

煤系含水层及多煤层合采水来源判识方法 ——以山西保德区块为例

张庆丰¹, 张继坤¹, 李子玲¹, 姚艳斌^{2,3}, 杜丰丰², 孙晓光¹, 郝帅¹, 李军辉¹

(1. 中石油煤层气有限责任公司, 北京 100028; 2. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083;
3. 煤层气开发利用国家工程研究中心煤储层物性实验室, 北京 100083)

摘要: 煤层气多层合采成功与否的关键在于对各产层产水来源与产气贡献的精确判识。现有排采水来源判识方法的不足, 给多煤层合采井的产层组合优化及排采工作制度制定带来较大挑战。为此, 本文以保德区块 85 口煤层气井勘探开发与水化学测试资料为基础, 确定了含水层层位, 阐述了排采水类型划分依据。应用主成分分析法(PCA)与 Bayes 判别法, 构建了多煤层排采水来源判识模型, 形成了“含水层判识、排采水类型划分、排采水来源判识”的多煤层合采水来源判识系列方法。基于 27 个排采水样的应用, 验证了该模型的准确性, 解析了合层排采水来源不同情况下的层间干扰强弱。结果表明: 4+5 号煤层顶板与 8+9 号煤层顶底板含水层发育稳定、厚度大, 对煤层气井生产影响较大。排采水类型划分与排采水来源判识模型均能够进行排采水来源分析。其中排采水类型划分是基于地质工程背景特征, 初步定性划分排采水来源, 适用于煤层气井全生命周期补给水来源判识; 而排采水来源判识模型是结合产出水常规离子特征来进一步动态识别排采水来源, 对合层排采层间干扰强弱分析具有一定指示意义。合层开发井排采水来源若为单一煤层水, 层间干扰剧烈, 产气效果差; 若为合采煤层与含水层混合水, 层间干扰较强, 产气效果一般; 若为合采煤层水, 层间干扰弱, 产气效果较好。该研究为合层排采水来源判识提供了一种可行方法, 为多煤层合采层间干扰程度评价、排采设备及排采工作制度调整提供依据。

关键词: 煤层气; 排采水来源判识; 主成分分析法; Bayes 判别法; 层间干扰

中图分类号: P 618.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1964(2025)01-0115-12

Identifying methods for coal measure aquifers and multi-coal seam commingled drainage water sources: A case study of the Baode block in Shanxi Province

ZHANG Qingfeng¹, ZHANG Jikun¹, LI Ziling¹, YAO Yanbin^{2,3}, DU Fengfeng²,
SUN Xiaoguang¹, HAO Shuai¹, LI Junhui¹

(1. PetroChina Coalbed Methane Company Limited, Beijing 100028, China; 2. School of Energy Resource, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China; 3. Coal Reservoir Laboratory of National Engineering Research Center of CBM Development & Utilization, Beijing 100083, China)

Abstract: The success of coalbed methane (CBM) drainage in multilayered coal seam gas wells

收稿日期: 2024-05-01 修回日期: 2024-08-12 DOI: 10.13247/j.cnki.jcmt.2024.0179

基金项目: 国家自然科学基金杰出青年基金项目(42125205); 国家自然科学基金重点项目(42130806)

通信作者: 姚艳斌(1978—), 男, 河北省邯郸市人, 教授, 博士生导师, 工学博士, 从事非常规油气与碳封存方面的研究。

E-mail: yyb@cugb.edu.cn Tel: 13466390066

引用格式: 张庆丰, 张继坤, 李子玲, 等. 煤系含水层及多煤层合采水来源判识方法: 以山西保德区块为例[J]. 中国矿业大学学报, 2025, 54(1): 115-126.

ZHANG Qingfeng, ZHANG Jikun, LI Ziling, et al. Identifying methods for coal measure aquifers and multi-coal seam commingled drainage water sources: A case study of the Baode block in Shanxi Province[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(1): 115-126.

depends on the precise identification of water sources and gas contributions from each productive layer. Current methods for identifying water sources exhibit deficiencies, presenting significant challenges in optimizing layer combinations and designing drainage systems for multi-coalseam gas wells. To address this, this study leveraged exploration and development data from 85 CBM wells in the Baode block, coupled with chemical testing, to identify aquifer strata and establish criteria for classifying drainage water types. Using principal component analysis (PCA) and Bayes discriminant analysis, a model for identifying drainage water sources in multi-coal seams is constructed, yielding methods for aquifer identification, drainage water type classification, and drainage water source identification within multi-coal seam integrated mining. Validation using 27 drainage water samples confirmed the accuracy of the model and assessed the interlayer interference strength under varying drainage water source conditions during integrated mining. The results indicate stable and thick aquifer strata at the top and bottom of coal seams 4+5 and 8+9, significantly impacting well production. Both the classification of drainage water types and the drainage water source identification model are useful for analyzing the origins of drainage water. The classification is based on geological engineering characteristics and provides a preliminary qualitative division of the drainage water sources. This approach is particularly effective for identifying recharge water sources throughout the life cycle of coalbed methane wells. The drainage water source identification model integrates conventional ion characteristics of the produced water to dynamically pinpoint the source of the drainage water. This approach offers insights for analyzing interlayer interference intensity in combined layer drainage. Single-coal-seam water sources in integrated development wells result in severe interlayer interference and poor gas production, whereas a mixture of coal seams and aquifer water leads to moderate interference and average gas production. Solely integrated coalseam water sources exhibit weak interlayer interference and improved gas production. This study offers a viable method for identifying drainage water sources in integrated coal seam mining, providing insights into interlayer interference evaluation and facilitating adjustments to drainage equipment and work systems for multi-coal seam integrated mining.

Key words: coalbed methane; identification of water source in production and drainage; principal component analysis; Bayes discrimination method; interlayer interference

鄂尔多斯盆地东缘保德区块煤层气资源丰富,目前已经实现了连续 7 a 的稳定高产,是我国中低阶煤层气生产的领头羊^[1-2]. 目前区块内煤层气的主要开发方式为山西组 4+5 号与太原组 8+9 号煤层合层排采,然而部分煤层气井产水量大,产气效果不理想. 查明排采水来源对煤层气井高产水成因分析、合采储层压力匹配关系研究、产层组合优化、压裂措施方案制定、排采动态诊断及排采制度调整等具有重要意义^[3-5].

煤层顶底板含水层向煤层补给,导致合采煤储层压力下降不同步,层间干扰加重^[6-7]. 针对煤层气井排采水来源,学者们做了较多研究工作,常用的判识方法有水温水位分析、水化学分析、数理统计等方法^[8]. 水温水位法是根据含水层位置与温度进行水来源判识,操作简单,但仅适用于简单

水文条件^[4]. 水化学分析法包括常规水化学法、微量元素法、氢氧同位素示踪法等,其中常规水化学分析法是根据不同来源水的离子组成、水质类型进行水来源判识,适用于含水层水质差异较大、水源单一的条件^[9-10];微量元素法是基于不同来源水中微量元素占比差异,采用交汇法或蛛网法等方法进行水来源判识^[3],操作便捷,同时具有层间干扰分析功能;氢氧同位素示踪法主要基于分馏作用,分析地下水与地表水的水力联系,进行地下水来源判识^[11]. 数理统计法则是在常规水化学与微量元素测试结果的基础上,采用聚类分析法、模糊综合评价法、熵权模糊综合法、主成分分析法(PCA)、灰色关联分析法、Fisher 判别法、Bayes 判别法及 BP 神经网络法等一种或多种方法^[12-17],进行水来源判识,弥补了水文条件复杂、水来源分析

困难等问题,判识准确率大大提高.然而多煤层合层排采时,由于井筒混合作用,导致不同水来源排采水剥离难度增大,导致上述方法不能直接使用.

