

海拉尔盆地伊敏组丝炭化学结构及成因探讨

王扶静¹, 李 耿^{1,2,3}, 秦 勇³, 张艳秋⁴, 尚福华^{1,2,3}, 李久庆³, 密文天¹

(1. 内蒙古工业大学 资源与环境工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2. 内蒙古工业大学 地质技术与岩土工程内蒙古自治区工程研究中心, 内蒙古 呼和浩特 010051; 3. 中国矿业大学 煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116;
4. 内蒙古煤炭地质勘查(集团)二三一有限公司, 内蒙古 呼伦贝尔 021000)

摘要:丝炭作为4种宏观煤岩成分之一,蕴含着丰富的古气候和古环境信息。以海拉尔盆地伊敏露天煤矿和大雁露天煤矿伊敏组16号煤层褐煤的丝炭组分为例,借助电子显微镜、核磁共振碳谱和电子顺磁共振等测试技术,量化表征丝炭的化学结构特征,并结合微区形态学观察讨论丝炭的成因。结果表明:丝炭的分子结构与煤自身的分子结构存在极大差异,丝炭中芳碳质量分数约75%,脂肪碳质量分数低,显示其较高的芳香化程度。伊敏组褐煤中丝炭火成因特征显著,其形态学差异明显,细胞壁薄且多呈白色,保存了较清晰的植物年轮和细胞结构,指示快速炭化及快速埋藏过程,另外丝炭化程度受控于多重地质因素。电子顺磁共振研究表明丝炭样品自由基浓度指示炭化温度应介于300~400℃之间,丝炭主要为火成因,通过形貌学与核磁共振碳谱分析进一步支持了火成因的推断。惰质组反射率分析得出的炭化温度与文中基于自由基浓度推断的炭化温度基本一致。受氧气体积分数、燃烧时间及空间位置等因素的影响,丝炭中丝质体反射率差异显著,反映了火成因的非均一性,揭示了地质历史中火成因作用的复杂性。基于研究区褐煤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值测试结果及煤相学分析,结合聚煤期古地理特征,进一步证实了海拉尔盆地早白垩世伊敏组成煤期气候炎热且野火频发的古环境特征。

关键词:丝炭; 化学结构; 火成因; 褐煤; 电子顺磁共振

中图分类号: TD98 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2025)05-2610-12

Chemical structure and genesis of fusain of Yimin Formation in Hailar Basin

WANG Fujing¹, LI Geng^{1,2,3}, QIN Yong³, ZHANG Yanqiu⁴, SHANG Fuhua^{1,2,3}, LI Jiuqing³, MI Wentian¹

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 2. Inner Mongolia Engineering Research Center of Geological Technology and Geotechnical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 3. Key Laboratory of Coalbed Methane Resources and Reservoir Formation Process, Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 4. Inner Mongolia Coal Geological Exploration (Group) 231 Co., Ltd., Hulun Buir 021000, China)

Abstract: As one of the four macroscopic coal rock components, fusain contains abundant information on Palaeoclimatology, Palaeoecology. This article takes the fusain components of lignite from No. 16 coal seam of Yimin Formation in the Yimin open-pit coal mine and Dayan open-pit coal mine in Hailar Basin as examples. The molecular structure of fusain was quantitatively characterized by the test results of electron microscopy, NMR (Nuclear Magnetic Resonance), EPR (Electron Paramagnetic Resonance), and the genesis of fusain was discussed in combination with the observation of micro-morphology. The results indicate that there is a significant difference in the molecular structure between fusain and coal it-

收稿日期: 2024-06-13 策划编辑: 韩晋平 责任编辑: 李雅楠 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0666

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42130802); 内蒙古自治区自然科学基金资助项目(2024QN04006)

作者简介: 李 耿(1994—), 男, 河北张家口人, 副教授, 博士。E-mail: gengli@imut.edu.cn

引用格式: 王扶静, 李耿, 秦勇, 等. 海拉尔盆地伊敏组丝炭化学结构及成因探讨[J]. 煤炭学报, 2025, 50(5): 2610-2621.

WANG Fujing, LI Geng, QIN Yong, et al. Chemical structure and genesis of fusain of Yimin Formation in Hailar Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(5): 2610-2621.



移动阅读

self. The proportion of aromatic carbon in fusain is about 75%, and the content of fatty carbon is low, indicating a high degree of aromatization. The formation characteristics of fusain fire burning are significant, with significant morphological differences. The cell walls are thin and mostly white, preserving clear plant rings and cell structures, indicating rapid carbonization and burial processes. In addition, the degree of carbonization is controlled by multiple geological factors. EPR studies showed that the free radical concentration of the fusain samples indicated that the carbonization temperature should be between 300 °C and 400 °C, mainly due to fire burning. The morphology and NMR analysis further supported the inference of fire burning causes. The reflectance analysis of inertinite shows that the carbonization temperature is basically the same as that inferred based on the free radical concentration, and the reflectance of fusinite in fusain is significantly different due to the influence of oxygen concentration, burning time and spatial location, which reflects the non-uniformity of the degree of fire burning and reveals the complexity of fire burning in geological history. By comparing and analyzing the results of $\delta^{13}\text{C}$ value tests in the study area, combined with coal facies and paleogeographic features of the coal accumulation period, the ancient environmental characteristics of the hot climate and frequent wildfires during the early Cretaceous Yimin Formation coal period in the Hailar Basin are further confirmed.

Key words: fusain; chemical structure; fire burning; lignite; electron paramagnetic resonance

0 引言

丝炭是煤中4种宏观煤岩成分之一,在全球不同地质时代的煤层中广泛分布^[1-2],分布层位最早可追溯到早泥盆世地层^[3]。我国诸多含煤盆地中,丝炭自早石炭世煤中即有丰富的存在迹象,此外中生代煤层中丝炭发育广泛,特别是在我国北方侏罗纪煤层和白垩纪煤层中显著富集^[4]。

目前,国内外丝炭研究诸多,早期国内关于丝炭的研究主要集中于煤岩组分分离以及煤层自燃倾向性等^[5-10]方面。而国外关于丝炭的研究主要倾向于沉积环境、古大气含氧情况、古植物结构分析,以及土壤环境相互作用等^[1,11-15],近年来丝炭的成因逐渐成为研究重点^[16-19]方面。探究丝炭成因有助于了解成煤期的古环境和古气候,此外,富丝炭煤储层特征的研究也逐渐增多^[20-21]。与镜煤相比,丝炭具有明显的富碳、贫氢、贫氧和贫氮等特征^[8,22-24]。丝炭的芳香化程度较高、缩合环数较多,分子中含有较多的活性氧^[8,24-25]。

以上研究主要集中于丝炭的化学结构,其研究手段诸多,目前主要有元素测试、X射线衍射和化学结构红外光谱表征等^[7-8,22]。除以上测试手段外,顺磁共振试验同样可以间接表征丝炭的化学特征,煤中化学结构部分双键发生断裂,形成不成对的电子结构,进而构成顺磁中心,即有机质具备顺磁性特征^[26]。通过解译电子顺磁共振波谱,可获得自由基浓度(N_g)、兰德因子(g)和线宽(ΔH)等参数。其中, N_g 为可反映煤化学结构芳香化程度的参数, 10^{18} 个/g; g 为无量纲量,其值与煤中芳香化结构有关,同时也与顺磁中心附近的O和S原子个数有关; ΔH 可在一定程度上反

