

寺河井田3号煤层含气量三维建模

李 勇¹, 陈祖国², 徐建军¹, 周加佳¹, 苏善博³, 张 震²

(1. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 西安 710077; 2. 贵州豫能投资有限公司, 贵州 毕节 551700;

3. 煤炭科学研究总院, 北京 100013)

摘要:煤层含气量直接决定了煤层气资源开发的潜力及井下煤炭开采的安全程度,为直观准确地表征煤层含气量空间分布特征,指导下一步工程部署并探索地质工程一体化思路,选取寺河井田西区3号煤层,以28口井的含气量测试、煤样工业分析数据及125口地面井分层数据等为基础,首先建立多元回归含气量预测数学模型,然后借助地质建模软件建立深度、水分、灰分、固定碳三维属性模型,经过模型数值运算,最后生成含气量三维模型,并与气井排采10年内日均产气量的分布特征进行对比。结果表明,数学预测模型可信,以此建立的含气量三维模型内平均含气量为 $19.95\text{ m}^3/\text{t}$,含气量分布受深度控制较为明显,与常规模型相比,其与实际产能分布特征一致性更高,在高含气区域形成了连片的日均产气量大于 $4\,500\text{ m}^3/\text{d}$ 高产井,模型可靠,对下一步井位部署及数值模拟预测剩余含气量分布具有指导意义。

关键词:多元回归;煤层气;含气量 三维建模;地质工程一体化

中图分类号:TD712 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)22-0275-06

煤层气具有能源、安全和环保三大属性,开发煤层气有利于增加清洁能源供应、减少煤矿瓦斯事故和温室气体排放,贡献“双碳”目标^[1-2]。但是目前受限于储层地质条件,以及相适应的开发技术,国内煤层气井产量普遍较低,煤层气行业地质研究与工程脱节较严重,迫切需要引入地质工程一体化思路^[3-6],实现煤层气井的效益开发,这一思路中,对目标区块进行精细化三维地质建模是核心^[7-8],三维地质建模可以广泛结合地质和数学领域的研究成果,实现对地质体更加准确的定量表征^[9]。

在煤层气开发过程中,从地质角度来看,煤层含气量大小直接决定了开发的资源丰度和潜力,因此准确预测并直观表征煤层含气量分布特征十分必要。在实际生产中,常常只能通过施工参数井获得数据,含气量数据量少而非均质性强,因此提出了诸多预测方法,包括煤级灰分类比法、数值模拟、地震解释、测井曲线解释法、神经网络法、地质多元统计分析法、灰色关联分析法、深度学习^[10-18]等,但在应用预测方法进行含气量直观表征时,只能进行非数据化的平面二维图形展示,也无法进行大规模的数值运算及模拟,严重影响了各种数学预测模型的推广应用。

三维地质建模在常规油气储层方面已得到广泛的应用,借鉴油气储层的建模思路,学者们在煤储层建模流程方面也进行了相关尝试,但针对煤储层属性参数三维精细建模应用相对有限,且方法大多集中在建立井点处煤储层参数后,通过商业建模软件内置模拟算法由井点处参数随机模拟到三维空间储层的参数分布,随机性太强。未充分发挥煤储层参数之间的地质相关性,提升三维地质模型的准确性。

本文以寺河井田为例,寺河井田是我国最早形成煤层气规模化开发的地区,并且取得了较好的抽采效果^[19],但是区域内不同煤层气井产能差异较大。因此本文以寺河区块参数测试数据为基础,首先建立基于埋深及煤岩样品工业分析结果的含气量预测数学模型,借助三维地质模型可数据化运算优势,在构造模型基础上,建立3号煤层含气量三维精细模型,以此分析其对煤层气井产能差异的影响,探讨区域产能差异原因这对下一步井网部署及探索煤层气开发地质工程一体化思路意义重大。

