



地球物理学进展
Progress in Geophysics
ISSN 1004-2903, CN 11-2982/P

《地球物理学进展》网络首发论文

题目：陕西省煤岩焦油产率测井评价方法研究
作者：田瀚，冯周，王金锋，闫和平，马丽，武宏亮，刘鹏，王贵文
收稿日期：2023-05-29
网络首发日期：2023-11-13
引用格式：田瀚，冯周，王金锋，闫和平，马丽，武宏亮，刘鹏，王贵文. 陕西省煤岩焦油产率测井评价方法研究[J/OL]. 地球物理学进展.
<https://link.cnki.net/urlid/11.2982.P.20231109.1731.014>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

陕西省煤岩焦油产率测井评价方法研究

田瀚^{1,2}, 冯周², 王金锋³, 闫和平³, 马丽⁴, 武宏亮², 刘鹏², 王贵文¹

(1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 3. 陕西省一九四煤田地地质有限公司, 陕西铜川, 727000; 4. 陕西省煤田地地质集团有限公司(自然资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室), 陕西西安, 710021)

*通信作者 王贵文, 男, 1966 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为沉积储层与测井地质学方面的教学与科研工作。E-mail: wanggw@cup.edu.cn

摘要 富油煤作为一种煤基油气资源, 对保障我国油气资源供应、实现煤炭绿色低碳利用具有现实意义。焦油产率作为富油煤判识的唯一指标, 目前主要通过格金干馏试验获得, 而利用地球物理手段进行焦油产率评价的研究相对薄弱。为了实现利用测井资料预测煤岩焦油产率, 本文以陕西省五大煤田重点煤井的基础实验分析数据和测井资料为基础, 结合前人研究认识, 在明确煤岩焦油产率影响因素分析的基础上, 探索建立煤岩焦油产率测井评价方法。研究表明: (1) 焦油产率受煤岩热演化程度、物质组成和成煤环境共同影响, 在煤心刻度测井的基础上, 建立了利用常规测井资料计算煤岩工业组分, 利用无水无灰固定碳和挥发分含量识别煤化程度, 利用元素测井测量得到的元素含量评价成煤环境, 实现了焦油产率影响因素的量化表征; (2) 在综合考虑煤质、煤阶和煤灰成分情况下, 创新提出了一种基于煤岩影响因素逐步剥离的焦油产率分类评价方法, 计算结果与实际岩心分析结果一致性好。

关键词 富油煤; 工业组分; 焦油产率; 成煤环境; 测井评价

Study on logging evaluation method of coal tar yield in Shaanxi Province

TIAN Han^{1,2}, FENG Zhou², WANG Jinfeng³, YAN Heping³, MA Li⁴, WU Hongliang², LIU Peng², WANG Guiwen¹

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 3. Shaanxi Provincial No.194 Coal Geological Exploration Co. Ltd, Tongchuan, Shaanxi 727000; 4. Shanxi Provincial Coal Geology Group Co. Ltd. (Ministry of Natural Resources Key Laboratory of Coal Resource Exploration and Comprehensive Utilization) Xi'an Shaanxi 710021)

Abstract Tar-rich coal is a kind of coal-based oil and gas resource. It is of practical significance to guarantee the supply of oil and gas resources and realize the green and low-carbon utilization of coal. Tar yield, as the only index of tar-rich coal identification, is mainly obtained by Gerkin distillation test, but the research on the evaluation of tar yield by geophysical methods is relatively weak. Based on the logging data and basic experimental analysis data of key coal wells in the five coalfields of Shaanxi Province, the main influencing factors of coal tar yield are systematically analyzed, and the quantitative evaluation method of coal tar yield is tried to establish. The results shown: (1) Tar yield is mainly affected by coal quality, coalification degree and coal forming environment. A method was established to calculate the industrial components of coal with conventional logging data, identify the degree of coalification with the fixed carbon and volatile content without water and ash, and evaluate the coal formation environment with the element content calculated by elemental logging, thus realizing the quantitative characterization of the factors affecting the tar yield; (2) Under the comprehensive consideration of coal rank, coal quality and coal ash composition, A new evaluation method of tar yield based on gradual stripping of influencing factors is proposed, and the calculation results are in good agreement with the actual core analysis results.

Key words Tar-rich coal; Industrial components; Tar yield; Coal-forming environment; Logging evaluation

收稿日期: 2023-05-29

基金项目: 自然资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室课题(SMDZ-2019ZD-1, SMDZ-2019CX-9); 中石油“十四五”基础性前瞻性科技项目(2021DJ3805)。

作者简介: 田瀚, 男, 1989 年生, 在职博士生, 工程师, 研究方向为复杂储层测井资料处理及综合评价研究。E-mail: tianh_hz@petrochina.com.cn

网络首发时间: 2023-11-13 12:52:53 网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.2982.P.20231109.1731.014>

0 引言

我国能源结构呈现出“缺油、少气、相对富煤”的资源禀赋特征（王双明等，2021）。煤作为重要的化石能源，是我国能源消费的主体，虽说消费占比近年来略有下降，但目前仍然占比最大。煤炭作为国家能源主体地位短期内不会改变，仍继续扮演着能源压舱石的角色（梵大磊等，2021；马丽等，2022）。为了响应国家“2030 年碳达峰、2060 年碳中和”的庄严承诺和保障国家能源供给安全的目标，推动煤炭安全绿色开采、清洁高效低碳利用是能源生产和消费革命的要求，也是新时代煤炭工业重要的发展方向（王双明等，2019）。

富油煤作为一种煤基油气资源，在隔绝空气条件下，通过中低温干馏技术可提取煤焦油，再经过后期加工生成成品油，是燃料油的替代产品（张颀等，2009）。大规模发展以生产油气为主要产品的富油煤开发和高效转化产业，对国内油气供给和煤炭清洁高效低碳循环发展至关重要（王双明等，2021）。按照矿产资源工业要求手册（2014 修订版）定义，富油煤是指在格金干馏试验条件下焦油产率在 7%~12% 的煤岩，而焦油产率小于 7% 的定义为含油煤，大于 12% 的称为高油煤，王双明等从资源评价角度，将焦油产率 $\geq 7\%$ 的煤统称为富油煤（王双明等，2021；师庆民等，2019）。对于富油煤的研究，目前学者们多聚焦于资源潜力、主控因素和赋存规律等地质方面，如王双明等研究认为，我国富油煤资源潜力巨大，其中西部地区是富油煤主要富集区，陕西、新疆、内蒙古、甘肃和宁夏 5 省区富油煤资源量约有 5000 亿吨（王双明等，2021；马丽等，2020；姜耀东等，2021；杨甫等，2021）；谢青、王锐、李华兵、许婷等分别研究了陕北黄陵、榆神和子长等矿区的富油煤分布规律及控制因素，认为成煤环境、煤化程度及煤中显微组分是富油煤发育的主控因素（谢青等，2022；王锐等，2020；李华兵等，2021；许婷等，2021）；师庆民等探讨了富油煤地化特征及宏-微观控制规律，研究分析了富油煤多源判别规律（师庆民等，2021；姚征等，2021；张宁等，2021）。对于煤岩焦油产率预测方面，部分学者也开展了探索性工作，如马丽等通过对陕北四个煤田主采煤层的煤岩焦油产率研究，认为焦油产率与挥发分呈正相关，但两者相关性较低，尚无法满足焦油产率计算精度要求（马丽等，2022）；闫和平等研究认为焦油产率与补偿密度具有相关性，并建立了焦油产率计算模型，但相关系数较低（闫和平等，2022）；赵军龙、王昌建等则提出利用多元回归拟合和神经网络的方法开展煤岩焦油产率预测，认为分区开展模型建立效果相对较好（赵龙军等，2022；王昌建等，2023），总而言之，现阶段针对煤岩焦油产率评价方法多限于具体研究区，评价模型的精度也有待提高。虽说对于浅层和露头煤矿，开展煤岩试验测量获得焦油产率含量相对简单，但测量数据通常具有离散性和滞后性，不利于富油煤的快速识别和精细评价；对于深层煤岩，也无法采用大规模取心的方式来获得煤岩焦油产率，因此，如何准确快速、经济有效的评价煤岩焦油产率是当前亟待解决的问题。

