



移动扫码阅读

杨甫,段中会,马丽,等.陕西省富油煤分布及受控地质因素[J].煤炭科学技术,2023,51(3):171-181.
YANG Fu, DUAN Zhonghui, MA Li, *et al.* Distribution and controlled geological factors of oil-rich coal in shaanxi province[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(3): 171-181.

陕西省富油煤分布及受控地质因素

杨甫^{1,2},段中会^{1,2},马丽^{1,2},付德亮^{1,2},田涛^{1,2},贺丹^{1,2},岳明娟³

(1. 自然资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室, 陕西西安 710021; 2. 陕西省煤田地质集团有限公司, 陕西西安 710021;
3. 陕西省煤田地质化验测试有限公司, 陕西西安 710054)

摘要: 煤的绿色清洁高效利用是煤炭工业可持续发展的重要途径。陕西省煤炭资源丰富, 主要含煤区分布于陕西北部的五大煤田, 富油煤资源更是位居全国首位。通过收集以往地质勘探资料和针对性采集陕北榆神矿区某煤矿煤心进行化验测试分析, 探讨陕西省富油煤分布特征及影响煤焦油产率的地质因素。结果显示, 陕西省富油煤以陕北侏罗系煤田为最优, 焦油产率分布于 7.6%~15.3%; 物质组成、生油潜力、热演化程度及成煤环境控制着煤的焦油产率的大小和分布。基质镜质体、挥发分产率、H 元素含量及 H/C 原子比等与煤的焦油产率呈正相关关系, 相关系数较高, 岩石热解参数中烃指数与焦油产率的相关性高, 可作为快速判别煤焦油产率的指标; 煤焦油产率随着热演化程度的增加呈现先增加后减少的趋势, 且在 R_0 约 0.9% 时, 达到最大值; 沉积环境水体微流动、强还原、浅覆水-微流动的泥炭沼泽相的煤焦油产率值越高。研究结果为富油煤的地质预测提供借鉴。

关键词: 富油煤; 煤焦油; 陕北侏罗系煤田; 沉积环境; 地质预测

中图分类号: P618.11 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2023)03-0171-11

Distribution and controlled geological factors of oil-rich coal in shaanxi province

YANG Fu^{1,2}, DUAN Zhonghui^{1,2}, MA Li^{1,2}, FU Deliang^{1,2}, TIAN Tao^{1,2}, HE Dan^{1,2}, YUE Mingjuan³

(1. Key Laboratory of Coal Resources Exploration and Comprehensive Utilization, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710021, China; 2. Shaanxi Coal Geology Group Co., Ltd., Xi'an 710021, China; 3. Shaanxi Coal Geological Laboratory Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: The green, clean and efficient utilization of coal is an important way for the sustainable development of coal industry. Shaanxi province is rich in coal resources, which are mainly distributed in the five coal fields in the north of Shaanxi province, and the oil-rich coal resources rank first in China. In this paper, the distribution characteristics of oil-rich coal in Shaanxi Province and the geological factors affecting the tar yield of coal are discussed by collecting the previous geological exploration data and the coal core of a coal mine in Yushen mining area of northern Shaanxi Province. The results show that the Jurassic coal field in northern Shaanxi is the best oil-rich coal in Shaanxi Province, and the tar yield is distributed in the range of 7.6%-15.3%. Material composition, oil generation potential, thermal evolution degree and coal-forming environment control the size and distribution of tar yield in coal. The desmocollinite content, volatile matter content, H element content and H/C atomic ratio were positively correlated with the tar yield of coal, and the correlation coefficient was high. There is a high correlation between the hydrocarbon index and tar yield in rock pyrolysis parameters, which can be used as an index to quickly identify tar yield in coal. The tar yield of coal increases first and then decreases with the increase of thermal evolution degree, and reaches the maximum value when R_0 is about 0.9%. The higher the coal tar yield value is in the peat swamp facies with micro-flow, strong reduction and shallow overlying water-micro-flow in sedimentary environment. The research results provide reference for geological prediction of oil-rich coal.

Key words: Oil-rich coal; coal tar; Shanbei jurassic coalfield; sedimentary environment; geological prediction

收稿日期: 2022-05-01 责任编辑: 王凡 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2021-0531

基金项目: 陕西省富油煤地下原位转化制氢与综合利用“科学家+工程师”队伍资助项目(2022KXJ-126); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2022KJXX-24)

作者简介: 杨甫(1986—),男,陕西西安人,高级工程师,博士。E-mail: yangpu666@163.com

0 引言

我国“缺油、少气、相对富煤”的资源禀赋特征决定了我国能源消费结构以煤为主体,短期难以改变。近年来,我国石油和天然气对外依存度逐年攀升,且90%的油气来自海上运输,严重威胁着我国的能源安全,加大煤炭的清洁高效利用,有助于发挥煤炭的能源压舱石作用,但煤炭的发展面临的环境问题也越来越突出,绿色安全高效利用成为煤炭产业可持续发展的必然选择。习近平主席自2020年9月22日在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表讲话:中国力争于2030年前二氧化碳排放达到峰值、2060年前实现碳中和。煤炭行业向低碳化发展成为必然趋势。改变煤炭开发利用形式,提高煤炭利用质量,推动煤炭从单一燃料向燃料+原料转变以及煤基能源产业与二氧化碳捕集、封存和利用技术的协同推进和耦合发展成为实现高碳能源低碳发展的现实选择。

根据煤地质学定义,将焦油产率($T_{ar,ad}$)小于等于7.0%的煤称为含油煤,焦油产率大于7.0%小于等于12.0%的煤称为富油煤,焦油产率大于12.0%的煤称为高油煤。富油煤不仅是煤,更是一种煤基油气资源,热解提油有助于缓解油气对外依存度,保障能源安全,实现高碳资源低碳发展。近年来针对我国富油煤的地质研究及煤中焦油产率的影响因素已有初步研究。汪寅人等^[1]研究了我国部分褐煤和烟煤中焦油产率与化学组成的关系,指出变质程度是影响煤焦油产率的主要因素;张军等^[2]从粉煤热解角度探讨了矿物质对焦油产率的影响,晁伟等^[3]提出通过焦油指数建立预测煤焦油产率的方法,孙晔伟等^[4]研究了我国特高挥发分特高焦油产率煤的分布特征,谢青等^[5]分析了黄陵矿区富油煤焦油产率分布特征及主控地质因素,王锐等^[6]研究认为榆神矿区富油煤形成于还原性较强的滨浅湖古地理环境及温暖潮湿的古气候环境,李华兵等^[7-8]分析了神府矿区 5^{-2} 煤富油煤的赋存特征和资源潜力和子长矿区瓦窑堡组特高焦油产率煤富集规律,张宁等^[9]研究了陕北侏罗纪富油煤有机地球化学特征,以上研究为富油煤地质研究充实了基础。

陕西省煤田地质集团有限公司/自然资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室2019年完成了陕西省富油煤生油潜力评价及高效开发研究课题,首次估算了陕西省富油煤资源,研究了陕西省五大煤田富油煤的分布特征,为富油煤的合理规划开发奠

定了基础。在收集煤田地质勘探2800多个钻孔焦油数据基础上,针对性补充了典型矿区样品,以榆神矿区典型煤矿主采煤层为对象,系统分析了煤的工业分析、元素分析、显微组分、岩石热解、热演化程度等因素对煤中焦油产率的地质约束,为富油煤的地质预测提供依据,也为富油煤的成因机理研究提供借鉴。

