

doi: 10.11720/wtyht.2018.0177

梁亚林,原文涛.测井预测煤层气含量及分布规律——以山西省沁水煤田为例[J].物探与化探,2018,42(6):1144-1149.http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.0177

Liang Y L, Yuan W T. The prediction of the content and distribution of coalbed gas : a case study in the Qinshui coalfield based on logging[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(6): 1144-1149. http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.0177

# 测井预测煤层气含量及分布规律 ——以山西省沁水煤田为例

梁亚林,原文涛

(山西省煤炭地质 148 勘查院,山西太原 030053)

**摘要:**煤层气勘探与开发过程中,对煤层含气量及其分布规律做出较准确预测非常重要。笔者收集、整理、分析勘探区测井、煤层气测试等资料,并通过多元回归分析方法建立测井参数与测试煤层气含量之间的关系,预测整个勘探区煤层气含量及分布规律。研究结果表明用多元回归方法计算煤层含气量快速、准确、方便,实用性较强。煤层气含量分布趋势为煤层气勘探和开发选出有利区域,给出先期勘探开发建议。

**关键词:**测井资料;多元回归分析;预测;煤层含气量及分布规律

**中图分类号:** P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2018)06-1144-06

## 0 引言

利用地球物理测井资料预测煤层气储层含气量有多种方法,主要方法有 3 种:即多元回归分析、兰氏方程和 BP 神经网络。刘荣芳等<sup>[1]</sup>利用常规测井曲线与含气量的关系,建立了以煤层结构为基础的回归方法,对煤层含气量进行计算,取得了较好的效果;孟召平等<sup>[2]</sup>发现煤层含气量与有效埋深、体积密度、自然电位、电阻率、声波时差、自然伽马及补偿中子等参数之间存在一定的相关性,采用测井参数预测煤层含气量具有较好的应用前景。兰氏方程法是将测井煤质分析碳、灰、水结果与含气量联系起来的一种间接解释方程,金泽亮等<sup>[3]</sup>根据沁水盆地柿庄区块煤层气储层的典型地质特征及该区块的测井资料和岩芯分析数据,利用兰氏方程导出了煤层含气量计算的公式。BP 神经网络也是利用电阻率、体积密度、自然伽马和声波时差等测井参数,通过 BP 神经网络训练预测值和期望值的吻合性来计算煤层含气量,潘和平等<sup>[4]</sup>通过大量数据分析表

明 BP 神经网络预测煤层含气量精度比较高;李春辉等<sup>[5]</sup>利用非线性的 BP 人工神经网络建立煤与瓦斯突出强度预测模型,来预测煤与瓦斯突出强度的大小,结果显示煤与瓦斯突出强度的预测值与实测值吻合较好。总之,兰氏方程法是用测井资料计算出煤层碳、灰、水含量,再计算含气量,是一种间接计算方法,BP 神经网络由于训练的复杂性一般也不实用。

## 1 理论基础

煤层气主要以 3 种形式赋存在煤层中,即吸附在煤孔隙表面上的吸附状态,分布在煤的孔隙及裂隙内呈游离状态和溶解在煤层水中呈溶解状态。煤层气主要以吸附状态存在,吸附气量占煤层含气量的比例最大。随着煤层含气量增加,煤的体积密度减小,因此,统计表明煤层含气量与体积密度之间呈负相关关系;由于煤层内部条带状、片状、层状结构以及煤的密度小等,使得声波在煤层中具有较低的传播速度,在声波测井曲线中体现为时差较高。声