为此，笔者基于陕西省五大煤田重点煤井的煤岩分析数据和测井资料，在系统分析富油煤焦油产率影响因素的基础上，探索建立煤岩焦油产率测井评价方法，以期后续富油煤的地质评价及富集区预测提供技术支撑。

1 陕西省煤田分布特征

陕西省煤田主要分布于鄂尔多斯盆地渭河以北地区，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陕北侏罗纪煤田、陕北石炭-二叠纪煤田、陕北三叠纪煤田、黄陇侏罗纪煤田和渭北石炭-二叠纪煤田等五大煤田（图 1）。其中陕北侏罗纪煤田主要采煤层发育于中侏罗统延安组，煤岩以长焰煤、不黏-弱黏煤为主，焦油产率为 2.4%-9.5%，平均焦油产率 6.98%，发育含油煤和富油煤；陕北石炭-二叠纪煤田的煤层主要发育于下二叠统山西组和上石炭统太原组，煤岩以长焰煤为主，少量不黏-弱黏煤、气煤，焦油产率为 6.4%-10.6%，平均焦油产率 8.7%，以富油煤为主；陕北三叠纪煤田的煤层主要发育于上三叠统瓦窑堡组，煤岩以气煤为主，含有气肥煤和长焰煤，焦油产率为 8.4%-15.9%，平均焦油产率 12.13%，属于富油煤和高油煤；黄陇侏罗纪煤田

的煤层主要发育于中侏罗统延安组，煤岩以不黏-弱黏煤、长焰煤为主，焦油产率为 2.0%-9.75%，平均焦油产率 6.05%，以含油煤为主；渭北石炭-二叠纪煤田的煤层主要发育于下二叠统山西组和上石炭统太原组，虽说与陕北石炭-二叠纪煤田的煤岩发育层位相同，但渭北石炭-二叠纪煤田的煤岩主要以瘦煤、贫瘦煤和贫煤为主，焦油产率为 0.25%-0.6%，平均焦油产率 0.43%，焦油产率极低，属于含油煤（马丽等，2022）。从平面分布来看，中部陕北三叠纪煤田焦油产率最高，北部陕北石炭-二叠纪煤田和陕北侏罗纪煤田次之，南部的黄陇侏罗纪煤田和渭北石炭-二叠纪煤田较低。陕北不同区域煤岩的焦油产率差异大，即使是相同区域、相同沉积时代的煤层，焦油产率也是存在明显差异，如均为石炭-二叠纪煤田，陕北石炭-二叠纪煤田的煤层平均焦油产率可达 8.7%，而渭北石炭-二叠纪煤田却仅有 0.43%，展现出富油煤分布的不均匀性。

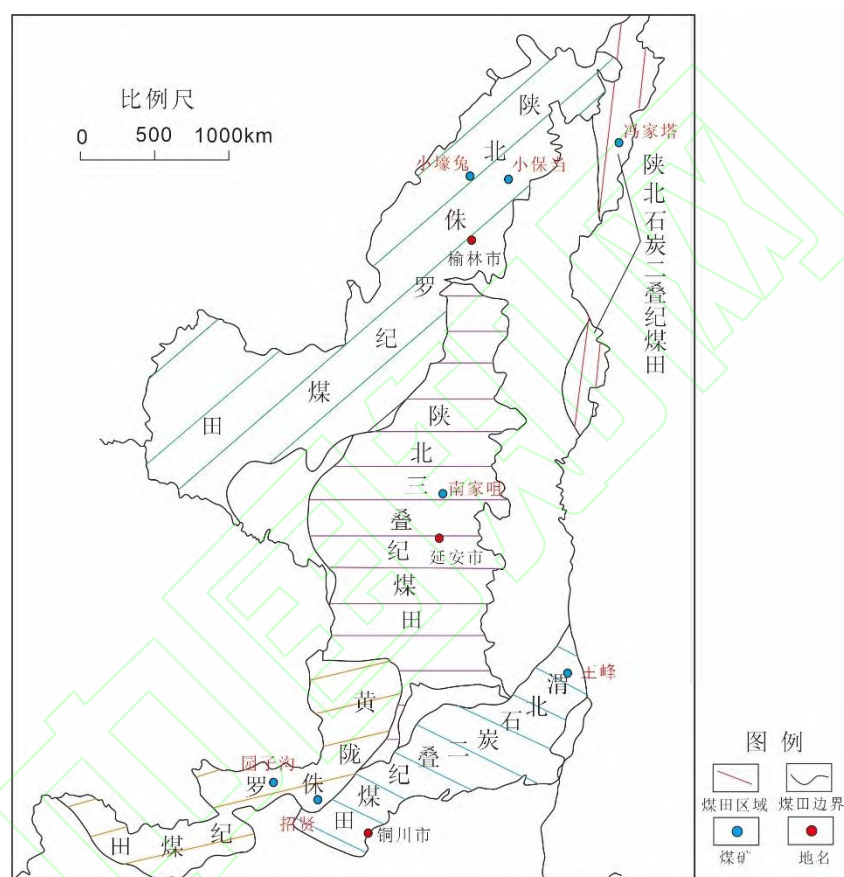


图 1 研究区示意图（据文献[40]修改）
Fig.1 Schematic diagram of study area

2 焦油产率影响因素及表征方法

焦油产率作为富油煤判别的唯一指标，明确煤岩焦油产率的影响因素对于建立焦油产率定量评价方法至关重要。虽说影响煤岩焦油产率高低的影响因素众多，但为了从本质上明确煤岩焦油产率的地质因素，故在此不讨论热解工艺的影响。笔者基于不同陕西省五大煤矿重点煤井的煤样（ $n=45$ ），系统分析了不同煤岩参数与焦油产率之间的关系，了解煤岩焦油产率的主要影响因素，并建立相应量化表征方法。

2.1 煤化程度

煤化程度表征了煤在温度、压力、时间影响下的组分和性质变化，常用镜质组反射率（ R_o ）来反映煤化程度。实验测量结果发现，陕西省主要煤层的镜质组反射率一般在 0.5%~1.5%之间，不同煤田表现不同，如陕北石炭-二叠纪煤田，镜质组反射率 R_o 在 0.57%~1.5%，而陕北侏罗纪煤田 R_o 在

0.51%~0.72%。基于焦油产率与镜质组反射率 R_o 交会分析发现（图 2），随着镜质组反射率 R_o 的增大，煤岩焦油产率表现出先增大后减小的特点，即低变质煤随煤化程度增大焦油产率升高，中-高变质煤则随着煤化程度增大焦油产率降低， R_o 约为 0.9% 时，焦油产率达到最大值，这与马丽等在陕北其他煤田的研究认识相一致（马丽等，2022）。煤化作用其实就是一个增碳、脱氢、脱氧和脱水的过程，在相同热解条件下，不同煤化程度的煤岩焦油产率存在明显差异，而富油煤（焦油产率 $\geq 7\%$ ）主要发育在中-低煤化程度的煤岩中。