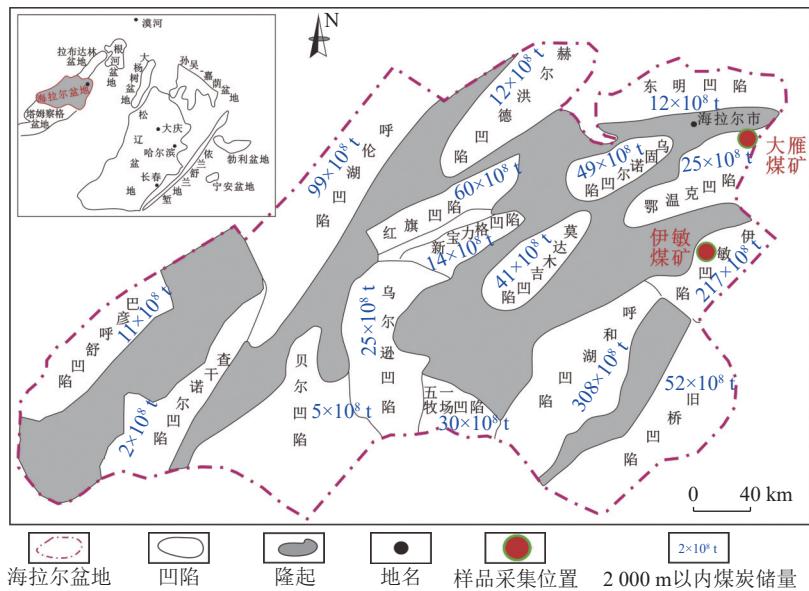
映顺磁中心附近的H、N或S原子数量多少,高斯(G)。电子顺磁共振(Electron Paramagnetic Resonance, EPR)方法在煤成因和演化机理研究中有所应用^[27-30]。张群等^[31]通过测试丝炭和暗煤的顺磁共振特征,首次给出了氧化丝炭和暗煤的顺磁共振图谱。李小明等^[32]基于高煤阶煤的顺磁共振试验,探讨了不同变质类型煤的芳香结构演化特征及影响因素。秦勇等^[33]分析不同煤级煤的顺磁共振响应,量化表征了高煤级煤演化阶段镜质组反射率跃变值,并阐释了其演化机理。

基于以上研究方法,结合其他煤岩学研究成果可知:丝炭成因为氧化成因和火焚成因^[31]。目前,关于丝炭火焚成因的文献多数局限于其具有较高反射率的物理学性质,极少有文献关注其火焚成因的化学结构证据。张群等^[31]对比分析不同温度下木材炭化后的最大反射率,印证了火焚成因丝炭反射光呈亮白色的光学属性^[3],研究发现在炭化温度极高的情况下丝炭呈金黄色反射色。同时,火焚成因丝炭的反射率并非完全稳定在5%以上,而是只有燃烧温度极高时才会呈现高反射率属性。

笔者以我国海拉尔盆地早白垩世伊敏组褐煤层中丝炭为研究对象,采用 ^{13}C 核磁共振和顺磁共振手段定量表征丝炭的化学结构,并结合丝炭光学属性分析,探讨丝炭的成因和成煤古环境。

1 地质概况

海拉尔盆地位于我国内蒙古东部,属于晚中生代沉积盆地^[33-34],如图1所示,该盆地是典型的伸展—挤压型复合盆地,盆地主要由中、小规模断陷群组成。在构造上盆地基本上表现出三坳两隆、坳隆相间的分

图1 海拉尔盆地构造格局及样品采集位置^[37]Fig.1 Structural framework and sample collection position of Hailar basin^[37]

布格局^[35]。早白垩世伊敏组是海拉尔盆地典型的含煤地层,形成于陆相断陷盆地冲积扇—河流—湖泊沉积体系^[36]。

大雁煤矿伊敏组含煤12层,煤层平均厚度为53.05 m,含煤系数为21.22%,其中9号煤厚度为0.60~53.10 m,平均33.65 m^[38]。伊敏煤矿含煤16层,主采煤层为15_上、16_下,16号煤层厚度为1.90~41.75 m,平均15.35 m^[36]。大雁煤矿、伊敏煤矿主要为褐煤,以暗煤为主,丝炭次之,具条带状结构、层状构造,呈暗淡光泽,整体以碎屑煤为主,部分层位为丝质煤^[38],煤层中间夹厚度不等的丝炭层,最厚可达数十厘米。

2 样品采集及测试方法

2.1 样品采集及预处理

原煤样品采自海拉尔盆地边缘伊敏、大雁2个露天煤矿伊敏组巨厚煤层新开挖工作面,采用手选的方式从原煤中剥离出丝炭成分,如图2所示,并在室内将丝炭样品粉碎研磨至50 μm以下。采用浓盐酸+氢氟酸混合酸反复处理丝炭样品以脱除其中矿物成分。将丝炭样品在浓盐酸和浓氢氟酸溶液中浸泡72 h并重复2次,然后用去离子水洗涤直至样品呈中性,之后在低温条件下烘干密封保存以供备用。采用高精度天平(精度为0.01 mg)对样品进行称重。

2.2 测试方法

2.2.1 显微镜测试

采用Leica DM4P光学显微镜观察煤中孔隙的形态。将丝炭和原煤样分别破碎并分割,然后利用环氧树脂与固化剂将其制备成光片,在反射光下观测煤岩

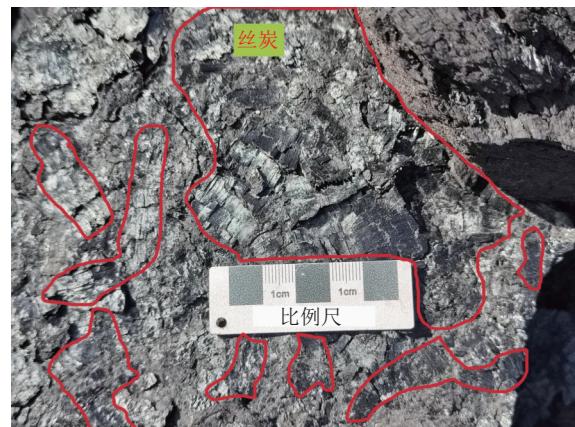


图2 丝炭层采样照片

Fig.2 Sampling photo of fusain layer

显微组分定量及丝炭微观形态。

2.2.2 扫描电镜测试

利用ZEISS SIGMA型场发射扫描电镜(Scanning Electron Microscope, SEM)观察丝炭成分中的微观形貌特征。试验前选择丝炭样品进行干燥,然后将块状样品破碎露出新鲜面,并放置于样品托底座上,分别沿样品的顺层面和垂直面观测丝炭的细胞结构。

2.2.3 核磁共振碳谱测试

在中国科学院山西煤炭化学研究所进行丝炭的核磁共振碳谱(Nuclear Magnetic Resonance, ¹³C-NMR)分析。所用仪器为AVANCE II 600 MHz,其主要参数:射频场强度为10 kHz、探头转子为4 mm MAS、F1通道核共振频率为151.006 MHz、脉冲宽度为45 454.547 Hz、采样数据点为1 024。

根据¹³C-NMR化学位移,可以区分煤中脂肪碳

(0~90)、芳香碳 (90~165) 和羧基及羧基碳 (165~220)。通过¹³C-NMR 谱分峰拟合,可进一步确定煤中各类型碳的质量分数^[39-40]。

2.2.4 EPR 测试

在中国科学院山西煤炭化学研究所完成丝炭的 EPR 测试。所用仪器为 EMXPLUS-10/12 顺磁共振仪, 主要参数: 中心磁场强度为 3510×10^{-4} T、扫描范围为 200×10^{-4} T、时间常数为 0.01 ms、扫描时间为 60 s、调制幅度为 4×10^{-4} T、调制频率为 1×10^5 Hz、微波功率为 0.1 MW。

3 试验结果及分析

3.1 显微组分

原煤样品伊敏煤矿和大雁煤矿惰质组体积分数分别为 40.62% 和 68.91%, 剥离后样品伊敏煤矿和大雁煤矿惰质组体积分数分别富集到 84.90% 和 92.34%, 以丝质体为主, 原煤及丝炭样品显微组分特征见表 1。

表 1 原煤及丝炭样品显微组分特征

Table 1 Maceral characteristics of raw coal and fusain samples

类型	样品位置	编号	R_o /%	H_u /%	L/%	I/%
原煤	伊敏煤矿	YM	0.29	56.52	2.86	40.62
	大雁煤矿	DY	0.33	26.86	4.23	68.91
丝炭	伊敏煤矿	YM-F	—	14.19	0.91	84.90
	大雁煤矿	DY-F	—	6.23	1.43	92.34

