



引文格式: 李峰, 贺延军, 冯英, 等. 延安芦村二号煤矿薄煤层构造与煤厚稳定性定量评价[J]. 西北地质, 2025, 58(2): 261–273. DOI: 10.12401/j.nwg.2024131

Citation: LI Feng, HE Yanjun, FENG Ying, et al. Quantitative Evaluation of the Structure and Coal Thickness Stability of the Thin Coal Seam in Lucun No. 2 Coal Mine, Yan'an[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(2): 261–273. DOI: 10.12401/j.nwg.2024131

延安芦村二号煤矿薄煤层构造与煤厚稳定性定量评价

李峰^{1,2}, 贺延军^{1,2}, 冯英^{1,2}, 马锐^{1,2}, 史康³, 郭晨³

(1. 延安车村煤业(集团)有限责任公司, 陕西 延安 717300; 2. 富县矿业开发有限公司芦村二号煤矿分公司, 陕西 延安 727500; 3. 西安科技大学地质与环境学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 薄煤层条件下的煤炭开采对精确掌握煤厚与构造的空间变化规律提出了更高要求。陕西延安黄陵矿区北部发育薄煤层, 对其构造发育特点与煤厚空间变化规律认识不清, 限制了煤炭高效开采与智能化矿井建设。笔者以延安芦村二号煤矿主采的 2 号煤层为研究对象, 基于煤层底板标高数据, 开展趋势面分析与构造曲率分析, 揭示构造展布与发育特点; 基于网格剖分法计算了 775 个网格节点的煤厚变异系数, 揭示煤层厚度及其稳定性变化规律, 克服了传统煤厚变异系数单一评价对揭示煤厚稳定性空间变化的不足。结果显示, 芦村二号煤矿 2 号煤层属于较稳定煤层, 整体呈一走向 NE、倾向 NW 的单斜构造, 在此背景下, 叠加了轴向为 NW 的次级波状起伏。新识别并圈定了 3 处典型构造, 分别为: 煤矿东北部发育一局部凹陷, 中北部发育一局部凸起, 煤矿南部发育一个呈 NW—SE 向展布的马鞍状构造。在马鞍状构造北部叠加了勘探与采掘期间发现的若干断层, 使得煤矿南部构造相对复杂。煤厚变异系数介于 0.16%~15.24%, 平均为 1.98%, 呈现从北向南逐渐增加的趋势, 在西南部 12-7 和 12-8 号钻孔附近达到最大值。在可采范围内, 煤层厚度稳定性由 NE 向 SW 逐步变差, 马鞍状构造与煤厚变异系数高值区高度吻合。基于煤厚及煤厚变异系数分级, 识别出 6 类煤厚及稳定性组合方案, 实现了煤厚及稳定性的平面分区评价, 揭示可采范围内东部的开采条件好于西部, 西南部最差, 源于马鞍状构造加剧了煤厚变化。研究成果可为薄煤层安全、高效、精准开采提供地质保障。

关键词: 构造地质; 薄煤层; 构造定量评价; 构造曲率; 趋势面分析; 煤厚变异系数; 稳定性; 精准开采

中图分类号: P542+5

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)02-0261-13

Quantitative Evaluation of the Structure and Coal Thickness Stability of the Thin Coal Seam in Lucun No. 2 Coal Mine, Yan'an

LI Feng^{1,2}, HE Yanjun^{1,2}, FENG Ying^{1,2}, MA Rui^{1,2}, SHI Kang³, GUO Chen³

(1. Yan'an Checun Coal Industry (Group) Co., Ltd., Yan'an 717300, Shaanxi, China; 2. Lucun No. 2 Coal Mine Branch of Fuxian Mining Development Co., Ltd., Yan'an 727500, Shaanxi, China; 3. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

收稿日期: 2024-08-07; 修回日期: 2024-12-30; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 陕西省重点研发计划项目“极薄煤层矿区产业集群绿色智能化升级示范工程”(2022GD-TSLD-64)资助。

作者简介: 李峰(1989-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事煤矿安全生产管理工作。E-mail: 511139550@qq.com。

Abstract: Coal mining under thin seam conditions puts forward higher requirements for accurately understanding the spatial variation law of coal thickness and structure. A thin coal seam was developed in the north of the Huangling mining area in Yan'an, Shaanxi Province. However, the structural characteristics and spatial variation of coal thickness are not well understood, which restricts efficient coal mining and intelligent mine construction. In this study, the No. 2 coal seam, a thin coal seam mined in Lucun No. 2 Coal mine in Yan'an, was taken as a research object. Based on the elevation data of the coal seam floor, trend surface analysis and structural curvature analysis were carried out to reveal the characteristics of structural development. The variation coefficient of coal thickness of 775 grid nodes was calculated based on the mesh splitting method to reveal the variation rule of coal seam thickness and its stability zoning. It will overcome the deficiency of the traditional single evaluation value of coal thickness variation coefficient to reveal the spatial change of coal thickness stability. The results showed that the No. 2 coal seam belonged to a relatively stable coal seam with a monoclinical structure trending NE and inclining NW. Under this background, secondary undulation with a NW axis was superposed. Three new typical structures were identified, namely, a local depression developed in the northeast part of the coal mine, a local dome developed in the north-central part of the coal mine, and a saddle shaped structure developed in the south of the coal mine with a NW-SE direction. In the northern part of the saddle shaped structure, several faults discovered during coal exploration and mining were superposed, which made the structure in the southern coal mine relatively complicated. The variation coefficient of coal thickness ranged from 0.16% to 15.24%, with an average of 1.98%. The variation coefficient of coal thickness gradually increases from north to south and reaches the maximum value near the Boreholes 12-7 and 12-8 in the southwestern coal mine. Within the recoverable area of coal seam, the thickness stability of coal seam gradually deteriorated from northeast to southwest. The saddle shaped structure was highly consistent with the high value area of coal thickness variation coefficient. Based on the classification of coal thickness and coal thickness variation coefficient, six combination schemes of coal thickness and stability were identified, and a partition evaluation of coal thickness and stability was realized. It revealed that the mining conditions in the eastern part of the recoverable area were better than those in the western part, with the worst occur in the southwest. The change of coal thickness was exacerbated by the saddle shaped structure. The research results would provide geological support for safe, efficient, and accurate mining of thin coal seam.

