



引文格式: 张华, 武书军, 张霞, 等. 东胜煤田新街台格庙矿区侏罗纪煤岩煤质特征及其高效利用评价[J]. 西北地质, 2026, 59(2): 264–279. DOI: 10.12401/j.nwg.2025098

Citation: ZHANG Hua, WU Shujun, ZHANG Xia, et al. Characteristics of Jurassic Coal Rock and Coal Quality in Xinjie Taigemiao Mining Area of Dongsheng Coalfield and Evaluation of Its High-Efficiency Utilization[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(2): 264–279. DOI: 10.12401/j.nwg.2025098

东胜煤田新街台格庙矿区侏罗纪煤岩煤质特征 及其高效利用评价

张华¹, 武书军², 张霞³, 王珏², 张锁², 董俊亮², 赵晓辰^{4,*}, 师庆民⁴, 徐军⁵, 冯泽一⁴

(1. 国家能源投资集团有限责任公司, 北京 100011; 2. 神华新街能源有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017200;
3. 鄂尔多斯市能源局, 内蒙古 鄂尔多斯 017000; 4. 西安科技大学地质与环境学院, 陕西 西安 710054;
5. 内蒙古矿业开发有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 010020)

摘要: 东胜煤田新街台格庙矿区位于内蒙古鄂尔多斯市伊金霍洛旗和乌审旗境内, 蕴含着丰富的煤炭资源, 属于中国西北地区大型煤炭基地的重要组成部分。然而, 目前尚未对该矿区的煤质进行综合评价, 严重制约其未来煤炭资源的清洁高效利用。鉴于此, 笔者系统整理了东胜煤田新街台格庙矿区多年来积累的煤田地质勘查资料, 综合分析了该矿区延安组煤的煤质、煤岩特征, 并结合煤炭洁净等级划分和各类煤炭清洁利用方向的评价指标体系, 全面评价了新街台格庙矿区延安组煤的洁净潜势和清洁利用方向。结果显示: 新街台格庙矿区延安组煤具有特低-低灰、特低-低硫、低有害元素、高热量的特征; 该矿区煤为优质的高清洁度动力用煤, 综合评价为 II 级动力用煤; 高焦油产率 (普遍 > 7%)、中-高挥发分、高固定碳、特低-低灰分、低水分的特征表明, 该矿区煤适用于中-低温热解提取煤焦油, 综合评价 I 级煤制焦油用煤; 无黏结性、低水分、较高氢碳原子比、高惰质组含量, 表明其也较适合于直接液化用煤。结合矿区发展规划目标, 综合分析认为新街台格庙矿区延安组煤清洁潜势较高, 优势的利用方向为清洁动力用煤和煤制焦油用煤。

关键词: 煤地质学; 煤岩; 煤质; 煤炭清洁利用; 延安组; 新街台格庙矿区

中图分类号: P624

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)02-0264-16

Characteristics of Jurassic Coal Rock and Coal Quality in Xinjie Taigemiao Mining Area of Dongsheng Coalfield and Evaluation of Its High-Efficiency Utilization

ZHANG Hua¹, WU Shujun², ZHANG Xia³, WANG Jue², ZHANG Suo², DONG Junliang²,
ZHAO Xiaochen^{4,*}, SHI Qingmin⁴, XU Jun⁵, FENG Zeyi⁴

收稿日期: 2025-04-20; 修回日期: 2025-05-27; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 国家重点研发计划青年科学家项目 (2024YFC2910500), 神华新街能源有限责任公司地勘服务项目 (xjgs-fw[2022] 138 号) 联合资助。

作者简介: 张华 (1983-), 男, 高级工程师, 从事煤矿开采技术及应用、矿山灾害防治等工作。E-mail: hua.zhang@ceic.com。

* 通讯作者: 赵晓辰 (1989-), 男, 副教授, 博士, 主要研究煤地质学、矿产普查与勘探等。E-mail: zxc@xust.edu.cn。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

- (1. China Energy Investment Corporation Co., Ltd., Beijing 100011, China; 2. Xinjie Energy, China Energy Investment Corporation Co., Ltd., Ordos 017200, Inner Mongolia, China; 3. Ordos Energy Bureau, Ordos 017000, Inner Mongolia, China; 4. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi China; 5. Inner Mongolia Mining Exploitation Co., Ltd., Hohhot 010020, Inner Mongolia, China)

Abstract: The Xinjie Taigemiao mining area of Dongsheng Coalfield contains rich coal resources, which is located in the Ejina Banner and Wushen Banner, Ordos City, Inner Mongolia Autonomous Region. However, the coal quality has not been comprehensively evaluated at present, which seriously restricts the clean and efficient utilization of coal resources in the future. Based on the abundant geological exploration data, we comprehensively analyze the coal quality and coal rock characteristics of the Yan'an Formation coal in the Xinjie Taigemiao mining area. Combined with the classification of coal cleanliness levels and the evaluation index system of various coal clean utilization directions, the clean potential and clean utilization direction of the Yan'an Formation coal in the Taigemiao mining area are comprehensively evaluated. The results show that the Yan'an Formation coal in the Taigemiao mining area has the characteristics of ultra-low ash, ultra-low sulfur, low harmful elements, and high calorific value. These characteristics indicate that the Yan'an Formation coal is high-quality, high cleanliness power coal, and is comprehensively evaluated as Class II power coal. The characteristics of high tar yield (generally > 7%), medium high volatile matter, high fixed carbon, ultra-low ash content, and low moisture content indicate that it is suitable for low-temperature pyrolysis extraction of coal tar (Class I). In addition, its cohesiveness, low moisture content, high hydrogen to carbon atomic ratio, and high inertinite contents, indicate that it is also suitable for liquefaction coal. Based on the development planning goals of the mining area, we proposed that the Yan'an Formation coal in the Taigemiao mining area has a high potential for clean energy, and the advantageous utilization directions are clean power coal and coal for tar production.

Keywords: coal geology; coal petrography; coal quality; clean utilization of coal; Yan'an Formation; Xinjie Taigemiao mining area

中国具有“相对富煤、缺油、少气”的资源禀赋特征,这也决定了在今后相当一段时期内,煤炭作为中国主体能源的地位不会改变(武强等, 2019; 王双明, 2020; 王国法等, 2021; 王双明等, 2024)。特别是中国2020年提出了“2030年前碳达峰、2060年前碳中和”的目标以来,煤炭的清洁高效利用更是成为了中国能源转型的必由之路和首要任务(王晓磊等, 2021)。煤炭清洁化利用是指通过各种技术手段,减少煤炭燃烧过程中的环境污染,提高能源利用效率(袁亮, 2020; 吕清刚等, 2022)。目前,煤炭的清洁高效利用主要包括煤中稀有元素利用(孙玉壮等, 2014; 代世峰等, 2014; 黄文辉等, 2019)、燃烧优化技术(余占鹏等, 2024)、气化与液化等技术(魏云迅等, 2022; 宁树正等, 2023; 尹甜等, 2024)。近年来,“富油煤(煤基油气资源)”新理念的提出,也为煤炭清洁高效利用开拓了新的方向(王双明, 2020; 王双明等, 2024; 段中会等, 2024),有望实现将富油煤从燃料向燃料+原料的转化,增加国内油气供给途径(郭晨等, 2021),对保障中国

能源供应具有重要意义(王双明, 2020)。

鄂尔多斯盆地以秦岭、阴山、吕梁山为界,横跨陕甘宁蒙晋多省区,面积为 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$,是世界级特大型能源盆地(刘池洋等, 2006)。鄂尔多斯盆地素有“半盆油、满盆气、遍地是煤”的美誉,是中国能源供给的重要基地,埋深2 000 m以浅的煤炭资源量约占全国的35.5%(邹才能等, 2024)。2022年,鄂尔多斯盆地原煤总产量占全国的34.2%,已成为中国重要的国家级能源基地,在煤炭生产保障国家能源供应方面不可或缺(邹才能等, 2024)。目前,针对鄂尔多斯盆地煤炭精细化分质开采与利用途径优化开展了一定的研究工作(杜芳鹏等, 2018, 2020, 2022; 雷亚军等, 2023),然而各个矿区/煤田该项工作开展程度的差异较大,严重制约了该大型煤炭生产基地的经济与社会综合效益的整体提升。因此,基于全面的煤岩、煤质和地质赋存特征,深化认识煤基本化学组成与工艺特征,完善不同地区煤炭资源分级评价,优化煤炭清洁利用途径,是实现鄂尔多斯盆地煤炭资源清洁高效利用的关

键,有助于重塑该盆地勘探开发新理念和新模式,对中国实现“双碳”目标具有重大意义。

新街台格庙矿区位于鄂尔多斯盆地北部,规划总面积为 681.03 km²,可采煤层 15 层,埋深为 519~921 m(倪炜等, 2023; 周爱平等, 2023a, 2023b)。矿区共规划 8 个井田,计划 2024 年一、二井开工建设,2027 年北部 4 个井田全部投产,2032 年南部 4 个井田全部投产(陈团团等, 2023; 周爱平等, 2023a)。故在其全面开发前,深入认识该矿区煤基本化学组成特点和工艺性质,并据此优化其未来煤炭利用途径极为必要。在此背景下,笔者以鄂尔多斯盆地北部新街台格庙矿区为研究区,开展全面、系统的煤岩、煤质综合研究与评价,为新街台格庙矿区乃至鄂尔多斯盆地煤炭分级分质、清洁高效利用提供参考依据。

1 地质概况

鄂尔多斯盆地为中国集煤、油、气及其他矿产于一盆的重要能源基地(吕鹏瑞等, 2025),其内部可划分为陕北斜坡、天环坳陷、晋西挠褶带、西缘冲断带、伊盟隆起及渭北隆起 6 个一级构造单元(刘池洋等, 2006)。新街台格庙矿区位于鄂尔多斯盆地北部伊盟隆起东部(图 1a),行政区划隶属内蒙古自治区鄂尔多斯市。矿区总体构造形态为 NW 向倾斜的单斜构造并发育有宽缓的波状起伏,地层倾角为 1°~3°。