1 建模区域地质概况

以寺河井田西区为研究区,东西长度约7.8 km,南北宽度约4.8 km,面积为 37.4 km^2 ,井田地表地

收稿日期:2023-05-21

基金项目:中煤科工西安研究院(集团)有限公司科技创新基金项目(2021XAYJSQ05,2020XAYJS10)。

作者简介:李勇(1993—),男,河南洛阳人,中煤科工西安研究院(集团)有限公司,助理工程师,硕士,研究方向为煤层气开发及煤储层三维地质建模。

貌特征以中山和中低山为主,次为低山及丘陵,地势呈北高,中、南部低的簸箕状(图1);地层上由老到新依次为奥陶系、石炭系、二叠系、第四系^[20],构造上处于沁水复式向斜盆地南端东翼,区内分布与沁水大型复式向斜走向一致的倾向北西-北西西单斜构造,同时发育少量小断层和陷落柱,总体属地质构造简单类。3号煤层位于石炭系山西组(P_{1s})下部,厚度在5.00~7.22 m,平均为6.21 m,埋深为214~460 m,煤体结构以原生结构煤为主,基本不含碎粒煤和糜棱煤^[21],属高变质程度的无烟煤,挥发分为7%~8%,为中等灰分、低挥发分煤,是目前井下煤炭及地面煤层气勘探开发的主力煤层。

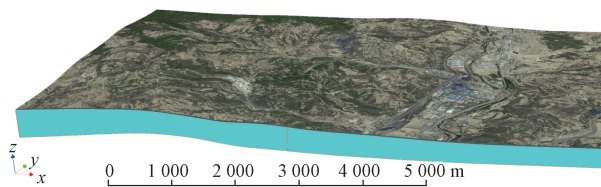


图1 研究区概况

2 含气量数学预测模型建立

为完成含气量三维建模,首先应完成含气量预测数学模型建立。影响煤层含气量的因素很多,有煤层厚度、埋深、煤的变质程度、灰分产率、水分含量、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^[22],但本研究区范围小,区域内所做试井测试数据不多,因此仅在现有数据及满足模型计算量的需求下,以收集的28口参数井煤岩工业分析结果及煤层埋深数据为基础(表1),采用皮尔逊相关性分析方法对含气量与埋深、水分、灰分、挥发分及固定碳含量进行关联度检验(表2)。

其中, $P < 0.01$ 说明显著性相关, $P < 0.05$ 为相关,最后通过线性多元回归建立含气量与各参数的回归方程式如下

$$V_{\text{gas}} = -86.354 + 0.069D - 7.056M_{\text{ad}} + 0.904A_{\text{d}} + 0.280V_{\text{daf}} + 0.966FC_{\text{d}} \quad (1)$$

式中: V_{gas} 为含气量(m^3/t); M_{ad} 为水分(%); D 为埋深(m); A_{d} 为灰分(%); FC_{d} 为固定碳(%).

式(1)回归方程相关系数 $R^2 = 0.824$,可信度较高,但是变量中挥发分(V_{daf})显著性系数 $P = 0.895 > 0.05$,表明含气量与挥发分无关。但是一般而言挥发分含量可反映煤的变质程度,煤的变质程度高,生气量也相应增加,说明区域内煤变质程度对气含

表1 煤样含气量及工业分析结果

序号	含气量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	埋深/ m	水分/ %	灰分/ %	挥发分/ %	固定碳/ %
1	22.40	332.50	2.95	14.23	6.80	93.19
2	26.33	403.27	2.50	12.46	6.60	93.40
3	24.28	287.46	2.63	17.63	8.35	91.65
4	24.92	327.21	2.35	13.31	6.90	93.10
5	20.30	312.35	2.41	15.36	6.82	93.18
6	22.17	246.70	1.90	15.63	8.55	91.45
7	8.49	319.31	0.94	14.49	5.96	66.53
8	27.79	388.90	2.14	7.41	5.91	94.09
9	23.28	341.23	2.42	14.21	8.00	92.00
10	23.15	316.35	2.09	16.49	9.19	90.81
11	21.52	287.11	1.42	14.96	6.48	85.21
12	24.24	496.04	2.03	14.57	6.73	78.50
13	11.04	345.69	1.23	12.80	6.50	70.01
14	26.18	459.70	1.75	14.19	6.39	81.98
15	25.90	475.73	1.56	15.02	6.57	77.50
16	23.96	424.00	0.93	13.55	6.65	75.90
17	22.62	450.32	2.73	16.66	6.70	82.11
18	21.52	287.11	1.42	14.96	6.48	85.98
19	5.31	286.71	2.17	11.00	6.99	82.79
20	15.14	365.08	1.89	12.83	7.94	80.25
21	18.82	343.65	1.66	14.72	7.90	78.54
22	12.87	286.95	2.76	15.98	8.09	77.24
23	16.15	355.22	2.06	13.20	6.70	81.00
24	16.72	283.71	2.02	12.18	7.46	81.28
25	4.42	269.50	2.17	16.39	7.92	77.01
26	8.71	325.59	2.49	10.56	6.77	83.39
27	5.63	295.54	2.65	14.75	7.73	78.68
28	5.98	321.18	2.93	12.63	7.24	81.06