Keywords: structural geology; thin coal seam; quantitative evaluation of structure; structural curvature; trend surface analysis; coal thickness variation coefficient; stability; precision mining

煤层厚度及其空间分布稳定性是决定采煤方式、技术与效率的关键因素,深刻影响着煤炭资源安全、高效与绿色开采,也是煤矿透明地质与智能化建设的首要基础(王红霞等, 2015; 王双明等, 2020, 2024)。按照煤层厚度分类,厚度 0.3~0.5 m 为极薄煤层,厚度 0.51~1.3 m 为薄煤层(李增学, 2009)。相比于中厚及其以上厚度煤层,地质条件的变化对薄煤层开发工艺与开发效率的制约更为明显(杨燕敏, 2023; 刘峰, 2023)。煤层厚度变化直接受控于构造地质条件(李盛富等, 2016; 黄建国等, 2016; 夏玉成等, 2018),精细确定薄煤层的构造发育特点与煤厚变化规律,对于指导薄煤层条件下煤炭精准高效开发与

透明化、智能化矿井建设具有重要意义(王文平等, 2023; 杨雨晨, 2023)。矿井构造定量评价是揭示矿井构造复杂程度及关键构造类型,并实现构造精细识别的重要手段(徐凤银等, 1991; 周云霞等, 2001; 曹代勇等, 2002),被广泛应用于矿井构造与开采地质条件分析,有效指导了煤矿安全高效生产(彭涛等, 2017; 刘伟等, 2019)。

延安芦村二号煤矿位于陕西黄陇侏罗纪煤田黄陵矿区西北部,含煤地层为中侏罗统延安组,以发育薄煤层为主要特点,但由于煤质好,仍具有较大的开发潜力,属于特低灰、低硫~特低硫、中高挥发分、特高发热量、高焦油产率煤,煤炭清洁高效利用潜势极

佳(王成祥等, 2016; 王晓, 2018; 唐恩贤, 2019)。薄煤层特点导致矿井开采地质条件与生产作业对构造与煤厚变化更为敏感, 要求也更加苛刻, 地质条件变化会极大程度影响采煤作业进程, 制约采煤效率(屈争辉等, 2015)。但目前对煤矿范围内构造的精细变化及其对煤层厚度的影响尚缺乏深入认识, 制约了对煤层赋存规律及开采地质条件的精准把握以及煤炭的安全高效开采。薄煤层背景下局部构造及其诱导的煤厚变化对矿井正常生产的影响更为显著(王晓, 2018)。另外, 该矿目前正在开展智能化矿井建设, 精确掌握煤厚分布与构造发育规律, 并依此实现开采地质条件分区, 可为透明工作面地质模型建立与智能化开采提供重要地质保障(段中会等, 2017; 李亮等, 2018; 常会珍等, 2018)。

因此, 笔者以芦村二号煤矿为研究对象, 分析该区薄煤层发育特点, 对薄煤层赋存背景下的矿井构造与煤厚变化规律开展定量评价, 精细揭示构造发育特

点与煤厚分区特点, 以期促进芦村二号煤矿煤炭开发进程, 优化采煤技术工艺, 提高采煤效率, 并为薄煤层条件下的地质透明化建设与煤炭智能化开采提供参考依据。

1 地质背景

黄陵矿区位于鄂尔多斯盆地黄陇侏罗纪煤田的东部, 为一倾向 NW 的单斜构造。矿区揭露断层均为小型断层, 未发现较大断层及岩浆岩活动(杨帆等, 2019)。芦村二号煤矿位于黄陵矿区西北部, 地层倾角较小, 约 $1^{\circ} \sim 3^{\circ}$, 整体构造简单。基于煤矿范围内 44 口煤田地质勘探钻孔的煤层底板标高实测数据, 采用克里金插值法绘制了 2 号煤层底板标高等高线图, 并在其上叠加了煤矿勘探与采掘期间揭露的断层, 多位于南部, 均属于正断层(图 1)。底板等高线与采掘过程实测 2 号煤层标高数据相吻合。

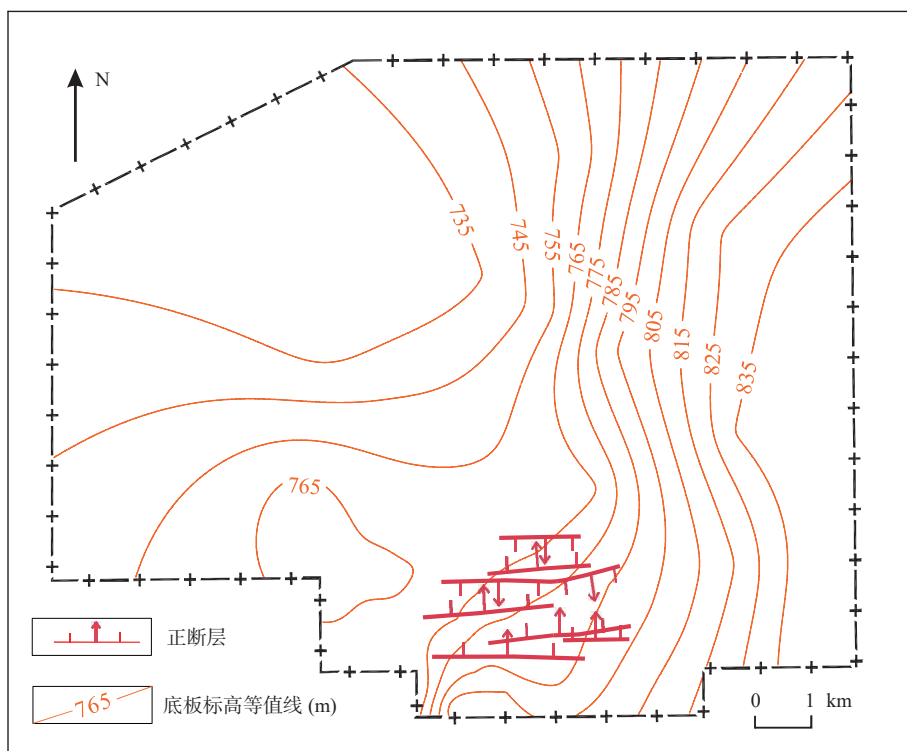


图1 芦村二号煤矿 2 号煤层底板等高线与揭露构造示意

Fig. 1 Contour line and disclosure structure of No. 2 coal seam floor in Lusun No. 2 Coal Mine

2 号煤层为区内唯一可采煤层, 也是目前的主采煤层, 笔者将其作为研究对象。煤层厚度介于 $0.2 \sim 1.4$ m, 平均为 0.82 m, 属于薄煤层。煤层埋藏深度介于 $170 \sim 630$ m, 一般在 $350 \sim 550$ m 左右。煤层

底板标高介于 $690 \sim 870$ m, 由东向西标高逐渐降低。在走向 NE、倾向 NW 的单斜构造格局下, 煤层底板标高等值线在东部为近 NS 向, 在西部变为 SW-NE 向且弯曲程度增加, 显示了构造特征的空间变化。

2 原理与方法

拟采用趋势面与构造曲率两种分析方法对矿井构造展布特点开展定量评价,揭示矿井构造发育规律与变化特点;依据可采性指数与煤厚变异系数对煤层稳定性进行评估。

(1) 趋势面分析

趋势面分析可获得趋势值与剩余值两个关键参数(李克庆等, 2015),前者反映构造整体变化情况,后者反映构造局部变化特点,两者结合可为揭示构造发育情况提供定量依据(王雅春, 2015; 马慧妍, 2023)。其计算方法与分析原理参见文献(高文华等, 1997; 马田生等, 2004; 吴勇等, 2017)。基于 44 口钻孔揭露的 2 号煤层底板标高实测数据,开展趋势面分析,拟合得到 2 次趋势面方程,获得底板标高二次趋势值与剩余值,并据此绘制等值线图,探讨煤层底板起伏以及构造发育情况。

