



您可能感兴趣的文章、专题：

“煤矿智能化综述及关键技术”专题

“我国煤矿瓦斯防治理论技术研究进展”专题

“煤地质与煤结构”专题

“煤矿安全+智能化”专题

“深部煤层瓦斯精准抽采”专题

“中国煤科首席科学家”专题

“矿井冲击地压灾害防治技术及工程实践”专题

2020 年度《煤炭科学技术》“领跑者 5000”论文

2021《煤炭科学技术》封面文章

煤炭行业青年科学家论坛(2021 年)



移动扫码阅读

韩文龙,王延斌,倪小明,等.多期构造运动对深部煤储层物性特征影响研究[J].煤炭科学技术,2021,49(10):208-216. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.10.028

HAN Wenlong, WANG Yanbin, NI Xiaoming, *et al.* Study on impact of multi-period tectonic movement on deep coal reservoir physical properties [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(10): 208-216. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.10.028

## 多期构造运动对深部煤储层物性特征影响研究

韩文龙<sup>1,2</sup>,王延斌<sup>2</sup>,倪小明<sup>3</sup>,吴翔<sup>4</sup>,高向东<sup>2</sup>,张雨健<sup>2</sup>

(1.深圳大学 土木与交通工程学院,广东 深圳 518060;2.中国矿业大学(北京) 地球科学与测绘工程学院,北京 100083;3.河南理工大学 能源科学与工程学院,河南 焦作 454000;4.中联煤层气有限责任公司,北京 100011)

**摘要:**煤的孔隙度、渗透率、裂缝和煤体结构等物性参数发育特征受控于构造及其演化特征。以沁水盆地南部柿庄地区为研究对象,基于野外节理和测井天然裂缝产状统计,利用节理(裂缝)的分期和配套、波叠加原理,对燕山期和喜山期构造应力场、构造形迹进行反演;通过地史最大构造曲率 $r$ 表征了煤层在地质历史时期的变形程度,进而探讨了多期构造作用对煤储层物性的影响特征。研究表明:柿庄地区节理(裂缝)走向发育具有五个优势方向,分别为 NNE 向( $10^{\circ}\sim 25^{\circ}$ )、NEE 向( $45^{\circ}\sim 85^{\circ}$ )、NNW 向( $85^{\circ}\sim 110^{\circ}$ )、NW 向( $135^{\circ}\sim 145^{\circ}$ )、NNW 向( $160^{\circ}\sim 175^{\circ}$ );倾角较大,主要分布在  $50^{\circ}\sim 90^{\circ}$ ,且大于  $70^{\circ}$  的高达 76%。自晚古生代以来的燕山期 NNW—SEE 向挤压和喜山早期 NNW—SEE 向拉伸运动造成煤层底板形态复杂,煤层物性差异较大。地史最大变形程度控制着煤体真实的损伤程度,随着地史最大变形程度的增加,裂隙发育增多,煤体破碎程度增加,当  $r<48\times 10^{-6}\text{ m}^{-1}$  时,发育原生结构煤;当  $48\times 10^{-6}\text{ m}^{-1}<r<150\times 10^{-6}\text{ m}^{-1}$  时,发育碎裂结构煤;当  $r>150\times 10^{-6}\text{ m}^{-1}$  时,发育碎粒结构煤;糜棱结构煤基本不发育。在一定范围内,随地史最大变形程度的增加,煤储层渗透率呈现出先增大后减小的趋势,其界线值在  $r\approx 110\times 10^{-6}\text{ m}^{-1}$  处;煤层的孔隙度多受埋深和应力特征控制,地史最大变形程度对其影响不明显。为多期构造活动对煤储层物理性质影响的研究提供了一种新方法,可望应用于柿庄区块及其他煤层气区块的储层物性评价及预测。

**关键词:**沁水盆地;柿庄区块;构造运动;构造行迹恢复;煤储层物性

中图分类号:TD618.11

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2021)10-0208-09

### Study on impact of multi-period tectonic movement on deep coal reservoir physical properties

HAN Wenlong<sup>1,2</sup>, WANG Yanbin<sup>2</sup>, NI Xiaoming<sup>3</sup>, WU Xiang<sup>4</sup>, Gao Xiangdong<sup>2</sup>, ZHANG Yujian<sup>2</sup>

(1.College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060; 2.College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 3.School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 4.China United Coalbed Methane Corporation Limited, Beijing 100011, China)

**Abstract:** The physical properties of coal reservoirs, i.e., porosity, permeability, fractures, and coal structures, restrict the exploration and development of coalbed methane. The developmental characteristics of physical properties are controlled by the tectonic evolution process. Based on the occurrence statistics of field joints and natural fractures from loggings, using staging and matching of joints (cracks) and wave superposition principle, the tectonic stress field and structural features of Yanshanian period and Himalayan period are inverted in the Shizhuang area of southern Qinshui Basin. The deformation degree of the coal seam in geological history period was characterized through the largest tectonic curvature ( $r$ ), and the influence on coal reservoir physical properties of multi period tectonic activities was discussed. Research has shown that the joint (fracture) trend has five advantageous directions, which are NNE ( $10\sim 25$  degrees), NEE ( $45\sim 85$  degrees), NNW ( $85\sim 110^{\circ}$ ), and NW ( $135\sim 145^{\circ}$ ), NNW direction ( $160\sim 175^{\circ}$ ). The inclination angle is large, mainly distributed

收稿日期:2021-02-24;责任编辑:曾康生

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2017ZX05064003-001, 2016ZX05066001-002)

作者简介:韩文龙(1991—),男,河北唐山人,博士。E-mail:hanwl0417@126.com

between  $50^{\circ} \sim 90^{\circ}$ , and it is 76% greater than  $70^{\circ}$ . Since the late Paleozoic, the NWW-SEE trend in the Yanshanian and NWW-SEE-direction tensile stress in the early Xishantectonic movement has caused the complex shape of the coal seam floor. The physical properties of the coal seam were quite different. The maximum deformation degree of the earth's history controls the actual damage degree of the coal body. With the increase of history's largest deformation degree, fractures and the broken degree of coal increased. When  $r < 48 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ , primary structural coals were developed; when  $48 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1} < r < 150 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ , cataclastic coals were developed; when  $r > 150 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ , granulated coals were developed; mylonite coals were barely developed. With the increase of the historical maximum deformation degree in a certain range, coal reservoir permeability shows a trend of increasing first and then decreasing. Its boundary value is  $110 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ . The porosity of coal seams is mostly controlled by burial depth and stress characteristics, so the influence of deformation degree of the coal on the porosity was not obvious. This presents an applicable method for evaluating the influence of tectonic movement on the physical properties of coal during different times and would benefit the evaluation of coalbed methane reservoirs in Shizhuang area as well as other coal basins in the world.

