 鄂尔多斯盆地东缘

[中图分类号] P628 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 10495-5331(2023)02-0443-08

Zhao Keying, Mu Kai. Evaluation of shale reservoirs based on grey relation analysis and principal component analysis [J]. *Geology and Exploration* 2023, 59(2): 0443-0450.

0 引言

页岩气藏属于连续聚集、自生自储型气藏(Curtis 2002; Jarvie et al. 2007),生储盖均为泥页岩,泥页岩储层评价是决定资源富集成藏及开发方式方法的关键之一(张金川等 2004; 张鹏等 2019)。泥页岩储层的影响因素众多,包括泥页岩中的有机碳含量、伊蒙混层和脆性矿物含量、干酪根的成熟度、储层的孔隙度、渗透率、裂缝的发育程度等。由于影响因素众多,不能单一地用某个因素或简单地用多个因素叠加的方法来评价,需要找到各个因素之间的内部联系来进行综合评价。

灰色关联度分析法和主成分分析法都是多因素的统计分析方法,被广泛应用于医患关系、生态环境、人力资源等领域的评价中。由于各应用领域都有其特殊性,评价中应采用适合本领域的方法。应用灰色关联度分析法和主成分分析法来评价页岩气储层的案例非常多(潘仁芳等 2009; 李武广等,

2011; 梁冰等 2014; 裴艳丽等 2016; 杨宇宁和王剑, 2016; Khanal et al. 2017; 刘健仪等 2020),但前人并未探讨过哪种方法更适用于评价泥页岩这种特殊的储层。本文选取鄂尔多斯盆地东缘数据量丰富的 Y88 井,应用灰色关联法和主成分分析法分别分析该井页岩影响因子间的相关关系,通过对这两种多元统计方法的原理、算法和结果进行对比,以寻求更适合页岩气储层评价的因子分析方法。

1 原理不同

灰色关联度分析法和主成分分析法都是通过数学建模来挖掘数据内部的结构信息,以解决单因素储层评价中可能出现的矛盾问题。灰色关联法是寻找参考数据列与比较数据列之间的关联程度,通过权重系数的分配获得综合定量评价指标(*REI* 值)来评价储层,算法对样本量的多少和样本有无规律没有严格的要求。主成分分析法则运用降维的思想,把多项因素转化为几项综合指标(即因子的主

[收稿日期]2020-05-13; [改回日期]2021-08-31; [责任编辑]郝情情。

[基金项目]国家科技重大专项“煤层气、致密气、页岩气合采示范工程”(编号:2016ZX05066)资助。

[第一作者]赵可英(1984年-),女,2015年毕业于中国地质大学(北京)矿产普查与勘探专业,获博士学位,副研究员,长期从事基于数学分析方法的页岩储层研究工作。E-mail: zhaokayngdy@163.com。

轴),用这些综合指标来反映原始因素的大部分信息,以此来衡量各因素之间的相关关系。

2 算法不同

2.1 参数的选取

在多元统计方法中,参数的选取至关重要,所选取的参数要与页岩储层密切相关。有机质是吸附气的核心载体(潘仁芳等 2009;柳广弟等 2012;张蔚等 2019),有机质中含有丰富的微孔,是甲烷吸附的重要空间,因此有机碳含量是页岩储层评价的重要参数。页岩气在储层中主要以吸附态赋存于泥页岩的显微孔隙中,少部分以游离态存在于大的孔隙和微裂缝中(吴克柳等 2015; Bhowmik and Dutta, 2019; 王永佩, 2019),因此泥页岩孔隙空间相关的孔隙度、渗透率、吸附气含量和可动流体饱和度等参数也是储层评价的参数。Y88 井上古生界岩心样品取自 2300 ~ 2500 m,其地层平均温度在 80 °C 左右(于强等 2012; 郭少斌和赵可英 2014)。为尽量模拟地层温压对泥页岩吸附气的影响,吸附气量是由 80 °C 时等温吸附试验所获得的。当 $R_o > 1.1\%$ 时,干酪根以产气为主,气态烃产率随 R_o (有机质成熟度指标)增大迅速增大(王社教等 2011; 李延钧等, 2011),因此泥页岩的成熟度也作为泥页岩储层评价的一个指标。泥页岩中的伊蒙混层与吸附气量呈现正相关关系,黏土矿物既有利于储层原始微孔和微裂缝的发育,又对气体有较强的吸附能力,因此伊蒙混层和黏土矿物含量作为评价储层的指标(Chalmers et al. 2012)。脆性矿物的含量又影响到页岩气后期的压裂开发(汪国庆等 2019),脆性矿物中的石英颗粒能增强泥页岩的抗压实能力,有利于泥页岩中有机质微孔隙的保存(Loucks and Ruppel 2007; 于强等 2012; 郭少斌和黄磊 2013),增加页岩气的储存空间,因此脆性矿物可作为储层评价的一个因素。