(2) 构造曲率

曲率是表征曲线或曲面上任意一点弯曲变形程度的数学指标,运用于构造地质几何学分析,可揭示构造线或构造面的弯曲变形程度。煤层底板构造曲率可以直观的反映煤层受力后的整体和局部弯曲变形程度,为评价其受力状态、煤体结构及渗透性提供定量依据(孙洪泉等, 1996; 汪吉林, 2005)。基于芦村二号煤矿 2 号煤层底板等高线图(图 1),按照 500 m×500 m 间距对其进行网格剖分,读取每个网格节点的标高值,根据每个节点及其周围 8 个节点的底板标高数据计算每个节点的构造曲率。共计算 775 个节点的构造曲率值,据此绘制构造曲率等值线图,从几何变形的角度对构造复杂程度进行定量评价。根据曲率的基本概念,可分为极小主曲率,符号为 K_g 、极大主曲率,符号为 K_{max} 、平均曲率,符号为 K_m 和高斯曲率,符号为 K_g (Roberts, 2001)。各类构造曲率的定义和计算方法参见文献(李志勇等, 2003)。

其中, K_m 与 K_g 对揭示构造类型与局部构造异常具有更明确的指示意义,为本次的重点分析参数。平均曲率(K_m)是曲面上某点任意正交的两个曲率值的平均值,可由极大主曲率与极小主曲率的平均值获得。 K_m 为正表示背斜或局部凸起, K_m 为负表示向斜或局部凹陷。另外, K_m 的 0 值线可反映褶皱构造的发育范围,绝对值可反映褶皱构造的变形程度。高斯曲率

(K_g)是曲面上某点相互正交的极大主曲率值(K_{max})和极小主曲率值(K_{min})的乘积。高斯曲率大,说明构造弯曲程度越大。当高斯曲率为正时,且 K_{max} 、 K_{min} 均为正值时,在地质构造上则表现出穹隆构造的形式;若 K_{max} 、 K_{min} 均为负值时,在地质构造上则表现出局部凹陷的形式;当高斯曲率的值为负时,即 K_{max} 、 K_{min} 异号,在地质构造上表现为马鞍状构造形式;当高斯曲率为 0,且 K_{max} 、 K_{min} 均为 0 值时,则为单斜构造或水平构造;当 K_g 为 0,且 K_{min} 为 0, K_{max} 为负值时,表示为向斜构造, K_{max} 为正值时,表示为背斜构造(苏德华, 2018)。

(3) 煤层厚度稳定性评估

依据可采性指数与煤厚变异系数对煤层厚度稳定性进行评估。可采指数的计算公式为:

$$K_n = \frac{n'}{n} \quad (1)$$

式中, K_n , 煤层可采性指数; n , 参与煤层厚度评价的见煤点总数; n' , 煤层厚度大于或等于可采厚度的见煤点数。

煤厚变异系数的计算公式为:

$$\gamma = \frac{S}{\bar{M}} \times 100\% \quad (2)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}{N-1}} \quad (3)$$

式中, γ , 煤厚变异系数, %; M_i , 每个见煤点的实测煤层厚度, m; $\bar{M}$, 平均煤层厚度, m; n , 参与评价的见煤点数; S , 煤层厚度标准差, m。

3 构造定量评价

3.1 趋势面分析

通过计算,得到 2 号煤层底板标高 2 次趋势面方程:

$$z = 2.661\ 328 - 2.229\ 064x + 0.233\ 438\ 2y - 1.690\ 206 \times 10^{-7}x^2 + 9.755\ 193 \times 10^{-8}xy - 8.364\ 058 \times 10^{-9}y^2 \quad (4)$$

式中: z 为底板标高趋势值, x , y 为横、纵坐标(1980 西安坐标系)。拟合度为 69.63%, 显著性检验 F 值为 17.43, 满足检验标准:

$$F > F_{\alpha=0.05}(5, 38) = 2.463 \quad (5)$$

其中, 括号内数值 5 代表第一自由度, 即 2 次趋势面方程中除常数项外的系数个数; 38 代表第二自由

度,即观测点个数(研究区内44口钻孔)与第一自由度差值减1。说明趋势面拟合结果在显著性水平0.05之下是显著的,煤层底板标高2次趋势面可靠。

2次趋势值等值线图揭示,芦村2号煤矿2号煤层整体呈一走向NE、倾向NW的单斜构造。2次剩

余值等值线总体走向为NW向,在煤矿中部尤为明显,与趋势值走向呈相交关系。以上信息表明,在走向NE的单斜构造格局下,叠加了轴向为NW的次级波状起伏,在煤矿中部发育次级凸起,东、西两侧则为次级凹陷(图2)。

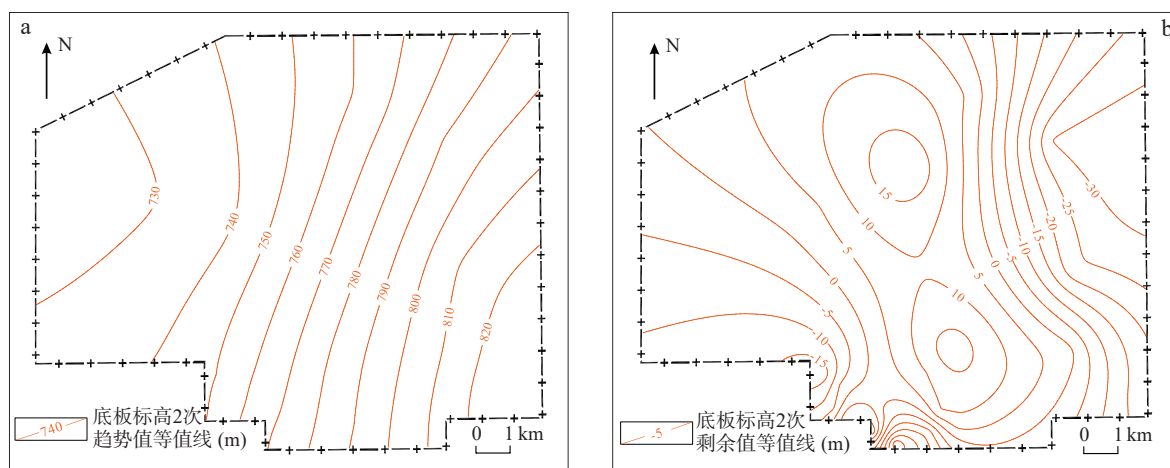


图2 2号煤层底板标高2次趋势值等值线图(a)和剩余值等值线图(b)

Fig. 2 (a) Contour map of the secondary trend value and (b) contour map of the residual value of the floor elevation of No. 2 coal seam

3.2 构造曲率分析

构造曲率计算结果显示,芦村二号煤矿2号煤层 $K_{\max}$ 值为 $-8.26 \times 10^{-6} \sim 30.20 \times 10^{-6}$,平均为 1.82×10^{-6} ; $K_{\min}$ 值为 $-28.45 \times 10^{-6} \sim 13.49 \times 10^{-6}$,平均为 -1.43×10^{-6} 。根据前人对 $K_{\max}$ 绝对值的划分方案, $\leq 5 \times 10^{-6}$,煤层变形程度弱; $5 \times 10^{-6} \sim 20 \times 10^{-6}$,煤层变形程度中等; $> 20 \times 10^{-6}$,煤层变形程度强(秦勇等,2008;郭晨等,2019)。本区构造曲率值总体较低,反映煤矿构造较为简单,煤层变形不强烈。

3.2.1 平均曲率

芦村二号煤矿2号煤层 K_m 值为 -13.18×10^{-6} 和 18.61×10^{-6} 之间,平均为 0.20×10^{-6} 。矿井东北部 K_m 相对低值区($-6 \times 10^{-6} < K_m < -2 \times 10^{-6}$)为局部凹陷;中部偏北的 K_m 相对高值区($2 \times 10^{-6} < K_m < 8 \times 10^{-6}$)表示存在局部凸起。煤矿南部以 $K_m > 0$ 区域为主,发育局部背斜,仅西南部发育局部向斜($K_m < 0$)(图3)。

