

沁水盆地海陆交互相页岩 脆性指数预测与测井响应分析

付娟娟, 郭少斌

(中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083)

摘要:沁水盆地煤系地层勘探开发时间长,但测井系列简单,通过全岩分析获取矿物组分的岩心数量十分有限,因此,目前该地区页岩储层的脆性评价以定性为主,缺少定量表征。基于 XRD 全岩分析的矿物组分信息,通过矿物法计算了沁水盆地海陆交互相页岩岩心的脆性矿物指数,分析了页岩地层的测井响应特征及对脆性矿物指数的影响,采用多元回归方法,建立了该区石炭—二叠系页岩地层矿物指数的计算模型。研究区内石英、长石、菱铁矿及黄铁矿对储层脆性有主要贡献,其含量与页岩脆性指数成正比;而黏土矿物含量较高,有利于提高岩石塑性,不利于裂缝伸展。不同测井响应对脆性指数的反映程度不同,脆性矿物指数与密度值呈正相关,与自然伽马值呈负相关,而与电阻率和声波时差的关系不明显,呈微弱的负相关。多元线性回归方法计算得到的脆性矿物指数与矿物法得到的结果吻合度较好。

关键词:脆性指数;脆性评价;矿物组成;页岩;海陆交互相;沁水盆地

中图分类号: TE122.23

文献标识码: A

Prediction of brittle index and its relationship with log data in marine-terrigenous shale of Qinshui Basin

FU Juanjuan, GUO Shaobin

(School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing, 100083, China)

Abstract: Rock brittleness, as a key factor affecting the fracture properties of shale, is one of most important parameters for shale gas reservoir evaluation and “sweet spot” prediction. At present, the brittleness evaluation of shale reservoirs in the Qinshui Basin is mostly based on qualitative analysis because of its simple well logging series and limited number of cores for XRD based mineral composition. In this paper, a brittleness index (*BI*) was firstly calculated based on mineral composition information from XRD data. Then the relationship between logging data and *BI* was analyzed. Finally, a model for calculating the *BI* of the Carboniferous and Permian shale is established. The results show that the brittleness in the studied area is related to quartz, dolomite, pyrite and clays. The contents of quartz, dolomite and pyrite have a positive correlation with *BI*, whereas the clay minerals, which increase the ductility of rocks, are negatively correlated with *BI*. Different logging responses reflect different degrees of *BI*. The *BI* is positively related to the density, whereas it is negatively correlated with natural gamma signal. The relationship of *BI* with resistivity and interval transit time is not strong, showing a weakly negative correlation. The *BI* calculated using a multiple linear regression method is in a good agreement with that obtained by the mineral method.

Key words: brittle index; brittleness evaluation; mineral composition; shale; marine-terrigenous facies; Qinshui Basin

页岩地层的脆性,即页岩的岩石力学性质,是页岩可开采性的关键评价参数之一。脆性与页岩压裂的难易程度、压裂缝的走向形态及天然裂缝的发育程度密切相关,大量脆性矿物的存在是页岩能

够通过压裂造缝获得高产油流的原因^[1]。

脆性评价是页岩储层评价的重要内容。目前,页岩的脆性评价主要有以下几种方法:一是矿物法,即通过分析岩石样品矿物组成对脆性进行定性

收稿日期: 2018-09-28; 修订日期: 2018-12-14。

作者简介: 付娟娟(1981—),女,博士研究生,工程师,矿产普查与勘探专业。E-mail: jessietx2009@hotmail.com。

通信作者: 郭少斌(1962—),男,教授,博士生导师,从事层序地层学、储层评价和油气资源评价方面的教学和科研工作。E-mail: guoshb58@126.com。