综上,本文选取对泥页岩储层含气量影响较多的有机碳含量、孔隙度、渗透率、吸附气量、有机质成熟度、伊蒙混层含量、可动流体饱和度、黏土含量、石英含量等 9 个参数进行对比研究。

2.2 灰色关联法的计算

2.2.1 选定参考数据列和比较数据列

泥页岩中有机碳含量是能否形成页岩储层的基础,它决定了泥页岩的生气能力和吸附能力,因此本文选取有机碳含量作为反映泥页岩储层好坏的参考数据列,其他因素作为影响储层好坏的比较数据列。

2.2.2 对参考数据列和比较数据列进行无量纲处理

由于泥页岩储层各影响因素的量纲不同,数据的数量级相差悬殊,无法直接进行比较,因此需要对这些数据进行处理。无量纲化处理公式: $X_i = (x_i - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min})$, x_{\max} 为数据列的最大值, x_{\min} 为数据列的最小值,将每项参数归一化到 (0, 1) 之间。

2.2.3 求灰色关联系数 $\xi(X_i)$ 和关联度 r_i 、权重系数

所谓关联度实质上是表征参考数据列和比较数据列的关联程度,用 $\xi(X_i)$ 来表示,计算方法见公式(1)。计算过程:先计算各个序列对应元素的绝对值 $|X_0(t) - X_i(t)|$,选出绝对值序列中的二级最小差 $D_{\min \min}$ 和二级最大差 $D_{\max \max}$,利用公式(1)求出灰色关联系数 $\xi(X_i)$:

$$\xi(X_i) = \frac{D_{\min \min} |X_0(t) - X_i(t)| + \rho D_{\max \max} |X_0(t) - X_i(t)|}{|X_0(t) - X_i(t)| + \rho D_{\max \max} |X_0(t) - X_i(t)|} \quad (1)$$

式中: $D_{\min \min}$ 为二级最小差; $D_{\max \max}$ 为二级最大差; ρ 为分辨系数,本文取 0.4 (Aman et al., 1999; Denney 2020; Curtis 2002; Ross and Bustin 2008; 涂乙等 2012)。

每项数据列的每个数据对应一个关联度值,关联度值形成一个 $n \times m$ 阶矩阵,数据信息分散不利于整体比较,因此对各个数据列的关联系数求平均值作为比较数列与参考数列关联程度的比较值,即关联度 $r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k)$ 。通过计算,各数据列的关联度数据如下表,关联度最高的是有机碳含量,最低的是石英含量,关联度的高低决定其对页岩储层好坏的影响程度。将所求各个参数的关联度进行归一化处理,最后求得各个参数的权重系数(表 1)。

表 1 比较数据列与参数数据列的关联度值

Table 1 Correlation values of comparison data columns and parameter data columns

项目	TOC(%)	气测孔隙度(%)	脉冲渗透率(mD)	伊蒙混层(%)	可动流体饱和度(%)
关联度	1	0.576	0.631	0.503	0.551
权重系数	0.167	0.096	0.105	0.084	0.092

续表 1

Continued Table 1

项目	计算 R_o (%)	吸附气量(m^3)	粘土总量(%)	石英(%)
关联度	0.685	0.879	0.693	0.471
权重系数	0.114	0.147	0.116	0.079

2.2.4 储层综合评价指标的确定

为了综合评价储层并对其进行分类,本文应用储层综合评价指标 REI 值来综合评价储层:

$$REI = \sum_{i=1}^n a_i X_i$$

式中: n 为储层评价参数的个数; a_i 为储层评价参数的权重系数; X_i 为储层评价参。

2.2.5 储层分类评价

根据储层综合评价指标 REI 值和归一化后累计 REI 值做储层评价指标概率累计曲线图(图 1),从图 1 可以找到两个拐点,即曲线的最大变化点。根据拐点可将储层分为三类,Ⅲ类储层 $REI \leq 0.32$,Ⅱ类储层 REI 在 $0.32 \sim 0.5$,Ⅰ类储层 $REI \geq 0.5$ 。 REI 值越大,说明储层的性能越好。根据这一分类对 Y88 井储层进行了评价,评价结果如表 2。