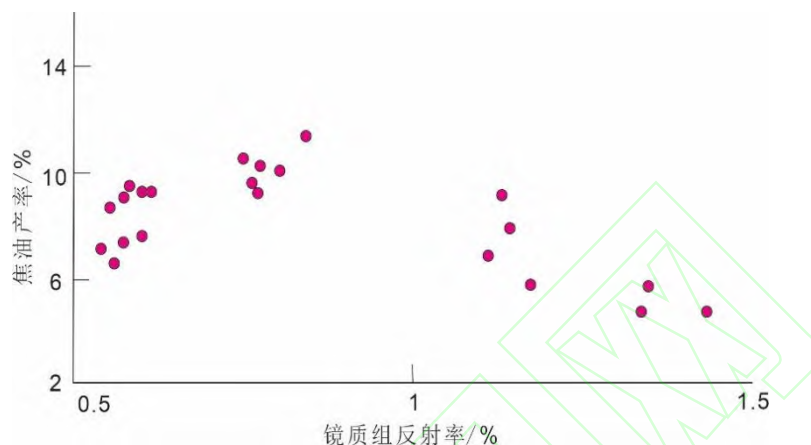


图 2 焦油产率与镜质组反射率的关系图（据文献[40]修改）
Fig. 2 Relationship between tar yield and R_o

按照镜质体反射率大小对煤阶进行划分，一般认为 $R_o < 0.7\%$ 为低阶煤， R_o 介于 0.65%~1.9% 为中阶煤， $R_o > 1.9\%$ 为高阶煤，其中褐煤和长焰煤称为低阶煤，气煤、肥煤、焦煤和瘦煤称为中阶煤，贫煤和无烟煤以上称为高阶煤（毛志强等，2011；赵军龙等，2022）。美国材料与试验协会（ASTM）则根据煤岩无水无灰固定碳和挥发分含量也建立了划分标准，将煤阶类型划分为无烟煤、半无烟煤、低挥发性的烟煤、中挥发性的烟煤、高挥发性的烟煤和亚烟煤（ASTM，2005）。虽说两者煤阶划分标准存在差异，但相互之间存在对应性，均被广泛用于煤阶识别中。

实验测量的镜质组反射率虽能准确反映煤岩的煤化程度，但目前难以用地球物理手段量化表征。基于无水无灰固定碳和挥发分含量的煤阶分类标准，为利用测井手段识别煤岩煤化程度提供了新思路。在煤心资料的刻度下，利用测井资料可以准确计算出煤岩的工业组分（空气干燥基条件下挥发分和固定碳含量），后续有具体方法介绍，将计算得到的挥发分和固定碳含量转换到干燥无灰基状态，结合煤阶划分标准，即可实现煤阶的准确识别，避免了传统采用镜质组反射率的方式。图 3 为陕西省煤田部分煤层煤阶识别结果，如渭北石炭-二叠纪煤田王峰煤矿山西-太原组煤层，煤岩无水无灰固定碳含量大于 78%，挥发分含量小于 22%，为低挥发性烟煤-半无烟煤，对应国内分类标准的瘦煤、贫瘦煤和贫煤；而陕北侏罗纪煤田小保当煤矿延安组煤层，煤岩无水无灰固定碳含量小于 69%，挥发分含量大于 31%，整体表现为高挥发性烟煤-亚烟煤，对应国内分类标准的长焰煤。

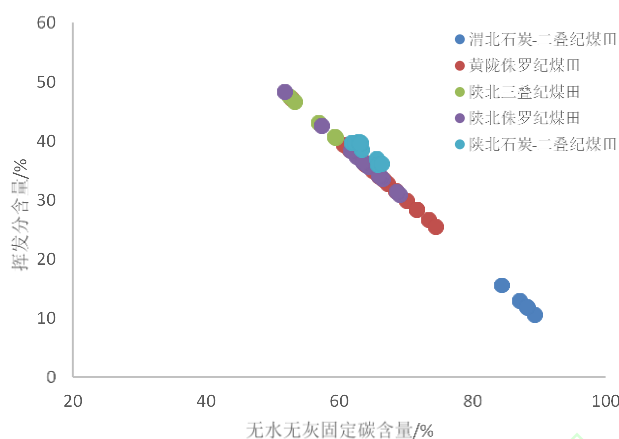


图3 基于无水无灰固定碳和挥发分含量划分煤阶
Fig. 3 Classification of coal rank by the content of fixed carbon and volatile matter with no water or ash

2.2 物质组成

虽说中-低煤化程度是富油煤赋存的先决条件，但是两者并不存在对等关系（姚征等，2021），并非中-低煤化程度的煤岩都是富油煤，煤中焦油产率高低同样受煤岩物质组成影响。

已有研究表明，煤中含有多种有机和无机显微组分，不同的有机显微组分生烃潜力尤其是生油能力存在不同，物质组成影响着煤岩焦油产率（王锐等，2020；李华兵等，2021；许婷等，2021）。杨甫等通过对陕北榆神矿区的煤岩分析发现，煤岩焦油产率与煤中镜质组含量呈正相关关系，与惰质组含量呈负相关关系，煤中镜质组含量越高，煤岩焦油产率相应越大（杨甫等，2021）。从宏观角度来看，煤岩是由复杂的化合物组合而成，为了便于表征，学者们通过研究煤岩工业组分来分析煤质与焦油产率关系。研究认为，煤岩的焦油产率与煤中灰分和水分呈负相关性，与挥发分呈正相关性，表现出煤岩挥发分含量越高，焦油产率越大的特点（许婷等，2021；杨东根等，2010）。图4为陕西省不同煤田的煤岩挥发分含量与焦油产率交会图，可以发现，煤岩焦油产率随挥发分含量增多整体呈增大趋势，这与煤岩的挥发分主要来自煤中有机质热解密切相关。

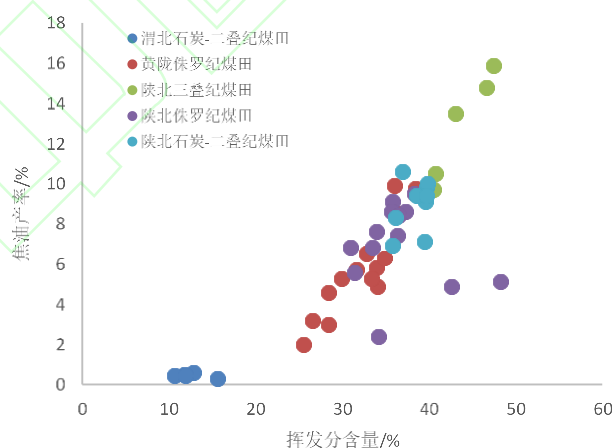


图4 焦油产率与煤岩挥发分含量关系
Fig.4 Relationship of tar yield and volatile matter

前述分析表明，焦油产率与煤岩的煤化程度和挥发分含量均存在联系，不论是利用无水无灰固定碳和挥发分含量识别煤阶类型，还是明确煤岩的物质组成，煤岩工业组分的准确计算是关键。目前，对于煤岩工业组分计算的常见测井评价方法有回归分析法和体积模型法（毛志强等，2011；杨东根等，2010；梁明星等，2013；潘和平，2005）。针对陕西省五大煤田的主力煤层，笔者基于煤岩工业

