



移动扫码阅读

卢晨刚,张遂安,白铁峰,等.川南筠连区块煤层三维含气量属性精细建模[J].煤炭科学技术,2019,47(8): 219-225.doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.08.031

LU Chengang,ZHANG Suian,BAI Tiefeng,*et al.*Improved modeling of 3D gas content attributes of CBM in Junlian Region of southern Sichuan[J].Coal Science and Technology,2019,47(8):219-225.doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.08.031

川南筠连区块煤层三维含气量属性精细建模

卢晨刚¹,张遂安¹,白铁峰¹,刘 成²,杜军军¹,薛 丹¹

(1.中国石油大学(北京)煤层气研究中心,北京 102200;2.中石油浙江油田公司,浙江 杭州 310023)

摘 要:在地表形态和构造起伏较大的川南筠连区块,采用常规储层属性建模方法进行煤层气三维含气量建模存在预测不准的问题,为提高含气量三维模型精度,利用灰色关联与多元回归分析方法建立了含气量预测模型,考虑每个网格的实际埋深,提出适应该区块的三维含气量建模方法。结果表明:川南筠连区块含气量的关联的因素由强到弱依次为水分、最大镜质组反射率、埋深、灰分、固定碳;经共线性检验,由水分、最大镜质组反射率、埋深、灰分建立的含气量预测模型较好,拟合相关系数 $R^2 = 0.701$,在 99% 的显著性水平下显著;该三维含气量计算模型综合考虑了地表形态和地下构造对实际埋深的影响,更接近实际情况;较大埋深区域的计算含气量比常规属性建模方法的数值高,同时改进的含气量建模结果比常规建模结果更贴近实际生产情况。

关键词:三维地质建模;含气量;埋深;煤层气

中图分类号:P628.1

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2019)08-0219-07

Improved modeling of 3D gas content attributes of CBM in Junlian Region of southern Sichuan

LU Chengang¹,ZHANG Suian¹,BAI Tiefeng¹,LIU Cheng²,DU Junjun¹,XUE Dan¹

(1.Coalbed Methane Research Center, China University of Petroleum, Beijing 102200, China;

2.Zhejiang Oilfield Company, PetroChina, Hangzhou 310023, China;)

Abstract:In the Junlian Region of southern Sichuan with large surface morphology and tectonic fluctuations, the conventional reservoir property modeling method has been used to predict the three-dimensional gas content of coalbed methane. In order to improve the accuracy of 3D model for gas content, the grey correlation analysis and multiple regression analysis were combined to build a gas content prediction model, considering the actual buried depth of each grid, a three-dimensional gas content modeling method suitable for the region was proposed. The results show that the correlation factors of gas content in Junlian Region of southern Sichuan were sorted in descending order by relevancy: water, maximum vitrinite reflectivity, buried depth, ash and fixed carbon. The co-linearity test shows that gas content prediction model established by water, maximum reflectivity, buried depth and ash is rather accurate. The fitting correlation coefficient $R^2 = 0.701$ is significant at 99% significance level. This three-dimensional gas content calculation model took into account the surface morphology and underground structure. The influence of the buried depth was closer to the actual situation. The calculated gas content of the larger deep-buried area was higher than the value from the conventional property modeling method, and the improved gas content modeling result was closer to the actual production situation than the conventional modeling result.

Key words:Three-dimensional geological modeling; coal gas content; burial depth; CBM

0 引 言

开发煤层气是增加低碳能源供应和弥补我国低

碳能源供给缺口、保障煤矿安全生产的重要举措。目前沁水盆地、鄂尔多斯盆地东缘煤层气产业化基地初步形成,川南黔北区块成为煤层气勘探开发发

收稿日期:2019-05-18;责任编辑:曾康生

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05067)

作者简介:卢晨刚(1994—),男,山西晋城人,硕士。E-mail:lcg.29@163.com

通讯作者:张遂安(1957—),男,山东菏泽人,教授。E-mail:sazhang@263.net

展区。川南黔北地形变化剧烈、地质构造复杂、成煤条件不稳定,形成了复杂的煤层气储层^[1]。评价及开发这类煤层气储层需建立一个精确的储层地质模型,其中三维含气量属性模型作为煤层气储量计算、开发调整的依据尤为重要。