鉴于此,本文以保德区块为例,基于 85 口煤层气井的测井、排采水化学及生产动态资料,构建了含水层判识模型和排采水类型划分方法,进一步采用基于 PCA 的 Bayes 判别法建立了排采水来源判识模型,形成了集“含水层判识、排采水类型划分、排采水来源判识”为一体的多煤层排采水来源判识系列方法.研究可为定量分析煤层气井高产水成分、精准预测煤层气井产水量、科学调整排采制度、优化产层组合等提供参考和指导.

1 地质概况

保德区块位于鄂尔多斯盆地东缘北部,构造位置属晋西挠褶带北部、吕梁山西侧.区内构造总体相对简单,为向西倾斜的单斜构造,北部相对平缓,倾角为 1°~5°,南部局部倾角为 5°~10°,局部发育小断层(见图 1a).区内主要含煤岩系为二叠系的山西组和太原组(见图 1b),主力煤层为山西组的 4+5

号煤层与太原组的 8+9 号煤层.4+5 号煤层厚度为 5.0~14.0 m,8+9 号煤层厚度为 5.0~14.2 m;煤层顶底板均以泥岩为主,局部为砂质泥岩或砂岩.此外,山西组与太原组还分别发育 3 号煤层与 6 号、7 号煤层等薄煤层,煤层平均厚度约为 1 m.8+9 号煤层底板标高介于-795~895 m 之间,整体由东北向西南倾斜,局部发育隆起的鼻状构造与小范围洼陷.基于微构造理论,以 8+9 号煤层底板起伏、地层变化和形态为主要依据,研究区可划分为 5 个鼻隆单元、4 个凹槽单元及 2 个斜坡单元^[18](图 1a).

太原组底、顶部与山西组顶部泥岩为较好的隔水层,使得煤系地层与上覆、下伏含水层之间无水力联系.对煤层气开发有影响的主要是太原组及山西组砂岩裂隙含水层.山西组砂岩中裂隙较发育,透水性中等,含水层钻孔单位涌水量为 0.102~109.000 mL/(s·m);太原组含水层主要为石英砂岩,无稳定隔水层,钻孔单位涌水量为 0.041~321.000 mL/(s·m).太原组富水性强于山西组,整体属于弱-中含水层.区块水文地质条件较简单,地下水自东向西流,整体为弱径流区,西部局部为滞流区^[19].

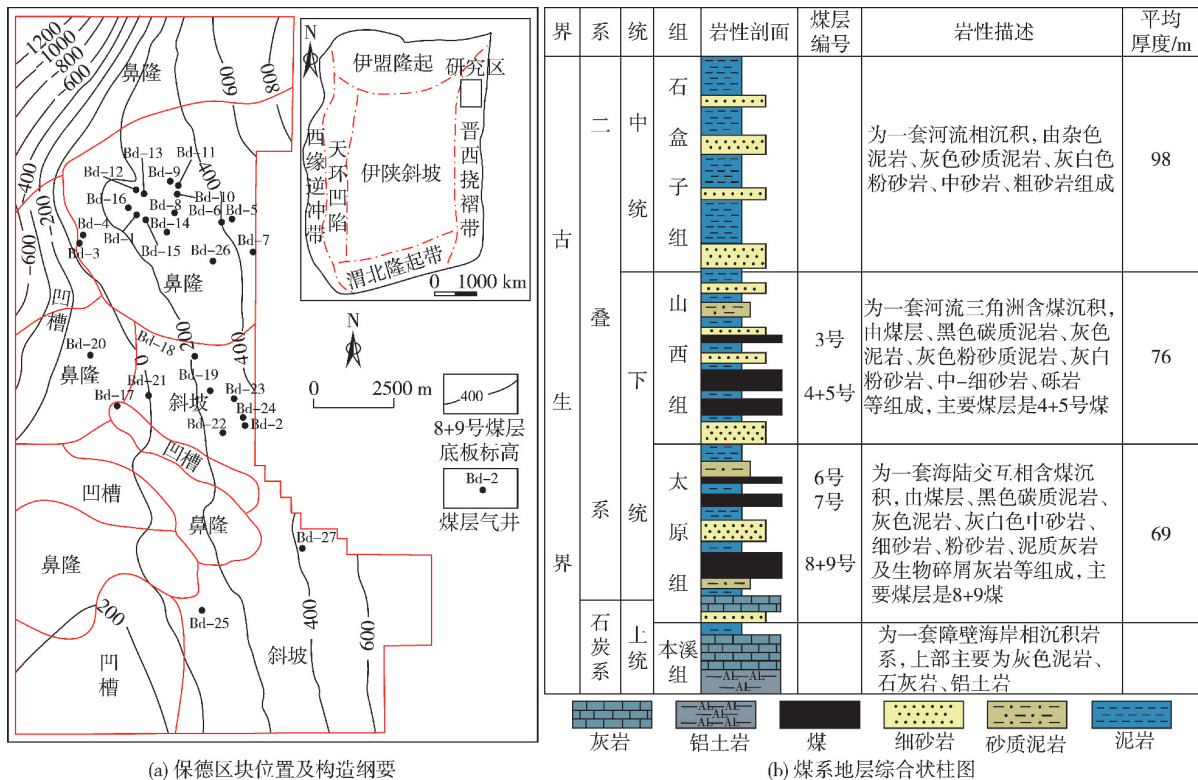


图 1 保德区块 8+9 号煤底板标高等值线及煤系地层柱状图(据文献[20]修改)

Fig. 1 Elevation contour of No. 8+9 coal seam and histogram of coal measures in the Baode block

2 煤系含水层判识

2.1 含水层判识原理

含水层是指能透水并产出相当数量水的岩

层,根据岩性分为砂岩含水层与灰岩含水层.保德区块煤系含水层以砂岩含水层为主(若不特别说明,以下含水层均指砂岩含水层).不同富水性含水层具备不同的物理特性及孔隙度特征,其测井

曲线响应特征也明显不同. 高富水性含水层一般表现为低自然电位(SP)、低深侧向电阻率值(RD)、较高补偿中子(CNL)、较低密度(DEN)、低自然伽马(GR)、较低声波时差(AC)等特征^[21]. 根据这一特性可进行含水层测井解释, 典型井的解释结果如图 2 所示.

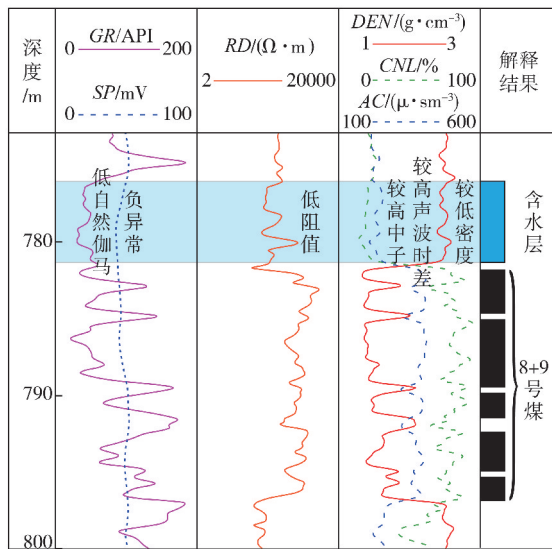


图 2 保德区块含水层测井解释示意
Fig. 2 Well logging interpretation of aquifer in Baode block

由图 2 可知, 通过含水层判识能够获取含水层厚度和含水层的位置. 但限于判识人员的经验差异、判识标准不统一, 导致判识结果可能存在一定的主观性. 相比较, 通过绘制含水层测井交汇图, 建立含水层判识模型, 能够降低判识难度、提高判识效率与精度. 基于研究区内 85 口井的测井资料, 综合整理了各含水层、砂岩、煤层、泥岩层、灰岩层的自然伽马、声波时差、密度、补偿中子、深侧向电阻率、自然电位等测井数据, 得到了主要关键测井曲线的交汇分析结果, 如图 3 所示.