组分实测数据和相应测井资料,通过交会分析建立了煤岩工业组分的测井计算方法。如图 5 所示,分析发现煤灰分含量与相应深度归一化后的自然伽马测井值具有很好的线性关系,两者相关系数达 0.89,之所以采用归一化后的自然伽马值,是为了消除非地层岩石特性变化所引起的伽马值变化。而煤岩固定碳含量与补偿密度测井值具有明显负相关性,即随着固定碳含量的减少,密度值逐渐增大,两者相关系数达 0.85。再结合煤岩各组分之间的内在联系,如煤岩碳分(固定碳+挥发分)和灰分之间具有很好的负相关性(李纪森,1999;黄兆辉等,2012;乔磊,2015;钱玉萍等,2021),在准确获得煤灰分和固定碳含量的基础上,即可计算出煤岩挥发分含量。最后利用在空气干燥基状态下煤岩各工业组分含量之和为 100% 的特点,即可得到水分含量,从而实现煤岩工业组分的准确计算,这为量化表征煤岩煤化程度和物质组成提供了基础。

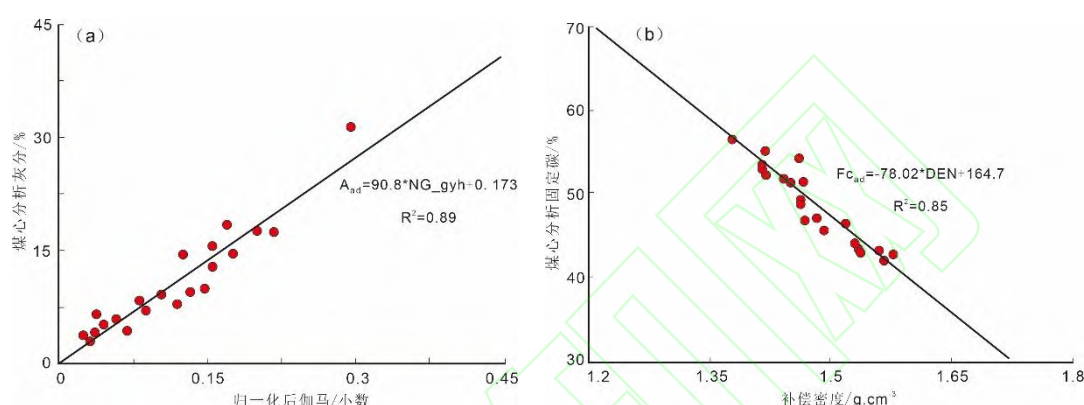


图 5 煤灰分及固定碳含量与自然伽马、密度关系图
Fig.5 Relationship of coal ash and GR fixed carbon content and density

2.3 成煤环境

虽说煤焦油来源于煤中有机部分,多数无机矿物对煤岩焦油产率没有贡献,但是通过无机矿物的种类和含量可以定性分析聚煤环境。前人研究认为,富油煤主要发育于还原-强还原的覆水环境中(许婷等,2021),而煤灰分中 Al_2O_3 和 SiO_2 能指示水动力条件, CaO 和 MgO 能指示成煤环境的气候条件, Fe_2O_3 和 SO_3 能指示氧化还原条件。煤灰中无机矿物类型和含量的差异指示着成煤环境的不同;同时,煤中部分无机矿物还对煤焦油的析出具有催化或抑制作用,影响着煤焦油产出效率。杨玉坤对煤灰中常见矿物及含量在煤热解过程中如何影响焦油产率进行了研究,发现在中低温条件下($\leq 600^\circ C$), Fe_2O_3 含量对煤焦油的析出具有抑制作用,而其它无机矿物的影响则较弱(杨玉坤,2017)。

如表 1 所示,两个煤岩样品均来自陕北侏罗纪延安组煤层,两者均为高挥发性烟煤,且挥发分含量相近,但是焦油产率差异明显, #1 的焦油产率几乎是 #2 焦油产率的 3 倍。从两者煤灰成分来看, #2 煤样不仅灰分含量高,而且灰分中 ($Fe_2O_3 + SO_3$) 质量分数(用 “ $w(Fe_2O_3 + SO_3)$ ” 表示)和 Fe_2O_3/SO_3 比值大,反映该煤岩形成于弱氧化-弱还原环境, #1 煤样则没有表现出这种特征;同时从表 1 中可以发现, #2 煤样 Fe_2O_3 含量较高,按照前人研究认识,其在热解过程中对煤焦油的析出具有一定抑制作用,这在一定程度上可能也影响煤岩焦油产率。

表1陕北侏罗纪延安组不同煤层试验分析结果
Tab.1 Experimental results of different Jurassic coal layers in northern Shaanxi

编号	FCad /%	Mad /%	Vdaf /%	Ad /%	Tar _{ad} /%	Fe ₂ O ₃ /%	SO ₃ /%
#1	56.18	6.07	33.89	9.53	7.6	21.72	6.41
#2	54.53	4.64	34.13	13.19	2.4	59.38	5.64

目前煤灰成分和含量主要依靠实验手段获取，但地层岩性扫描测井的出现为解决这一问题提供了新的技术手段。地层岩性扫描测井是利用快中子与地层中的原子核发生非弹性散射碰撞及热中子俘获的原理，通过解谱可得到地层中主要造岩元素(Si、Ca、Fe、Al、S、Ti、Na、K、Mg 等)的相对百分含量，再利用氧化物闭合模型获取矿物含量，从而达到评价地层矿物类型及含量的目的。目前元素扫描测井在非常规油气领域岩石矿物成分识别和含量计算方面已经得到了广泛应用（武宏亮等，2013）。对于煤层，在岩性扫描测井获得主要造岩元素含量后，虽然缺乏大量全岩分析数据来建立元素和矿物的转化模型，但是结合实验测量的煤灰成分，可建立起 Si 与石英、Ca 与氧化钙、Mg 与氧化镁、Al 与三氧化二铝等的对应关系。在研究区煤灰成分定性表征成煤环境的基础上，即可得到相应元素识别成煤环境的评价标准，如前述 Fe₂O₃/SO₃ 即可转变为 Fe/S，从而实现利用岩性扫描测井测量得到的元素含量分析煤层沉积环境（李松臣等，2018）。图 6 中 2347-2355m 为 X1 井煤层发育段，从左至右，第五道为基于岩性扫描测井得到的矿物剖面，第六至十道分别为岩性扫描测井测量得到的铝、硅、钙、铁和硫元素相对含量。可以发现，煤层上部表现为“钙、铁元素相对含量较低”的特点，而下部表现为“铁和钙元素相对含量较高”的特点，其中，硫元素含量从上至下呈逐渐增大趋势，这些元素变化特征不仅反映出煤层无机矿物含量的不同，也反映出成煤环境的差异。虽说对于煤层，目前岩性扫描测井资料采集较少，但不可否认的是，其可为煤岩矿物识别和成煤环境分析提供重要帮助。

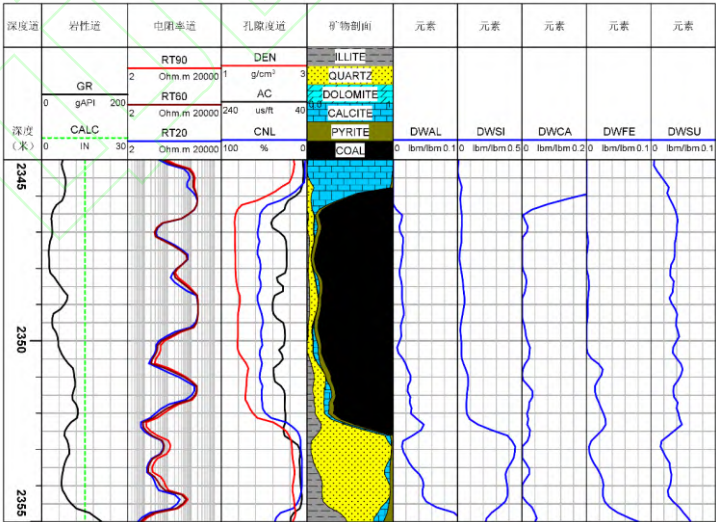


图 6 X1 井煤层岩性扫描测井测量的元素结果
Fig. 6 Element results of coal in well X1 by LithoScanner