表2 含气量与各参数关联度检验

模型	调整后相关系数 R^2	显著性系数 P				
		埋深/ m	水分/ %	灰分/ %	挥发分/ %	固定碳/ %
式(1)	0.824	0.039	0.034	0.020	0.895	0.000
式(2)	0.824	0.030	0.015	0.049	—	0.000

量影响不大,这也与研究区内煤质普遍为高变质程度的无烟煤,本身挥发分含量变化不大,这一背景相吻合。

因此,去除挥发分(V_{daf})这一变量,对埋深、水分、灰分及固定碳的再次进行多元线性回归计算,公式为

$$V_{\text{gas}} = -84.285 + 0.068D - 7.229M_{\text{ad}} + 0.970A_{\text{d}} + 0.963FC_{\text{d}} \quad (2)$$

式(2)回归方程相关系数 $R^2 = 0.824$,各变量 P 均小于0.05,较式(1)中的 R^2 不变,而且各变量显著性系数均小于0.05,固定碳含量 $P = 0.001 <$

0.01,与含气量相关性最高,这与固定碳越多,间接反映煤中碳含量越高,生气能力强,这一基本认识也相符;预期累计概率与实测累计概率接近,标准化残差直方图分布基本符合正态分布,回归标准化残差介于-2~2,表明回归方程可信度较高(图2)。

3 三维含气量建模

含气量三维建模分为构造及煤层建模、含气量控制因素三维建模、含气量三维建模3步(图3)。地质建模是基于多学科数据的,数据的准确性及丰富程度从根本上决定着模型的精度。构造建模以116口地面煤层气井、9口勘探井的分层数据,辅以3煤底板等高线、断层数据、地面高程数据为基础完成研究区构造及煤层建模。

