

doi: 10.11720/wtyht.2024.1360

李斌,张跃恒,洪链涵,等.伊敏盆地伊敏组煤层地球化学特征及沉积环境[J].物探与化探,2024,48(6):1577-1587.http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.1360

Li B, Zhang Y H, Hong L H, et al. Geochemical characteristics and sedimentary environment of coal seams in the Yimin Formation in the Yimin Basin [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(6): 1577-1587. http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.1360

伊敏盆地伊敏组煤层地球化学特征及沉积环境

李斌¹, 张跃恒², 洪链涵¹, 袁静仪¹, 高婷¹, 董振国²

(1. 韩山师范学院 地理科学与旅游学院, 广东 潮州 521014; 2. 神华地质勘查有限责任公司, 北京 102211)

摘要: 伊敏组煤系地层发育、埋藏浅且赋存稳定, 煤炭资源丰富, 适宜露天开采, 为了查明伊敏组煤层的分布特征并揭示聚煤规律, 利用地球化学方法辨识其物源区古地理背景和成煤环境具有重要地质意义。通过系统采集研究区钻孔岩心煤样, 进行煤岩煤质的测试分析, 对煤层形成时古地理信息和沉积环境进行恢复和综合研究, 结果表明, 伊敏组煤层主要为褐煤, 其次为丝炭, 镜煤反射率(R_0)均值为0.37%, 原煤含油率均值为7.66%, 全硫均值为1.32%。煤样CIA均值为58.45, 表示物源区经历初级—中等风化作用; $w(\text{Si})/w(\text{Al})$ 指标均值为2.72, 表明煤中矿物质来自陆源泥质沉积物; 灰分指数 K 为0.34, 代表煤层形成于低位泥炭沼泽环境; $w(\text{Sr})/w(\text{Cu})$ 、 $w(\text{Sr})/w(\text{Ba})$ 、 m 值和 n 值指标表示煤层沉积期古气候温湿, 蒸发量较大, 古水体盐度较高; Sr/Ba 、 $w(\text{Ba})/w(\text{Ga})$ 值指标指示煤层为陆相沉积产物; $w(\text{V})/[w(\text{V})+w(\text{Ni})]$ 、 $w(\text{V})/w(\text{Cr})$ 、 $w(\text{Ni})/w(\text{Co})$ 、 $w(\text{V})/w(\text{Sc})$ 指标指示煤层形成于缺氧的还原条件。研究认为, 伊敏组沉积早期, 陆相断陷盆地萎缩, 气候湿润, 湖泊淤浅, 形成了三角洲平原泥炭沼泽环境, 为煤炭生成和聚集提供了有利的条件。

关键词: 下白垩统; 煤层煤质; 元素丰度; 沉积环境; 伊敏盆地**中图分类号:** P595; P531**文献标识码:** A**文章编号:** 1000-8918(2024)06-1577-11

0 引言

煤炭是中国能源供应的基石, 由于“富煤、少气、缺油”的地质条件, 决定了我国能源结构长期以煤炭为主。内蒙古地区煤炭资源丰富, 为我国煤炭产量第二大省^[1], 且该区煤炭资源具有煤层厚度大、分布广、储量丰富、埋藏浅、易开采、煤种齐全等特征, 被称为“露天煤矿”之乡, 也是北方地区重要的煤电一体化能源基地。

蒙东煤矿位于内蒙古呼伦贝尔市鄂温克族旗, 该煤矿于2008年12月16日开工建设, 煤炭可采储量达 7×10^8 t, 设计服务年限100年。蒙东煤矿采取煤电联营, 通过建设坑口电厂, 将褐煤就地转化成电力输出^[2]。

早白垩世是我国地质历史上重要的聚煤和成煤

期, 在东北地区形成了丰富的煤炭资源, 但在煤炭开采和生产实践中, 人们发现该地区煤层空间变化较大, 煤层对比和追踪困难, 煤炭资源勘探和评价工作遇到了困境。前人曾对该地区的层序地层、沉积环境、盆地演化进行了研究^[3-4], 但缺少针对性的地球化学佐证, 难以指导煤矿开采和资源评价。

