

文章编号: 1009-3850(2016)01-0109-04

基于灰色关联分析法的页岩气资源丰度敏感性研究

杨宇宁^{1,2,3}, 王 剑³

(1. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059; 2. 四川中成煤田物探工程院有限公司, 四川 成都 610072; 3. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081)

摘要: 页岩气成藏是多种因素共同作用的结果。要探明页岩气资源丰度, 就要分清各种影响因素之间的关系及其重要性。研究影响页岩气资源丰度的各种因素, 从众多影响因素中分析各种因素的敏感度具有重要意义。本文介绍了页岩气成藏条件, 研究了影响页岩气资源丰度的主要因素。以北美典型的页岩盆地地层与中国四川盆地地下古生界页岩地层相关数据为基础, 利用灰色关联分析对页岩气资源丰度各种影响因素的重要程度进行研究。该方法的思路为: 首先在大量离乱、随机的统计数据中建立参考数据和比较数据; 其次, 由于数据的单位不同, 对原始数据进行无量纲化处理, 使数据具有可比性; 最后, 运用灰色关联分析法处理数据, 从整体观念出发进行综合评价, 确定其对目标要素的贡献程度。本研究得到的资源丰度敏感程度自大到小依次为页岩深度、厚度、演化度(R_o)、有机质(TOC)和孔隙度, 这为以后页岩资源丰度的研究提供了理论借鉴。

关键词: 灰色关联分析; 页岩气; 资源丰度; 敏感性

中图分类号: TE132.2

文献标识码: A

引言

随着全球经济的快速发展, 对资源的需求不断增长。由于常规油气资源的日益枯竭, 促使人类加快非常规油气资源的勘探步伐。非常规油气资源中的页岩气资源量大、生产寿命长^[1]。20世纪90年代以来, 全球页岩气的成藏机理和增产措施研究不断深入, 页岩气工业发展迅猛^[2]。

研究表明, 页岩气成藏是多种因素共同作用的结果^[3]。要探明页岩气资源丰度, 就要分清影响因素之间的关系及重要性。研究影响页岩气资源丰度的各种因素, 从众多影响因素中分析各种因素的敏感度具有重要意义。本文采用灰色关联分析法分析影响页岩气资源丰度各种因素的敏感度, 研究各种因素之间的相互关系及重要程度, 为后续的页岩气研究提供一定的参考。

1 页岩气成藏条件

常规油气藏中页岩通常只作为源岩或盖层。在页岩气藏中, 由于页岩具有较低的孔隙度及渗透率, 页岩既可以作为源岩, 又可以作为储层和盖层, 形成典型的“自生自储”型气藏。

1.1 烃源条件

富有机质烃源页岩中, 天然气的生成取决于沉积环境及沉积后热演化的强度和持续时间; 前者决定岩层中原始沉积有机质的数量和天然气的生成能力, 后者决定有机质转化为烃类天然气的程度^[4-6]。

快速沉积条件和封闭还原环境有利于形成有机质丰度高的黑色泥页岩, 为页岩气的工业聚集提供丰富的气源基础^[7]。页岩中的有机物质兼具生成天然气与吸附气体的功能。有机质丰度(TOC)

收稿日期: 2015-06-08; 改回日期: 2015-08-10

作者简介: 杨宇宁(1987-), 女, 博士, 主要从事含油气盆地沉积与层序地层工作

资助项目: 国家自然科学基金“华南新元古代楔状地层沉积充填序列及大地构造研究”(41030315)

高的地区页岩气产量也较高。

页岩气的生成贯穿于有机质向烃类演化的各个过程,演化度(R_o)越高,成气的可能性越大, $R_o > 0.4\%$,就可生成天然气^[9]。

页岩气可以在以生油为主的 I 型、II 型干酪根和以生气为主的 III 型干酪根源岩中产出,有机质丰度(TOC)和成熟度(R_o)是决定源岩产气能力的重要因素。研究表明,有机质丰度(TOC)大于 2%,成熟度(R_o)大于 1.1%的地区可有效降低页岩气开发的风险^[9]。

1.2 储集条件

既可作为源岩又兼具较低的孔隙度及渗透率的页岩可形成典型的“自生自储”型气藏。页岩成藏关键因素是页岩必须具备足够的厚度和埋藏深度。

由于“自生自储”的特性,页岩气在页岩中以多种形式赋存。但通常情况下,足够的储集厚度可以保证页岩气的储集。如果要达到工业产量,页岩必须具备连续分布面积且达到相应的厚度,从而能够提供足够的产气源和储集空间,继而成为有效的烃源岩层和储集层。页岩越厚,可提供的气源越丰富,产气量越稳定。