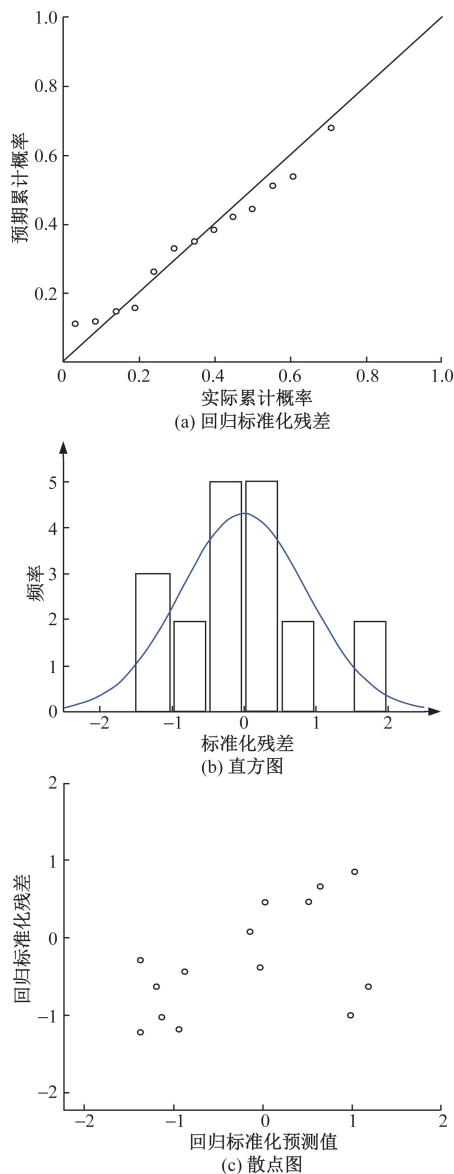


图2 标准化检验结果

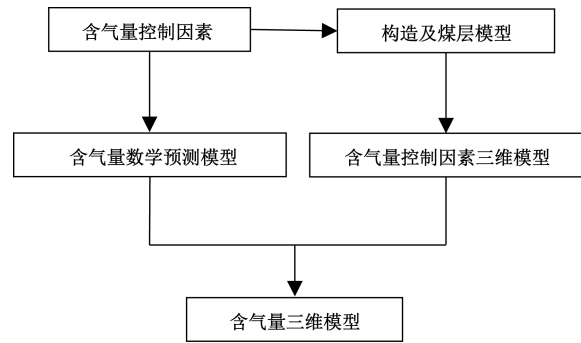


图3 建模流程

3.1 构造及煤层建模

构造及煤层模型包括断层模型及层面模型,断层模型以煤矿底板等高线上断点数据为基础,构建研究区发育的4条小断层;层面模型以3号煤层顶板板及地表层面模型,要求构建的煤层网格模型垂向分辨率小于各参数测试岩样段数据长度(<0.2 m)和平面分辨率小于井间距(<100 m),最终以 $100 \times 63 \times 30 = 190\,890$ 个网格完成对煤层模型的构建。最终完成研究区的构造及煤层建模(图4)。

3.2 控制因素三维属性模型

在进行三维属性建模之前,首先通过变差函数分析,确定水分、灰分、固定碳数据在垂向上、主变程和次变程方向上的变差函数曲线,得出主变程方向、次变程方向、主变程、次变程、垂向变程。经过多次调参试验实验,最终选择高斯变差函数模型,作为属性参数分析模型,以灰分参数为例,进行变差函数分析后,得出灰分主方向为 45° ,主变程为2 382.3 m,次变程为1 178.6 m,垂向变程为4.6 m。具体建模步骤,首先需要将井点煤质参数数据粗化到网格内,然后在煤质参数变差函数分析的基础上,在煤层网格模型内,使用序贯高斯模拟方法,对水分、灰分、固定碳参数进行三维属性建模,如图5(a)~图5(c)所示。模型结果显示区域内水分含量为0.8%~3.4%,灰分含量为6.7%~25.0%、固定碳含量为77.0%~94.1%。