三维储层建模是从常规油气储层的属性建模发展而来,常规油气储层已经通过沉积相约束、地震属性提取、正演模拟约束等方式提高模型精度^[2-5],而煤层已是微相沉积的结果^[6],在地球物理方法中,30 Hz地震垂向分辨率为25~12.5 m^[7],薄的煤层厚度限制了地震属性提取,煤储层信息主要来源于井点的测井信息。煤储层含气量受多种因素影响,没有直接的测井响应,可靠的含气量数据主要来源于钻井取心的煤样含气量测试,受取芯测试成本限制,实测含气量样本数有限,建立含气量预测模型得到井点处含气量是常用方法。

常规三维属性建模是在建立井点含气量后通过商业建模软件内置模拟算法由井点处含气量随机模拟到三维空间储层的含气量。这种“由井点到地质体”的随机模拟依赖于连续变量^[8],常规油气开发常位于平原区块,储层属性变化趋向性好,在模拟插值中可认为变量连续,而煤层气多在山地采用定向井开发,深度作为含气量重要影响因素,其连续性差会产生两种误差:①由于定向井靶点的大位移特性,由井口和井轨迹计算的埋深和靶点实际埋深有差异,这种差异随着地形复杂更明显;②开发初期井点稀疏,川南筠连区块地表形态和地下构造起伏变化较大,从已有井点插值模拟到三维空间时,无井点区域实际埋深及含气量的模拟误差较大。

为了解决上述问题,笔者以川南筠连区块煤层气储层为例,基于较少的实测井点信息,建立预测含气量的数学模型,考虑深度在地表形态和地下构造起伏共同作用下连续性差的特征,提出三维含气量建模的改进方法。

1 建模区域地质概况

筠连区块位于扬子地块西部,川南煤田西段,地表山势起伏大,西北和东南部为中低山区,切割深,比差大。区域构造位于川滇南北构造带之东,川黔南北构造带以西,四川前陆盆地南部,叙永—筠连叠加褶皱带,构造方向多异,褶皱型式不一^[9-10],区内主要出露地层为二叠系和三叠系。区域晚二叠世为海陆过渡的三角洲沉积背景,经历两次大规模海侵,多期小规模海进海退,在长兴期和龙潭期沉积多套煤层(C1~C25)^[11]。建模区域约12 km²,地表海拔

在+420—+800 m,煤储层为一向斜区域,海拔在-50—+120 m(图1,X、Y、Z为大地三维坐标)。区内断层多为走向北东-南西的高角度断层,最大主应力为北西-南东向,与区内断层走向近垂直,形成挤压封闭。区域强含水层为下二叠统茅口组和三叠系飞仙关组,地层中隔水层发育,煤储层水动力弱。主力开发煤储层为长兴组C7+C8煤合采,C7和C8间隔小于10 m,主要间隔分布在1~6 m,累计煤层厚度4.0~9.5 m,东厚西薄。宏观煤岩类型以暗淡煤、半暗煤为主,夹线理状-细条带状镜煤和亮煤;煤阶为高煤阶,镜质组反射率分布范围较小,中高灰分(表1)。受地表地形变化和构造影响,储层不同部位埋深变化较大;煤层含气量为7.2~20.7 m³/t。

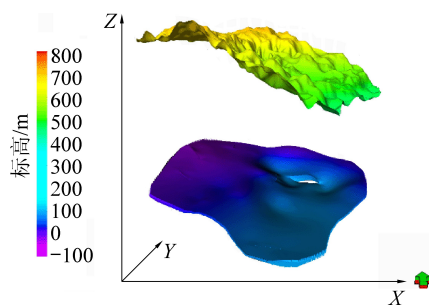


图1 模型空间形态

Fig.1 Model geometric space form

表1 储层煤质特征

Table 1 Basic features of coal

参数	分布范围	平均值
R_o /%	2.63~2.87	2.73
镜质组分/%	44.40~64.60	52.50
惰质组分/%	35.40~69.9	52.20
水分/%	0.40~1.80	1.10
灰分/%	15.38~66.07	30.27
挥发分/%	6.00~19.31	8.00
固定碳/%	23.30~73.67	55.62