基金项目: 国家科技重大专项“不同类型页岩生成机理与富集规律研究”(2016ZX05034-001)资助。

或定量表征^[2-4]。JARVIE 等^[2]分析了 Barnett 页岩的矿物组成,认为石英为主要的脆性矿物,在此基础上建立了脆性指数计算模型。随后,国内外的诸多学者,根据不同地区页岩的矿物组成特点,考察了碳酸盐、长石等矿物对脆性的贡献^[5-6],分别建立了适用于地区经验的脆性指数公式。二是弹性参数法,即通过岩石力学实验获取的弹性参数进行表征。RICKMAN 等^[7]提出了基于弹性参数杨氏模量和泊松比表征页岩脆性的方法;GOODWAY 等^[8]提出采用拉梅系数和剪切模量表征脆性;还有学者以杨氏模量、泊松比、拉梅系数和剪切模量为参数进行脆性指数计算^[9]。三是基于岩石物理实验和矿物组分分析进行脆性评价^[10-13]。无论是矿物法还是弹性参数法,都需要通过矿物组分分析实验或岩石物理实验确定参数,再应用元素俘获测井(ECS)、阵列声波测井或地震资料进行脆性矿物指数预测,从而进行脆性评价。

沁水盆地煤系地层勘探开发时间长,测井系列简单,只有常规测井资料,而通过全岩分析获取矿物组分的岩心数量又十分有限。因此,目前该地区页岩储层的脆性评价以定性认识为主。本文通过矿物法计算岩心的脆性矿物指数 BI ,分析页岩地层的测井响应特征及其对脆性矿物指数 BI 的影响;采用多元回归方法,建立了该地区石炭—二叠系页岩地层矿物指数 BI 的计算模型,并对 BI 的影响因素进行了分析。本文方法实现了页岩地层脆性评价的定量表征,旨为该地区页岩储层评价和甜点预测提供依据。

1 研究区概况

沁水盆地位于华北克拉通盆地中心,为一近南北向的大型复式向斜构造盆地。其东部与太行山隆起毗邻,西部与霍山隆起相隔,北临五台山隆起,南接中条山隆起^[14-15],面积为 $4.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1)。

沁水盆地及其周缘在上古生界石炭—二叠系发育多套泥页岩,多数分布于太原组以及山西组,少量散布于下石盒子组。太原组沉积期海进海退作用频繁,形成了一套以潮控三角洲、碳酸盐岩台地、障壁沙坝、滞留潟湖、泥炭坪为主的海陆交互复合沉积体系,其岩性主要为泥岩、砂质泥岩、煤层、粉砂岩、砂岩及石灰岩。山西组沉积期海岸线向南移动,地层以三角洲体系沉积为主,为一套浅水三角洲、三角洲平原及前缘的组合;其北缘在中晚期发生多次森林泥炭沼泽化过程,是以河流相泛滥盆地和三角洲平原为主的成煤环境,岩性为灰黑

