

灰色关联度分析法在筛选页岩含气量主控因素中的应用

张博^{1,2}, 姜振学^{1,2*}, 原园¹, 李微², 李耀华^{1,2}

1 中国石油大学(北京)非常规天然气研究院, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

* 通信作者, jiangzhenxue@qq.com

收稿日期: 2016-11-23

国家科技重大专项项目(2011ZX05018-02)以及国家自然科学基金项目(41472112)资助

摘要 页岩含气量是页岩气资源评价和有利区优选的关键参数, 在勘查工作中需要筛选影响含气量的主控因素。但往往因为具备所有实验项目数据的样品非常稀少, 所以采用常见筛选方法做主控因素筛选时, 样品数据利用率不高, 影响筛选结果准确性。本文结合页岩气赋存机理以及实验取得的不同数据参数, 提取共计十二种可能控制总含气量的地化参数和储层物性因素, 引入灰色模型(Grey Model)中的关联度分析, 针对样品数据不匹配的混沌系统, 计算各项形成条件与含气量的灰色邓氏关联度与灰色绝对关联度, 并做乘积得相似关联度作为依据筛选出影响总含气量的主控因素, 据此建立起总含气量预测模型。对比主成分分析法、欧氏距离分析法的筛选结果, 采用后退线性回归方法对比筛选结果的优劣。灰色关联度分析法筛选的主控因素为黏土矿物含量、 S_1+S_2 、孔隙度、总有机碳含量。据此拟合出的线性模型 R^2 为0.878, 高于另外两种主流筛选方法。采用该筛选方案做研究区含气量分布图, 其预测趋势与实际试井结论符合。

关键词 页岩气; 含气量; 灰色关联度分析; 主控因素

0 前言

页岩气是当今最主要的非常规天然气资源之一^[1-2], 页岩含气量是页岩气资源评价和有利区优选的关键参数^[3-4], 通常采用现场解析法测量^[5]。为了对勘察与开发工作提供指导, 需要对影响总含气量的潜在影响因素进行筛选。前人根据各项地质条件对含气量的线性拟合关系做了大量的筛选工作^[6], 通过线性回归中显著性水平的检验判断该项因素对含气量的单因素关联度, 并选取多个高关联度的因素对含气量进行多元线性回归分析以得到含气性预测模型^[7], 也有通过主成分分析等方法, 对各项页岩气形成条件进行关联度排序筛选^[8]。但在实际科研当中, 因为各项实验样品不匹配, 具备所有实验项目数据的样品往往非常

稀少; 部分数据尽管可以结合测井数据和实测数据拟合得到, 但无法排除自变量之间的关联, 可信度存疑; 筛选时不同因素分析时采用的样品数不同, 准确度受到样品量控制, 传统方法难以进行有效的筛选, 故本文引入灰色模型(Grey model)中的关联度分析。灰色模型是指系统内的一部分信息是已知的, 一部分系统是未知的, 系统内的各因素间有不确定的关系, 符合研究区样品数据的现状。针对样品数据不匹配的混沌系统, 计算各项影响因素与含气量的关联度, 根据该关联度从各类页岩气形成条件中筛选出主控因素并解释其地质意义, 以达到在勘探度较低区域预测甜点区, 指导勘探布井的目的。

灰色系统理论是由邓聚龙教授于1982年创立, 迄今已广泛运用于经济、生态、军事、医学、教育等众

引用格式: 张博, 姜振学, 原园, 李微, 李耀华. 灰色关联度分析法在筛选页岩含气量主控因素中的应用. 石油科学通报, 2018, 02: 134-143
ZHANG Bo, JIANG Zhenxue, YUAN Yuan, LI Wei, LI Yaohua. Grey correlation analysis to elucidate the main controlling factors of shale gas content. Petroleum Science Bulletin, 2018, 02: 134-143. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2018.02.014

多领域。灰色关联分析不仅是灰色理论的重要组成部分,同时也是灰色系统分析、预测和决策的基石^[9]。王森^[10]等用灰色关联度分析判断声波波速与页岩理化性能之间关系,刘二虎^[11]和詹泽东^[12]等人就原始压裂、地质参数与气井产能之间的关联性用该方法进行分析,许珂^[13]等用该方法分析含水层富水性的主控因素。

1 区域地质背景

鄂尔多斯盆地是一个多旋回克拉通盆地,经历了早古生代北陆表海、晚古生代华北滨浅海、中生代内陆湖盆和新生代周缘断陷等多旋回演化^[14]。鄂尔多斯盆地由伊盟隆起、渭北隆起、西缘逆冲带、晋西褶皱带、天环坳陷以及陕北斜坡等6个二级构造单元构成^[15]。研究区位于鄂尔多斯盆地陕北斜坡东南部(图1),面积约为4400 km²,区域构造为一平缓的西倾单斜,构造稳定且平缓,地层倾角小于1°。平均坡降7~8 m/km,内部构造简单,局部发育差异压实形成的低幅度鼻状隆起,其中勘探目的层段长7段厚100~120 m,岩性为暗色泥岩、碳质泥岩、油页岩

夹薄层粉、细砂岩,产介形虫、方鳞鱼化石及黄铁矿颗粒^[16],以湖泊体系为主。在该时期湖侵达到了鼎盛期,具备丰富的有机质,是主要的生油岩系^[17]。

目的层段整体处在镜质体反射率为0.8%~1.0%的低成熟生气阶段,由钻井取芯样品现场解析实验得到长7段解析气量平均1.07 cm³/g,通过UBSM直接法进行损失气恢复后得到的总含气量平均3.50 cm³/g^[16],含气性较好,勘探开发潜力大。但其含气性主控因素尚不明确,针对这一问题从研究区样品各项地化和物性实验中提取了相关因素,引入灰色关联度分析进行主控因素筛选。

2 灰色关联度分析的基本原理

灰色关联度是根据事物或因素的序列曲线的相似程度来判断其关联程度的。通过关联度分析,可以以归一化的方式突出各个因素的发展趋势之间的差异,然后通过比较该差异的大小来明确系统的主导因素和潜在因素。它可以在很大程度上减少由于信息不对称带来的损失,并且具有所需样品少,对数据要求较低,样本不需要有规律性分布的优点。