2 含气量数学模型建立

为实现含气量属性的三维建模,首先需要建立预测含气量数学模型。当前含气量预测主要从井点入手,主要方法有:①煤级-灰分-含气性类比法^[12];对于煤级、灰分主控含气量区块较准确,适应选区储层构造变化不大区域;②测井曲线解释法^[13-14];含气量并无测井响应,测井解释法是通过建立实测含气量与样品层段测井曲线相关关系以达到解释含气量的目的,此方法从数值上寻求含气量与测井曲线的关系,对于内在控制因素表达不充分;

③神经网络法^[15-16]:输入实测数据进行机器学习,具有很强的非线性逼近能力,但需输入学习样本数尽可能多,才能实现神经网络训练;④地质多元统计分析法^[17]:在控制含气量的因素中通过相关系数优选出参数进行多元回归计算,相关系数为单相关条件下参数分析,需要样本较少;⑤灰色关联分析法^[18-19]:具有小样本不确定的特征,定量分析结果与定性分析结果吻合较好,但预测模型计算量较大。对于该区综合资料较少及实测含气量样本较少情况,优先选取灰色关联进行影响因素分析。

2.1 基于灰色关联的因素分析

影响煤层含气性因素主要有:煤质特征、煤变质程度、顶板岩性、煤层埋深、构造条件、水文条件、温度压力等。研究区煤层厚度小,煤层顶板为泥-粉砂岩,上部为砂泥互层;断层以挤压封闭断层为主,煤层中水动力弱;在埋深超过 1 000 m 的深部煤层气储层中温度和压力表现出与含气量负相关的特征^[20-21],本区相对为浅层。受实际测试参数影响,建模区域内试井数据较少且与煤岩工业分析匹配性差,因此,本次建模考虑影响含气量的因素主要考虑煤质特征(水分、灰分、挥发分、固定碳)、最大镜质组反射率($R_{o,max}$)、埋深。选取区内较完整配套的 16 组测试数据(表 2)。

表 2 样品含气量及影响因素测试结果

Table 2 Test results of coal gas content and control factors

编号	含气量/ ($m^3 \cdot t^{-1}$)	埋深/m	$R_{o,max}/\%$	煤质特征		
				水分/ %	灰分/ %	固定碳/ %
Z-1	8.57	579.76	2.63	1.37	65.95	24.47
Z-2	13.32	581.69	2.69	0.98	28.33	59.06
Z-3	14.66	593.98	2.73	0.4	39.17	49.04
Z-4	18.34	594.44	2.84	0.38	25.87	65.99
Z-5	11.21	600.78	2.78	0.62	36.03	54.54
Z-6	11.76	605.38	2.84	0.59	46.5	42.85
Z-7	11.73	551.84	2.83	0.66	26.58	62.46
Z-8	10.98	552.34	2.68	0.62	32.57	55.42
Z-9	19.34	554.58	2.81	0.41	22.74	67.77
Z-10	12.87	557.25	2.78	0.5	28.83	63.52
Z-11	8.75	314.56	2.68	0.85	45.56	26.65
Z-12	8.02	317.4	2.65	1.42	54.35	24.42
Z-13	17.70	659.74	2.92	0.56	32.16	60.62
Z-14	15.42	677.93	2.76	0.66	33.18	58.72
Z-15	20.70	683.56	2.91	0.47	16.83	73.03
Z-16	19.25	684.26	2.89	0.35	19.76	70.28

采用灰色关联理论进行因素分析^[22],使用 Matlab 软件进行灰色关联计算。

关联度分析结果表明影响筠连区块含气量的因素由强到弱依次为:水分、最大镜质组反射率、埋深、灰分、固定碳(表 3)。水分和含气量关联度最大,工业分析的水分是吸附在煤颗粒内部毛细管中和附着在煤颗粒表面的水,未达到临界含水量以前,甲烷吸附量随水分增加而减少; $R_o < 4.0\%$ 时,随着变质级别越高,Langmuir 体积越大,最大吸附量越大,研究区煤的 R_o 变化范围不大,最大镜质组反射率仅排关联序列第 2 位;关联序列第 3 位为埋深,埋深与储层压力有一定正相关性,而压力吸附量增多,同时埋深越大,煤储层的保存条件也越好;关联序列第 4 位为灰分,灰分代表煤中无机物部分,无机物含量越高,则有机物相对含量越低,生气和吸附气能力减弱;关联度最低的是固定碳,煤的碳含量大于固定碳,固定碳越多,间接反映煤中碳含量越高,生气能力强。