3.2.2 高斯曲率

K_g 值为 $-460.76 \times 10^{-8} \sim 320.13 \times 10^{-8}$,平均为 -3.57×10^{-8} (图4)。北部整体为单斜构造,构造简单,变形较弱。在此基础上,煤矿东北部存在 K_g 正值区($0 < K_g < 2 \times 10^{-8}$)、 K_m 负值区($-6 \times 10^{-6} < K_m < -2 \times 10^{-6}$),表示该区域发育局部凹陷;中北部存在 K_g 正值

区($0 < K_g < 4 \times 10^{-8}$)、 K_m 正值区($2 \times 10^{-6} < K_m < 8 \times 10^{-6}$),说明该区域发育局部凸起。煤矿南部存在一个呈NW-SE向展布的 K_g 负值区($-18 \times 10^{-8} < K_g < -2 \times 10^{-8}$),表明该区域发育一马鞍状构造。马鞍状构造实质为背斜构造,其特点在于背斜轴部呈中间下凹,两端翘起的形态,形似“马鞍”。在构造曲率上体现为 $K_{\max}$ 为正, $K_{\min}$ 为负, K_g 为负, K_m 一般为正。总体而言,煤矿南部区域发育有多条断层和一个轴向NW的马鞍状构造,构造相对复杂,将对煤炭开采造成影响。

3.3 构造评价

综合前述研究,芦村二号煤矿2号煤层构造整体较为简单。依据构造曲率分析,矿井东北部发育局部凹陷,中北部发育局部凸起,南部发育马鞍状构造。根据构造曲率0值线圈定了其发育范围(图5):东北部局部凹陷, $K_g > 0$ 且 $K_m < 0$;中北部局部凸起, $K_g > 0$ 且 $K_m > 0$;南部马鞍状构造, $K_g < 0$ 且 $K_m > 0$ 。2次趋势面分析结果对此亦有良好响应,局部凹陷对应于剩余值强负值区,局部凸起对应剩余值强正值区,马鞍状构造对应剩余值剧烈变化区。在马鞍状构造北翼叠加了勘探与采掘期间发现的若干断层,一方面验证了所识别马鞍状构造的可靠性,另一方面说明煤矿南部在马鞍状构造主导下构造相对复杂,发育系列断层。