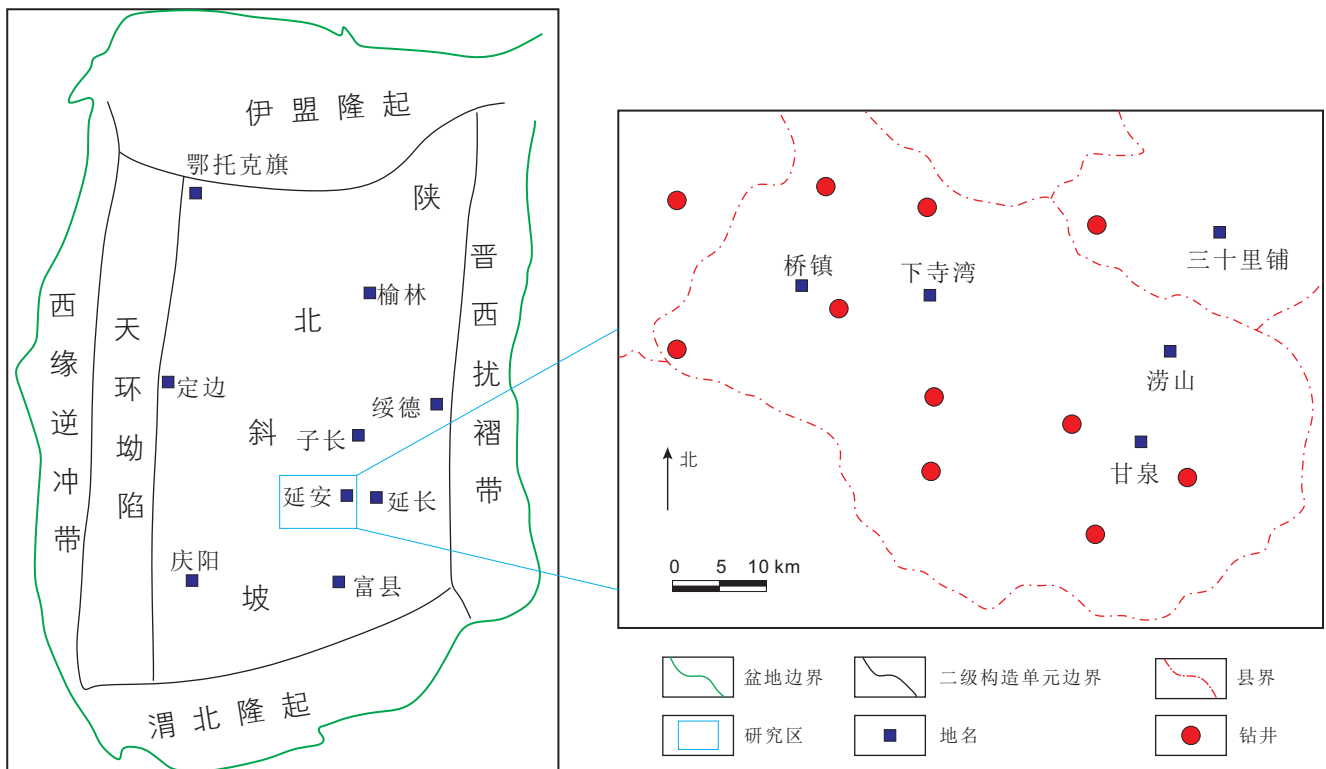


图1 鄂尔多斯盆地寺湾地区位置示意图

Fig. 1 Location map of Xiasiwang area in Ordos Basin

目前针对灰色关联度分析,发展出了最初的邓氏关联度^[18]到绝对关联度^[19]、T型关联度^[20]等一系列适用于各数据条件下的不同方法。针对页岩含气量主控因素的筛选,本文采用邓氏关联度与绝对关联度联立的方法,用不同的样本代替动态序列,将原来随时间变化的关联度分析转换为对同一项测试中样本数据随样本的变化。由于页岩气形成条件样本是以不同样本点为变化的离散数据,不存在灰色关联度原本针对的时间序列之间的前后关联,可以采用样品深度作为排序标准,模拟时序上的变化从而对比变化趋势。

由于样品形成条件参数序列的单位不一致,首先对数据进行归一化预处理。

选取含气量作为因变量, n 个自变量分别为各种页岩气形成条件。设含气量数据构成参考序列 $\{X_0(k)\}$,共有 m 个样品。各形成条件数据构成比较序列 $\{X_i(k)\}$,如式(1)。

$$\begin{aligned} X_0(k) &= \{x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(m)\} \\ X_i(k) &= \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(m)\} \end{aligned} \quad (1)$$

$$(k=1, 2, \dots, m; i=1, 2, \dots, n)$$

当 $k=1$ 时的 $X_0(1)$ 和 $X_i(1)$ 和组成的序列为参考序列,必须是具备全部形成条件参数的 11 个样品之一。利用参考序列对上述序列无量纲化,使得各序列之间具有可比性。

$$\begin{aligned} X_0'(k) &= \left\{ \frac{x_0(k)}{x_0(1)} \right\} = \left\{ \frac{x_0(1)}{x_0(1)}, \frac{x_0(2)}{x_0(1)}, \dots, \frac{x_0(m)}{x_0(1)} \right\} \\ X_i'(k) &= \left\{ \frac{x_i(k)}{x_i(1)} \right\} = \left\{ \frac{x_i(1)}{x_i(1)}, \frac{x_i(2)}{x_i(1)}, \dots, \frac{x_i(m)}{x_i(1)} \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

$$(k=1, 2, \dots, m; i=1, 2, \dots, n)$$

对无量纲化的数据进行灰色关联度分析。邓氏关联度又称为相对关联度或一般关联度,利用位移差反映两序列间发展过程或量级的相近性^[18]。若两时间序列在对应位点上的位移差的绝对值小,则认为两者形态近似,邓氏关联度就大;反之则小。邓氏关联度的数学模型为:

(1)求含气量与任一形成条件在同一样品上的关联系数:

$$\varepsilon_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0'(k) - x_i'(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0'(k) - x_i'(k)|}{|x_0'(k) - x_i'(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0'(k) - x_i'(k)|} \quad (3)$$

$$(k=1, 2, \dots, m; i=1, 2, \dots, n)$$

式中, ρ 为分辨系数,一般情况下取 0.5 。

(2)计算第 i 个参数与含气量的关联度:

$$r_i = \frac{1}{m} \sum_{k=2}^m \varepsilon_i(k) \quad (4)$$

$$(k=1, 2, \dots, m; i=1, 2, \dots, n)$$

式中样品数量 m 随 i 的不同而变化,即不同测试实验项目的样品数量不同。

绝对关联度是根据因素的曲线变化势态的接近程度来计算灰色关联度^[19]。对于离散数据数列,所谓两曲线的接近程度,是指两时间序列在各对应时段上曲线斜率的接近程度,若两曲线在各时段上曲线斜率相等或相差较小,关联系数的分母就大,则二者的关联系数就大;反之则小。绝对关联度的基本数学模型为:

(1)一次累减生成,以找到样品形成条件数值曲线不断变化的斜率:

$$\begin{aligned} a_0 d &= X_0'(k+d) - X_0'(k) \\ a_i d &= X_i'(k+d) - X_i'(k) \end{aligned} \quad (5)$$

$$(k=1, 2, \dots, m; i=1, 2, \dots, n)$$

式中, d 为间隔的样品数量,如该项形成条件的测试在样品分布上是连续的,则 d 为 1 。

(2)利用斜率的近似程度,求含气量与任一形成条件在同一样品上的关联系数:

$$\varepsilon_i(k) = \frac{1}{1 + \frac{|a_0 - a_i|}{d}} \quad (6)$$

$$(k=1, 2, \dots, m; i=1, 2, \dots, n)$$

(3)计算第 i 个参数与含气量的关联度:

$$r_i = \frac{1}{m} \sum_{k=2}^m \varepsilon_i(k) \quad (7)$$

$$(k=1, 2, \dots, m; i=1, 2, \dots, n)$$

在最后的关联度计算步骤中,可以发现样品数越大分母越大,也就将差异量平均化,从而考虑到所有有效数据样品对筛选的贡献;并且差异量存在正负,对正相关负相关都可以进行计算。

由于邓氏关联度是根据两序列在对应曲线段上的距离接近程度来判定,绝对关联度则是根据两序列在对应曲线段上的斜率的接近程度来判定,因此邓氏关联度越大,说明比较序列与参考序列形态越一致;绝对关联度越大,说明比较序列与参考序列变化态势越一致。因此对两种关联度直接做积,可以兼顾归一化后两种参数序列之间形态的近似和变化趋势的近似。将绝对关联度和邓氏关联度求积,得到考虑形态和变化趋势两者的关联度—相似关联度,如式(8)所示:

$$r_{\text{相似}} = r_{\text{邓氏}} \cdot r_{\text{绝对}} \quad (8)$$

3 主控因素关联度筛选

3.1 页岩含气量主控因素

通过现场解析实验结合UBSM直接法恢复损失气计算得到样品总含气量^[16]。通过对研究区页岩气形成条件的分析,结合陆相页岩气赋存机理及实验样品取得的数据类型,提取研究区中部分烃源岩地化参数和储层物性参数进行主控因素分析。一般而言,页岩的含气能力与页岩的总有机碳含量^[21]、有机质热演化程度、孔隙比表面积^[22]、泥页岩地层温度和压力^[23]、泥页岩地层中原始含水量^[24]等因素相关。举出下列十二种可能控制总含气量的因素,包括:渗透率、地层压力、地层温度、孔隙度、岩石热解峰温(T_{max})、残留烃和尚未裂解的烃(S_1+S_2)、总有机碳含量(TOC)、含水饱和度、黏土矿物含量百分比、石英含量百分比、比表面积以及孔容。

研究区样品在不同的实验项目中取得上述参数结果,由于样品品质、数量等的影响,不同实验送样数目不同,总计研究区样品共60份,其中11份样品取得上述全部参数,其他49份样品在不同项目上均有不同程度的实验结果缺失(见表1)。

表1 页岩气形成条件数据来源

Table 1 The data source for shale gas formation conditions

测试项目	实验测试方法	样品数量
地层温度、地层压力	岩心录井	60
T_{max} 、 TOC 、 S_1+S_2	岩石热解生烃实验	51
渗透率、孔隙度	脉冲孔隙度物性测试	60
黏土、石英含量百分比	XRD全岩分析	13
含水饱和度 S_w	测井数据拟合	18
孔容、比表面积	氮气吸附实验	11

表2 页岩各形成条件与总含气量的灰色关联度

Table 2 The grey correlations between total gas content and shale formation conditions

形成条件	绝对关联度	邓氏关联度	相似关联度	形成条件	绝对关联度	邓氏关联度	相似关联度
渗透率	0.505	0.018	0.009	总有机碳含量	0.702	0.019	0.014
压力	0.561	0.021	0.012	含水饱和度 S_w	0.673	0.005	0.003
温度	0.830	0.011	0.009	黏土矿物含量	0.989	0.046	0.045
孔隙度	0.882	0.073	0.064	石英含量	0.695	0.005	0.004
T_{max}	0.618	0.004	0.002	比表面积	0.774	0.040	0.031
S_1+S_2	0.720	0.032	0.023	孔容	0.506	0.019	0.009

3.2 灰色关联度主控因素筛选

从60块具备不完整数据的样品中,求出各形成条件参数与总含气量的绝对关联度和相似关联度。将绝对关联度与邓氏关联度相乘,得到考虑形态和变化趋势的灰色相似关联度如表2。

最终按照灰色相似关联度从大到小对各条件进行排序,顺序为:孔隙度>黏土矿物含量>比表面积> S_1+S_2 >总有机碳含量>压力>孔容>温度>渗透率>石英含量>含水饱和度> T_{max} 。统一选择关联度排序前5项作为含气量主控因素以便后续对比分析,分别为:孔隙度(0.064)、黏土矿物含量(0.045)、比表面积(0.031)、 S_1+S_2 (0.023)、总有机碳含量(0.013)。