表 3 含气量与影响因素之间的关联度

Table 3 Correlation degree on coalbed methane content to influencing factors

影响因素	水分	$R_{o,max}$	埋深	灰分	固定碳
关联度	0.764	0.729	0.723	0.691	0.600
关联序列	1	2	3	4	5

2.2 多元回归预测模型建立与检验

由于灰色理论系统中 GM(1,N) 预测模型需要迭代回归以及修正计算^[23],计算量大且复杂,不利于后续笔者提出的三维含气量计算,而地质多元统计回归的数学模型计算量适宜,且含气量预测精度可以满足实际需求^[17]。故仅使用灰色关联进行参数分析,而采用计算量较小的地质多元统计回归方法建立预测模型。对灰色关联的 5 个参数进行多元线性回归分析,得式(1)为

$$V_{gas} = -0.468M_{ad} + 13.509R_o B_d - 0.212A_d - 0.076F_{cad} - 19.11 \tag{1}$$

式中: V_{gas} 为含气量, m^3/t ; M_{ad} 为水分, %; R_o 为镜质组反射率, %; B_d 为埋深, m; A_d 为灰分, %; F_{cad} 为固定碳, %。

式(1)中回归模型的相关系数 $R^2 = 0.674$, P 检验中的 P 值, $P = 0.004 < 0.010$, 显著性较强,但固定碳系数为负,这与固定碳越高生气能力越强相矛盾。对模型进行共线性检验,表 4 结果表明灰分和固定碳的方差膨胀因子 $VIF > 10$,二者具有强的共线性关系。灰分反映了煤的无机物部分占煤的百分比,固定碳反映了有机物部分占煤的百分比,两者显著相关。结合灰色关联序列排位结果,去除与含气量关

联度最小的固定碳,对水分、镜质组反射率、埋深、灰分再次进行多元线性回归计算,得式(2)为

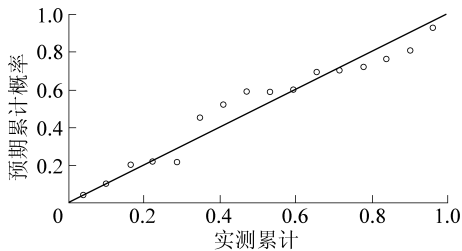
$$V_{\text{gas}} = -0.448M_{\text{ad}} + 13.633R_o + 0.009B_d - 0.137A_d - 24.213 \quad (2)$$

式(2)回归模型的 $R^2 = 0.701$, $P = 0.001 < 0.010$,

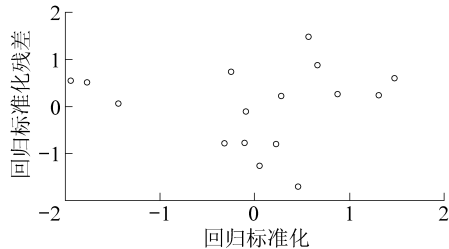
表4 模型参数检验

Table 4 Model test parameters

模型	调整后相关系数 R^2	显著性	显著性系数				
			水分	镜质组反射率	埋深	灰分	固定碳
式(1)	0.674	0.004	3.241	2.765	5.562	28.737	40.66
式(2)	0.701	0.001	3.240	2.762	1.735	2.762	—



(a) 回归标准化残差



(b) 散点图

图2 标准化检验结果

Fig.2 Standardized test results

3 三维含气量精细建模

含气量属性的精细建模需要在网格精细化的基础上,因此设置平面 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 网格,垂向网格控制在 $0.2 \sim 0.5\text{ m}$,模型网格达到 706.5 万个。笔者就含气量计算建模方法利用三维空间构造模型参与计算每个网格的实际埋深,使用建模商业软件将其它控制因素由井点进行模拟到三维空间(图3)。三维含气量精细建模可分为建立控制因素三维属性模型、建立三维含气量属性模型2步。

3.1 控制因素三维属性模型

对符合地质统计模拟规律,不受实际埋深影响的因素进行由井点到三维地质体的模拟。使每个三维网格具有水分、灰分、镜质组反射率属性值。水分和镜质组反射率受煤化作用影响^[24],基于地质统计等方法^[25]可得到三维模型每个网格的属性值。

较式(1)拟合度提高,显著性强。共线性检验4个校验参数值均小于10(表4),各参数的数值间不存在统计意义上的线性相关。标准化累计概率与预期标准化累计概率接近,回归标准化残差介于 $-2 \sim 2$,表明回归模型有效可靠(图2)。