由图 3 可知, 基于砂岩声波时差与自然伽马、密度交汇图(图 3a 和图 3b)能够较好地区分砂岩、煤、泥岩与灰岩, 典型含水层的自然伽马值介于 31.54~81.84 API, 声波时差值介于 213.50~258.37 $\mu\text{s}/\text{m}$ (图 3a), 密度介于 2.33~2.58 g/cm^3 (图 3b), 然而却难以区分砂岩与砂岩含水层. 结合深侧向电阻率与补偿中子、自然电位交汇图(图 3c 和图 3d)发现, 典型含水层补偿中子值介于 10.62%~17.02%, 深侧向电阻率值介于 59.91~199.18 $\Omega \cdot \text{m}$ (图 3c), 自然电位介于 43.33~58.45 mV. 可采用上述标准进行研究区含水层的精确判识.

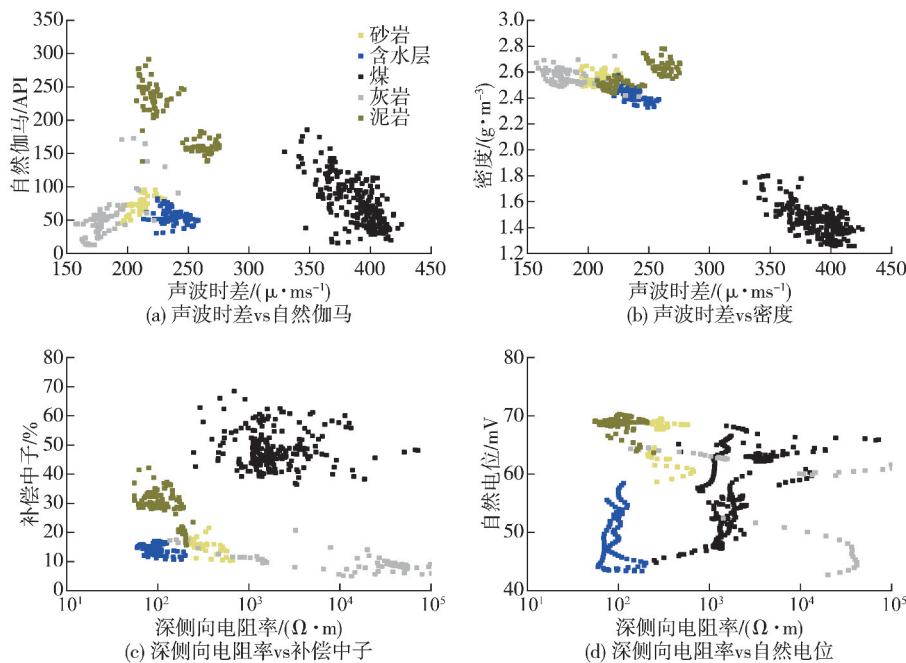


图 3 保德区块含水层测井交汇图
Fig. 3 Aquifer logging intersection diagram in the Baode block

2.2 含水层判识结果

应用构建的含水层判识模型开展了保德区块煤层顶底板含水层判识, 典型井含水层判识结果如图 4 所示.

由图 4 可以看出, 含水层与煤层呈嵌套式叠置

分布, 其中 3 号煤层顶板、4+5 号煤层顶板与 8+9 号煤层顶底板含水层厚度大, 发育稳定, 对煤层气井产水影响较大; 其他含水层厚度较薄、发育程度低, 对煤层气井排采影响较小.

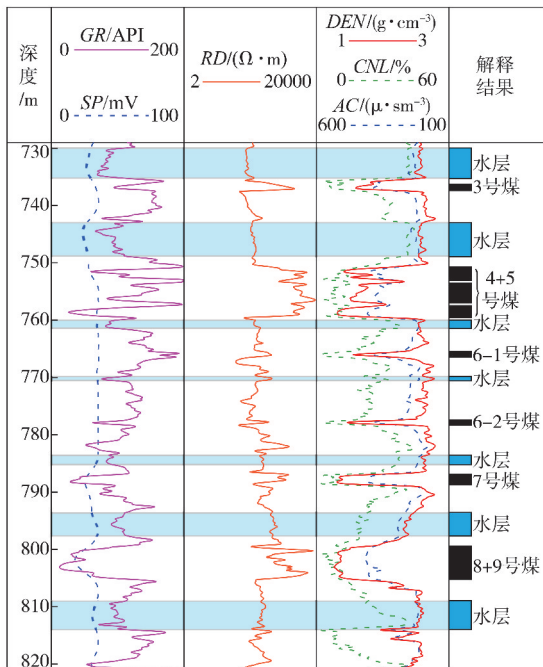


图 4 保德区块典型井含水层判识结果

Fig. 4 Aquifer identification results of typical well in the Baode block

3 排采水类型划分及水化学特征分析

3.1 排采水类型划分

煤层气排采水类型是指所排采储层与补给水源类型,每种排采水类型具有相似的水化学性质.煤层气井补给水来源包括地表水与围岩水,其中地表水通过入渗补给,含水层则通过断层沟通、侧向补给或突破隔层等方式补给^[22].结合保德区块煤层气高产水成因剖析结果,保德区块补给水来源以含水层补给为主,补给方式主要为突破隔层补给与侧向补给^[18],采用如下方法对含水层补给方式进行判识.

1) 突破隔层补给

若煤层顶底板封闭性差或水力压裂裂缝突破顶底板,则含水层突破隔层向煤层补给.据微地震监测结果,保德区块主力煤层水力压裂裂缝高 8.5~14 m,据此可判别含水层是否向煤层补给.

2) 侧向补给

构造的凹槽区与斜坡区分别是地下水汇水中心和强水动力区,若煤层气井布置于此,含水层通过侧向补给导致煤层气井高产水.根据区块微构造单元划分结果判识含水层是否向煤层气井补给.

根据保德区块煤层气井开发的产层与含水层补给情况,煤层气井的排采水类型可划分为地表水、4+5号煤层排采水、8+9号煤层排采水、4+5

号和 8+9 号煤层排采水、4+5 号和含水层排采水、8+9 号和含水层排采水、4+5 号和 8+9 号及含水层排采水 7 种排采水类型(以下按顺序分别采用序号 I, II, III, IV, V, VI, VII 代替).

3.2 不同排采水类型水化学特征

在初步判识了排采水来源后,进一步对不同排采水类型的水化学特征进行分析.本次以保德区块地表水和煤层气排采井为研究对象,煤层气井于 2010 年 9 月至 2015 年 10 月开始排采,在排采半年后开始采集水样,每隔半年采集水样 1 次,共采集水样 2~5 次,以剔除压裂液对排采水来源分析的影响.在 2011 年 6 月至 2016 年 9 月之间共采集水样 85 样次,其中地表水样 7 次,4+5 号煤层单采排采水样 9 次(II 型样 6 次、V 型样 3 次),8+9 号煤层排采水样 20 次(III 型样 18 次、VI 型样 2 次),4+5 号与 8+9 号煤层合采水样 49 次(IV 型样 39 次、VII 型样 10 次).研究中水样采集统一采用 0.5 L 聚乙烯塑料瓶,采集前在煤层气井出水口以排采水反复清洗样品瓶 3~5 次,取样时水样装满整瓶,以确保排除瓶子内全部空气,然后使用瓶盖密封,检查是否漏液.最后标记取样时间和井号,并于 72 h 内送至测试中心,依据《油田水分析方法》(SY/T 5523—2016)进行常规水化学测试.根据排采水类型判识方法,不同排采水类型水化学测试统计结果如图 5 所示.