矿区内地层由老到新依次为:中—下侏罗统延安组(J_{1-2y})、中侏罗统直罗组(J_{2z})、中侏罗统安定组(J_{2a})、下白垩统志丹群(K_{1zh})和第四系(Qh)。其中,延安组为一套陆源碎屑沉积,与下伏上三叠统延长组(T_{3y})呈不整合接触。根据其沉积旋回、煤层组合特征、物性特征,可将延安组划分为 3 段(图 1b)。延安组第一段位于延安组下部,从延安组底界至 5⁻¹煤层顶板。岩性下部为灰白色中粗粒砂岩,局部含细砾,砂岩成分以石英为主,分选好;中上部为灰白色细粒砂岩、粉砂岩及深灰色砂质泥岩、泥岩互层,具水平纹理及微波状层理。延安组第二段位于延安组中部,从 5⁻¹煤层顶板至 3⁻¹煤层顶板。岩性以灰白色中、细粒砂岩、深灰—灰黑色砂质泥岩为主、泥岩次之,砂岩成分以石英、长石为主,富含岩屑。延安组第三段位于延安组上部,从 3⁻¹煤层顶板至延安组顶界。岩性为灰白色粗、中粒砂岩,局部含砾夹深灰色粉砂岩、砂质泥岩及泥岩,其中含少量植物化石碎片。延安组

为矿区主要含煤地层,含 2、3、4、5、6 等 5 个煤组,发育煤层近 20 层,含可采煤层 15 层,主要可采煤层为较稳定型(图 1b)。其中,主要可采煤层由上至下依次为 2⁻¹、2⁻²[±]、2⁻²、3⁻¹、4⁻¹、5⁻¹、5⁻²、6⁻¹、6⁻²和 6⁻³等 10 个煤层为大部可采的较稳定煤层;2⁻¹[±]、3⁻²、5⁻³等煤层为局部可采的较稳定煤层。

直罗组(J_{2z})与下伏延安组呈平行不整合接触,上部岩性组合为灰绿色砂质泥岩、粉砂岩呈互层出现;中部为灰绿、青灰色中—粗砂岩,局部夹粉砂岩、砂质泥岩薄层,底部为一套灰绿、青灰色砾岩或含砾粗粒砂岩。安定组(J_{2a})与下伏直罗组呈整合接触,岩性组合为紫色或棕红色细—粗粒砂岩夹紫红、灰绿色砂质泥岩、泥岩粉砂岩。志丹群(K_{1zh})与下伏地层安定组呈角度不整合接触,岩性组合为一套浅紫、粉红色细砂岩与灰白色中—细砂岩互层,砂岩成分以石英、长石为主,分选及磨圆度较差,具大型槽状、板状斜层理。第四系(Qh)主要为现代风积、冲洪积、冲积、湖积等成因类型的全新统堆积物。

2 煤岩特征

富镜质组是新街台格庙矿区各煤层显微煤岩组分最鲜明的特征,镜质组体积分数平均值达到 64.62%(含矿物基);惰质组体积分数明显低于镜质组,占 34.71%;壳质组含量较低,平均值为 0.57%。矿物体积分数平均值为 6.90%,以黏土类为主,其次为碳酸盐类、硫化物矿物、氧化硅矿物(图 2)。此外,整理分析已有地质勘查资料发现,东胜煤田新街台格庙矿区镜质体平均最大反射率为 0.52%~0.65%,平均为 0.59%,整体属于低阶烟煤—中阶烟煤(表 1)。与鄂尔多斯盆地其他煤田相比,新街台格庙矿区延安组煤表现出镜质组明显较高,但惰质组和壳质组相对偏低的特点(表 1)。此外,新街台格庙矿区延安组煤的镜质体反射率均较低(表 1)。这些差异与盆地不同构造位置煤层的赋存特征有关。

3 煤质特征

3.1 工业分析特征

新街台格庙矿区的各煤层水分(M_{ad})产率为 0.2%~14.04%,平均为 4.96%(N=13 730),全部分布在 15% 以下,为低水分煤(图 3a);各煤层原煤灰分(A_d)产率为

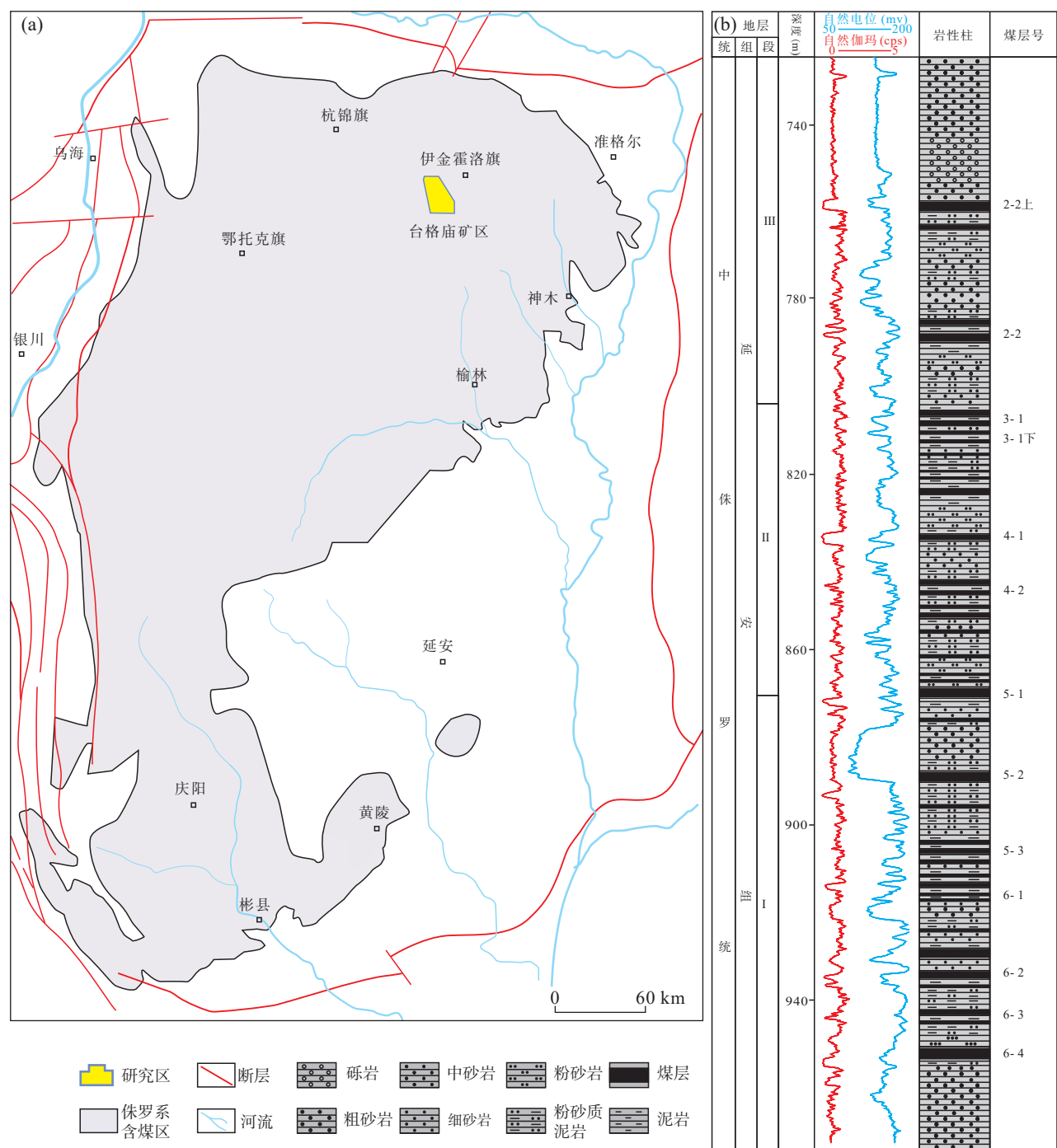


图1 新街台格庙矿区区域位置(a)及延安组地层柱状图(b)

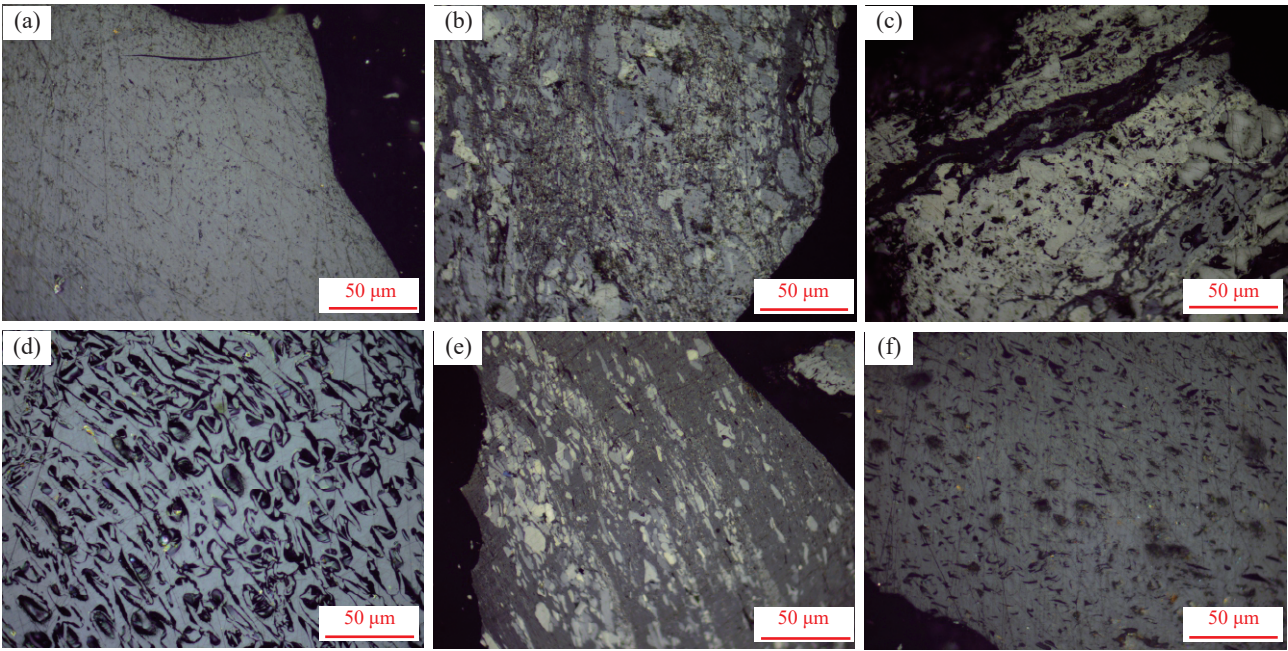
Fig. 1 (a) Regional location of Xinjie Taigemiao mining area and (b) stratigraphic column of Yan'an Formation