1 陕西省煤田分布

陕西省横跨黄河流域和长江流域,以秦岭为界北部属于黄土高原,中部是关中平原,南部属秦巴山区。根据我国主要含煤地层大地构造单元划分,陕西省赋煤单元属华北和华南两个赋煤区。根据富煤带的划分原则,陕西省划分为4个赋煤带,分别为华北赋煤区鄂尔多斯盆地陕北赋煤带、鄂尔多斯盆地南缘赋煤带和秦岭山间盆地群赋煤带,华南赋煤区上扬子盆地北缘赋煤带。陕西省煤田主要分布在鄂尔多斯盆地渭河以北地区(图1)含煤面积约 $5.74 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。依据成煤时代及煤炭资源地理分布,陕西省煤田可划分为晚古生代陕北石炭二叠系煤田和渭北石炭二叠系煤田、中生代陕北三叠系煤田、陕北侏罗系煤田和黄陇侏罗系煤田。其次为渭河以南秦岭、上扬子北部地区石炭系、二叠系、三叠系和侏罗系形成的一些小型煤产地,主要为上扬子区盆地北部的镇巴三叠侏罗系煤产地。陕西北部含煤地层沉积面积大,分布稳定,含煤性好,煤质优良,资源/储量丰富,地质构造及开采技术条件较简单;陕南含煤地层多、沉积面积小、分布不稳定,含煤性较差,煤质也较差,资源/储量规模较小,地质构造及开采技术条件较复杂,本次未予以讨论。

2 陕西省煤中焦油产率分布

1)陕北侏罗系煤田。呈北东—南西向沿横山—榆林—神木府谷一带展布,长约300 km,宽约25~80 km,面积约20000 km^2 。包括神府新民、榆神、榆横3个国家规划矿区及庙哈孤非国家规划矿区。含煤地层为侏罗系中统延安组,含煤层多达14层,主要可采煤层1~7层。庙哈孤矿区煤类以不黏煤和长焰煤为主,煤化程度为I级,焦油产率为7.95%~11.36%,属富油煤;新民矿区煤类以不黏煤、长焰煤和弱黏煤为主,煤化程度为I级,焦油产率为7.30%~12.90%,属富油煤,少量高油煤;榆神矿区煤类以不黏煤、长焰煤和弱黏煤为主,煤化程度为I级,焦油产率为7.6%~15.3%,属富油煤,少量高油煤;榆

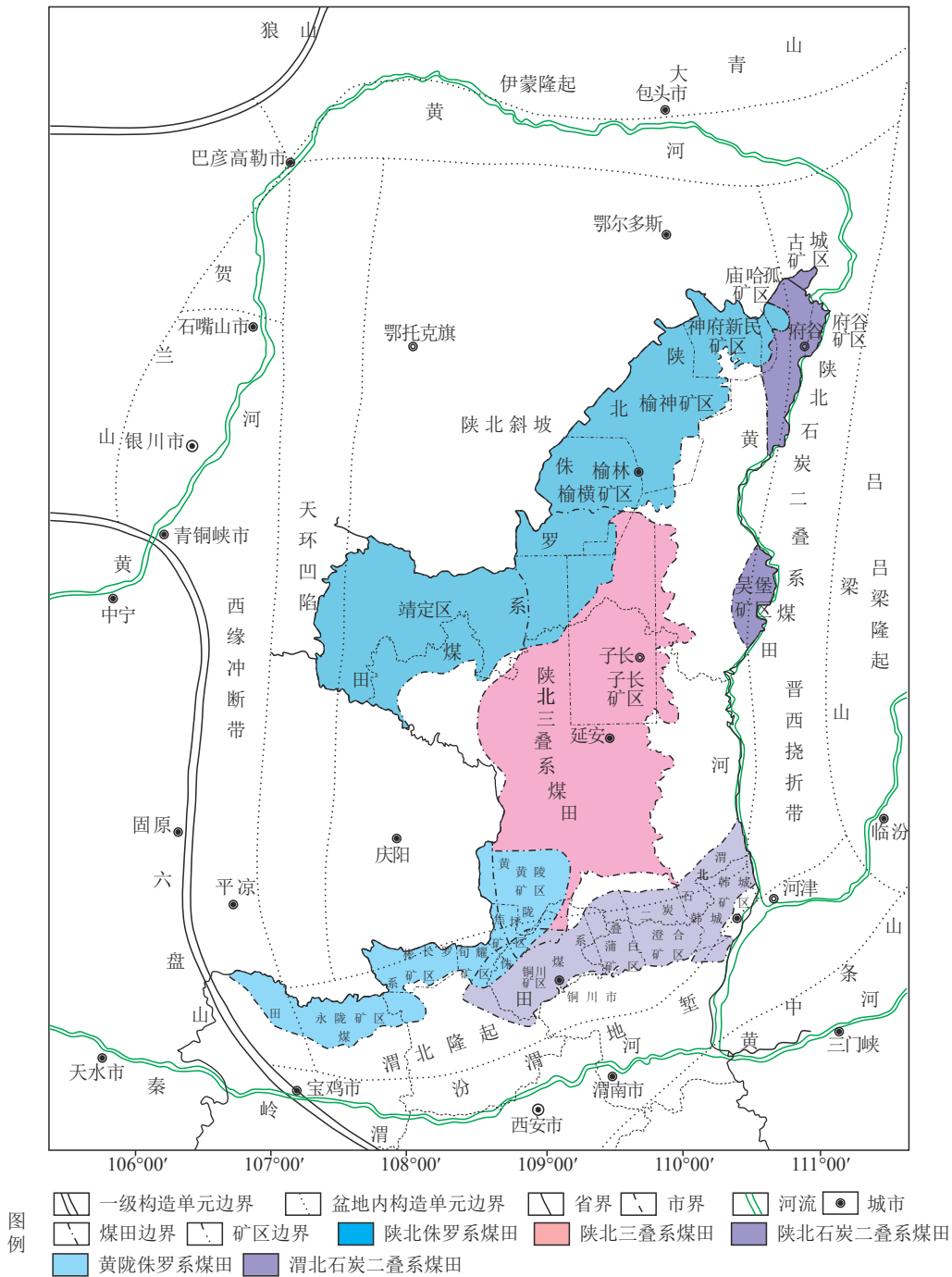


图 1 鄂尔多斯盆地构造区划及陕西煤田分布示意

Fig.1 Tectonic division of Ordos Basin and coal field distribution in Shaanxi Province

横矿区煤类以长焰煤、不黏煤和弱黏煤为主，煤化程度为 I 级，焦油产率为 8.9%~14.7%，属富油煤，少量高油煤。陕北侏罗系煤田煤的焦油产率较高均属富油煤，且高油煤区主要集中在榆横矿区，少量分布在榆神矿区和新民矿区(图 2)。

2)黄陇侏罗系煤田。呈北东—南西向带状分布于黄陵—旬邑—彬县麟游陇县一带，紧邻陕甘边界，长度约 280 km，宽度 20~35 km，面积约 11 250 km²。

主要包括彬长煤炭国家规划矿区及黄陵、焦坪、旬耀、永陇 4 个非国家规划煤炭矿区。含煤地层为侏罗系中统延安组，含煤层 2~8 层，可采煤层 1~4 层。永陇矿区煤类以不黏煤和长焰煤为主，煤化程度为 I 级，焦油产率为 4.3%~11.7%，富油煤占比 74%；彬长矿区煤类以不黏煤和弱黏煤为主，煤化程度为 I~II 级，焦油产率介于 3.6%~11.8%，富油煤占比 62%；旬耀矿区煤类以不黏煤、长焰煤和弱黏煤为主，煤化程