由图 5 可知,保德区块煤层气井排采水中的离子有 Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- 等,阳离子以 Na^+ 和 K^+ 离子为主,阴离子以 Cl^- 与 HCO_3^- 为主.不同排采水类型水的矿化度和各离子质量浓度差异较大,矿化度中位数由大到小排序为 $\text{V} > \text{IV} > \text{VII} > \text{VI} > \text{III} > \text{II} > \text{I}$.一般地表水动力越活跃,矿化度越低, SO_4^{2-} 质量浓度越高;而煤储层水动力越弱,矿化度越高.随着埋深的增大,矿化度呈增大的趋势,阴离子由以 HCO_3^- 为主转变为以 Cl^- 为主,滞流水环境的脱碳酸作用是 HCO_3^- 减少的关键.需要注意的是,仅靠矿化度还不足以实现水来源的精确判识,如存在部分 4+5 号与 8+9 号煤层合层排采水矿化度大于 4+5 号煤层排采水的现象,这与高、低矿化度水混合获得中等矿化度水这一结论相悖.主要原因在于,不同采样区域同一地层矿化度存在较大差异,导致局部合采水矿化度大于单层排采水平均矿化度.因此,根据这些水化学参数来区分排采水来源仍存在较大难度,需要进一步探索新方法.

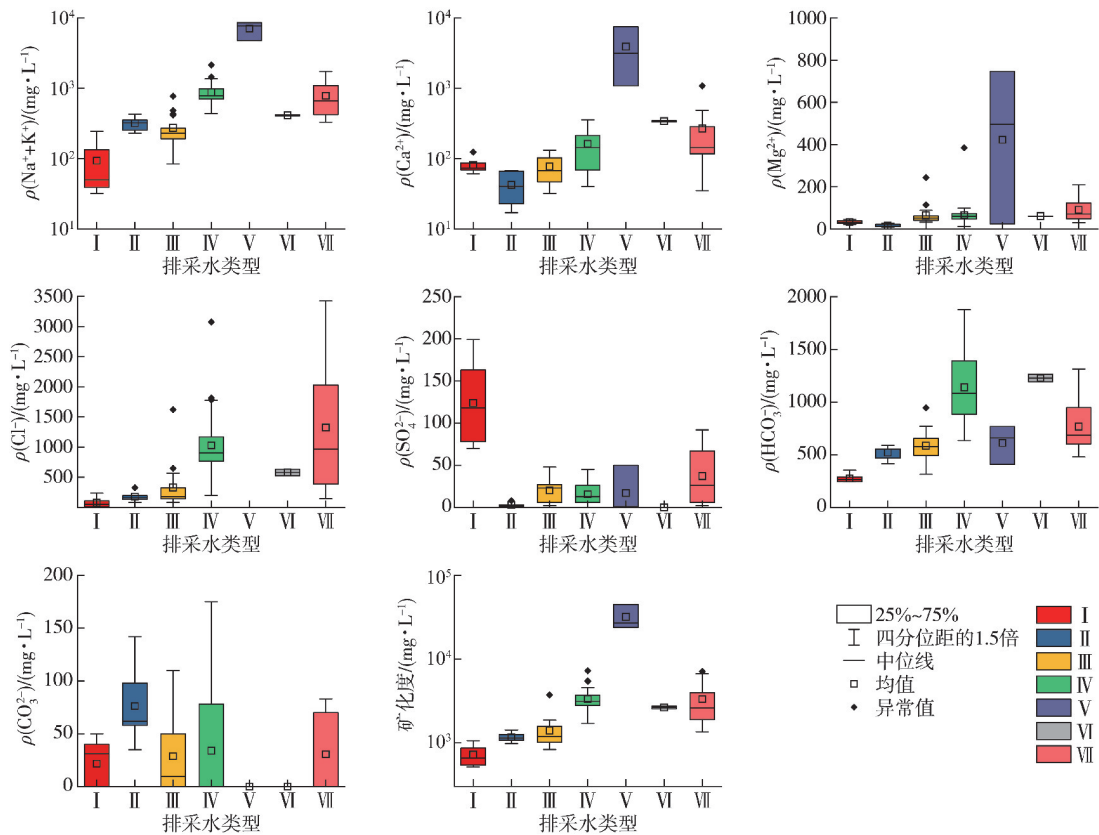


图 5 不同排采水类型下水中各离子特征对比

Fig. 5 Comparison of water ion characteristics of different drainage types

4 排采水来源判别模型的建立

由于排采水来源分析受多种复杂因素相互制约,为提高排采水来源划分的准确率和提高判别效率,本文提出了一种基于 PCA 的 Bayes 判别的新方法.该方法通过采用 PCA 筛选出排采水中离子的主成分因子,并应用 Bayes 判别法构建多煤层合采排采水来源判别模型.

4.1 基于 PCA 的主成分筛选

PCA 法是一种在保证原始数据特征信息的基础上,通过降低数据维度,能够减少特征指标冗余,提高建模速度和判断准确率的数理分析方法.采用该方法能够剔除关联度较高的排采水离子变量、提高计算速度和水来源判断准确率^[15].

PCA 法的求解步骤如下:

首先,构建原始矩阵.本次进行主成分分析的水样有 85 个,水中的离子指标有 7 个,建立 85 行 7 列的原始数据矩阵 $\mathbf{X} = (x_{ij})_{85 \times 7}$,结果如下:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{17} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{27} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{851} & x_{852} & \cdots & x_{857} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

其次,采用式(2)进行原始数据标准化,消除

排采水中离子数量级差异,可得到标准化矩阵 \mathbf{Z} ,采用式(3)获取相关系数矩阵 \mathbf{R} ,结果见图 6.

$$x' = \frac{x - x_{\max}}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (2)$$

$$\mathbf{R} = \frac{\mathbf{Z}^T \mathbf{Z}}{85 - 1}, \quad (3)$$

式中: x' , x , x_{\max} 和 x_{\min} 分别为标准化后的离子质量浓度、原始离子质量浓度、最大离子质量浓度和最小离子质量浓度.

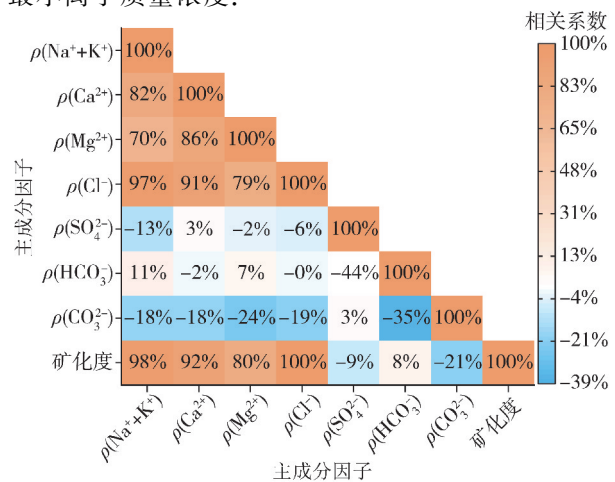


图 6 排采水中各离子的相关系数矩阵

Fig. 6 Correlation coefficient matrix of ion mass concentration in drainage water

由图 6 可知, $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- 及 CO_3^{2-} 的质量浓度与矿化度关联度较高, 分别为 98%, 92%, 80%, 100%, -21%, 其中 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Cl^- , CO_3^{2-} 是排采水中的主要阳离子和阴离子, 矿化度的大小主要取决于这 3 种离子, 故而相关性最好. 矿化度与 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, SO_4^{2-} , CO_3^{2-} 质量浓度的关联度分别为 98%, -9%, -21%, 差异原因在于这 3 种离子的成因不同, $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 主要来源于地下水的溶滤作用, 表现为矿化度随着 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 离子质量浓度的增大而增大; SO_4^{2-} 的存在反映了弱的脱硫酸作用和氧化环境, CO_3^{2-} 的存在反映了弱的脱碳酸作用和较差的地层封闭性^[23], 表现为矿化度随着 SO_4^{2-} 或 CO_3^{2-} 质量浓度的增大而减小. 由于脱硫酸作用和脱碳酸作用是地层封闭性好坏的充分不必要条件, SO_4^{2-} 与 CO_3^{2-} 质量浓度并没有较好的相关性, 关联度仅为 3%. 然后, 计算相关系数矩阵的特征值 λ_j 及其对应的特征向量 \mathbf{U}_j ($j = 1, 2, \dots, 8$). 计算公式如下:

$$|\mathbf{R} - \lambda\mathbf{U}| = 0. \quad (4)$$

最后, 确定主成分个数. 根据特征值对各成分由大到小排序, 采用式(5)计算前 a 个成分的累计贡献率 ξ_a ($a = 1, 2, \dots, 8$), 使累计方差贡献率达 80% 以上.

$$\xi_a = \sum_{j=1}^a \lambda_j / \sum_{j=1}^8 \lambda_j. \quad (5)$$

计算获取排采水中各离子的特征值、累计贡献率, 绘制主成分分析碎石图, 如图 7 所示.