0.59%~55.73%, 平均为 9.93%(N=13 681), 集中分布在 12% 以下, 主要为特低灰煤, 低灰分煤次之(图 3b); 各煤层原煤挥发分(V_{daf})产率为 22.08%~50.95%, 平均为 33.8%(N=13 726), 集中分布在 28% 以上, 主要为中高-高挥发分煤(图 3c); 煤的固定碳实验结果显示, 煤样固定碳(FC_d)含量介于 46.96%~77.24%, 平均为 60.42%(N=534)。数据频率分布显示, 固定碳主要介于 55%~

70%, 属于中等固定碳煤和中-高固定碳煤(图 3d)。

3.2 元素组成

测试结果显示, 煤中 5 种主要元素含量由高到低依次为 C、O、H、N、S。C 元素平均质量分数大多在 80% 以上, 基于频率分布进一步分析 C 元素含量主要介于 79%~84%(图 4a), H 元素主要介于 4%~5.5%(图 4b), O 元素含量主要介于 9%~14%(图 4c), N 元



a. 均质镜质体; b. 碎屑镜质体; c. 角质体; d. 结构镜质体; e. 基质镜质体胶结碎屑镜质体; f. 半丝质体

图2 典型显微微组分照片

Fig. 2 Photographs of different macerals

表 1 新街台格庙矿区侏罗系各煤层及其他煤田显微煤岩组分平均值统计(部分数据据杜芳鹏等, 2020)

Tab. 1 Average value statistics of micrarite components of Jurassic coal seams and other coal fields in Xinjie Taigemiao mining area

煤田/矿区	煤层	镜质组V(%)	惰质组I(%)	壳质组E(%)	矿物(%)	反射率Rmax(%)
台格庙矿区	2 ⁻¹	72.72	27.10	0.40	6.21	0.57
	2 ⁻²	58.03	40.98	0.90	5.42	0.58
	2 ^{-2上}	60.30	38.96	0.77	5.41	0.59
	3 ⁻¹	59.93	39.25	0.71	7.81	0.59
	3 ^{-1下}	65.80	33.01	0.33	7.66	0.58
	3 ⁻²	62.39	37.57	0.20	6.68	0.59
	4 ⁻¹	81.10	18.90	/	5.20	0.66
	5 ⁻¹	63.21	36.40	0.24	5.96	0.59
	5 ⁻²	59.55	38.63	0.96	4.94	0.61
	5 ⁻³	78.88	20.60	0.60	15.50	0.56
	6 ⁻¹	50.39	47.70	0.61	6.26	0.57
	6 ⁻²	52.05	47.34	0.61	9.31	0.59
	6 ^{-2下}	83.10	16.90	/	3.30	0.61
	6 ⁻³	57.30	42.58	0.45	6.92	0.61
	平均	64.62	34.71	0.57	6.90	0.59
陕北侏罗纪煤田	/	54.60	40.70	1.80	3.20	0.59
黄陇侏罗纪煤田	/	60.70	27.40	2.60	9.70	0.66
宁南煤田	/	61.60	29.70	0.60	8.10	0.62
陇东煤田	/	58.60	34.70	3.10	6.80	0.63
宁东煤田	/	38.90	52.64	1.76	6.64	0.56

素主要介于 0.9%~1.5%(图 4d)。新街台格庙矿区的各煤层原煤磷分为 0.43% 以下, 平均为 0.015%(N=10 204), 集中分布在 0.1% 以下(图 4e), 主要为低磷分煤, 中磷分煤和特低磷煤次之。各煤层原煤全硫含量

为 0.03%~5.01%, 平均为 0.61%(N=10 784), 集中分布在 0.9% 以下(图 4f), 主要为特低硫煤、低硫煤, 中硫煤次之; 形态硫方面, 硫化物硫(S_{p,d})和有机硫(S_{o,d})是煤中硫的主要存在形态, 硫酸盐硫(S_{s,d})含量极低。所

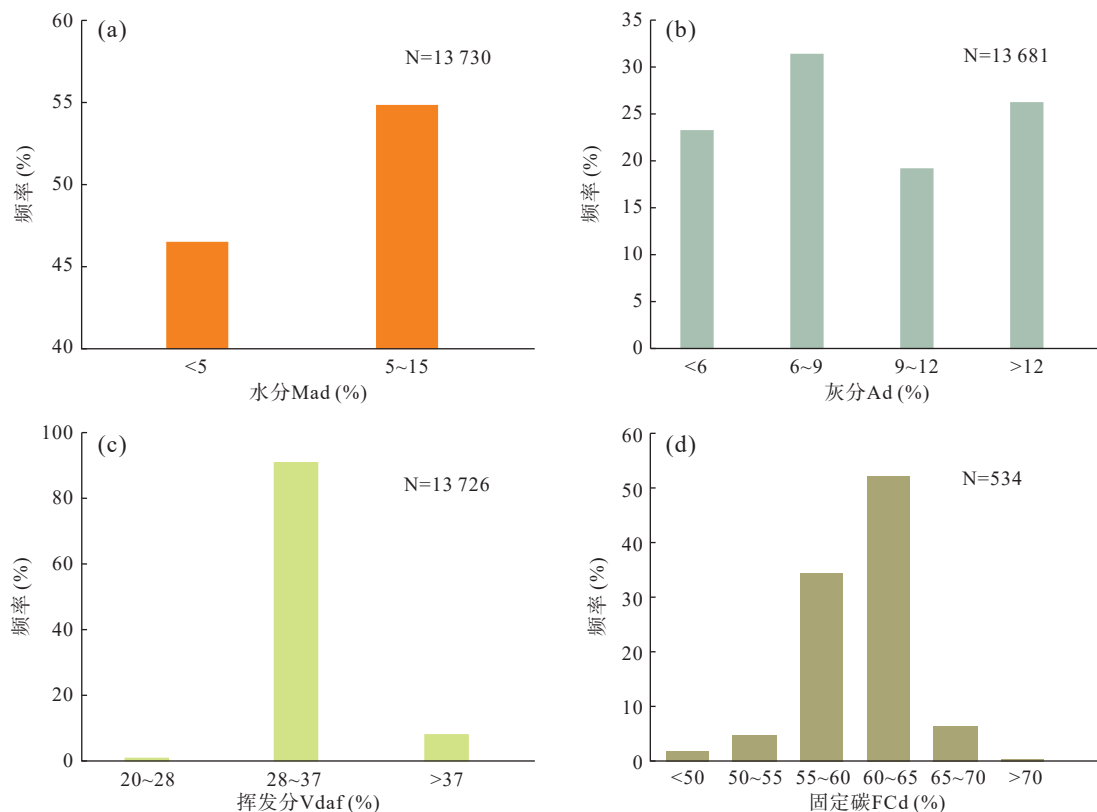


图3 工业分析特征频率直方图

Fig. 3 Industrial analysis feature frequency histogram

有煤层皆富含硫化物硫和有机硫, 其中 2^{-1} 煤层、 2^{-1+} 煤层、 2^{-2+} 煤层和 3^{-2} 煤层以硫化物硫占明显优势(图5)。各煤层原煤碳氢原子比为 0.39~0.90, 平均为 0.68 (N=4 704), 主要介于 0.6~0.8(图6)。

3.3 煤灰成分

煤灰成分测试结果显示, 产率由高到低前 6 位依次是 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 Fe_2O_3 、 SO_3 和 P_2O_5 , 其他灰成分产率均比较低(图7)。

此外, 煤灰成分中, SiO_2 和 Al_2O_3 呈现较为明显的正相关性, 反映二者来源的基本一致性, 即陆源碎屑矿物。煤中常见的铝硅酸盐矿物主要为黏土矿物和长石两类, 由于灰成分中 K_2O 和 Na_2O 含量很低, 且 CaO 与 Al_2O_3 、 SiO_2 均呈负相关, 基本可排除为长石的可能性。因此, SiO_2 和 Al_2O_3 应主要来源于煤中的黏土矿物与石英, 以黏土矿物为主。 CaO 应主要来源于方解石, 非长石或黏土矿物。灰成分 K_2O 具有特殊性, 虽然其平均产率最低, 但与灰分产率呈正相关(图8)。 K_2O 产率较高的煤样普遍灰分产率较高, 说明 K_2O 是一种重要的指示性灰成分类型, 推测其来源于含钾黏土矿物。

煤灰成分三端元图中, 多数样品数据分布于

$\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2$ 主导区域(右下), 少数样品分布于 $\text{CaO}+\text{MgO}$ 的主导区域(上部), 个别样品分布在 Fe_2O_3 主导区域(左下)(图9)。因此, 可以推测黏土矿物应为煤中的主要矿物类型, 其次为碳酸盐矿物(方解石)及少量黄铁矿。

3.4 工艺指标特征

煤的格金低温干馏实验结果显示, 煤样焦油产率介于 1%~17.67%, 平均为 9.58%。数据频率分布显示焦油产率主要为 7%~12%, 大部分煤样的焦油产率大于 7%(图10), 达到富油煤和高油煤水平, 表现出新街台格庙矿区鲜明的煤质特色。本矿区煤具有优良的热解产油潜力和广阔的煤制焦油发展空间。

低位发热量($Q_{\text{net,ad}}$)为 8.8~35.59 MJ/kg, 平均为 28.96 MJ/kg, 主要介于 25~35 MJ/kg(图11a)。其中, 干燥基高位发热量 $Q_{\text{gr,d}}$ 是煤质分级评价选用的发热量指标, $Q_{\text{gr,d}}$ 主要介于 12.49~36.45 MJ/kg, 平均为 29.80 MJ/kg。根据《煤炭质量分级第3部分发热量》(GB/T15224.3—2010), 研究区煤大多属于高发热量煤, 中高发热量煤次之, 少数样品为中发热量煤(图11b)。煤的粘结指数实验结果显示, 煤样粘结指数介于 0~27, 平均为 0.93(N=3 018)。数据频率分布显示, 粘