**Key words:** Qinshui Basin; Shizhuang Block; tectonic movement; tectonic trace recovery; coal reservoir physical properties

## 0 引言

我国高阶煤储层具有低孔低渗的特征,同一区块内储层物性表现出较强的非均质性<sup>[1-2]</sup>。渗透率是评价煤储层的重要参数,受许多因素的影响,包括孔裂隙发育程度、煤体结构特征、煤的变质程度和原位应力分布等<sup>[3-5]</sup>。裂缝是甲烷解吸和扩散后迁移的主要通道,根据其形成机制分为内生裂隙和外生裂隙<sup>[6]</sup>。构造运动不仅产生了新的裂缝,而且还对内生裂缝进行改造,构造运动的频率和强度控制着内生裂缝的破坏程度和外生裂缝的发育<sup>[7]</sup>。裂缝的发育程度可用煤体结构变化来反映<sup>[8-9]</sup>。不同期次的构造运动对煤储层孔隙度和渗透率的改造程度不相同,现今渗透率是历次古构造运动叠加的结果。前人多从现今构造性质、构造部位、构造曲率等方面评价煤储层裂隙的发育程度<sup>[10-12]</sup>,而利用现今构造特征并不能完全反映煤层的变形程度,尤其在多期构造叠加区域,如两期构造是背斜和向斜叠加,那么现今构造形迹就会相对平缓,若用现今相对平缓的构造特征去评价煤层变形程度就会掩盖煤层所经历的复杂变形。沁水盆地成煤期后经历了多期构造运动,从多期构造活动叠加角度解读煤储层物性差异分布机制的研究鲜有报道。基于此,笔者以沁水盆地南部柿庄区块为研究对象,在构造期次剥离的基础上,采用构造曲率定量刻画主构造期煤层变形程度,分析地史最大构造曲率对煤体损伤程度的影响,进而探讨多期构造运动对煤储层物性的控制机理,为相对高渗区预测提供新的依据。

## 1 地质概况

柿庄区块位于沁水盆地中南部,是我国较早实现煤层气商业开发的区块,含煤地层为上石炭统太

原组和下二叠统山西组,分别为障壁海岸和河流三角洲沉积<sup>[13]</sup>。全区稳定发育两个煤层,其中3号煤层为主采煤层,厚度4.16~8.8 m,平均6.30 m,埋深515~1 682 m;15号煤厚度1.1~6.3 m,平均3 m左右,埋深612~1 754 m。区内发育断层和次级褶皱构造(图1),北部以断层为主,多数为正断层,呈NS

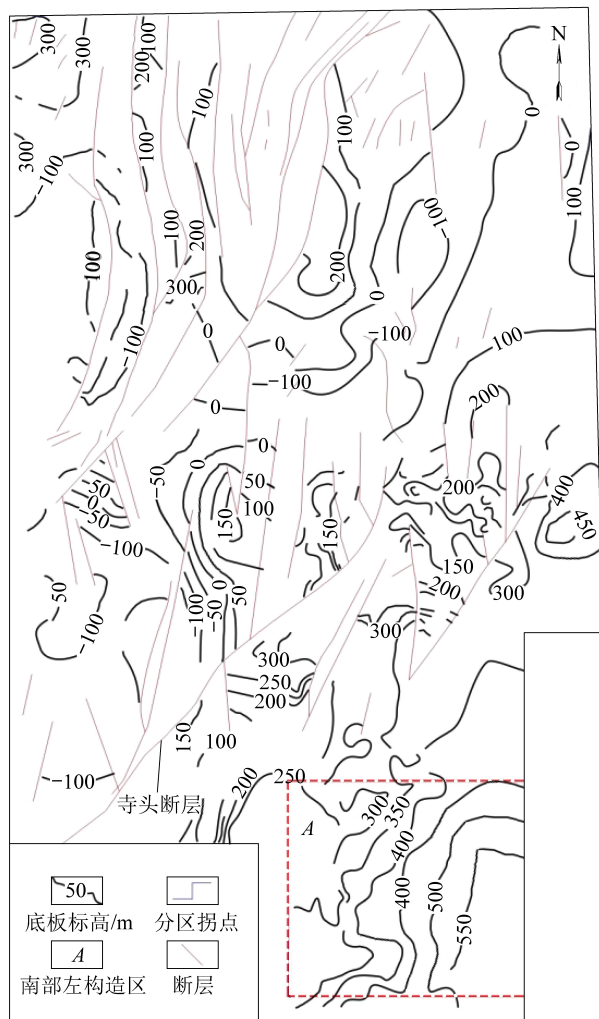


图1 柿庄区块3号煤层底板等高线

Fig.1 Floor contours of No.3 coal seam of Shizhuang Block

或 NNE 向展布,其中寺头断层为区域性大断层,位于柿庄区块中南部;南部整体为一向西倾斜的单斜构造,倾角较小,在此背景上发育次级褶皱<sup>[14]</sup>。

## 2 构造应力场及古构造形迹恢复

柿庄区块晚古生代成煤期以来经历了印支期、燕山期和喜山期三期构造运动,印支期和喜山晚期构造作用比较微弱,燕山期和喜山早期构造影响相对强烈<sup>[15]</sup>。煤储层物性与燕山期—喜山早期构造活动密切相关,需要恢复这两期构造应力场和构造形迹。