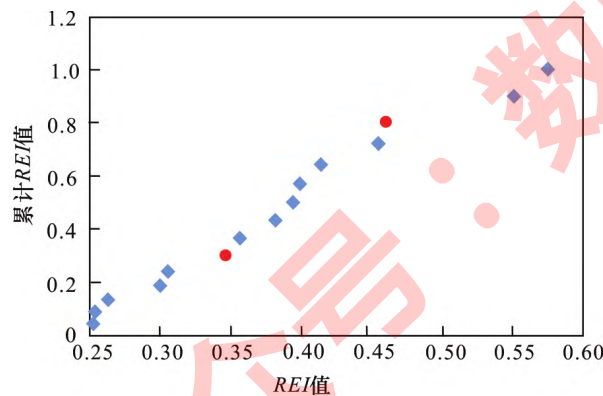


图 1 储层评价指标概率累计曲线图

Fig.1 Cumulative probability curve of reservoir evaluation index

表 2 榆 88 井储层分类表

Table 2 Reservoir classification of the well Yu 88

井号	深度(m)	REI	储层分类
榆 88	2509	0.253023	Ⅲ
	2507	0.254513	
	2406.82	0.263714	
	2396.23	0.300401	
	2396.88	0.305946	

续表 2

Continued Table 2

井号	深度(m)	REI	储层分类
榆 88	2401.1	0.347073	Ⅱ
	2502.4	0.356976	
	2503.15	0.381986	
	2400.05	0.394715	
	2496.7	0.399324	
	2427.16	0.414121	
	2500.35	0.454879	Ⅰ
	2402.92	0.460457	
	2455.08	0.551024	
	2509.45	0.574808	

2.3 主成分分析的算法

2.3.1 对原始数据进行标准化处理

参数仍然选用上述的有机碳含量、孔隙度、渗透率、吸附气量等 9 项参数,参数维数高,通过降维以找到既反映原数据中的较多因素信息且彼此独立的综合变量,即主成分来综合评价储层,使储层的评价更加简单且准确。

由于各数据列的量纲不同,数量级相差较大,先对数据进行标准化处理。

$$\text{标准化处理: } x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j} \quad j = 1, 2, \dots, p \quad i = 1, 2, \dots, n$$

...

$$\text{其中 } \bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij} \quad s_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2$$

2.3.2 计算相关系数矩阵

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1p} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{p1} & r_{p2} & \cdots & r_{pp} \end{pmatrix}$$

r_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, p$) 为标准化后变量 x'_i 与 x'_j 的相关系数 $r_{ij} = r_{ji}$, 其计算公式为

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)^2 \sum_{k=1}^n (x_{kj} - \bar{x}_j)^2}}$$

2.3.3 计算特征值与特征向量

通过计算特征值与特征向量,寻找因素的主轴。建立 R 的特征方程 $|R - \lambda E| = 0$,应用雅可比法求出特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$,根据特征值 λ_i 求出相应的特征向量 $\|e_i\|$ 。

2.3.4 计算主成分贡献率及累计贡献率

$$\text{贡献率计算公式: } \frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^p \lambda_k} (i = 1, 2, \dots, p)$$

$$\text{累计贡献率计算公式: } \frac{\sum_{k=1}^i \lambda_k}{\sum_{k=1}^p \lambda_k} (i = 1, 2, \dots, p)$$

从碎石图可见(图2),第四个特征值点开始曲线趋于平缓,犹如山底的碎石,对储层的好坏存在影响但影响不大,其他三个特征值的累计贡献率达到81.69%,因此取前面三个特征值 $\lambda_1 = 3.473$ 、 $\lambda_2 = 2.604$ 、 $\lambda_3 = 1.275$,即降维后用三个综合评价指标来评价储层。

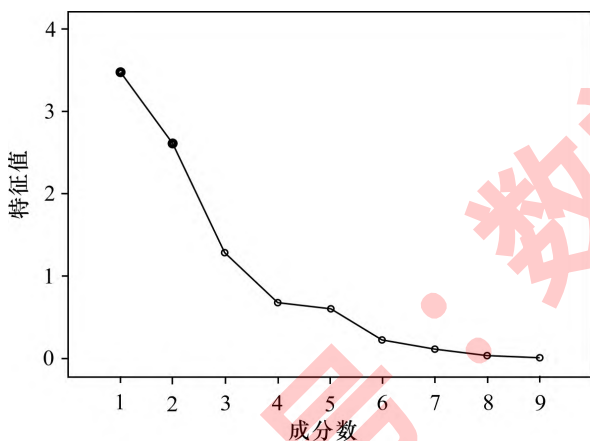


图2 主成分累计贡献率特征值碎石图

Fig. 2 Stone map of the eigenvalues of the cumulative contribution rate of principal components