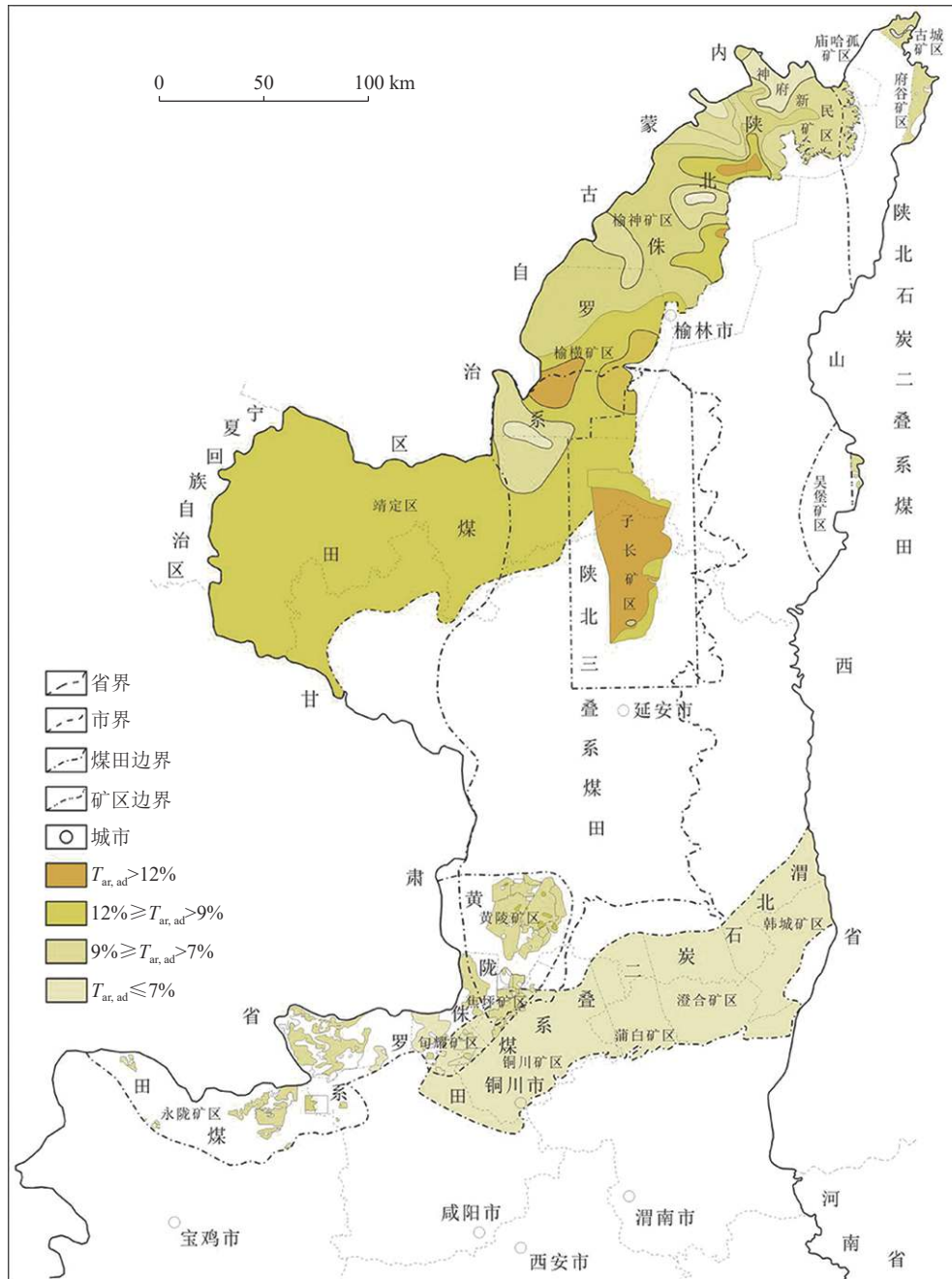


图2 陕西五大煤田煤中焦油产率分布

Fig.2 Distribution of coal tar yield in five coalfields in Shaanxi

度为 I 级, 焦油产率为 3.9%~11.8%, 富油煤占比 30.1%; 焦坪矿区煤类以不黏煤、长焰煤和弱黏煤为主, 煤化程度为 I 级, 焦油产率为 3.7%~12.9%, 富油煤占比 86.4%; 黄陵矿区煤类以弱黏煤、气煤和长焰煤为主, 煤化程度为 I~II 级, 焦油产率为 2.7%~15.2%, 富油煤占比 61.1%。黄陇侏罗纪系煤田各矿区煤焦油产率分布差异较大, 富油煤主要分布在焦坪矿区, 永陇矿区、彬长矿区和黄陵矿区次之, 旬耀矿区最少。高油煤零星分布于黄陵矿区和焦坪矿区(图 2)。

3) 陕北三叠系煤田。分布于延安市富县以北, 榆林市部分区域, 面积约 24 000 km², 现仅划有子长矿区。含煤地层为三叠系上统瓦窑堡组, 共含煤层 7~15 层, 最多达 30 余层, 主要可采煤层 2 层, 煤类以气煤为主, 含有长焰煤和气肥煤, 煤化程度为 I~II 级, 焦油产率为 7.1%~16.39%, 属富油煤和高油煤(图 2)。

4) 陕北石炭二叠系煤田。分布于府谷县城、吴堡县城以北的黄河西岸, 煤田西边界约以煤层埋深大于 1 000 m 为边界。总面积约 810 km²。主要包括

古城矿区、府谷矿区和吴堡矿区。含煤地层为二叠系下统山西组和石炭系上统太原组，含煤层 1~12 层，可采煤层 3~6 层。古城矿区煤类以气煤和长焰煤为主，煤化程度为 I~II 级，焦油产率为 4.1%~13.6%，富油煤和高油煤占比 75%；府谷矿区煤类以长焰煤、气煤、不黏煤和弱黏煤为主，煤化程度为 I~II 级，焦油产率为 2.5%~14.8%，富油煤占比 95%、高油煤和含油煤零星分布；吴堡矿区煤类以焦煤、瘦煤和肥煤为主，煤化程度 III~IV 级，焦油产率为 5.62%~7.13%，富油煤占比 19.4%。陕北石炭二叠系煤田富油煤主要分布在府谷矿区，古城矿区次之，吴堡矿区最少(图 2)。

5) 渭北石炭-二叠纪煤田。分布于渭河以北铜川市至韩城市一带，有“渭北黑腰带”之称，东西长 200~220 km，南北宽 37~41 km，面积约 8 700 km²。主要为渭北煤炭国家规划矿区，分为铜川矿区、蒲白矿区、澄合矿区及韩城矿区。含煤地层为石炭系上统太原组和二叠系下统山西组。一般含煤层 1~6 层，可采煤层 1~3 层。煤类以瘦煤、贫瘦煤和贫煤为主，煤化程度为 VI~VII 级，焦油产率为 1.8%~2.12%，均属于含油煤(图 2)。

3 影响煤中焦油产率的地质因素

以陕北富油煤区榆神矿区某煤矿主采 2⁻² 煤为

研究对象，采用钻探取心，所取煤样($n=27$)在自然资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室进行了煤的显微组分、工业分析、元素分析、岩石热解、镜质组反射率(R_o)及煤的格金干馏试验测定煤中焦油产率，分别讨论了各参数与焦油产率之间的关系，分析影响煤中焦油产率的地质因素。

3.1 物质组成

1) 显微组分。煤中含有多种有机显微组分，不同有机显微组分的物质组成、化学组分存在较大差异，导致不同组分的生烃潜力尤其是生油能力存在明显不同。已有研究表明，富氢显微组分及成烃的物质基础^[10]，从惰质组到基质镜质组再到壳质组，随着富氢组分的增高，其倾油程度逐渐增加，且惰质组不生油^[11]，同时也认识到壳质组和基质镜质组的含量共同决定了煤岩生油能力的大小^[12]。本次所测样品 2⁻² 煤的显微组分测定依据国家标准 GB/T 8899—2013《煤的显微组分组和矿物测定方法》和 GB/T 15588—2001《烟煤显微组分分类》完成，显微组分采用含矿物基结果，其中镜质组含量为 37.2%~78.5%、惰质组含量为 19.9%~58.5%、壳质组含量为 0.1%~3.8%，镜质组含量最多，壳质组含量最少，呈现为镜质组-惰质组组合为特征。镜质组中基质镜质体(图 3a)含量为 22.2%~56.2%、结构镜质体(图 3b)含量为 3.3%~48.8%、均质镜质体(图 3c)含