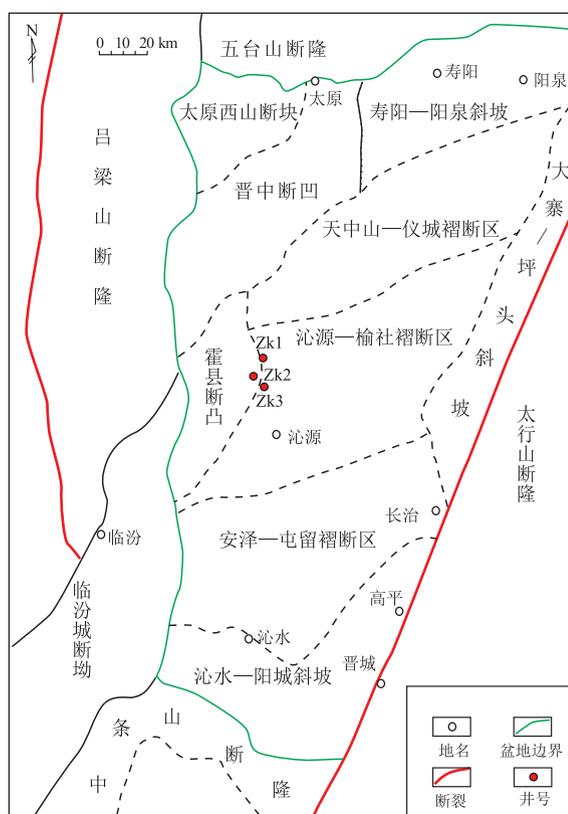


图 1 沁水盆地构造单元及位置示意

Fig.1 Tectonic units and location of Qinshui Basin

色碳质泥岩、砂质泥岩、泥岩、粉砂岩、砂岩夹煤层。石盒子组沉积期地壳上升,沁水盆地大部分地区脱离了海洋环境,沉积环境转变为以内陆河流及湖泊为主的组合,局部有泥炭沼泽沉积,因此地层沉积以相对干旱气候条件下的河流、浅水湖泊及其三角洲体系为主;岩性则以粗砂岩、粉砂岩、砂岩为主,同时存在有泥岩夹薄煤层。

沁水盆地石炭—二叠系富有机质页岩储层中发育形态各异的不同类型孔隙及微裂缝。其中,矿物基质孔十分发育,但有机质孔相对不发育,扫描电镜下可见多数有机质孔呈点状,偶见椭圆型;从孔隙结构上看,以中孔隙发育为主。由于高含量的黏土矿物的存在,使得孔隙具有较大的比表面积。从有机地化特征来看,有机质类型以Ⅲ型为主,有机碳含量高;受中生代异常地温的影响,有机质热成熟度高,有利于生烃及吸附存储^[16]。

2 矿物指数计算

2.1 矿物组分特征分析

本文样品来自沁水盆地石炭—二叠系地层的 3 口井中(图 1)。黏土矿物及全岩 X-射线衍射实验仪器为 D8 DISCOVER 型 X 射线衍射仪,分析依据为石油天然气行业标准《沉积岩中黏土矿物和常见非

黏土矿物 X 射线衍射分析方法;SY/T 5163-2010)。

研究区上古生界页岩地层中,塑性矿物即黏土矿物含量高,平均高达 57.5%,其中,太原组为 53%~62%,平均 56.6%;山西组为 50%~63%,平均 58%;下石盒子组为 57%~60%,平均 58.5%。以石英、长石为代表的脆性矿物含量次之,平均含量为 41.3%,其中,太原组为 38%~44%,平均 40.2%;山西组为 36%~48%,平均 40.8%;下石盒子组为 40%~43%,平均 41.5%。此外,还存在一定量的菱铁矿及少量黄铁矿(图 2)。

沁水盆地页岩地层具有典型的海陆交互相煤系地层矿物组成特征,即黏土矿物含量高、陆源碎

屑矿物(石英、长石)含量相对较少。黏土矿物含量较高,其塑性变形能力较强,对裂缝的扩展十分不利。与海相页岩相比^[17-19],虽然该地区以石英和长石为代表的脆性矿物含量不高,但菱铁矿和黄铁矿的存在,有利于提高其脆性^[20]。

2.2 脆性矿物指数计算

根据以上分析,可知该地区脆性矿物主要有石英、长石、黄铁矿、菱铁矿。将 XRD 全岩分析结果代入公式(1),即可得到基于矿物法的脆性指数(BI)。

$$BI = (V_{\text{石英}} + V_{\text{长石}} + V_{\text{黄铁矿}} + V_{\text{菱铁矿}}) / V_{\text{总}} \quad (1)$$