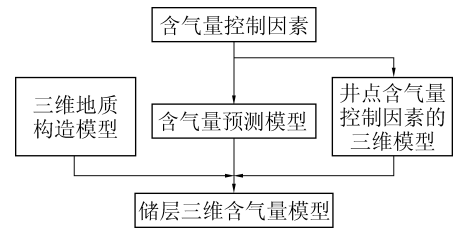


图3 三维含气量建模流程

Fig.3 3D gas content modeling process

灰分不仅与成煤过程有关,还受沉积时海陆分布影响,模拟中需通过物源方向进行控制。在有限数据下,为进一步提高模型精度,选取研究区98口生产井的测井数据,通过测井解释获取灰分、水分^[26]数据以增加灰分、水分三维属性模型的样本基数,灰岩特征对煤层气含量暂不考虑^[27]。

此步完成后三维空间中每个网格点 (i, j, k) 均有水分 $M_{\text{ad}}(i, j, k)$ 、灰分 $A_d(i, j, k)$ 、镜质组反射率 $R_o(i, j, k)$ 的属性值。

3.2 三维含气量属性模型

基于式(2)的预测模型,考虑真实深度的影响,三维地质体的任意网格 (i, j, k) 有:

$$V_{\text{gas}}(i, j, k) = -0.448M_{\text{ad}}(i, j, k) + 13.633R_o(i, j, k) + 0.009[Top(i, j) - Z(i, j, k)] - 0.137A_d(i, j, k) - 24.213 \quad (3)$$

式中: $V_{\text{gas}}(i, j, k)$ 为网格点 (i, j, k) 的含气量, m^3/t ; $M_{\text{ad}}(i, j, k)$ 为网格点 (i, j, k) 的水分, %; $R_o(i, j, k)$ 为网格点 (i, j, k) 的镜质组反射率, %; $Top(i, j)$ 为网格 (i, j, k) 对应地表标高, m; $Z(i, j, k)$ 为网格 (i, j, k) 中心的标高, m; $A_d(i, j, k)$ 为网格 (i, j, k) 的灰分, %。

精细的三维地质模型拥有百万以上的网格数,对整个三维地质体的每个网格的含气量属性都进行数学模型计算,需要预测模型的计算足够简便,故在第2.2节中采用多元回归建立预测模型,而非灰色关联的 $GM(1, N)$ 预测模型。由式(3)计算可得精

细的三维含气量模型。

4 结果分析与讨论

笔者建模方法三维含气量精细建模结果如图4a所示。笔者建模方法考虑了储层每个网格受埋深的影响,与常规含气量建模图4b对比,对于向斜核部深埋及地表高山隆起区域建模的含气量比

常规建模的含气量值高。笔者建模含气量分布较为集中,主要分布在 $14\sim 17\text{ m}^3/\text{t}$,而常规建模方法含气量分布广,主要集中在 $12\sim 17\text{ m}^3/\text{t}$ (图4c)。常规含气量建模的分布具有明显随机模拟的特征,分布的峰态在随机模拟方法中可有不同设置,随机性强,含气量的模拟趋于实际情况的误差较难控制。

