

文章编号: 1001-1986(2005)03-0022-04

# 基于多元逐步回归分析的煤储层含气量预测模型 ——以沁水盆地为例

李贵红, 张泓, 崔永君, 张培河, 董敏涛 (煤炭科学研究院西安分院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 以沁水盆地为例, 运用多元逐步回归分析方法, 建立了以 Langmuir 体积和含气饱和度为参数的含气量预测模型; 复相关系数、F 检验、t 检验结果表明, 该模型满足线性与方差齐性的假设, 拟合效果较好。运用此模型, 结合多因素权重分析确定的含气饱和度和实测的 Langmuir 体积数据, 实现了沁水盆地山西组主煤层含气量预测。对比分析显示, 该含气量预测模型有一定的可行性。

**关键词:** 煤储层; 含气量; 多元逐步回归分析; 预测模型; 沁水盆地

中图分类号: P618.11 文献标识码: A

## A predictive model of gas content in coal reservoirs based on multiple stepwise regression analysis: a case study from Qinshui Basin

LI Gui-hong, ZHANG Hong, CUI Yong-jun, ZHANG Pei-he, DONG Min-tao  
(Xi'an Branch, China Coal Research Institute, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Taken Qinshui Basin as an example a predictive model of gas content is established by multiple stepwise regression analysis, using Langmuir volume and gas saturation as its parameters. The result of multiple correlation coefficient testing, F-testing and t-testing indicates that the model meets the hypothesis testing of linearity and its matching effect is preferable. Based on the model and combined with gas saturation determined by the multifactor weight analysis and tested Langmuir volume data the gas content of main coal from the Shanxi Formation in the Qinshui Basin is predicted successfully. The comparative result indicates that the model is feasible to some extent.

**Key words:** coal reservoir; gas content; multiple stepwise regression analysis; predictive model; Qinshui Basin.

## 1 引言

含气量是煤储层评价最为重要的一个参数, 但在实际工作中, 由于含气量数据太少, 需进行含气量预测, 来指导有利区块的初选。目前国内煤层含气量预测方法主要有: 含气量一梯度法<sup>[1~3]</sup>、煤级一灰分一含气性类比法<sup>[1~3]</sup>、综合地质条件分析法<sup>[1~3]</sup>、等温吸附曲线法<sup>[4]</sup>、相对瓦斯涌出量法<sup>[5]</sup>、数学模型预测法<sup>[6~8]</sup>等。含气量一梯度法, 主要是根据一个地区有限的含气量数据, 来推测含气量在平面和垂向上的变化, J R Kelafant 和 C M Boyer<sup>[1]</sup>以美国阿帕拉契亚盆地中部 61 个煤样的含气量数据, 得出 3 种煤级煤的含气量与煤层埋深的关系曲线。煤级一灰分一含气性类比法, 主要是基于含气性受控于煤级和煤质分布特征的认识, 进而将预测区的煤级和煤质与参照区进行类比。综合地质条件分析法, 是在基本没有含气性和煤质资料的情况下, 通过对预测区的构造特点、煤层赋存特征及煤层埋藏、热演化一生烃一烃类保存历史的分析, 结合不同参照

区地质条件的类比, 来推断预测区的含气性。等温吸附曲线法, 是根据少量的含气量数据和煤的等温吸附曲线、储层压力梯度、煤的水分、灰分数据, 来预测未知区含气量的一种方法。我国大多煤矿都有完整的瓦斯资料, 在缺乏含气量数据的地方, 多用回收率校正后的相对瓦斯涌出量法来预测含气量。数学模型预测法, 是近年来兴起的一种方法, 它主要是运用数学统计原理, 通过分析各种影响含气量的地质因素, 得出主控因素与含气量的关系式, 建立预测含气量的数学模型。

上述预测方法都包含着一定程度的综合地质条件分析。本文以沁水盆地为例, 在进行逐步多元回归分析的基础上, 建立煤层含气量预测模型, 并对预测结果进行对比分析。

## 2 基本思路和预测模型

### 2.1 预测参数的选择

沁水盆地是我国目前煤层气地质研究与勘探最为活跃的地区<sup>[9~11]</sup>, 煤层气测试资料比较齐全, 这些

收稿日期: 2004-10-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2002CB211703)和科技部社会公益专项基金项目(2001DIA10016)  
作者简介: 李贵红(1976—)女 山西大同人 煤炭科学研究院西安分院博士研究生 从事煤与煤层气地质研究