式中:V_总为黏土矿物、石英、长石、黄铁矿及菱铁矿的总体积。

3 脆性矿物指数与影响因素

3.1 储层测井响应特征

沁水盆地上古生界石炭—二叠系富有机质地层由岩石骨架、有机质和孔隙流体 3 部分构成,部分层段夹杂煤层。测井响应是对不同矿物、有机质及孔隙流体的综合反映。由于有机质、煤与其他矿物的岩石物理特性差别较大,通常,有机质表现为较低密度、低声波传递能力和低导电性;煤则表现为低密度、较高的声波传递能力和超低导电性。相应的,其测井曲线的响应特征(图 3)表现为:富有机质页岩地层,密度曲线低异常,声波时差高异常,自然伽马高异常;煤层密度曲线低异常,自然伽马低异常,电阻率曲线高异常;而砂岩密度曲线幅度

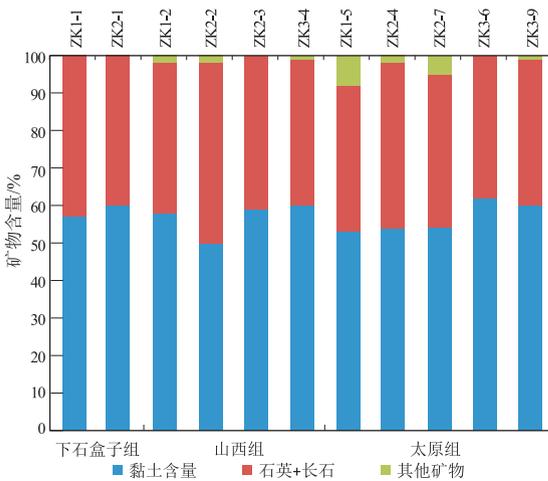


图 2 沁水盆地石炭—二叠系页岩样品矿物组成
Fig.2 Mineral composition of shale samples from Carboniferous and Permian, Qinshui Basin

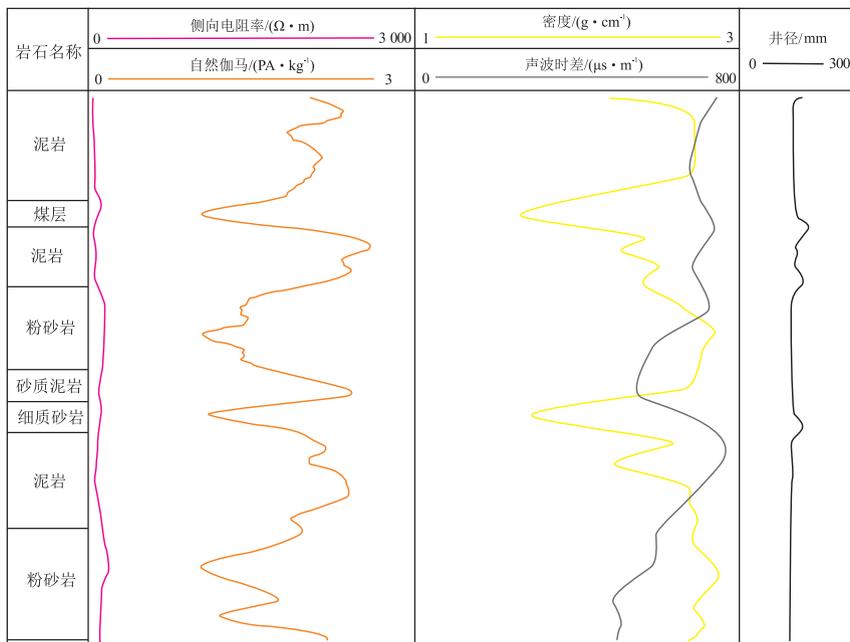


图 3 沁水盆地石炭—二叠系煤系地层典型测井曲线特征

Fig.3 Typical logging curves of coal measure strata in Carboniferous and Permian, Qinshui Basin