注: R_o 为腐殖组随机反射率, H_u 为腐殖组, L 为稳定组, I 为惰质组

3.2 样品核磁共振特征

选取 5 个丝炭样品开展¹³C-NMR 试验, 其中伊敏矿 (YM)3 个、大雁矿 (DY)2 个。结果显示, 不同样品的¹³C-NMR 曲线高度相似, 均表现为存在 2 个主峰 (图 3a)。第 1 主峰化学位移为 0~50, 属于脂肪类碳; 第 2 主峰化学位移为 90~165, 属于芳香类碳。化学位移为 90~165 峰的谱峰明显要大于化学位移为 0~50 峰的谱峰, 这表明芳香类碳原子在煤的结构中占主要地位, 脂肪类碳原子在煤结构中起联结芳香结构单元的作用^[39]。其中, 第 2 主峰在化学位移为 125 和 150 附近出现次峰, 羧基及羧基碳结构没有明显的谱峰。

原煤样品的¹³C-NMR 谱显示其存在 3 类碳结构类型^[41], 即化学位移为 0~90 的脂肪结构碳, 化学位移为 90~165 的芳香结构碳和化学位移为 165~240 的羧基及羧基碳 (图 3b)。3 类碳结构谱峰均含有 2 个明显的次级峰, 脂肪结构碳次级峰出现在化学位移为

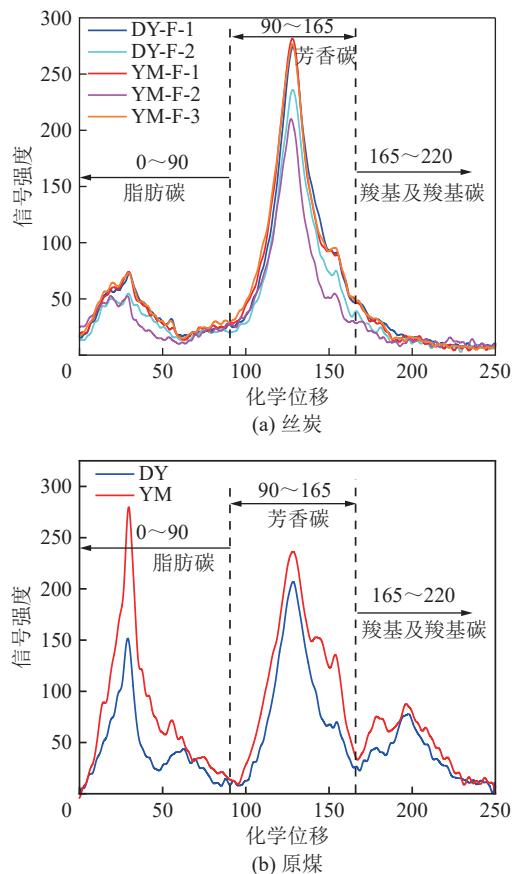


图 3 样品核磁共振碳谱

Fig.3 Nuclear magnetic resonance carbon spectra of samples

25 和 60 附近, 其分别代表环烷烃中的亚甲基、次甲基和与氧相接的脂碳; 芳香结构碳次级峰在化学位移为 125 和 150 附近, 其分别代表质子化芳碳和氧取代芳碳; 羧基及羧基碳次级峰出现在化学位移为 180 和 195 附近, 其分别代表 COOR 中的羧基碳和醛类、酮类、喹诺酮类化合物中的羧基碳。

由于煤结构的复杂性以及固体核磁技术的限制, ¹³C-NMR 谱图的分辨能力有限。为了更好地解释该低阶煤的结构信息, 对¹³C-NMR 谱图进行了分峰拟合, 得到了伊敏矿和大雁矿煤分子结构的 12 个参数, 见表 2。

由表 2 可知: 丝炭样品中的羧基碳质量分数远低于原煤中的羧基碳质量分数, 酚基醚基碳的质量分数略高于原煤, 烷基取代芳碳及芳香桥碳的质量分数均与原煤相近, 质子芳碳的质量分数远高于原煤; 氧接脂碳的质量分数与原煤相近, 亚甲基、次甲基碳和甲基碳的质量分数均分别远小于原煤, 非质子化芳碳的质量分数较原煤偏高。核磁共振分峰拟合结果对比如图 4 所示。由图 4 可看出, 丝炭样品的芳香碳率约为 67%, 远高于原煤; 芳碳占比约为 75%, 同样明显高于原煤; 脂肪碳占比约为 25%, 较原煤明显偏低, 表明

表 2 丝炭及原煤样品碳结构核磁共振分峰拟合结果

Table 2 Nuclear magnetic resonance peak fitting results of carbon structure of fusain and raw coal samples

类型	样品编号	f_a^C	f_a^P	f_a^S	f_a^B	f_a^H	f_{al}^O	f_{al}^H	f_{al}^*	f_a^N	f_a'	f_a	f_{al}
原煤	YM	0.19	0.07	0.07	0.25	0.07	0.10	0.28	0.28	0.39	0.46	0.65	0.35
	DY	0.21	0.08	0.07	0.15	0.18	0.09	0.24	0.12	0.30	0.48	0.69	0.31
丝炭	YM-F-1	0.07	0.12	0.08	0.21	0.28	0.10	0.15	0.10	0.41	0.68	0.75	0.25
	YM-F-2	0.07	0.09	0.07	0.20	0.30	0.10	0.18	0.09	0.36	0.66	0.73	0.27
丝炭	YM-F-3	0.07	0.12	0.08	0.19	0.28	0.11	0.15	0.11	0.38	0.67	0.74	0.26
	DY-F-1	0.08	0.11	0.10	0.22	0.24	0.10	0.15	0.10	0.43	0.67	0.75	0.25
	DY-F-2	0.07	0.11	0.10	0.23	0.25	0.10	0.15	0.10	0.43	0.68	0.75	0.25

注: f_a^C 为羧基碳, f_a^P 为酚基醚基碳, f_a^S 为烷基取代芳碳, f_a^B 为芳香桥碳, f_a^H 为质子化芳碳, f_{al}^O 为氧接脂碳; f_{al}^H 为亚甲基、次甲基碳, f_{al}^* 为甲基碳, f_a^N 为非质子化芳碳, f_a' 为芳香率, f_a 为芳碳, f_{al} 为脂肪碳。

芳香碳是丝炭大分子中的主要成分。

煤中芳香碳包括质子化芳碳 f_a^H 和非质子化芳碳 f_a^N , 其中 f_a^N 包括酚基醚基碳 f_a^P 、烷基取代芳碳 f_a^S 和香桥 f_a^B 3类, 以上均为确定煤分子结构的重要参数。另一个反映煤结构的重要参数 X_{BP} , 其是芳香桥碳与总碳比, 其计算过程为

$$X_{BP} = f_a^B / (f_a^H + f_a^P + f_a^S) \quad (1)$$

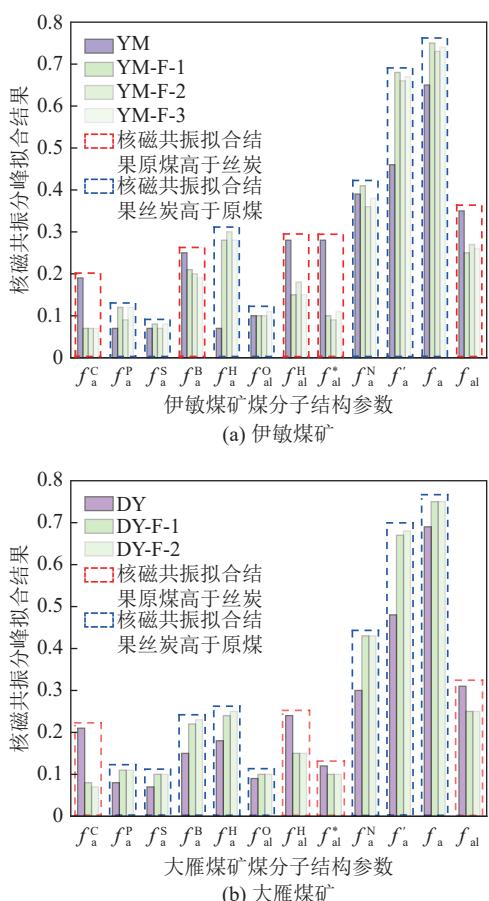


图 4 碳结构核磁共振分峰拟合结果对比

Fig.4 Comparison of nuclear magnetic resonance peak fitting results of carbon structure