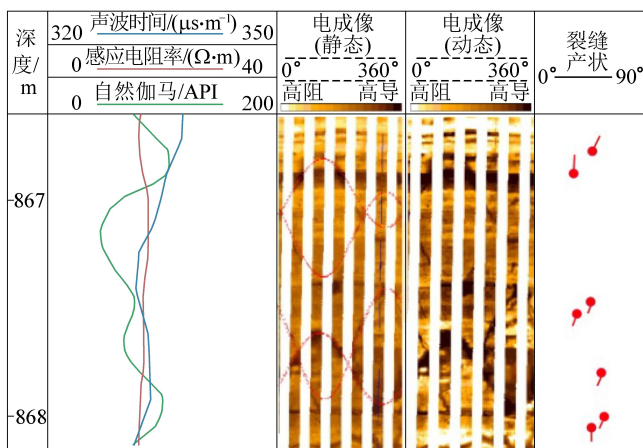
### 2.1 节理(裂缝)观测

为全面反映节理发育情况,对柿庄区块内出露的上石盒子组和石千峰组地层的节理进行了观测和

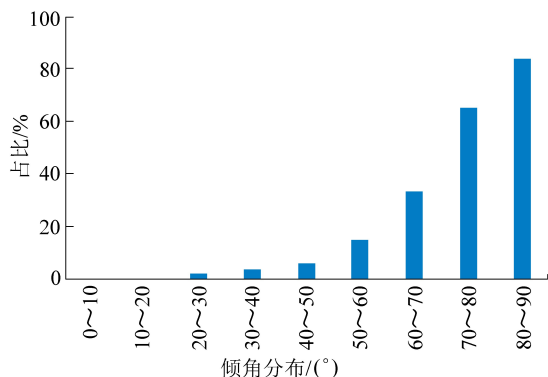
统计(图 2a)。由于野外节理观测严格受限于地层的出露情况和地形地貌特征,因此节理观测点的区域分布具有不均一性和聚集性。为弥补野外节理观测不足,对柿庄区块具有电成像测井的钻井,进行测井天然裂缝产状统计(图 2b)。综合野外节理和测井天然裂缝的产状统计,绘制了柿庄区块节理(天然裂缝)走向玫瑰花图(图 2d)。统计结果表明,柿庄区块野外露头节理走向发育具有五个优势方向,其产状分别为 NNE 向( $10^{\circ} \sim 25^{\circ}$ )、NEE 向( $45^{\circ} \sim 85^{\circ}$ )、NNW 向( $85^{\circ} \sim 110^{\circ}$ )、NW 向( $135^{\circ} \sim 145^{\circ}$ )、NNW 向( $160^{\circ} \sim 175^{\circ}$ )。节理(裂缝)的倾角较大(图 2c),主要分布在  $50^{\circ} \sim 90^{\circ}$ ,其中倾角大于  $50^{\circ}$  的占 93%,倾角大于  $70^{\circ}$  的占 76%,表明,柿庄区块主要以高角度、近似垂直的裂隙为主。



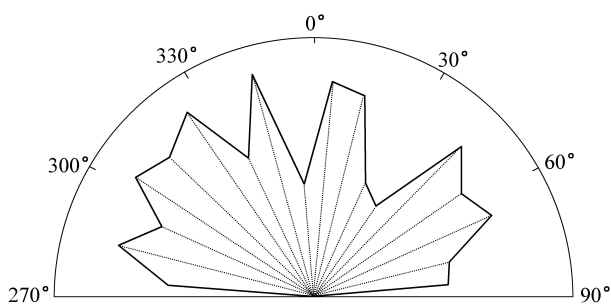
(a) 野外节理观测



(b) 电成像测井裂缝产状统计示意



(c) 节理(裂缝)倾角分布



(d) 节理(裂缝)走向玫瑰花图

图 2 柿庄地区节理(裂缝)产状统计

Fig.2 Occurrence statistics of joints( crack) of Shizhuang Block

### 2.2 古构造应力场恢复

通过对野外节理(裂缝)数据的分析(图 2 和图 3),并结合前人对沁水盆地南部的构造演化的研究成果,发现柿庄区块 3 号煤层形成后经受了四期构造应力场的改造(图 4 与图 5),分别为印支期近 NS 向的挤压应力、燕山期 NWW—SEE 向的挤压应力、

喜山早期 NEE—SWW 向挤压应力以及喜山晚期 NE—SW 向挤压应力<sup>[16-20]</sup>。其中印支期近南北向的水平挤压应力场对沁水盆地的影响并不大,沁水盆地仍保持了稳定状态,并未在盆地内部形成明显的地质构造,仅使盆地南部产生了一定程度的隆起抬升<sup>[16-17]</sup>;燕山期是沁水盆地中生代以来最强烈





图 3 不同构造时期典型共轭剪节理

Fig.3 Typical conjugate shear joint structures of different tectonic periods

的一次构造变形,在该期构造应力场的作用下,柿庄区块以挤压抬升和褶皱作用为主,形成了一系列轴向 NE—NNE 的宽缓的背、向斜构造和走向 NW 与近 EW 的节理<sup>[17,19]</sup>;喜山早期受到 NWW—SEE 向的拉伸应力,燕山期形成的褶皱进一步的改造,底板形态更加复杂,并形成一些走向 NNE 或 NE 的正断层<sup>[17-19]</sup>;在喜山晚期构造应力场作用下,导致盆地地壳进一步被抬升,接受剥蚀,并在第四纪老黄土中发育有节理构造<sup>[17-18]</sup>。

2.3 古构造形迹恢复

在古构造应力场反演的基础上,结合柿庄区块现今构造形迹特征,利用构造行迹拉平和波叠加原理<sup>[19-20]</sup>,选取南部地区进行古构造形迹的恢复(图 1 中的 A 部位)。由于印支期和喜山晚期-现今构造活动对构造形迹影响很小,并考虑到方法本身的适用性,现做出如下假设和处理:由于印支期和喜山晚期构造运动对柿庄区块影响微弱,因此忽略这两期的影响;不考虑局部岩浆侵入和区域性垂向运动对煤层底板标高的影响;断层引起的底板标高变化依据断层的落差进行恢复;水平挤压作用形成的褶皱简化为相应方向的波列,构造运动的叠加近似为波的叠加;现今构造活动的影响忽略不计,煤层底板等值线图近似为喜山期后的构造形迹(图 6)。

柿庄区块造褶运动主要受燕山期和喜山早期两期构造运动的作用,且两期构造运动的最大主应力方向近似垂直,基于上述假设和处理,燕山期和喜山早期的构造作用可以简化为两个近似垂直的波的叠加。背斜的枢纽类似于波峰,向斜的枢纽类似于波谷(图 7),煤层底板构造形迹的变化遵从波叠加规律,具体操作如下:

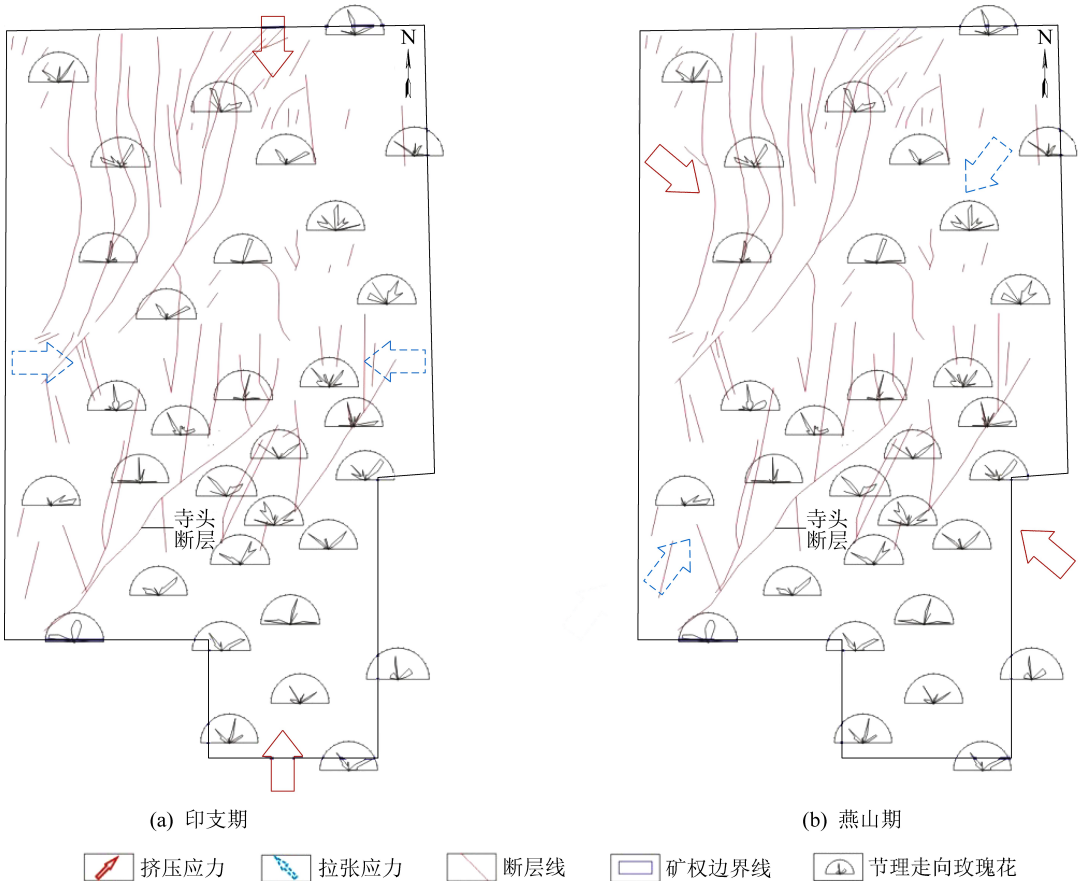


图 4 印支期和燕山期古构造应力场

Fig.4 Tectonic stress fields of Indochina and Yanshanian periods

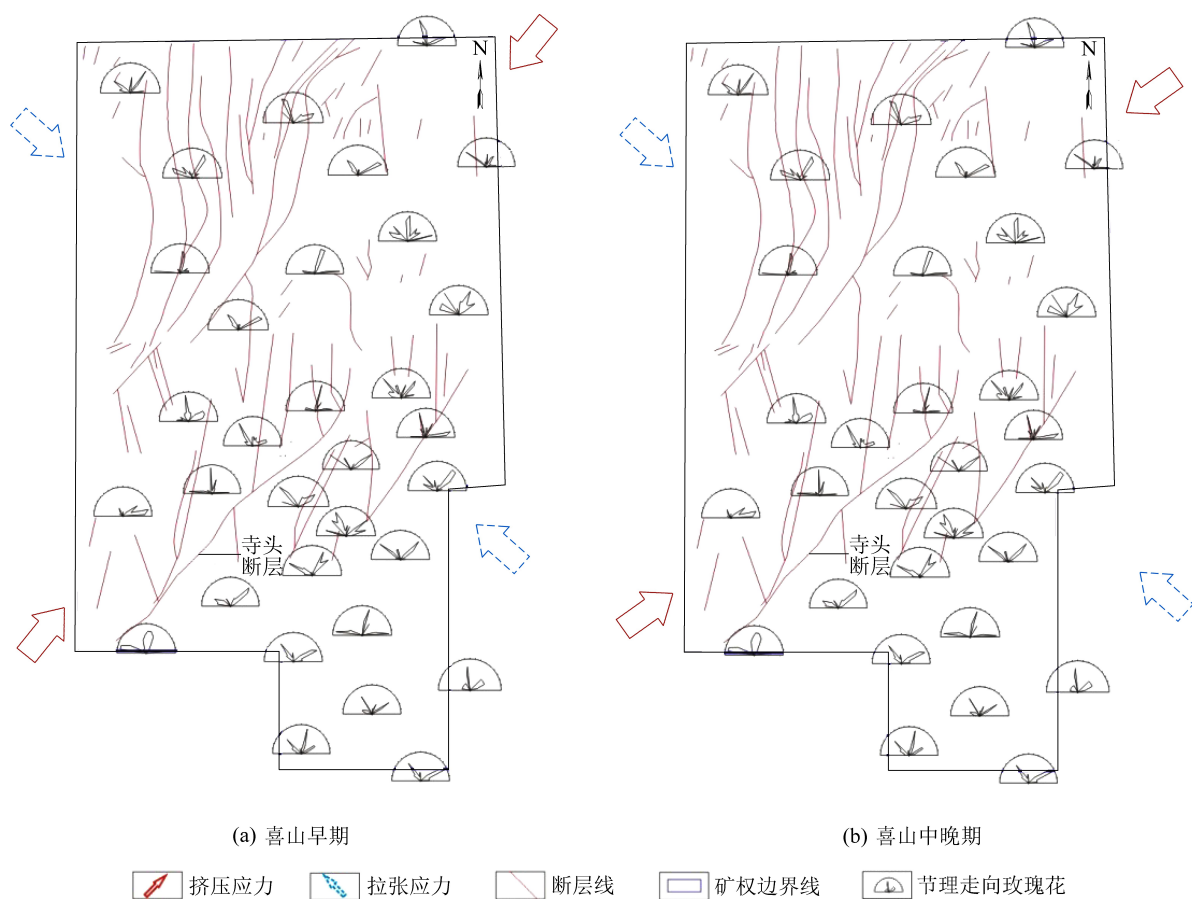


图5 喜山期古构造应力场

Fig. 5 Tectonic stress fields of Himalayan periods

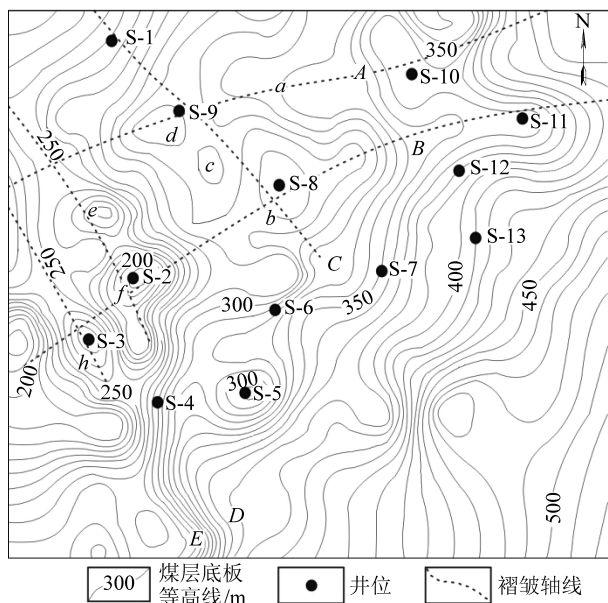
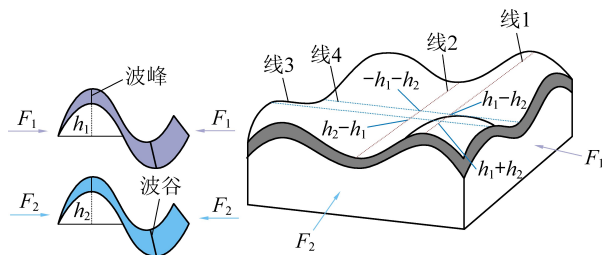


图6 喜山末期构造形迹

Fig. 6 Paleotectonic traces of late Himalayan

首先根据不同构造运动时期的构造应力场确定各时期褶皱的枢纽线,如图6中的线1、线2、线3和线4。若两期构造运动引起的煤层底板标高变化分别为 $h_1$ 和 $h_2$ ,则背斜枢纽线与背斜枢纽线叠加点处

的标高变化为 $h_1+h_2$ ,则向斜枢纽线和向斜枢纽线叠加点的标高变化为 $-h_1-h_2$ ,同理背斜枢纽线与向斜枢纽线叠加点的标高波动为 $h_1-h_2$ 或 $h_2-h_1$ ,结合关键点处现今煤层底板标高,即可计算出 $h_1$ 和 $h_2$ <sup>[21]</sup>。

图7 基于波叠加原理的古构造形迹恢复<sup>[21]</sup>Fig. 7 Recovery of tectonic traces based on wave superposition principle<sup>[21]</sup>