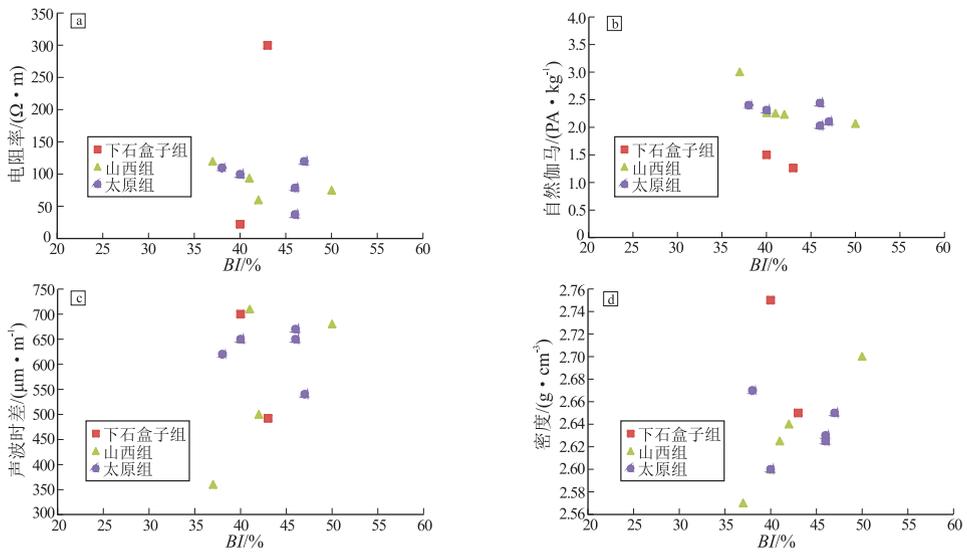


图 4 沁水盆地石炭—二叠系页岩储层脆性指数与测井响应特征

Fig.4 Relationship between brittleness index and logging response of shale samples from Carboniferous and Permian, Qinsui Basin

高于页岩,电阻率曲线高异常。

陆源碎屑矿物、黏土矿物、菱铁矿和黄铁矿的测井响应特征值各不相同,因此,矿物法计算得到的脆性指数在一定程度上对应不同的测井响应值。黏土矿物通常具有高时差、高伽马、低密度;石英和长石通常具有高电阻率、低伽马、高密度、高时差;而黄铁矿和菱铁矿具有低电阻率、高密度的特点。从图 4 可以看到,脆性指数 BI 与测井响应有一定的关系:与密度值呈正相关;与自然伽马值呈负相关;与电阻率和声波时差的关系不明显,呈微弱的负相关。

由以上分析可以看出,由于受沉积环境的影响,不同地层形成了不同的矿物组合,测井响应是对矿物组合的综合反映。对每种测井方法而言,矿物组合对其影响程度不同,脆性指数与矿物组合密切相关。因此,在应用测井资料进行脆性指数预测时,要考虑到不同测井响应权重的不同。根据测井响应对脆性指数的反映程度,本文采用多元线性回归的方法,建立适用于沁水盆地的脆性指数计算模型。各测井曲线权重分别为:电阻率测井为 -0.05 ,自然伽马测井为 -8.60 ,声波时差测井为 -0.01 ,密度测井为 33.60 。从各测井曲线的权重值来看,密度对脆性指数的影响最大,且密度越高,脆性指数越大,这是由于有利于脆性提高的矿物多具有较高的密度值;自然伽马与脆性指数负相关,是由于不利于脆性提高的黏土矿物具有较高的自然伽马值;电阻率和声波时差由于受各矿物组分的影响相互抵消,对脆性指数的影响较小。应用测井响应预测的脆性指数与矿物法计算结果进行对比(图 5),相

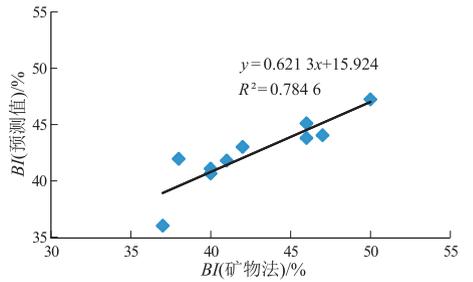


图 5 沁水盆地石炭—二叠系页岩 BI 预测值与矿物法计算值对比

Fig.5 Comparison between predicted BI values and calculated values with mineral method of shale samples from Carboniferous and Permian, Qinsui Basin