蒙东煤矿主力开采煤层为下白垩统伊敏组。对蒙东煤矿的主力煤层煤样的地球化学分析, 可恢复成煤期的沉积环境, 追溯成煤物质在地壳中的形成、演化过程, 丰富地质学基础理论, 对于揭示东北地区煤层赋存规律具有重要意义, 也可为东北地区的油气勘探提供理论支持。但因白垩纪煤层分布局限, 埋藏较浅, 易于开采, 其理论研究和关注度不够, 前人主要对该地区地质构造特征、地层、聚煤作用、煤岩煤质特征等进行研究, 对煤系地层尚缺乏系统的地球化学分析和成煤环境研究。

收稿日期: 2023-08-18; **修回日期:** 2023-11-19**基金项目:** 神华神东电力有限责任公司科技创新项目“宁东煤矿南部区构造特征及煤层对比控制”(SGEG-FZB-2024-D4-KX-752); 韩山师范学院重点项目(理科)“鄂尔多斯盆地大柳塔地区活鸡兔—补连塔侏罗系层序地层及聚煤规律研究”(XZ202104)**第一作者:** 李斌(1970-), 男, 内蒙古化德县人, 博士, 2009年毕业于中国地质大学(北京), 高级工程师, 现从事页岩气地质勘探开发方面教学与研究工作。Email: libin9600@sohu.com

在蒙东煤矿的勘探和开采过程中,积累了大量的煤岩地球化学资料,利用指相元素和地球化学指标,能较好地反映沉积环境条件。在收集研究区钻孔主采煤层地球化学测试数据的基础上,开展元素地球化学研究和分析,可揭示成煤期的古地理沉积环境和古盐度、古气候、古氧化还原条件。

1 地质背景

白垩纪早期,受控于燕山运动,在海拉尔沉降区形成了众多一系列 NE—SW 向雁行式排列的内陆拗陷盆地。伊敏盆地位于黑龙江省大兴安岭隆起带西坡,是海拉尔沉降区东部的一个凹陷盆地,该地区因其丰富的煤炭资源而闻名,也被称为伊敏煤

田^[3]。伊敏煤田在平面总体呈 NNE 走向,北西及南东两侧分别被具有同沉积性质的阿吉图伊洪德断裂(F_{60})和伊敏河断裂(F_{10})两条较大的断层所控制(图 1),为一轴向 $N45^{\circ}E$ 的宽缓向斜,地层倾角一般在 5° 左右,由轴部向两翼逐渐变陡,且东南翼稍陡于西北翼,沿走向及倾向均具有缓波状起伏。蒙东煤矿(研究区)位于伊敏煤田的东北部,为一单斜构造形态,区内正断层广泛分布,在成煤期后持续活动,将原本完整的含煤盆地切成若干块段,由于断层的上升盘含煤地层抬升作用,致使部分煤层遭受剥蚀。

根据钻探揭露,区内地层系统由老至新依次为白垩系下统龙江组、大磨拐河组、伊敏组以及第四系^[4](图 2)。伊敏组(K_1y)为煤系地层,岩性主要为灰—灰白色砾岩,灰—深灰色粉砂岩、泥岩,灰—

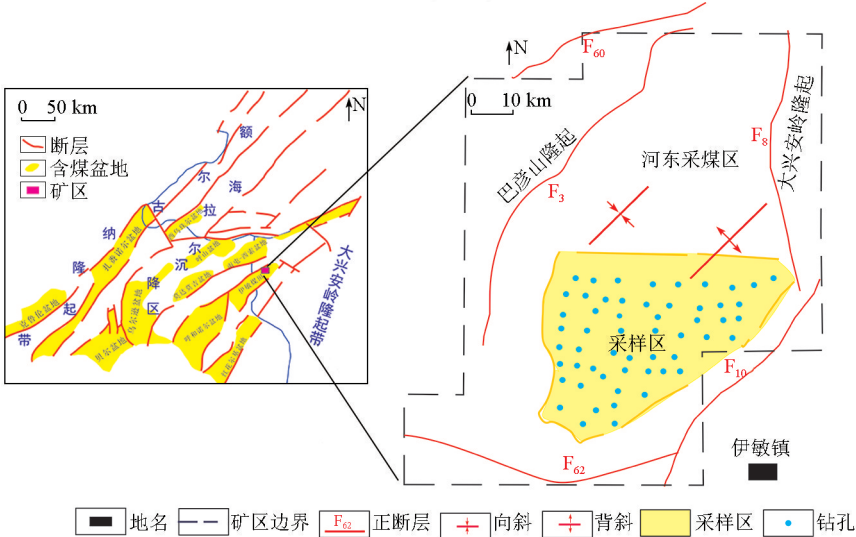


图 1 海拉尔沉降区构造纲要和采样位置
Fig.1 The structural outline of Hailar settlement area and sample location

