

Reconstruction Evaluation Method and Application of Coal Measure Three Gases Co-Mining Reservoirs in Linxing Block, East Ordos Basin

Bin Sun¹, Yiwen Ju^{2*}, Shuangfang Lu¹, Jianguang Wu³, Jingming Wang¹, Wuyang Li², Yu Qi², Kun Yu², Wangang Chen³, Peng Qiao²

¹School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao Shandong

²Key Laboratory of Computational Geodynamics, CAS, University of Chinese Academy of Sciences, College of Earth and Planetary Science, Beijing

³China United Coalbed Methane Corporation Ltd., Beijing

Email: sunbin9524@163.com, *juyw03@163.com

Received: Feb. 5th, 2020; accepted: Feb. 19th, 2020; published: Feb. 26th, 2020

Abstract

Reconstruction refers to the nature of oil and gas reservoirs that can be effectively modified, and is an important parameter in unconventional oil and gas production. For coal-bearing “three gases” combined production reservoirs, the currently commonly used method is to evaluate different reservoirs separately, and then obtain the optimal reformability area of the “three gases” combined production reservoirs by superposition. This method lacks storage Layer combination concept. To this end, we divide a variety of recoverable reservoirs into different production groups, and transform each reservoir parameter into a production group parameter by a certain method. According to the previous research, the brittleness index, quartz content, porosity, TOC, permeability, gas content, horizontal stress difference, fracture toughness, clay mineral content, water saturation are determined as factors that affect the reformability of the formation group. Hierarchical structure, using the judgment matrix to get the weights of each parameter, and establish the evaluation model of the productivity of the formation group and apply it to the Linxing block on the eastern edge of the Ordos Basin. Using this model, the northwestern part of the Linxing block is the area where the A-type formation can be transformed most, followed by the south and southeast of the block. In the northeast and west of the block, the type A formation strata is poorly remodelable.

Keywords

Coal Measures, Multilayered Reservoir, Three Gases Co-Mining, Reconstruction, East Ordos Basin

*通讯作者。

鄂尔多斯盆地东缘临兴区块煤系“三气”合采储层可改造性评价因素分析及其应用

孙斌¹, 琚宜文^{2*}, 卢双舫¹, 吴建光³, 王璟明¹, 李午阳², 戚宇², 余坤², 陈万钢³, 乔鹏²

¹中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛

²中国科学院计算地球动力学重点实验室, 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京

³中联煤层气有限责任公司, 北京

Email: sunbin9524@163.com, juyw03@163.com

收稿日期: 2020年2月5日; 录用日期: 2020年2月19日; 发布日期: 2020年2月26日

摘要

可改造性是指油气储层能够被有效改造的性质, 是非常规油气开采中的重要参数。对于煤系“三气”合采储层来说, 目前常用到的方法是将不同储层单独评价, 然后通过叠加得到“三气”合采储层可改造性优选区, 这种方法缺少储层组合观念。为此, 我们将多种可采储层划分为不同的产层组, 并通过一定的方法将各储层参数转化为产层组参数。根据前期研究确定脆性指数、石英含量、孔隙度、TOC、渗透率、含气量、水平应力差、断裂韧性、黏土矿物含量、含水饱和度为影响产层组可改造性的因素, 采用层次分析法建立层次结构, 利用判断矩阵得到各参数权重, 建立了产层组可改造性评价模型并应用于鄂尔多斯盆地东缘临兴区块。采用该模型得到临兴区块西北部是A型产层组可改造性最好的地区, 其次是区块南部和东南部, 而在区块东北部和西部的A型产层组可改造性较差。

关键词

煤系, 产层组, “三气”合采, 可改造性, 鄂尔多斯盆地东缘

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着常规油气勘探开发程度的降低, 非常规油气在世界油气工业的勘探开发领域发挥的作用和地位也在不断加强。世界能源发展趋势也逐渐由固态(木柴+煤炭)、液态(石油)向气态(天然气)转变[1] [2]。近年来, 我国非常规油气开发相继取得突破, 特别是非常规天然气, 成为天然气产量增长的新主力, 步入快速发展时期[2]-[6]。其中, 煤系气是非常规天然气的重要组成部分, 我们通常将煤系地层中的煤层气、致密砂岩气和页岩气称为煤系“三气” [7] [8] [9]。煤系“三气”在我国资源储量丰富, 分布十分广泛, 勘探开发前景广阔。煤系“三气”合采, 可以充分利用含煤地层优势, 提高开采效率, 降低勘探开发成本, 提高经济效益, 促进非常规天然气产业的快速发展。

国内外学者对煤系“三气”合采可行性也进行了广泛的研究。据宜文等[10][11]通过研究认为, 如果在一个能源盆地中, 同时赋存有煤层气和页岩气, 则在开采过程中可以考虑利用一口井同时开采, 从而提高它们的开采效率, 促进非常规天然气产业的快速发展。梁冰等[3]通过对煤系盆地特征、煤系盆地分布及成藏机理的研究发现, 三种非常规天然气资源分布区域重叠, 且均在含煤地层中, 说明了我国煤系“三气”具有“同源共生, 盆地共存”的特点。Law [12]通过研究盆地的生气、成藏特点, 指出煤层和碳质页岩是主要烃源岩, 而砂岩是主要的储集层。郭本广等[13]综合分析了鄂尔多斯盆地东缘临兴区块石炭-二叠纪煤系地层的地质条件, 认为区内煤层气、页岩气和致密砂岩气具有优越的成藏条件和良好的配置关系, 并提出合探合采设计方案。高为等[14]对六盘水煤田和织纳煤田二叠系煤系地层的煤层气和页岩气的地质条件进行分析, 发现该地区综合开发条件比较优越, 初步探讨了煤层气与页岩气共采的开发模式。冯其红等[15]开展了煤层气与相邻砂岩储气层合采条件以及显著性影响因素的数值模拟分析研究, 并认为砂岩层含水饱和度是对煤层气与相邻砂岩气藏合采最为显著的影响因素, 对多目标储层模拟分析提供了重要依据。实现煤系非常规天然气共采需要对烃源岩生排烃规律、富集规律和成藏机制、储层条件、保存条件进行综合评价, 确定一系列关键评价参数, 建立煤系非常规天然气评价标准, 建立不同非常规天然气储层综合评价与预测技术[16]。