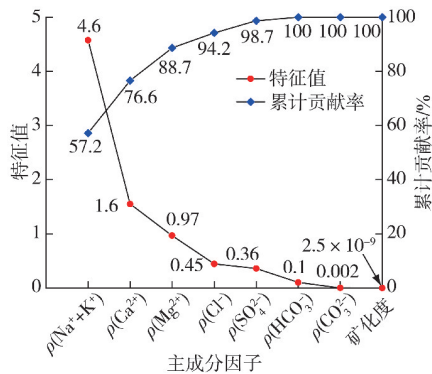


图 7 主成分分析碎石图

Fig. 7 Principal component analysis gravel diagram

$$\begin{cases} P_{\text{I}} = -21.75 + 0.01x_1 + 0.01x_2 + 0.02x_3 - 0.01x_4 + 0.31x_5, \\ P_{\text{II}} = -9.38 + 0.06x_1 + 0.05x_2 + 0.01x_3 - 0.03x_4 - 0.02x_5, \\ P_{\text{III}} = -5.54 + 0.03x_1 + 0.02x_2 + 0.03x_3 - 0.02x_4 + 0.04x_5, \\ P_{\text{IV}} = -24.11 + 0.10x_1 + 0.07x_2 + 0.03x_3 - 0.06x_4 - 0.002x_5, \\ P_{\text{V}} = -425.24 - 0.33x_1 - 0.29x_2 - 0.08x_3 + 0.22x_4 + 0.19x_5, \\ P_{\text{VI}} = -16.94 + 0.09x_1 + 0.06x_2 + 0.02x_3 - 0.05x_4 - 0.05x_5, \\ P_{\text{VII}} = -11.24 + 0.05x_1 + 0.04x_2 + 0.03x_3 - 0.03x_4 + 0.07x_5, \end{cases} \quad (11)$$

式中: $P_{\text{I}}, P_{\text{II}}, P_{\text{III}}, P_{\text{IV}}, P_{\text{V}}, P_{\text{VI}}, P_{\text{VII}}$ 分别为 7 种排采水来源判别函数值; x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 分别为

由分析结果可知, 前 5 个主成分占据了 98.7% 的数据信息量, 可实现对样本信息进行有效描述. 结合图 5 所示的 85 个训练样本, 经主成分分析选取 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} 这 5 个要素用于后文建模分析.

4.2 基于 Bayes 判别的排采水来源判识模型

Bayes 判别法是一种考虑先验概率和后验概率, 以概率归属最大原则确定某一变量归属种类的判别分析方法. 相较于 Fisher 判别法, Bayes 计算简单, 运算速度更快, 效率更高^[24].

根据煤层气井排采水的离子特征, 设 x_i 为水样中的离子质量浓度, mg/L; i 为水离子指标 ($i = 1, 2, \dots, m$); j 为某排采水来源 ($j = 1, 2, \dots, s$); y_{ij} 为排采水来源 j 的水化学离子 i 的标准值. Bayes 判别法的计算方法如下:

1) 先验概率 $P(y_{ij})$. 根据排采水类型确定排采水来源, 此时水样属于每种水源的概率相同, 即

$$P(y_{i1}) = P(y_{i2}) = \dots = P(y_{is}) = 1/s. \quad (6)$$

2) 似然概率 $P(x_i | y_{ij})$. 通过对水样中离子质量浓度与标准值做差, 取其绝对值的倒数计算, 方法如下:

$$P(x_i | y_{ij}) = (1/|x_i - y_{ij}|) / \left(\sum_{j=1}^m 1/|x_i - y_{ij}| \right). \quad (7)$$

3) 后验概率 $P(y_{ij} | x_i)$. 将先验概率与似然概率代入 Bayes 计算公式求取后验概率, 公式如下:

$$P(y_{ij} | x_i) = \frac{P(y_{ij})P(x_i | y_{ij})}{\sum_{i=1}^n P(y_{ij})P(x_i | y_{ij})}. \quad (8)$$

4) 判别函数 P_j . 分别采用式(9)与式(10)求取排采水中各离子 i 的权重 w_i 和水中多种离子的综合得分, 即排采水样属于水来源 j 的概率 P_j . 获取的判别函数见式(11).

$$w_i = (x_i/y_{ij}) / \left(\sum_{i=1}^m x_i/y_{ij} \right). \quad (9)$$

$$P_j = \sum_{i=1}^n w_i P(y_{ij} | x_i). \quad (10)$$

排采水中 $\text{Na}^+ + \text{K}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+}, \text{Cl}^-, \text{SO}_4^{2-}$ 的质量浓度, mg/L 。

5) 排采水来源判别. 以最大归属概率判别排采水来源归属 P_h , 即哪一水样的判别函数值最大, 那么该水样就归于该类, 判别方法如下:

$$P_h = \max_{1 \leq j \leq m} P_j, \quad (12)$$

综合以上方法, 可形成“含水层判识、排采水类型划分、排采水来源判识”的多煤层合采排采水来源判识系列方法, 具体流程如图 8 所示。

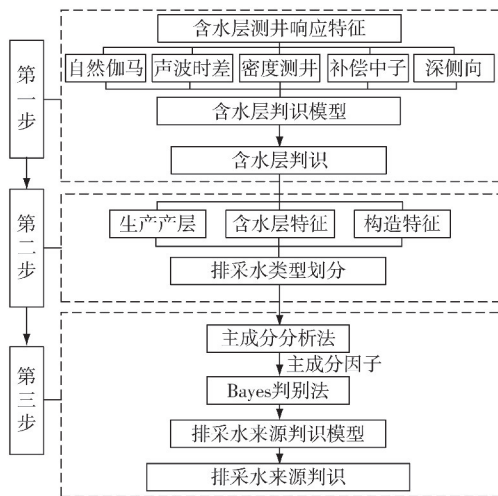


图 8 多煤层合层排采水来源判识方法流程

Fig. 8 The flowchart of the method for identifying the source of multiple coal seam co-layer drainage

1) 根据含水层测井响应特征, 建立含水层判识模型, 进行煤层顶底板含水层判识, 查明含水层层位及展布特征。

2) 根据煤层气井开发产层、井位构造特征及含水层展布特征, 采用煤层气井补给水类型判识

方法^[21], 进行含水层补给方式判识, 划分排采水类型, 初步划分煤层气井排采水来源。

3) 采用基于 PCA 的 Bayes 判别法, 在排采水类型划分结果的基础上, 通过筛选排采水离子主成分因子, 构建多煤层合采水来源判识模型, 进一步判识排采水来源。