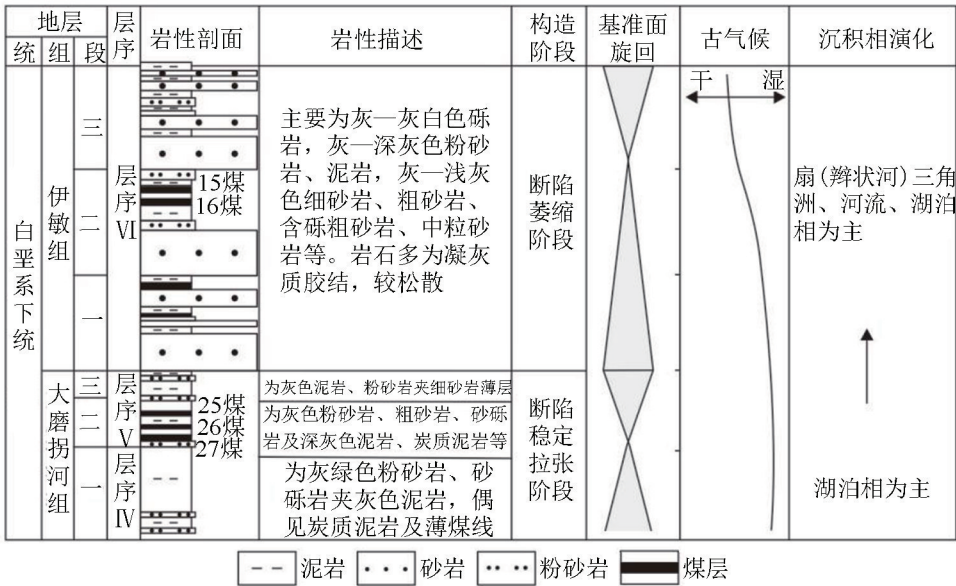


图 2 白垩系下统含煤地层综合柱状图
Fig.2 The comprehensive histogram of lower Cretaceous coal bearing strata

浅灰色细砂岩、粗砂岩、含砾粗砂岩、中粒砂岩,多为凝灰质胶结,较松散,发育 15、16 两个煤组。伊敏组地层厚度为 184.98~549.05 m,平均 352.38 m,总的趋势是西南部较薄,向东南部逐渐变厚,与下伏大磨拐河组呈整合接触,上覆第四系不整合于伊敏组地层之上。

2 采样与化验测试

样品全部来自于研究区内的钻井煤样取心,涉及 65 口钻孔,样品共计 925 件。依照《煤炭资源勘探煤样采取规程》规定要求,可采煤层(褐煤>1.50 m、烟煤>0.8 m)及临界可采煤层均进行采样。采样厚度不大于 3 m,复煤层中各煤层单独采样,夹矸及炭质泥岩单独采样,夹矸厚度大于 0.1 m 时,只采 0.1 m。样品按规定要求分层描述,整理净化后,计算长度和质量采取率,填写送样说明书和煤样汇总表后,包好装箱发往测试单位内蒙古煤田地质局科研所实验室进行测试。

依据《煤灰成分分析方法》(GB/T 1574—2007)中硅钼兰分光光度法测试二氧化硅,使用库仑滴定法测试三氧化硫、氧化镁、氧化钙、二氧化钛、氧化锰、三氧化二铝、氧化钠、三氧化二铁、氧化钾,测试仪器为可见分光光度计(722N),分析误差小于 3%;依据《煤中锆的测定方法》(GB/T 8207—2007)中蒸馏分离—苯芴酮分光光度法测试锆等微量元素,测试仪器为原子吸收仪(Z-5000),测试精度优于 5%。