形迹分析举例(图6):简化后的两期构造运动为两列方向不同的波。由于点c、d、h处于背斜核部,点e、f处于向斜核部,结合喜山早期构造应力场方向,推断曲线C、E在喜山早期分别处于波峰位置,D处于波峰波谷位置;由于点a、d处于背斜核部,b、f、h处于向斜核部,结合燕山期构造应力场方向,推断曲线A在燕山期分别处于波峰位置,B处于

波峰波谷位置。两列波叠加,则点  $f$  为波谷和波谷叠加的部位,点  $d$  为波峰和波峰叠加的部位,点  $c$ 、 $h$ 、 $e$ 、 $h$  为波峰和波谷叠加的部位。

然后利用当前煤层底板标高及其波动值,求出关键点不同构造时期的煤层底板标高,通过插值法确定关键点之间的煤层底板标高,如此可以反演出关键时期的煤层底板标高,进而得到燕山期末构造形迹特征如图 8 所示。

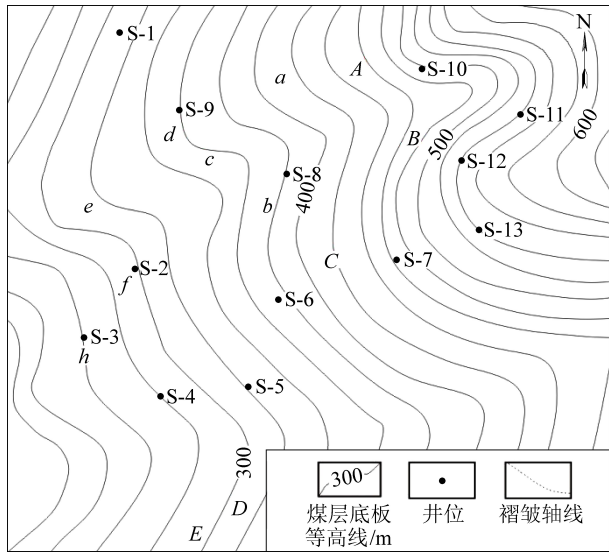


图 8 燕山期末构造形迹

Fig.8 Paleotectonic traces of late Yanshanian

3 多期构造作用对煤储层物性的影响

3.1 不同时期构造作用后的煤岩变形程度表征

从燕山期和喜山早期后构造形迹可知,目标煤层在两期构造作用过程中存在核部叠加(背斜+背斜、向斜+向斜、背斜+向斜)、翼部叠加、核翼叠加(背斜+翼部、向斜+翼部)6 种组合情况。为了更好分析煤层变形过程,笔者根据曲率公式计算<sup>[28]</sup>每期构造活动以后的构造曲率,来反映煤层在每期构造作用以后的变形程度。在计算构造曲率之前先将柿庄区块进行网格化,由于燕山期和喜山早期的最大主应力方向近 NWW—SEE 向、NEE—SWW 向,为了方便操作,将柿庄区块按照 NWW—SEE 向、NEE—SWW 向进行网格化,网格边长为 500 m。

利用上述方法选取能够覆盖 6 种组合的典型井(图 6)进行燕山期后和喜山早期后的构造曲率进行计算,计算结果见表 1。由结果可知,两期构造活动叠加,煤层的变形程度不一定增加,存在燕山期后构造曲率大于喜山早期后构造曲率的现象。