X_{BP} 反映了煤的分子结构中芳香化合物缩聚程度的平均值, 可用来计算芳香簇尺寸^[39]。经计算可得表 2 中 5 个丝炭样品的平均 X_{BP} 为 0.4514, 表明伊敏煤矿和大雁煤矿丝炭结构中芳香环的缩聚程度较高。通过手选的方式获得的丝炭样品中仍混有 6%~14% 的腐殖组和稳定组分, 同时原煤中也含有大量的惰质组(表 1)。由此可推测纯丝炭的芳香化程度会更高。对比前人研究成果^[42-44], 文中丝炭样品的芳香化程度与烟煤甚至无烟煤相接近。笔者团队先前基于高分辨率透射电镜观测, 发现海拉尔褐煤丝炭的芳香条纹结构特征介于无烟煤与超无烟煤之间^[45]。以上研究表明, 海拉尔褐煤丝炭具有极高的芳香化程度。

3.3 样品顺磁共振特征

研究区 8 个采用手选方式获得的丝炭样品以及 4 个两矿区原煤样品的 EPR 测试结果如表 3 和图 3 所示。 N_g 反映物质中不成对电子的浓度, 而煤中不成对电子仅在芳香性自由基中才能长期保存, 故 N_g 随煤化程度的增高而增大^[26]。文中丝炭样品的 N_g 明显大于原煤的 N_g (图 5a), 亦表明丝炭的芳香化程度明显高于原煤。

煤中不成对电子与邻近的 H、N 或 S 等原子的电子自旋相互作用, 可以缩短煤中不成对电子的弛豫时间, 因此这些原子的质量分数越高, EPR 线宽(ΔH)越大^[26]。文中的丝炭样品的 ΔH 明显小于原煤(图 5b), 说明丝炭中 H、N 或 S 等原子的质量分数明显少于原煤, 这与核磁共振研究结果一致。

g 表征外加磁场与样品中电子运动频率发生共振的位置, 煤中芳香化结构或顺磁中心 O 或 S 原子能够引起局部磁场发生偏离, 其中芳香化程度、O 或 S 等杂原子的分数占比均与 g 值呈正相关性^[26]。丝炭样品的 g 值略小于原煤, 但与原煤较为接近(图 5c)。结合 N_g 和 ΔH 特征, 可以认为丝炭和原煤 g 值相似但影

表3 原煤及丝炭电子顺磁共振测试结果

Table 3 Electron paramagnetic resonance test results of raw coal and fusain

类型	样品编号	$N_g/(10^{18} \cdot g^{-1})$	$\Delta H/G$	g
原煤	YM-1	5.96	5.97	2.004 10
	YM-2	3.65	5.62	2.004 14
	DY-1	6.39	6.14	2.004 04
	DY-2	4.56	6.36	2.004 08
丝炭	YM-F-1	6.18	5.18	2.004 02
	YM-F-2-1	9.13	6.14	2.004 07
	YM-F-2-2	6.77	6.32	2.004 08
	YM-F-3	6.60	5.44	2.004 01
	YM-F-4	7.95	5.00	2.004 00
	YM-F-5	6.59	5.35	2.004 00
	DY-F-1	8.84	6.14	2.004 06
	DY-F-2	8.85	5.71	2.004 02

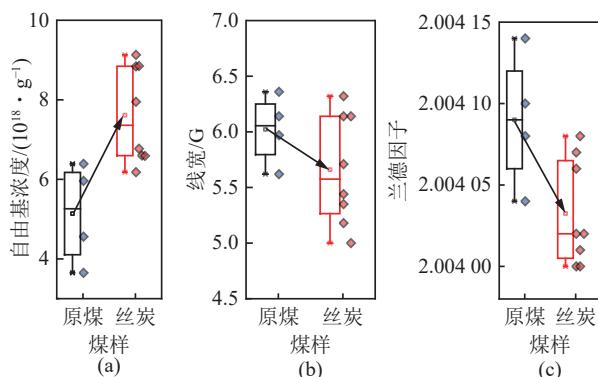


图5 丝炭与原煤样品电子顺磁共振测试结果对比

Fig.5 Comparison chart of electron paramagnetic resonance test results between fusain and raw coal samples

响因素显然不同。其中,丝炭 g 值偏高是由于芳香体系急剧增大^[26],而原煤 g 值偏高是煤中杂原子数量偏高导致的结果,二者具有本质区别。

4 讨 论

4.1 基于丝质体形态特征的丝炭成因分析

不同成因丝炭在形态学上具有明显的差异^[3]。其中,氧化成因丝炭植物细胞壁加厚且不甚完整,火焚成因丝炭植物细胞壁则保存完好且相对较薄,有时也可见清晰植物年轮结构。但是,惰质组中植物细胞壁的厚度只能作为丝炭成因分析的辅助证据,原因在于植物细胞壁的厚度易受植物种类、植物组织等因素的影响,例如:水生植物的细胞壁一般薄于陆生植物的细胞壁。火焚作用使得植物组织被快速炭化,进而在丝炭中保存了火焚之前的植物细胞结构状况。通常认为,火焚成因的丝炭在显微镜下为金黄色、黄白色、

亮黄色或亮白色且细胞壁较薄的丝质体,氧化形成的丝炭则为白色或亮白色、细胞壁稍厚的丝质体^[31]。根据SCOTT^[3]的研究结果可知:火焚成因的丝炭并非都为金黄色的丝质体,也可为亮白色的丝质体,这主要与森林火灾时植物种类和细胞结构以及植物所经历的热解温度的高低有关。

基于显微镜和扫描电镜观察,发现丝炭样品具有2个微观特点(图6):一方面丝质体中细胞壁极薄,相邻胞腔间的细胞壁整体呈细丝状,部分细胞壁破碎后呈星弧状;另一方面丝质体均呈白色或亮白色,与原煤中镜质组暗灰色的特征截然不同。以上形态学特征,均表明丝炭样品具有火焚成因特征。另外,丝炭样品的丝质体形态还与局部应力作用相关,如图6d中丝炭基本保持了原始的植物组织结构,而图6e显示植物组织结构变形严重,形成类似挠曲状结构,这可能是丝炭附近存在坚硬结构物质,成炭过程中应力集中导致的结果。

部分丝炭样品可观察到清晰的植物年轮结构(图6f—图6i),细胞结构平行排列或呈同心圆状排列,并且以上细胞可观察到明显的“早材”和“晚材”交替分布的结构。其中图6f可以看出丝炭至少保存了3层年轮结构,并且呈平行结构排列,局部放大该结构可以观察到明显的“早材”和“晚材”结构,其中“晚材”结构的细胞壁相对较厚,对应的丝质体细胞壁结构同样较厚,而“早材”结构的细胞壁则相对较薄,对应的丝质体细胞壁结构同样较薄,在压实过程中该类型结构极易发生破坏,因此丝炭中“早材”结构细胞壁往往呈星弧状(图6g)。图6h可以观察到丝炭保存了5层以上的植物年轮,各年轮层具有明显的同心圆状结构,其“早材”和“晚材”交替分布的细胞结构特征极为明显(图6i)。以上大块的植物细胞集合体组织可以说明丝炭经历了快速埋藏过程,结合笔者研究丝炭的高芳香化程度,可以确定研究区该类型丝炭主要为火焚成因而非氧化成因,即植物茎秆被快速炭化后迅速埋藏,形成既有高芳香化程度又具备完整植物组织结构的丝炭。

4.2 基于 N_g 标志的丝炭成因分析

8个丝炭样品的 N_g 均介于 $(6.18\sim 9.13)\times 10^{18}$ 个/g之间,平均 7.61×10^{18} 个/g(表3)。此外,无盖坩埚中的松木放置于马弗炉加热时,当温度达到600℃以上,加热20 min后松木会燃烧殆尽,这也就意味着在自然有氧条件下,过高的燃烧温度下燃烧产物中很难保存下大块的植物组织。比照张群等^[31]测试结果,初步推测文中丝炭样品的炭化温度(T)应在300~400℃之间,且主要为火焚成因。