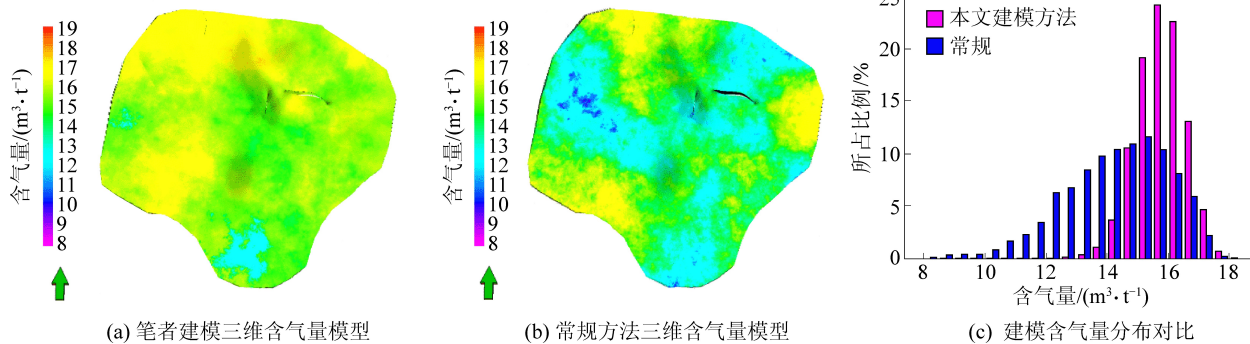


图4 模拟结果对比

Fig.4 Comparison of simulation results

4.1 模拟流程的改进

使用由构造计算的实际埋深 B_d ,加强水分 M_{ad} 、灰分 A_d 、镜质组反射率 R_o 在三维空间中的控制有利于精细描述含气量。

从井点信息到三维储层必然需要随机模拟,由井点含气量到储层的三维含气量只需要一次随机模拟,但实测取心井点含气量数量少,其连续变化特征不明显,随机模拟参数设置不易。笔者含气量建模用到了3次随机模拟,一个区域内水分和镜质组反射率在煤化作用控制下,灰分也得到沉积的控制,其变化连续性好,随机模拟质量高。且生产井水分和灰分的测井解释给模拟添加更多基础数据,有利于提高随机模拟质量。与常规建模最大的不同在于笔者方法所有网格计算时使用的都是真实的深度,随机模拟不直接或间接涉及深度的处理。在地表和地下构造变化剧烈的筠连区块,考虑实际埋深计算含气量的结果和常规建模方法计算含气量结果会出现显著不同。

4.2 实际生产验证

在实际生产中出现煤层气井间产气量差异难以解释的问题,笔者从三维含气量角度进行分析。

Z19井组是具有相同工程条件,储层厚度相近,孔渗物性接近的井组(图5)。其井控范围内储层西高东低,角度变化量小于 7.5° 。常规含气量建模结果中,井组间含气量表现较一致(图5a)。但在实际生产中出现井间产能差异,Z19井组进入稳产阶段

后,Z19-0、Z19-1、Z19-2井日产气量较Z19-3、Z19-4井日产气量低。从三维含气量模型分析,在常规建模含气量差异不大的Z19井组范围内,笔者的三维含气量建模表现出差异,含气量具有由北向南减少的趋势(图5b),这与井间产能表现的差异相吻合。

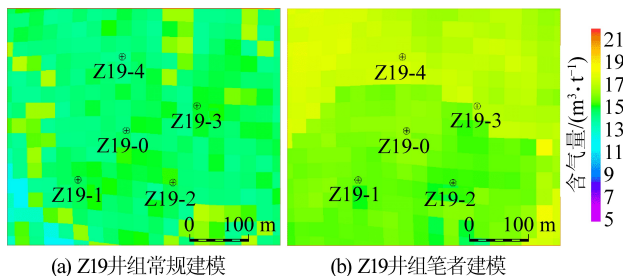


图5 Z19井组含气量对比

Fig.5 Comparison of coalbed methane content in Well Z19

为了进一步分析含气量造成产能差异的可能性,可从气藏工程角度验证,由产气量反推含气量。利用生产数据进行物质平衡计算井控储量,再由储量计算井控范围的平均含气量。采用文献[28]物质平衡方法,考虑排水解吸,气体溶解度,孔隙压缩性和基质收缩。计算结果表明井控制范围平均含气量为:Z19-0井 $14.65\text{ m}^3/\text{t}$ 、Z19-1井 $11.34\text{ m}^3/\text{t}$ 、Z19-2井 $11.63\text{ m}^3/\text{t}$ 、Z19-3井 $17.68\text{ m}^3/\text{t}$ 、Z19-4井 $19.82\text{ m}^3/\text{t}$,含气量也具有由北向南减少的趋势,与笔者建模结果相近。

5 结 论

1)通过灰色关联分析得到与川南筠连区块煤层含气量相关的影响因素由强到弱依次为:水分、最大镜质组反射率、埋深、灰分、固定碳。经统计检验建立的多元回归含气量预测模型精度较好,模型 $R^2=0.701$, $P=0.001<0.010$ 在 99% 的显著性水平下显著。

2)筠连区块地表形态和储层构造形态对实际埋深的影响较大,笔者改进的含气量计算避免了常规由井点含气量模拟到三维地质体过程中实际埋深信息丢失的问题,尽可能利用现有数据,改进了三维含气量建模的方法流程。