但是非常规天然气储层开采不改造无经济产量。Chong 等[17]认为可改造性是储层具有能够被有效改造从而增产能力的性质, 不同可改造性的储层在水力改造过程中形成不同的裂隙网络, 可改造性与可生产性、可持续性是非常规气井评价的关键参数。Gale 等[18]认为可改造性是岩石地质、储层特征的综合反映, 主要与地应力、岩石脆性、脆性矿物含量、黏土矿物含量、页岩强度、天然裂缝及成岩作用等因素有关。唐颖等[19]提出了基于页岩脆性、天然裂缝、石英含量、成岩作用 4 种影响参数建立的数学模型对可改造性量化评价。

然而, 目前对储层可改造性影响因素的研究多是单层储层, 对多套单层储层组成的产层组的研究较少。本文的目的是建立储层组合观念, 将多套单层储层组成一个产层组, 对产层组可改造性影响因素研究, 为多气合采改造增产改造技术优化提供科学依据。

2. 研究区地质背景

临兴地区位于山西省兴县南部和临县北部(见图 1), 构造上处于鄂尔多斯盆地东缘晋西挠褶带, 总体为一平缓的西倾单斜, 东侧中部为受紫金山构造岩浆作用影响的隆起区, 断裂发育, 呈环形放射状展布[20](见图 2), 面积 2600 km²左右。目前, 临兴区块的致密砂岩气已被成功开采, 而煤层和页岩富含有机质, 具有良好的生气潜力, 对“三气”合采有着良好的物质基础[21]。

研究区含煤地层自下往上依次为本溪组、太原组和山西组(属于石炭系和二叠系), 地层厚度在 127~365 m 之间(见图 3)。区内主要发育于海陆过渡相的沉积环境[22][23][24][25], 本溪组发育以障壁砂坝-泻湖体系为主体的碳酸盐碳酸盐潮坪-障壁砂坝-泻湖-浅水三角洲复合沉积体系, 岩性以浅灰色、灰白色灰岩和黑色炭质泥页岩为主, 夹有浅灰色、灰白色砂岩, 顶部发育主力煤层 8+9 号煤层。太原组呈现出碳酸盐潮坪-障壁砂坝-泻湖与浅水三角洲共生的沉积格局, 岩性由浅灰色灰岩、砂砾岩和黑色泥页岩、煤层组成。到山西组时, 由于华北晚古生代巨型盆地北部物源区抬升, 构造活动显著, 海水逐渐退出研究区, 造成浅水三角洲沉积体系占据了整个研究区, 岩性以深灰色至灰黑色泥页岩、浅灰色、灰色砂岩夹少量灰岩和粉砂质泥岩为主。

3. 可改造性及其影响因素

储层可改造性是页岩储层能够被有效改造增产的能力和性质, 不同可改造性的储层在水力改造过程

中形成不同的裂缝网络[17]。可改造性是储层地质、储层特征的综合反映，其影响因素复杂。国外学者通过储层的脆性矿物含量或岩石力学参数来表征可改造性，为可改造性的定量评价提供了思路，但研究结果仅仅反映了储层在矿物组成或岩石力学单一因素方面的特征，难以全面反映储层在水力改造改造过程中的综合特征。近年来一些学者[17][18][26][27]使用脆性指数结合杨氏模量和泊松比来直接评估可改造性，更高水平的脆性代表更高可改造性。此外，还有其他一些学者采用脆性矿物质的含量来计算改造指数，脆性组分的含量越高，可改造性越高。另一方面，越来越多的研究认识到，可改造性不仅取决于材料的脆性，还包括一些其他因素，如成岩作用，延性，天然裂缝，抗拉强度等。

因此，根据前人的研究基础，提出了储层含气量、含水饱和度、矿物含量、有机质含量、物性参数、脆性指数、断裂韧性、水平应力差及其他因素为影响产层组可改造性的影响因素。

3.1. 储层含气量

储层含气量是表征储层含气性的直接参数，也是评价储层的一个重要参数。储层的含气量越高，其开采的潜力越大，在水力压裂改造后才越有可能产出经济产量。煤层和页岩储层的含气量包括吸附气、游离气和溶解气，溶解气含量极少，一般对总含气量没有影响。



Figure 1. Location of Linxing exploration block [28]

图 1. 临兴勘探区块位置[28]

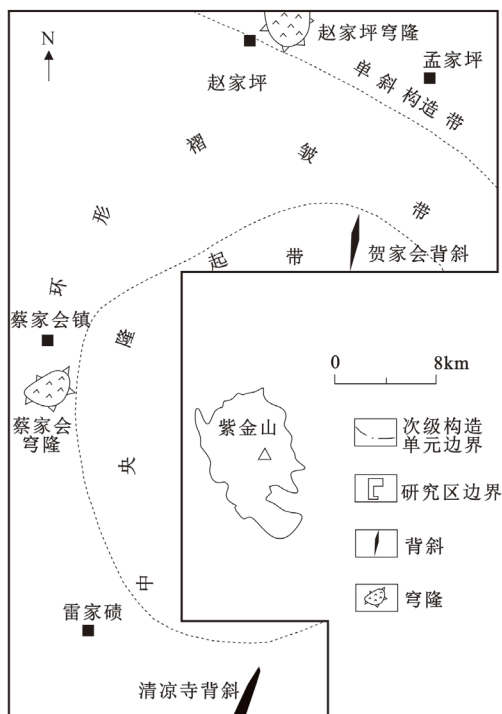


Figure 2. Structural sketch of study area and division of secondary tectonic units [29]