3.3 主成分分析和欧氏距离分析

主成分分析法是一种数学变换的方法,它通过建立数据矩阵,把给定的一组相关变量通过线性变换转换成另一组不相关的变量,去除变量之间的相关性,建立尽可能少的新的变量,使得这些新变量是两两不相关的,而且这些新变量在反映信息方面尽可能保持原有的信息^[25]。

主成分分析需要建立样品数据矩阵,虽然目前通过插值补缺的方法^[26],但仍旧对分析结果存在不同程度的影响。且由于受控于样品数,样品数较少时体

现的相关性较大,必须要结合显著性检验判断,显著性检验区间越小则相关性越显著。对12项页岩气形成条件与含气量的数据矩阵做主成分分析如表3所示。为对比灰色关联度得到的5项主控因素,选取显著性小于0.05的5项参数作为含气量主控因素,分别为:孔隙度、 T_{\max} 、温度、总有机碳含量、 S_1+S_2 。

欧式距离分析是将不同的参数视作坐标向量的维数,计算欧几里得直线距离,因此需要样品的全部形成条件参数^[27],所有样品中只有11个有效样品可以进行欧式距离分析。欧氏距离越小两者之间的相似程度越高。对包含12项页岩气形成条件与含气量数据的数据矩阵做欧式距离分析,结果如表4所示,由欧氏距

离的远近得到的关联度最高的5项含气量主控因素为:黏土矿物含量、 T_{\max} 、孔隙度、总有机碳含量和 S_1+S_2 。

4 线性回归验证

通过上述三种关联度分析方法筛选出的主控因素及其关联度排序如图2所示。

将三种筛选方法筛选出来的5项主控因素利用SPSS软件的后退线性回归模块对总含气量进行线性回归以建立含气量模型。后退线性回归会在指定的5项主控因素中依次退出不同的主控因素,通过退出前后的 R^2 变化剔除对因变量含气量作用不显著的主控因

表3 页岩各形成条件的主成分分析相关性

Table 3 The correlation between total gas content and shale formation conditions by principal component analysis

形成条件	相关性	显著性	样品数	形成条件	相关性	显著性	样品数
S_1+S_2	0.518	0	51	比表面积	0.595	0.091	11
T_{\max}	-0.365	0.008	51	S_w	-0.381	0.119	18
温度	-0.328	0.010	60	孔容	0.359	0.342	11
孔隙度	0.319	0.013	60	压力	0.096	0.466	60
总有机碳含量	0.302	0.031	51	渗透率	0.046	0.726	60
石英含量	-0.501	0.081	13	黏土矿物含量	-0.067	0.827	13

表4 页岩各形成条件与总含气量的欧氏距离相关性

Table 4 The Euclidean distance between total gas content and shale formation conditions

形成条件	欧氏距离	形成条件	欧氏距离
黏土矿物含量	0.179	温度	0.323
孔隙度	0.196	比表面积	0.385
S_1+S_2	0.197	石英含量	0.396
总有机碳含量	0.247	S_w	0.502
T_{\max}	0.250	孔容	0.647
压力	0.285	渗透率	3.169

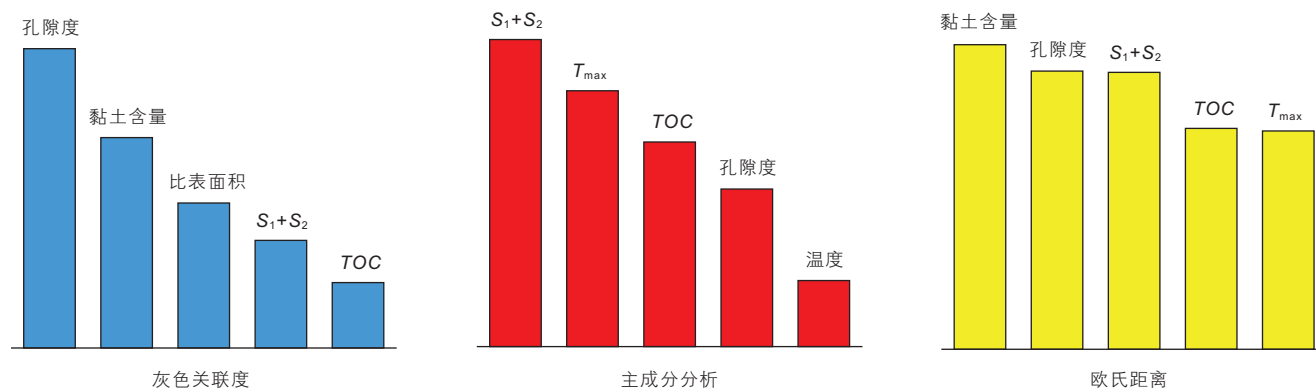


图2 三种筛选方法的主控因素排序

Fig. 2 The rank of main control factors elucidated by three methods

素, 终止条件为对某一个被退出的变量的回归系数作显著性检查时, P 值小于给定显著性水平, 则退出变量的过程结束, 所得方程即为“最优”回归方程, 反之则继续退出下一个变量。后退线性回归后分别得到表 5 所示的拟合 R^2 数据, 其中灰色关联度筛选出的 5 种因素后退回归两次就满足终止条件, 另外两种筛选方案均后退回归三次后终止。

三种方法中, 灰色关联度分析筛选出来的 5 种主控因素拟合得到的 R^2 最高, 排除样品数量影响因素后的调整 R^2 也是以灰色关联度最高。据此可知在部分数据残缺不全的情况下, 运用灰色关联度分析筛选的含

气量主控因素最能体现实际控制因素。由于灰色关联度在筛选之时纳入了更多的样品数据, 提高了样品数据利用率, 而非主流筛选方法采取的仅选择具备全部参数的样品数据或进行数据插补来进行关联度分析。并且灰色关联度分析还从斜率和数值差两方面考虑, 避免了类似欧式距离法仅考虑数值距离接近而忽略趋势变化不同的缺点。

三种筛选方法的回归准确度随回归次数变化如图 3。在灰色关联度分析筛选出的几个主控因素的后退线性回归中, 比表面积被排除的结果使得调整 R^2 更高 (图 3b), 而如果进一步排除额外的参数则会使得模型

表 5 三种方法筛选的主控因素后退线性回归 R^2 数据

Table 5 Backward linear regression R^2 data for the main controlling factors of three methods