3 分析结果

3.1 煤层特征

研究区煤的颜色为深褐—黑褐色,条痕为棕深—褐色,光泽暗淡,断口为不规则或参差状,裂隙不发育,真密度为 1.53~1.63 g/cm³,视密度为 1.30~1.38 g/cm³。15、16 煤组煤岩成分以暗煤为主,丝炭次之,层状或块状构造,条带状或均一状结构,以暗

淡型煤为主,半暗淡型煤次之。

3.1.1 固定碳和挥发分含量

煤的固定碳(FC_{ad})是测定煤岩挥发分后残留下来的有机物质的产率。根据固定碳含量可以判断煤化程度,进行煤的分类。通常固定碳含量越高,挥发分越低,煤化程度越高;固定碳含量高,煤的发热量也越高。根据煤岩样的工业分析结果,15、16 煤组原煤样品 FC_{ad} 含量均值为 27.56%,属于特低固定碳煤 SLFC;挥发分(V_{daf})含量均值为 45.36%,属于高挥发分煤 HV;基本特点是随着深度的加深,煤化作用和变质程度提高,煤的固定碳含量逐渐增加,煤的挥发分逐渐降低(表 1)。

3.1.2 成煤母质

显微煤岩特征:根据煤显微组分分析,15、16 煤组中煤的镜质组含量为 55.27%~75.71%,半镜质组含量为 2.52%~9.14%,惰性组含量为 0.59%~7.05%,矿物质含量为 11.46%~38.83%,透光率 PM 平均值为 37。根据类型指数计算结果,烃源岩干酪根类型指数 TI 均小于 0,成煤母质为典型的 β 型干酪根。对比煤显微组分含量,上部煤层中煤的镜质组含量低于下部煤层,而矿物质含量高于下部煤层,各煤层其他组分的含量变化不大。

元素分析:煤元素分析结果表明,煤主要由 C、H、O 等元素组成,其中 C 平均含量 71.04%,H 平均含量 4.67%,O 平均含量 23.47%,具有 H 低、O 高、H/C 原子比低的特点(表 2)。15、16 煤组 H/C 原子比值为 0.07,O/C 原子比值为 0.33,根据低成熟度($R_0<1\%$)条件下干酪根元素分类(表 3),成煤母质为腐殖型干酪根(β 型)。

3.1.3 变质阶段

各煤层镜煤最大反射率($R_{0,max}$) 在 0.34%~0.39%,变质程度低,为低阶褐煤,随着埋深的增加,煤变质程度有所提高。

3.1.4 低温干馏

按照煤质指标分级详细标准,可将煤岩化分为

表 1 煤质特征和显微组分

Table 1 The coal quality characteristics and macerals

煤层	煤质特征					显微组分					类型指数 TI 值	镜惰比 V/I	反射率 $R_0/\%$
	$FC_{ad}/\%$	$M_{ad}/\%$	$A_d/\%$	$V_{daf}/\%$	透光率 PM	镜质 组 V/%	半镜 质组/%	惰性 组 I/%	壳质 组 E/%	矿物质/%			
15-5 下	23.79	10.72	19.13	46.36	35	59.93		0.59	0.66	38.83	-45.21	101.58	0.34
16-1	23.23	9.80	20.33	46.64	36	55.27		7.05	0.77	35.40	-48.12	7.84	0.36
16-2 下	27.10	9.82	17.10	45.98	36	75.71		1.59	0.50	22.08	-58.12	47.62	0.38
16-3 上	30.37	8.70	16.29	44.64	37	62.64	2.52	1.37	0.46	34.85	-48.12	45.72	0.39
16-3	33.30	12.01	11.49	43.20	41	72.15	9.14	6.69	0.56	11.46	-60.52	10.78	0.39

注: FC_{ad} 为固定碳, M_{ad} 为水分, A_d 为灰分, V_{daf} 为挥发分。

表 2 煤元素组成和原子比

Table 2 The elemental composition and atomic ratio of coal

煤层	w(C)/%	w(H)/%	w(O)/%	w(N)/%	w(S)/%	H/C 原子比	O/C 原子比
15-5 下	72.09	4.78	22.41	0.68	1.04	0.07	0.31
16-1	69.95	4.43	24.67	0.8	1.71	0.07	0.33
16-2	70.11	4.82	24.24	0.71	1.00	0.06	0.32
16-3 上	71.02	4.69	23.22	0.79	1.16	0.07	0.31
16-3	72.05	4.63	22.82	0.82	0.80	0.06	0.35