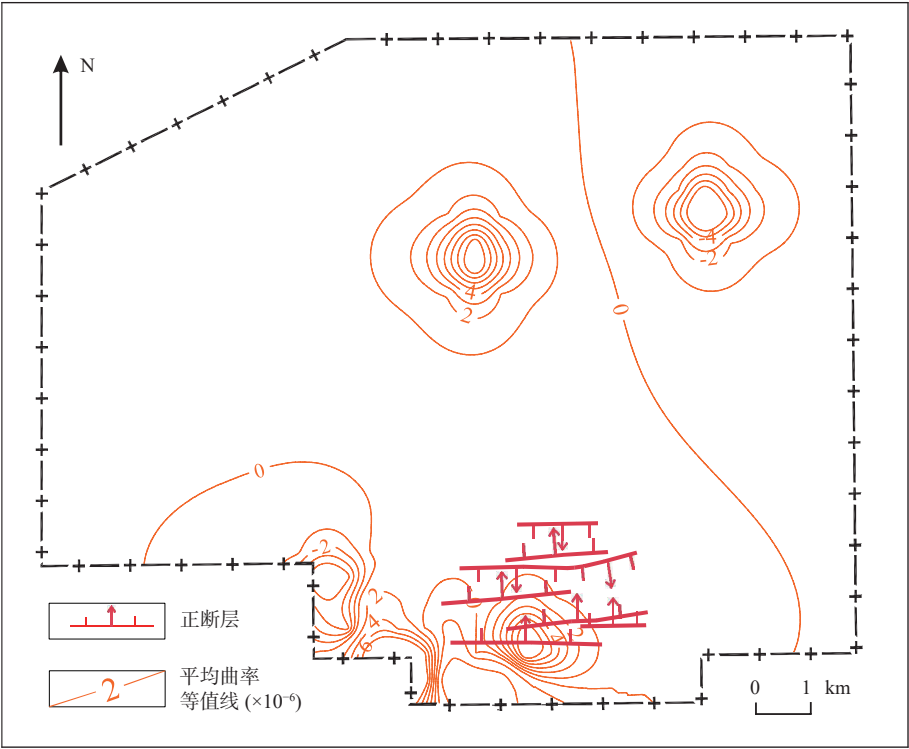


图3 平均曲率等值线图

Fig. 3 Contour map of mean curvature

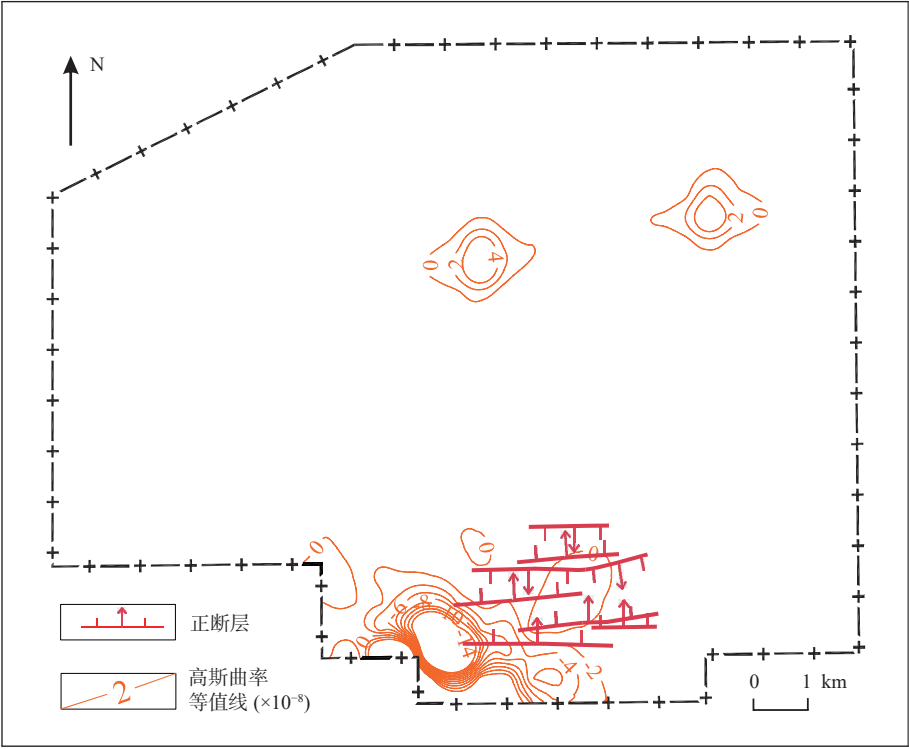


图4 高斯曲率等值线图

Fig. 4 Contour map of gaussian curvature

但揭露断层均属小型断层, 落差小于 3 m, 对煤层底板标高影响不明显, 其在趋势面与构造曲率分析结果中

无明显响应, 开发实践也显示其不影响采区划分和工作面连续推进。上述构造精细识别结果可为煤炭高

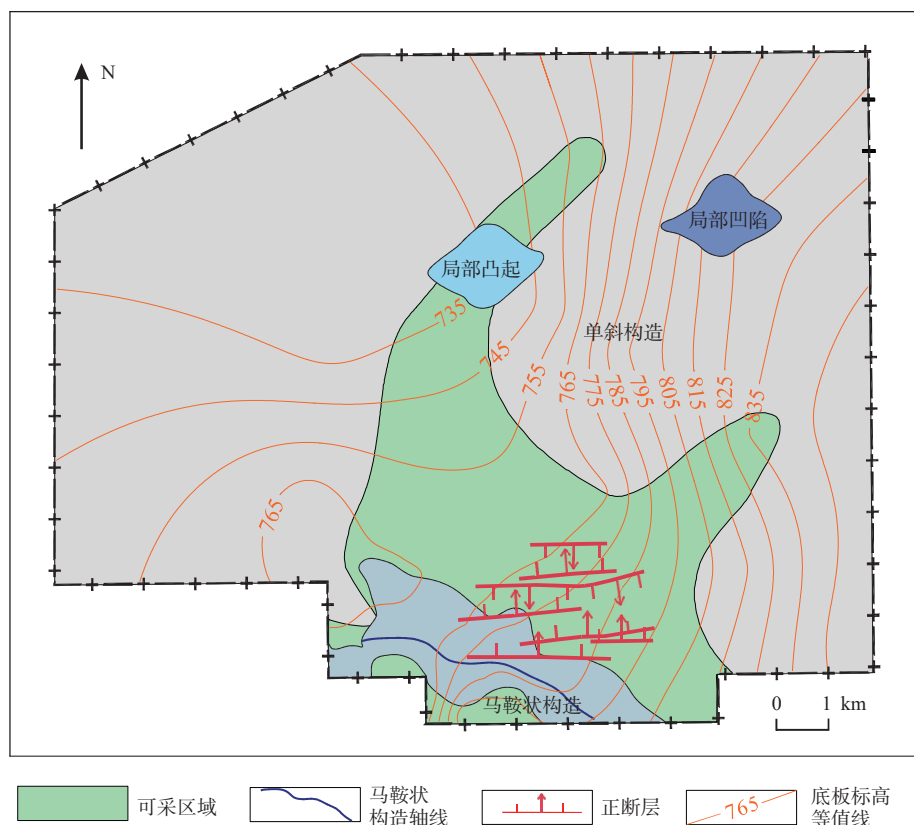


图5 基于曲率分析的构造发育特点

Fig. 5 Characteristics of structural development based on curvature analysis

效开采提供地质依据。

4 煤层厚度稳定性评价

4.1 稳定性总体评价

基于2号煤层44口钻孔的计量煤厚数据,对煤层厚度及其稳定性开展评价。44口钻孔全部见煤,计量煤厚值为0.2~1.4 m,平均为0.82 m,总体属于薄煤层。煤厚频率分布显示,主体煤厚区间值为0.8~1.0 m,占比68%(图6)。

经统计计算,见煤点数量(n)为44,按可采厚度标准0.8 m,达到此标准的见煤点数量(n')为35,因此可采性指数为0.80。煤厚变异系数为25.21%。根据《煤矿地质工作规定》,芦村二号煤矿2号煤层属于较稳定煤层。

4.2 煤厚及稳定性分区评价

4.2.1 煤厚分布规律

基于区内44口钻孔的计量煤厚数据绘制了2号煤层煤厚等值线图。结果显示,煤矿中南部区域煤层较厚,为可采煤层分布区,可采范围(煤厚 ≥ 0.8 m)如图中绿色区域所示,面积45.94 km²。井田东北部煤厚

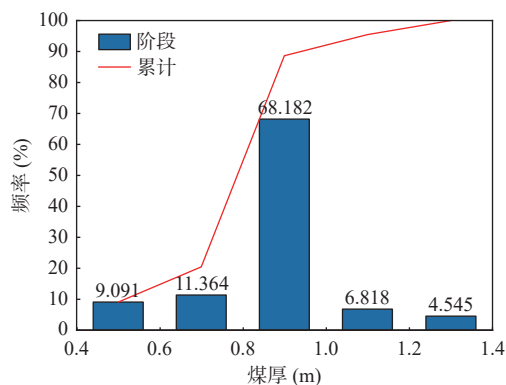


图6 煤厚频率分布图

Fig. 6 Distribution of coal thickness frequency

较薄,最薄处仅0.2 m,位于22-4钻孔。煤层最厚处位于7-6号钻孔,煤厚1.4 m,但该钻孔位于井田边界以外,井田范围内最厚煤层位于南部14-2号钻孔,煤厚1.05 m(图7)。

4.2.2 煤厚变异系数分布规律

传统意义上的煤厚变异系数仅是依靠见煤钻孔煤厚数据计算得到的单一统计学数值,即一个井田只能得到一个数据,反映的是煤厚变化程度总体信息,无法揭示煤厚变化程度的空间非均质性,限制了对煤

依据 775 个网格节点煤厚变异系数计算结果绘制煤厚变异系数等值线图, 显示煤厚变异系数从北向南呈现逐渐增加的趋势, 在西南部 12-7 和 12-8 钻孔附近达到最大值, 变异系数超过 10%。在可采范围内, 煤层厚度稳定性由东北向西南逐步变差(图 10)。值

得注意的是, 南部区域钻孔控制程度高于其他区域, 这是煤矿实际生产条件决定的, 芦村二号煤矿尚处于基建阶段, 仍未投产, 南部为前期勘探重点与目前优先开拓区, 其他区域评价结果有待勘探开发的持续深入而不断丰富、优化。