2.3.5 计算主成分载荷和主成分得分矩阵

降维后的三个主成分(综合评价指标)用成分载荷公式 $l_{ij} = p(z_i, x_j) = \sqrt{\lambda_i} e_{ij}$ ($i, j = 1, 2, \dots, p$) 计算每一项因素的成分载荷(表3)。

表3 成分载荷矩阵

Table 3 Component load matrix

项目	主成分		
	1	2	3
TOC(%)	-0.308	0.798	0.498
气测孔隙度(%)	0.789	-0.346	0.326

续表3

Continued Table 3

项目	主成分		
	1	2	3
脉冲渗透率(mD)	0.457	-0.234	0.649
伊蒙混层(%)	0.791	0.397	-0.093
可动流体饱和度(%)	0.695	0.023	-0.070
R_o (%)	-0.746	0.433	-0.281
吸附气量(m^3)	-0.193	0.842	0.460
粘土总量(%)	-0.613	-0.664	0.231
石英(%)	0.684	0.546	-0.377

通过成分载荷分析可见,主成分1与气测孔隙度、伊蒙混层、可动流体饱和度及石英含量呈现较强的正相关,与 R_o 和粘土总量呈较强的负相关,这几个因素综合反映了储层的储集空间特征,因此可以认为主成分1是储集空间的代表;主成分2与有机碳含量、吸附气量呈现较强的正相关,综合反映了储层的丰度;主成分3与脉冲渗透率呈现较强的正相关,反映了储层的渗透性。用这3个主成分代替原来9个页岩储层影响因素来评价储层,简化了页岩储层评价的过程。

根据公式 $z_{ij} = l_{ij} / \sqrt{\lambda_i}$ 计算各成分的得分系数(表4),结合公式 $F_i = z_{1i}x'_1 + z_{2i}x'_2 + \dots + z_{pi}x'_p$ 计算每一个样本的因素综合得分 F_i 。综合得分是对各因素加权求得的衡量潜变量的一个指标,综合得分越高,样本所反映的页岩储层越好(表5)。

表4 成分得分系数矩阵

Table 4 Component score coefficient matrix

因素	成分		
	1	2	3
深度(m)	-0.165	0.494	0.441
气测孔隙度(%)	0.423	-0.214	0.289
脉冲渗透率(mD)	0.245	-0.145	0.575
伊蒙混层(%)	0.425	0.246	-0.082
可动流体饱和度(%)	0.373	0.014	-0.062
TOC(%)	-0.401	0.268	-0.249
计算 R_o (%)	-0.103	0.522	0.407
吸附气量(m^3)	-0.329	-0.412	0.205
粘土总量(%)	0.367	0.338	-0.334
石英(%)	-0.165	0.494	0.441

表 5 主成分得分结果表
Table 5 Principal component score

井号	深度 (m)	F1	F2	F3	综合得分
	2396.23	-0.744	-3.036	1.660	-0.930
	2396.88	0.895	-1.282	0.389	0.030
	2400.05	1.736	-0.084	0.388	0.700
	2401.10	1.832	-0.103	-0.946	0.543
	2402.92	2.970	-0.560	0.461	1.049
	2406.82	0.672	-0.960	-0.233	-0.051
	2427.16	1.814	-0.054	0.210	0.714
榆 88	2455.08	1.186	2.815	0.436	1.334
	2496.70	-0.959	1.008	-0.443	-0.141
	2500.35	0.121	-0.100	0.652	0.110
	2502.40	-0.921	0.783	-0.997	-0.270
	2503.15	-0.973	0.494	-0.814	-0.348
	2507.00	-3.909	-2.382	-0.418	-2.257
	2509.00	-0.863	0.533	-2.505	-0.533
	2509.45	-2.859	2.928	2.160	0.050

3 计算结果对比

两种方法都是挖掘数据的内部信息,通过灰色关联分析法所求的 REI 值和主成分分析法获得的综合得分排序所做的散点图(图 3),发现两者的拟合度 $R^2 = 0.6147$,说明两个方法对榆 88 井储层的评价趋于是一致的,但存在一定的差别。

(1) 应用灰色关联分析法时先确定参考数据列,其余的则为比较数据列,计算结果对参考数据列的依赖性比较大,所以参考数据应选对所评价内容起决定性作用的参数。页岩储层中有机碳既是页岩气的生气源,有机碳中的微孔还是吸附页岩气的重要空间,是影响页岩储层好坏的关键因素,因此选有机碳作为参考数据列在页岩储层评价中更可靠;而主成分分析法中各因子的地位是平等的,通过寻找因子的主轴来评价储层,从成分上看,有机碳和吸附气含量代表其丰度,孔隙度、伊蒙混层、可动流体饱和度、 R_o 、黏土总量和石英含量代表其储集空间,脉