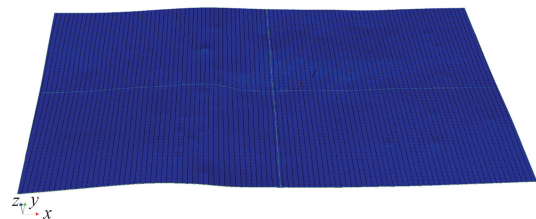


图4 构造及煤层模型

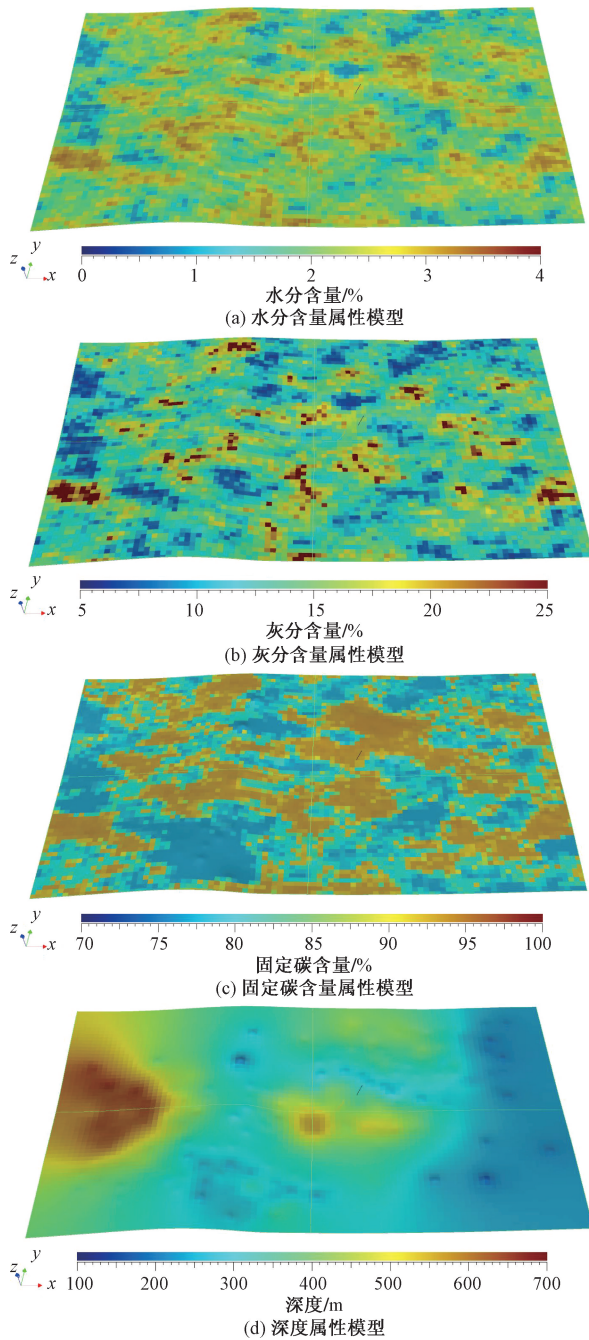


图5 控制因素三维属性模型

深度属性模型直接通过模型运算获得(煤层模型高程值与地表层面高程值相减)。由深度属性模型[图5(d)]可知,模型西侧、中心及中北部煤层埋藏较深,基本都大于400 m。

此时各个属性参数模型每个网格属性值可以表示为 $D(i, j, k)$ 、 $M_{ad}(i, j, k)$ 、 $A_d(i, j, k)$ 、 $FC_d(i, j, k)$ 。

3.3 含气量三维建模

基于预测数学模型(2),可以得到含气量三维模型每个网格属性值表达式为

$$V_{gas}(i, j, k) = -84.285 + 0.068D(i, j, k) - 7.229M_{ad}(i, j, k) + 0.970A_d(i, j, k) + 0.963FC_d(i, j, k) \quad (3)$$

式中: $V_{gas}(i, j, k)$ 为含气量模型中 (i, j, k) 网格点数值; $M_{ad}(i, j, k)$ 为水分含量模型中 (i, j, k) 网格点数值; $A_d(i, j, k)$ 为灰分含量模型中 (i, j, k) 网格点数值; $FC_d(i, j, k)$ 为固定碳含量模型中 (i, j, k) 网格点数值。

借助软件中三维模型数值运算功能,通过式(3),建立多元回归预测的含气量三维模型(图6),结果显示模型内平均含气量为 $19.95 \text{ m}^3/\text{t}$ 。

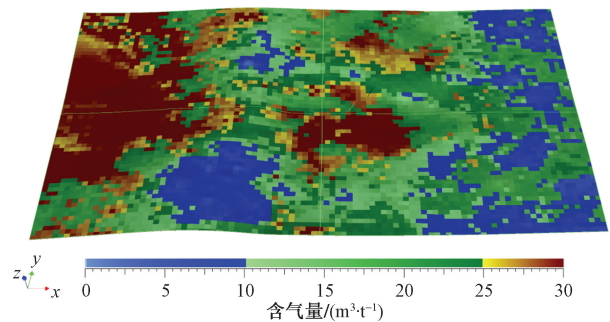


图6 多元回归预测的含气量三维模型

4 模型对比与检验

多元回归预测建立的含气量三维模型进行检验之前,同时采用常规建模方法,随机模拟生成含气量三维模型,然后以两个三维模型为基础,计算模型垂向平均值,生成多元回归预测的含气量平面图(图7)和常规建模的含气量平面图(图8),可以发现二者明显不同。前者中含气量在模型西侧、中心及中北部形成三个高含气区域,与深度模型[图5(d)]大于400 m的分布范围基本一致,说明区域含气量受深度控制较为明显,而后者含气量分布规律性不强。

煤层含气量对产能具有直接的影响,根据地区已有研究表明含气量分布与产能分布一致度较高^[23-25],因此以138口单采3号煤的气井近10年间的平均产气量为依据,绘制了研究区产能分布特征图(图9),研究区内单井日均产气量为 $453.98 \sim 9\,131.92 \text{ m}^3/\text{d}$,最高单井产量为 $22\,953 \text{ m}^3/\text{d}$ 。对所建立的模型进行检验。

利用多元回归预测的含气量分布与产气量分布一致性更高,在日均产气量大于 $2\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 的井均分布在气含量大于 $15 \text{ m}^3/\text{t}$ 的区域,日均产气量大于 $4\,500 \text{ m}^3/\text{d}$ 的井分布范围与高含气区域基本一致。说明气含量大小与单井产气量相关性较强,