图 2. 研究区构造简图及次级构造单元划分[29]

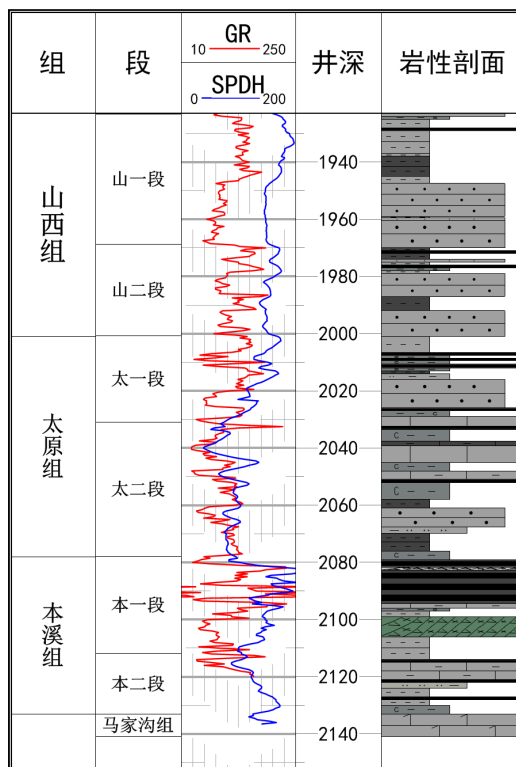


Figure 3. Formation histogram of well LX-1 in Linxing block

图 3. 临兴区块 LX-1 井地层柱状图

吸附气含气量的计算是根据样品解吸实验数据、等温吸附实验和实测吸附气含量数据与测井资料结合，建立起吸附气含气量与测井数据之间的计算模型。

相较于吸附气含气量的计算，游离气含气量的计算采用国际上常规方法[30] [31]:

$$G_f = \Psi \frac{\varnothing S_g}{\rho B_g} \tag{1}$$

上式中： G_f 是游离气含气量， m^3/t ； S_g 是含气饱和度，%； ρ 是岩石密度， g/cm^3 ； B_g 是气体体积压缩因子，0.0046； Ψ 是常数，取 0.91。

煤层和页岩储层的总含气量是其吸附气含气量与游离气含气量之和。

而计算致密砂岩含气量不同，致密砂岩储层中主要为游离气，为了方便比较砂岩游离气与煤层含气量的关系，主要采用林玉祥等[32]对砂岩游离气含气量的计算方法：

$$G_{sa} = \frac{\varnothing S_g}{\rho} \tag{2}$$

上式中： G_{sa} 是砂岩含气量， m^3/t ； \varnothing 是孔隙度，小数； S_g 是含气饱和度，%； ρ 是岩石密度， g/cm^3 。

由上式计算的砂岩含气量是在地下温压条件下的含气量(V_2)，为了与煤层含气量进行比较研究，需要将其转化为地表标准温压条件下的气体含量(V_1)。

$$V_1 = T_1 P_2 V_2 / T_2 P_1 \tag{3}$$

上式中： $T_1 = 293 K$ ， $P_1 = 0.101 Mpa$ ， $T_2 = 273 + (T_0 + G * D/100)$ ， $P_2 = G_2 * D$ 。

G 是地温梯度， $^{\circ}C/100 m$ ； G_2 是压力梯度，取 $0.01 MPa/m$ ； D 是深度， m 。

3.2. 含水饱和度

储层原始含水，水分在很大程度上影响页岩和煤层的吸附能力，使其小孔隙阻塞而失去吸附能力[33]；对于致密砂岩储层，含水饱和度升高对致密砂岩气相渗透率损害严重，水的存在加剧了致密砂岩应力敏感程度，且含水饱和度越高应力敏感性越强[34]，对储层改造越不利。

含水饱和度由印度尼西亚公式求得：

$$\frac{1}{R_t} = \frac{\varnothing^m \cdot S_w^n}{a R_w \cdot (1 - V_{sh})} + \frac{V_{sh} \cdot S_w}{R_{sh}} \tag{4}$$

上式中： R_t 是深电阻率， Ωm ； \varnothing 是孔隙度，%； R_w 是地层水电阻率， Ωm ； S_w 是含水饱和度；其中 m 是胶结指数， n 是饱和度指数， a 是岩电因数，数值取值来自于区域经验(见表 1)。

Table 1. a, m, n in Linxing area

表 1. 临兴地区 a, m, n 取值

地层	a	m	n	备注
石千峰组	1.00	2	1.60	
石盒子组	1.00	2	1.60	
山西组	1.00	2	1.60	区域经验
太原组	1.00	1.85	1.60	
本溪组	1.00	1.85	1.60	

3.3. 矿物含量

前人将储层中的岩石矿物分为脆性矿物和塑性矿物两种，储层中的矿物组成会直接影响岩石的力学性质，脆性矿物含量越高，岩石脆性越强，在构造运动或水力改造过程中越易形成天然裂缝或诱导裂缝，从而形成复杂的网络有利于页岩气的开采[19]。脆性矿物含量和黏土矿物含量在页岩发生形变时有重要影响[35] [36]。除石英外，长石、白云石和方解石等也属于脆性矿物，脆性矿物包含的种类较多，研究区内储层中的石英含量和黏土含量占据了出储层矿物组成绝大部分，因此本次研究主要以石英含量作为脆性矿物含量，黏土矿物含量作为塑性矿物含量。