收稿日期:2018-05-02;修回日期:2018-06-27

作者简介:梁亚林(1965-),男,汉族,山西芮城人,高级工程师,1988年毕业于山西矿业学院。Email:scy345@163.com

波时差对含气性敏感,煤储层含气性增高,声波传播速度减少,声波时差增大,煤层含气量与声波时差表现出正相关性;煤的有机质和无机质都不是放射物质。在成煤过程中,外来矿物质决定煤的天然放射性,一般情况下,煤的自然放射性很弱,但是,由于煤中黏土矿物的存在影响煤的吸附性能,降低煤层含气量,所以随着煤的自然放射性增强,煤层含气量将减少,故表现为负相关<sup>[2]</sup>;电阻率曲线除受含气量影响外,主要还受煤层含水性及井径和井液侵入的影响。煤层孔隙度越大含水性越大、电阻率值越低;井径影响实质上反映了泥浆电阻率的影响,随着井径扩大,电阻率受井液电阻率影响越大;电阻率也受泥浆侵入的影响,泥浆侵入地层越深电阻率受影响越大,当侵入深度很大时,仪器只能探测到侵入带,探测不到原状地层<sup>[6]</sup>,因此用电阻率计算煤层含气量最不科学。根据以上理论,我们采用自然伽马结合补偿密度和声波时差等计算煤层含气量,另外考虑到煤层埋藏深度对含气量的影响,进行回归分析时也应把它考虑进去。

具体分析还要注意以下几点:

1) 测井参数取值采用加权平均值法,即所有测井参数从见煤深度到至煤深度每 5 cm 一个采样点,采用平均值。

2) 为了测井原始基础数据的可靠性和准确性,必须对他们进行标准化。由于不同地区、仪器、探管、刻度器及操作方式的差异、井径扩大、井液密度、随机干扰等变化,必定对测井参数造成影响,为此,我们对测井数据进行“标准化”。在研究区内具有多井横向上连续、地层厚度较大、岩性一致、测井响应横向上变化不大的地层,可作为标准层。在整个研究区选一个标准层中物性变化最小的钻孔作为标准孔,其他钻孔测井曲线就以它为标准进行适当的平移(即曲线重叠),以消除误差;或者将所有钻孔的某一标准层取平均值,然后各个钻孔标准层均向其靠近。从而达到对煤层测井曲线的标准化。

标准层必须满足以下条件:① 层位全区稳定分布、岩性一致(或者有特别稳定的夹层)、物性特征明显、便于全区对比追踪。② 要有一定的厚度。③ 煤系地层最好选井径扩大最小、自然伽马最低、声波时差和密度曲线变化平缓、物理性质变化最小的致密灰岩。④ 作为一个单层或层组、且靠近目的层位。

根据以上条件,本次研究取全部煤层气井太原组  $K_2$  灰岩平均值作为标准值,各个钻孔标准层均向其靠近。

3) 测井曲线煤层深度与钻井取芯的煤芯深度之间存在深度差(1.5%以内),因此必须对每条测井曲线按照钻探取芯的深度、夹矸及测井曲线煤层顶底板变化情况进行深度归位,使两者深度严格一致。

## 2 勘探区概况

沁水煤田为中国目前产煤最多的大型石炭二叠纪煤田,是山西省 6 大煤田之一,位于山西省东南部,沁水煤田煤炭资源量约 3 000 亿 t。煤种以高变质的贫煤、无烟煤为主。沁水煤田具有丰富的煤层气资源。根据中联煤层气有限责任公司全国煤层气评价资料,沁水煤田煤层气资源量为 6.85 万亿  $m^3$ ,占山西省煤层气资源量的 65%,近占全国煤层气资源量的四分之一,是目前国内勘探程度最高、储量条件稳定、开发潜力巨大、商业化程度最高的煤层气田。沁水煤田含煤地层为石炭二叠系,具有开采价值的煤层主要赋存于石炭系上统太原组、二叠系下统山西组,其中 3 号和 15 号为煤层气开发的主要煤层。本次所研究的勘探区位于沁水煤田东部,15 号煤层为区内唯一一层全区可采的稳定煤层,该煤层为高变质无烟煤,煤层埋藏深,结构简单,顶底板均为泥岩或砂质泥岩,封闭性较好。勘探区总体构造形态为走向 NE、倾向 NW、倾角  $6^\circ \sim 12^\circ$  的单斜构造,在井田东部边界断层发育,总之井田构造简单。

## 3 实际应用

勘探区共施工煤层气钻孔 10 个,取得煤层含气量测试样品 50 个,普通煤田孔 123 个。将 50 个测试样品含气量及对应的标准化以后的自然伽马、补偿密度和声波时差及深度收集在一起(表 1),图 1 为煤层测试含气量与测井各参数之间的散点图。