退出次数	模型	R^2	调整 R^2	退出参数
1	灰色	0.884	0.768	—
	主成分	0.408	0.342	—
	欧式	0.784	0.568	—
2	灰色	0.878	0.797	比表面积
	主成分	0.396	0.344	孔隙度
	欧式	0.784	0.639	T_{\max}
3	灰色	—	—	—
	主成分	0.382	0.343	温度
	欧式	0.780	0.686	比表面积

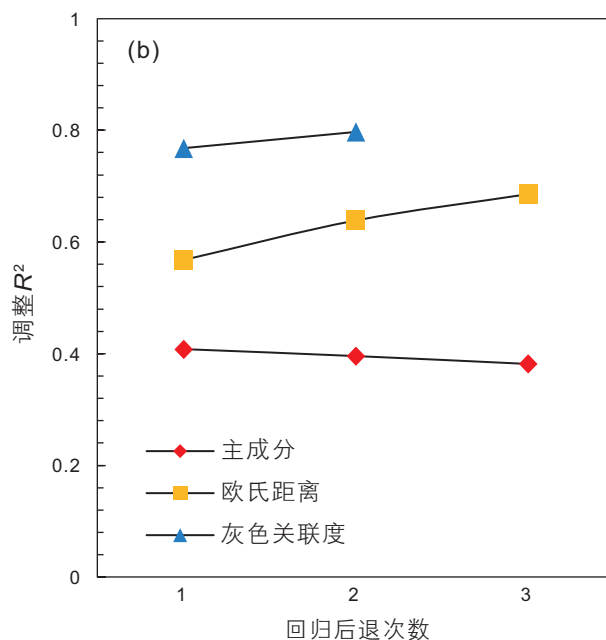
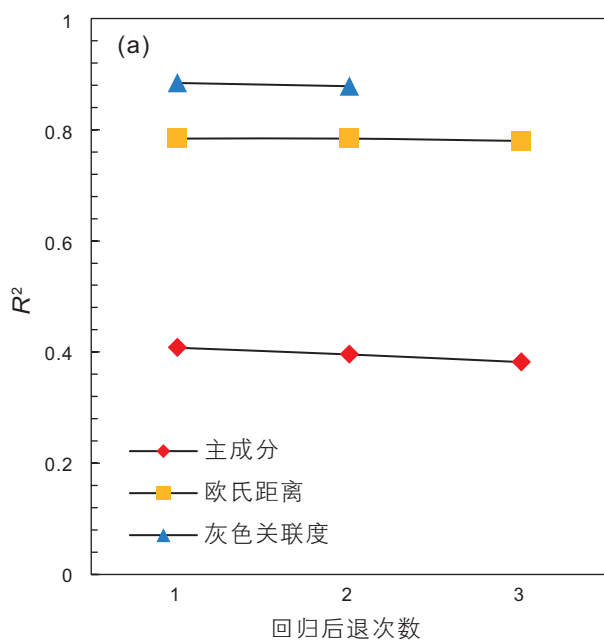


图 3 三种筛选方法的回归准确度随回归次数变化: (a)线性回归 R^2 ; (b)线性回归调整 R^2

Fig. 3 Regression accuracy changes with regression times for three methods: (a) linear regression R^2 ; (b) linear regression adjustment R^2

准确度大幅下降故退出终止。加之比表面积是通过氮气吸附实验测定,检测成本较高,出于经济性考虑排除比表面积,取剩余4项形成条件作为研究区含气量主控因素进行建模。

将灰色关联度分析筛选出的4项主控因素与研究区地质情况相结合,对含气量与每个主控因素的关联(图4)进行分析。

孔隙可以为气体提供赋存空间,是页岩气的主要赋存场所,不论是游离气还是吸附气都依赖于孔隙空间的大小多寡,因此孔隙度越大,页岩气含气量越高,与总含气量呈正相关(图4a)。

残留烃和尚未裂解的烃类物质(S_1+S_2)随着有机质生烃潜力的消耗和排烃过程而逐步降低。研究区整体处在镜质体反射率为0.8%~1.0%的低成熟生气阶段^[28],较低的生烃潜量指示其成熟度处在该成熟度范围内较高的水平,更有利于低熟条件下湿气的生成,

因此更低的生烃潜力在研究区指示更高的含气量,与总含气量呈负相关(图4b)。

有机碳作为主要的生烃物质,代表了目的层段的生烃能力,又会在演化成熟过程中生成有机酸促使发育有机质溶蚀孔缝(研究区存在大量有机质溶蚀原生矿物产生的微孔^[16])。同时有机质干酪根表面极强的吸附能力也为吸附气的赋存提供了相应条件(研究区目的层段现场解析中平均吸附气占比60%~80%^[16])。因此总有机碳含量与总含气量呈正相关(图4c)。

黏土矿物,如伊利石、蒙脱石、高岭石是微孔隙和微裂缝发育的主要场所^[29],提供了气体附着的一部分比表面积,而较大规模的粒间孔缝也是游离气赋存的游离空间。因此黏土矿物含量与总含气量也具有较弱的正相关关系(图4d)。