此次研究所需的石英含量和黏土矿物含量主要是通过研究区样品进行薄片鉴定结合测井资料建立相应的计算模型。

3.4. 总有机碳含量

有机碳含量虽然不能直接反映储层的可改造性，但对储层的裂缝发育及分布、岩石力学性质有显著影响[37]。有机碳含量是烃源岩产生油气的基础，储层含气量往往取决于有机质含量，且有机碳含量通常与吸附气能力成正比，对储层含气量的影响较大，进而间接影响储层可改造性；有机碳含量也会影响储层的密度，进而影响储层的岩石力学性质，对储层可改造性产生一定的影响。

目前大多数人采用的是 Passey 等[38]提出的利用声波测井和地层电阻率计算 TOC 含量的公式，即 $\Delta \log R$ 法，此方法需要人为的确定基线值及有机碳含量背景值，可操作性较差，误差比较大。此次研究主要是通过研究区样品分析结果结合测井资料得到有机碳含量的计算模型。

3.5. 物性参数

储层物性中孔裂隙和渗透性对可改造性的影响最为显著。主要表现在孔隙度和平均孔径方面。储层孔隙度高且有较大的孔径时，改造更容易形成裂缝，沿孔喉扩展范围增加，更容易形成系统的裂隙网络[39]。渗透性主要是对挑选改造层段和位置有较大的意义。

本次研究孔隙度采用中子 - 密度交会法计算：

利用密度测井资料计算：

$$\varnothing_D = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_f} - V_{sh} \cdot \frac{\rho_{ma} - \rho_{sh}}{\rho_{ma} - \rho_f} \quad (5)$$

上式中： \varnothing_D 是密度孔隙度，小数； ρ_{ma}, ρ_f 分别为岩石骨架密度值、地层流体密度值， g/cm^3 ； ρ_b 是目的层密度测井值， g/cm^3 ； ρ_{sh} 是泥岩密度值， g/cm^3 ； V_{sh} 是储层泥质含量，小数。

利用中子测井资料计算：

$$\varnothing_N = (CN - LCOR - 0.5 \times V_{sh} \times N_{sh}) \times 0.01 \quad (6)$$

上式中： \varnothing_N 是中子孔隙度，小数； CN 是目的层补偿中子测井值，%； $LCOR$ 是岩石骨架中子值，%； N_{sh} 是泥岩中子值，%； V_{sh} 是储层泥质含量，小数。

利用中子 - 密度几何平均值计算：

$$\varnothing = \sqrt{\frac{\varnothing_D^2 + \varnothing_N^2}{2}} \quad (7)$$

上式中： \varnothing_D 是密度孔隙度，小数； \varnothing_N 是中子孔隙度，小数。

其中 V_{sh} 可由下式求得：

$$\Delta GR = \frac{GR - GR_{\min}}{GR_{\max} - GR_{\min}} \quad (8)$$

$$V_{sh} = \frac{2^{\Delta GR * GCUR} - 1}{2^{GCUR} - 1} \quad (9)$$

上式中： GR 是自然伽马测井值； GR_{\min} 是纯砂岩自然伽马极小值； GR_{\max} 是纯泥岩自然伽马极大值； $GCUR$ 是与地层年代有关的经验系数，新地层为 3.7，老地层为 2.0。

研究区储层段岩心分析渗透率大多在 0.1 md 以下，如采用岩心回归公式计算渗透率误差较大，因此，本次渗透率求取采用最常用的 TIMUR 公式。

$$PERM = \frac{0.136 \times \varnothing^{4.4}}{SIRR^2} \quad (10)$$

上式中： $PERM$ 是渗透率，md； \varnothing 是地层孔隙度，%； $SIRR$ 是束缚水饱和度，%，根据区域经验取值 68%。

3.6. 脆性指数

根据国内外对储层可压性的评价经验，脆性指数是常用的评价储层可改造性的重要因素，脆性对水力改造后产生的裂缝的形态有很大的影响。脆性越高，改造后越容易产生复杂的裂缝网络，储层的可改造性就越高[19]。

杨氏模量和泊松比是评价储层岩石力学性质主要参数指标。杨氏模量是指其所受应力与应变的比，描述岩石抵抗抗变能力的物理量，即反映了储层被改造后保持裂缝的能力；泊松比是横向正应变与轴向正应变的绝对值的比值，反映了储层在压力下破裂的能力。一般情况下，杨氏模量越高，泊松比越低，脆性就越高，储层的可改造性就越好。

根据测井资料中的纵波时差和横波时差数据，结合密度测井数据，可以计算出地层中的任意深度处的杨氏模量和泊松比，此时得到的结果是动态杨氏模量和动态泊松比，通过动、静态参数转化为静态杨氏模量与静态泊松比。其计算公式如下[40]：

杨氏模量计算：

$$E_d = \beta \cdot \frac{\rho_b (3\Delta t_s^2 - 4\Delta t_c^2)}{\Delta t_s^2 (\Delta t_s^2 - \Delta t_c^2)} \quad (11)$$

泊松比计算：

$$V_d = \frac{\Delta t_s^2 - 2\Delta t_c^2}{2(\Delta t_s^2 - \Delta t_c^2)} \quad (12)$$

上式中： E_d 是动态杨氏模量，Mpa； V_d 动态是泊松比； ρ_b 是测井密度值， g/cm^3 ； Δt_s 是测井横波时差， $\mu s/m$ ； Δt_c 是测井纵波时差， $\mu s/m$ ； β 是单位换算系数，达到上述单位时， $\beta = 10^9$ 。

脆性的大小一般采用脆性系数 B 来表示，公式如下：

$$B_E = \frac{E - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}} \quad (13)$$

$$B_V = \frac{V - V_{\max}}{V_{\min} - V_{\max}} \quad (14)$$

$$B = \frac{B_E + B_V}{2} \quad (15)$$

上式中： E 为静态杨氏模量，10 MPa； V 为静态泊松比； E_{\min} 最小静态杨氏模量； E_{\max} 最大静态杨氏模量； B_E 为标准化的杨氏模量； V_{\min} 最小静态泊松比； V_{\max} 最大静态泊松比； B_V 为标准化的泊松比； B 为脆性指数。