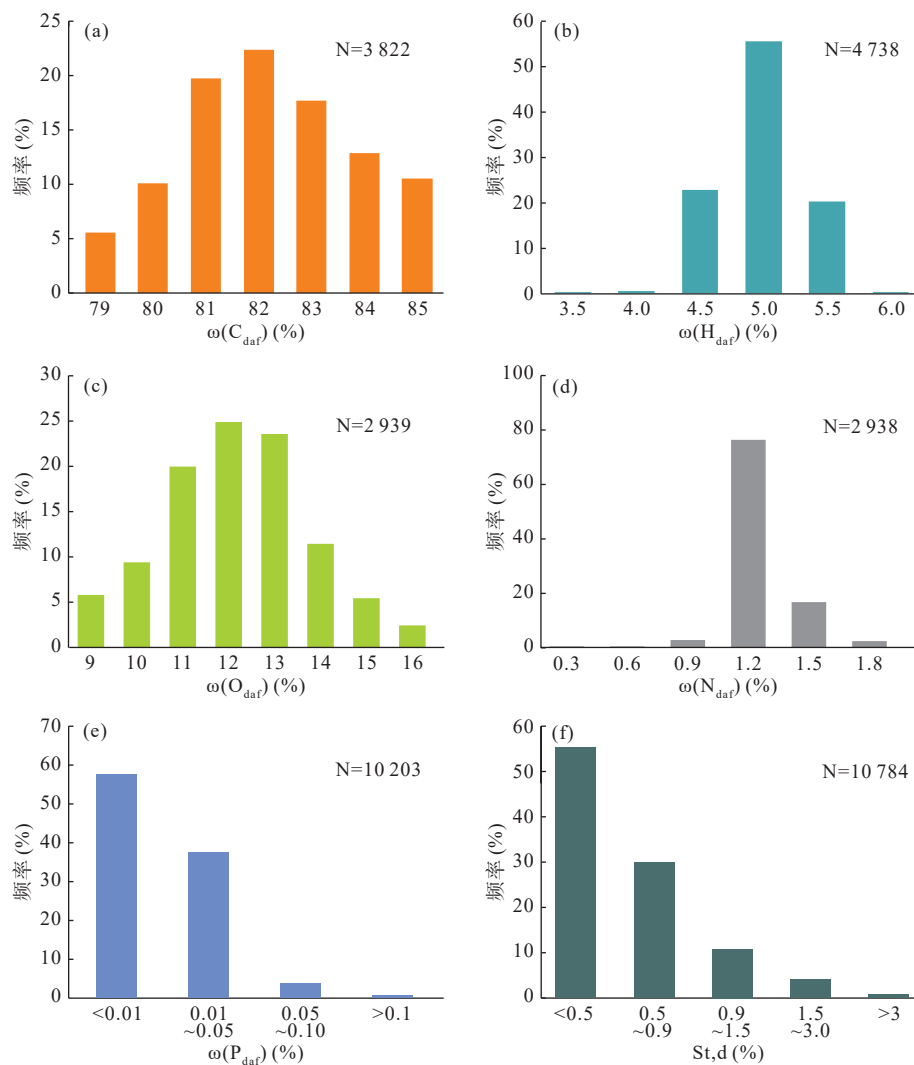


图4 煤中主要元素含量分布频率图

Fig. 4 Distribution frequency of main elements in coal

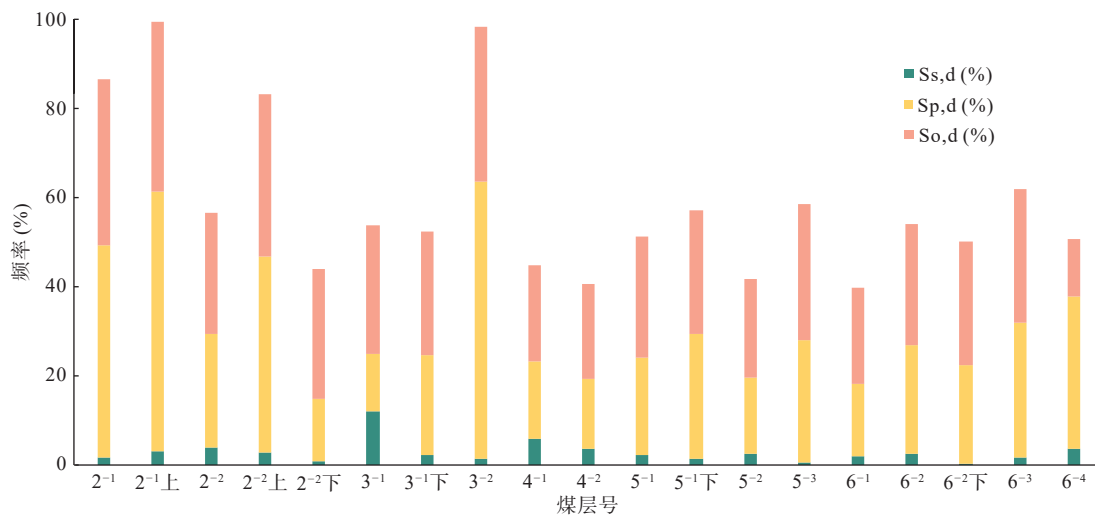


图5 煤样形态硫分布比例

Fig. 5 Sulfur distribution ratio of coal samples

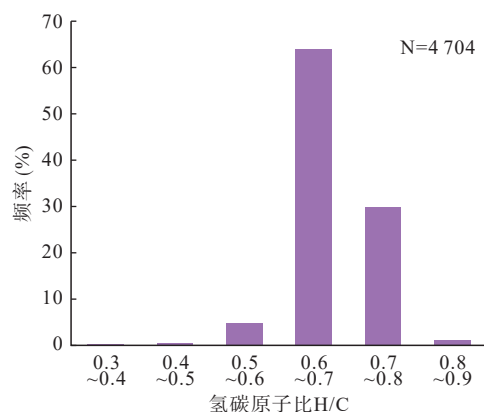


图6 氢碳原子比频率分布直方图

Fig. 6 Histogram of frequency distribution of hydrogen carbon atom ratio

结指数主要介于0~5,属于不粘结煤,剩余属于弱粘结煤(图11c)。

一般而言,煤的热稳定性通常以 TS_{+6} 、 TS_{3-6} 、 TS_3 等3个参数评价。其中, TS_{+6} 为热稳定性指标, TS_{3-6} 和 TS_3 为辅助指标。 TS_{+6} 数值越高,代表煤热稳定性越好,即能以较大粒度完成燃烧或气化过程(郭晨等,2021)。测试结果显示, TS_{+6} 介于29.97%~96.37%,平均为84.22%(图11d),主要介于85%~95%; TS_{3-6} 为2.07%~19.8%,

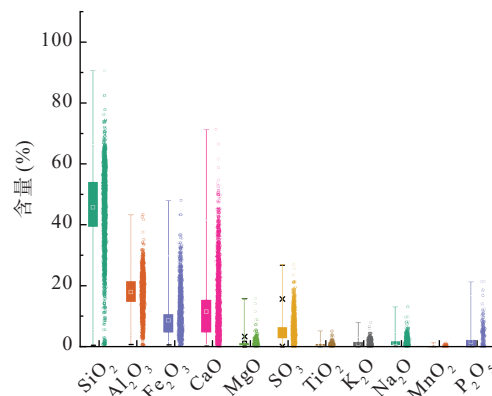


图7 煤灰成分数据分布箱型图

Fig. 7 Coal ash composition data distribution box diagram

平均为14.3%,主要介于4%~12%(图11e); TS_3 为1.18~22.14%,平均为5.3%(图11f)。根据煤的热稳定性分级标准(MT/T560—2008),研究区煤样总体热稳定性良好,为高-中高热稳定性煤。

煤灰的熔融性用 $DT^{\circ}C$ (变形温度)、 $ST^{\circ}C$ (软化温度)、 $HT^{\circ}C$ (半球温度)和 $FT^{\circ}C$ (流动温度)来代表煤灰的不同熔融状态,并决定了煤燃烧和气化过程中煤灰结渣的难易程度。灰熔融性是常压固定床等气化床型的关键指标,温度越高,煤灰越不易结渣,气化性能

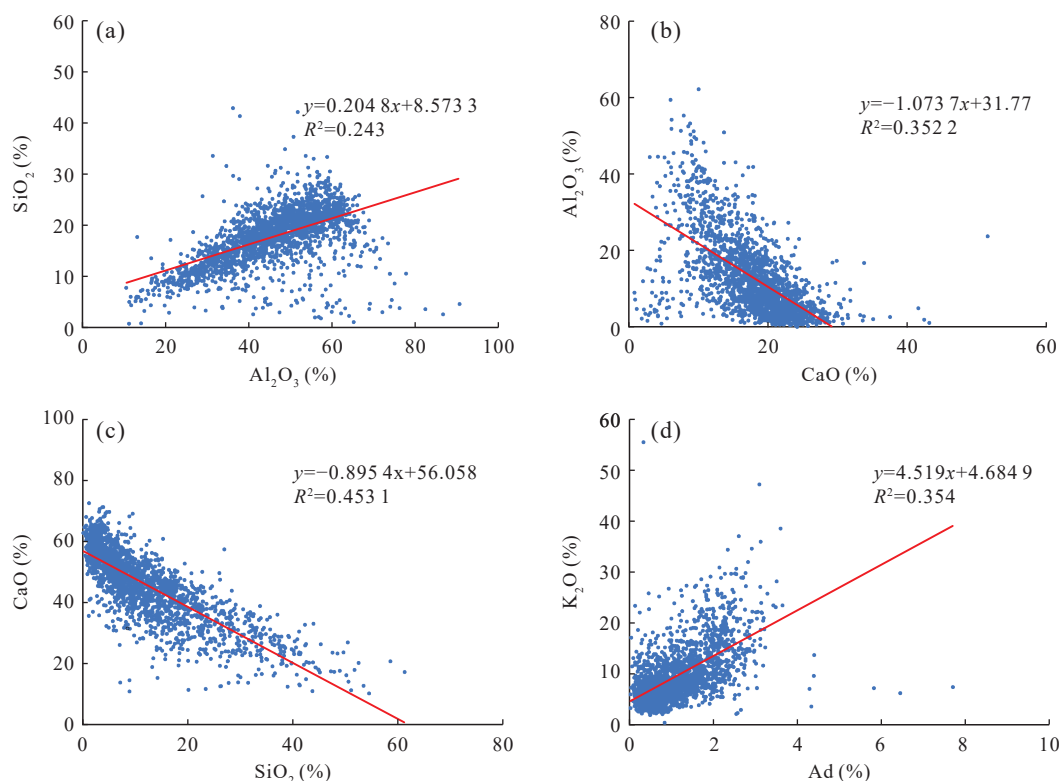


图8 煤灰成分相关性分析

Fig. 8 Correlation analysis of coal ash composition

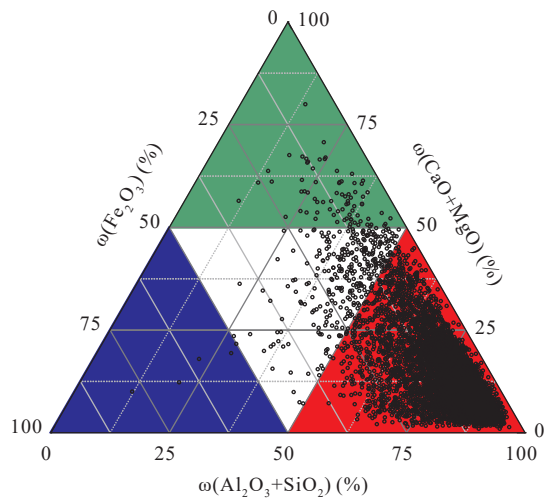


图9 煤灰成分三端元分布

Fig. 9 Three-terminal distribution of coal ash composition

越好。测试结果显示, 煤灰变形温度主要为 1 150~1 250 °C; 软化温度主要为 1 150~1 300 °C, 主要为较低软化温度灰和中等软化温度灰; 半球温度主要为 1 150~1 300 °C(图 12); 流动温度主要为 1 150~