资料多是在阳泉、寿阳、屯留—安泽、大宁—潘庄—樊庄等地的煤层气勘探试验井获得的。沁水盆地本身的地质构造和水文地质条件相对简单, 煤层倾角较小, 煤体结构以原生结构为主, 宏观煤岩类型以光亮型煤、半亮型煤占主导地位, 煤层顶底板岩性以泥岩、粉砂岩居多。

影响煤储层含气量的因素很多。煤层厚度、埋深、煤的变质程度、灰分产率( $A_d$ )、水分含量( $M_{ad}$ )、镜质组含量、煤的等温吸附常数、储层原地应力、渗透率、压力、储层温度和含气饱和度等地质参数, 对含气量的影响程度是不同的。如果将这些参数都作为自变量进行逐步回归分析, 可能会影响到分析结果的客观性。所以, 要首先将那些与含气量线性关系不显著的因素剔除。在这里, 通过作各参数与含气量的散点图来判别它们的相关性。

沁水盆地煤层含气量与其影响因素的相关性表明, 煤层厚度、埋深、水分、固定碳含量、Langmuir 压力、储层压力、渗透率、地应力、储层温度这些参数与含气量的线性关系较差, 相关系数的平方均在  $10^{-2}$  甚至是  $10^{-3}$  数量级。因此, 这些参数不参与逐步回归分析, 仅选取煤镜质体反射率、挥发分、灰分、Langmuir 体积、含气饱和度、镜质组含量等有效参数作为自变量, 含气量作为因变量进行逐步回归分析。然后再结合盆地内各煤层气勘探试验井的实测数据, 运用逐步回归分析方法建立煤层含气量数学模型。

## 2.2 预测模型的建立和检验

运用 SPSS 统计软件对上述相关参数进行逐步回归, 最终得到如下回归方程:

$$G = -17.484 + 0.124S + 0.496V_L \quad (1)$$

式中  $G$  代表含气量( $m^3/t$ );  $S$  为含气饱和度(%);  $V_L$  是 Langmuir 体积( $m^3/t$ )。

最终回归方程的复相关系数  $R^2$  为 0.716, 说明在因变量变化中, 有 71% 以上的偏差可以用含气饱和度和 Langmuir 体积来解释, 有不到 29% 偏差属于目前无法解释的随机误差。消除自变量个数影响  $R^2$  的修正值为 0.689, 能较确切地反映拟合度, 这表明该模型的拟合度较好。

为确证这个方程的可靠性和应用价值, 需要用 F 检验来对方程进行显著性检验, 进而判断回归模型整体的显著性。拟合过程中, 每一步的方差分析结果表明, 当回归方程包含不同的变量时, 其显著性概率均小于 0.001, 拒绝总体回归系数均为 0 的原假设。因此, 回归方程应包括含气饱和度、Langmuir 体积这两个自变量, 认为回归效果显著。当置信概率为 95% 时, 统计量  $t$  取值超出双侧临界值  $t_{0.05(n-3)}$  范

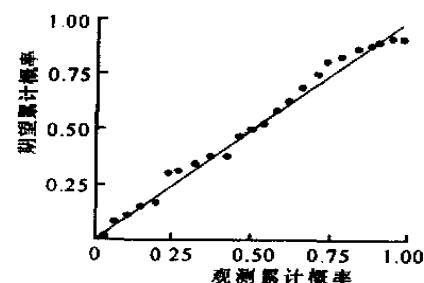


图 1 残差累计概率分布图

Fig. 1 The distribution of residual error cumulative probability

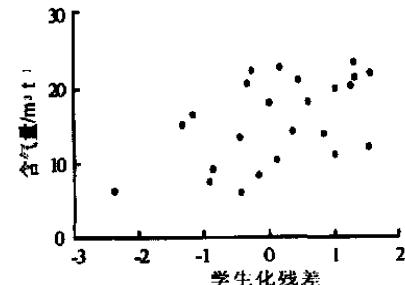


图 2 含气量预测值与学生化残差的散点图

Fig. 2 Diagram showing the relationship between predicted gas content value and residual error

围的概率为 0.025, 凡统计量数值  $t_i$  所对应的尾概率值 Sig. 小于 0.025, 其对应的自变量作用是显著的, Sig. (常数项系数除外) 均为零, 小于 0.025, 认为回归方程中自变量 Langmuir 体积和含气饱和度的作用是显著的。容忍度(Tolerance) 大小适中, 方差膨胀因子(VIF) 数值不大, 从而拒绝它们之间的共线性假设。