关系系数为 0.75,预测效果较好。

4 结论

(1) 沁水盆地石炭—二叠系页岩储层矿物组成以黏土矿物为主,平均含量为 57.5%;石英、长石为主的脆性矿物含量次之,平均含量为 41.3%;此外,含有一定量的菱铁矿和少量的黄铁矿。脆性矿物包括石英、长石、菱铁矿及黄铁矿。

(2) 应用矿物法得到的沁水盆地石炭—二叠系页岩地层的脆性矿物指数平均值为 42.7%,表明该地区页岩具备适合于后期压裂改造的条件。

(3) 不同矿物的测井曲线响应特征不同,因此,在应用测井资料进行脆性指数预测时,不同测井响应的权重不同。脆性指数 BI 与密度曲线呈正相关,与自然伽马呈负相关,与电阻率和声波的关系不明显,呈微弱的负相关。

(4) 沉积环境及其影响下的矿物成分、有机质含量与岩石脆性指数 BI 密切相关,是影响后期压

裂改造的主要因素。

(5) 沁水盆地上古生界石炭—二叠系页岩储层的矿物组成对后期压裂造缝较为有利,具有一定的勘探与开发潜力。

参考文献:

- [1] BOWKER K A. Barnett Shale gas production, Fort Worth Basin: issues and discussion[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 523-533.
- [2] JARVIE D M, HILL R J, RUBLE T E, et al. Unconventional shale-gas systems; the Mississippian Barnett shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 475-499.
- [3] 郭少斌, 赵可英. 鄂尔多斯盆地上古生界泥页岩储层含气性影响因素及储层评价[J]. 石油实验地质, 2014, 36(6): 678-683. GUO Shaobin, ZHAO Keying. Gas-bearing influential factors and estimation of shale reservoirs in Upper Paleozoic, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(6): 678-683.
- [4] GUO Shaobin, WANG Yigang. Reservoir-forming condition analysis and favorable zone prediction for the shale gas in the Upper Paleozoic Taiyuan Formation in the Ordos Basin[J]. Energy Exploration & Exploitation, 2013, 31(3): 381-394.
- [5] 李钊源. 东营凹陷泥页岩矿物组成及脆度分析[J]. 沉积学报, 2013, 31(4): 616-620. LI Juyuan. Analysis on mineral components and frangibility of shales in Dongying Depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(4): 616-620.
- [6] JIN Xiaochun, SHAH S N, ROEGIERS J C, et al. Fracability evaluation in shale reservoirs: an integrated petrophysics and geomechanics approach[C]//Proceedings of the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference. The Woodlands, Texas, USA; SPE, 2014: 518-526.
- [7] RICKMAN R, MULLEN M J, PETRE J E, et al. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: all shale plays are not clones of the Barnett shale[C]//Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Denver, Colorado, USA; SPE, 2008.
- [8] GOODWAY B, PEREZ M, VARSEK J, et al. Seismic petrophysics and isotropic - anisotropic AVO methods for unconventional gas exploration[J]. The Leading Edge, 2010, 29(12): 1500-1508.
- [9] 陈祖庆, 郭旭升, 李文成, 等. 基于多元回归的页岩脆性指数预测方法研究[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(3): 461-469. CHEN Zuqing, GUO Xusheng, LI Wencheng, et al. Study on shale brittleness index prediction based on multivariate regression method[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(3): 461-469.
- [10] 余坤, 郑世帅, 张优. 基于矿物组分与弹性参数的泥页岩脆性评价模型[J]. 煤炭技术, 2017, 36(7): 73-76. YU Kun, ZHENG Shishuai, ZHANG You. Mud shale brittleness evaluation model based on mineral composition and elastic parameters[J]. Coal Technology, 2017, 36(7): 73-76.