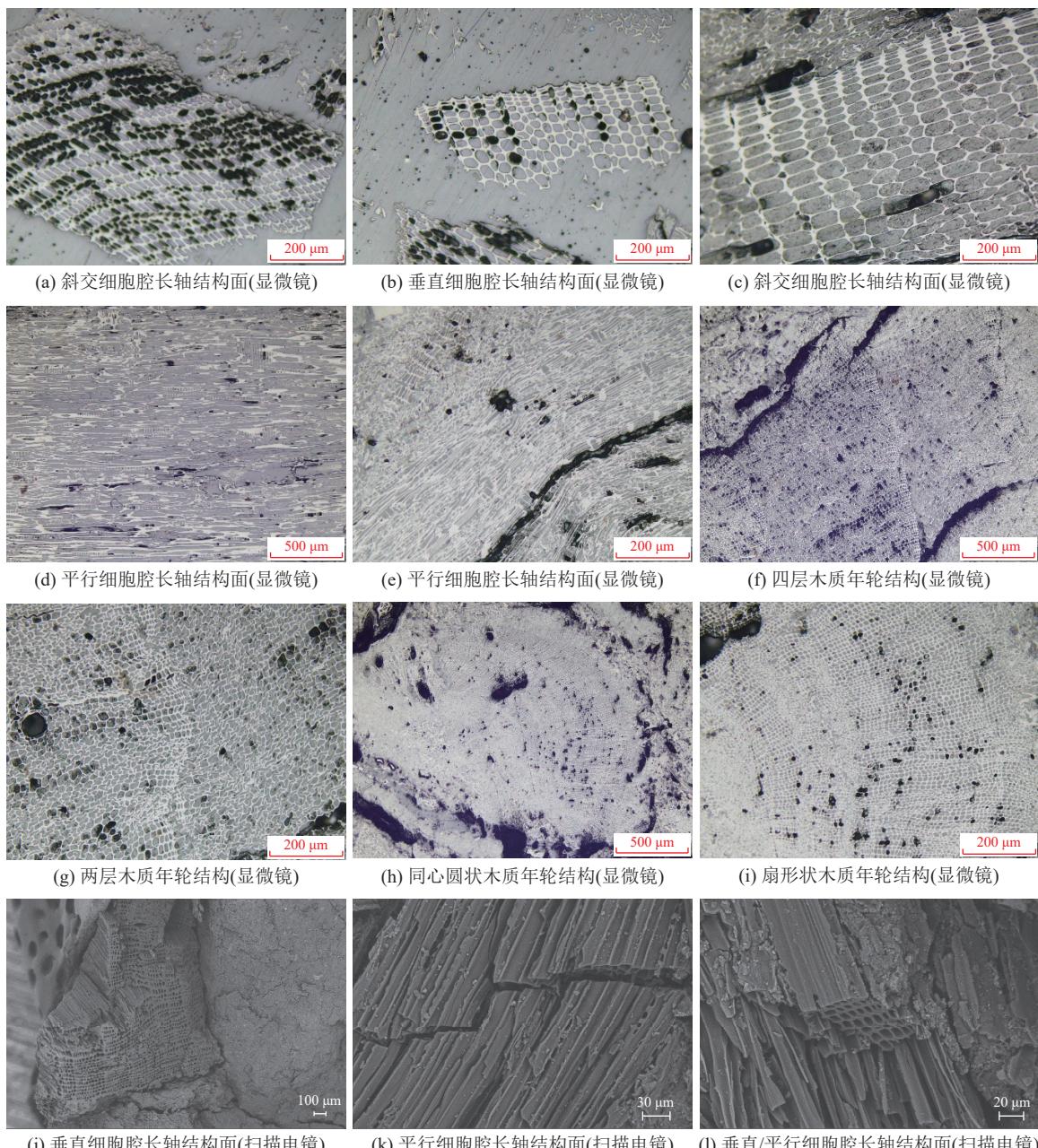


图 6 丝炭形态学特征

Fig.6 Morphological characteristics of fusain

为了进一步验证电子顺磁共振的试验结果,研究参照张群等^[31]的试验方法,进行了补充试验:将4个0.7 cm×1.5 cm×6 cm的松木试件放在坩埚内,而后置入马弗炉中,并在温度为300、400、500、600 °C条件下持续加热20 min,得到不同加热状态下的细胞壁图片(图7)。整个加热过程中,坩埚几乎是处于无氧状态下的,所以木材只炭化但不会燃烧^[30]。选择松木是因为松木炭化后外观呈丝绢光泽、纤维状结构、性脆易污手等特征,炭化后松木在成因及形态上与丝炭相似^[31]。

从形貌学角度分析,炭化木材细胞壁的形貌特征

只有达到400或500 °C以上才与丝炭样品的形貌相似(图6和图7),意味着煤层中典型的丝炭形成温度在400 °C以上,但这与电子顺磁共振试验得出的结论不符。分析其原因在于试验数据反映的是样品的平均水平,而部分高温炭化木材与部分低温炭化木材(亦或是部分原煤镜质体)的混合同样可以达到以上试验结果。因此,分析认为煤层当中的丝炭实质上是不同火焚程度下的综合产物。

文中丝炭样品羧基碳的质量分数极低,在核磁共振碳谱上几乎没有显示,而原煤样品则羧基碳峰显示明显(图3,表2)。研究区煤中腐殖组反射率仅为

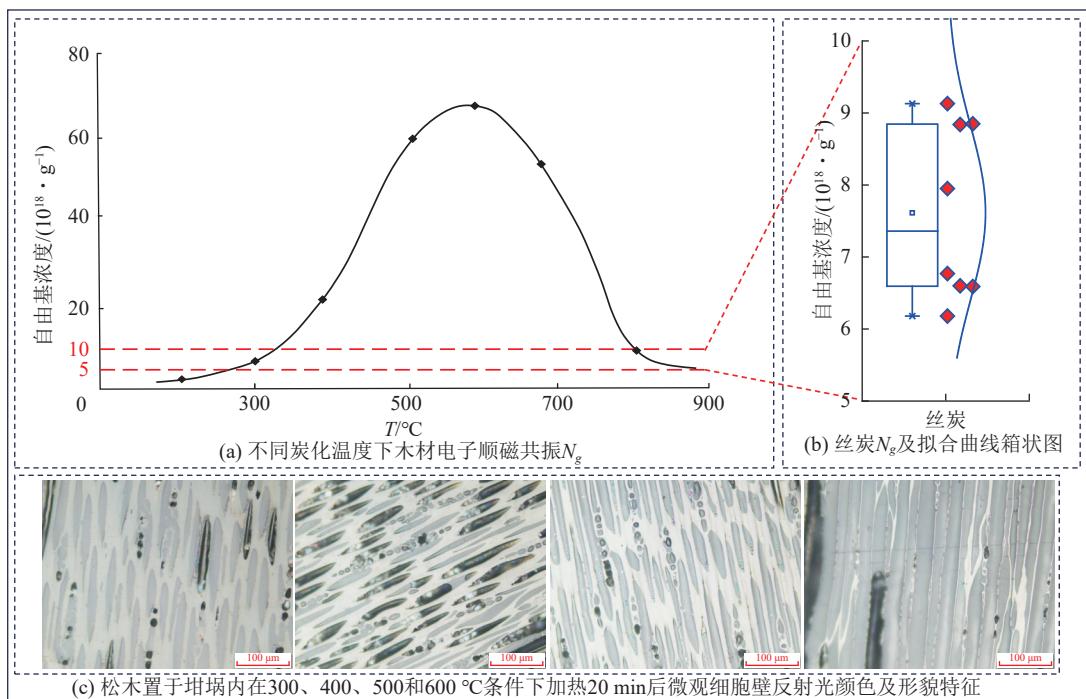


图7 相似材料炭化模拟结果及与丝炭属性对比

Fig.7 Simulation results of carbonization of similar materials and comparative analysis with fusain properties

0.3%，表明煤样处于早期煤化作用阶段。氧化过程实则为“去氢、加氧”的过程，而羧基即是该过程的一种中间产物，因此如果文中研究的丝炭为氧化成因为主的丝炭，在极弱的煤化作用阶段理论上应该尚保存部分上述羧基碳中间产物，然而丝炭的核磁共振碳谱结果显示丝炭中并未有羧基峰值体现，该现象进一步否定了笔者对丝炭的氧化成因的推测，同时也在一定程度上间接证明了丝炭火焚成因的结论。