残差累计概率分布图(图 1)上, 观测数据的残差在假设直线(正态分布)周围的分布说明, 残差基本上符合正态分布。在含气量预测值和学生化残差散点图(图 2)上来看, 残差随机分布在一条穿过零点的水平直线两侧, 说明方差的分布是常数, 与自变量或者因变量无关。因此, 该回归方程满足线性与方差齐性的假设, 且拟合效果较好。

## 3 预测结果及其评价

为了检验建立的回归模型的合理性, 下面运用回归方程对沁水盆地山西组主煤层含气量进行预测, 并与以往的含气量预测结果进行了比较。

### 3.1 Langmuir 体积和含气饱和度的确定

在应用最终回归方程时, 应首先确定 Langmuir 体积和含气饱和度。这里使用的 Langmuir 体积是来自大宁、寿阳、屯留、潞安、樊庄等地 20 余口煤层气井的相关煤层等温吸附实验数据(图 3): 含气饱和度是在综合分析各种地质因素的基础上, 用给定权

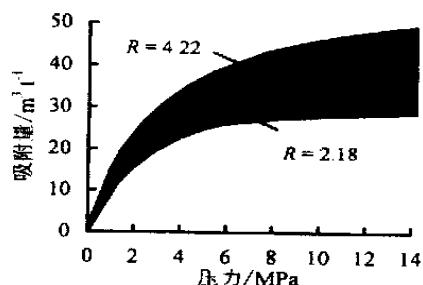


图3 沁水盆地山西组不同煤级煤的等温吸附曲线分布范围

Fig. 3 Range of adsorption isotherms (at reservoir temperature) of coal samples from the Shanxi Formation in the Qinshui Basin

重(表 1) 的方法确定的。实际操作过程中, 在详细分析影响含气饱和度的各种地质因素的基础上, 首先将沁水盆地全区分为 20 个区块, 再对各区块结点参数进行评分, 算得各结点的含气饱和度值, 将 Langmuir 体积和含气饱和度带入回归方程, 得到该结点的含气量, 然后利用 sufer 软件得到图 4a 所示的预测含气量等值线图。