表 3 低温干馏 600 °C 原煤焦油产率

Table 3 The raw coal tar yield at low temperature dry distillation 600 °C

煤层	腐殖酸	苯萃取物产率/%	低温干馏 /%			
			Tar.ad	CR.ad	Water.ad	气体损失
15-5 下	14.34	0.50	7.07	59.64	19.47	15.00
16-1	13.66	0.72	7.68	60.87	18.39	14.00
16-2 下	16.68	0.74	9.47	61.95	20.43	13.84
16-3 上	17.00	0.69	7.22	62.20	15.34	15.24
16-3	17.20	1.65	6.84	63.54	15.34	14.62

注: Tar.ad 为焦油产率; CR.ad 为半焦产率; Water.ad 为水分。

含油煤(焦油产率 Tar.ad <7%)、富油煤(7% < Tar.ad <12%)和高油煤(Tar.ad >12%)3类。研究区煤层原煤含油率为 6.84%~9.47%,除 16-3 煤层含油率 <7%,为含油煤外,其余各层均 >7%,为富油煤(表 3)。

3.2 煤灰成分

煤中无机矿物质经高温灼烧均变为金属和非金属的氧化物及盐类,按其赋存形态可以划分为主要元素和微量元素,其在煤层中的富集与元素的性质、物质来源、沉积环境以及煤的变质程度等密切相关。

3.2.1 主要元素

根据煤岩样品实验,研究区煤灰成分以 SiO₂ 和 Al₂O₃ 为主,其次为 CaO、Fe₂O₃ 和 SO₃,其余成分含量较低(表 4)。

3.2.2 微量元素

目前,在中国的煤中已查明了微量元素有 63 种,其中有些元素可在煤中富集,形成工业矿床。伊敏组原煤中微量元素的富集系数 E_f 为 0.06~0.55,

说明原煤微量元素含量均低于地壳克拉克值和世界煤的微量元素含量,表明伊敏褐煤中微量元素明显不富集(表 5)^[5]。

4 成煤环境辨识

4.1 显微组分和 V/I 比值

煤显微组分中镜质组、惰质组含量及镜质比(V/I)与泥炭沉积时的温度、湿度关系密切。在温暖潮湿的还原环境,凝胶化作用占优势,镜质组含量增加;在高温干燥的氧化环境,丝炭化作用占优势,惰质组含量增加^[6-7]。镜质比(V/I)是成煤环境判断的重要指标,可指示成煤沼泽水位变化情况:V/I 比值高,表示为覆水深、强还原环境的泥炭沼泽;V/I 比值低,表示为覆水浅、弱还原环境的泥炭沼泽。研究区煤层的 V/I 为 7.84~101.58,平均值为 42.71(表 1),V/I 值较高,表示泥炭沼泽覆水较深,凝胶化作用强烈,为有利的成煤环境。

表 4 煤灰主要元素含量

Table 4 The main element content of coal ash

煤层	煤灰元素/%							酸性氧化物 (SiO ₂ + Al ₂ O ₃)/%	碱性氧化物 (Fe ₂ O ₃ + CaO+MgO)/%	$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)/$ $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$	煤厚/m
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	SO ₃				
15-5 下	47.03	4.65	19.57	10.87	2.72	0.85	7.51	66.60	18.24	0.24	2.83
16-1	49.14	6.54	19.51	8.28	2.11	0.78	6.87	68.65	16.93	0.34	2.64
16-2 下	47.73	4.87	16.30	10.86	1.82	0.73	8.49	64.03	17.55	0.30	3.16
16-3 上	45.04	8.47	16.06	14.53	2.37	1.70	7.80	61.10	25.37	0.53	7.50
16-3	39.64	11.50	13.15	15.59	2.58	1.81	7.22	52.79	29.67	0.87	21.50
平均值	45.72	7.21	16.92	12.03	2.32	1.17	7.58	62.63	21.55	0.45	7.53