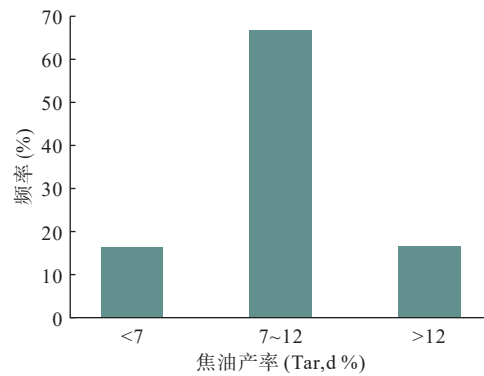


图10 主要可采煤层原煤焦油产率箱型分布图

Fig. 10 Box distribution map of raw coal tar yield in main recoverable coal seams

1 350 °C, 属于较低流动温度灰和中等流动温度灰级别。总体上, 研究区煤灰熔融性变化幅度较小。

4 有害元素

有害元素的评价是煤炭清洁利用的前提, 本次研

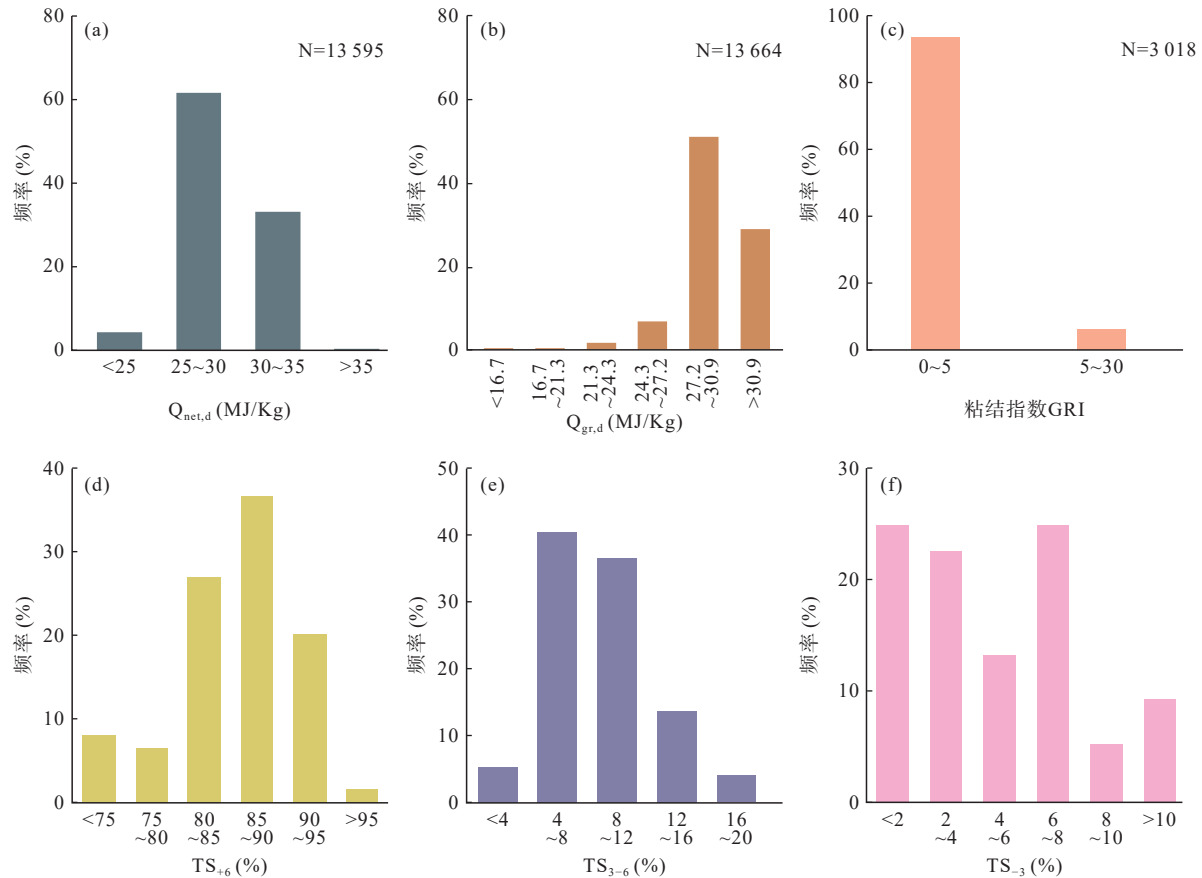


图11 工艺指标特征频率直方图

Fig. 11 Process index characteristic frequency histogram

究重点针对煤中 F、Cl、As 元素含量及赋存状态进行分析。F 是煤中挥发性较强的有害元素,在煤的开采、加工利用及燃煤过程中释放的氟易对环境造成巨大污染。矿区各煤层原煤氟含量测试数据显示, F 含量为 5~755 $\mu\text{g/g}$, 平均为 85 $\mu\text{g/g}$ ($N=8\ 879$), 以特低氟煤为主, 低氟煤次和中氟煤次之(图 13a)。矿区各煤层原煤 Cl 含量低于 0.375%, 平均为 0.057% ($N=9\ 882$)。其中, 特低氯煤(氯含量 $\leq 0.05\%$)占比为 76.26%, 低氯煤(0.05%~0.15%)占比为 2.99%(图 13b)。As 作为工类环境敏感元素, 对生态环境和人体健康危害极大。矿区内各煤层原煤 As 含量为 0~40 $\mu\text{g/g}$, 平均为 1.84 $\mu\text{g/g}$ ($N=9\ 617$)。其中, 94.54% 的样品原煤 As 含量 < 4.0 $\mu\text{g/g}$, 属一级含砷煤; 5.46% 的样品的原煤 As 含量大于 4.0 $\mu\text{g/g}$, 为二级含砷煤(图 13c)。

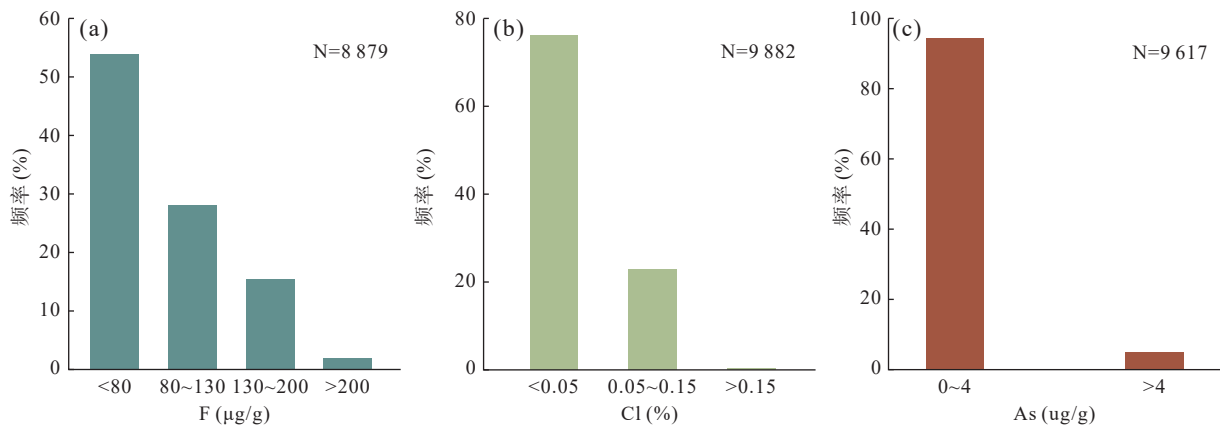


图13 有害元素频率直方图

Fig. 13 Harmful element frequency histogram

5 清洁利用方向探讨

5.1 煤炭洁净等级评价

前人已总结出较为成熟的煤炭清洁利用潜势评价体系(唐书恒等, 2005, 2006; 杨淑婷等, 2011), 笔者在已有评价标准基础上, 选择硫分(S_{td})、灰分(A_d)、Cl 元素、F 元素、As 砷等评价因子对新街台格庙矿区延安组煤层进行洁净等级划分。新街台格庙矿区延安组煤中硫分、灰分、Cl 元素、F 元素属于 II 级好洁净煤, As 元素属于 I 级特好洁净煤。根据煤炭资源结晶潜势评价“就高不就低”的原则, 综合评定台格庙矿区延安组煤属于 II 级, 属于好洁净煤(表 2)。

5.2 煤炭清洁利用方向探讨

在新街台格庙矿区延安组煤清洁利用方向综合

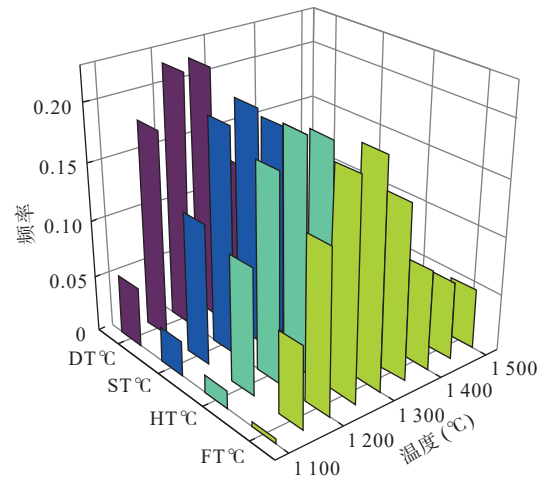


图12 熔融性频率直方图

Fig. 12 Fusibility frequency histogram

分级中, 本次采用单项指标依次叠加、叠加指标归属最低级的原则, 即不同单项指标叠加后的区域均归属各单项 I 级指标时, 煤炭用途分级为 I 级。其中, 归属某一项指标 II 级时, 煤炭用途分级为 II 级; 归属某一项指标 III 级时, 煤炭用途分级为 III 级。