3.2 多期构造作用对煤体结构的影响

煤体结构是煤岩在外力作用下的变形产物,是煤

层自身力学性质对外力作用的响应结果。在小范围内不考虑力学性质差异的情况下,煤体的破坏程度主要取决于外力作用下的变形程度<sup>[22]</sup>。由于现今构变形程度可能并不是地史最大构造曲率值(表 1),所以,煤体的损伤程度应取决于地史最大构造曲率,即现今构造曲率并不能完全反映煤体的真实损伤程度。

表 1 不同构造期后煤层构造曲率

Table 1 Structure curvature of coal seam after different tectonic period

井号	构造曲率/ $10^{-6} \text{ m}^{-1}$			叠加方式
	$r_1$	$r_2$	$r$	
S-1	166.2	87.9	166.2	翼部+翼部
S-2	362.0	88.0	362.0	向斜核部+向斜核部
S-3	138.1	135.6	138.1	翼部+背斜核部
S-4	59.6	24.0	59.6	翼部+向斜核部
S-5	190.7	24.0	190.7	向斜核部+向斜核部
S-6	11.5	24.0	24.0	翼部+翼部
S-7	52.9	43.9	52.9	翼部+翼部
S-8	20.9	39.9	39.9	向斜核部+背斜核部
S-9	186.9	48.0	186.9	背斜核部+背斜核部
S-10	49.8	95.9	95.9	翼部+背斜核部
S-11	15.3	47.8	47.8	向斜核部+翼部
S-12	51.3	111.7	111.7	背斜核部+翼部
S-13	21.2	56.0	56.0	背斜核部+翼部

注: $r_1$ 、 $r_2$ 分别为燕山期和喜山期后煤层构造曲率; $r$ 为两期中相对较大的构造曲率。

由于区内取芯井较少,为了系统揭示构造作用对煤体结构的影响,笔者利用测井曲线来定性表征煤体结构。利用测井曲线反映煤体结构已经得到广泛的应用<sup>[22]</sup>,其响应机理是随着煤体破碎程度的增加,声波传播速度逐渐减小,扩径现象不断地严重,单位体积内放射性元素含量也会相应的降低(图 9)。因此,采用声波时差、井径  $X$  和自然伽马来表征煤体破碎程度,通过对柿庄区块煤岩取心的统计分析,总结出煤体结构与测井曲线的对应关系见表 2。

表 2 煤体结构与测井对应关系

Table 2 Corresponding relation of coal structures and logs

煤体结构	声波时差/ $(\mu\text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	井径 $X/\text{cm}$	自然伽马/API
原生结构/Ⅰ	400~418	<27	42~96
碎裂结构/Ⅱ	415~428	26~35	25~62
碎粒结构/Ⅲ	425~430	30~35	15~47
糜棱结构/Ⅳ	>420	>33	<32

通过测井曲线与地史最大构造曲率的相关性分析可知(图 10),随着煤体变形程度的增加,煤体结构的破碎程度也增大。由对应关系可知,当  $r < 48 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$  时,为原生结构煤(Ⅰ类煤);当  $48 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1} < r < 150 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$  时,为碎裂结构煤(Ⅱ类煤);当  $r > 150 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$  时,为碎粒结构煤(Ⅲ类煤)。柿庄区块糜棱结构煤基本不发育,但是对于煤体结构比较



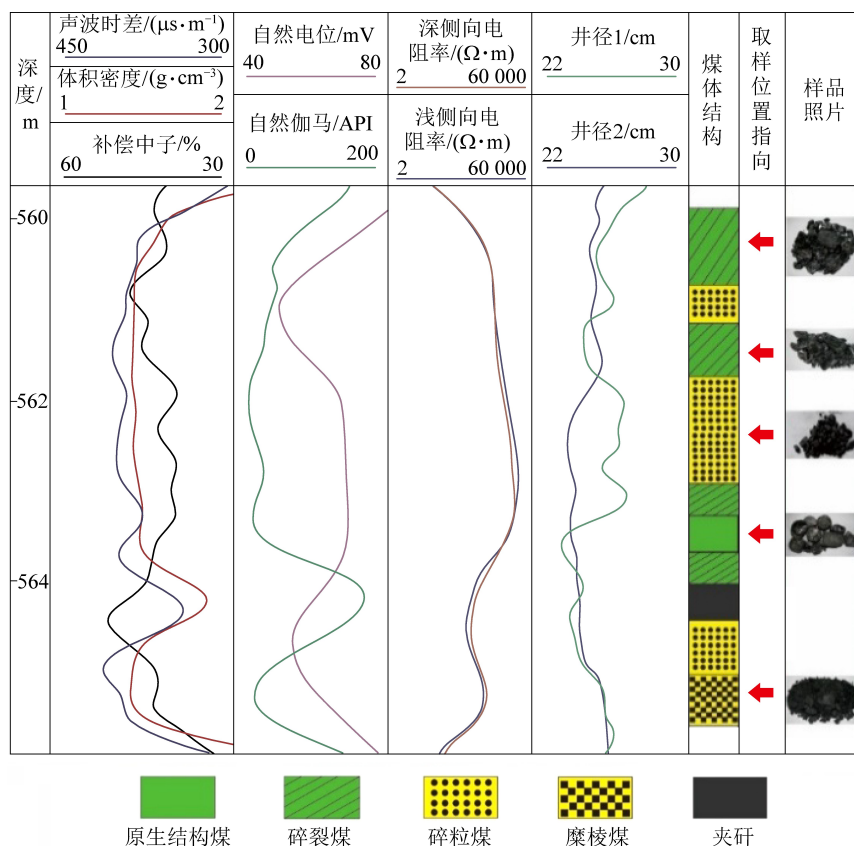


图 9 煤体结构单井观测

Fig.9 Coal structure of single well

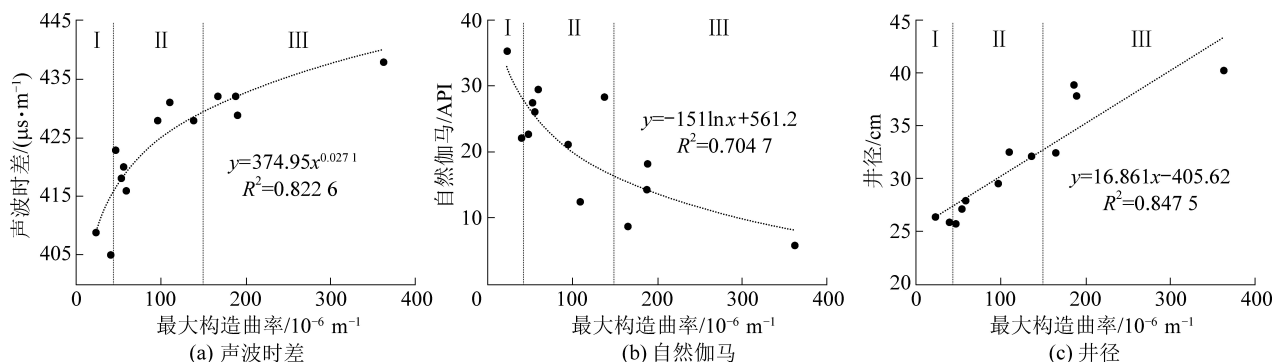


图 10 煤层变形程度与煤储层孔渗的关系

Fig. 10 Relationship between deformation degree of coal seam and coal body structure