对前面 38 个煤层含气量测试样品与对应的各测井参数进行回归,由图 1 可见 15 号煤层测试含气量和自然伽马标准值、声波时差标准值及密度标准值的相关性较好。

设含气量为  $Q$ ,自然伽马标准值为 GRB、声波时差标准值为 ACB、密度标准值为 DENB,对它们进行多元回归,得出回归方程:

$$Q = 1.57 - 0.074GRB + 0.032ACB - 1.738DENB$$

$$R = 0.71$$

$$F = 11.81$$

查  $F$  检验临界值表,自由度  $N - M - 1 = 34$ ,自变

表 1 15 号煤层测试含气量与测井深度及标准化参数

| 样品号 | 测试含气量<br>/(m <sup>3</sup> /t) | 煤层深度<br>/m | 自然伽马标准值<br>/API | 补偿密度标准值<br>/(g/cm <sup>3</sup> ) | 声波时差标准值<br>/(μs/m) |
|-----|-------------------------------|------------|-----------------|----------------------------------|--------------------|
| 1   | 9.90                          | 848.52     | 33              | 1.41                             | 462                |
| 2   | 11.53                         | 849.82     | 15              | 1.47                             | 512                |
| 3   | 6.04                          | 850.22     | 31              | 1.44                             | 456                |
| 4   | 7.03                          | 850.92     | 53              | 1.81                             | 392                |
| 5   | 11.70                         | 550.84     | 20              | 1.59                             | 431                |
| 6   | 11.58                         | 551.84     | 26              | 1.41                             | 463                |
| 7   | 11.47                         | 552.59     | 15              | 1.40                             | 474                |
| 8   | 11.48                         | 553.84     | 33              | 1.52                             | 438                |
| 9   | 5.03                          | 554.54     | 55              | 1.96                             | 344                |
| 10  | 4.11                          | 554.84     | 60              | 2.11                             | 341                |
| 11  | 7.68                          | 751.13     | 31              | 1.52                             | 475                |
| 12  | 8.92                          | 751.78     | 34              | 1.49                             | 472                |
| 13  | 8.76                          | 752.53     | 40              | 1.55                             | 469                |
| 14  | 12.98                         | 585.26     | 24              | 1.51                             | 451                |
| 15  | 13.97                         | 585.86     | 22              | 1.52                             | 472                |
| 16  | 13.53                         | 586.81     | 40              | 1.62                             | 450                |
| 17  | 13.72                         | 587.86     | 19              | 1.56                             | 466                |
| 18  | 11.62                         | 588.36     | 33              | 1.74                             | 445                |
| 19  | 8.32                          | 589.31     | 48              | 1.77                             | 396                |
| 20  | 9.43                          | 892.54     | 37              | 1.63                             | 426                |
| 21  | 10.42                         | 893.34     | 8               | 1.58                             | 415                |
| 22  | 10.69                         | 894.04     | 37              | 1.63                             | 444                |
| 23  | 12.13                         | 894.54     | 25              | 1.71                             | 436                |
| 24  | 10.33                         | 571.36     | 28              | 1.61                             | 447                |
| 25  | 11.70                         | 571.76     | 16              | 1.55                             | 460                |
| 26  | 9.75                          | 572.86     | 41              | 1.69                             | 432                |
| 27  | 10.93                         | 574.46     | 24              | 1.60                             | 426                |
| 28  | 10.52                         | 575.06     | 21              | 1.60                             | 447                |
| 29  | 13.07                         | 1025.12    | 35              | 1.66                             | 461                |
| 30  | 12.94                         | 1026.12    | 22              | 1.68                             | 493                |
| 31  | 16.27                         | 1027.12    | 24              | 1.56                             | 517                |
| 32  | 13.74                         | 1027.62    | 24              | 1.56                             | 510                |
| 33  | 12.60                         | 1028.12    | 18              | 1.55                             | 475                |
| 34  | 9.72                          | 1028.72    | 37              | 1.57                             | 458                |
| 35  | 17.22                         | 835.37     | 17              | 1.30                             | 460                |
| 36  | 16.11                         | 836.27     | 27              | 1.35                             | 472                |
| 37  | 15.23                         | 836.77     | 34              | 1.50                             | 477                |
| 38  | 12.92                         | 838.37     | 32              | 1.30                             | 467                |
| 39  | 15.14                         | 666.57     | 16              | 1.55                             | 460                |
| 40  | 14.72                         | 666.97     | 12              | 1.46                             | 470                |
| 41  | 16.20                         | 667.37     | 31              | 1.48                             | 527                |
| 42  | 16.37                         | 667.77     | 22              | 1.48                             | 494                |
| 43  | 14.91                         | 669.33     | 8               | 1.47                             | 455                |
| 44  | 13.78                         | 670.63     | 24              | 1.51                             | 444                |
| 45  | 9.97                          | 1238.22    | 47              | 1.60                             | 426                |
| 46  | 10.01                         | 1238.82    | 49              | 1.57                             | 425                |
| 47  | 10.37                         | 1239.55    | 29              | 1.53                             | 425                |
| 48  | 11.25                         | 1240.15    | 43              | 1.52                             | 417                |
| 49  | 10.50                         | 1240.80    | 55              | 1.59                             | 435                |
| 50  | 12.24                         | 1241.30    | 24              | 1.54                             | 452                |