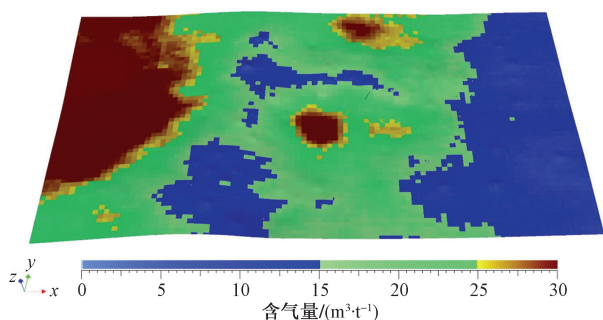


图7 多元回归预测的含气量分布平面

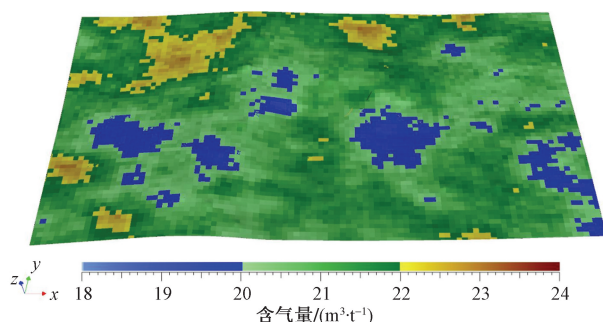


图8 常规建模含气量分布平面

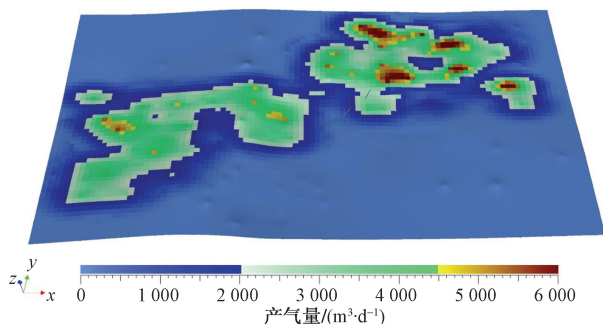


图9 10年间产能分布特征

而含气量受深度控制较为明显,可见区域内埋深对产能影响较大;同时说明建立的模型可靠,可为后续工程部署及产能模拟预测剩余含气量提供重要的支撑,探索煤层气地质工程一体化开发思路。

5 结论

通过皮尔逊相关性分析得到与寺河区块煤层含气量相关的影响因素为埋深、水分、灰分、固定碳。经多元线性回归方法建立含气量预测数学模型, $R^2=0.824$, $P<0.05$,模型可信。

通过三维地质建模软件,完成研究区煤层及构造模型,然后采用随机模拟方法完成水分、灰分、固定碳三维模型并通过模型计算获得深度属性模型,模型结果显示在模型西侧、中心及中北部埋藏深度较深,基本都大于400 m。

对深度、水分、灰分、固定碳三维属性模型进行回归预测数学模型运算,获得含气量三维模型,显示平均含气量为 $19.95 \text{ m}^3/\text{t}$,含气量分布受深度控制较为明显,同时与常规模型相比,其与实际产能分布特征一致性更高,在高含气区域形成了连片的日均产气量大于 $4\,500 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产井。

建立模型可靠,可为后续工程部署及产能模拟预测剩余含气量提供重要的支撑,探索煤层气地质工程一体化开发思路。

参考文献

- [1] 邹才能,马锋,潘松圻,等.论地球能源演化与人类发展及碳中和战略[J].石油勘探与开发,2022,49(2):411-428.
- [2] 滕吉文,王玉辰,司芾,等.煤炭、煤层气多元转型是中国化石能源勘探开发与供需之本[J].科学技术与工程,2021,21(22):9169-9193.
- [3] 黄浩勇,范宇,曾波,等.长宁区块页岩气水平井组地质工程一体化[J].科学技术与工程,2020,20(1):175-182.
- [4] 姚红生,陈贞龙,郭涛,等.延川南深部煤层气地质工程一体化压裂增产实践[J].油气藏评价与开发,2021,11(3):291-296.
- [5] 孙钦平,赵群,姜馨淳,等.新形势下中国煤层气勘探开发前景与对策思考[J].煤炭学报,2021,46(1):65-76.
- [6] 李贵红,赵佩佩,吴信波.煤层气地质工程一体化平台的建设构想[J].煤田地质与勘探,2022,50(9):130-136.
- [7] 张平松,李洁,李圣林,等.三维地质建模在煤矿地质可视化中的应用分析[J].科学技术与工程,2022,22(5):1725-1740.
- [8] 刘英君,朱海燕,唐煊赫,等.基于地质工程一体化的煤层气储层四维地应力演化模型及规律[J].天然气工业,2022,42(2):82-92.
- [9] 贾爱林,郭智,郭建林,等.中国储层地质模型30年[J].石油学报,2021,42(11):1506-1515.
- [10] 杨兆中,杨晨曦,李小刚,等.基于灰色关联的逼近理想解排序法的煤层气井重复压裂选井——以沁水盆地柿庄南区块为例[J].科学技术与工程,2020,20(12):4680-4686.
- [11] 李媛,郭大立,康芸玮.融合注意力机制的煤层气产量动态预测[J].科学技术与工程,2023,23(2):550-557.
- [12] 侯晓琳.深度学习在地质储层属性预测中的应用研究[J].计算机应用与软件,2020,37(4):40-47.
- [13] 周优,张松航,唐书恒,等.柿庄南区块3号煤层含气量三维建模[J].煤田地质与勘探,2020(1):96-104.
- [14] 孟召平,田永东,雷响.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(4):456-461.
- [15] 郭广山,郭建宏,孙立春,等.基于随机森林算法的煤层含气量三维精细建模[J].中国海上油气,2022,34(4):156-163.
- [16] 冯汝勇,柳迎红,廖夏,等.基于井底流压的煤储层含气量计算方法研究[J].煤炭科学技术,2020(S1):105-108.