足够的埋藏深度也是形成页岩气成藏的关键因素^[9]。有机质在一定的温度与压强作用下方能转化为油气,足够的埋藏深度为这种转化提供了合适的温度与压力。同时,页岩的埋藏深度也影响开发成本。

1.3 孔隙度

页岩中存在一些孔隙,这些孔隙的大小对页岩

气吸附和储集具有重要意义^[9]。在页岩孔隙中存在大量的内表面积,内表面积可以大量吸附页岩气,在页岩气成藏过程中,吸附作用是页岩气得以储集的主要机制。同时,页岩的渗透率很低,这可以保证页岩气不会流走溢出,从而保证了页岩气的储集,但是渗透率过小也不利于页岩气开采。孔隙度可以影响页岩气吸附状态和吸附量,对资源丰度也有较大影响,一般孔隙度达到一定条件后页岩气才能够达到工业产量。

综上所述,页岩埋藏深度、有效厚度、有机质丰度(TOC)、演化度(R_o)、总孔隙度为页岩气资源丰度的主控因素^[9]。

1.4 四川盆地页岩气与北美页岩气

通过对四川盆地筇竹寺组、龙马溪组的页岩气成藏地质条件进行初步分析,认为四川盆地筇竹寺组、龙马溪组与北美 5 大页岩气盆地产气页岩的地质地球化学参数相当^[6,10]。两套页岩具有相似的沉积背景、有机质类型和生烃演化史等^[11-13],两者共性较多,四川盆地页岩气具有较大的勘探开发潜力^[13-15]。作者以本文统计数据(表 1)为研究对象,分析研究有机质含量、类型、成熟度、储层厚度、埋藏深度和孔隙度等因素与页岩气资源丰度之间的关系,应用灰色关联分析方法对多种因素进行综合评价,以了解各个影响因素对页岩气资源丰度重要程度。

2 页岩气资源丰度灰色关联分析的研究

广泛应用于工程、经济等领域的灰色关联分析法是灰色系统理论分支之一。

表 1 四川盆地龙马溪组页岩与北美页岩地质条件对比^[9]

Table 1 Correlation of geological conditions of the shales from the Longmaxi Formation in the Sichuan Basin and North America

页岩	埋藏深度(m)	厚度(m)	TOC(%)	R_o (%)	孔隙度(%)	资源丰度($10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)
Bamett	1981 ~ 2926	30 ~ 183	3 ~ 13.0	1.1 ~ 2	4 ~ 5.0	7.15
Fayetteville	305 ~ 2287	6 ~ 76	2 ~ 9.8	1.2 ~ 4	2 ~ 8.0	6.3
Haynesville	3048 ~ 4115	62 ~ 91	0.5 ~ 4	2.2 ~ 3.2	8 ~ 9.0	8.71
Woodford	1829 ~ 3353	37 ~ 67	1 ~ 14.0	1.1 ~ 3	3 ~ 9.0	2.29
Antrim	183 ~ 730	21 ~ 37	1 ~ 20.0	0.4 ~ 0.6	9	0.69
Lewis	914 ~ 1829	61 ~ 91	0.45 ~ 2.5	1.6 ~ 1.9	3 ~ 55	1.74
Marcellus	475 ~ 2591	15 ~ 304	3 ~ 12.0	1.5 ~ 3	10	1.73
New Albany	152 ~ 1494	15 ~ 122	1 ~ 25.0	0.4 ~ 0.8	10 ~ 14.0	0.42
Ohio	600 ~ 1500	9 ~ 30.0	0 ~ 4.7	0.4 ~ 1.3	4.7	0.55 ~ 1.09
筇竹寺组	2600 ~ 4600	20 ~ 80	2.3 ~ 4.2	1.5 ~ 5.7	1.46 ~ 2.61	0.9 ~ 2.3
龙马溪组	1600 ~ 4200	20 ~ 120	1 ~ 5.0	1.88 ~ 4.36	1 ~ 5.0	1 ~ 2.5

灰色关联分析法能从系统中离乱的、随机的观测数据中,确定各因素间的关联程度。灰色关联分析法的思路为:首先在大量离乱、随机的统计数据中建立参考数据和比较数据;由于数据的单位不同,一般对原始数据进行无量纲化处理,使数据具有可比性;最后,运用灰色关联分析法处理数据,从整体观念出发进行综合评价,确定其对目标要素的贡献程度。