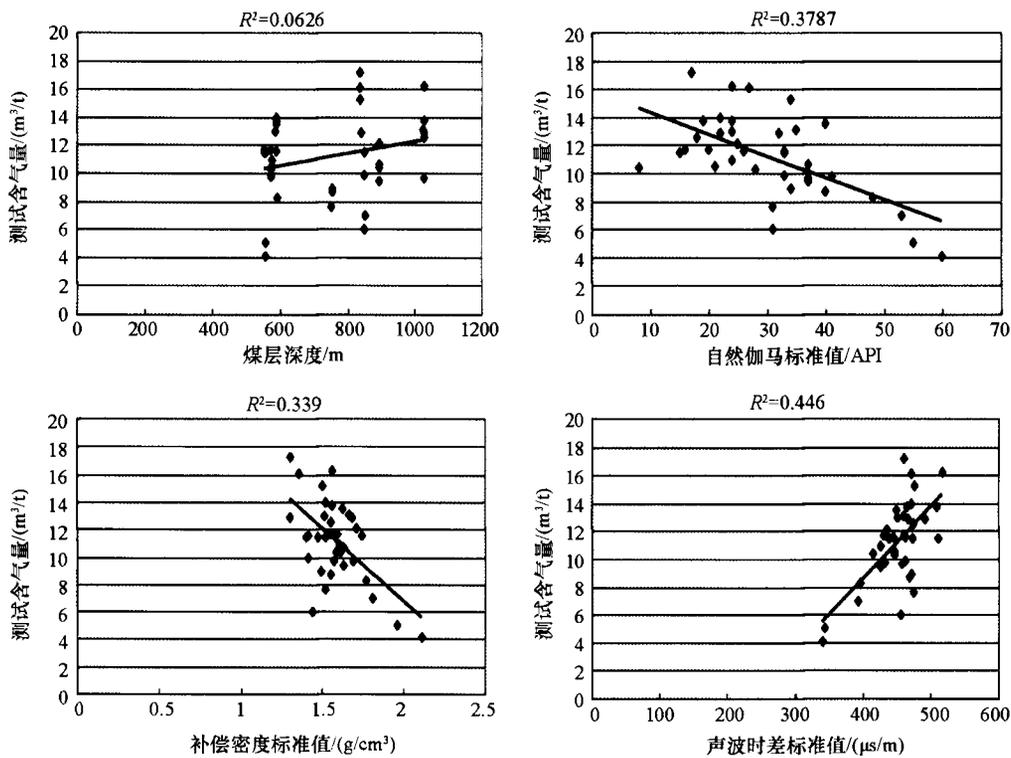


图 1 煤层测试含气量与测井各参数之间的关系

表 2 计算含气量与测试含气量关系

| 样品号 | 测试含气量<br>/(m <sup>3</sup> /t) | 计算含气量<br>/(m <sup>3</sup> /t) | 绝对误差<br>/(m <sup>3</sup> /t) | 相对误差<br>/% |
|-----|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------|
| 39  | 15.14                         | 12.41                         | 2.73                         | 18         |
| 40  | 14.72                         | 13.18                         | 1.54                         | 10         |
| 41  | 16.20                         | 13.57                         | 2.63                         | 16         |
| 42  | 16.37                         | 13.18                         | 3.19                         | 19         |
| 43  | 14.91                         | 12.98                         | 1.93                         | 13         |
| 44  | 13.78                         | 11.38                         | 2.4                          | 17         |
| 45  | 9.97                          | 8.94                          | 1.03                         | 10         |
| 46  | 10.01                         | 8.82                          | 1.19                         | 12         |
| 47  | 10.37                         | 10.36                         | 0.01                         | 0          |
| 48  | 11.25                         | 9.09                          | 2.16                         | 19         |
| 49  | 10.50                         | 8.66                          | 1.84                         | 18         |
| 50  | 12.24                         | 11.58                         | 0.66                         | 5          |
| 平均值 |                               |                               | 1.78                         | 13         |

量数目  $M=3, F=11.81 > 2.883$ , 回归方程有效。

利用以上多元回归式, 计算表 1 中后面 12 个样品的煤层含气量, 表 2 给出计算含气量、测试含气量、绝对误差和相对误差; 平均绝对误差 1.78, 相对误差为 13%。