- [11] 刁海燕. 泥页岩储层岩石力学特性及脆性评价[J]. 岩石学报, 2013, 29(9): 3300-3306. DIAO Haiyan. Rock mechanical properties and brittleness evaluation of shale reservoir[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(9): 3300-3306.
- [12] 徐赣川, 钟光海, 谢冰, 等. 基于岩石物理实验的页岩脆性测井评价方法[J]. 天然气工业, 2014, 34(12): 38-45. XU Ganchuan, ZHONG Guanghai, XIE Bing, et al. Petrophysical experiment-based logging evaluation method of shale brittleness[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(12): 38-45.
- [13] 秦晓艳, 王震亮, 于红岩, 等. 基于岩石物理与矿物组成的页岩脆性评价新方法[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(10): 1924-1932. QIN Xiaoyan, WANG Zhenliang, YU Hongyan, et al. A new shale brittleness evaluation method based on rock physics and mineral compositions [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(10): 1924-1932.
- [14] 闫宝珍, 王延斌, 丰庆泰, 等. 基于地质主控因素的沁水盆地煤层气富集划分[J]. 煤炭学报, 2008, 33(10): 1102-1106. YAN Baozhen, WANG Yanbin, FENG Qingtai, et al. Coalbed methane enrichment classifications of Qinshui Basin based on geological key controlling factors [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(10): 1102-1106.
- [15] 孟元库, 汪新文, 李波, 等. 华北克拉通中部沁水盆地热演化史与山西高原上中生代岩石圈构造演化[J]. 西北地质, 2015, 48(2): 159-168. MENG Yuanku, WANG Xinwen, LI Bo, et al. Thermal evolution history of Qinshui Basin in the middle of North China Craton and Mesozoic-Cenozoic lithosphere tectonic evolution in Shanxi Plateau[J]. Northwestern Geology, 2015, 48(2): 159-168.
- [16] 付娟娟, 郭少斌, 高全芳, 等. 沁水盆地煤系地层页岩气储层特征及评价[J]. 地学前缘, 2016, 23(2): 167-175. FU Juanjuan, GUO Shaobin, GAO Quanfang, et al. Reservoir characteristics and enrichment conditions of shale gas in the Carboniferous - Permian coal-bearing formations of Qinshui Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(2): 167-175.
- [17] 邹才能, 陶士振, 侯连华, 等. 非常规油气地质学[M]. 北京: 地质出版社, 2014. ZOU Caineng, TAO Shizhen, HOU Lianhua, et al. Unconventional petroleum geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.
- [18] 陈尚斌, 朱炎铭, 王红岩, 等. 四川盆地南缘下志留统龙马溪组页岩气储层矿物成分特征及意义[J]. 石油学报, 2011, 32(5): 775-782. CHEN Shangbin, ZHU Yanming, WANG Hongyan, et al. Characteristics and significance of mineral compositions of Lower Silurian Longmaxi Formation shale gas reservoir in the southern margin of Sichuan Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 32(5): 775-782.
- [19] 陈燕萍, 黄文辉, 陆小霞, 等. 沁水盆地海陆交互相页岩气成藏条件分析[J]. 资源与产业, 2013, 15(3): 68-72. CHEN Yanping, HUANG Wenhui, LU Xiaoxia, et al. Shale gas reservoir-forming conditions in Qinshui Basin's marine-continental facies[J]. Resources & Industries, 2013, 15(3): 68-72.
- [20] 徐宏杰, 胡宝林, 郑建斌, 等. 淮南煤田煤系页岩气储集空间特征及其岩相控制作用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2017, 47(2): 418-430. XU Hongjie, HU Baolin, ZHENG Jianbin, et al. Reservoir characteristics and their lithofacies controlling effect of coal-bearing mudstone in Huainan Coal Field[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2017, 47(2): 418-430.

(编辑 徐文明)