此方法认为杨氏模量与泊松比对脆性指数的贡献是一样的，即取权重均为0.5，此为经验认识，具有一定的局限性，使用范围有限。

3.7. 断裂韧性

单纯利用杨氏模量与泊松比不能完全判断储层的可改造性，例如部分岩石的杨氏模量与泊松比相近，但是脆性差别极大，其中的重要区别就在于断裂韧性[41]。断裂韧性反映储层可改造难易程度，在储层改造时能够阻挡水力改造改造作用，阻挡改造缝的扩展及新改造缝的产生。断裂韧性越小，在改造过程中形成的裂缝越复杂，也越容易扩展延伸。

断裂韧性在实验室获取数据的难度较大，实验较为繁琐，目前，大多数学者主要采用金衍、陈勉等[42] [43] [44]围绕测井资料和大量实验研究建立的计算 I 型和 II 型裂缝断裂韧性的等效方法，公式如下：

$$K_{IC} = 0.2176P_C + 0.0059S_t^3 + 0.923S_t^2 + 0.517S_t - 0.3322 \quad (16)$$

$$K_{IIC} = 0.0466P_C + 0.1674S_t - 0.1851 \quad (17)$$

$$P_C = \sigma_h - \alpha P_p \quad (18)$$

$$S_t = \frac{(0.0045 + 0.0035V_{cl})E_d}{K} \quad (19)$$

上式中： P_C 为围压值，MPa； S_t 为单轴抗拉强度，MPa； P_p 为孔隙压力，MPa； σ_h 为最小水平地应力，MPa； V_{cl} 为泥质含量%； E_d 为动态杨氏模量，GPa； K 为常数，通常取值为12.26。

3.8. 水平应力差

地应力显示了当前岩层正在承受的力的状态。目前，人们认为地应力主要分为水平最大主应力、水平最小主应力和垂向应力三个应力。在改造过程中，地应力的影响也是不容忽视的，储层地应力较高，经过水力改造后裂缝起裂压力较大，岩石内部裂缝形成困难，水力裂缝与天然裂缝有效沟通形成缝网几率较低，影响改造增产效果[45]。尤其是水平最大主应力和水平最小主应力之间的差值，差值越小，改造形成的裂缝越容易沿多个方向扩展，便于形成网状裂缝。

此次研究水平最大主应力和水平最小主应力的计算模型，考虑到研究区的特征，主要采用的黄氏经验模型，其公式如下：

$$\sigma_H - \alpha P_p = \frac{V}{1-V}(\sigma_v - \alpha P_p) + \tau_1(\sigma_v - \alpha P_p) \quad (20)$$

$$\sigma_h - \alpha P_p = \frac{V}{1-V}(\sigma_v - \alpha P_p) + \tau_2(\sigma_v - \alpha P_p) \quad (21)$$

上式中： σ_H 、 σ_h 为水平最大和最小主应力，MPa； σ_v 为垂向应力，MPa； α 为 Biot 系数，无量纲； V 为泊松比，无量纲； P_p 为孔隙压力，MPa； τ_1 、 τ_2 为构造应力系数，无量纲。

3.9. 其他因素

除了上述的影响因素外，可改造性可能还受到沉积环境、内部构造、天然裂缝分布和成岩作用等因素的影响，这些因素往往是基于经验赋值，难以定量评价，本次研究暂不考虑这些因素对可改造性的影响。

4. 可改造性评价模型及应用

4.1. “三气”赋存模式

在煤系地层中，煤层气、页岩气和致密砂岩气在空间叠置模式非常复杂，平面上，不同类型的气藏分布在不同的区域，而“三气”合采选区的重点是三种气藏同时发育的区域。在垂向叠置模式上，也存在着多种模式，例如煤层下伏在单层致密砂岩层之下的模式，或者在煤层和致密砂岩层之间夹杂着薄的页岩层等模式。在研究区的本溪组、太原组和山西组中，“三气”的赋存模式多种多样，极其复杂。但是，实际开采中，主力层位是致密砂岩层和煤层，页岩气的产量较低，因此在此次研究中，主要以致密砂岩气层和煤层为重点，兼顾少量页岩，建立了一种简化模式：致密砂岩层下伏在煤层之下，而薄泥岩层下伏在致密砂岩层之下，我们称之为A型产层组(见图4)。



Figure 4. A-type stratum group combination

图4. A型产层组组合方式

上图中： H 为产层组总厚度，m； H_1 为煤层厚度，m； H_2 为致密砂岩层厚度，m； H_3 为页岩层厚度，m。

产层组的各个参数均由各层参数计算得到，以杨氏模量为例，产层组的杨氏模量 E 由煤层杨氏模量、致密砂岩杨氏模量和页岩杨氏模量按照其厚度比例相加得到，即

$$E = E_{COAL} \frac{H_1}{H} + E_{SAND} \frac{H_2}{H} + E_{SHALE} \frac{H_3}{H} \quad (22)$$

上式中： E 为产层组的杨氏模量，MPa； E_{COAL} 为煤层杨氏模量，MPa； E_{SAND} 为致密砂岩层杨氏模量，MPa； E_{SHALE} 为页岩层杨氏模量，MPa； H 为产层组总厚度，m； H_1 为煤层厚度，m； H_2 为致密砂岩层厚度，m； H_3 为页岩层厚度，m。

4.2. 可改造性评价数学模型

由于影响产层组水力改造的影响因素较多，需综合各个因素对可改造性的影响，建立可改造系数的模型进行评价。计算步骤是：首先将各个参数采取极差变换方法进行标准化处理，其目的是消除各参数的不同单位和量纲，然后采用层次分析法确定不同因素对可改造性影响的权重，最后将标准化的值与权重系数加权得到产层组可改造性评价参数。数学公式为：

$$FI = \sum_{i=1}^n S_i W_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (23)$$