上述研究表明，煤岩的煤化程度、物质组成和成煤环境等因素对焦油产率均有影响，正是因为诸多因素对煤岩焦油产率都有影响，才导致目前难以采用某种单一参数对焦油产率进行准确定量评价。

3 富油煤焦油产率评价方法

由于煤岩焦油产率的影响因素众多, 为了实现焦油产率的准确定量评价, 笔者在前述焦油产率影响因素量化表征的基础上, 提出了一种基于影响因素逐步剥离的焦油产率分类评价方法。

3.1 基于煤阶识别, 划分煤岩类型

前述研究发现, 焦油产率与挥发分含量之间的相关性虽然较其它组分要好, 表现为挥发分越高, 焦油产率越大, 但局部存在着不一致性。如图 4 所示, 当煤岩挥发分含量小于 25% 时, 焦油产率随挥发分的增加而缓慢升高, 挥发分含量超过 25% 后, 焦油产率随挥发分的变化速率明显加快, 不同挥发分含量范围内焦油产率随挥发分的变化关系差异明显。依据煤阶划分标准, 笔者利用无水无灰固定碳含量和挥发分含量对煤阶进行识别, 如图 3 所示, 渭北石炭-二叠纪煤田的煤岩无水无灰固定碳含量整体大于 78%, 挥发分含量小于 22%, 按照煤阶分类标准, 该煤田煤岩为低挥发性烟煤-半无烟煤, 而陕西省其它煤田的煤岩为中-高挥发性烟煤。故将陕西省煤岩大致分为两大类, 即低挥发性烟煤-半无烟煤和中-高挥发性烟煤。对于低挥发性烟煤-半无烟煤, 焦油产率随挥发分的变化速率较小, 对应图 4 中挥发分含量小于 25% 部分; 而对于中-高挥发性烟煤, 焦油产率随挥发分的变化速率相对较快, 对应图 4 中挥发分含量大于 25% 部分, 从而实现基于煤阶的煤岩分类。

3.2 基于煤灰成分, 对中-高挥发性烟煤进一步分类

利用煤阶虽然可以将挥发分含量小于 25% 部分的低挥发性烟煤-半无烟煤与中-高挥发性烟煤区分开, 但是对于中-高挥发性烟煤, 即使在相同煤阶的情况下, 焦油产率与挥发分也未表现出很好的线性关系。如图 4 所示, 当挥发分含量在 35%~50% 时, 焦油产率与挥发分的正相关性并不明显, 如在相同挥发分含量的情况下, 焦油产率可以从 2.4% 变化到 9.4%。

图 7a—c 分别为煤岩焦油产率与挥发分含量、挥发分含量与灰分含量、 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{SO}_3)$ 与 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SO}_3$ 的关系图。从图 6a 可以发现, 黑色虚线框中的煤岩与其他煤岩明显存在差异, 表现出在相同挥发分含量情况下, 焦油产率明显偏低的特点。更有意思的现象是, 该煤岩均来自于陕北侏罗纪煤田 (紫色数据点), 其表现出两种变化特征: 一部分煤岩与其他煤田具有相同变化趋势 (除黑色虚线框中数据点), 焦油产率与挥发分的变化关系呈现出很好的线性关系, 相关系数达 0.87; 而另一种特征就是黑色虚线框中的数据点, 虽然样本点不多, 但是整体表现出的规律与其他煤岩截然不同, 在相同挥发分含量情况下, 焦油产率明显偏低。通过进一步分析发现 (图 7b 和 6c), 黑色虚线框中的煤岩具有 “高灰分、高 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{SO}_3)$ 和高 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SO}_3$ ” 特点, 表现为 “灰分含量超过 10%, $w(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{SO}_3)$ 含量占煤灰总质量分数的 50%, $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SO}_3$ 大于 10”。虽然其他煤岩也存在高灰分含量的情况, 如陕北石炭-二叠纪煤岩, 其灰分含量整体超过 15%, 但是与黑色虚线框中煤岩相比, 其 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{SO}_3)$ 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SO}_3$ 均较低。通过前述焦油产率影响因素分析已知, 高 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{SO}_3)$ 含量和高 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SO}_3$ 比值反映煤岩形成于淡水介质弱氧化-弱还原环境, 这就解释了为什么陕北侏罗纪煤田部分煤层焦油产率偏低的原因。