3)在实际埋深较大区域笔者改进计算模型的含气量比常规建模的结果高。改进的三维含气量模型与 Z19 井组实际生产特征相符。

4)埋深对含气量控制主要原因是压力,受数据限制笔者未进行储层压力属性建模,引入压力模型提高含气量建模精度有待进一步研究。

参考文献(References):

- [1] 路玉林,王联军,王英超.中国煤层气产业发展现状及趋势分析[J].中国矿业,2017,26(S1):19-22,46.
LU Yulin, WANG Lianjun, WANG Yingchao. Analysis of the development situation and the trend of coalbed methane industry in China[J]. China Mining Magazine, 2017, 26(S1): 19-22, 46.
- [2] 吴胜和,李宇鹏.储层地质建模的现状与展望[J].海相油气地质,2007,12(3):53-60.
WU Shenghe, LI Yupeng. Reservoir modeling: current situation and development prospect[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2007, 12(3): 53-60.
- [3] 吴胜和,张一伟,李恕军,等.提高储层随机建模精度的地质约束原则[J].石油大学学报:自然科学版,2001,25(1):55-58.
WU Shenghe, ZHANG Yiwei, LI Shujun, et al. Geological constraint principles in reservoir stochastic modeling[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 2001, 25(1): 55-58.
- [4] 李阳,吴胜和,侯加根,等.油气藏开发地质研究进展与展望[J].石油勘探与开发,2017,44(4):569-579.
LI Yang, WU Shenghe, HOU Jiagen, et al. Progress and prospects of reservoir development geology[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(4): 569-579.
- [5] SACCHI Q, BORELLO E S, WELTJE G J, et al. Increasing the predictive power of geostatistical reservoir models by integration of geological constraints from stratigraphic forward modeling[J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 69: 112-126.
- [6] 杨起.煤地质学进展[M].北京:科学出版社,1987.
- [7] 刘文岭.油藏地球物理学基础与关键解释技术[M].北京:石油工业出版社,2014.
- [8] OLIVEIRA G S, SOARES A O, SCHIOZER D J, et al. Reducing uncertainty in reservoir parameters combining history matching and conditioned geostatistical realizations[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 156: 75-90.
- [9] 梁兴,叶熙,张介辉,等.滇黔北坳陷威信凹陷页岩气成藏条件分析与有利区优选[J].石油勘探与开发,2011,38(6):693-699.
LIANG Xing, YE Xi, ZHANG Jiehui, et al. Reservoir forming conditions and favorable exploration zones of shale gas in the Weixin Sag, Dianqianbei Depression[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(6): 693-699.
- [10] 舒兵.筠连区块二叠系乐平统宣威组煤环境与聚煤规律研究[D].成都:西南石油大学,2016.
- [11] 朱志敏,陈岑,尹中山.川南煤田晚二叠世含煤系统分析[J].煤炭科学技术,2010,38(7):104-108.
ZHU Zhimin, CHEN Cen, YIN Zhongshan. Analysis on upper Permian coal system in South Sichuan Coalfield[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(7): 104-108.
- [12] 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.推断区及预测区煤层含气性预测[J].煤田地质与勘探,1997,25(6):20-24.
QIN Yong, LIU Huanjie, FAN Binhuan, et al. Study on gas potential of the upper Paleozoic in South Shanxi Province (Part 2): prediction of coalbed gas inferred area and prediction area[J]. Coal Geology & Exploration, 1997, 25(6): 20-24.
- [13] 唐颖,李乐忠,蒋时馨,等.煤层含气量测井解释方法参数选择及适用性[J].煤田地质与勘探,2015,43(4):94-98.
TANG Ying, LI Lezhong, JIANG Shixin, et al. Parameter selection and applicability of gas content logging interpretation methodology in coal seam[J]. Coal Geology & Exploration, 2015, 43(4): 94-98.
- [14] 高绪晨,张炳,姜法.煤层工业分析、吸附等温线和含气量的测井解释[J].测井技术,1999,23(2):108-111.
GAO Xuchen, ZHANG Bing, XIAN Fa. Log interpretation for industrial analysis, sorption isotherm and gas content of coalbed[J]. Well Logging Technology, 1999, 23(2): 108-111.
- [15] 孟召平,田永东,雷旸.煤层含气量预测的BP神经网络模型与应用[J].中国矿业大学学报,2008,37(4):456-461.
MENG Zhaoping, TIAN Yongdong, LEI Yang. Prediction models of coal bed gas content based on BP neural networks and its applications[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(4): 456-461.
- [16] ZHOU Fengde, YAO Guangqing, TYSON S. Impact of geological modeling processes on spatial coalbed methane resource estimation[J]. International Journal of Coal Geology, 2015, 146: 14-27.
- [17] 胡亚斐,张遂安,吴畴颖.基于地质多元统计分析的煤层气含量建模方法:以沁水盆地南部某区块3号煤层为例[J].煤田地质与勘探,2013,41(2):33-36.
HU Yafei, ZHANG Suian, WU Shiyang. The gas content modeling method based on geological statistical analysis: with No. 3 seam in Southern Qinshui Basin as an example[J]. Coal Geology & Exploration, 2013, 41(2): 33-36.