5.2.1 动力用煤

动力用煤是将煤的内能转变为热能, 然后通过膨胀机把热能再转变成动能的用煤, 其核心评价指标为煤的发热量。此外, 挥发分(V_{daf})、灰分(A_d)、全水分(M_t)等也影响着动力用煤的质量(李静琴等, 2017; 雷亚军等, 2023)。新街台格庙矿区延安组煤发热量均值大于动力用煤 I 级发热量 25.12 MJ/kg 的要求(均值为 29.80 MJ/kg), 属于高-中高发热量煤。新街台格庙矿区延安组煤硫分产率为 0.03%~5.01%, 平均为 0.61%, 满足硫分 II 级指标(0.5%~1.0%)的要求; 挥发分产率

为 22.08%~50.95%, 平均值 33.8%, 主要为中高-高挥发分煤, 满足动力用煤硫分 I 级指标的要求 (>28%); 灰分产率为 0.59%~55.73%, 平均值 9.93%, 满足灰分 I 级指标的要求 (≤20%); 水分产率为 0.20%~14.04%, 平均值 4.96%, 小于 20% 水分 I 级指标的要求 (≤8.0%) (表 3)。因此, 可将新街台格庙矿区延安组煤评价为动力用煤 II 级。

5.2.2 煤制焦油用煤/中低温热解用煤

富油煤是集煤、油、气属性于一身的煤基油气资源(王双明等, 2021, 2024), 将其在隔绝空气的低温 (500~700 ℃) 条件下进行干馏, 可生产出半焦、焦油、煤气等产品。其中, 焦油可进一步深加工为汽油、柴油等产品, 增加煤炭附加值的同时, 也增加了其利用的清洁度(曾凡虎等, 2013; 罗腾, 2017)。《矿产资源工业要求手册(2014 年修订版)》依据低温干馏焦油产

率($T_{ar,d}$)将煤炭划分为含油煤($T_{ar,d} \leq 7\%$)、富油煤($7\% < T_{ar,d} \leq 12\%$)和高油煤($T_{ar,d} > 12\%$); 煤炭行业标准《煤中焦油含量分级》(MT/T 1179—2019)也将焦油产率大于 7% 的煤炭氛围中、高、特高油产率煤(王双明等, 2022)。

新街台格庙矿区延安组煤焦油产率平均 9.58%, 数据频率分布显示焦油产率主要为 7%~12%, 大部分煤样的焦油产率大于 7%(图 10), 达到富油煤和高油煤水平, 可以作为中低温热解用煤使用。此外, 煤焦油热解用煤以产出更多的焦油及品质更好的轻质焦油为目的。因此, 挥发分(V_{daf})、固定碳(FC_d)、水分(M_t)、灰分(A_d)也是影响其焦油品质的关键指标(雷亚军等, 2023; 董伸培等, 2023)(表 4)。据新街台格庙矿区煤质指标, 挥发分产率平均值为 33.8%, 大于煤制焦油挥发分 I 级指标大于 30% 的要求; 固定碳平均值

表 2 洁净煤分级标准及新街台格庙矿区洁净煤潜势

Tab. 2 Classification standard of clean coal and potential of clean coal in Xinjie Taigemiao mine area

洁净等级	$S_{t,d}(\%)$	$A_d(\%)$	$Cl(\%)$	$F(\mu g \cdot g)$	$As(\mu g \cdot g)$	等级名称
I	≤ 0.5	≤ 5	$\leq 0.050\ 0$	≤ 80	≤ 4	特好洁净煤
II	$> 0.5 \sim 1$	$> 5 \sim 10$	$> 0.050\ 0 \sim 0.078\ 2$	$> 80 \sim 100$	$> 4 \sim 6$	好洁净煤
III	$> 1.0 \sim 1.5$	$> 10 \sim 20$	$> 0.078\ 2 \sim 0.122\ 5$	$> 100 \sim 126$	$> 6 \sim 10$	较好洁净煤
VI	$> 1.5 \sim 2.0$	$> 20 \sim 30$	$> 0.122\ 5 \sim 0.191\ 7$	$> 126 \sim 159$	$> 10 \sim 16$	中等洁净煤
V	$> 2.0 \sim 3.0$	$> 30 \sim 40$	$> 0.191\ 7 \sim 0.300\ 0$	$> 159 \sim 200$	$> 16 \sim 25$	较差洁净煤
VI	$> 3.0 \sim 4.5$	$> 40 \sim 50$	$> 0.300\ 0 \sim 0.469\ 0$	$> 200 \sim 251$	$> 25 \sim 40$	差洁净煤
研究区	0.61	9.93	0.057%	85	1.84	/
分类评级	II	II	II	II	I	/
综合评级			II			好洁净煤

表 3 清洁动力用煤指标分级标准

Tab. 3 Index classification standard for clean power coal

评价指标	符号	单位	级别	技术要求	研究区	等级评定
发热量	$Q_{net,ar}$	MJ/kg	I 级	> 25.12	29.80	I 级
			II 级	$20.93 \sim 25.12$		
			III 级	$16.75 \sim 20.93$		
			IV 级	< 16.75		
硫分	$S_{t,d}$	%	I 级	< 0.5	0.61	II 级
			II 级	$0.5 \sim 1.0$		
			III 级	$1.0 \sim 2.0$		
			IV 级	$2.0 \sim 3.0$		
挥发分	V_{daf}	%	I 级	> 40	33.8	I 级
			II 级	> 28		
			III 级	$37 \sim 40$		
			IV 级	$28 \sim 37$		
灰分	A_d	%	I 级	≤ 20	9.93	I 级
			II 级	$20 \sim 30$		
			III 级	$30 \sim 40$		
			IV 级	≤ 8.0		
水分	M_t	%	I 级	≤ 8.0	4.96	I 级
			II 级	$8.1 \sim 12$		
			III 级	$12 \sim 20$		
			IV 级	> 20		

为 60.42%, 满足煤制焦油用煤固定碳 I 级指标 $\geq 50\% \sim 60\%$ 的要求; 水分平均值为 4.96%, 满足煤制焦油用煤水分 I 级指标小于 8.00% 的要求; 灰分平均值为 9.93%, 满足煤制焦油用煤灰分小于 10.00% 的 I 级指标。因此, 综合评定新街台格庙矿区延安组煤为热解焦油用煤 I 级。

表 4 煤制焦油用煤指标分级标准

Tab. 4 Standard for classification of coal used in coal tar production

评价指标	符号	单位	级别	技术要求	研究区相应指标 (%)	等级评定
焦油产率	$T_{ar,d}$	%		> 7	9.58	/
水分	M_t	%	I 级	≤ 8	4.96	I 级
			II 级	$> 8 \sim 10$		
灰分	A_d	%	I 级	≤ 10.0	9.93	I 级
			II 级	$> 10.0 \sim 20$		
挥发分	V_{daf}	%	I 级	$> 30 \sim 40$	33.8	I 级
			II 级	≤ 30		
固定碳	FC_d	%	I 级	$> 50 \sim 60$	60.42	I 级
			II 级	≤ 50		

5.2.3 直接液化用煤

煤炭液化技术是一种将高品质固态煤炭通过化学加工转化为液态化工产品(如液态油或烃类化学燃料)的先进技术(张松, 2023)。煤炭的高效液化可生成大量的液态烃类产物, 同时也实现了煤炭的清洁利用, 能

够较好地满足新形势下工业发展和人民生活的需求。

参照《直接液化用原料煤技术条件》(GB/T23810—2009)中煤质技术要求, 以及赵刚等(2024)、张建强等(2022)的划分标准, 笔者对新街台格庙矿区延安组煤液化用煤进行评价, 具体评价指标见表 5。

表 5 直接液化用煤指标分级标准

Tab. 5 Index classification standard of coal for liquefaction

等级评定	挥发分 $V(\%)$	镜质体最大反射率 $Ro, \max(\%)$	氢碳原子比 H/C	惰质组 $I(\text{vol.}\%)$	灰分 $A_d(\%)$
I	> 35	< 0.65	> 0.75	≤ 15	≤ 12
II			$0.70 \sim 0.75$	$15 \sim 35$	$12 \sim 25$
研究区	33.8%	0.59	0.68	34.71	9.93%
分类评级	II (部分)	I	II (部分)	II	I

据新街台格庙矿区煤质指标, 挥发分平均值为 33.8%, 部分煤层满足直接液化用煤挥发分 > 35 的要求; 镜质体最大反射率平均值为 0.59%, 满足直接液化用煤镜质体最大反射率小于 0.65 的指标; 氢碳原子比平均值为 0.68, 部分煤层满足直接液化用煤氢碳原子比 II 级的指标, 惰质组含量平均值为 34.71%, 满足直接液化用煤惰质组含量评价的 II 级指标; 灰分平均值为 9.93%, 满足直接液化用煤灰分评价的 I 级指标。因此, 综合评定新街台格庙矿区延安组煤部分为直接液化用煤 II 级。

5.2.4 煤制兰炭用煤

兰炭是将无黏结性或弱黏结型煤在中低温条件下, 干馏热解得到的固体炭质产物。兰炭具有固定碳高、比电阻高、反应性高、发热量高等优良特点。近年来, 兰炭企业形成了多用途利用的产业链, 发展并形成以煤的中低温干馏工艺为起点的煤—炼焦—焦油加工—炭素产业结构链, 以及煤炭和富余的煤气为原

料合成气制乙二醇、甲醇—精细化工等平台。根据《兰炭用煤技术条件》(GB/T25210—2010), 兰炭用煤适用于长焰煤、不粘煤和弱粘煤, 其指标分级标准如表 6。

据新街台格庙矿区煤质指标, 水分平均值为 4.96%, 满足煤制兰炭用煤水分 I 级指标小于 8.00% 的要求; 灰分平均值为 9.93%, 满足煤制兰炭用煤灰分 $> 5.00 \sim 10.00$ 的 II 级指标; 全硫含量平均值 0.61%, 满足煤制兰炭用煤 $> 0.50 \sim 1.00$ 的 III 级指标; 磷分含量平均值 0.015%, 满足煤制兰炭用煤 $> 0.010 \sim 0.030$ 的 II 级指标; 氧化铝含量平均值为 1.85%, 满足煤制兰炭用煤的 II 级指标; 固定碳平均值为 60.42%, 满足煤制兰炭用煤 $\geq 50\% \sim 60\%$ 的 I 级指标要求。因此, 综合评定新街台格庙矿区延安组煤为煤制兰炭用煤 III 级。