4.3 基于反射率的丝炭成因分析

电子顺磁共振试验结果显示，文中研究的丝炭对应的炭化温度约为300~400 °C，这明显小于现今环境中木材燃烧时的火焰温度。且不说空气中氧气体积分数、燃烧时间对火焚过程的重要影响作用，就植物组织表皮与内部所经历的温度也具有明显的差异性，导致靠近外表皮的组织炭化程度高而接近内部的组织炭化程度则较低。李鸿豆^[46]通过测定木材不同燃烧温度下生物炭的反射率值，发现燃烧温度与反射率具有明显的正相关性，但相同的最高温度下平均反射率要远小于最大反射率，该现象说明了木材燃烧过程中炭化程度的差异性。按照 ALPERN^[47]提出的关于不同显微组分反射率值的定义，火焚丝质体反射率大于5.0%，并且一直保持稳定不变。然而实际地层中火焚成因的丝炭，其丝质体反射率多数并非能够完全达到5.0%，甚至远小于该值。

文献^[46]显示，即使生物炭燃烧温度达到700 °C，其最大反射率仍然不足5.0%，平均反射率则更低。张

群等^[31]也发现，人工丝炭最大反射率在炭化温度为500 °C条件下仅为3.02%，炭化温度为950 °C时可达到5.34%。以上2项研究均说明“火焚”只是一个燃烧的过程，受燃烧时的氧气体积分数、燃烧时间、木材与火焰的空间相对位置等因素影响，被燃烧的木材不同位置处往往反射率并非为一个定值，木材由完全燃烧位置到完全未燃烧位置，其反射率在空间上应该符合由大到小的规律，而该系列炭化的木材均应归因于燃烧作用。以上现象类比于煤中丝炭而言，即丝炭中丝质体反射率的差异应归因于火焚程度的影响，其本质是燃烧过程中氧气体积分数、燃烧时间、木材与火焰的空间相对位置等因素差异性影响。

JONES^[48]研究表明惰质组反射率与燃烧温度存在以下关系：

$$T = 184.10 + 117.76 \times R_o \quad (2)$$

式中：T为燃烧温度，°C； R_o 为油镜下惰质组（碎屑惰质体、半丝质体、丝质体）平均反射率，%。

根据式(2)，前人就海拉尔盆地伊敏露天矿的21个样品计算了其燃烧温度，结果显示其燃烧温度为308~352 °C，平均为333 °C^[49]。同时，前人测定了相邻凹陷宝日希勒煤矿伊敏组的12个样品惰质组随机反射率，计算其燃烧温度为332~366 °C，平均温度为351 °C^[49]。WANG等^[50]测定了相邻的旧桥凹陷伊敏组20个样品惰质组随机反射率，同样根据式(2)计算其燃烧温度为273~379 °C，平均为322 °C。以上基于惰质组平均反射率计算结果与文中通过顺磁共振

试验中 N_g 分析得到的丝炭燃烧温度基本一致 (图 7), 均为 300 °C 左右, 进一步证实了以上分析的合理性。

同样再结合图 7, 不同炭化温度下得到的样品, 其光学特征有显著的变化, 温度为 300 °C 时反射光显示的是灰白色, 温度为 400 和 500 °C 时反射光显示的是白色, 温度为 600 °C 时反射光显示为亮白色, 结合图 6, 同样为海拉尔盆地煤层中丝炭样品, 其光学特征存在差异, 也就意味着不同层位的丝炭样品反映出当时野火的温度等诸多地质影响因素差异性, 因此在研究丝炭成因时需要考虑多方面的交叉证据和影响因素。

4.4 丝炭成因的地质意义

有机碳同位素为有效解释古气候及沉积环境的标志 [51-52], 研究认为燃烧作用影响煤中总有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 且火焚成因的半丝质体和丝质体体积分数越大, 煤中总有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏移就越大 [46]。文中伊敏煤矿煤中总有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 测试值介于 -21.48% ~ -23.65%, 平均为 -22.36%, 对比 WHEELER 等 [52] 统计的有机碳同位素数据可知: 伊敏煤矿测试的总有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值明显偏大 (图 8), 这也意味着研究区煤中丝炭与火焚成因密切相关, 进一步印证了以上研究结论。此外, 研究发现 $\delta^{13}\text{C}$ 值在垂向上存在波动性, 也就意味着聚煤期间干—湿气候存在一定的周期性 [49, 51], 进而影响野火发生的频次, 这也合理解释了伊敏煤矿富丝炭层厚度及层数垂向变化的特征。

另外, 煤相学同样可以指示聚煤期间的古环境特征, 凝胶化指数 ($GI=(\text{镜质组}+\text{粗粒体})/(\text{丝质体}+\text{半丝质体}+\text{碎屑质体})$) 可作为反映植物残体凝胶化程度的重要指标, GI 越大反映聚煤期环境越潮湿, GI 越小反映环境相对干燥。统计发现伊敏煤矿 75% 的样品 GI 值小于 1, 甚至约有 35% 的样品 GI 值小于 0.5, 这也意味着研究区聚煤期间绝大部分时间处于环境相对

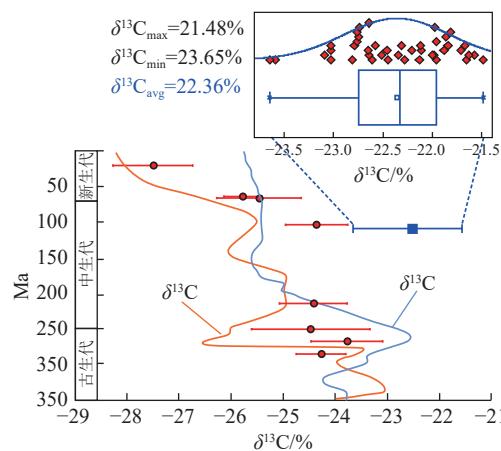


图 8 伊敏煤矿 $\delta^{13}\text{C}$ 值统计结果与全球碳同位素对比^[49,51]

Fig.8 Statistical results of $\delta^{13}\text{C}$ values in Yimin coal mine and comparison with global $\delta^{13}\text{C}$ values^[49,51]

干燥的状况。另外聚煤期间研究区处于相对较高的古纬度 (北纬 $> 45^\circ$), 与同期的沿海或热带地区相比, 研究区的降雨量明显较低, 这一现象与当今大多数内陆地区 (如澳大利亚、中亚、北美洲中部等) 基本一致 [51], 季节性降雨差异也可能是导致海拉尔盆地聚煤期间周期性干燥的重要原因。以上地质环境均为野火频发提供了重要基础。

前人研究认为白垩纪早期全球开始变暖, 并且在白垩纪中期达到高峰^[53-54]。SHEN 等^[55]研究二连盆地成煤环境, 认为该时期当地气候温暖炎热, 整体为湿润气候, 同时也伴随有明显的干旱期特性。野火作为环境的重要组成部分, 研究认为野火环境几乎贯穿整个伊敏组 16 号巨厚煤层^[51], 早白垩世富氧环境也是导致该时期野火频发的重要原因^[56-57]。

笔者研究认为海拉尔盆地伊敏组丝炭为典型的火焚成因丝炭, 并且以上样品均采集于巨厚煤层的不同层位, 因此认为在伊敏组聚煤时期野火发生频率较高, 几乎贯穿整个聚煤时期。该研究成果与前人对该时期的聚煤环境研究认识基本一致, 进一步证实了海拉尔盆地在早白垩世晚期伊敏组处于炎热、富氧、野火频发的地质环境。

5 结 论

1) 伊敏组褐煤中丝炭具有较高的芳香化程度, 芳碳占比约为 75%, 脂肪碳占比少, 较高的芳碳占比显示丝炭具有较高的芳香化程度。

2) 伊敏组褐煤中丝炭形态学特征反映出丝炭的快速炭化及快速埋藏过程, 丝炭微观光学差异性反映出火焚程度的非均一性, 而火焚过程受控于多种因素。

3) 基于丝炭 N_g 研究发现其炭化温度应介于 300 ~ 400 °C 之间, 与通过惰质组反射率测试分析推断的炭化温度基本一致。

4) 基于丝炭成因分析, 结合煤相学、元素地球化学和古地理条件分析, 印证了海拉尔盆地早白垩世伊敏组成煤期存在古气候炎热且野火频发的古环境特征。

参考文献(References):

- [1] SCOTT A C, LOMAX B H, COLLINSON M E, et al. Fire across the K-T boundary: Initial results from the sugarite coal, New Mexico, USA[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2000, 164(1-4): 381-395.
- [2] TANNER L H, LUCAS S G. Stratigraphic distribution and significance of a 15 million-year record of fusain in the Upper Triassic Chinle Group, southwestern USA[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, 461: 261-271.