### 3.2 预测结果

从图 4a 中可以看出, 山西组主煤层(3号煤)含

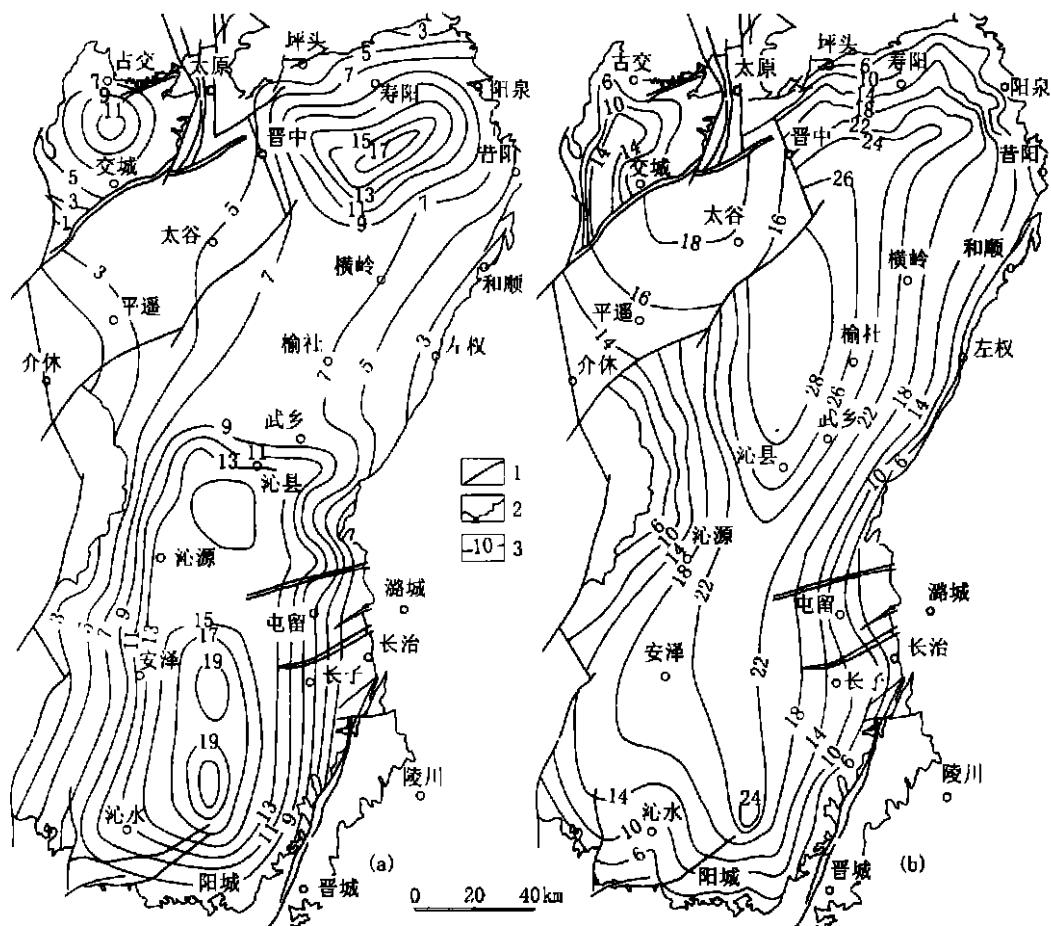


图 4 沁水盆地山西组主煤层预测含气量等值线图

Fig. 4 Map showing predicted gas content isoline of main coal seam from the Shanxi Formation in the Qinshui Basin  
 (a) 基于回归分析预测结果; (b) 先前预测结果: 1. 断层; 2. 煤层露头线; 3. 含气量等值线( $m^3/h$ )

表 1 沁水盆地影响含气饱和度地质因素权重分配表  
 Table 1 Weight coefficient of the geological factors influencing  
 gas saturation in the Qinshui Basin

| 影响因素   | 权重   | 分类                          | 权重系数        |
|--------|------|-----------------------------|-------------|
| 围岩圈闭性  | 0.30 | 好                           | 1.00        |
|        |      | 较好                          | 0.85        |
|        |      | 中                           | 0.65        |
|        |      | 较差                          | 0.40        |
|        |      | 差                           | 0.10        |
| 埋藏深度   | 0.20 | $> 1\ 200 \text{ m}$        | 1.00        |
|        |      | $500 \sim 1\ 200 \text{ m}$ | 0.50 ~ 1.00 |
| 构造稳定性  | 0.20 | 构造较简单                       | 0.80        |
|        |      | 构造较复杂                       | 0.60        |
|        |      | 构造复杂                        | 0.50        |
|        |      | 构造极复杂                       | 0.30        |
| 水文地质条件 | 0.20 | 补给区                         | 0.30        |
|        |      | 径流区                         | 0.50        |
|        |      | 滞流区                         | 0.70        |
| 储层压力   | 0.10 | 超压储层                        | 1.00        |
|        |      | 常压储层                        | 0.80        |
|        |      | 欠压储层                        | 0.50        |

部含气量较上述两地稍低, 成为沁水盆地含气量较高的第3区块; 而盆地周边和中部地带的煤层含气量要低一些。

### 3.3 对比分析

图4b是沁水盆地山西组主采煤层含气量早期预测结果(煤炭科学研究院西安分院《我国煤层气富集成藏规律与勘探开发有利地区优选研究》, 2003年)。其中, 中深部是按照含气量与煤层埋深的线性关系预测的。从图中可以看出, 位于沁水盆地中深部煤层的含气量较高, 显示埋深越大, 煤层含气量越高。

将图4a和图4b略加对比就可看出: 含气量变化趋势基本上相似, 即盆地南部以及盆地北部阳泉—寿阳地区含气量较高。从地质条件来看, 沁水盆地南部3号煤层分布稳定, 平均厚度5 m, 埋深不超过1 500 m, 一般为300 m~1 000 m; 煤层底板为具菱铁质结核的泻湖沼泽相泥岩, 有时相变为粉砂岩, 一般厚10 m, 直接顶板多为三角洲分流间湾相的含菱铁质结核的泥岩、粉砂岩, 厚度变化较大, 一般在3 m左右; 区内地质构造相对简单, 断层稀少, 地层产状平缓且连续完整; 水文地质条件简单, 在潘庄附近是一个地下水局部“低洼”滞流区, 深部地下水径流很弱, 煤层气侧向和垂向运移微弱, 形成地下水圈闭和煤层气的富集成藏; 煤层处于正常压力或微超压状态<sup>[12]</sup>。因此, 煤层气的保存条件比较有利, 含气饱和度较高。两次预测的沁水盆地高含气量区带与上述地下水滞流区都大体吻合。所不同的是, 图4a显示含气量随埋深增加缓慢, 在盆地中深部含气量较图4b低很多。