该模型中自变量的参数相关性与实际地质解释相符,将上述4种主控因素(孔隙度、黏土矿物含量、

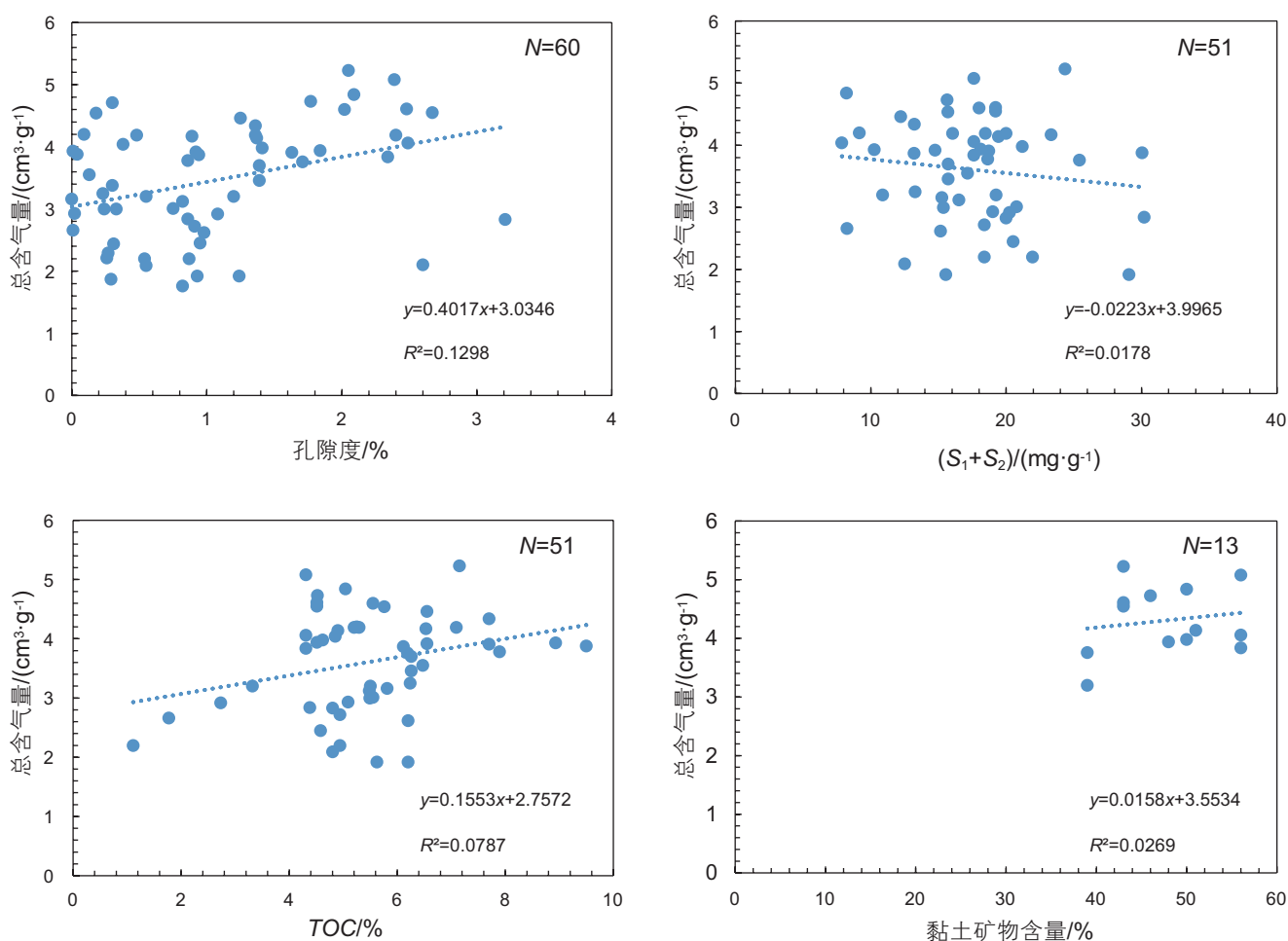


图4 实测含气量与筛选出的主控因素相关性: (a)孔隙度; (b) S_1+S_2 ; (c) 总有机碳含量; (d)黏土矿物含量

Fig. 4 The dependency between measured air content and clucidated controlling factors: (a)porosity;(b) S_1+S_2 ;(c)TOC;(d) content of clay minerals

总有机碳含量、 S_1+S_2)通过最小二乘法进行线性回归,得到研究区长7段总含气量预测模型如式(9)所示:

$$V = 0.824 \times \Phi - 0.086 \times (S_1 + S_2) + 0.541 \times TOC + 0.053 \times V_{\text{clay}} - 0.654 \quad (9)$$

式中, V 为总含气量,单位为 cm^3/g ; Φ 为孔隙度,单位为%; S_1+S_2 为生烃潜力,单位为 mg/g ; TOC 为总有机质碳含量,单位为%; V_{clay} 为黏土矿物含量,单位为%。

模型 R^2 为0.878,拟合精度较高。利用这4项主控因素推导出的预测模型计算预测含气量,与样品实测含气量进行对比,如图5所示。

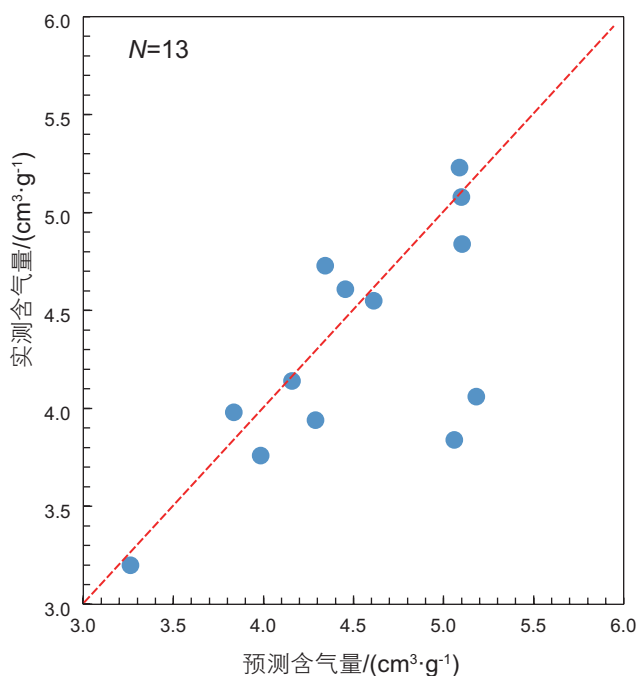


图5 实测总含气量与计算含气量关系

Fig. 5 The relation between measured and predicted air content

据此利用该模型根据现有实验测试结果对研究区页岩气总含气量进行预测,得到预测总含气量等值线图(图6)。

参考文献

- [1] BUSTIN R M. Gas shale tapped for big pay[J]. AAPG Explorer, 2005, 26(2): 5-7.
- [2] ROSS D J K, BUSTIN R M. Shale gas potential of the Lower Jurassic Gordondale member, northeastern British Columbia, Canada[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2007, 55(1): 51-75.
- [3] MONTGOMERY S L, JARVIE D M, BOWKER K A, et al. Mississippian Barnett Shale, Fort Worth Basin, north-central Texas: Gas-shale play with multitrillion cubic foot potential[J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(2): 155-175.
- [4] BOWKER K A. Barnett shale gas production, Fort Worth Basin: Issue sand discussion[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 523-533.
- [5] 李玉喜, 乔德武, 姜文利, 等. 页岩气含气量和页岩气地质评价综述[J]. 地质通报, 2011, 30(2): 308-317. [LI Y X, QIAO D W,