- [3] SCOTT A C. Observations on the nature and origin of fusain[J]. *International Journal of Coal Geology*, 1989, 12(1-4): 443-475.
- [4] 周宁, 王永栋, 田宁, 等. 中生代的丝炭化石与森林火灾事件[A]. 中国古生物学会第十一次全国会员代表大会暨第27届学术年会论文摘要集[C]: 东阳: 中国古生物学会, 2013: 133-134.
- ZHOU Ning, WANG Yongdong, TIAN Ning, et al. Mesozoic char-coal fossils and forest fire events[A]. Chinese Society of Paleontology. Abstracts of the 11th National Member and 27th Annual Conference of Chinese Society of Paleontology[C]. Dongyang: Chinese Society of Paleontology, 2013: 133-134.
- [5] 张玉贵. 镜煤和丝炭自燃倾向性研究[J]. 煤矿安全, 1991, 22(12): 20-22, 29.
- ZHANG Yugui. Study on spontaneous combustion tendency of vitrinite and silk charcoal[J]. Safety in Coal Mines, 1991, 22(12): 20-22, 29.
- [6] 曾凡桂, 郝玉英. 镜煤与丝炭粉碎特性的比较研究[J]. 燃料化学学报, 1998, 26(6): 575-578.
- ZENG Fangui, HAO Yuying. Contrast study of comminuting property of vitrain and fusain[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 1998, 26(6): 575-578.
- [7] 田承圣, 曾凡桂. 镜煤与丝炭结构的X射线衍射初步分析[J]. *太原理工大学学报*, 2001, 32(2): 102-105.
- TIAN Chengsheng, ZENG Fangui. Analysis of structure between vitrain and fusain X-ray diffraction analysis[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2001, 32(2): 102-105.
- [8] 赵世永. 神府煤选择性破碎机理及其煤岩组分分离富集研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2015.
- ZHAO Shiyong. Research on selective grinding mechanism and separating enrichment of macerals in Shenshu coal[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2015.
- [9] 冯国瑞, 白锦文, 马俊彪, 等. 残采区群柱遗煤资源绿色开采与地下空间开发技术挑战[J]. 绿色矿山, 2023(1): 91-100.
- FENG Guorui, BAI Jinwen, MA Junbiao, et al. Technical challenge of coal pillars resource green mining and underground space developing in the residual mining area[J]. *Journal of Green Mine*, 2023(1): 91-100.
- [10] 赵春虎, 王世东, 靳德武, 等. 陕北与神东煤炭基地煤矿开采对地下水影响研究现状与评价方法[J]. 绿色矿山, 2024, 2(1): 48-57.
- ZHAO Chunhu, WANG Shidong, JIN Dewu, et al. Research status and evaluation methods on the impact of coal mining on groundwater resources in Shaanbei and Shandong coal bases[J]. *Journal of Green Mine*, 2024, 2(1): 48-57.
- [11] JONES T P, ASH S, FIGUEIRAL I. Late Triassic charcoal from petrified forest National Park, Arizona, USA[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2002, 188(3-4): 127-139.
- [12] TANNER L H, WANG X, MORABITO A C. Fossil charcoal from the Middle Jurassic of the Ordos Basin, China and its paleoatmospheric implications[J]. *Geoscience Frontiers*, 2012, 3(4): 493-502.
- [13] MARGUERIE D, HUNOT J Y. Charcoal analysis and dendrology: Data from archaeological sites in north-western France[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2007, 34(9): 1417-1433.
- [14] WARNOCK D D, LEHMANN J, KUYPER T W, et al. Mycorrhizal responses to biochar in soil—concepts and mechanisms[J]. *Plant and Soil*, 2007, 300(1): 9-20.
- [15] CORNELISSEN G, ELMQUIST M, GROTH I, et al. Effect of sorbate planarity on environmental black carbon sorption[J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(13): 3574-3580.
- [16] HAN Q C, LIU J J, HOWER J C, et al. Fire activities and their impacts on local ecosystems in the southern Ordos Basin during the Middle Jurassic: Evidence from pyrogenic PAHs and petrography of inertinite-rich coal[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2024, 636: 111972.
- [17] 吕大炜, 徐锦程, 张之辉, 等. 石炭纪全球野火事件分布及主控因素[J]. 地质学报, 2024, 98(6): 1893-1903.
- LYU Dawei, XU Jincheng, ZHANG Zhihui, et al. Distribution and controlling factors of the Carboniferous global wildfires[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2024, 98(6): 1893-1903.
- [18] GLASSPOOL I J, GASTALDO R A. Silurian wildfire proxies and atmospheric oxygen[J]. *Geology*, 2022, 50(9): 1048-1052.
- [19] LU M, IKEJIRI T, LU Y H. A synthesis of the Devonian wildfire record: Implications for paleogeography, fossil flora, and paleoclimate[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2021, 571: 110321.
- [20] LI G, QIN Y, YAO H P, et al. 3D pore structure characterization and permeability anisotropy visualization simulation of fusain[J]. *Energy*, 2024, 291: 130422.
- [21] LI G, QIN Y, ZHOU X Q, et al. Comparative analysis of the pore structure of fusain in lignite and high-volatile bituminous coal[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2021, 90: 103955.
- [22] 李玉林, 张爱云. 阜新煤田镜煤和丝炭的有机地球化学特征及其热解性能研究[J]. *地球化学*, 1989, 18(4): 334-342.
- LI Yulin, ZHANG Aiyun. Organic geochemical characteristics and pyrolytic properties of vitrain and fusain[J]. *Geochimica*, 1989, 18(4): 334-342.
- [23] 曾凡桂, 曲星武, 葛岭梅. 论神府2²煤层煤岩组成与煤炭自燃的关系[J]. 西安矿业学院学报, 1991, 11(2): 20-28.
- ZENG Fangui, QU Xingwu, GE Lingmei. On relationship of coal petrological composition to spontaneous combustion of coal from 2² coal seam in Shenshu coal field[J]. *Journal of Xi'an Mining Institute*, 1991, 11(2): 20-28.
- [24] 舒新前, 王祖讷, 徐精求, 等. 神府煤煤岩组分的结构特征及其差异[J]. 燃料化学学报, 1996, 24(5): 426-433.
- SHU Xinqian, WANG Zune, XU Jingqiu, et al. Structural characteristics and differences among lithotypes[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 1996, 24(5): 426-433.
- [25] 蒋莉. 低阶煤显微煤岩组分的粉碎解离特性及浮选试验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- JIANG Li. Study on comminution dissociation characteristics and flotation test of macerals in low rank coal[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [26] 秦勇, 姜波, 王超, 等. 中国高煤级煤的电子顺磁共振特征: 兼论煤中大分子基本结构单元的“拼叠作用”及其机理[J]. 中国矿业大学学报, 1997, 26(2): 10-14.
- QIN Yong, JIANG Bo, WANG Chao, et al. Electron paramagnetic resonance studies of high rank coals in China: A reference to making