5 案例应用与分析

5.1 排采水来源判识

采用上述系列方法, 对未用于建模的 27 口煤层气井进行排采水类型划分, 并收集排采水样品进行水化学测试, 代入已建立的排采水来源判别函数式(11)与式(12)进行排采水来源判识. 排采水类型划分结果与最终判识结果见表 1。

由表 1 可知, 当含水层通过突破隔层向煤层补给时, 煤层气井产水量介于 $5.82 \sim 13.82 \text{ m}^3/\text{d}$ 之间, 整体随着含水层厚度的增大, 平均日产水量呈现增大的趋势. 含水层补给情况判识结果与高产水成因分析结果一致. 同时, 排采水来源判识结果与排采水类型划分结果差异较小, II, III, VI 类水样的准确率均为 100%, IV 和 VII 类水样的准确率则分别为 85.71% 和 77.78%, 整体判识准确率为 88.89%. 由此可见, 该模型具有良好的判识准确率. 与单煤层排采水来源相比, 合层排采水来源判识准确率相对较低. 主要原因在于排采过程中地下水所接触的地层不同, 含水层的补给和储层压力的改变均会导致产层贡献比例发生改变, 同时也可能导致排采水化学特征发生改变, 影响模型判断结果, 这是上述模型所不可避免的问题。

表 1 保德区块煤层气井排采水化学特征及水来源判识结果

Table 1 Chemical characteristics and water source identification of coalbed methane well drainage water in Baode block

井号	产层	含水层厚度/m	构造单元	补给方式	排采水类型划分	日产水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	离子质量浓度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)					水来源判识
							$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	
Bd-1	4+5,8+9	1.18	鼻隆	无补给	IV	4.39	811	99	60	862	15	IV
Bd-2	8+9	0	斜坡	无补给	III	1.43	210	39	35	192	6	III
Bd-3	4+5,8+9	15.08	鼻隆	突破隔层补给	VII	7.68	1 149	278	121	1 978	2	VII
Bd-4	8+9	3.15	鼻隆	无补给	III	3.03	1 022	221	107	1 957	5	III
Bd-5	4+5,8+9	1.80	鼻隆	无补给	IV	1.22	827	248	77	1 165	35	IV
Bd-6	8+9	0	鼻隆	无补给	III	1.52	375	176	43	580	10	III
Bd-7	4+5,8+9	7.90	鼻隆	突破隔层补给	VII	5.82	771	99	50	1 058	16	VII
Bd-8	4+5,8+9	0	鼻隆	无补给	IV	1.83	872	88	65	1 018	6	IV
Bd-9	4+5,8+9	9.66	鼻隆	突破隔层补给	VII	6.96	880	150	68	1 057	7	IV
Bd-10	8+9	0	鼻隆	无补给	III	3.65	590	112	55	894	8	III
Bd-11	4+5,8+9	0	鼻隆	无补给	IV	3.27	1 095	174	70	1 389	7	IV
Bd-12	4+5,8+9	15.79	鼻隆	突破隔层补给	VII	7.29	672	167	74	901	49	VII
Bd-13	4+5,8+9	0	鼻隆	无补给	IV	2.45	601	365	62	825	22	IV
Bd-14	4+5,8+9	9.30	鼻隆	突破隔层补给	VII	8.26	609	99	74	822	30	VII

续表 1

井号	产层	含水层厚度/m	构造单元	补给方式	排采水类型划分	日产水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	离子质量浓度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)					水来源判识
							$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	
Bd-15	8+9	0	鼻隆	无补给	Ⅲ	1.93	532	254	62	965	6	Ⅲ
Bd-16	8+9	8.70	鼻隆	突破隔层补给	Ⅵ	10.17	512	256	42	627	4	Ⅵ
Bd-17	8+9	5.12	凹槽	侧向补给	Ⅵ	9.27	732	161	59	900	3	Ⅵ
Bd-18	4+5,8+9	9.84	斜坡	突破隔层补给	Ⅶ	6.47	450	39	51	346	27	Ⅶ
Bd-19	8+9	2.53	斜坡	无补给	Ⅲ	2.49	226	41	44	163	26	Ⅲ
Bd-20	4+5,8+9	11.32	鼻隆	突破隔层补给	Ⅶ	13.08	753	301	103	1 157	32	Ⅶ
Bd-21	4+5,8+9	13.41	斜坡	突破隔层补给	Ⅶ	12.48	395	44	84	424	39	Ⅶ
Bd-22	4+5,8+9	1.29	斜坡	无补给	Ⅳ	2.61	661	30	52	544	22	Ⅳ
Bd-23	8+9	3.32	斜坡	无补给	Ⅲ	1.43	265	42	55	321	25	Ⅲ
Bd-24	8+9	0	斜坡	无补给	Ⅲ	0.51	218	112	36	253	6	Ⅲ
Bd-25	4+5	3.20	斜坡	无补给	Ⅱ	4.73	390	25	9	225	11	Ⅱ
Bd-26	4+5,8+9	9.37	鼻隆	突破隔层补给	Ⅶ	5.94	688	200	47	649	28	Ⅶ
Bd-27	4+5,8+9	4.15	斜坡	无补给	Ⅳ	3.59	153	44	31	144	1	Ⅳ

注:表中加粗斜体字表示排采水来源判识结果与排采水类型划分结果不同。

5.2 分析与讨论

产液剖面测试是一种采用井下测试仪器测试不同生产层位气/水产量、压力、温度等参数的生产测井手段。采用产液剖面测试手段,可了解不同分层的生产动态。本次对合层排采 4+5 号与 8+9 号煤层的 3 口煤层气井的产液剖面测试数据与生产动态进行了分析,以论证本文提出的排采水来源判识模型的有效性。3 口井的产液剖面测试结果见表 2,相应的排采曲线如图 9 所示。

表 2 产液剖面测试数据
Table 2 Liquid production profile test data

井号	煤层	产水贡献率/%	产气贡献率/%
Bd-20	4+5	49.37	54.86
	8+9	50.63	45.14
Bd-26	4+5	42.50	70.51
	8+9	57.50	29.49
Bd-27	4+5	10.58	14.55
	8+9	89.42	85.45

由表 2 可知,Bd-20 与 Bd-26 这 2 口井的两层(4+5 号与 8+9 号)煤层的产水贡献比例相当。其中,Bd-20 井判识的排采类型与排采水来源一致,产液剖面测试结果也显示两煤层产水比例贡献相当,排采水来源的确为 4+5 号和 8+9 号及含水层;相应地,Bd-20 井日产水量大且稳定,稳定排采过程中套压稳定,表明供气气源充足且稳定,产气效果好(图 9a)。

Bd-26 井判识的排采水类型为 4+5 号和 8+9 号及含水层排采水,排采水来源判识结果为 4+5 号和 8+9 号煤层排采水,未判识出外来水补给;相应地,Bd-26 井产水量受排采工作制度影响,产

水量并不稳定,初期产水量较大,后期产水量较小,且大部分时间煤层气井产水量低于 $5 \text{ m}^3/\text{d}$;分析认为受采样测试时间影响,无/有少量外来水补给,导致未能识别出外来水补给(图 9b)。

Bd-27 井判识的排采水类型为 4+5 号和 8+9 号煤层排采水,而排采水来源判识结果为 8+9 号煤层排采水,未判识出 4+5 号煤层水;由产液剖面测试可知,4+5 号与 8+9 号煤层产水与产气贡献比例均接近 1:9;分析认为由于 4+5 号与 8+9 号煤层流体压力不匹配,排采过程中产生层间干扰,导致排采水以 8+9 号煤层为主,这是导致排采水来源判识结果与排采水类型判识结果不一致的根本原因。同时由排采曲线(图 9c)可以看出,Bd-27 井排采井底压力下降较为容易,套压小但相对稳定,相较于 Bd-20 和 Bd-26 井产气效果较差;分析认为 Bd-27 井产气量主要由 8+9 号煤层贡献,这是产气效果差的主要原因。