冲渗透率代表其气体在储层的渗透性。通过降维将 9 项储层评价因子用三项综合指标:丰度、储集空间和储层的渗透性来评价储层。

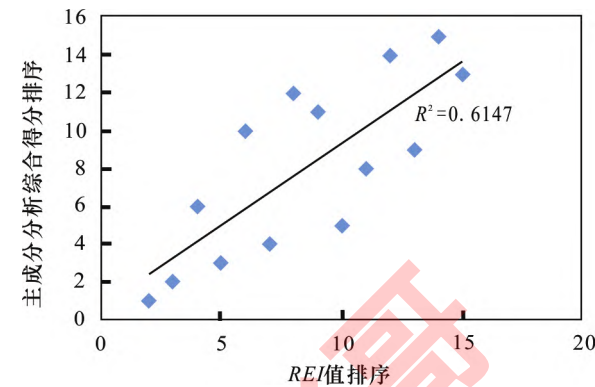


图 3 灰色关联分析法和主成分分析法对页岩储层评价排序拟合图

Fig. 3 Sequence fitting diagram of shale reservoir evaluation by grey correlation analysis and principal component analysis

(2) 灰色关联法通过绘制储层综合评价指标概率累计曲线获得拐点,根据拐点将储层进行分类,而主成分分析法的综合得分的正负只是将综合得分在零两侧等分而已,只能对储层的好坏进行排序,无法对储层进行分类。

(3) 美国 5 个大规模商业开发的含气页岩系统有机碳含量为 0.5% ~ 25.0% (Curtis, 2002); Charles Boye 等对页岩气资源有机质丰度定级中,将 $TOC < 0.5\%$ 的划为很差有机质, TOC 在 0.5% ~ 1.0% 的划为差有机质(李世臻等, 2010); Burnaman 等也提出,页岩气资源中烃源岩的有机碳含量至少为 2% (Burnaman et al., 2009)。因此, $TOC < 0.5\%$ 的页岩不能形成有效的页岩气储层,灰色关联法根据这一标准将最后 5 个样本的储层分类为Ⅲ类(非-差储集层)(表 6),而主成分分析法将这相应的 5 个样本分别排在 8、9、13 ~ 15 位(表 6);对于 $TOC > 2.0\%$ 的 4 个样本,用灰色关联法分析获得的排名较主成分分析法获得的更靠前些,由此可以看出,灰色关联法分析泥页岩储层获得的结果更适合应用于实际勘探。

表 6 灰色关联分析法和主成分分析法对页岩储层评价排序表
Table 6 Ranking of shale reservoir evaluation by grey correlation analysis and principal component analysis

井号	深度 (m)	TOC (%)	灰色关联分析法		主成分分析法	
			REI	REI 值排序	综合得分	综合得分排序
榆 88	2396.23	0.07	0.300	12	-0.930	14
	2396.88	0.11	0.306	11	0.030	8

续表 6

Continued Table 6

井号	深度(m)	TOC(%)	灰色关联分析法		主成分分析法	
			REI	REI 值排序	综合得分	综合得分排序
榆 88	2400. 05	0. 83	0. 395	7	0. 700	4
	2401. 1	0. 54	0. 347	10	0. 543	5
	2402. 92	0. 93	0. 460	3	1. 049	2
	2406. 82	0. 09	0. 264	13	-0. 051	9
	2427. 16	1. 29	0. 414	5	0. 714	3
	2455. 08	5. 25	0. 551	2	1. 334	1
	2496. 7	2. 62	0. 399	6	-0. 141	10
	2500. 35	1. 93	0. 455	4	0. 110	6
	2502. 4	1. 73	0. 357	9	-0. 270	11
	2503. 15	2. 11	0. 382	8	-0. 348	12
	2507	0. 24	0. 255	14	-2. 257	15
	2509	0. 05	0. 253	15	-0. 533	13
	2509. 45	9. 60	0. 575	1	0. 050	7

[References]

4 结论

(1) 灰色关联法对数据的多少和数据有无规律没有严格的要求,而主成分分析法需要寻找数据的主轴,对数据的量和数据的相关性要求更高。

(2) 在页岩储层评价中,主成分分析法把各项因子视为离散变量,降维后用三个综合评价指标来反映储层的优劣,是对各项指标的概括性分析;灰色关联法将参数分为参考数据列和比较数据列,参考数据列的有机碳是页岩气的物质基础,同时有机碳含量越高,页岩孔隙和裂缝越发育,因此参考数据列对评价对象具有可测性。