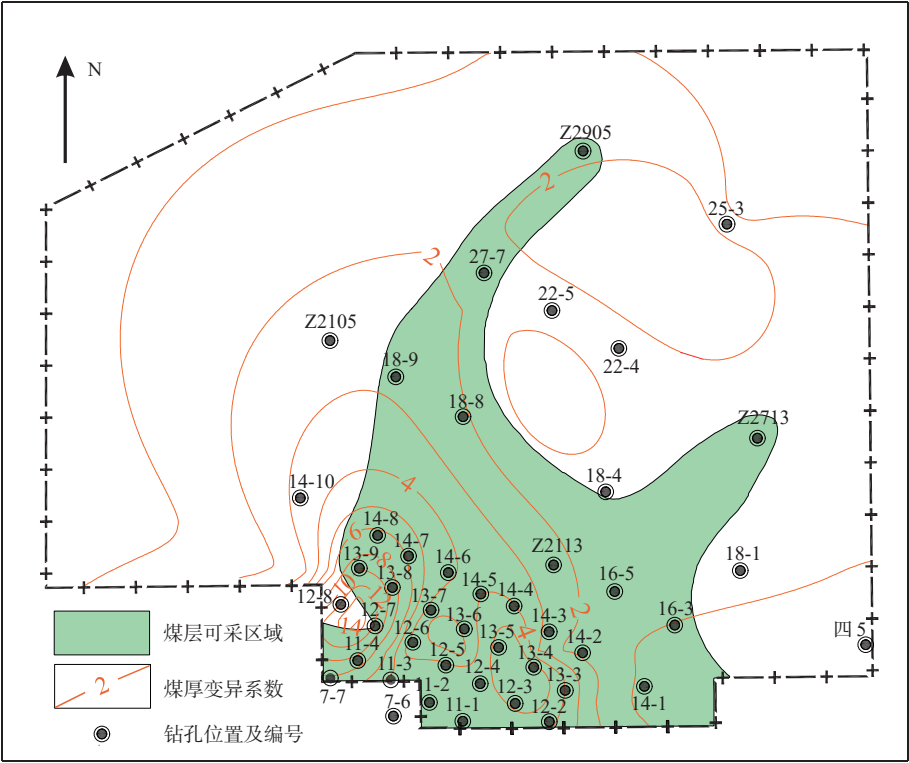


图10 煤厚变异系数等值线图

Fig. 10 Contour map of variation coefficient of coal thickness

4.2.3 煤厚及稳定性组合分区

如表 1 所示, 按照变异系数 1% 和 2% 将煤层稳定性分为三类: I 类, $<1\%$; II 类, $1\% \sim 2\%$; III 类, $>2\%$ 。按照可采范围内煤层厚度 0.8 m 与 0.9 m 两个临界值, 将煤厚分为两类: I 类, >0.9 m; II 类, $0.8 \sim 0.9$ m。据此, 理论上可形成 6 种煤厚及稳定性组合方案。按照

表 1 煤厚及稳定性组合方案

Tab. 1 Combination scheme of coal thickness and stability

煤厚分类	变异系数分类	组合方案	描述
I (>0.9 m)	I ($<1\%$)	I - I	煤厚大, 稳定
II ($0.8 \sim 0.9$ m)	II ($1\% \sim 2\%$)	I - II	煤厚大, 较稳定
		I - III	煤厚大, 较不稳定
	III ($>2\%$)	II - I	煤厚稍小, 稳定
		II - II	煤厚稍小, 较稳定
		II - III	煤厚稍小, 较不稳定

薄煤层评价优先考虑煤厚, 其次考虑稳定性的一般思路, 开采地质条件由好到坏依次为: I - I、I - II、I - III、II - I、II - II、II - III, 据此可为芦村二号煤矿煤炭开发工程部署与精准开采提供依据。

分区评价结果显示, 可采范围内 I - I、I - II、I - III 组合位于南部, 代表相对较好的开采煤厚条件, 但最优的 I - I 组合分布面积较小, 仅 0.45 km^2 ; I - II 组合面积为 3.14 km^2 , I - III 组合面积 2.64 km^2 ; II - I 组合位于可采范围的东南部, 面积 2.38 km^2 。II - II 与 II - III 组合所占面积最大, 为区内的主要类型。II - II 组合主要位于可采范围的东部, 面积 13.46 km^2 ; II - III 组合则主要位于西部, 面积 23.87 km^2 。总体而言, 可采范围内东部的开采条件好于西部(图 11)。

将煤厚稳定性分区与构造识别分区结果进行叠加, 发现马鞍状构造对应的煤厚分区为 II - III 与 I - III 型, 也就是变异系数 $>2\%$, 煤厚较不稳定。北部的

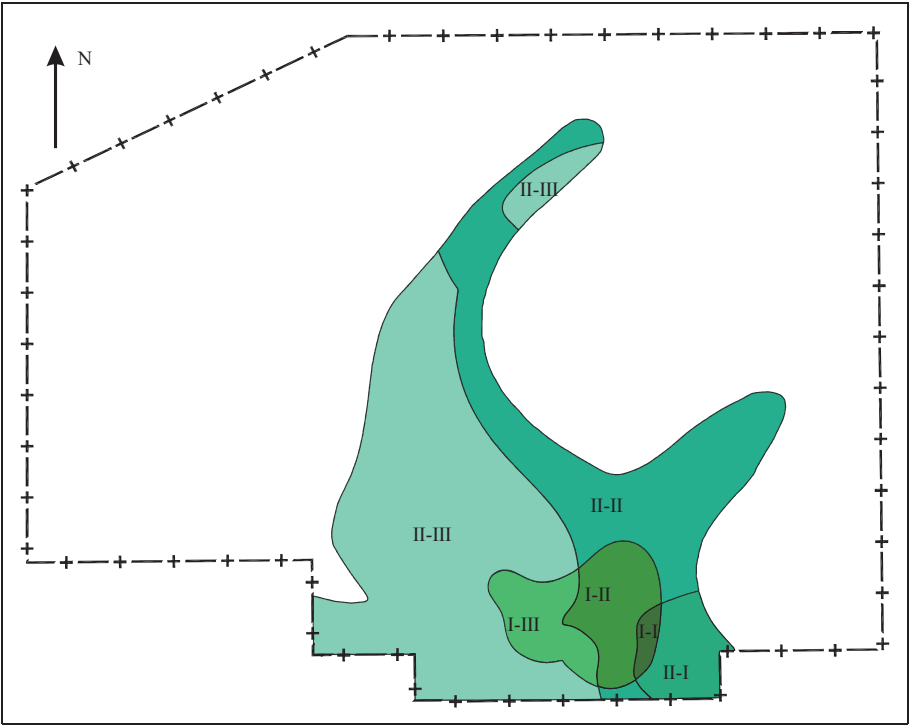


图11 煤厚及稳定性组合分区

Fig. 11 Combined partition of coal thickness and stability

局部凸起对应Ⅱ-Ⅱ类型,煤厚稍小,较稳定。东北部的局部凹陷位于可采范围以外(图12)。煤厚变异系数高值区与马鞍状构造分布区是高度重合的,说明马鞍状构造对可采范围内煤厚变化的影响较大。

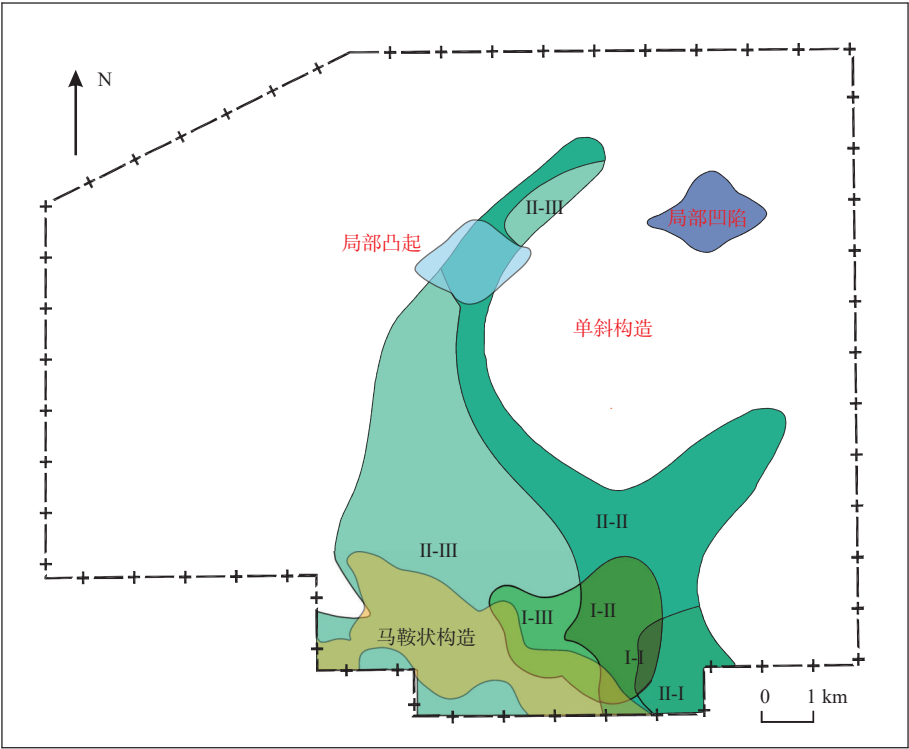


图12 煤厚分区与构造叠加图

Fig. 12 Coal thickness zoning and structure superposition diagram

5 结论

(1) 芦村二号煤矿2号煤层整体呈一走向NE、倾向NW的单斜构造,在此背景下,叠加了轴向为NW向的次级波状起伏。煤矿东北部存在高斯曲率正值区、平均曲率负值区,表示该区域发育局部凹陷;中北部存在高斯曲率正值区、平均曲率正值区,说明该区域发育局部凸起。煤矿南部存在一个呈NW-SE向展布的高斯曲率负值区,且平均曲率为正值,表明该区域发育一马鞍状构造。