上式中： FI 为产层组可改造系数，无量纲； S_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)为产层组各参数标准化之后的值，无量纲； W_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)为产层组各参数的权重系数，无量纲； n 为参数的个数。

4.3. 参数标准化

根据产层组可改造性与影响因素之间的关系，将影响因素分为两类：

正向参数：脆性指数、石英含量、孔隙度、总有机碳含量、渗透率、含气量；负向参数：黏土矿物含量、水平应力差、含水饱和度、断裂韧性。

为计算可改造性系数，利用极差变换法将各参数进行标准化处理，并将具有不同单位和量纲的各参数按照正向指标和负向指标取值。

正向指标：

$$S = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (24)$$

负向指标：

$$S = \frac{X - X_{\max}}{X_{\min} - X_{\max}} \quad (25)$$

S 为参数标准化值； X_{\max} 为参数最大值； X_{\min} 为参数最小值； X 为参数值。

经过标准化处理后，指标在 0~1 之间且均为正值，最优为 1，最差为 0。

4.4. 层次分析法计算权重

可改造性评价中含有多个参数，各参数对产层组可改造性的影响程度难以判定，而层次分析法可以将复杂问题分解成不同因素，每个因素根据属性不同继续分解，形成层次结构，进而建立判断矩阵(见表 2)确定参数权重[46] [47]。

Table 2. Transformability evaluation index judgment matrix

表 2. 可改造性评价指标判断矩阵

重要程度	脆性指数	石英含量	孔隙度	TOC	渗透率	含气量	水平应力差	断裂韧性	黏土矿物含量	含水饱和度
脆性指数	1	2	3	4	5	5	7	7	9	9
石英含量	1/2	1	2	3	4	4	6	6	8	8
孔隙度	1/3	1/2	1	2	3	3	5	5	7	7
TOC	1/4	1/3	1/2	1	2	2	4	4	6	6
渗透率	1/5	1/4	1/3	1/2	1	1	3	3	5	5
含气量	1/5	1/4	1/3	1/2	1	1	3	3	5	5
水平应力差	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1/3	1	1	3	3
断裂韧性	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1/3	1	1	3	3
黏土矿物含量	1/9	1/8	1/7	1/6	1/5	1/5	1/3	1/3	1	1
含水饱和度	1/9	1/8	1/7	1/6	1/5	1/5	1/3	1/3	1	1

将上述表 2 视为数学关系中的矩阵，利用和积法求出上述判断矩阵的最大特征向量，即对应为各个参数的权重。最大特征向量 \bar{W} 为(0.288, 0.207, 0.149, 0.104, 0.072, 0.072, 0.036, 0.036, 0.018, 0.018)，即所对应的脆性指数、石英含量、孔隙度、TOC、渗透率、含气量、水平应力差、断裂韧性、黏土矿物含量、含水饱和度的权重分别为 0.288、0.207、0.149、0.104、0.072、0.072、0.036、0.036、0.018、0.018。

4.5. 可改造系数计算

根据层次分析法得到的各影响因素所占的比例，建立可改造系数(FI)的计算模型：

$$FI = 0.288 \cdot B + 0.207 \cdot Q + 0.149 \cdot \varnothing + 0.104 \cdot TOC + 0.072 \cdot K + 0.072 \cdot Gc + 0.036 \cdot Hsd + 0.036 \cdot Kc + 0.018 \cdot C + 0.018 \cdot Sw \quad (26)$$

上式中： B 为脆性指数； Q 为石英含量； \varnothing 为孔隙度； TOC 为总有机碳含量； K 为渗透率； Gc 为含气量； Hsd 为水平应力差； Kc 为断裂韧性； C 为黏土矿物含量； Sw 为含水饱和度； FI 为可改造系数。以上参数均为标准化后的值。 FI 值越大，代表越有利于产层组改造。

4.6. 可改造性评价模型应用

临兴地区本溪组-山西组广泛发育煤层，其中有两套主力煤层，一套为以4+5号煤为主，一套以8+9号煤为主。本次研究主要以4+5号煤层结合其上下致密砂岩层和薄页岩层对临兴区块A型产层组进行量化评价。

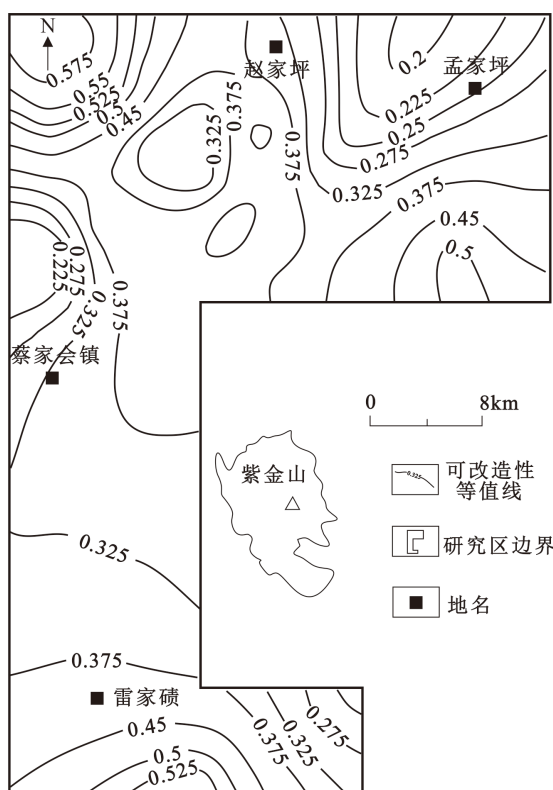


Figure 5. Comprehensive evaluation map of the transformability of A-type production stratum in Linxing block