2.1 建立参考数据和比较数据

首先,选取系统分析中最为重要的因素,即反映系统特征行为的参考序列 X_0 。其次,获取系统相关影响因素行为序列 X_i (也称为比较序列)。最后,建立 X_0 和 X_i 计算关联系数,进而得到相应影响因素关联度。

建立系统参考序列 X_0 (式 1):

$$X_0(k) = (x_0(1), x_0(2), x_0(3), \dots, x_0(m)) \quad (1)$$

建立系统比较序列(式 2)

$$x_i(k) = \begin{bmatrix} x_1(1) & x_2(1) & x_3(1) & \cdots & x_m(1) \\ x_1(2) & x_2(2) & x_3(2) & \cdots & x_m(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1(n) & x_2(n) & x_3(n) & \cdots & x_m(n) \end{bmatrix} \quad (2)$$

以表 1 中页岩气资源丰度为参考序列,埋藏深度、厚度、TOC、 R_o 、孔隙度为比较序列:

$$X_0 = (7.15, 6.3, 8.71, 2.29, 0.69, 1.74, 1.73, 0.42, 0.82, 1.6, 1.75)^T$$

$$X_1 = (2453.50, 1296.00, 3581.5, 2591.00, 457.50, 1371.50, 1533.00, 823.00, 1050.00, 3600.00, 2900.00)^T$$

$$X_2 = (106.50, 41.15, 76.52, 51.84, 29.00, 76.00, 159.60, 68.50, 19.50, 50.00, 60.00)^T$$

$$X_3 = (4.50, 5.90, 2.25, 7.50, 10.50, 1.48, 7.50, 13.00, 2.35, 3.25, 2.60)^T$$

$$X_4 = (1.55, 2.60, 2.70, 2.05, 0.50, 1.75, 2.25, 0.60, 0.85, 3.60, 3.12)^T$$

$$X_5 = (4.5, 5, 8.5, 6.00, 9.00, 29.00, 10.00, 12.00, 2.35, 2.04, 3.00)^T$$

2.2 数据无量纲化

由于数据的单位不同,一般对原始数据进行无量纲化处理(式 3),使数据具有可比性(表 2)。

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (3)$$

表 2 无量纲化后的数据

Table 2 Dimensionless data

名称	资源丰度	埋藏深度	厚度	TOC	R_o	孔隙度
A	0.81	0.64	0.62	0.26	0.34	0.09
B	0.71	0.27	0.15	0.38	0.68	0.11
C	1.00	0.99	0.41	0.07	0.71	0.24
D	0.23	0.68	0.23	0.52	0.50	0.15
E	0.03	0.00	0.07	0.78	0.00	0.26
F	0.16	0.29	0.40	0.00	0.40	1.00
G	0.16	0.34	1.00	0.52	0.56	0.30
H	0.00	0.12	0.35	1.00	0.03	0.37
I	0.05	0.19	0.00	0.08	0.11	0.01
J	0.14	1.00	0.22	0.15	1.00	0.00
K	0.16	0.78	0.29	0.10	0.85	0.04

2.3 灰色关联分析法处理数据

根据关联系数公式(4),建立 X_0 和 X_i 计算关联系数,取得关联系数如表 3

$$e_i(k) = \frac{\min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|}{|X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|} \quad (4)$$

其中: ρ 为分辨率,在 $(0, 1)$ 内取值,通常取 0.5。

表 3 关联系数

Table 3 Correlation coefficients

名称	埋藏深度	厚度	TOC	R_o	孔隙度
A	0.74	0.72	0.48	0.51	0.41
B	0.53	0.47	0.61	0.94	0.45
C	0.99	0.46	0.35	0.63	0.40
D	0.52	0.99	0.63	0.65	0.86
E	0.94	0.93	0.40	0.94	0.69
F	0.79	0.67	0.76	0.67	0.37
G	0.73	0.37	0.58	0.55	0.78
I	0.81	0.59	0.33	0.94	0.58
K	0.78	0.91	0.95	0.89	0.93

对各评价对象(比较序列)分别计算关联系数的均值(式 5),反映各评价对象与参考序列的关联关系。

计算得到每个影响因素的关联度:

$$r(X_0, X_i) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m e_i(k) \quad 5$$

$$r(X_0, X_1) = 0.70$$

$$r(X_0, X_2) = 0.71$$

$$r(X_0, X_3) = 0.63$$

$$r(X_0, X_4) = 0.68$$

$$r(X_0, X_5) = 0.64$$

结合页岩气成藏条件,根据灰色关联理论计算

结果可知,页岩埋藏深度、页岩的有效厚度及有机质丰度(TOC)、演化度(R_o)、总孔隙度对页岩气资源丰度都有较明显的影响,这与之前页岩气成藏条件的分析较吻合。根据灵敏度平均值计算结果可知,页岩气岩层埋藏深度、相对厚度对资源丰度影响较大,其次为演化度(R_o)、孔隙度与有机质丰度(TOC)。