破碎的井,在破碎层段夹有少量的糜棱煤。利用地史最大构造曲率对煤体结构的预测,对于没有钻井的区域具有重要的现实意义。

### 3.3 多期构造作用对煤储层孔渗的影响

随着煤岩变形程度的增加,裂隙的发育程度增加,且裂隙的发育趋于复杂,在两期构造作用比较强烈的部位尤为显著。基于试井渗透率和测井信息所建立的渗透率公式计算出上述 13 口典型井渗透率值如图 11 所示。当  $0 < r < 110 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$  时,随煤层变形程度的增加,煤储层渗透率呈线性增长,当  $r > 110 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$  时,随煤层变形程度的增加,煤储层渗透率

呈线性降低(图 11a)。结合煤体结构与最大构造曲率的关系可知,随着变形程度的增加,煤体结构由原生结构向碎裂煤演化,煤储层裂隙发育程度增加,煤层导流能力增大,随着破裂程度进一步增加,煤层导流能力逐渐降低,这种现象在前人研究煤体结构与渗透率的变化关系的结果一致<sup>[23]</sup>。13 口典型井构造曲率与孔隙度关系如图 11b 所示,随着煤体变形程度的增加,孔隙度有增大的趋势,但是关系比较离散,即变形程度对孔隙度影响不明显,其原因为煤层的孔隙度多受埋深和应力特征控制。



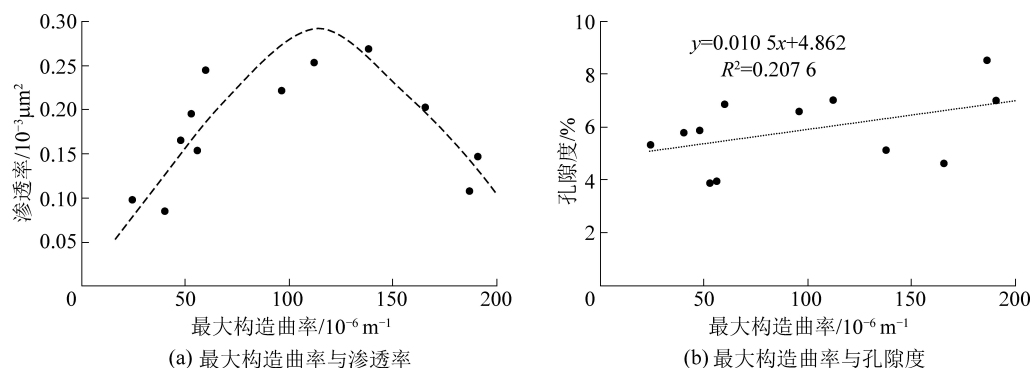


图 11 煤层变形程度与煤储层孔隙度与渗透率的关系

Fig.11 Relationships between deformation degree and porosity and permeability of coal seam

## 4 结 论

1) 柿庄地区 3 号煤层形成后经受了四期构造应力场的改造,分别为印支期近 NS 向的挤压应力、燕山期 NWW—SEE 向的挤压应力、喜山早期 NEE—SWW 向挤压应力以及喜山晚期 NE—SW 向挤压应力,但受印支期和喜山晚期的构造作用比较微弱,主要受燕山期和喜山早期构造活动的影响较强。

2) 两期构造活动叠加,煤层的变形程度不一定增加,存在燕山期后构造曲率大于喜山早期后的现象。

3) 地史最大变形程度控制着煤体真实的损伤程度,随着地史最大变形程度的增加,裂隙发育增多,煤体破碎程度增加,当  $r < 48 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$  时,发育原生结构煤;当  $48 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1} < r < 150 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$  时,发育碎裂结构煤;当  $r > 150 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$  时,发育碎粒结构煤。

4) 随着地史最大变形程度的增加,渗透率呈先增大后减小的趋势,其极值点在  $r = 110 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$  附近,煤层变形程度对孔隙度的影响不显著。

## 参考文献 (References):

[1] 傅雪海,秦 勇,李贵中,等.沁水盆地中-南部煤储层渗透率主控因素分析[J].煤田地质与勘探,2001,29(3):16-19.  
FU Xuehai, QIN Yong, LI Guizhong, et al. An analysis on the principal control factor of coal reservoir permeability in Center and Southern Qinshui Basin [J]. Coal Geology and Exploration, 2001, 29(3): 16-19.

[2] 叶建平,吴建光,房 超,等.沁南潘河煤层气田区域地质特征与煤储层特征及其对产能的影响[J].天然气工业,2011,31(5):16-20.  
YE Jianping, WU Jianguang, FANG Chao, et al. Regional geological and reservoir characteristics of the Panhe CBM Gas Field in the southern Qinshui Basin and their influence on CBM gas production capacity[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(5): 16-20.

[3] GUO Junjie, QIN Qirong, ZHANG Ruilin. Evaluation of the damages of permeability and effective porosity of tectonically deformed coals [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2017, 10(16): 357.

[4] ZHU Hongjian, JU Yiwen, LU Weidong, et al. The characteristics and evolution of micro-nano scale pores in shales and coals [J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2017, 17(9): 6124-6138.

[5] 孟召平,田永东,李国富.沁水盆地南部煤储层渗透性与地应力之间关系和控制机理[J].自然科学进展,2009,19(10): 1142-1148.  
MENG Zhaoping, TIAN Yongdong, LI Guofu. The relationship between the permeability and the in-situ stress of the coal reservoir in the southern Qinshui basin and its control mechanism [J]. Progress in Natural Science, 2009, 19(10): 1142-1148.