(3) 灰色关联法可以通过综合评价指标概率累计曲线中的拐点将储层进行分类,而主成分分析法的综合得分只能对储层的好坏进行排序。

灰色关联分析法和主成分分析法各有各的优势,如果是对评价对象的概括性分析,用主成分分析法比较合适;泥页岩储层分析中,有机碳含量的高低决定着能不能形成泥页岩储层,因此用灰色关联法评价更合理。综合评价指标概率累计曲线上的拐点可以进一步对储层进行分类,有利于储层的分类评价。

致谢:感谢导师郭少斌教授提供的 Y88 井的分析化验数据,感谢黄磊师兄在数据分析过程中给予的帮助。

- Aman B A, Nichols T W, Snyder R L, Payne M E. 1999. Integrated reservoir evaluation revives nearly abandoned Illinois Basin field[C]// SPE Eastern Regional Conference and Exhibition, Charleston, West Virginia: 20 - 22.
- Bhowmik S, Dutta P. 2019. A study on the effect of gas shale composition and pore structure on methane sorption[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering 62(6): 144 - 156.
- Burnaman D M, Xia Wenyu, Shelton J. 2009. Shale gas play screening and evaluation criteria[J]. China Petroleum Exploration, 14(3): 51 - 64.
- Chalmers G R, Bustin R M, Power I M. 2012. Characterization of gas shale pore systems by porosimetry, pycnometry, surface area, and field emission scanning electron microscopy transmission electron microscopy image analyses: Examples from the Barnett, Woodford, Haynesville, Marcellus and Doig units[J]. AAPG Bulletin 96(6): 1099 - 1119.
- Curtis J B. 2002. Fractured shale - gas systems[J]. AAPG Bulletin, 86(11): 1921 - 1938.
- Denney D. 2020. Integrated evaluation revives nearly abandoned field[J]. Journal of Petroleum Technology 52(2): 50 - 51.
- Guo Shaobin, Huang Lei. 2013. Gas - bearing in fluenial factors and evaluation of shale gas reservoir: A case study of Paleozoic shale gas reservoir in Upper Yangtze region[J]. Petroleum Geology & Experiment 35(6): 601 - 606(in Chinese with English abstract).
- Guo Shaobin, Zhao Keying. 2014. Gas - bearing influential factors and estimation of shale reservoirs in Upper Paleozoic, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment 36(6): 678 - 683, 691(in Chinese with English abstract).
- Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E. 2007. Unconventional shale - gas systems: The Mississippian Barnett shale of north - central Texas as one