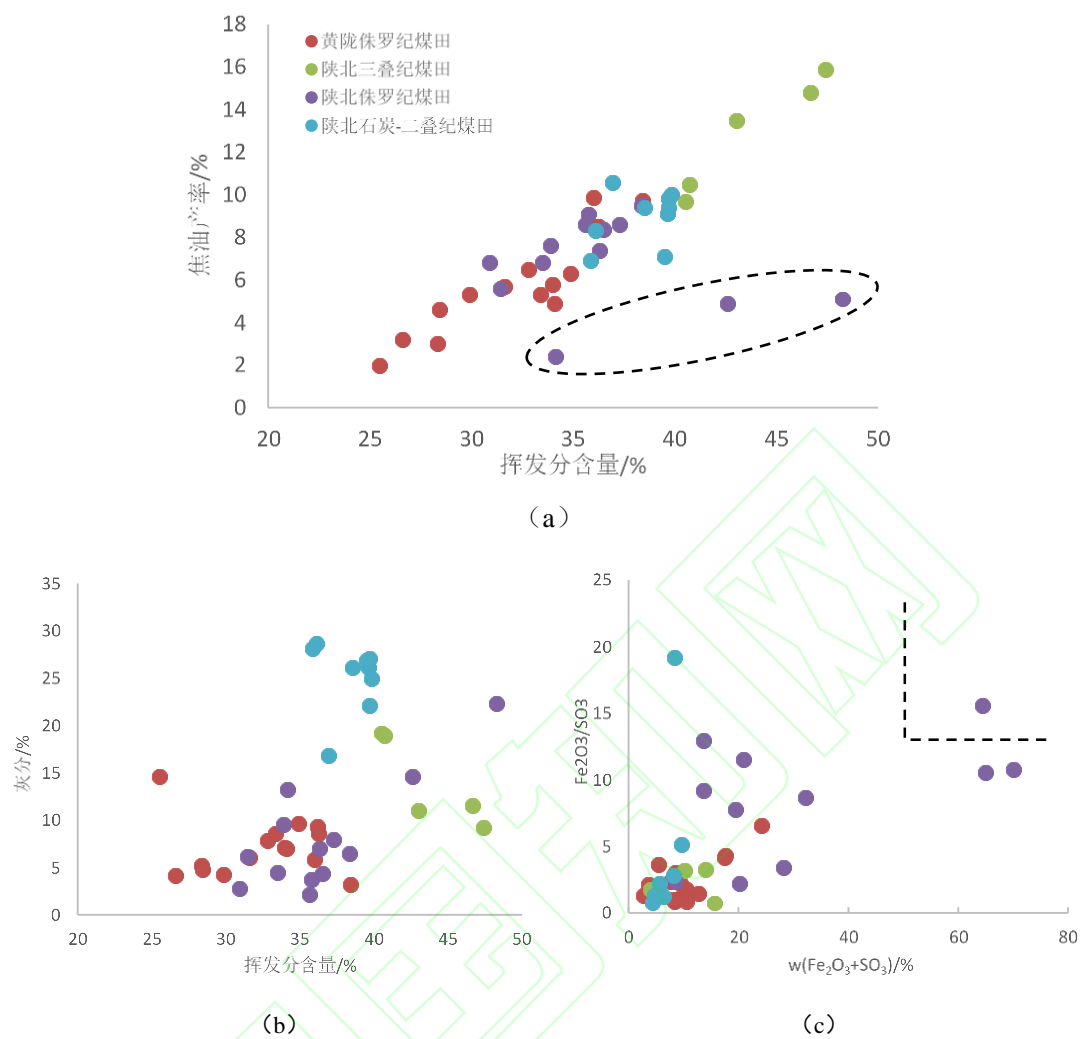


图7 陕西省不同焦油产率煤岩的灰分和无机矿物含量特征
(a) 焦油产率与挥发分关系图; (b) 挥发分与灰分关系图; (c) $w(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{SO}_3)$ 与 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SO}_3$ 关系图
Fig.7 Ash and mineral content characteristics of coal rocks with different tar yields in Shaanxi Province
(a) Relationship of tar yield and volatile matter; (b) Relationship of fixed carbon and water; (c) Relationship of $w(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{SO}_3)$ and $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SO}_3$

同时由于煤中 Fe_2O_3 含量在煤热解过程中具有抑制煤焦油析出的作用, 通过将陕北煤岩中 Fe_2O_3 含量转换到其占煤岩的质量分数时, 可以发现, 黑色虚线框中的煤岩 Fe_2O_3 含量占煤岩质量分数分别高达 13.5%、7.83%和 9.35%, 远超过其他煤岩中 Fe_2O_3 含量, 这也是为什么黑色虚线框中的煤岩焦油产率偏低另一个原因, 即该部分煤岩不仅形成于弱氧化-弱还原环境, 而且由于煤岩中 Fe_2O_3 含量过高, 进一步降低了煤焦油的产出效率。综合上述两种原因, 文中采用 Fe_2O_3 含量和 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SO}_3$ 比值两个参数作为中-高挥发性烟煤进一步划分依据具有其合理性。

故可以综合利用煤岩灰分、 Fe_2O_3 含量和 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SO}_3$ 比值对中-高挥发性烟煤进一步分类, 将其可以进一步划分为“高挥发分、高焦油产率”煤岩和“高挥发分、低焦油产率”煤岩。而对于陕西省煤岩, 可以利用灰分含量大于 10%、 Fe_2O_3 含量占煤岩总质量分数大于 5%和 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SO}_3$ 大于 10 等条件, 将高挥发分、低焦油产率煤岩识别出来。

3.3 分类建立焦油产率计算方法

基于上述思路, 首先, 利用常规测井资料准确计算煤岩工业组分参数, 将计算得到的固定碳含量转换到干燥无灰基状态下, 按照煤阶划分标准, 利用无水无灰固定碳和挥发分含量将煤岩划分为低挥

发性烟煤-半无烟煤和中-高挥发性烟煤；其次，根据计算得到的煤岩灰分含量和元素扫描测井测量的矿物元素含量（如 Fe 和 S 元素含量）将中-高挥发性烟煤进一步划分为高挥发分、高焦油产率煤岩和高挥发分、低焦油产率煤岩；最后，针对所划分的煤岩类别，分别建立焦油产率与挥发分含量关系，从而实现了在综合考虑煤阶、煤质和煤灰成分等影响因素下，准确计算煤岩焦油产率。

图 8 为陕西省主采煤层采用影响因素逐步剥离的方式，建立的富油煤焦油产率分类评价方法。该方法系统考虑了煤岩煤阶、煤质（灰分、挥发分）和煤灰成分（ Fe_2O_3 和 SO_3 ）对焦油产率的影响，相比传统直接拟合精度更高，也更为合理。可以发现，分类建立的焦油产率评价方法相关系数分别高达 0.9222、0.8875 和 0.8879。

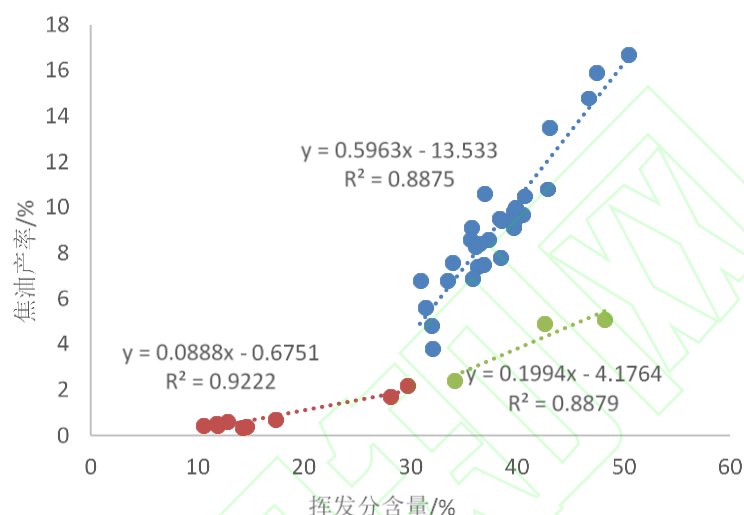


图 8 分类建立焦油产率与挥发分关系
Fig.8 Classification to establish the relationship between tar yield and volatile matter

4 实例应用

图 9 为陕西省 X2 煤井测井解释成果图，该井煤层主要发育于陕北侏罗系中统延安组，煤层厚度达 7.5m。如图所示，前六道分别为地层分层道、深度道、岩性道、电阻率道、孔隙度道和岩性剖面，第七至十道分别为测井计算的固定碳、灰分、水分和挥发分含量，第十一至十三道为基于煤阶分类标准，利用测井计算得到的无水无灰固定碳和挥发分含量识别的煤岩类型，第十三道为识别的煤阶类型；第十四道为测井计算的煤岩焦油产率含量。

从评价结果来看，该套煤层固定碳含量在 36%~60%，灰分含量在 5%~21%，挥发分含量在 26%~44.6%，水分含量在 6.7%~12.54%，测井计算的工业组分与煤岩分析结果一致。基于前述所建立的分类标准，利用转换公式得到干燥无灰基条件下的无水无灰固定碳和挥发分含量，X2 井煤层段无水无灰固定碳含量整体小于 78%，挥发分含量整体大于 22%，因此认为该套煤岩为中-高挥发性的烟煤，然后利用测井计算得到的灰分含量，结合该井煤灰分析数据中 Fe_2O_3 和 SO_3 含量，发现该煤层 $\text{SO}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 含量较高， $\text{SO}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 较低，故该煤层属于高挥发分、低焦油产率煤岩。比较遗憾的是，该井由于没有进行元素测井，因此无法通过元素测井得到连续的元素含量，但元素测井能准确测量主要造岩元素已在其它领域被证实。基于测井计算结果，该煤层焦油产率在 1.6%~6.5%，整体低于 7% 的富油煤标准，属于含油煤，且计算结果与煤岩低温干馏试验测量的焦油产率具有很好的一致性，从整个煤层而言，计算结果与实测结果两者绝对误差平均约为 0.56，从具体层位来看（表 2），计算结果与实测结果绝对误差最大为 1.32%，最小为 0.09%，整体而言能满足焦油产率计算精度要求，同时也验证了评价方法的有效性。