- gup and its mechanism of macromolecular basic structural units in coals[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1997, 26(2): 10–14.
- [27] 翁成敏. 电子顺磁共振法在峰峰煤田煤的演化程度研究中的应用[J]. *地球科学*, 1991, 16(2): 213–218.
WENG Chengmin. Electronic spin resonance applied to evolute degrees of coal from Fengfeng coalfield[J]. *Earth Science*, 1991, 16(2): 213–218.
- [28] 姜波, 秦勇. 变形煤的 EPR 结构演化及其构造地质意义[J]. *高校地质学报*, 1999, 5(3): 334–339.
JIANG Bo, QIN Yong. EPR structural evolution of deformed coals and its significane instructural geology[J]. *Geological Journal of China Universities*, 1999, 5(3): 334–339.
- [29] 殷春浩, 赵强, 滕道祥, 等. 煤镜质组热解的电子顺磁共振研究[J]. *波谱学杂志*, 2011, 28(4): 464–470.
YIN Chunhao, ZHAO Qiang, TENG Daoxiang, et al. Coal vitrinite pyrolysis studied by EPR[J]. *Chinese Journal of Magnetic Resonance*, 2011, 28(4): 464–470.
- [30] 杨昊睿, 要惠芳, 姬新强. 韩城矿区构造煤的电子顺磁共振特征[J]. *煤炭技术*, 2016, 35(9): 99–100.
YANG Haorui, YAO Huifang, JI Xinqiang. Electron paramagnetic resonance features of tectonically deformed coals in Hancheng mining area[J]. *Coal Technology*, 2016, 35(9): 99–100.
- [31] 张群, 庄军. 丝炭和暗煤的顺磁共振特性研究[J]. *煤炭学报*, 1995, 20(3): 272–276.
ZHANG Qun, ZHUANG Jun. Study of esr characteristics of fusain and durain[J]. *Journal of China Coal Society*, 1995, 20(3): 272–276.
- [32] 李小明, 曹代勇. 不同变质类型煤的电子顺磁共振特征对比分析[J]. *现代地质*, 2009, 23(3): 531–534.
LI Xiaoming, CAO Daiyong. Contrast study on the EPR characteristics of coals of different metamorphism types[J]. *Geoscience*, 2009, 23(3): 531–534.
- [33] 张帆. 海拉尔盆地构造特征与构造演化[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
ZHANG Fan. The structural feature and tectonic evolution about Hai laer basin[D]. Changchun: Jilin University, 2007.
- [34] 郭彪. 海拉尔盆地早白垩世层序地层格架内聚煤模式研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2015.
GUO Biao. Pattern of coal-accumulation in the sequence stratigraphic framework of the Early Cretaceous in the Hailaer basin[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2015.
- [35] 刘冀蓬, 胡海燕, 刘德勋, 等. 海拉尔盆地呼和湖凹陷低阶煤孔隙分形特征研究[J]. *煤矿安全*, 2021, 52(8): 1–8.
LIU Jipeng, HU Haiyan, LIU Dexun, et al. Fractal characteristics of pore of low-rank coal in Huhehu Sag in Hailaer Basin[J]. *Safety in Coal Mines*, 2021, 52(8): 1–8.
- [36] 史鸣剑, 邵龙义, 王帅, 等. 伊敏凹陷早白垩世含煤岩系层序地层与聚煤模式[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(11): 3491–3503.
SHI Mingjian, SHAO Longyi, WANG Shuai, et al. Sequence stratigraphy and coal accumulation of the Lower Cretaceous in yimin sag[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(11): 3491–3503.
- [37] 卢双舫, 申家年, 王振平, 等. 海拉尔盆地煤层气资源评价及潜力分析[J]. *煤田地质与勘探*, 2003, 31(6): 28–31.
- LU Shuangfang, SHEN Jianian, WANG Zhenping, et al. Resource evaluation of coalbed gas and potential analysis in Hailaer Basin[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2003, 31(6): 28–31.
- [38] 张震. 褐煤胡敏酸吸附性及其地质-地球化学控制[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
ZHANG Zhen. Adsorptivity and its geological-geochemical controls of humic acid from lignite[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [39] 秦勇, 姜波, 宋党育, 等. 高煤级煤碳结构¹³C NMR 演化及其机理探讨[J]. *煤炭学报*, 1998, 23(6): 634–638.
QIN Yong, JIANG Bo, SONG Dangyu, et al. Charecteristics and mechanism on the ¹³C NMR evolution of the carbon structure in the high-rank coals[J]. *Journal of China Coal Society*, 1998, 23(6): 634–638.
- [40] 姜波, 秦勇. 实验变形煤结构的¹³C NMR 特征及其构造地质意义[J]. *地球科学*, 1998, 23(6): 579–582.
JIANG Bo, QIN Yong. ¹³C NMR characteristics of structures of the experimental deformed coals and their significance of structual Geology[J]. *Earth Science*, 1998, 23(6): 579–582.
- [41] 刘宇. 煤镜质组结构演化对甲烷吸附的分子级作用机理[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
LIU Yu. Effect of coal vitrinite macromolecular structure evolution on methane adsorption capacity at molecular level[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [42] 郭德勇, 叶建伟, 王启宝, 等. 平顶山矿区构造煤带里叶红外光谱和¹³C 核磁共振研究[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(12): 3040–3046.
GUO Deyong, YE Jianwei, WANG Qibao, et al. FTIR and ¹³C NMR characterizations for deformed coal in Pingdingshan mining [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(12): 3040–3046.
- [43] 相建华, 曾凡桂, 梁虎珍等. 不同变质程度煤的碳结构特征及其演化机制[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(6): 1498–1506.
XIANG Jianhua, ZENG Fangui, LIANG Huzhen, et al. Carbon structure characteristics and evolution mechanism of different rank coals[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(6): 1498–1506.
- [44] 魏帅, 严国超, 张志强, 等. 晋城无烟煤的分子结构特征分析[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(2): 555–562.
WEI Shuai, YAN Guochao, ZHANG Zhiqiang, et al. Molecular structure analysis of Jincheng anthracite coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(2): 555–562.
- [45] LI G, QIN Y, ZHANG M, et al. Microporous structure and gas adsorption model of fusain in lignite[J]. *Fuel*, 2022, 309: 122186.
- [46] 李鸿豆. 现代野火残留物对煤中丝质体成因的启示[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2022.
LI Hongdou. Implications of modern wildfire residues for the genesis of fusinite in coal[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2022.
- [47] ALPERN B. Tectonics and gas deposit in coalfields a bibliographic study and examples of application[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1970, 7(1): 67–76.
- [48] JONES T P. Fusain in Late Jurassic sediments from Witch Ground Graben, North Sea, U. K[J]. *Mededelingen Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO*, 1997, 58: 93–103.

- [49] 贾荣坤.海拉尔盆地煤的物质组成特征及其对区域地质过程的响应机制[D].徐州:中国矿业大学,2024.
- JIA Rongkun. Materials composition of coal in the hailar basin and its response to the regional geological processes[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2024.
- [50] WANG S, SHAO L Y, LI J X, et al. Coal petrology of the yimin formation (albian) in the Hailar basin, NE China: Paleoenvironments and wildfires during peat formation[J]. *Cretaceous Research*, 2021, 124: 104815.
- [51] MOORE T A, MOROENG O M, SHEN J, et al. Using carbon isotopes and organic composition to decipher climate and tectonics in the Early Cretaceous: An example from the Hailar Basin, Inner Mongolia, China[J]. *Cretaceous Research*, 2021, 118: 104674.
- [52] WHEELER A, SHEN J, MOORE T A, et al. Palaeoecology and Palaeoclimate of an Early Cretaceous peat mire in east Laurasia (Hailar basin, Inner Mongolia, China)[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2022, 599: 111050.
- [53] HUBER B T, MACLEOD K G, WATKINS D K, et al. The rise and fall of the Cretaceous hot greenhouse climate[J]. *Global and Planetary Change*, 2018, 167: 1–23.
- [54] TOSOLINI A P, KORASIDIS V A, WAGSTAFF B E, et al. Palaeoenvironments and Palaeocommunities from Lower Cretaceous high-latitude sites, Otway Basin, southeastern Australia[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2018, 496: 62–84.
- [55] SHEN J, QIN Y, WANG J Y, et al. Peat-forming environments and evolution of thick coal seam in Shengli Coalfield, China: Evidence from geochemistry, coal petrology, and palynology[J]. *Minerals*, 2018, 8(3): 82.
- [56] BROWN S A E, SCOTT A C, GLASSPOOL I J, et al. Cretaceous wildfires and their impact on the Earth system[J]. *Cretaceous Research*, 2012, 36: 162–190.
- [57] WADE D C, ABRAHAM N L, FARNSWORTH A, et al. Simulating the climate response to atmospheric oxygen variability in the phanerozoic: a focus on the Holocene, Cretaceous and Permian[J]. *Climate of the Past*, 2019, 15(4): 1463–1483.