(2) 2号煤层为薄煤层,较稳定煤层,以0.8 m煤层厚度等值线圈定了可采范围,主体位于井田中南部区域,面积45.94 km²。针对传统煤层稳定性评价仅采用煤厚变异系数单一值的不足,基于网格剖分法计算了平面775个网格节点的煤厚变异系数,实现了煤层稳定性空间差异的精确刻画。在可采范围内,煤层厚度稳定性由东北向西南逐步变差,变异系数在西南部12-7和12-8钻孔附近超过10%,导致可采区西南部开采地质条件恶化。

(3) 芦村二号煤矿2号煤层构造整体较为简单。在南部马鞍状构造的北部叠加了勘探与采掘期间发现的若干断层,使得南部构造相对复杂。形成6类煤厚及稳定性组合方案,完成了可采范围内煤厚及稳定性的平面分区评价,计算了每类分区所占面积,东部的开采条件好于西部,西南部开采条件最差。马鞍状构造加剧了煤厚空间变化,使开发地质条件复杂化,可能给矿井南部的正常掘采造成影响。煤炭开发可参考本次分区结果从优到差有序开展,并在不同分区采取针对性与适应性措施以提高采煤效率,需重点关注马鞍状构造区的潜在影响。研究成果可为芦村二号煤矿以及其他薄煤层矿井地质保障体系建设与煤炭精准、高效开采提供依据和参考。

参考文献(References):

曹代勇,周云霞,魏迎春. 矿井地质构造定量评价信息系统的开发及应用[J]. 煤炭学报, 2002, 27(4): 379-382.

CAO Daiyong, ZHOU Yunxia, WEI Yingchun. Development and application of quantitative evaluation information system for mine geological structure[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(4): 379-382.

常会珍,郝春生,张蒙,等. 煤层气开发地质信息在完善矿井地质保障中的应用[J]. 煤炭技术, 2018, 37(2): 126-128.

CHANG Huizhen, HAO Chunsheng, ZHANG Meng, et al. Application of Coalbed Methane Development Geological Information in Perfecting Mine Geological Guarantee[J]. Coal Technology, 2018, 37(2): 126-128.

段中会,马丽,高阳,等. 煤矿复杂地质条件精细预测预报技术及应用[J]. 中国煤炭地质, 2017, 29(9): 53-60.

DUAN Zhonghui, MA Li, GAO Yang, et al. Precise Prediction and Forecasting Technologies and Their Application under Coal-mine Complex Geological Condition[J]. Coal Geology of China, 2017, 29(9): 53-60.

高文华,周利华. 趋势面分析在洪山殿矿区构造和厚煤带分布研究中的应用[J]. 湖南地质, 1997(3): 59-63.

GAO Wenhua, ZHOU Lihua. Application of Trend Analysis to the Study of Structure and Thickness of Coal Layer in Hongshandian Mine[J]. Hunan Geology, 1997(3): 59-63.

郭晨,夏玉成,孙学阳,等. 高瓦斯矿井采煤工作面瓦斯地质分级评价方法与实践[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2409-2418.

GUO Chen, XIA Yucheng, SUN Xueyang, et al. Method and practice of gas geological grading evaluation on coal mining face of high gas mine[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2409-2418.

黄建国,崔春龙,杨剑,等. 西昆仑库斯拉甫一带侏罗纪断陷盆地演化及成煤环境分析[J]. 西北地质, 2016, 49(4): 201-206.

HUANG Jianguo, CUI Chunlong, YANG Jian, et al. Evolution and Coal-forming Environment Analysis of Jurassic Rift Basin in Kusilafu Area, Western Kunlun[J]. Northwestern Geology, 2016, 49(4): 201-206.

李克庆,张延凯编. 数学地质[M]. 北京:冶金工业出版社, 2015.

LI Keqing, ZHANG Yankai, Ed. Mathematical Geology[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2015.

李亮,田增辉. 综合地质保障技术在崔木煤矿开采中的应用[J]. 陕西煤炭, 2018, 37(6): 113-116.

LI Liang, TIAN Zenghui. Application of comprehensive geological guarantee technology in the mining of Cuimu coal mine[J]. Shaanxi Coal, 2018, 37(6): 113-116.

李盛富,陈洪德,周剑,等. 新疆伊犁盆地南缘新生代以来构造演化与聚煤规律研究[J]. 西北地质, 2016, 49(2): 220-228.

LI Shengfu, CHEN Hongde, ZHOU Jian, et al. Tectonic Evolution and Coal Accumulation about the Southern Margin of Yili Basin in Xinjiang since Middle Cenozoic Era[J]. Northwestern Geology, 2016, 49(2): 220-228.

李增学. 煤地质学[M]. 北京:地质出版社, 2009.

LI Zengxue. Coal Geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009.