把计算含气量和测试含气量做交会图(图 2), 二者呈明显的正相关关系。

测试含气量和预测含气量相关系数  $R^2=0.89$ , 二者相关性较好, 预测精度较高。

下面以 P7 号钻孔为例, 用自然伽马标准值、补偿密度标准值和声波时差标准值计算含气量(图 3)。

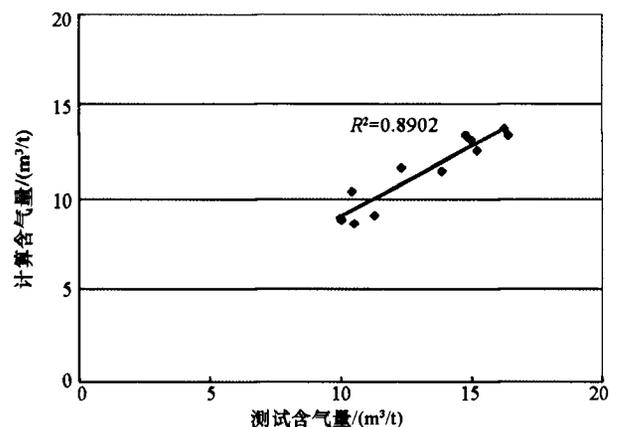


图 2 测试含气量和计算含气量关系

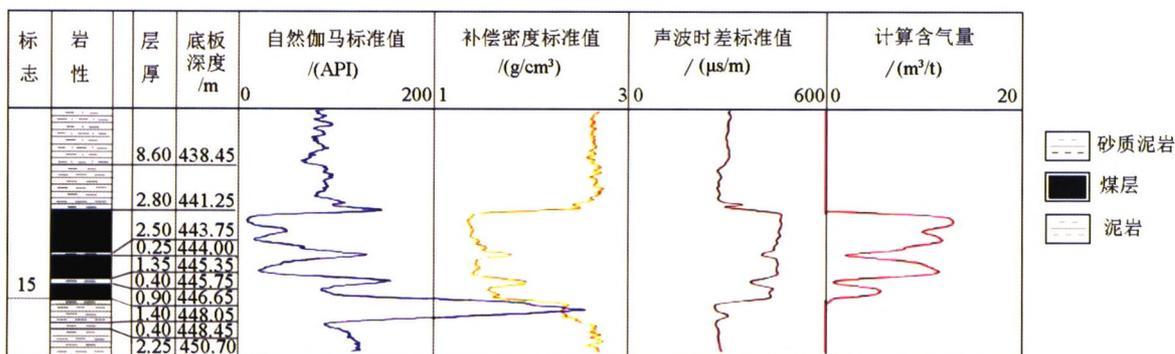


图 3 测井曲线计算含气量

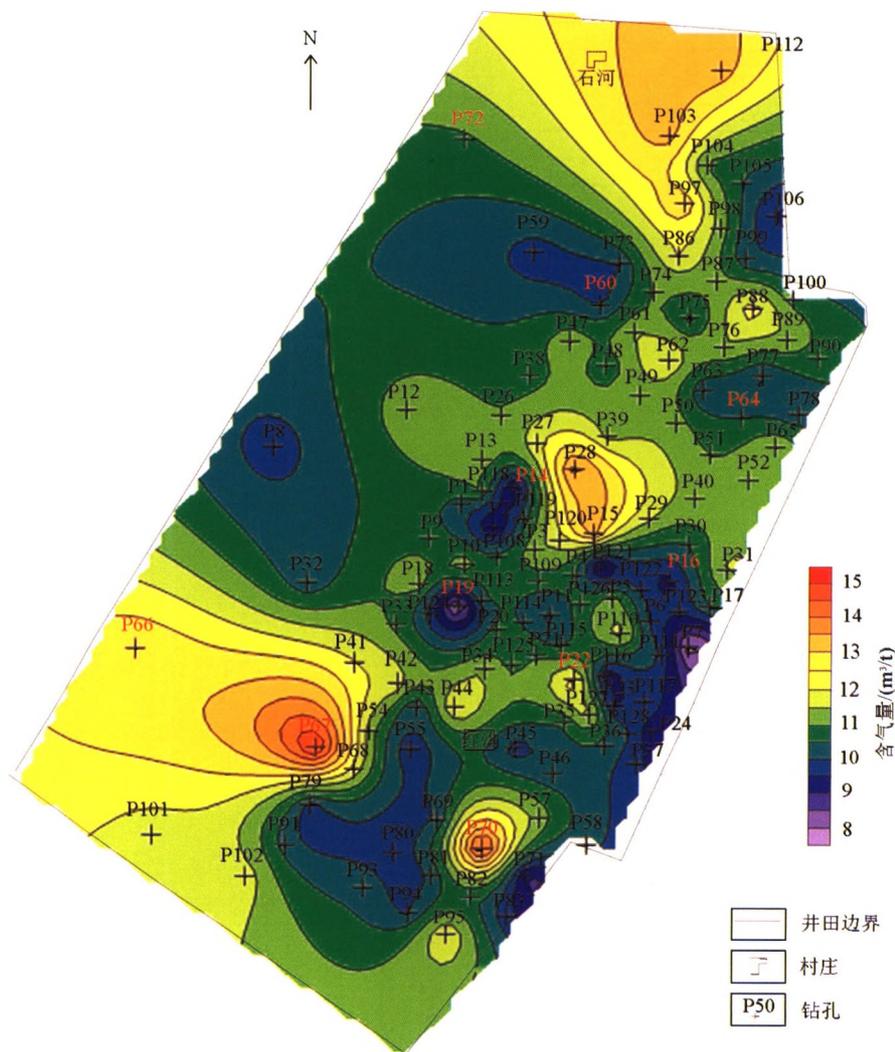


图 4 15号煤层预测含气量示意

利用得到的多元回归方程式,计算 123 个普通煤田孔 15 号煤层的含气量,并绘制煤层气含量等值线分布图(图 4),从含气量等值线图可以看出,整个勘探区煤层气含量分布趋势为东部较低、西部较高,特别是 WS 和 WN 两个黄色区域含气量相对较高,可以作为煤层气勘探与开发的先期地段,最大值为西南部 P67 号钻孔的 15.26 m<sup>3</sup>/t,最小值为东部边

界 P7 号钻孔的 7.59 m<sup>3</sup>/t,平均值为 10.84 m<sup>3</sup>/t。

总体来说,煤层气含量分布趋势和地层走向与倾向一致,也就是说勘探区总体为走向 NE-SW、倾向由 ES 往 WN 的单斜构造,WN 部煤层埋藏深覆盖好且没有构造含气量高,SN 部煤层埋藏浅覆盖差且断层发育形成裂隙处于张剪或引张状态,造成附近的煤层割理和外生裂隙系统极其发育,煤储层易改