事实上, 利用不同的模型或方法预测气含量时, 出现不同的结果是很自然的事。用梯度法(或含气量—深度关系法)完成的含气量预测, 是建立在含气量与煤层埋深呈简单线性关系基础之上的。但用Langmuir方程描述的煤层气储集机理表明, 煤层的吸附容量随压力(深度)的增大而增加, 当煤层埋藏到达一定深度(或达到一定压力)之后, 煤层含气量将不再增加。这就是说, 梯度法只能用于预测浅部煤层的含气量。然而, 由于地质条件的多变性以及煤层含气量控制因素的复杂性, 沁水盆地浅部(<800 m)煤层的含气量与埋深也不是简单的线性关系(图5)。因此, 预测结果出现一定的偏差是不可避免的。

基于逐步回归分析预测的煤层含气量(图4a)考虑了多种因素, 可能更接近真实情况。但是, 用该方法建立的预测模型中, 含气饱和度是受各种地质

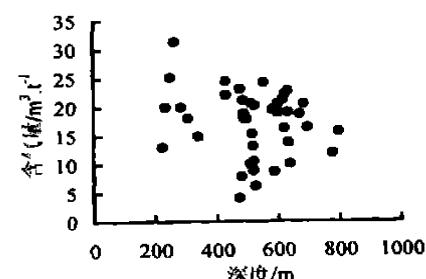


图5 沁水盆地煤层埋深与含气量关系图

Fig. 5 Relationship between the depth and gas content of the coal beds in the Qinshui Basin

因素影响(表1)的一个变量, 如何在未知区合理地确定含气饱和度, 是含气量预测正确与否的核心问题。在影响含气饱和度的地质因素中, 有些因素(如围岩封闭性、构造条件、水文地质条件)是难于量化的。因此, 在分配权重时难免会出现人为的误差, 进而导致含气量预测结果的偏差。

总之, 含气量预测是一个极为复杂的问题, 不同的预测方法和预测模型都有合理的一面, 但也有一定的局限性。本文的研究证明, 利用多元逐步回归方法建立煤储层含气量模型, 预测含气量在一定程度上是可行的, 但仍需进一步完善。

致谢: 成文过程中, 使用了本单位积累的资料。张群和李建武研究员在学术思想方面给予指点, 姜在炳高级工程师在多元回归分析方法的应用方面给予帮助, 谨此致谢。

### 参考文献

- [1] Kelafant J R, Boyer C M. A geologic assessment of natural gas from coal seams in the central Appalachian Coal Basin[J]. Gas Res. Inst. Topical Rep. 1988, GRI-88/0302, Chicago, IL, 86.
- [2] 秦勇, 刘焕杰, 桑树勋等. 山西南部上古生界煤层含气性研究. I, 推定区煤层含气性评价[J]. 煤田地质与勘探, 1997, 25(4): 25-30.
- [3] 秦勇, 刘焕杰, 范秉恒等. 山西南部上古生界煤层含气性研究. II, 推断区与预测区煤层含气性预测[J]. 煤田地质与勘探, 1997, 25(6): 18-22.
- [4] 李静, 李小彦, 杨利军等. 煤层含气量预测方法[J]. 煤田地质与勘探, 1998, 26(2): 31-33.
- [5] 四达公司矿业开发部. 矿井煤层气储量计算方法[A]. 中国煤层气(第二届全国煤层气学术研讨会论文专辑)[C], 1996(2), 102-105.
- [6] 王全生. 井田煤层甲烷含量的定量预测[J]. 煤炭工程师, 1997, 4: 39-42.
- [7] 张子戌, 张许良, 袁崇孚等. 瓦斯地质数学模型软件的开发[J]. 煤田地质与勘探, 2001, 30(2): 29-30.
- [8] 吴财芳, 曾勇, 张子戌等. 瓦斯含量地质预测的自适应神经网络技术研究[J]. 矿业安全与环保, 2003, 30(3): 17-19.
- [9] 刘焕杰, 秦勇, 桑树勋. 山西南部煤层气地质[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998.
- [10] 张建博, 王红岩. 山西沁水盆地煤层气有利区预测[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1999.
- [11] 樊生利. 沁水盆地煤层气勘探成果与地质分析[J]. 天然气工业, 2001, 21(4): 35-38.
- [12] 叶建平, 武强, 叶贵钧等. 沁水盆地南部煤层气成藏动力学机制研究[J]. 地质评论, 2002, 48(3): 319-322.