综合认为,排采水类型是基于地质工程背景特征,针对煤层气井全生命周期分析排采水来源,能够为煤层气井井位布置、井网优化、开发决策、排采设备选择提供参考;而排采水来源判识模型是结合产出水常规离子特征来进一步动态识别排采水来源,判识结果更精准,可粗略判识排采水占比及合采层间干扰情况,可为更换排采设备或调整排采工作制度提供参考。

排采水来源判识模型可用于多煤层合采井的层间干扰程度评价。根据排采水来源判识结果,保德区块煤层气合层排采水来源可分为 3 种:一是 4+5 号/8+9 号煤层水(情况 1),如 Bd-27 井,层间干扰强烈,产气效果较差;二是 4+5 号和 8+9

号煤层合采水与含水层(情况 2),如 Bd-3, Bd-7, Bd-12 井等,层间干扰较强,产气效果一般;三是 4 +5 号和 8+9 号煤层合采水(情况 3),如 Bd-1,

Bd-5, Bd-8 井等,层间干扰弱,产气效果较好. 保德区块煤层气合采井 3 种排采水来源平均日产气量如图 10 所示.

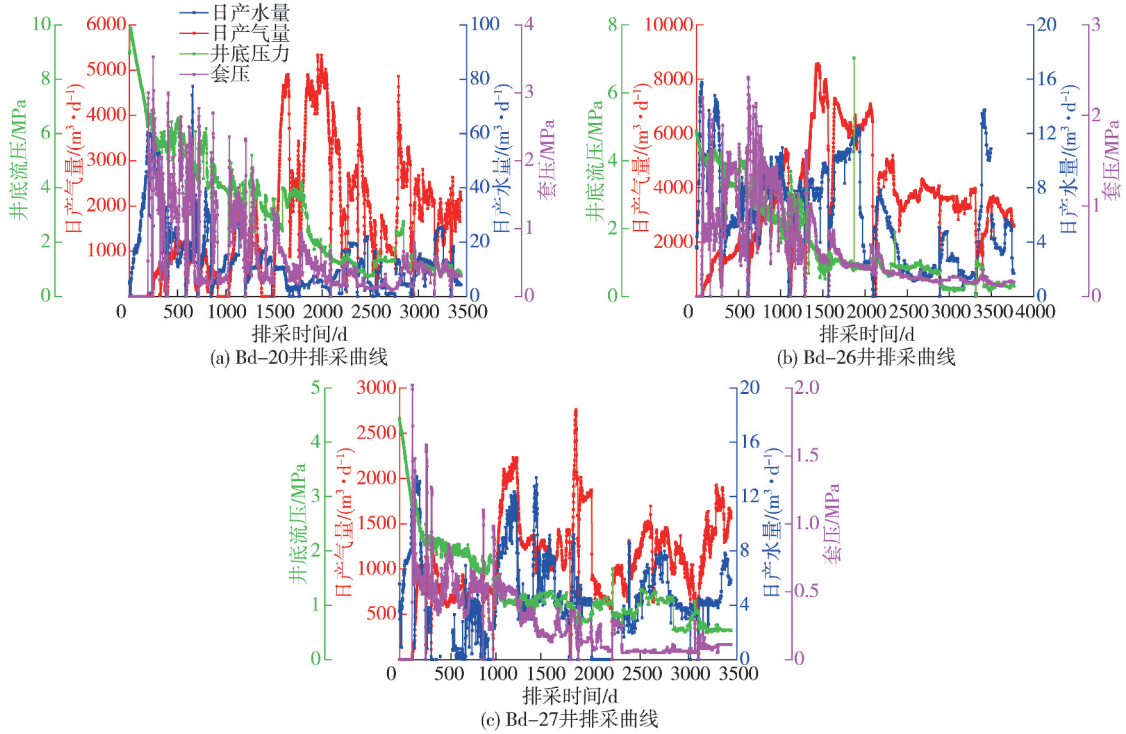


图 9 煤层气井排采曲线

Fig. 9 Drainage curve of coalbed methane well

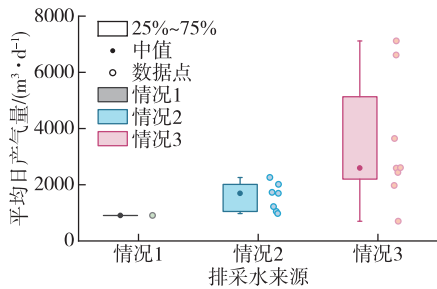


图 10 煤层气合采井不同排采水来源平均日产气量
Fig. 10 Average daily gas production of different drainage water sources in CBM commingled wells

由图 10 可知,情况 1 至情况 3,平均日产气量呈现逐渐增大的趋势.分析认为:情况 1 与情况 2 分别是合采层间干扰的 2 种主要表现形式^[25-26].其中,情况 1 反映了处于不同压力系统的煤层合采,压力高的煤层水向压力低的煤层倒灌,排采水主要由压力高的煤层贡献,层间干扰十分强烈,产气效果差.情况 2 反映出不均衡产水导致某一或某些煤层降压解吸受限,当存在外来水补给时,外来水与煤层合采水一同产出,外来水补给的影响进一步限制煤储层压降传播,导致供气范围受限;同时由于外来水补给,导致合采储层压降传播不一致,层间干扰加剧,产气效果变差,产气量一般.情况 3 则显示两煤层对产水量的贡献相当,层间干扰

弱,且无外来水补给,煤层气井产水量小,有利于压降传播,整体产气效果较好,局部受地质、工程等因素的影响,产气效果一般.

6 结 论

1)通过含水层测井响应分析,构建了含水层判识模型,结合生产动态,划分了排采水类型,采用基于 PCA 的 Bayes 判别法,建立了排采水来源判识模型,形成了“含水层判识-排采水类型划分-排采水来源判识”的多煤层合层排采水来源判识系列方法.

2)保德区块煤层气井排采水类型可划分为 7 种,排采水类型划分是基于地质工程背景初步划分排采水来源,能为煤层气井井位布置、井网优化、开发决策、排采设备选择提供参考.

3)排采水来源判识模型是结合产出水常规离子特征进一步动态识别排采水来源,通过判别可为更换排采设备或调整排采工作制度等决策提供参考.同时,该模型具有一定的层间干扰判识功能.合层排采水来源若为单一煤层水,层间干扰剧烈,产气效果差;若为合采煤层与含水层的混合水,层间干扰较强,产气效果一般;若为合采煤层

水,层间干扰弱,产气效果较好。

参考文献:

- [1] 徐凤银,张 伟,李子玲,等.鄂尔多斯盆地保德区块煤层气藏描述与提高采收率关键技术[J]. 天然气工业,2023,43(1):96-112.
XU Fengyin, ZHANG Wei, LI Ziling, et al. Coalbed methane reservoir description and enhanced recovery technologies in Baode block, Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(1): 96-112.
- [2] 傅雪海,康俊强,陈义林,等.煤层气有关术语辨析[J/OL]. 中国矿业大学学报,1-8(2024-06-20)[2024-08-10]. <https://doi.org/10.13247/j.cnki.jcumt.20240106>.
FU Xuehai, KANG Junqiang, CHEN Yilin, et al. Analysis on terminologies related to coalbed methane [J/OL]. Journal of China University of Mining & Technology, 1-8(2024-06-20)[2024-08-10]. <https://doi.org/10.13247/j.cnki.jcumt.20240106>.
- [3] 秦 勇,张 政,白建平,等.沁水盆地南部煤层气井产出水源解析及合层排采可行性判识[J]. 煤炭学报,2014,39(9):1892-1898.
QIN Yong, ZHANG Zheng, BAI Jianping, et al. Source apportionment of produced-water and feasibility discrimination of commingling CBM production from wells in Southern Qinshui Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(9): 1892-1898.
- [4] 康永尚,陈 晶,张 兵,等.沁水盆地寿阳勘探区煤层气井排采水源层判识[J]. 煤炭学报,2016,41(9):2263-2272.
KANG Yongshang, CHEN Jing, ZHANG Bing, et al. Identification of aquifers influencing the drainage of coalbed methane wells in Shouyang exploration area, Qinshui Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(9): 2263-2272.
- [5] 刘会虎,桑树勋,李梦溪,等.煤层气群井排采地层水来源判识及其意义[J]. 水文地质工程地质,2015,42(1):29-34.
LIU Huihu, SANG Shuxun, LI Mengxi, et al. Discrimination of source of formation water during CBM drainage with the multi-well pattern and its significance[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(1): 29-34.
- [6] 郭 晨,秦 勇,易同生,等.基于生产特征曲线的煤层气合采干扰判识方法:以黔西地区织金区块为例[J]. 石油勘探与开发,2022,49(5):977-986.
GUO Chen, QIN Yong, YI Tongsheng, et al. A method for identifying coal bed methane co-production interference based on production characteristic curves: A case study of the Zhijin block, western Guizhou, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(5): 977-986.
- [7] 韩思杰,桑树勋,段飘飘,等.改进的深部煤层CO₂地质封存潜力评价方法:以沁水盆地郑庄区块3#煤层为例[J]. 中国矿业大学学报,2023,52(4):772-788.
HAN Sijie, SANG Shuxun, DUAN Piaopiao, et al. Modified assessment method of CO₂ geologic storage capacity in deep coal and its application in the Zhengzhuang block, Qinshui Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(4): 772-788.
- [8] 杨兆彪,吴丛丛,朱杰平,等.中国煤层气井产出水地球化学研究进展[J]. 煤炭科学技术,2019,47(1):110-117.
YANG Zhaobiao, WU Congcong, ZHU Jieping, et al. Research progress on produced water geochemical from CBM wells in China[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(1): 110-117.
- [9] 尹 恒,姜丽丽,裴尼松,等.基于水化学和多元统计的煤矿采空积水识别[J]. 科学技术与工程,2020,20(27):11051-11058.
YIN Heng, JIANG Lili, PEI Nisong, et al. Identification of coalmine goaf groundwater based on hydrogeochemistry and multivariate statistics[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(27): 11051-11058.
- [10] 曾一凡,梅傲霜,武 强,等.基于水化学场与水动力场示踪模拟耦合的矿井涌(突)水水源判识[J]. 煤炭学报,2022,47(12):4482-4494.
ZENG Yifan, MEI Aoshuang, WU Qiang, et al. Source discrimination of mine water inflow or inrush using hydrochemical field and hydrodynamic field tracer simulation coupling[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12): 4482-4494.
- [11] 焦 雯,唐书恒,张松航,等.煤层气井产出水离子及同位素演化特征研究[J]. 煤炭科学技术,2019,47(12):168-176.
JIAO Wen, TANG Shuheng, ZHANG Songhang, et al. Study on evolution characteristics of water ions and isotopes produced by coalbed methane wells[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(12): 168-176.
- [12] JIANG C L, AN Y Q, ZHENG L G, et al. Water source discrimination in a multiaquifer mine using a comprehensive stepwise discriminant method[J]. Mine Water and the Environment, 2021, 40: 442-455.
- [13] 康小兵,李晓雪,饶丽芳,等.重庆松藻矿区关闭煤

- 矿涌水来源与模式判识研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(10): 220-230.
- KANG Xiaobing, LI Xiaoxue, RAO Lifang, et al. Source identification and pattern study of closed coal mines water inflow in Songzao mining area, Chongqing City[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(10): 220-230.
- [14] 秋兴国, 刘杰, 李娜, 等. 改进贝叶斯判别法的矿井水源识别模型[J]. 西安科技大学学报, 2022, 42(2): 237-244.
- QIU Xingguo, LIU Jie, LI Na, et al. Identification model of mine water source based on improved Bayesian discrimination[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2022, 42(2): 237-244.
- [15] 葛燕燕. 煤系多层叠置含水系统及煤层气合排水源判识: 以黔西珠藏向斜为例[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- GE Yanyan. Study on the multi-superimposed aquifer system of coal seams and source discrimination of commingling CBM produced-water: An example from Zhucang Syncline in western Guizhou Province [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [16] 文稔东. 多层合采煤层气井地下水地球化学特征及其来源辨识: 以古交矿区邢家社区块为例[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- WEN Rendong. Geochemical characteristics and source identification of groundwater in multi-layer coal seam gas well: A case study of Xingjiashe block in Gujiao mining area[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [17] 陈文文, 何萌, 王晶, 等. 煤层气井产出水来源判别[J]. 煤炭技术, 2017, 36(3): 123-126.
- CHEN Wenwen, HE Meng, WANG Jing, et al. Identify about source of CBM wells produced water[J]. Coal Technology, 2017, 36(3): 123-126.
- [18] 闫霞, 肖芝华, 吴仕贵, 等. 鄂尔多斯盆地保德区块煤层气富集区高产水井排采效果剖析[J]. 天然气工业, 2018, 38(增1): 86-93.
- YAN Xia, XIAO Zhihua, WU Shigui, et al. Analysis on drainage and production effect of high yield well in CBM rich area of Baode block, Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(Sup 1): 86-93.
- [19] 李剑, 王勃, 邵龙义, 等. 水文地质分区及其控气作用: 以鄂东气田保德区块为例[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(4): 869-876.
- LI Jian, WANG Bo, SHAO Longyi, et al. Hydrogeological zoning and its gas-controlling mechanism: A case study of Baode block, eastern Ordos gas field [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(4): 869-876.
- [20] 李洋冰, 曾磊, 胡维强, 等. 保德地区煤层气地球化学特征及成因探讨[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(2): 133-141.
- LI Yangbing, ZENG Lei, HU Weiqiang, et al. Geochemical characteristics and genesis of coalbed methane in Baode area[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(2): 133-141.
- [21] 赵一民. 西山煤田古交矿区煤层气水文封存单元测井解释方法研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
- ZHAO Yimin. Log interpretation method of coalbed methane hydrological storage unit in Gujiao mining area, Xishan coalfield[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018.
- [22] 杜丰丰, 倪小明, 张亚飞, 等. 补给水类型对煤层气井产水量的控制作用及开发对策[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(6): 74-84.
- DU Fengfeng, NI Xiaoming, ZHANG Yafei, et al. Recharge water types of coalbed methane wells: Controlling effects on water yield and countermeasures[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(6): 74-84.
- [23] 杜丰丰, 倪小明, 张亚飞, 等. 寿阳区块煤层气田的水文控藏模式及控产特征[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(10): 177-188.
- DU Fengfeng, NI Xiaoming, ZHANG Yafei, et al. Hydrological control mode and production characteristics of coalbed methane field in Shouyang block[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(10): 177-188.
- [24] 于小鸽, 裴富华, 刘焱菲, 等. 贝叶斯判别和 Fisher 判别在矿井突水水源判别中的应用比较[J]. 中国科技论文, 2022, 17(1): 9-14.
- YU Xiaoge, PEI Fuhua, LIU Yifei, et al. Application comparison of Bayes and Fisher discrimination in mine inrush water source[J]. China Science Paper, 2022, 17(1): 9-14.
- [25] LI Q X, XU J, SHU L Y, et al. Exploration of the induced fluid-disturbance effect in CBM co-production in a superimposed pressure system[J]. Energy, 2023, 265: 126347.
- [26] GUO C, QIN Y, WU C F, et al. Hydrogeological control and productivity modes of coalbed methane commingled production in multi-seam areas: A case study of the Bide-Santang Basin, western Guizhou, South China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 189: 107039.