表 5 煤灰微量元素含量^[5]Table 5 The trace element content of coal ash^[5]10⁻⁶

煤层	样号	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Ga	Rb	Sr	Mo	Ba	Th	U
15 上	M6	4.42	30.50	11.20	1.31	4.59	5.11	1.30	0.49	257.00	0.12	137.00	2.12	0.76
	M5	0.20	28.40	8.41	2.29	7.00	5.37	1.08	0.53	156.00	0.34	75.60	0.75	0.14
	M4	4.74	38.40	22.50	0.92	3.13	29.60	5.22	2.30	244.00	0.71	153.00	6.94	2.28
16 下	M3	2.60	20.90	6.85	1.58	3.35	2.30	1.32	0.62	46.00	1.97	74.70	0.24	0.17
	M2	1.47	18.40	10.10	1.51	3.54	12.00	1.14	0.42	117.00	0.28	274.00	0.78	0.22
	M1	6.14	16.90	13.80	4.22	3.57	14.50	3.76	6.04	96.30	1.55	191.00	3.70	1.00
平均值		3.26	25.58	12.14	1.97	4.20	11.48	2.30	1.73	152.72	0.83	150.88	2.42	0.76
地壳克拉克值		22	135	100	25	75	55	15	90	375	1.5	425	9.6	2.7
富集系数 E_f		0.15	0.19	0.12	0.08	0.06	0.21	0.15	0.02	0.41	0.55	0.36	0.25	0.28
中国煤 (侏罗系—白垩系) ^[6]		3	13	12	8	11	9	4	7	79	2	150	4	2
世界褐煤 ^[6]		3.86	37.38	54.53	32.01	54.17	35.32	5.22	32.64	206.82	6.18	249.91	3.3	6.06

4.2 主量元素丰度和比值

4.2.1 化学风化指数(CIA)

CIA 是反映物源区化学风化程度的指标。根据稳定氧化物(Al_2O_3) 和不稳定氧化物($\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) 含量比值可以, 判别物源区化学风化强度^[8], 其计算公式如下:

$$\text{CIA} = w(\text{Al}_2\text{O}_3) / [w(\text{Al}_2\text{O}_3) + w(\text{CaO}) + w(\text{Na}_2\text{O}) + w(\text{K}_2\text{O})] \times 100。$$

其中: CIA 值代表硅酸盐矿物中在 K、Na、Ca、Mg 等活泼性元素的淋失程度, 与风化作用强度成正比, CIA 值越大, 风化强度越大。研究区东部大兴安岭隆起带为物质来源方向, 煤层物源区化学风化指数为 45.76~70.21, 均值为 58.45, 表示物源区经历初级—中等风化作用(图 3a)。自下而上(16~15 煤层), 物源区风化作用有增强趋势。

4.2.2 $w(\text{SiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$

煤灰中的 Si、Al 为陆源物质的指示元素, 通常 Si 来自黏土和页岩, 而 Al 的相对富集可指示受陆源的影响程度。 $w(\text{SiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 比值与气候条件、水介质有关, 在暖湿气候条件下, $w(\text{SiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 比值低; 在干冷气候条件下, $w(\text{SiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 比值高^[9]。

当煤层中 $w(\text{SiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3) > 2$ 时, 为偏碱性水介质环境, 此时 Si 大量转化迁移, Al 相应增加。研究区煤层 $w(\text{SiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 比值为 2.40~3.01(图 3b), 远低于纯硅质岩($w(\text{SiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 80 \sim 1400$), 表明煤中矿物质来自陆源泥质沉积物, 其沉积环境主要为陆相。

4.2.3 K 值

沉积环境的变化对成煤影响明显, 煤中灰分氧化物含量可反映成煤沼泽环境的地球化学特征及古

地理环境。煤灰中酸性氧化物($\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$) 占优势时, 成煤环境属于弱还原性; 煤灰中碱性氧化物($\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{CaO}+\text{MgO}$) 占优势时, 成煤环境属于强还原性。灰分指数 K 可以作为判别煤层形成时的地球化学环境和相环境的指标^[10]。灰分指数 K 计算公式为:

$$K = [w(\text{SiO}_2) + w(\text{Al}_2\text{O}_3)] / [w(\text{Fe}_2\text{O}_3) + w(\text{CaO}) + w(\text{MgO})]。$$