造成高渗透率储层,与煤储层近同时期形成的裂隙带,构成良好的煤层气逸散通道,不利于煤层气的赋存,使煤储层含气量降低。

#### 4 结论与建议

1) 本研究区进行测井参数与测试含气量之间的多元回归分析,利用多元回归式得到的含气量预测值与测试含气量对照表明,其误差较小。

2) 多元回归分析方法预测煤层气含量快速、准确、可靠、简单、成本低。因此,可以将其运用到煤层气勘探与开发实际工作中。

3) 利用文中得到的多元回归方程式,计算研究区 15 号煤层的含气量,绘制煤层气含量等值线分布图,表明煤层气含量分布趋势和地层走向与倾向一致,同时煤层含气量的大小还与构造、裂隙带等因素有关。

4) 煤层气含量分布趋势为煤层气勘探和开发选出有利区域,把西南和西北含气量相对较高的两个黄色区域作为煤层气勘探与开发的先期地段,中部地区作为后背区域,这样不但速度快而且能避免盲目投资,从而节省大量的人力、物力和财力。

#### 参考文献:

[1] 刘荣芳,王建功,刘文华,等.基于煤岩结构的煤层含气量测井

评价方法[J].中国煤层气,2014,11(4):22-25.

- [2] 孟召平,郭彦省,张纪星,等.基于测井参数的煤层含气量预测模型与应用[J].煤炭科学技术,2014,42(6):25-30.
- [3] 金泽亮,薛海飞,高海滨,等.煤层气储层测井评价技术及应用[J].煤田地质与勘探,2013,41(2):42-45.
- [4] 潘和平,黄智辉.煤层含气量测井解释方法探讨[J].煤田地质与勘探,1998,26(5):58-60.
- [5] 李春辉,陈日辉,苏恒瑜,等. BP 神经网络在预测煤与瓦斯突出中的应用[J].矿冶,2010,19(3):21-23.
- [6] 夏宏泉,刘之的,朱猛,等.随钻电阻率测井的环境影响校正主次要因素分析[J].测井技术,2008,32(2):160-161.
- [7] 张文博,宋晓莉.测井曲线常见影响因素分析[J].石油管材与仪器,2015,1(2):93-95.
- [8] 长春地质学院.水文地质工程地质物探教程[M].北京:地质出版社,1979:336-340.
- [9] 刘效贤,李承华.测井评价煤层气储层的方法探讨[J].中国煤炭地质,2008,20(12):1-3.
- [10] 高绪晨.煤层气测井资料解释初探[J].中国煤田地质,2003,15(4):54-57.
- [11] 贾承造.煤层气资源储量评估方法[M].北京:石油工业出版社,2007:47-48.
- [12] 赵庆波,李五忠.中国煤层气勘探开发技术研究[M].北京:石油工业出版社,2007:106-109.
- [13] 潘和平.煤层气储层测井评价[J].天然气工业,2005,25(3):48-51.
- [14] 陆国桢,张凤威,傅雪海,等.测井解释煤层甲烷含量与煤层结构的研究[J].煤田地质与勘探,1997,25(3):54-56.
- [15] 陈江峰,刘保民,别玉平,等.测井在煤层气储层评价中的应用[J].煤炭技术,1997(4):36-40.

### The prediction of the content and distribution of coalbed gas : a case study in the Qinshui coalfield based on logging

LIANG Ya-Lin, YUAN Wen-Tao

(No. 148 Coal Geological Exploration Institute, Taiyuan 030053, China)

**Abstract:** In the course of coalbed methane exploration and development, it is very important to make a more accurate prediction of gas content and its distribution. The authors collected, sorted and analyzed the exploration zone logging as well as coalbed gas test data and used multiple regression analysis method to establish the relationship between logging parameters and coalbed methane (CBM) content, predicted coalbed methane content and its distribution in the whole exploration area. The results show that the calculation of gas content in coal seam by multivariate regression method is fast, accurate, convenient and practical. The distribution trend of coalbed methane content provides reference for selecting favorable areas for coalbed methane exploration and development.

**Key words:** log data; multiple regression analysis; prediction; gas content and distribution law of coal seam

(本文编辑:王萌)