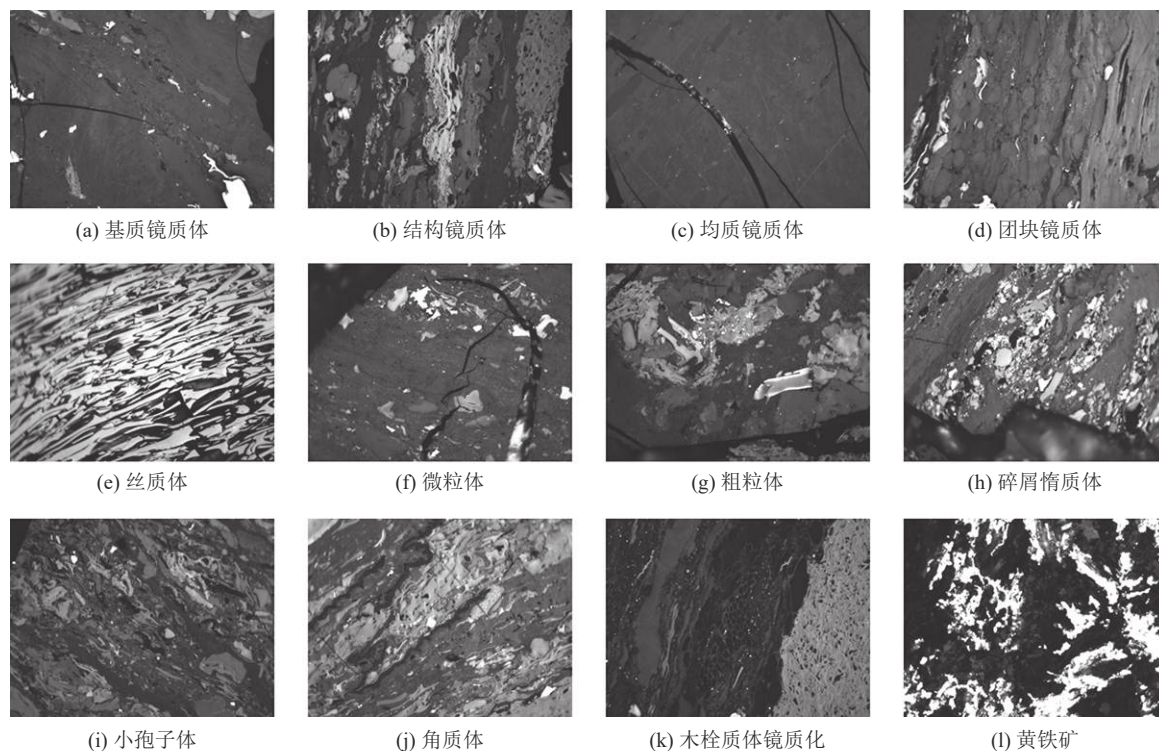


图 3 富油煤中不同显微组分照片

Fig.3 Photographs of different macerals in oil-rich coal

量为 2.3%~23.8%、团块镜质组(图 3d)含量 0~4.6% 和碎屑镜质体含量为 0~2.8%, 且以基质镜质体含量最多。惰质组中丝质体(图 3e)含量为 9.6%~32.7%, 微粒体(图 3f)含量为 0~1.8%, 粗粒体(图 3g)含量为 2.8%~17.0%, 碎屑惰质体(图 3h)含量为 2.2%~9.3%, 且以丝质体含量最多。壳质组中以小孢子体(图 3i)为主、个别见角质体(图 3j)和木栓质体(图 3k)。含有少量黄铁矿(图 3l)。

煤中焦油产率($T_{ar,ad}$)依据国家标准 GB/T 1341-2007《煤的葛金低温干馏试验方法》进行测定, 结果采用空气干燥基产率。为讨论显微组分与煤中焦油产率的关系, 对基质镜质体含量、惰质组含量和壳质组含量分别与焦油产率进行线性关系描述, 结果显示基质镜质体含量与焦油产率呈正相关关系(图 4a), 相关系数为 0.70; 惰质组含量与焦油产率呈负相关关系(图 4b), 相关系数为 0.64; 壳质组含量与焦油产率相关性不明显(图 4c), 基质镜质体又在基质镜质组中所占比例较大, 且其与焦油产率也成正相关关系(图 4d), 相关系数为 0.61。这一结果的原因是壳质组含量较少, 对生油潜力贡献较小, 也反映出基质镜

质组尤其是基质镜质组对煤中焦油产率的贡献占主导地位。

2)挥发分。已有研究表明, 煤的挥发分主要是由煤的有机质热解产生, 其组成物质包括 CH_4 、 C_2H_6 、 H_2 、 CO 、 H_2S 、 NH_3 、 H_2O 、 C_nH_{2n} 、 C_nH_{2n-2} 和苯、萘、酚等芳香族化合物以及 $C_5 \sim C_{16}$ 的烃类、吡啶、吡咯、噻吩等化合物^[13]。挥发分与煤焦油产率的关系前人已有较多研究, 存在 2 种不同观点: 一种观点认为煤中焦油产率同煤的挥发分产率呈正相关^[1,4], 另一种观点认为单煤种的挥发分与焦油产率不完全呈正比^[3]。本次收集了黄陇侏罗系煤田大佛寺煤矿 4 号煤, 煤类为长焰煤(编号 DFS), 双龙煤矿 2 号煤, 煤类为弱黏煤(编号 SL)以及陕北三叠系煤田贯屯煤矿 5 号煤, 煤类为气煤(编号 GT)的不同煤类挥发分与焦油产率数值, 同时对钻井样品依据国家标准 GB/T 212—2008《煤的工业分析》进行测定, 挥发分产率采用干燥无灰基挥发分(V_{daf}), 综合讨论不同挥发分与焦油产率的相关关系。通过相关性可知, 挥发分与焦油产率正相关, 且随着挥发分增加相关性增强(图 5a), 针对同一煤层挥发分与焦油差率也成