- [18] 王盼盼, 秦 勇, 高 弟. 观音山勘探区煤层含气量灰色关联预测[J]. 煤田地质与勘探, 2012, 40(4): 34-38.
WANG Panpan, QIN Yong, GAO Di. Grey relational prediction of coalbed methane content in Guanyinshan Exploration District [J]. Coal Geology & Exploration, 2012, 40(4): 34-38.
- [19] 许亚坤, 王 昆, 张 鹏. 永城矿区煤层气主控因素分析及含气量预测研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(5): 170-174.
XU Yakun, WANG Kun, ZHANG Peng. Study on coalbed methane main control factors and gas content prediction in Yongcheng Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(5): 170-174.
- [20] 赵丽娟, 秦 勇, 申 建. 深部煤层吸附行为及含气量预测模型[J]. 高校地质学报, 2012, 18(3): 553-557.
ZHAO Lijuan, QIN Yong, SHEN Jian. Adsorption behavior and abundance predication model of deep coalbed methane[J]. Geological Journal of China Universities, 2012, 18(3): 553-557.
- [21] 李辛子, 王运海, 姜昭琛, 等. 深部煤层气勘探开发进展与研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 24-31.
LI Xinzi, WANG Yunhai, JIANG Zhaochen, *et al.* Progress and study on exploration and production for deep coalbed methane [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 24-31.
- [22] 刘思峰. 灰色系统理论及其应用: 第7版[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [23] 郝天轩, 柳 猛. 基于多元非线性回归理论的煤层瓦斯含量预测[J]. 煤炭技术, 2014, 33(9): 1-3.
HAO Tianxuan, LIU Meng. Prediction of coal seam gas content based on multivariate nonlinear regression[J]. Coal Technology, 2014, 33(9): 1-3.
- [24] 杨天宇, 王涵云. 褐煤干酪根煤化作用成气的模拟实验及其地质意义[J]. 石油勘探与开发, 1983, 10(6): 29-36.
YANG Tianyu, WANG Hanyun. Simulation experiment of kerogen gasification into coal in kerogen and its geological significance [J]. Petroleum Exploration and Development, 1983, 10(6): 29-36.
- [25] 张明禄, 王家华, 卢 涛. 应用储层随机建模方法计算概率储量[J]. 石油学报, 2005, 26(1): 65-68, 73.
ZHANG Minglu, WANG Jiahua, LU Tao. Calculation of probabilistic reserves of reservoir with stochastic modeling method [J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(1): 65-68, 73.
- [26] 邵先杰, 孙玉波, 孙景民, 等. 煤岩参数测井解释方法: 韩城矿区为例[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(5): 559-565.
SHAO Xianjie, SUN Yubo, SUN Jingmin, *et al.* Logging interpretation of coal petrologic parameters: a case study of Hancheng Mining Area [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(5): 559-565.
- [27] 高向东, 王延斌, 张崇崇, 等. 煤层顶板灰岩特征对煤储层含气量的影响研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(5): 164-169.
GAO Xiangdong, WANG Yanbin, ZHANG Chongchong, *et al.* Study on impact of limestone features of coal seam roof on gas content of coal reservoir [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(5): 164-169.
- [28] SHI Juntai, CHANG Yucui, WU Shigui, *et al.* Development of material balance equations for coalbed methane reservoirs considering dewatering process, gas solubility, pore compressibility and matrix shrinkage [J]. International Journal of Coal Geology, 2018, 195: 200-216.