由图6可知,研究区预测总含气量自东向西南方向逐渐增大。该结论与研究区试井产气和含气性显示结论基本一致,延长下寺湾地区首口产工业气流井X1井即位于图中含气量大于 $4.0 \text{ cm}^3/\text{g}$ 的含气量有利区域。

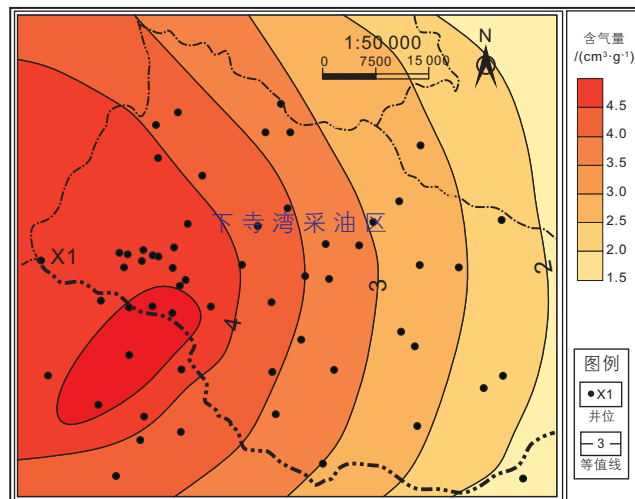


图6 下寺湾地区预测总含气量等值线图

Fig. 6 The contour map of predicted total air content in Xiasiwan area

5 结论

(1)相比于常用于主控因素筛选的主成分分析法和欧氏距离分析法,灰色关联度分析法能够利用更多的有效数据,兼顾数值相似和趋势相似,筛选结果合理,符合地质认识,可有效运用在地质勘探领域的主控因素筛选中。

(2)灰色关联度分析筛选出下寺湾地区长7段陆相页岩总含气量的主控因素为孔隙度, S_1+S_2 , 总有机碳含量, 黏土矿物含量以及比表面积。其中除 S_1+S_2 与含气量呈负相关外,其余均为正相关关系。采用灰色关联度筛选结果的线性回归模型拟合精度较高,得到的预测结果与生产实际吻合。

- JIANG W L, et al. Gas content of gas-bearing shale and its geological evaluation summary[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2): 308–317.]
- [6] 毕赫, 姜振学, 李鹏, 等. 渝东南地区黔江凹陷五峰组—龙马溪组页岩储层特征及其对含气量的影响[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(8): 1275–1283. [BI H, JIANG Z X, LI P, et al. Shale reservoir characteristics and its influence on gas content of Wufeng-Longmaxi Formation in the southeastern Chongqing[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(8): 1275–1283.]
- [7] 李武广, 钟兵, 杨洪志, 等. 页岩储层含气性评价及影响因素分析—以长宁—威远国家级试验区为例[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(10): 1653–1660. [LI W G, ZHONG B, YANG H Z, et al. Evaluation of gas-bearing property for shale reservoir and its influence factors analysis: Taking Changning-Weiyuan national experimental zone as an example[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(10): 1653–1660.]
- [8] 姜生玲, 朱亮亮, 洪克岩, 等. 主成分分析法在页岩气有利区优选中的应用[J]. 地质学刊, 2017, 41(2): 251–256. [JIANG S, ZHU L L, HONG K Y, et al. Application of principal component analysis in shale gas favorable areas optimization[J]. Journal of Geology, 2017, 41(2): 251–256.]
- [9] 李宏艳. 关于灰色关联度计算方法的研究[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(9): 1231–1233+1270. [LI H Y. Study on the calculation method of grey relationship degree[J]. Systems Engineering & Electronics, 2004, 26(9): 1231–1233+1270.]
- [10] 王森, 刘洪, 陈乔, 等. 渝东南下志留统龙马溪组页岩理化性能实验[J]. 石油学报, 2014(2): 245–252. [WANG S, LIU H, CHEN Q, et al. Physical and chemical properties experiment on shale in Longmaxi Formation of Lower Silurian, southeast Chongqing[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014(2): 245–252.]
- [11] 刘二虎. 应用灰色关联法分析延长气田子长东区山2层产能影响因素[J]. 油气井测试, 2014(2): 18–20. [LIU E H. The analysis on 2th member of Shan in Yanchang gas field by gray correlation method [J]. Well Testing, 2014(2): 18–20.]
- [12] 詹泽东, 周桦, 郭莉霞, 等. 基于灰色关联度的气井主控因素定量描述[J]. 工业安全与环保, 2015(9): 55–57. [ZHAN Z D, ZHOU H, GUO L X, et al. The modeling and application of the key factors of controlling production of gas well based on gray correlation[J]. Industrial Safety & Environmental Protection, 2015(9): 55–57.]
- [13] 许珂, 张维, 申建军, 等. 灰色理论在裂隙含水层富水性评价中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2016(8): 816–820. [XUE K, ZHANG W, SHEN J J, et al. Fissured aquifer water yield capacity evaluation based on fractal dimension and weighted grey relational degree theory[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2016(8): 816–820.]
- [14] 王峰, 陈洪德, 赵俊兴, 等. 鄂尔多斯盆地寒武系—二叠系层序界面类型特征及油气地质意义[J]. 沉积与特提斯地质, 2011, 31(1): 6–12. [WANG F, CHEN H D, ZHAO J X, et al. Sequence boundary and petroleum geology of the Cambrian-Permian strata in the Ordos Basin[J]. Sedimentary Geology & Tethyan Geology, 2011, 31(1): 6–12.]
- [15] 李功强, 赵永刚, 温伟. 鄂尔多斯盆地镇泾油田长8段储层的判别标准[J]. 石油地质与工程, 2010, 24(5): 16–19. [LI G Q, ZHAO Y G, WEN W. Determining criteria for the reservoir in Chang 8 of Zhenjing oilfield in Ordos Basin. [J]. Petroleum Geology & Engineering, 2010, 24(5): 16–19.]
- [16] 王香增, 郝进, 姜振学, 等. 鄂尔多斯盆地地下寺湾地区长7段油溶相页岩气量影响因素及其分布特征[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(4): 744–753. [WANG X Z, HAO J, JIANG Z X, et al. Influencing factors and distributions of the oil dissolved shale gas content of member Chang 7 shale in Xiasiwan Area, Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(4): 744–753.]
- [17] 张文正, 杨华, 杨奕华, 等. 鄂尔多斯盆地长7优质烃源岩的岩石学、元素地球化学特征及发育环境[J]. 地球化学, 2008, 37(1): 59–64. [ZHANG W Z, YANG H, YANG Y H, et al. Petrology and element geochemistry and development environment of Yanchang Formation Chang 7 high quality source rocks in Ordos Basin[J]. Geochimica, 2008, 37(1): 59–64.]
- [18] 邓聚龙. 灰色系统理论教程[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990. [DENG J L. Tutorial on grey system theory [M]. Wuhan: Huazhong University of science & technology press, 1990.]
- [19] 梅振国. 灰色绝对关联度及其计算方法[J]. 系统工程, 1992, 10(5): 43–44. [MEI Z G. Grey absolute correlation degree and its calculation method[J]. Systems Engineering, 1992, 10(5): 43–44.]
- [20] 唐五湘. T型关联度及其计算方法[J]. 数理统计与管理, 1995, 14(1): 34–37. [TANG W X. T gray correlation degree and its calculation method[J]. Mathematical Statistics & Management, 1995, 14(1): 34–37.]
- [21] 李明明. 页岩含气量主控因素及其定量模型[D]. 大庆: 东北石油大学, 2015. [LI M M. Main control factors of Shale gas content and its quantitative models[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2015.]
- [22] 党伟, 张金川, 黄潇, 等. 陆相页岩含气性主控地质因素—以辽河西部凹陷沙河街组三段为例[J]. 石油学报, 2015, 36(12): 1516–1530. [DANG W, ZHANG J C, HUANG X, et al. Main-controlling geological factors of gas-bearing property of continental shale gas: A case study of member 3rd of Shahejie Formation in western Liaohe sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(12): 1516–1530.]
- [23] 余川, 程礼军, 曾春林, 等. 渝东北地区下古生界页岩含气性主控因素分析[J]. 断块油气田, 2014, 21(3): 296–300. [YU C, CHENG L J, ZENG C L, et al. Main controlling factor analysis on gas-bearing property of Lower Paleozoic shale in northeastern Chongqing Region[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2014, 21(3): 296–300.]
- [24] 李靖, 李相方, 王香增, 等. 页岩黏土孔隙含水饱和度分布及其对甲烷吸附的影响[J]. 力学学报, 2016, 48(5): 1217–1228. [LI J,