图 5. 临兴区块 A 型产层组可改造性综合评价图

上图中(图 5)我们可以看出，在区块西北部是 A 型产层组可改造性最好的地区，其次是区块南部和东南部。而在区块东北部和西部 A 型产层组可改造性较差。此外，我们不仅能在平面上定量刻画可改造性有利区，还可以对不同井之间按照优劣进行排序，甚至在同一口井内不同类型的产层组也可进行排序以挑选最优的改造层位，达到量化评价的目的。

5. 结论

- 1) 将煤系地层“三气”储层划分了不同类型的产层组，将测井资料与实验资料结合得到不同参数，

并按照每种储层的厚度在产层组总厚度中所占的比例，确定了产层组各个参数值。

2) 综合分析储层含气量、含水饱和度、矿物含量、有机质含量、物性参数、脆性指数、断裂韧性、水平应力差等因素对鄂尔多斯盆地东缘临兴地区煤系地层产层组可改造性的影响。并采用层次分析法建立层次结构，并利用判断矩阵确定各参数权重，最终建立了适用于临兴区块产层组可改造性评价模型。

3) 将评价模型应用于临兴区块，以 4 + 5 号煤层为主，结合其上下致密砂岩层和薄页岩层，得到区内各井 A 型产层组可改造系数，并绘制出在平面上的可改造性综合评价系数图，确定了区块西北部是整个研究区 A 型产层组可改造性最优的地区。

致 谢

本文获国家自然科学基金项目(41530315, 41872160)和国家科技重大专项项目(2016ZX05066003, 2016ZX05066006)资助。

基金项目

国家自然科学基金重点项目“构造演化过程中泥页岩层变形作用及其富气机理研究”(编号:41530315)资助、国家自然科学基金重点项目“有机质与金属矿共存的微纳米尺度特征及成藏成矿机理”(编号:41872160)联合资助、国家科技重大专项“临兴-神府地区煤系地层煤层气、致密气、页岩气合采示范工程”(编号:2016ZX05066003, 2016ZX05066006)联合资助。

参考文献

- [1] 邹才能, 杨智, 何东博, 等. 常规-非常规天然气理论、技术及前景[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 575-587.
- [2] 邹才能, 赵群, 陈建军, 等. 中国天然气发展态势及战略预判[J]. 天然气工业, 2018, 38(4): 1-11.
- [3] He, T.H., Lu, S.F., Li, W.H., Tan, Z.Z. and Zhang, X.W. (2018) Effect of Salinity on Source Rock Formation and Its Control on the Oil Content in Shales in the Hetaoyuan Formation from the Biyang Depression, Nanxiang Basin, Central China. *Energy & Fuels*, **32**, 6698-6707. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b01075>
- [4] He, T.H., Lu, S.F., Li, W.H., Wang, W.M., Sun, D.Q., Pan, W.Q. and Zhang, B.S. (2020) Geochemical Characteristics and Effectiveness of Thick, Black Shales in Southwestern. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **185**, Article ID: 106607.
- [5] 何涛华, 李文浩, 谭昭昭, 等. 南襄盆地泌阳凹陷核桃园组页岩油富集机制[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(6): 1259-1269.
- [6] 王璟明, 肖佃师, 卢双舫, 等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩储层物性分级评价[J]. 中国矿业大学学报, 2020(1): 1-13.
- [7] 梁冰, 石迎爽, 孙维吉, 等. 中国煤系“三气”成藏特征及共采可能性[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 167-173.
- [8] 胡进奎, 杜文凤. 浅析煤系地层“三气合采”可行性[J]. 地质论评, 2017(S1): 99-100.
- [9] 傅雪海, 德勒恰提·加娜塔依, 朱炎铭, 等. 煤系非常规天然气资源特征及分隔合采技术[J]. 地学前缘, 2016, 23(3): 36-40.
- [10] 琚宜文, 颜志丰, 李朝锋, 等. 我国煤层气与页岩气富集特征与开采技术的共性与差异性[C]//中国煤炭学会煤层气专业委员会、中国石油学会石油地质专业委员会. 2011 年煤层气学术研讨会论文集. 中国煤炭学会煤层气专业委员会、中国石油学会石油地质专业委员会: 中国煤炭学会, 2011: 478-485.
- [11] Ju, Y.W., Wang, G.C., Bu, H.L., Li, Q.G. and Yan, Z.F. (2014) China Organic-Rich Shale Geologic Features and Special Shale-Gas Production Issues. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **6**, 196-207. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.03.002>
- [12] Law, B.E. (2002) Basin-Centered Gas System. *AAPG Bulletin*, **86**, 189-191. <https://doi.org/10.1306/61EEDDB4-173E-11D7-8645000102C1865D>
- [13] 郭本广, 许浩, 孟尚志, 等. 临兴地区非常规天然气合探共采地质条件分析[J]. 中国煤层气, 2012, 9(4): 3-6.
- [14] 高为, 田维江, 秦文, 等. 贵州省煤层气与页岩气共探共采的地质优选[J]. 断块油气田, 2014, 21(1): 36-38.