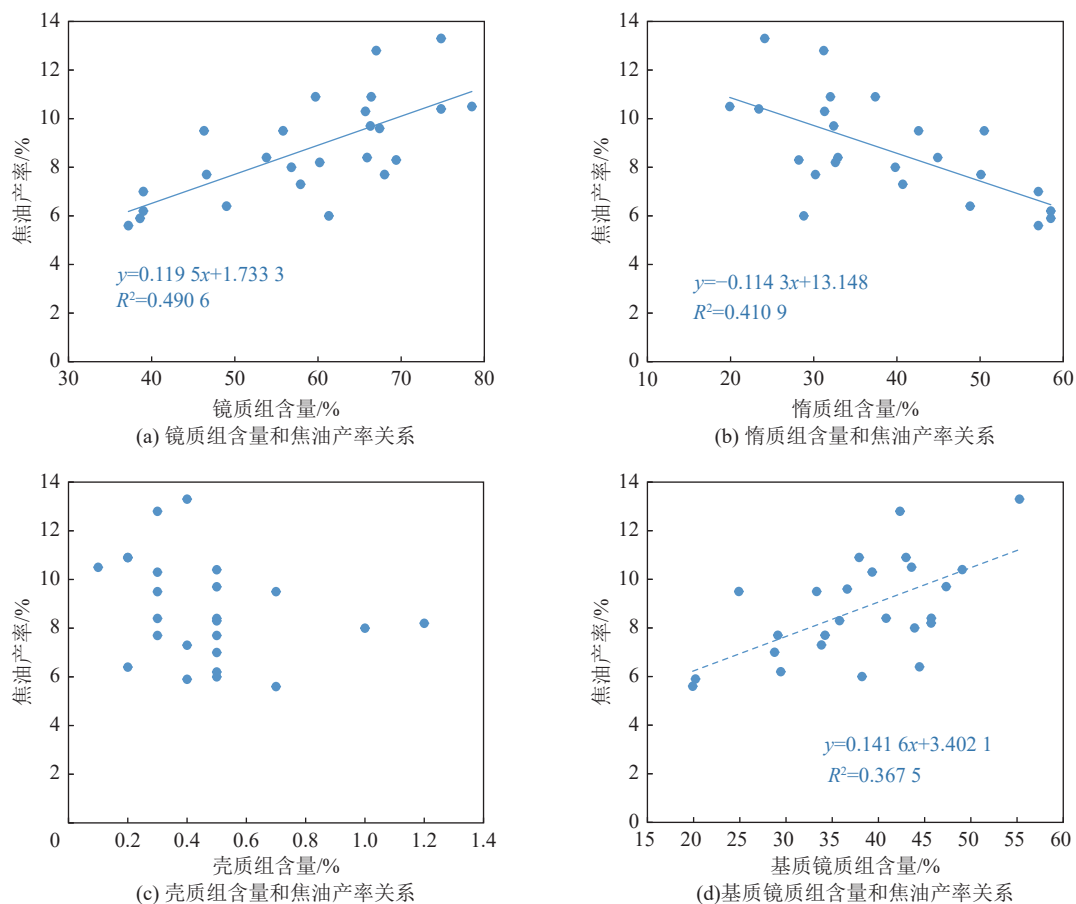


图4 煤中显微组分与焦油产率相关关系

Fig.4 Correlation between macerals in coal and tar yield

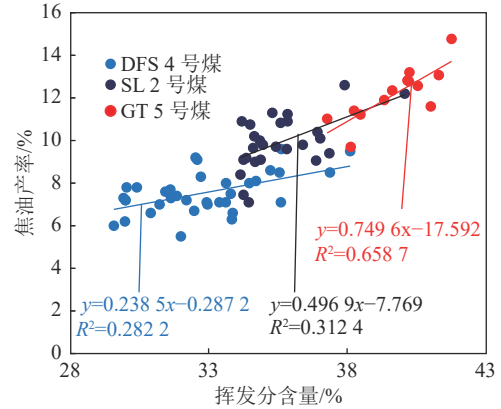
正相关关系, 相关系数 0.81(图 5b), 反映了陕西煤中挥发分含量与焦油产率具有正相关关系, 可使用挥发分含量估算煤中焦油产率大小。

3) 元素组成。已有研究表明, 煤的元素化学组成与热解原油产量之间存在稳定的关系, 且单个显微组分的石油潜力是随着 H/C 原子比的增加而增加^[14]。分别对样品的 C、H、N、O 质量分数依据国家标准 DB/T 476—2001《煤的元素分析方法》进行测定, 结果为空气干燥基质量分数。所采钻井煤心 C_{ad} 元素含量为 75.56% ~ 83.25%、H_{ad} 元素含量为 4.23% ~ 5.33%、N_{ad} 元素含量为 0.86% ~ 1.16%、O_{ad} 元素含量为 9.87% ~ 18.68%, H/C 原子比为 0.62% ~ 0.78%, O/C 原子比 0.09% ~ 0.18%。分别与焦油产率进行了相关性分析, 结果显示 C_{ad}、O_{ad} 元素含量与焦油产率相关性不明显(图 6a、图 6b), H_{ad}、N_{ad} 元素含量与焦油产率呈正相关关系(图 6c、图 6d), 且与 H 元素含量的相关系数大于 N 元素。H/C 原子比可反映煤中富氢组分含量, H/C 原子比与焦油产率呈正相关性关系, 相关系数 0.72(图 6e)。SAXBY 通过 H/C 原子比和 O/C 原子比建立了相关图解, 用于判别煤的生油潜力^[15], 测试样品点落在基质镜质组成熟基线附近(图 6f), 显示具有一定的生油潜力。

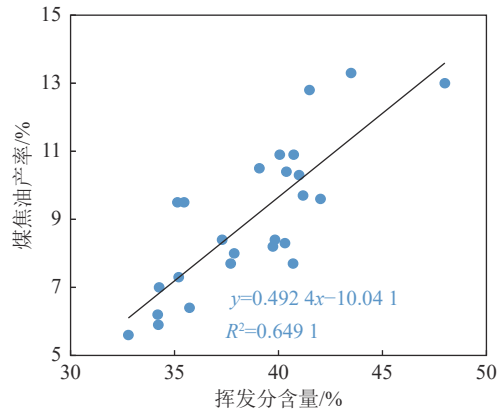
3.2 生油潜力

通过岩石热解试验生烃潜力(S₁+S₂)、最大热解峰温(T_{max})、氢指数(HI)、烃指数(HCI)等参数反应煤的生油潜力。郭春清^[12]在前人研究基础上结合了显微组分组成特征及元素组成建立了评价煤岩生油

潜力的评价标准。本次对陕北某煤矿煤心样品依据国家标准 GB/T 18602—2012《岩石热解分析》进行相关参数测定, 可溶烃(S₁)含量 5.03 ~ 22.54 mg/g、



(a) 不同煤层挥发分含量和焦油产率关系



(b) 单一煤层挥发分含量和焦油产率关系

图 5 挥发分与焦油产率相关关系

Fig.5 Correlation between volatile content and tar yield

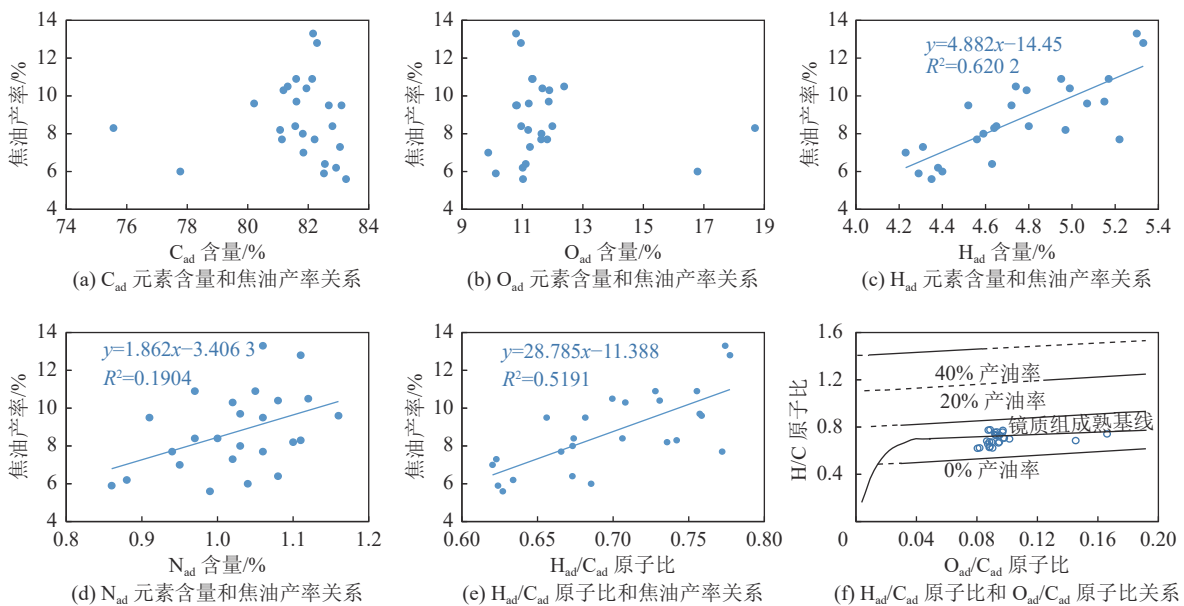


图 6 元素含量与焦油产率相关关系

Fig.6 Correlation between element content and tar yield

热解烃(S_2)含量 111.61 ~ 274.40 mg/g、有机 CO_2 (S_3) 含量 0.67 ~ 2.02 mg/g、残余碳(S_4)含量 214.21 ~ 421.17 mg/g、最大热解峰温为 421 ~ 434 °C,计算的总有机碳(TOC)含量为 31.1% ~ 63.13%、生烃潜力(S_1+S_2)为 116.4 ~ 285.8 mg/g、产率指数(PI)为 0.03 ~ 0.08、氢指数为 306 ~ 478 mg/g、烃指数为 11.30 ~ 42.25 mg/g,岩石热解参数反应的煤岩有机质类型为 II_A 型,分别绘制了总有机碳、生烃潜力、烃