3 结语

本文引入灰色关联分析法对页岩气资源丰度影响因素进行分析,认为页岩埋藏深度与厚度对页岩气资源丰度影响最大,其次为演化度(R_o),有机质丰度(TOC)、总孔隙度。本文的研究对页岩气的研究和开发具有借鉴意义。

参考文献:

- [1] 付斌,杨春生,王径,张连军,杜德甫,蒲俊伟,等. 美国页岩气藏勘探开发及其启示 [J]. 天然气技术,2010,4(6): 1-2,33.
- [2] 曾祥亮. 四川盆地及其周缘下志留统龙马溪组页岩气研究 [J]. 成都: 成都理工大学,2011.
- [3] 姜文斌,陈永进,李敏. 页岩气成藏特征研究 [J]. 复杂油气藏,2011,4(3): 1-5.
- [4] 李世臻,乔德武,冯志刚,刘丽君,王倩,聂海宽. 世界页岩气勘探发现现状及对中国的启示 [J]. 地质通报,2010,29(6): 918-924.
- [5] 许长春. 国内页岩气地质理论研究进展 [J]. 特种油气藏,2012,19(1): 9-17.
- [6] 邹才能,董大忠,王社教,李建忠,李新景,王玉满,等. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力 [J]. 石油勘探与开发,2010,37(6): 641-653.
- [7] 孟庆峰,侯贵廷. 页岩气成藏地质条件及中国上扬子区页岩气潜力 [J]. 油气地质与采收率,2012,19(1): 11-14.
- [8] 胡琳,朱炎铭,陈尚斌,杜志立. 蜀南双河龙马溪组页岩孔隙结构的分形特征 [J]. 新疆石油地质,2013,34(1): 79-82.
- [9] 蒲泊伶. 四川盆地页岩气成藏条件分析 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东),2008.
- [10] 蒲泊伶,蒋有录,王毅,包书景,刘鑫金. 四川盆地下志留统龙马溪组页岩气成藏条件及有利地区分析 [J]. 石油学报,2010,31(2): 225-230.
- [11] 聂海宽,唐玄,边瑞康. 页岩气成藏控制因素及中国南方页岩气发育有利区预测 [J]. 石油学报,2009,30(4): 484-491.
- [12] 张金川,金之钧,袁明生. 页岩气成藏机理和分布 [J]. 天然气工业,2004,24(7): 15-18.
- [13] 张金川,徐波,聂海宽,汪宗余,林拓. 中国页岩气资源勘探潜力 [J]. 天然气工业,2008,28(6): 136-140.
- [14] 刘树根,曾祥亮,黄文明,马文辛. 四川盆地页岩气藏和连续型-非连续型气藏基本特征 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2009,36(6): 578-592.
- [15] 刘建华,朱西养,王四利,魏继生. 四川盆地地质构造演化特征与可地浸砂岩型铀矿找矿前景 [J]. 铀矿地质,2005,21(6): 321-330.

The susceptibility of the shale gas resources abundances based on the grey association analysis

YANG Yu-ning^{1,2,3}, WANG Jian³

(1. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. Research Institute of Geophysical Exploration Engineering Co., Ltd., Zhongcheng Coal Field, Chengdu 610072, Sichuan, China; 3. Key Laboratory of Sedimentary Basin and Oil and Gas Resources, Ministry of Land and Resources, Chengdu 610081, Sichuan, China)

Abstract: The shale gas exploration is developing into a new field of the exploration and development of natural gas in China. Referenced to the representative shale basins in North America and the Lower Palaeozoic shale strata in the Sichuan Basin in China, the present paper focuses on the shale gas accumulation conditions and controlling factors influencing the shale gas resources abundances based on the grey association analysis. The technological processes of this method may be generalized as follows. Firstly, the reference data and correlation data are established from the abundant chaotic and random statistic data; then the dimensionless processing is made for the original data in order that these data may be comparable. Finally, these data are processed with the aid of the grey association analysis in order to evaluate these data and their contribution to the target elements. The main controlling factors include the burial depth, effective thickness, organic carbon abundance (TOC), thermal evolutionary degree (R_o) and total porosity. The result of research in this study may provide one useful approach to the future research of shale gas resources abundances.

Key words: grey association analysis; shale gas; resources abundance; susceptibility