- [15] 冯其红, 张先敏, 张纪远, 等. 煤层气与相邻砂岩气藏合采数值模拟研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(S1): 169-173.
- [16] 曹代勇, 姚征, 李靖. 煤系非常规天然气评价研究现状与发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(1): 89-92.
- [17] Chong, K.K., Grieser, W.V., Jaripatke, O.A., *et al.* (2010) A Completions Roadmap to Shale-Play Development: A Review of Successful Approaches toward Shale-Play Stimulation in the Last Two Decades. Society of Petroleum Engineers, Beijing, SPE-130369.
- [18] Gale, J.F.W., Reed, R.M. and Holder, J. (2007) Natural Fractures in the Barnett Shale and Their Importance for Hydraulic Fracture Treatments. *AAPG Bulletin*, **91**, 603-622. <https://doi.org/10.1306/11010606061>
- [19] 唐颖, 邢云, 李乐忠, 等. 页岩储层可改造性影响因素及评价方法[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 356-363.
- [20] 钟大康, 周立建, 孙海涛, 等. 储层岩石学特征对成岩作用及孔隙发育的影响——以鄂尔多斯盆地陇东地区三叠系延长组为例[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(6): 84-93.
- [21] Qi, Y., Ju, Y.W., Meng, S.Z., Yu, K., Li, W.Y., Jia, T.R., *et al.* (2019) Geological Controls on High Production of Tight Gas in Linxing Block, Eastern Ordos Basin, China. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 1-15. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.14334>
- [22] 钟建华, 刘闯, 吴建光, 等. 鄂尔多斯盆地东缘临兴地区煤系气共生藏特征[J]. 煤炭学报, 2018, 43(6): 1517-1525.
- [23] 谢英刚, 孟尚志, 万欢, 等. 临兴地区煤系地层多类型天然气储层地质条件分析[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(9): 71-75.
- [24] Li, Y., Yang, J.H., Pan, Z.J., Meng, S.Z., Wang, K. and Niu, X.L. (2019) Unconventional Natural Gas Accumulations in Stacked Deposits: A Discussion of Upper Paleozoic Coal-Bearing Strata in the East Margin of the Ordos Basin, China. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, **93**, 111-129. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.13767>
- [25] Qi, Y., Ju, Y.W., Cai, J.C., Gao, Y., Zhu, H.J., Huang, C., *et al.* (2019) The Effects of Solvent Extraction on Nanoposity of Marine-Continental Coal and Mudstone. *Fuel*, **235**, 72-84. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.07.083>
- [26] Wu, J., Zhang, S., Cao, H., *et al.* (2017) Fracability Evaluation of Shale Gas Reservoir: A Case Study in the Lower Cambrian Niutitang Formation, Northwestern Hunan, China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **164**, 675-684. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.11.055>
- [27] 翟文宝, 李军, 周英操, 等. 基于测井资料的页岩储层可改造性评价新方法[J]. 岩性油气藏, 2018, 30(3): 112-123.
- [28] 傅宁, 杨树春, 贺清, 等. 鄂尔多斯盆地东缘临兴-神府区块致密砂岩气高效成藏条件[J]. 石油学报, 2016, 37(S1): 111-120.
- [29] 曹代勇, 聂敬, 王安民, 等. 鄂尔多斯盆地东缘临兴地区煤系气富集的构造-热作用控制[J]. 煤炭学报, 2018, 43(6): 1526-1532.
- [30] 钱凯. 煤层甲烷气勘探开发理论与实验测试技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2013.
- [31] 钟光海, 谢冰, 周肖. 页岩气测井评价方法研究——以四川盆地蜀南地区为例[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(4): 96-102.
- [32] 林玉祥, 栾伟娜, 韩继雷, 等. 沁水盆地砂岩游离气成藏主控因素分析[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(10): 1873-1882.
- [33] 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.
- [34] 游利军, 康毅力, 陈一健, 等. 含水饱和度和有效应力对致密砂岩有效渗透率的影响[J]. 天然气工业, 2004, 24(12): 105-107+195.
- [35] Ju, Y.W., Sun, Y., Tan, J.Q., Bu, H.L., Han, K., Li, X.S. and Fang, L.Z. (2018) The Composition, Pore Structure Characterization and Deformation Mechanism of Coal-Bearing Shales from Tectonically Altered Coalfields in Eastern China. *Fuel*, **234**, 626-642. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.06.116>
- [36] Yu, K., Gan, Y.T., Ju, Y.W. and Shao, C.J. (2019) Influence of Sedimentary Environment on the Brittleness of Coal-Bearing Shale: Evidence from Geochemistry and Micropetrology. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **185**, Article ID: 106603. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106603>
- [37] 赖富强, 罗涵, 覃栋优, 等. 基于层次分析法的页岩气储层可压裂性评价研究[J]. 特种油气藏, 2018, 25(3): 154-159.
- [38] Passey, Q.R., Creaney, S. and Kully, J.B. (1990) A Practical Model for Organic Richness from Porosity and Resistivity

Logs. *AAPG Bulletin*, **74**, 1777-1794. <https://doi.org/10.1306/0C9B25C9-1710-11D7-8645000102C1865D>

- [39] 周帅. 河东煤田煤系页岩气储层非均质性与可改造性研究[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- [40] 马庆利. 东营凹陷多薄层低渗透滩坝砂储层分层改造工艺优化[J]. 油气地质与采收率, 2017, 24(2): 121-126.
- [41] 袁俊亮, 邓金根, 张定宇, 李大华, 闫伟, 陈朝刚, 等. 页岩气储层可压裂性评价技术[J]. 石油学报, 2013, 34(3): 523-527.
- [42] 陈建国, 邓金根, 袁俊亮, 闫伟, 蔚宝华, 谭强. 页岩储层 I 型和 II 型断裂韧性评价方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(6): 1101-1105.
- [43] 金衍, 陈勉, 张旭东. 利用测井资料预测深部地层岩石断裂韧性[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 454-456.
- [44] 金衍, 陈勉, 王怀英, 阮洋. 利用测井资料预测岩石 II 型断裂韧性的方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(S2): 3630-3630.
- [45] 张晓. 页岩油储层可改造性评价[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2018.
- [46] 张军华, 黄广谭, 李军, 杨勇, 杜玉山. 基于层次分析法的地震有利储层预测[J]. 特种油气藏, 2015(5): 27-31+155-156.
- [47] 徐东晶, 牛超, 相诗尧, 许乐. AHP-Fisher 判别法在工作面安全开采评价中的应用[J]. 煤炭技术, 2016, 35(10): 18-20.