- model for thermogenic shale – gas assessment[J]. AAPG Bulletin , 91(4) : 475 – 499.
- Khanal A , Khoshghadam M , John L W , Nikolaou M. 2017. New forecasting method for liquid rich shale gas condensate reservoirs with data driven approach using principal component analysis [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering 38(2) : 621 – 637.
- Li Wuguang , Yang Shenglai , Lou Yi , Sun Xiaoxu. 2011. Structural equation model of optimal selection factors in shale gas development target area [J]. Natural Gas and Oil 29(3) : 42 – 44(in Chinese with English abstract) .
- Li Shizhen , Qiao Dewu , Feng Zhigang , Liu Lijun , Wang Qian , Nie Haikuan. 2010. The status of worldwide shale gas exploration and its suggestion for China [J]. Geological Bulletin of China 29(6) : 918 – 924(in Chinese with English abstract) .
- Li Yanjun , Liu Huan , Liu Jiaxia , Cao Lichun , Jia Xuecheng. 2011. Geological regional selection and an evaluation method of resource potential of shale gas [J]. Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition) 33(2) : 28 – 34(in Chinese with English abstract) .
- Liang Bing , Dai Yuanyuan , Chen Tianyu , Sun Weiji , Qin Bing. 2014. Optimal selection of grey correlation degree in shale gas exploration and development blocks under complex geological conditions [J]. Journal of China Coal Society 39(3) : 524 – 530(in Chinese with English abstract) .
- Liu Guangdi , Yu Shun , Sun Mingliang. 2012. Methods and parameter systems for analog assessment of petroleum resources in marine carbonate strata: A case study of the Ordovician in Tarim Basin , China [J]. Acta Petrolei Sinica 33(S2) : 125 – 134(in Chinese with English abstract) .
- Liu Jianyi , He Wenting , Liao Xingyi. 2020. Dynamic deliverability evaluation method of shale gas well considering stress sensitivity and fracturing fluid effects [J]. Science Technology and Engineering , 20(7) : 2652 – 2658(in Chinese with English abstract) .
- Loucks R G , Ruppel S C. 2007. Mississippian Barnett shale: Litho facies and depositional setting of a deep – water shale – gas succession in the Fort Worth Basin , Texas [J]. AAPG Bulletin 91(4) : 579 – 601.
- Pan Rengfang , Wu Yuan , Song Zheng. 2009. Geochemical parameters for shale gas exploration and basic methods for well logging analysis [J]. China Petroleum Exploration 14(3) : 6 – 9 , 28(in Chinese with English abstract) .
- Pei Yanli , Jiang Hanqiao , Li Junjian , Liu Chuangbin , Zhou He , Yu xi. 2016. Optimum design of fracturing scale for new shale gas well [J]. Fault Block Oil and Gas Field 23(2) : 265 – 268(in Chinese with English abstract) .
- Ross D J K , Bustin R M. 2008. Characterizing the shale gas resource potential of Devonian – Mississippian strata in the Western Canada sedimentary basin: Application of an integrated formation evaluation [J]. AAPG Bulletin 92(1) : 87 – 125.
- Tu Yi , Xie Chuanli , Liu Chao , Li Jiajia. 2012. Application of grey correlation analysis method in Qing – Dong Sag reservoir evaluation [J]. Natural Gas Geoscience 23(2) : 381 – 386(in Chinese with English abstract) .
- Wang Guoqing , Xiao Yongjun , Zhao Hao , Wang Yuzhong , Chen Yuanlin. 2019. Application of microseismic monitoring technology to re – fracturing of shale gas horizontal well [J]. Geology and Exploration , 55(5) : 1366 – 1342(in Chinese with English abstract) .
- Wang Shejiao , Li Denghua , Li Jianzhong , Dong Dazhong , Zhang Wenzheng , Ma Jun. 2011. Exploration potential of shale gas in the Ordos Basin [J]. Natural Gas Industry 31(12) : 40 – 46(in Chinese with English abstract) .
- Wang Yongpei. 2019. Surface diffusion of shale gas mixture in organic nanopores [J]. Journal of Beijing Institute of Petrochemical Technology 27(3) : 38 – 43(in Chinese with English abstract) .
- Wu Keliu , Li Xiangfang , Chen Zhangxing. 2015. The mechanism and mathematical model for the adsorbed gas surface diffusion in nanopores of shale gas reservoirs [J]. Science China (Technical Science) 45(5) : 525 – 540(in Chinese with English abstract) .
- Yang Yuning , Wang Jian. 2016. Sensitivity of shale gas abundance based on grey correlation analysis [J]. Sedimentary and Tethyan Geology , 36(1) : 109 – 112(in Chinese with English abstract) .
- Yu Qiang , Ren Zhanli , Wang Baojiang , Gao Lijun , Li Chengfu , Cao Hongxia. 2012. Thermal evolution history of the Upper Paleozoic in Yanchang exploratory area , Ordos Basin [J]. Geological Review , 58(2) : 303 – 308(in Chinese with English abstract) .
- Zhang Jinchuan , Jin Zhijun , Yuan Mingsheng. 2004. Reservoiring mechanism of shale gas and its distribution [J]. Natural Gas Industry , 24(7) : 15 – 18(in Chinese with English abstract) .
- Zhang Peng , Huang Yuqi , Zhang Jinchuan , Liu Hongyang , Yang Junwei. 2019. Fractal characteristics of pore in marine shale and marine – continental transitional shale in northwest Guizhou [J]. Geology and Exploration 55(4) : 1073 – 1081(in Chinese with English abstract) .
- Zhang Wei , Liu Chenglin , Wu Xiaozhi , Zheng Min , Guo Qiulin , Zhang Daoyong , Chen Xiaoming , Li Bin. 2019. Statistical characteristics and prediction models for oil and gas resources abundance in different types of Chinese basins [J]. Geology and Exploration 55(6) : 1518 – 1527(in Chinese with English abstract) .

[附中文参考文献]

- 郭少斌 , 黄磊. 2013. 页岩气储层含气性影响因素及储层评价——以上扬子古生界页岩气储层为例 [J]. 石油实验地质 35(6) : 601 – 606.
- 郭少斌 , 赵可英. 2014. 鄂尔多斯盆地上古生界泥页岩储层含气性影响因素及储层评价 [J]. 石油实验地质 36(6) : 678 – 683 , 691.
- 李武广 , 杨胜来 , 姜毅 , 孙晓旭. 2011. 页岩气开发目标区优选因素的结构方程模型 [J]. 天然气与石油 29(3) : 42 – 44 , 87.
- 李世臻 , 乔德武 , 冯志刚 , 刘丽君 , 王倩 , 聂海宽. 2010. 世界页岩气勘探开发现状及对中国的启示 [J]. 地质通报 29(6) : 918 – 924.
- 李延钧 , 刘欢 , 刘家霞 , 曹利春 , 贾学成. 2011. 页岩气地质选区及资源潜力评价方法 [J]. 西南石油大学学报(自然科学版) , 33(2) : 28 – 34.
- 梁冰 , 代媛媛 , 陈天宇 , 孙维吉 , 秦冰. 2014. 复杂地质条件页岩气勘探开发区块灰关联度优选 [J]. 煤炭学报 39(3) : 524 – 530.