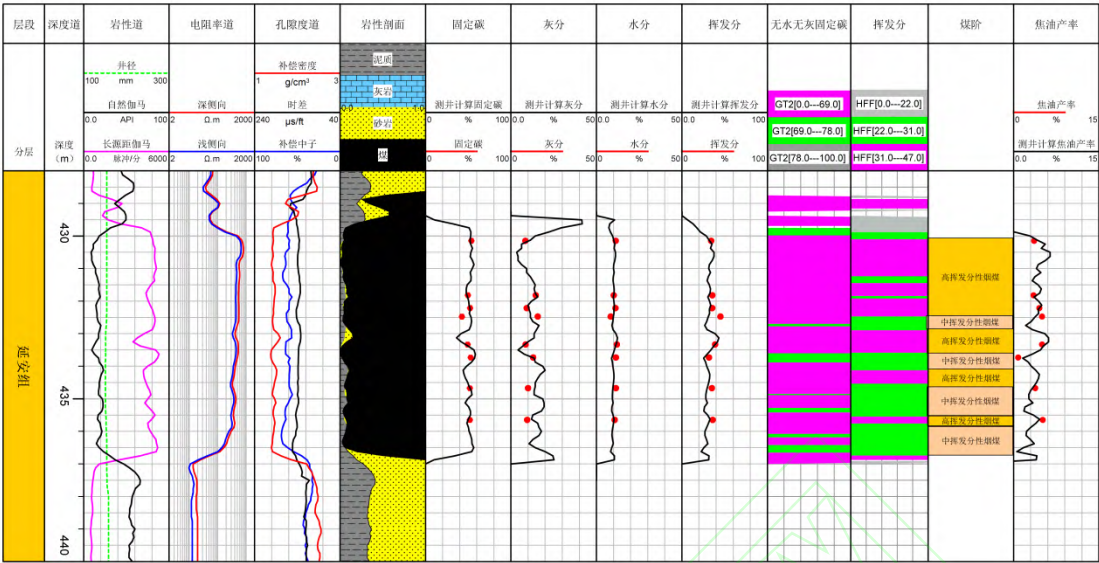


图 9 X2 井测井解释成果图
Fig.9 Log interpretation results of well X2

表2 X2井测井计算结果与实验分析结果对比

Tab.2 Comparison between the calculation results of well logging and the experimental analysis results in Well X2

序号	实测 FCad /%	测井计算 FCad /%	实测 Mad /%	测井计算 Mad /%	实测 Ad /%	测井计算 Ad /%	实测 Vdaf /%	测井计算 Vdaf /%	实测 Tarad /%	测井计算 Tarad /%
1	53.63	54.45	11.21	10.35	8.36	6.95	34.09	33.26	3.6	4.77
2	47.48	49.27	10.39	9.78	18.34	15.65	35.12	31.31	2.8	3.6
3	49.55	50.68	10.08	10.37	14.48	10.57	35.57	34.38	3.5	4.82
4	52.18	52.12	11.08	10.13	9.17	10.57	35.40	33.17	4.5	4.34
5	47.25	49.14	10.63	9.80	18.40	15.65	35.21	31.42	3.0	3.64
6	42.48	37.23	8.35	12.31	15.66	12.02	45.05	44.44	5.0	6.28
7	49.28	49.62	11.96	11.13	8.58	6.95	38.78	37.30	5.0	5.09
8	52.72	57.47	11.38	8.80	12.91	13.47	31.70	27.26	0.8	1.6
9	51.85	51.00	11.34	14.20	10.00	9.73	35.02	32.36	3.8	3.92
10	51.79	49.24	10.64	10.25	9.47	12.75	35.98	33.77	5.1	4.57

5 结 论

(1) 创新提出了一种基于煤岩影响因素逐步剥离的焦油产率分类评价方法思路。在明确煤岩焦油产率主要地质影响因素基础上，建立了相关影响因素量化表征手段，从而通过影响因素逐步剥离，分类建立煤岩焦油产率测井计算方法。

(2) 煤灰矿物不仅间接定性指示成煤环境，而且作为催化剂对煤的热解转化过程有一定影响，尤其是煤中 Fe_2O_3 含量，采用 Fe_2O_3 含量和 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SO}_3$ 比值对煤岩分类具有其合理性。地层元素测井作为目前唯一能准确识别地层矿物和含量的技术手段，虽说目前岩性扫描测井资料较少，但是评价思路值得借鉴，后续针对富油煤评价，可以考虑采集相关测井系列的资料。

(3) 着眼富油煤勘查-开发-利用全过程，今后需加强富油煤岩石物理实验方面的研究，从机理上明确富油煤的岩石物理特性变化规律，为后续测井系列优选和解释评价工作提供理论依据。