- LI X F, WANG X Z, et al. Effect of water distribution on methane adsorption capacity in shale clay. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, 48(5): 1217–1228.]
- [25] 张文霖. 主成分分析在SPSS中的操作应用[J]. *市场研究*, 2005, (12): 31–34. [ZHANG W L. The application of principal component analysis in SPSS[J]. *Market Research*, 2005, (12): 31–34.]
- [26] 张晓琴, 王敏. 基于主成分分析的成分数据缺失值插补法[J]. *应用概率统计*, 2016, 32(1): 101–110. [ZHANG X Q, WANG M. Imputation of missing values for compositional data based on principal component analysis[J]. *Chinese Journal of Applied Probability & Statistics*, 2016, 32(1): 101–110.]
- [27] 刘瑞元. 加权欧氏距离及其应用[J]. *数理统计与管理*, 2002, 21(5): 17–19. [LIU R Y. Weighted euclidean distance and its application[J]. *Mathematical Statistics & Management*, 2002, 21(5): 17–19.]
- [28] 姜呈馥, 王香增, 张丽霞, 等. 鄂尔多斯盆地东南部延长组长7段陆相页岩气地质特征及勘探潜力评价[J]. *中国地质*, 2013, 40(6): 1880–1888. [JIANG C F, WANG X Z, ZHANG L X, et al. Geological characteristics of shale and exploration potential of continental shale gas in of Yanchang 7 Formation, southeast Ordos Basin[J]. *Geology in China*, 2013, 40(6): 1880–1888.]
- [29] 高凤琳, 宋岩, 姜振学, 等. 黏土矿物对页岩储集空间及吸附能力的影响[J]. *特种油气藏*, 2017, 24(3): 1–8. [GAO F L, SONG Y, JIANG Z X, et al. Influence of clay minerals on shale storage space and adsorptive capacity[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2017, 24(3): 1–8.]

Grey correlation analysis to elucidate the main controlling factors of shale gas content

ZHANG Bo^{1,2}, JIANG Zhenxue^{1,2}, YUAN Yuan², LI Wei², LI Yaohua^{1,2}

1 Unconventional natural gas institute, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

Abstract Gas content is the key parameter of shale gas resource evaluation and favorable area optimization. The main factors controlling gas content need to be considered in exploration. But due to the fact that not each sample can cover all factors, samples which have all kinds of experimental data are rare and the data utilization rate is poor when using common methods in finding out the main controlling factors. Combining with shale gas occurrence mechanisms and all kinds of experimental data, twelve factors that may control the total gas content are selected from geochemical parameters and reservoir properties. By using grey model correlation analysis for the chaos system where sample data does not cover all factors, Deng grey correlation and absolute grey correlation are calculated. we multiplied both together to form a similar grey correlation, and then establish the total gas content prediction model accordingly. Compared with principal component analysis and euclidean distance analysis, we used the linear backward regression method to validate the pros and cons of possible results. This shows that the main controlling factors shown by grey correlation analysis are clay content, S_1+S_2 , porosity and *TOC*. The R^2 of the linear model is 0.878, which is higher than the other two methods. A gas content distribution map of the study area shows that the trend agrees with the actual well tests.

Keywords shale gas; gas content; grey correlation analysis; main controlling factors

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2018.02.014

(编辑 付娟娟)