- [17] 胡亚斐,张遂安,吴峙颖.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(2):33-36.
- [18] 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(8):219-225.
- [19] 李国富,张为,李猛,等.沁水盆地寺家庄区块煤储层含气性及产能控制因素[J].煤田地质与勘探,2022(3):146-155.
- [20] 姜在炳,杨建超,李勇,等.基于三维地质建模技术的煤层气抽采效果评价——以晋城寺河煤矿为例[J].煤田地质与勘探,2022(2):55-64.
- [21] 李勇,姜在炳,刘钰辉.基于三维地质建模的煤层气井产能特征分析[J].煤矿安全,2020(4):190-194.
- [22] 李贵红,张泓,崔永君,张培河,董敏涛.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[J].煤田地质与勘探,2005(3):22-25.
- [23] 常会珍,郝春生,张蒙,等.寺河井田煤层气产能分布特征及影响因素分析[J].煤炭科学技术,2019(6):171-177.
- [24] 李国富,张为,李猛,等.沁水盆地寺家庄区块煤储层含气性及产能控制因素[J].煤田地质与勘探,2022(3):146-155.
- [25] 张典坤,王生维,李梦溪,等.晋城煤层气井产能的地质控制因素分析[J].天然气地球科学,2010,21(3):513-517.

Gas Content Modeling of No. 3 Coal Seam in District of Sihe Mine Field

LI Yong¹, CHEN Zuguo², XU Jianjun, ZHOU Jiajia¹, SU Shanbo³, ZHANG Zhen²

(1. China Coal Research Institute Xi'an Science and Industry Group, Xi'an 710077, China;

2. Guizhou Yuneng Investment Co. Ltd., Bijie 551700, China;

3. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: The potential of coalbed methane resource development and the safety of underground coal mining are directly determined by the coalbed gas content. In order to intuitively and accurately characterize the spatial distribution characteristics of coalbed gas content, guide the next project deployment and explore the idea of geology and engineering integration. The No. 3 coal seam in the west area of Sihe mine field was selected. Based on the data of the tested gas content and industrial analyzed coal samples of 28 wells and the coal seams layered data of 125 surface wells, firstly the multivariate regression mathematical model of gas content prediction was established. Then the three-dimensional attribute model of burial depth, moisture content, ash content, and fixed carbon content were established by geological modeling software. Finally the three-dimensional gas content model was built by numerical calculation in the geological modeling software, which was compared with the distribution characteristics of the average daily gas production within 10 years of gas well drainage. The results show that the mathematical prediction model is credible. The average gas content is 19.95 m³/t in the three-dimensional gas content model established by this method, and the distribution of gas content is obviously controlled by the burial depth. Compared with the conventional gas modeling, it is more consistent with the actual production capacity distribution characteristics. Contiguous high-yield wells with an average daily gas production of more than 4 500 m³/d are formed in high gas-contenting areas. The model is reliable and has guiding significance for the next well location deployment and numerical simulation to predict the distribution of remaining gas content.

Keywords: multiple regression analysis; coalbed methane; gas content; 3D geological modeling; geology and engineering integration