煤的灰分指数与覆水程度、还原性成反比, 煤的灰分指数越低, 覆水越深, 还原性越强。研究区煤灰成分中酸性氧化物($\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$) 含量为 52.79%~68.65%, 碱性氧化物($\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{CaO}+\text{MgO}$) 含量为 17.55%~29.67%, 灰分指数 K 为 0.25~0.56, 均值为 0.34, K 值较低, 表明 15、16 煤层成煤期整体为覆水较深的泥炭沼泽环境(图 3c)。自下而上煤层(16~15 煤) K 值逐渐降低, 说明沼泽水体有变深的趋势。

4.2.4 m、n 值

Ca、P、Fe、Mn、Mg、Al 等可用于古盐度判别。湖泊中的 SiO_2 、 Al_2O_3 主要来源于陆源河流及尘土的碎屑, CaO、MgO 主要来自陆源碳酸盐岩和湖泊内生沉淀, Fe 主要是由陆地搬运而来的, 还原环境中铁以 Fe^{2+} 的形式, 咸水的沉积环境有助于将 Fe^{2+} 从溶解相移除, 变为固体相沉淀下来存在泥岩中, 利用 $m = w(\text{MgO})/w(\text{Al}_2\text{O}_3) \times 100$, $n = w(\text{CaO})/[w(\text{CaO}) + w(\text{Fe}_2\text{O}_3)]$ 等比值, 可以有效地判断古盐度^[11-13], 当 $m > 10$ 时, 指示为咸水环境; $n > 0.5$ 时, 指示为高盐环境。

研究区煤层 m 值为 10.81~19.62, 均值 13.71, 属咸水环境; n 值为 0.58~0.70, 均值 0.63, 属高盐度水体范围(图 3d、e)。自下而上(16~15 煤), m、n 值变化较稳定, 代表水体介质基本为咸水环境。