[6] YAO Yanbin, LIU Dameng. Microscopic characteristics of microfractures in coals: an investigation into permeability of coal [J]. Procedia Earth Planetary Science, 2009, 1(1): 903-910.

[7] 倪小明,赵永超,曹运兴,等.阜康矿区西部构造运动作用下煤储层渗透率分布特征[J].煤田地质与勘探,2017,45(6): 40-45.  
NI Xiaoming, ZHAO Yongchao, CAO Yunxing, et al. Distribution characteristics of coal reservoir permeability under the action of tectonic movement in western Fukang mining area [J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(6): 40-45.

[8] ZHANG Xiaodong, DU Zhigang, LI Pengpeng. Physical characteristics of high-rank coal reservoirs in different coal-body structures and the mechanism of coalbed methane production [J]. Earth Sciences, 2017, 60(2): 246.

[9] LI Ming, JIANG Bo, LIN Shoufa. Tectonically deformed coal types and pore structures in Puhe and Shanchahe coal mines in western Guizhou [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2011, 21(3): 353-357.

[10] 黄 波,郑启明,秦 勇,等.基于底板构造曲率的煤层高渗区预测[J].河南理工大学学报(自然科学版),2020,39(6): 43-50.  
HUANG Bo, ZHENG Qiming, QIN Yong, et al. Prediction of higher-permeability region of coalbed methane based on tectonic curvature of coal-seam floor [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2020, 39(6): 43-50.

[11] 陈金刚,张景飞.构造对高煤级煤储层渗透率的系统控制效

- 应:以沁水盆地为例[J].天然气地球科学,2007,18(1):134-136.
- CHEN Jingang,ZHANG Jinfei. Systematic control effect of structures on permeability of high coal rank reservoirs [J]. Natural Gas Geoscience,2007,18(1):134-136.
- [12] 张建博,秦 勇,王红岩,等. 高渗透性煤储层分布的构造预测[J]. 高校地质学报,2003,9(3):359-364.
- ZHANG Jianbo,QIN Yong,WANG Hongyan,*et al.* Predication for the occurrence of high permeability coalbed gas reservoirs with tectonics analysis[J]. Geological Journal of China Universities,2003,9(3):359-364.
- [13] 韩文龙,王延斌,高向东,等. 基于 BP 神经网络的沉积微相识别[J]. 煤炭技术,2016,35(12):114-116.
- HAN Wenlong,WANG Yanbin,GAO Xiangdong,*et al.* Identification of sedimentary microfacies based on BP neural network [J]. Coal Technology,2016,35(12):114-116.
- [14] 王 莹,张庆龙,朱文斌,等. 沁水盆地南缘中-新生代构造变形与构造应力场[J]. 高校地质学报,2014,20(2):249-259.
- WANG Ying,ZHANG Qinglong,ZHU Wenbin,*et al.* Meso-Cenozoic structural deformation and tectonic stress fields in the south margin of Qinshui Basin [J]. Geological Journal of China Universities,2014,20(2):249-259.
- [15] 王 猛,朱炎铭,李 伍,等. 沁水盆地郑庄区块构造演化与煤层气成藏[J]. 中国矿业大学学报,2012,41(3):425-431.
- WANG Meng,ZHU Yanming,LI Wu,*et al.* Tectonic evolution and reservoir formation of coalbed methane in Zhengzhuang Block of Qinshui Basin[J]. Journal of China University of Mining and Technology. 2012,41(3):425-431.
- [16] XIA Xiaoping,SUN Min,ZHAO Guochun,*et al.* U-Pb and Hf isotopic study of detrital zircons from the Luliang Khondalite, North China Craton, and their tectonic implications[J]. Geological Magazine,2009,146(5):701-716.
- [17] 尹 帅,丁文龙,王凤琴,等. 沁水盆地南部构造负反转、应力机制及油气意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2017,44(6):1-15.
- YIN Shuai,DING Wenlong,WANG Fengqin,*et al.* Stress mechanism of negative inversion structures and its implication for oil and gas in Southern Qinshui Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition),2017,44(6):1-15.
- [18] 李 月,林玉祥,于腾飞. 沁水盆地构造演化及其对游离气藏的控制作用[J]. 桂林理工大学学报,2011,31(4):481-487.
- LI Yue,LIN Yuxiang,YU Tengfei,*et al.* Tectonic evolution of Qinshui Basin and free gas reservoir control [J]. Journal of Guilin University of Technology,2011,31(4):481-487.
- [19] 倪小明,李志恒,王延斌,等. 沁水盆地中部断层发育区煤层气开发有利块段优选[J]. 天然气地球科学,2017,28(4):602-610.
- NI Xiaoming,LI Zhiheng,WANG Yanbin,*et al.* Stress influence in different tectonic positions fracturing interstitial morphology [J]. Journal of China Coal Society,2017,28(4):602-610.
- [20] 倪小明,杨艳辉,王延斌,等. 沁中南断层不发育区多期构造运动作用下煤层气直井产水产气特征[J]. 煤炭学报,2016,41(4):921-930.
- NI Xiaoming,YANG Yanhui,WANG Yanbin,*et al.* Study on gas production and water production characteristics of CBM vertical wells under multi period tectonic movement of non-development fault in central south Qinshui Basin [J]. Journal of China Coal Society,2016,41(4):921-930.
- [21] GAO Xiangdong,WANG Yanbin,NI Xiaoming,*et al.* Recovery of tectonic traces and its influence on coalbed methane reservoirs: a case study in Linxing area, eastern Ordos Basin, China [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering,2018,56(8):414-427.
- [22] 陶传奇,王延斌,倪小明,等. 基于测井参数的煤体结构预测模型及空间展布规律[J]. 煤炭科学技术,2017,45(2):173-177,196.
- TAO Chuanqi,WANG Yanbin,NI Xiaoming,*et al.* Prediction model of coal-body structure and spatial distribution law based on logging parameters [J]. Coal Science and Technology,2017,45(2):173-177,196.
- [23] 贾秉义. 乌鲁木齐—大黄山地区煤层气地质条件研究[J]. 煤炭科学技术,2018,46(11):189-193.
- JIA Bingyi. study on geological condition of coalbed methane in Urumqi—Dahuangshan Area [J]. Coal Science and Technology,2018,46(11):189-193.