- 柳广弟, 喻顺, 孙明亮. 2012. 海相碳酸盐岩系油气资源类比评价方法与参数体系——以塔里木盆地奥陶系为例[J]. 石油学报, 33(S2): 25 – 134.
- 刘健仪, 何汶亭, 廖鑫怡. 2020. 考虑应力敏感和压裂液影响的页岩气井动态产能评价方法[J]. 科学技术与工程, 20(7): 2652 – 2658.
- 潘仁芳, 伍媛, 宋争. 2009. 页岩气勘探的地球化学指标及测井分析方法初探[J]. 中国石油勘探, 14(3): 6 – 9, 28.
- 裴艳丽, 姜汉桥, 李俊键, 刘传斌, 周赫, 余曦. 2016. 页岩气新井压裂规模优化设计[J]. 断块油气田, 23(2): 265 – 268.
- 涂乙, 谢传礼, 刘超, 李佳佳. 2012. 灰色关联分析法在青东凹陷储层评价中的应用[J]. 天然气地球科学, 23(2): 381 – 386.
- 汪国庆, 肖勇军, 赵昊, 王玉忠, 陈远林. 2019. 微地震监测技术在页岩气水平井重复压裂中的应用[J]. 地质与勘探, 55(5): 1366 – 1342.
- 王社教, 李登华, 李建忠, 董大忠, 张文正, 马军. 2011. 鄂尔多斯盆地页岩气勘探潜力分析[J]. 天然气工业, 31(12): 40 – 46.
- 王永佩. 2019. 页岩有机质纳米孔混合气表面扩散数学模型[J]. 北京石油化工学院学报, 27(3): 38 – 43.
- 吴克柳, 李相方, 陈掌星. 2015. 页岩纳米孔吸附气表面扩散机理和数学模型[J]. 中国科学(技术科学), 45(5): 525 – 540.
- 杨宇宁, 王剑. 2016. 基于灰色关联分析法的页岩气资源丰度敏感性研究[J]. 沉积与特提斯地质, 36(1): 109 – 112.
- 于强, 任战利, 王宝江, 高利军, 李成福, 曹红霞. 2012. 鄂尔多斯盆地延长探区上古生界热演化史[J]. 地质论评, 58(2): 303 – 308.
- 张鹏, 黄宇琪, 张金川, 刘洪洋, 杨军伟. 2019. 黔西北海相、海陆过渡相页岩孔隙分形特征对比研究[J]. 地质与勘探, 55(4): 1073 – 1081.
- 张金川, 金之钧, 袁明生. 2004. 页岩气成藏机理和分布[J]. 天然气工业, 24(7): 15 – 18.
- 张蔚, 刘成林, 吴晓智, 郑民, 郭秋麟, 张道勇, 陈晓明, 黎彬. 2019. 中国不同类型盆地油气资源丰度统计特征及预测模型[J]. 地质与勘探, 55(6): 1518 – 1527.

Evaluation of Shale Reservoirs Based on Grey Relation Analysis and Principal Component Analysis

ZHAO Keying¹, MU Kai²

(1. School of Maths and Informations Science, Neijiang Normal University, Neijiang, Sichuan 641100; 2. Sichuan Business Vocational College, Chengdu, Sichuan 610000)

Abstract: Shale reservoirs are generally affected by various factors, and it is significant to clarify the internal relationship between these factors for reservoir evaluation. This work selected the well Y88 with rich exploration data of Upper Paleozoic in the eastern margin of Ordos Basin to compare the applicability of grey relation analysis with principal component analysis. The comparison of the principles, algorithms and results of the two multivariate statistical methods shows that the principal component analysis regards various factors as discrete variables, and three comprehensive evaluation indexes are used to reflect the advantages and disadvantages of the reservoir after dimension reduction, which is a general analysis of each index. The grey relation method divides the parameters into reference data series and comparative data series, and the organic carbon content of the reference data series is positively related to the quality of the reservoir, implying that the reference data series is testable for the evaluation objects. Therefore, the principal component analysis is suitable for the general analysis of evaluation objects. For testability analysis of the evaluation objects, for example, the organic carbon content determines whether the shale reservoir can be formed, the grey correlation method is more reasonable.

Key words: grey relation analysis, principal component analysis, multivariate statistical method, shale reservoir, eastern margin of Ordos Basin