综上所述, 基于新街台格庙矿区延安组煤岩、煤质资料的综合分析, 该矿区侏罗纪煤的主要清洁利用途径为煤制焦油用煤(I 级)、动力用煤(II 级)、液化用煤(II 级)、煤制兰炭用煤(III 级)(图 14)。事实上,

表 6 兰炭用煤指标分级标准
Tab. 6 Standard for coal index classification of semi-coke

评价指标	符号	单位	级别	技术要求	研究区相应指标 (%)	等级评定
全水分	M_t	%	I级	≤ 8.0	4.96%	I级
			II级	$> 8.0 \sim 12.0$		
			III级	$> 12.0 \sim 16.0$		
灰分	A_d	%	I级	≤ 5.0	9.93%	II级
			II级	$> 5.00 \sim 10.00$		
			III级	$> 10.00 \sim 15.00$		
全硫	$S_{t,d}$	%	I级	≤ 0.30	0.61%	III级
			II级	$> 0.30 \sim 0.50$		
			III级	$> 0.50 \sim 1.00$		
磷	P_d	%	I级	≤ 0.010	0.015%	II级
			II级	$> 0.010 \sim 0.030$		
			I级	≤ 1.00		
氧化铝 ^a	$\omega(Al_2O_3)$	%	II级	$> 1.00 \sim 2.00$	1.85	II级
			III级	$> 2.00 \sim 3.00$		
			I级	$\geq 50 \sim 60$		
固定碳	FC_d	%	II级	< 50	60.42%	I级

^a 煤中氧化铝含量的计算方法： $\omega(Al_2O_3) = \frac{\omega_1(Al_2O_3) \times A_d}{100}$

新街台格庙矿区作为国家煤炭战略储备基地,计划以其丰富的煤炭资源为依托,建设成为绿色、安全、高

效、智能的大型现代化矿区(倪炜等, 2023; 周爱平等, 2023a)。此外,需要对标双碳目标,力争实现投产即

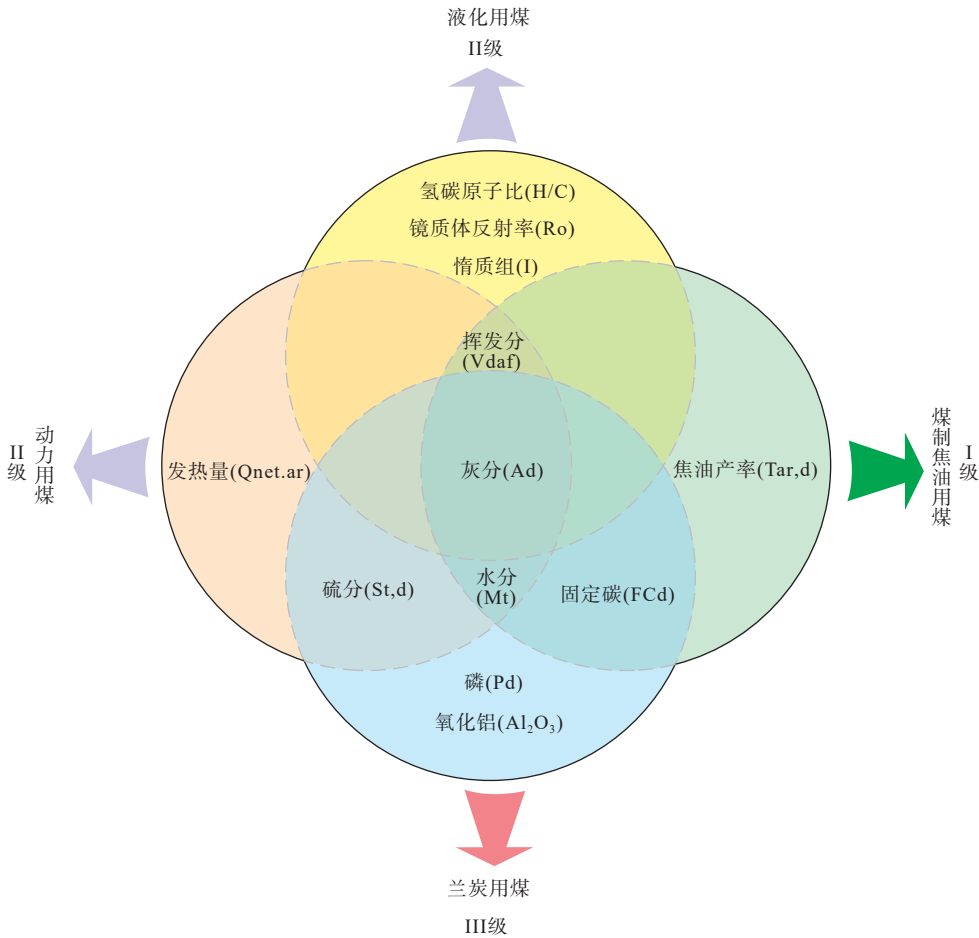


图14 台格庙矿区延安组煤清洁利用方向

Fig. 14 Clean utilization direction of Yanan Formation coal in Tagemiao mining area

达峰的目标(周爱平等, 2023b)。为了契合这一发展目标, 在新街台格庙矿区未来的发展建设过程中, 建议充分利用该矿区富油煤蕴含的油气资源潜力, 探索科学、高效的“取氢留碳”的开发技术, 应重点加快富油煤热解、半焦综合利用、煤气和焦油深加工等技术研发, 实现梯级化充分利用煤中固定碳、油、气等资源。

6 结论

(1)鄂尔多斯盆地新街台格庙矿区延安组煤镜质组含量平均为 64.62%, 惰质组含量平均为 34.71%, 壳质组含量平均为 0.57%; 镜质体最大反射率为 0.52%~0.65%, 平均为 0.59%, 属于低阶烟煤—中阶烟煤, 具有低灰、低硫、特低—低磷、低有害元素、高发热量、高焦油产率等特征。

(2)新街台格庙矿区延安组煤洁净等级综合评价为Ⅱ级, 属于好洁净煤。煤岩、煤质指标评价结果显示, 新街台格庙矿区延安组煤属于Ⅰ级煤制焦油用煤、Ⅱ级动力用煤、Ⅱ级直接液化用煤、Ⅲ级煤制兰炭用煤, 即清洁利用方向为清洁动力用煤和煤制焦油用煤。结合矿区发展目标, 建议优先新街台格庙矿区煤制焦油用煤方向, 挖掘煤中的油气资源潜力, 实现其固定碳、油、气的梯级化、高效化、综合化利用。

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References):

- 陈团团, 辛德林, 李臣. 新街台格庙矿区高质量发展规划评价研究[J]. 煤化工, 2023, 51(4): 117–122.
- CHEN Tuantuan, XIN Delin, LI Chen. Research on Evaluation of High-quality Development Planning in the Xinjie Taigemiao Mining Area[J]. Coal Chemical Industry, 2023, 51(4): 117–122.
- 代世峰, 任德贻, 周义平, 等. 煤型稀有金属矿床: 成因类型、赋存状态和利用评价[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1707–1715.
- DAI Shifeng, REN Deyi, ZHOU Yiping, et al. Coal-hosted Rare Metal Deposits: Genetic Types, Modes of Occurrence, and Utilization Evaluation[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1707–1715.
- 董仲培, 乔军伟, 陈远焱, 等. 曹家滩煤矿 2-2 煤层煤质特征及清洁利用评价[J]. 地质论评, 2023, 69(S1): 121–124.
- DONG Shenpei, QIAO Junwei, CHEN Yuanyao, et al. Coal Quality Characteristics and Clean Utilization Evaluation of Coal 2-2 in Caojiatan Coalmine[J]. Geological Review, 2023, 69(S1): 121–124.
- 杜芳鹏, 李聪聪, 乔军伟, 等. 陕北府谷矿区煤炭资源清洁利用潜势及方式探讨[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(3): 11–14.
- DU Fangpeng, LI Congcong, QIAO Junwei, et al. Discussion on the potential and way of clean utilization of coal resources in Fugu mining area, northern Shaanxi[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(3): 11–14.
- 杜芳鹏, 雒铮, 乔军伟, 等. 宁东煤田侏罗纪煤岩煤质特征及清洁高效利用[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(2): 71–77.
- DU Fangpeng, LUO Zheng, QIAO Junwei, et al. Petrographic, quality characteristics and clean & efficient use of Jurassic coal in Ningdong coalfield[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(2): 71–77.
- 杜芳鹏, 宁树正, 刘池洋, 等. 中国低阶富惰质组煤的时空分布、煤质特征及清洁利用[J]. 中国地质, 2022, 49(6): 1792–1807.
- DU Fangpeng, NING Shuzheng, LIU Chiyang, et al. Distributions, properties and clean utilization of the low rank inertinite-rich coals in China[J]. Geology in China, 2022, 49(6): 1792–1807.
- 段中会, 杨甫, 王振东, 等. 陕北富油煤地下原位热解先导试验[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(7): 14–24.
- DUAN Zhonghui, YANG Fu, WANG Zhendong, et al. Pilot Experiment for Underground in-situ Pyrolysis of Tar-rich Coal in the Northern Shaanxi Province[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(7): 14–24.
- 郭晨, 王生全, 师庆民, 等. 神府南部矿区低阶煤化学组成与工艺性质: 特征、关系与实践[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(1): 87–99.
- GUO Chen, WANG Shengquan, SHI Qingmin, et al. Chemical Compositions and Technological Properties of Low-rank Coals in the South Shenfu Mining Area: Characteristics, Relationship and Practice[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(1): 87–99.
- 黄文辉, 久博, 李媛. 煤中稀土元素分布特征及其开发利用前景[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 287–294.
- HUANG Wenhui, JIU Bo, LI Yuan. Distribution Characteristics of Rare Earth Elements in Coal and its Prospects on Development and Exploitation[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 287–294.
- 雷亚军, 乔军伟, 李增林, 等. 曹家滩煤矿煤质特性及清洁利用途径分级研究[J]. 能源与环保, 2023, 45(8): 155–162.
- LEI Yajun, QIAO Junwei, LI Zenglin, et al. Study on Coal Quality Characteristics and Classification of Clean Utilization in Caoji-