指数、氢指数与煤中焦油产率的相关性图,结果显示总有机碳与煤中焦油产率相关性不明显(图 7a),生烃潜力与煤中焦油产率呈正相关关系(图 7b),相关系数 0.59;烃指数、氢指数与煤中焦油产率也呈正相关关系(图 7c、图 7d),相关系数分别为 0.69、0.81,总体显示氢指数与煤中焦油产率相关性最强,可通过岩石热解参数快速反映煤中焦油产率大小。

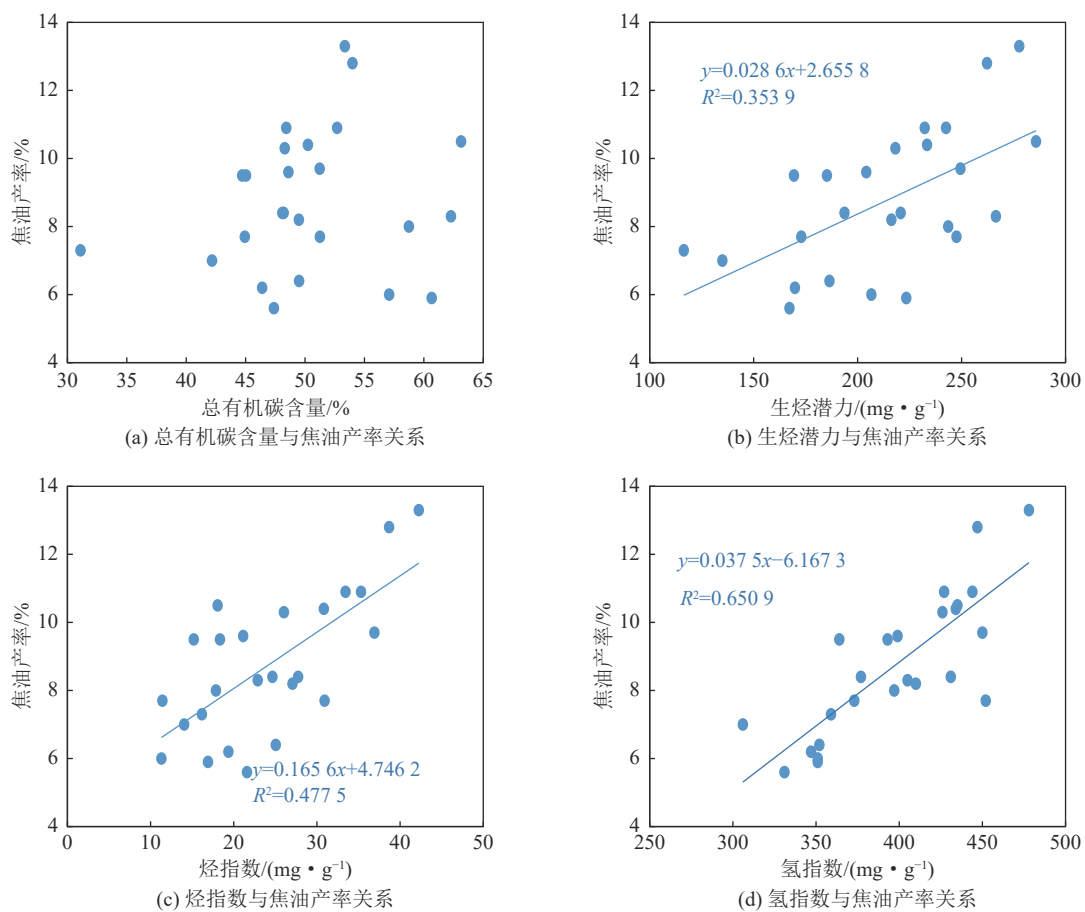


图7 热解参数与焦油产率相关关系

Fig.7 Correlation between pyrolysis parameters and tar yield

通常总有机碳含量和热解烃含量可反映煤岩生烃潜力^[16-18],本次测试结果在判别图版中落入倾向于生油气区间(图 8),显示出煤岩具有较强的生油气潜力。

3.3 热演化程度

煤中焦油产率大小不仅受制于物质组成,更受地质历史热演化程度的影响。前人的研究结果显示,煤中不同显微生油组分的生油窗温度具有差异性,部分富氢镜质组的生油高峰 R_o 为 0.5% ~ 0.95%^[19],对应的最大热解峰温 430 ~ 445 °C^[20]。本次测试的

煤心样品的最大热解峰温为 421 ~ 434 °C,最大热解峰温和产率指数(PI)值均较低,在相应图版^[21]中落入未成熟区间(图 9),煤岩成熟度较低,但也具有一定的生油潜力。通过搜集以往煤炭地质勘探资料,绘制了煤岩镜质组反射率与焦油产率的相关关系图,结果显示随着镜质组反射率的增加煤中焦油产率呈现先增加后减小的趋势,并且在 R_o 约 0.9% 时焦油产率最大(图 10),这与煤系地层在 R_o 约 0.9% 时液态生烃曲线达到最大值相一致^[22]。这也是渭北石炭二叠系煤田煤的焦油产率值较低的主要原因。

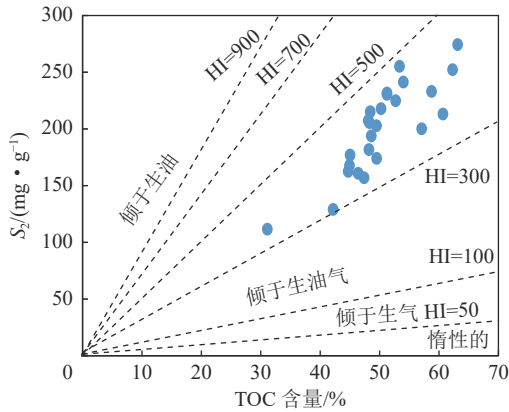


图 8 岩石热解 TOC 和 S_2 关系
Fig.8 Plot of rock-eval TOC versus S_2

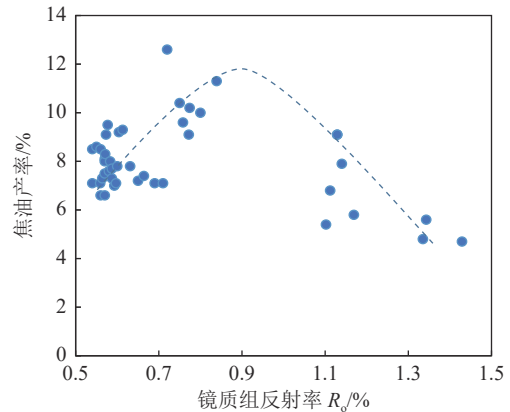


图 10 镜质组反射率和焦油产率关系
Fig.10 Relation between vitrinite reflectance (R_0) and tar yield

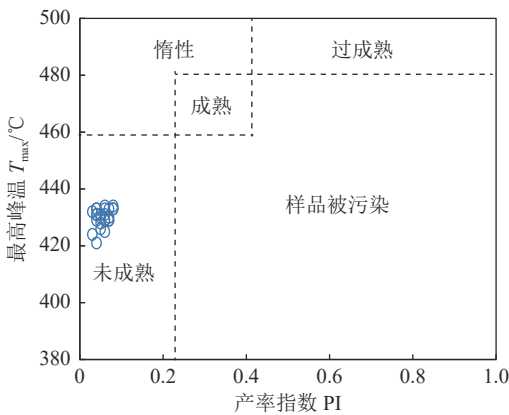


图 9 岩石热解和产率指数关系
Fig.9 Plot of Production Index (PI) versus T_{max}

3.4 成煤环境

成煤环境的研究对预测煤中微量元素、成烃特征以及探讨古气候具有重要意义。判别成煤环境的方法较多主要有灰成分端元图解法^[23]、微量元素比值法^[24]、同位素示踪法^[25-26]、显微组分分析法^[27]。同时,认为煤的显微组分中镜质组形成于深覆水还原条件,惰质组形成于氧化条件,而壳质组的形成则主要取决于成煤植物特征及沼泽水位状况^[28]。本次通过测试煤心样品的显微组分判别沉积环境的判别标准^[29],以此研究成煤过程的水体流动性、氧化-还原性及煤相特征,集合煤的焦油产率、氢指数等参数,综合分析煤的生油潜力。结果显示,煤中焦油产率高低取决于宏观煤岩组成、水体流动性、氧化-还原性及煤相特征,水体流动性为微流动、氧化还原性为强还原、浅覆水-微流动的泥炭沼泽相条件下煤的焦油产率值越高(图 11),这一结果对预测煤中焦油产率具有借鉴意义。