致 谢 感谢陕西省煤田地质集团有限公司为本文提供的样品测试分析数据！

Reference

- [1] ASTM D388-2005, Standard Classification of Coals by Rank.
- [2] Fan D L, Li F B, Wang Z L, et al. 2021. Development status and prospects of China's energy minerals under the target of carbon peak and carbon neutral. *China Mining Magazine*, 30(6):1-8.
- [3] Huang Z H, Zou C C, Yang Y Q, et al. 2012. Coalbed Methane Reservoir Evaluation from Wireline Logs in TS District, Southern Qinshui Basin. *Geoscience*, 26(6):1275-1282.
- [4] Hao J S, Ge B X, Xie H B. 2000. The analysis method based on Ash-composition and its application in coal- accumulating environment reconstruction. *Acta Sedimentologica Sinica*, 18(3):460-464.
- [5] Jiang Y D. 2021. The waste of oil-rich coal resources in China cannot be underestimated. *China Energy News*, 4-12(15).
- [6] Li J S. 1999. Logging technology and interpretation approach for coalbed gas. *Logging Technology*, 23(2):103-107.
- [7] Li H B, Li N, Yao Z, et al. 2021. Study on wayaobu formation extra-high tar yield coal enrichment pattern in Zichang mining area, Northern Shaanxi Triassic coalfield. *Coal Geology of China*, 33(1):22-25.
- [8] Liang M X, Sun W J. 2013. Application of Geophysical Logging in Parameters' Integrated Interpretation of Coal Reservoir. *Science Technology and Engineering*, 13(18):5121-5140.
- [9] Li S C, Li Z H, Niu Z G, et al. 2018. Application of Elemental capture spectral logging to the evaluation of coalbed methane logging. *Sino-global Energy*, 11(23):60-64.
- [10] Ma L, Wang S M, Duan Z H, et al. 2022. Potential and development suggestion of oil-rich coal resources in Shaanxi Province. *Coal Geology & Exploration*. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1155.p.20220110.0930.002.html>.
- [11] Mao Z Q, Zhao Y, Sun W, et al. 2011. Identification on the type of coal rank by using geophysical well logging data. *Journal of China Coal Society*, 36(5):766-771.
- [12] Pan H P. 2005. Evaluating coalbed methane reservoir by log data. *Natural Gas Industry*, 25(3):48-51.
- [13] Qiao L. 2015. Study on the Technique of Log Interpretation and Productivity Prediction for Coalbed Methane Reservoir. Beijing: China University of Geosciences (Beijing).
- [14] Qian Y P, Zhang G H. 2021. Research and Application of Logging Evaluation Method for Industrial Components of Coalbed. *Offshore Oil*, 41(3):48-51.
- [15] Shi Q M, Wang S M, Wang S Q, et al. 2021. Multi source identification and internal relationship of tar-rich coal of Yan'an formation in the south of Shenfu. *Journal of China Coal Society*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2190.TD.20211228.1329.004.html>
- [16] Wang S M, Shi Q M, Wang S Q, et al. 2021. Resource property and exploitation concepts with green and low-carbon of tar-rich coal as coal-based oil and gas. *Journal of China Coal Society*, 46(5):1365-1377.
- [17] Wang S M, Duan Z H, Ma L, et al. 2019. Research status and future trends of geological assurance technology for coal green development in Western China. *Coal Science and Technology*, 47(2):1-6.
- [18] Wang R, Xia Y C, Ma L. 2020. Study on oil-rich coal occurrence characteristics and sedimentary environment in Yushen Mining Area. *Coal Science and Technology*, 48(12):192-197.
- [19] Wu H L, Li N, Lan C L, et al. 2013. Standard spectrum measurement and simulation of elemental capture spectroscopy log. *Applied Geophysics*, 10(1):109-116.
- [20] Wang C J, Qiao J W. Rich coal tar yield prediction based on BP neural network. *Geological Review*, 69(Supp.1).
- [21] Xie Q, Li N, Yao Z, et al. 2020. Research on the tar yield characteristics and main control factors of tar-rich coal in Huangling mining area. *China Coal*, 2020, 46(11):83-90.
- [22] Xu T, Li N, Yao Z, et al. 2021. Distribution and geological controls of tar-rich coals in Yushen mining area of Northern Shaanxi. *Coal Science and Technology*, <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.MTQY21-018>
- [23] Yang F, Duan Z H, Ma L, et al. 2021. Distribution and controlled geological factors of oil-rich in shaanxi Province. *Coal Science and Technology*. <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.20231-0531>
- [24] Yao Z, Luo Q Z, Li N, et al. 2021. Occurrence characteristics of Carboniferous-Permian tar-rich coal and its influencing factors in Northern Shaanxi. *Coal Geology & Exploration*, 49(3):50-61.
- [25] Yan H P, Duan Z H, Wang J F. 2022. Study on the relationship model between Oil-rich coal tar yield and compensation density in Huangling Mining Area. *Coal Geology of China*, 34(10):25-30.
- [26] Yang D G, Fan Y R, Deng S G, et al. 2010. Logging evaluation for coal quality and gas content: A case study in Heshun region. *Progress in Exploration Geophysics*, 33(4):262-265.
- [27] Yang Y K. 2017. Experimental study on influence of coal ash and its mineral matter on coal pyrolysis. Zhejiang: Zhejiang University.
- [28] Zhang Y, Sun H Q, Bai X Y, et al. 2009. The basic property and comprehensive utilization of the low temperature coal-tar. *Clean Coal Technology*, 15(6):57-60.
- [29] Zhang N, Xu Y, Qiao J W, et al. 2021. Organic geochemistry of the Jurassic tar-rich coal in Northern Shaanxi Province. *Coal Geology & Exploration*, 49(3):42-49.
- [30] Zhao J L, Yan H P, Wang J F, et al. The research on coal tar productivity prediction method based on logging information [J/OL]. *Progress in Geophysics*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.P.20221109.0950.002.html>.
- [31] 樊大磊, 李富兵, 王宗礼, 等. 2021. 碳达峰、碳中和目标下中国能源矿产发展现状及前景展望. *中国矿业*, 30(6):1-8.
- [32] 姜耀东. 2021. 我国富油煤资源浪费不容小觑. *中国能源报*, 4-12(15).
- [33] 李纪森. 1999. 煤层气测井技术与解释分析. *测井技术*, 23(2):103-107.
- [34] 黄兆辉, 邹长春, 杨玉卿, 等. 2012. 沁水盆地南部 TS 地区煤层气储层测井评价方法. *现代地质*, 26(6):1275-1282.
- [35] 郝吉生, 葛宝勋, 谢洪波. 2000. “灰成分端元分析法”及其在聚煤环境分析中的应用. *沉积学报*, 18(3):460-464.
- [36] 李华兵, 李宁, 姚征, 等. 2021. 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. *中国煤炭地质*, 33(1):22-25.
- [37] 梁明星, 孙文杰. 2013. 地球物理测井在煤层参数综合解释中的应用. *科学技术与工程*, 13(18):5121-5140.
- [38] 李松臣, 李兆惠, 牛志刚, 等. 元素俘获能谱测井在煤层气测井评价中的应用思考. *中外能源*, 11(23):60-64.
- [39] 马丽, 王双明, 段中会, 等. 2021. 陕西省富油煤资源潜力及开发建议. *煤田地质与勘探*. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1155.p.20220110.0930.002.html>.
- [40] 马丽, 拓宝生. 2020. 陕西富油煤资源量居全国之首 榆林可“再造一个大庆油田”. *陕西煤炭*, (1):220.
- [41] 毛志强, 赵毅, 孙伟, 等. 2011. 利用地球物理测井资料识别我国的煤阶类型. *煤炭学报*, 36(5):766-771.

- [42] 潘和平. 2005. 煤层气储层测井评价. 天然气工业, 25 (3): 48-51.
- [43] 乔磊. 2015. 煤层气储层测井评价与产能预测技术研究. 北京: 中国地质大学(北京).
- [44] 钱玉萍, 张国华. 2021. 煤层工业组分的测井评价方法研究及应用. 海洋石油, 41 (3): 48-51.
- [45] 师庆民, 王双明, 王生全, 等. 2021. 神府南部延安组富油煤多源判识规律研究. 煤炭学报, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2190.TD.20211228.1329.004.html>
- [46] 谢青, 李宁, 姚征, 等. 2022. 黄陵矿区富油煤焦油产率特征及主控地质因素分析. 中国煤炭, 46 (11): 83-90.
- [47] 许婷, 李宁, 姚征, 等. 2021. 陕北榆神矿区富油煤分布规律及控制因素. 煤炭科学技术, <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.MTQY21-018>
- [48] 王双明, 师庆民, 王生全, 等. 2021. 富油煤的油气资源属性与绿色低碳开发. 煤炭学报, 46 (5): 1365-1377.
- [49] 王双明, 段中会, 马丽, 等. 2019. 西部煤炭绿色开发地质保障技术研究现状与发展趋势. 煤炭科学技术, 47 (2): 1-6.
- [50] 王锐, 夏玉成, 马丽. 2020. 榆神矿区富油煤赋存特征及其沉积环境研究. 煤炭科学技术, 48 (12): 192-197.
- [51] 王昌建, 乔军伟. 2023. 基于BP神经网络的富油煤焦油产率预测. 地质论评(增刊), 69 (增刊1): 569-572.
- [52] 杨甫, 段中会, 马丽, 等. 2021. 陕西省富油煤分布及受控地质因素. 煤炭科学技术, <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.20231-0531>
- [53] 杨东根, 范宜仁, 邓少贵, 等. 2010. 利用测井资料评价煤层煤质及含气量的方法研究-以和顺地区为例. 勘探地球物理进展, 33 (4): 262-265.
- [54] 闫和平, 段中会, 王金锋. 2022. 黄陵矿区富油煤焦油产率与补偿密度关系模型预测方法研究. 中国煤炭地质, 34 (10): 25-30.
- [55] 姚征, 罗乾周, 李宁, 等. 2021. 陕北石炭-二叠纪富油煤赋存特征及影响因素. 煤田地质与勘探, 49 (3): 50-61.
- [56] 杨玉坤. 2017. 煤灰及其矿物组分对煤热解影响的试验研究. 浙江: 浙江大学.
- [57] 张飏, 孙会青, 白效言, 等. 2009. 低温煤焦油的基本特性及综合利用. 洁净煤技术, 15 (6): 57-60.
- [58] 张宁, 许云, 乔军伟, 等. 2021. 陕北侏罗纪富油煤有机地球化学特征. 煤田地质与勘探, 49 (3): 42-49.
- [59] 赵军龙, 闫和平, 王金锋, 等. 2022. 基于测井信息的煤焦油产率预测方法研究[J/OL]. 地球物理学进展. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.P.20221109.0950.002.html>.