- 李志勇, 曾佐勋, 罗文强. 构造面曲率分析及三维可视化软件 3DCAVF 开发与实践[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2003, 42(5): 101-104.
- LI Zhiyong, ZENG Zuoxun, LUO Wenqiang. Development and practice of 3DCAVF software for structural surface curvature analysis and 3D visualization[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatsen*, 2003, 42(5): 101-104.
- 刘峰. 适应保护层开采的薄煤层采煤机研制与应用[J]. *煤矿机械*, 2023, 44(9): 66-67.
- LIU Feng. Development and Application of Thin Coal Seam Shearer Suitable for Protective Layer Mining[J]. *Coal Mine Machinery*, 2023, 44(9): 66-67.
- 刘伟, 吴基文, 胡儒, 等. 矿井构造复杂程度定量评价与涌(突)水耦合分析[J]. *工矿自动化*, 2019, 45(12): 17-22.
- LIU Wei, WU Jiwen, HU Ru, et al. Quantitative evaluation of mine structure complexity and its coupling analysis with water bursting[J]. *Industry and Mine Automation*, 2019, 45(12): 17-22.
- 马慧妍. 趋势面分析在瓦窑堡油田油藏分布规律研究中的应用[J]. *地质学刊*, 2023, 47(2): 175-181.
- MA Huiyan. Application of trend surface analysis to reservoir distribution in Wayaopu oilfield[J]. *Journal of Geology*, 2023, 47(2): 175-181.
- 马田生, 张林山. 趋势面分析在山西朔州王坪井田构造研究中的应用[J]. *新疆地质*, 2004, 22(1): 107-110.
- MA Tiansheng, ZHANG Linshan. Application of trend surface analysis to structural study of Wangping mine field in Shuozhou, Shanxi[J]. *Xinjiang Geology*, 2004, 22(1): 107-110.
- 彭涛, 王生全, 樊敏, 等. 基于趋势面分析法的下峪口井田褶皱构造发育新认识[J]. *矿业安全与环保*, 2017, 44(3): 77-81.
- PENG Tao, WANG Shengquan, FAN Min, et al. New Cognition on Development of Folded Structure in Xiayukou Mine Based on Trend Surface Analysis[J]. *Mining Safety and Environmental Protection*, 2017, 44(3): 77-81.
- 秦勇, 姜波, 王继尧, 等. 沁水盆地煤层气构造动力条件耦合控藏效应[J]. *地质学报*, 2008(10): 1355-1362.
- QIN Yong, JIANG Bo, WANG Jiyao, et al. Coupling Control of Tectonic Dynamical Conditions to Coalbed Methane Reservoir Formation in the Qinshui Basin, Shanxi, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008(10): 1355-1362.
- 屈争辉, 姜波, 汪吉林, 等. 不同煤级煤大分子结构对应力-应变环境的响应分析[J]. *中国矿业大学学报*, 2015, 44(4): 656-663.
- QU Zhenghui, JIANG Bo, WANG Jilin et al. Reaction of macromolecular structure of coals of various ranks to stress-strain environments[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2015, 44(4): 656-663.
- 苏德华. 山西灵石荡荡岭煤矿矿井构造特征及复杂程度评价[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- SU Dehua. Characteristics and Evaluation of Geological Structure of Dangdangling Coal Mine in Shanxi Province[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- 孙洪泉, 陆国桢, 邵玉宏, 等. 判别分析法在矿井地质构造预测中的应用[J]. *煤炭学报*, 1996, 22(5): 9-12.
- SUN Hongquan, LU Guozhen, SHAO Yuhong, et al. Application of discriminant analysis method in prediction of geological structures in coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 1996, 22(5): 9-12.
- 唐恩贤. 黄陵矿业公司智能化开采核心技术及其应用实践[J]. *中国煤炭*, 2019, 45(4): 13-18+113.
- TANG Enxian. Core technology of intelligent mining in Huangling Mining Company and its application practice[J]. *China Coal*, 2019, 45(4): 13-18+113.
- 王成祥, 张玉良. 让井下无人采煤成为引领未来煤炭发展新坐标——陕煤黄陵矿业公司实施智能化开采的调查与思考[J]. *陕西煤炭*, 2016, 35(5): 1-6+14.
- WANG Chengxiang, ZHANG Yuliang. Making the unmanned mining as the new coordinate of coal industry development in the future—The survey and thinking on the implementation of intelligent mining in Shaanxi Huangling Mining Corp[J]. *Shaanxi Coal*, 2016, 35(5): 1-6+14.
- 王红霞. 窑街煤田外围赋煤特征及找煤方向[J]. *西北地质*, 2015, 48(1): 191-195.
- WANG Hongxia. Coal-Bearing Features and Prospecting Orientation in Peripheral Yaojie Coalfield[J]. *Northwestern Geology*, 2015, 48(1): 191-195.
- 汪吉林. 矿井构造定量评价理论与方法研究——以鲍店矿为例[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2005.
- WANG Jilin. Research on theory and method of quantitative evaluation of mine structure -- taking Baodian Mine as an example [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2005.
- 王双明, 孙强, 袁士豪, 等. 论煤-水-土多资源协调开发[J]. *西北地质*, 2024, 57(5): 1-10.
- WANG Shuangming, SUN Qiang, YUAN Shihao, et al. On the Coordinated Development of Coal-Water-Soil Multiple Resources[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(5): 1-10.
- 王双明, 孙强, 乔军伟, 等. 论煤炭绿色开采的地质保障[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(1): 8-15.
- WANG Shuangming, SUN Qiang, QIAO Junwei, et al. Geological guarantee of coal green mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 8-15.
- 王文平, 朱良嘉. 动态地质模型规划开采技术在薄煤层中的应用[J]. *陕西煤炭*, 2023, 42(6): 176-179.
- WANG Wenping, ZHU Liangjia. Application of dynamic geological model planning mining technology in thin coal seam[J]. *Shaanxi Coal*, 2023, 42(6): 176-179.

- 王晓. 芦村二号煤矿开拓方式的比选确定研究[J]. [山东煤炭科技](#), 2018(6): 182-184.
- WANG Xiao. Contrast and Determination of the Development Form of Lucun No. 2 Coal Mine[J]. [Shandong Coal Science and Technology](#), 2018(6): 182-184.
- 王雅春. 油气数学地质 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2015.
- WANG Yachun, Mathematical Geology of Oil and Gas [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2015.
- 吴勇, 马腾, 王玉, 等. 移动趋势面法识别微幅度构造的多参数分析[J]. 西南石油大学学报 (自然科学版), 2017, 39(3): 34-46.
- WU Yong, MA Teng, WANG Yu, et al. Multi-parameter analysis of micro amplitude structures by moving trend surface method[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science and Technology Edition), 2017, 39(3): 34-46.
- 夏玉成, 孙廷臣, 梁倩文, 等. 韩城矿区纵弯褶皱的几何学特征及其形成演化机理[J]. 煤炭学报, 2018, 43(3): 801-809.
- XIA Yucheng, SUN Tingchen, LIANG Qianwen, et al. Geometry and geodynamic mechanism of buckle folds in Hancheng mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(3): 801-809.
- 徐凤银, 龙荣生, 夏玉成, 等. 矿井地质构造定量评价及其预测[J]. 煤炭学报, 1991, 17(4): 93-102.
- XU Fengyin, LONG Rongsheng, XIA Yucheng, et al. Quantitative evaluation and prediction of mine geological structure[J]. Journal of China Coal Society, 1991, 17(4): 93-102.
- 杨帆, 李艳清. 浅析黄陵矿区瓦斯地质规律[J]. 陕西煤炭, 2019, 38(1): 88-90.
- YANG Fan, LI Yanqing. Research of gas geological law in Huangling mining area[J]. Shaanxi Coal, 2019, 38(1): 88-90.
- 杨燕敏. 薄煤层综采工作面智能化控制技术应用[J]. [江西煤炭科技](#), 2023(4): 244-246.
- YANG Yanmin. Key Technology Application of Intelligent Mining in Thin-seam Fully-mechanized Working Face[J]. [Jiangxi Coal Science and Technology](#), 2023(4): 244-246.
- 杨雨晨. 薄煤层采煤机智能控制关键技术研究[J]. [煤](#), 2023, 32(10): 43-46.
- YANG Yuchen. Research on Key Technology of Quick Control in Thin Seam Mining[J]. [Coal](#), 2023, 32(10): 43-46.
- 周云霞, 曹代勇. 矿井地质构造定量评价模型探讨[J]. [煤田地质与勘探](#), 2001(2): 16-19.
- ZHOU Yunxia, CAO Daiyong. Discussion on quantitative evaluation model of mine geological structure[J]. [Coal Geology and Exploration](#), 2001(2): 16-19.
- Roberts A. Curvature attributes and their application to 3D interpreted horizons[J]. [First Break](#), 2001, 19(2): 85-100.