综上所述,成煤环境决定了煤的物质组成和元素特征,煤化程度和挥发分产率是影响煤焦油产率

的主要因素。已有研究结果表明,煤的挥发分主要是煤分子分解和解聚反应的产物,其中不稳定的脂肪侧链、含氧官能团以及以脂肪结构为主的小分子化合物在受热后会发生热分解或热裂解成为挥发分^[13]。烟煤中随着变质程度的增加煤的挥发分产率先减少后增加再减少,在气肥煤和气煤(R_0 约 0.9%)阶段挥发分产率最大^[30],焦油产率最大。随着煤的挥发分产率减少相应的煤热分解或热裂解产物减少,表现在煤的焦油产率逐渐减少。陕西省五大煤田中三叠系煤田的煤类以气煤为主,煤的变质程度中等,挥发分产率最大,焦油产率最大;渭北石炭二叠系煤田煤类以瘦煤、贫瘦煤和贫煤为主,煤的变质程度较高,挥发分产率较低,相应的焦油产率较低。此外,煤岩组分中壳质组的挥发分最高,镜质组次之,惰质组最低^[13],陕西省煤以镜质组为主,惰质组次之,壳质组最少,且不同变质程度的煤随着镜质组含量的增加挥发分总体成增加趋势^[31],成为镜质组含量和焦油产率呈正相关的主要原因。

4 结 论

1)陕西省煤的焦油产率较高,富油煤主要分布在陕北侏罗系煤田,高油煤分布在陕北三叠系煤田,渭北石炭二叠系煤田为含油煤区。

2)焦油产率与镜质组含量正相关,与惰质组含量负相关,与壳质组关系不明显,镜质组中以基质镜质体为主;焦油产率与煤的挥发分产率正相关,与煤中 H 元素含量和 H/C 原子比正相关。

3)随着热演化程度的增加煤的焦油产率呈现先增加后减少的趋势,且在 R_0 约 0.9% 时,达到最大值;沉积环境水体微流动、强还原、浅覆水微流动的泥炭沼泽相的煤焦油产率值越高。

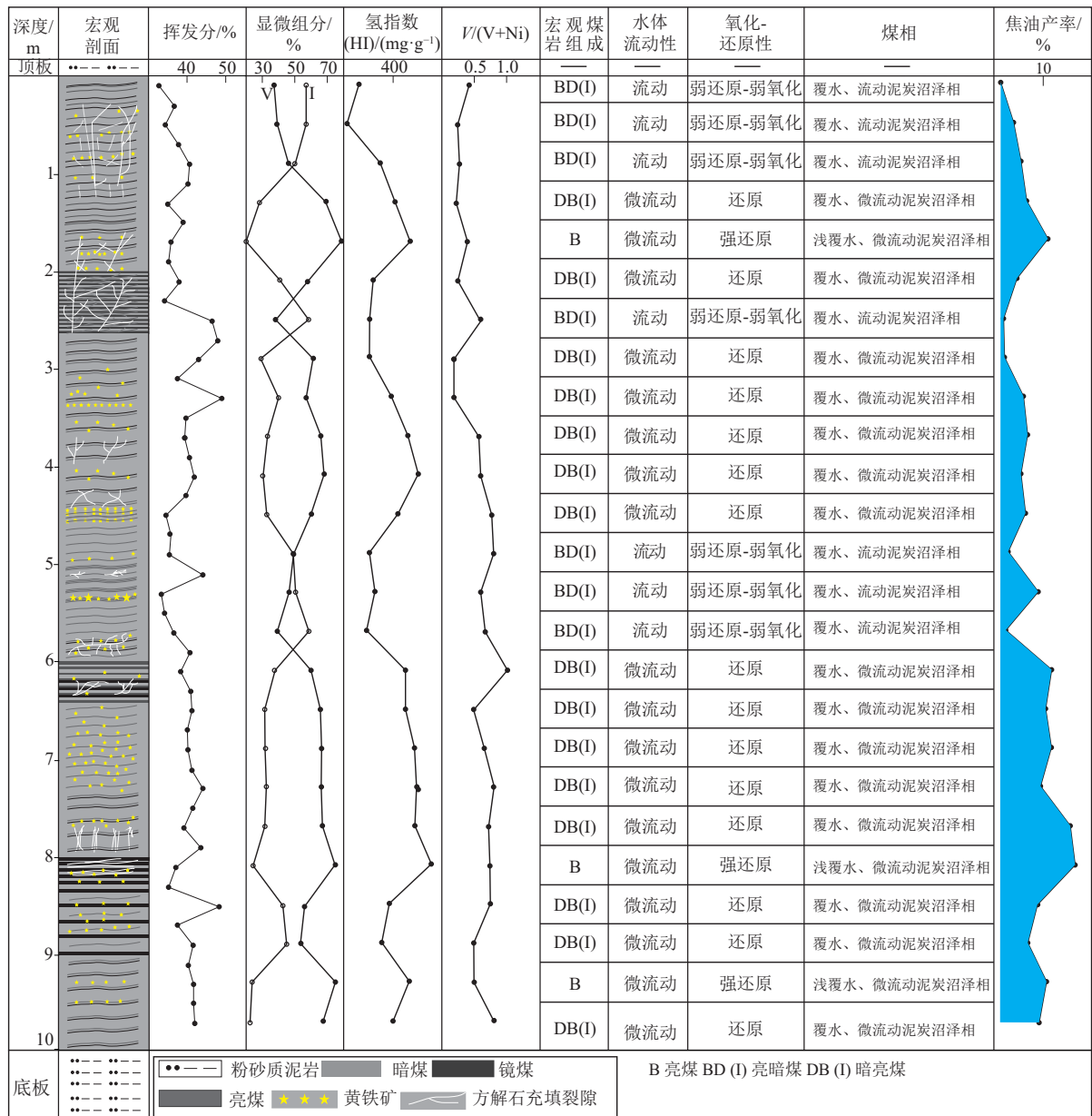


图 11 榆神矿区某煤矿主采 2² 煤综合柱状示意

Fig.11 Comprehensive 2² coal column diagram of the main mining of a coal mine in Yushen Mining Area

参考文献(References):

[1] 汪寅人, 刘品双, 陈文敏. 我国若干褐煤及烟煤的化学组成与低温焦油产率的关系[J]. 燃料学报, 1958, 3(1): 35-41.
WANG Yinren, LIU Pinshuang, CHEN Wenmin. Relationship between chemical composition and low temperature tar yield of some lignite and bituminous coals in China[J]. Acta Focalia Sinica, 1958, 3(1): 35-41.

[2] 张军, 袁建伟, 徐益谦. 矿物质对煤粉热解的影响[J]. 燃烧科学与技术, 1998, 4(1): 66-71.
ZHANG Jun, YUAN Jianwei, XU Yiqian. Effects of mineral matter on pyrolysis of pulverized coal[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 1998, 4(1): 66-71.

[3] 晁伟, 苏展, 李东涛, 等. 一种预测煤焦油产率的新方法[J]. 煤炭转化, 2011, 34(2): 64-68.
CHAO Wei, SU Zhan, LI Dongtao, et al. A new method to anticipate the coal tar yield[J]. Coal Conversion, 2011, 34(2): 64-68.

[4] 孙晔伟, 唐跃刚, 李正越, 等. 中国特高挥发分特高油产率煤的分布及其特征[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(5): 6-12.
SUN Yewei, TANG Yuegang, LI Zhengyue, et al. Occurrence of super high volatile and tar yield coal in China[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(5): 6-12.