- atan Coal Mine[J]. China Energy and Environmental Protection, 2023, 45(8): 155–162.
- 李静琴, 张丽维, 李明培. 陕北河兴梁井田 5-3 煤洁净等级及分布特征[J]. 煤质技术, 2017(3): 17–20.
- LI Jingqin, ZHANG Liwei, LI Mingpei. Cleanliness Grade and Distribution Characteristics of 5-3 Coal Seam in Hexingliang Mine Field of Northern Shaanxi[J]. Coal Quality Technology, 2017(3): 17–20.
- 刘池洋, 赵红格, 桂小军, 等. 鄂尔多斯盆地演化-改造的时空坐标及其成藏(矿)响应[J]. 地质学报, 2006, 80(5): 617–638.
- LIU Chiyang, ZHAO Hongge, GUI Xiaojun, et al. Space-time Coordinate of the Evolution and Reformation and Mineralization Response in Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(5): 617–638.
- 罗腾. 低阶煤分质利用产业链和综合评价研究[J]. 煤炭经济研究, 2017, 37(8): 42–46.
- LUO Teng. Study on Quality Based Utilization Industrial Chain and Comprehensive Evaluation of Low Rank Coal[J]. Coal Economic Research, 2017, 37(8): 42–46.
- 吕清刚, 柴祯. “双碳”目标下的化石能源高效清洁利用[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 541–548.
- LYU Qinggang, CHAI Zhen. Highly Efficient and Clean Utilization of Fossil Energy under Carbon Peak and Neutrality Targets[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(4): 541–548.
- 吕鹏瑞, 袁士豪, 耿济世, 等. 陆相油页岩微波热解后的孔隙结构响应机制[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(8): 131–139.
- LYU Pengrui, YUAN Shihao, GENG Jishi, et al. Mechanisms underlying responses of pore structures in continental oil shale to microwave pyrolysis[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(8): 131–139.
- 倪炜, 孙宝东, 郝秀强, 等. 新街台格庙矿区高质量开发路径及关键问题研究[J]. 煤炭工程, 2023, 55(5): 1–7.
- NI Wei, SUN Baodong, HAO Xiuqiang, et al. High Quality Development Path and key Issues of Xinjie Taigemiao Mining Area[J]. Coal Engineering, 2023, 55(5): 1–7.
- 宁树正, 黄少青, 严晓云, 等. 我国煤系锗镓资源前景及研究方向[J]. 中国矿业, 2023, 32(11): 1–11.
- NING Shuzheng, HUANG Shaoqing, YAN Xiaoyun, et al. Prospect and Research Direction of Germanium and Gallium Resources in Coal-bearing Strata in China[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(11): 1–11.
- 孙玉壮, 赵存良, 李彦恒, 等. 煤中某些伴生金属元素的综合利用指标探讨[J]. 煤炭学报, 2014, 39(4): 744–748.
- SUN Yuzhuang, ZHAO Cunliang, LI Yanheng, et al. Minimum Mining Grade of the Selected Trace Elements in Chinese Coal[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(4): 744–748.
- 唐书恒, 秦勇, 姜尧发, 等. 中国洁净煤地质研究[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
- 唐书恒, 马彩霞. 中国煤炭资源洁净潜势评价指标探讨[J]. 河北建筑科技学院学报, 2005, 22(3): 105–106.
- TANG Shuheng, MA Caixia. Probe into Cleaning Potential Assessment Index of Coal Resources in China[J]. Journal of Hebei Institute of Architectural Science and Technology, 2005, 22(3): 105–106.
- 王国法, 任世华, 庞义辉, 等. 煤炭工业“十三五”发展成效与“双碳”目标实施路径[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(9): 1–8.
- WANG Guofa, REN Shihua, PANG Yihui, et al. Development Achievements of China's Coal Industry during the 13th Five-year Plan Period and Imolementation Path of “Dual Carbon” Target[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(9): 1–8.
- 王双明, 师庆民, 孙强, 等. 富油煤原位热解技术战略价值与科学探索[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(7): 1–13.
- WANG Shuangming, SHI Qingmin, SUN Qiang, et al. Strategic Value and Scientific Exploration of in-situ Pyrolysis of Tar-rich Coals[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(7): 1–13.
- 王双明, 师庆民, 王生全, 等. 富油煤的油气资源属性与绿色低碳开发[J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1365–1377.
- WANG Shuangming, SHI Qingmin, WANG Shengquan, et al. Resource Property and Exploitation Concepts with Green and Low Carbon Of tar-rich Coal as Coal-based Oil and Gas[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1365–1377.
- 王双明, 王虹, 任世华, 等. 西部地区富油煤开发利用潜力分析和技术体系构想[J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 49–57.
- WANG Shuangming, WANG Hong, REN Shihua, et al. Potential Analysis and Technical Conception of Exploitation and Utilization of Tar-Rich Coal in Western China[J]. Chinese Engineering Science, 2022, 24(3): 49–57.
- 王双明. 对我国煤炭主体能源地位与绿色开采的思考[J]. 中国煤炭, 2020, 46(2): 11–16.
- WANG Shuangming. Thoughts about the Main Energy Status of Coal and Green Mining in China[J]. Chinese Coal, 2020, 46(2): 11–16.
- 王晓磊, 陈贵锋, 李文博, 等. 双碳背景下煤炭清洁高效利用方向构建[J]. 煤质技术, 2021, 36(6): 1–5.
- WANG Xiao, CHEN Guifeng, LI Wenbo, et al. Construction of Clean and Efficient Utilization Direction of Coal under the Background of Double Carbon[J]. Coal Quality Technology, 2021, 36(6): 1–5.
- 魏云迅, 陈冰凌, 李玉桂, 等. 全国液化、气化、焦化用煤煤质数据库建设[J]. 中国煤炭地质, 2022, 34(10): 47–50.
- WEI Yunxun, CHEN Bingling, LI Yugui, et al. Construction of National Coal Quality Database for Liquefied Coal, Gasification Coal and Coking Coal[J]. Coal Geology of China, 2022, 34(10): 47–50.

- 武强, 涂坤, 曾一凡, 等. 打造我国主体能源(煤炭)升级版面临的主要问题与对策探讨[J]. 煤炭学报, 2019, 44(6): 1625–1636.
- WU Qiang, TU Kun, ZENG Yifan, et al. Discussion on the Main Problems and Countermeasures for Building an Upgrade Version of Main Energy (Coal) Industry in China[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(6): 1625–1636.
- 杨淑婷, 唐跃刚, 解锡超, 等. 煤炭资源洁净等级评价研究[J]. 洁净煤技术, 2011, 17(1): 5–8+11.
- YANG Shuting, TANG Yuegang, Jie Xichao, et al. Research on clean potential assessment of coal resources[J]. Clean Coal Technology, 2011, 17(1): 5–8+11.
- 尹甜, 吴永杰, 陈凡. 煤直接液化油渣萃取物组成、性质分析及应用场景探讨[J]. 煤化工, 2024, 52(1): 76–79, 96.
- YIN Tian, WU Yongjie, CHEN Fan. Analysis on Composition, Property and Application Scenario of Oil Residue Extract of Coal Direct Liquefaction[J]. Coal Chemical Industry, 2024, 52(1): 76–79, 96.
- 余占鹏, 侯茂林, 程盼, 等. 燃煤机组燃烧优化控制技术[J]. 自动化应用, 2024, 65(13): 90–92.
- YU Zhanpeng, HOU Maolin, CHEN Pan, et al. Optimization Control Technology for Combustion of Coal-fired Power Units[J]. Automation Application, 2024, 65(13): 90–92.
- 袁亮. 我国煤炭工业高质量发展面临的挑战与对策[J]. 中国煤炭, 2020, 46(1): 6–12.
- YUAN Liang. Challenges and Countermeasures for High Quality Development of China's Coal Industry[J]. China Coal, 2020, 46(1): 6–12.
- 曾凡虎, 陈钢, 李泽海, 等. 我国低阶煤热解提质技术进展[J]. 化肥设计, 2013, 51(2): 1–7.
- ZENG Fanhu, CHEN Gang, LI Zehai, et al. Technical Progress for Pyrolysis/Upgrade of Low Rank Coal in China[J]. Chemical Fertilizer Design, 2013, 51(2): 1–7.
- 张建强, 宁树正, 黄少青, 等. 内蒙古煤炭资源煤质特征及清洁利用方向[J]. 中国矿业, 2022, 31(8): 60–68.
- ZHANG Jianqiang, NING Shuzheng, HUANG Shaoqing, et al. Characteristics of Coal Quality and Clean Utilization of Coal Resources in Inner Mongolia[J]. China Mining Magazine, 2022, 31(8): 60–68.
- 张松. 新型能源体系下我国煤炭清洁高效利用途径研究[J]. 煤炭经济研究, 2023, 43(9): 71–77.
- ZHANG Song. Study on Clean and Efficient Utilization of Coal in China Under New Energy System[J]. Coal Economic Research, 2023, 43(9): 71–77.
- 赵刚, 田彦强, 刘争, 等. 王洼矿区 5#煤层煤岩煤质特征及绿色利用方向探讨[J]. 中国煤炭地质, 2024, 36(3): 6–12+59.
- ZHAO Gang, TIAN Yanqiang, LIU Zheng, et al. Discussion on the Coal Quality Characteristics and Green Utilization of 5# Coal Seam in Wangwa Mining Area[J]. Coal Geology of China, 2024, 36(3): 6–12+59.
- 周爱平, 李臣, 辛德林, 等. 新时代背景下台格庙整装矿区高质量发展规划研究[J]. 煤化工, 2023a, 51(5): 89–93.
- ZHOU Aiping, LI Chen, XIN Delin, et al. Research on High Quality Development Planning of Taigemiao Mining Area in the New Era[J]. Coal Chemical Industry, 2023a, 51(5): 89–93.
- 周爱平, 辛德林, 谢松岩, 等. 新街台格庙矿区高质量发展规划评价研究[J]. 中国煤炭, 2023b, 49(7): 31–37.
- ZHOU Aiping, XIN Delin, XIE Songyan, et al. Research on the evaluation of high-quality development planning of Xinjie Taigemiao mining area[J]. China Coal, 2023b, 49(7): 31–37.
- 邹才能, 李士祥, 熊波, 等. 碳中和“超级能源系统”内涵、路径及意义——以鄂尔多斯盆地为例[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(4): 924–936.
- ZOU Caineng, LI Shixiang, XIONG Bo, et al. Connotation, Pathway and Significance of Carbon Neutrality “Super Energy System”: A Case Study of the Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(4): 924–936.