[5] 谢青, 李宁, 姚征, 等. 黄陵矿区富油煤焦油产率特征及主控地质因素分析[J]. 中国煤炭, 2020, 46(11): 83-90.
XIE Qing, LI Ning, YAO Zheng, et al. Research on the tar yield characteristics and main control factors of tar-rich coal in Huangling mining area[J]. China Coal, 2020, 46(11): 83-90.

[6] 王锐, 夏玉成, 马丽. 榆神矿区富油煤赋存特征及其沉积环境研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(12): 192-197.
WANG Rui, XIA Yucheng, MA Li. Study on oil-rich coal occurrence characteristics and sedimentary environment in Yushen Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(12): 192-197.

[7] 李华兵, 李宁, 姚征, 等. 陕北三叠纪煤田子长矿区瓦窑堡组

- 特高焦油产率煤富集规律分析[J]. 中国煤炭地质, 2021, 33(1): 22-25,79.
- LI Huabing, LI Ning, YAO Zheng, *et al.* Study on wayaobu formation extra-high tar yield coal enrichment pattern in Zichang Mining Area, Northern Shaanxi Triassic Coalfield[J]. Coal Geology of China, 2021, 33(1): 22-25,79.
- [8] 李华兵, 姚征, 李 宁, 等. 神府矿区5-2煤层富油煤赋存特征及资源潜力评价[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(3): 26-32.
- LI Huabing, YAO Zheng, LI Ning, *et al.* Occurrence characteristics and resource potential evaluation of tar-rich coal for No.5 -2 coal seam in Shenfu Mining Area[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(3): 26-32.
- [9] 张 宁, 许 云, 乔军伟, 等. 陕北侏罗纪富油煤有机地球化学特征[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(3): 4249.
- ZHANG Ning, XU Yun, QIAO Junwei, *et al.* Organic geochemistry of the Jurassic tar-rich coal in Northern Shaanxi Province[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(3): 42-49.
- [10] 陈 祥, 张育民, 程克明, 等. 焉耆盆地侏罗纪煤系源岩显微组分组合与生油潜力[J]. 地球科学, 2005, 30(3): 337-342.
- CHEN Xiang, ZHANG Yumin, CHENG Keming, *et al.* Maceral Composition and Oil Potential of the Jurassic Coal Bearing Series in the Yanqi Basin[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2005, 30(3): 337-342.
- [11] 钟宁宁, 陈恭洋. 中国主要煤系倾气倾油性主控因素[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(3): 331-338.
- ZHONG Ningning, CHEN Gongyang. Key controls of the gas and oil preferences of China's major coal-bearing sequences[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(3): 331-338.
- [12] 郭春清. 形成煤成油田的制约条件[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(5): 69-73.
- GUO Chunqing. Key format ion conditions of coal-derived oil-fields[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(5): 69-73.
- [13] 张双全, 吴国光. 煤化学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2019.
- ZHANG Shuangquan, WU Guoguang. Coal Chemistry[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2019.
- [14] WILKINS R, GEORGE S C. Coal as a source rock for oil: a review[J]. International Journal of Coal Geology, 2002, 50(1-4): 317-361.
- [15] SAXBY J D. Atomic HC ratios and the generation of oil from coals and kerogens[J]. Fuel, 1980, 59(5): 305-307.
- [16] LANGFORD F F, BLANC-VALLERON M M. Interpreting Rock-Eval pyrolysis data using graphs of pyrolyzable hydrocarbons vs. total organic carbon[J]. AAPG bulletin, 1990, 74(6): 799-804.
- [17] PETERS K E, CASSA M R. Applied source rock geochemistry[J]. American Association of Petroleum Geologists, 1994, 60: 93-120.
- [18] HAKIMI M H, ABDULLAH W H, SIA S G, *et al.* Organic geochemical and petrographic characteristics of Tertiary coals in the northwest Sarawak, Malaysia: implications for palaeoenvironmental conditions and hydrocarbon generation potential[J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 48: 31-46.
- [19] 王飞宇, 傅家谟, 刘德汉, 等. 煤和陆源有机质生油岩有机岩石学特点及评价[J]. 石油勘探与开发, 1994, 21(4): 30-35.
- WANG Feiyu, FU Jiamo, LIU Dehan, *et al.* Organic petrological characteristics of coal and ter-restrictal organic matter and their assessment as a oil source rock[J]. Petroleum Exploration and Development, 1994, 21(4): 30-35.
- [20] 汤达祯, 王激流, 林善园, 等. 煤二次生烃作用程序热解模拟试验研究[J]. 石油实验地质, 2000, 22(1): 9-15.
- TANG Dazhen, WANG Jiliu, LIN Shanyuan, *et al.* An experimental Study of Program Pyrolytic Modeling on Secondary Hydrocarbon Generation of Coals[J]. Experimental Petroleum Geology, 2000, 22(1): 9-15.
- [21] SENGULER I, AYYILDIZ T, ONAL Y, *et al.* Organic geochemical characterization and mineralogical properties of Mengen oil shale (Lutetian), Bolu-Turkey[J]. Oil Shale, 2008, 25(3) : 359-376.
- [22] 杨 智, 邹才能. “进源找油”: 源岩油气内涵与前景[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(1): 173-184.
- YANG Zhi, ZOU Caineng. “Exploring petroleum inside source kitchen”: Connotation andprospects of source rock oil and gas[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(1) : 173-184.
- [23] 郝吉生, 葛宝勋, 谢洪波. “灰成分端元分析法”及其在聚煤环境分析中的应用们[J]. 沉积学报, 2000, 18(3): 460-464.
- HAO Jisheng, GE Baoxun, XIE Hongbo. The analysis method based on ash:composition and itsapplication in coal-accumulating environment reconstruction[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(3): 460-464.
- [24] DAI S, JI D, WARD C R, *et al.* Mississippian anthracites in Guangxi Province, southern China: petrological, mineralogical, and rare earth element evidence for high-temperature solutions[J]. International Journal of Coal Geology, 2018, 197: 84-114.
- [25] SPIRO B F, LIU J, DAI S, *et al.* Marine derived ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr in coal, a new key to geochronology and palaeoenvironment: elucidation of the India-Eurasia and China-Indochina collisions in Yunnan, China[J]. International Journal of Coal Geology, 2019, 215: 103304.
- [26] DAI S, BECHTEL A, EBLE C F, *et al.* Recognition of peat depositional environments in coal: A review[J]. International Journal of Coal Geology, 2020, 219: 103383.
- [27] DIESSEL C F K. The correlation between coal facies and depositional environments[C]//Proceedings of the 20th symposium of the ad-vances in the study of the Sydney Basin. Australia: University of Newcastle, 1986: 19-22.
- [28] 邵龙义, 王学天, 鲁 静, 等. 再论中国含煤岩系沉积学研究进展及发展趋势[J]. 沉积学报, 2017, 35(5): 1016-1031.
- SHAO Longyi, WANG Xuetian, LU Jing, *et al.* A reappraisal on development and prospect of coal sedimentology in China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, 35(5): 1016-1031.
- [29] 黄第藩, 秦匡宗, 王铁冠, 等. 煤成油的形成和成烃机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995.
- HUANG Difan, QIN Kuangzong, WANG Tieguan, *et al.* Oil from coal: formation and mechanism[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995.
- [30] 李文华, 白向飞, 杨金和, 等. 烟煤镜质组平均最大反射率与煤种之间的关系[J]. 煤炭学报, 2006, 31(3): 342-345.
- LI Wenhua, BAI Xiangfei, YANG Jinhe, *et al.* Correspondence between mean maximum reflectance of vitrinite and classification of bituminous coals[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(3): 342-345.
- [31] 倪志强. 炼焦煤中镜质组的黏结性特征及其成焦行为[D]. 唐山: 河北联合大学, 2015.
- NI Zhiqiang. The Caking Properties of the Vitrinite in Coking Coals and its Coking Behavior[D]. Tangshan: Hebei United University, 2015.