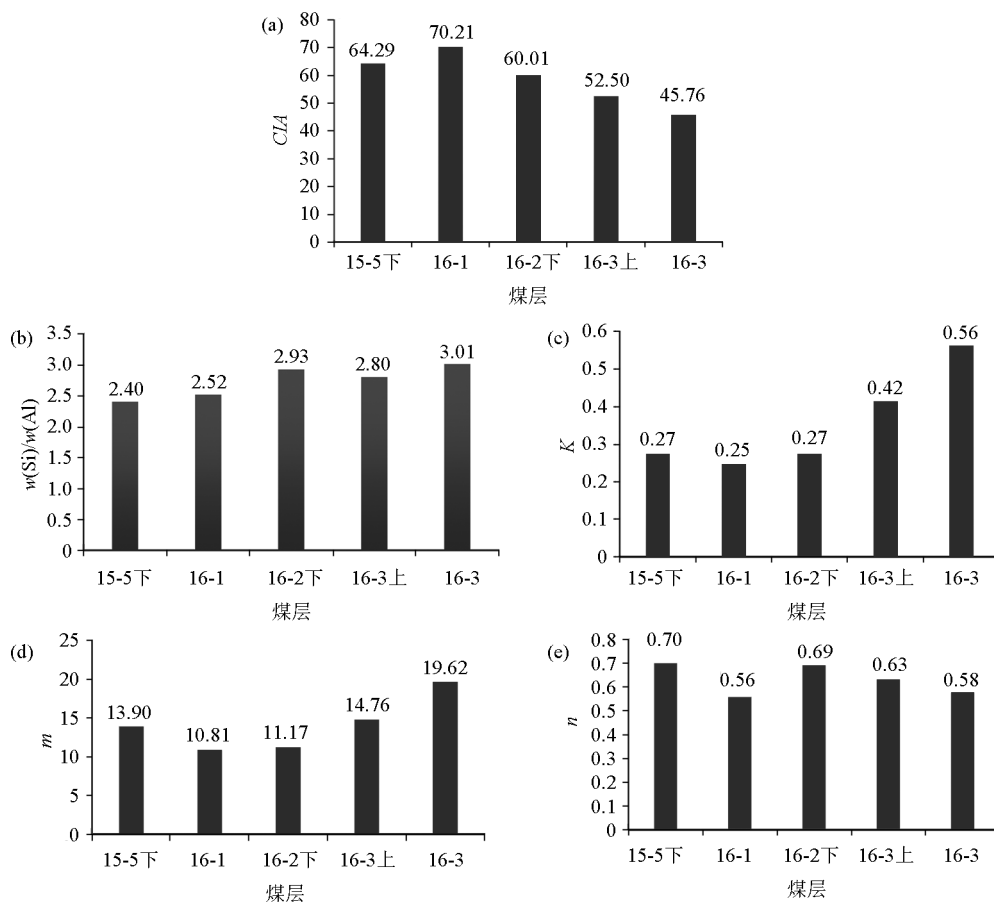


图3 伊敏组 15、16 煤组 CIA 值(a)、 $w(\text{Si})/w(\text{Al})$ 值(b)、 K 值(c)、 m 值(d)、 n 值(e) 特征
Fig.3 Characteristics of CIA value(a), $w(\text{Si})/w(\text{Al})$ value(b), K value(c), m value(d) and n value(e) of coal groups 15 and 16 of Yimin Formation

4.3 微量元素丰度和比值

4.3.1 沉积相

煤的生成和演化是受沉积环境控制,具体包括古地理位置、古气候和古水体等条件。古气候决定植物发育程度,古水体还原环境决定植物遗体保存条件,古地理位置决定植物的堆积和保存条件, Sr 、 Ba 、 Ga 等元素丰度和比值是判别沉积相的有效指标^[14-18]。通常情况下认为 $w(\text{Sr}) = (100 \sim 300) \times 10^{-6}$ 、 $w(\text{Ba}) > 150 \times 10^{-6}$ 、 $w(\text{Ba})/w(\text{Ga}) > 16$ 为典型的陆相沉积环境^[19]。

研究区煤层 Sr 均值 152.72×10^{-6} , Ba 均值 150.88×10^{-6} 、 $w(\text{Ba})/w(\text{Ga})$ 均值为 92.07(图 4),指示 16、15 煤组形成于以陆相为主的沉积环境,但存在短暂的海侵现象。

4.3.2 古氧相

一般认为还原的水体环境是有利于泥炭的堆积、保存和成煤演化。采用 $w(\text{V})/w(\text{Ni})$ 、 $w(\text{V})/w(\text{Cr})$ 、 $w(\text{Ni})/w(\text{Co})$ 、 $w(\text{V})/w(\text{Sc})$ 等指标比值可以恢复古水体的还原条件,通常当 $w(\text{V})/w(\text{Ni}) >$

1 、 $w(\text{V})/w(\text{Cr}) > 2$ 、 $w(\text{Ni})/w(\text{Co}) > 2.5$ 、 $w(\text{V})/w(\text{Sc}) > 9.1$ 时,代表贫氧—缺氧的还原环境^[20-21]。

研究区煤层 $w(\text{V})/w(\text{Ni})$ 为 4.06~12.27,均值为 6.52; $w(\text{V})/w(\text{Cr})$ 值为 0.83~0.92,均值为 2.32; $w(\text{Ni})/w(\text{Co})$ 值为 0.85~3.40,均值为 2.55; $w(\text{V})/w(\text{Sc})$ 值为 2.75~142.00,均值为 30.05(图 5),表明成煤期水体整体处于贫氧的还原条件,并伴随着多次短暂富氧条件。根据 Co 含量 ($< 3 \times 10^{-6}$ 、 $(3 \sim 10) \times 10^{-6}$ 、 $> 10 \times 10^{-6}$) 可以判断泥炭沼泽的类型(高、中、低),研究区 Co 含量平均值为 1.97×10^{-6} ,为高位泥炭沼泽。

4.3.3 古气候

某些岩石的形成和元素丰度与古气候相关,可恢复和重建古气候。微量元素识别古气候的常用方法有 $w(\text{Sr})/w(\text{Cu})$ 、 $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$ 比值等。

煤层中 Sr 含量可以反映古气候特征, Sr 含量高代表干旱炎热气候条件, Sr 含量低代表潮湿气候背景。 $w(\text{Sr})/w(\text{Cu}) = 1 \sim 10$ 指示为温湿气候; $w(\text{Sr})/w(\text{Cu}) > 10$ 指示为干燥气候。 $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$

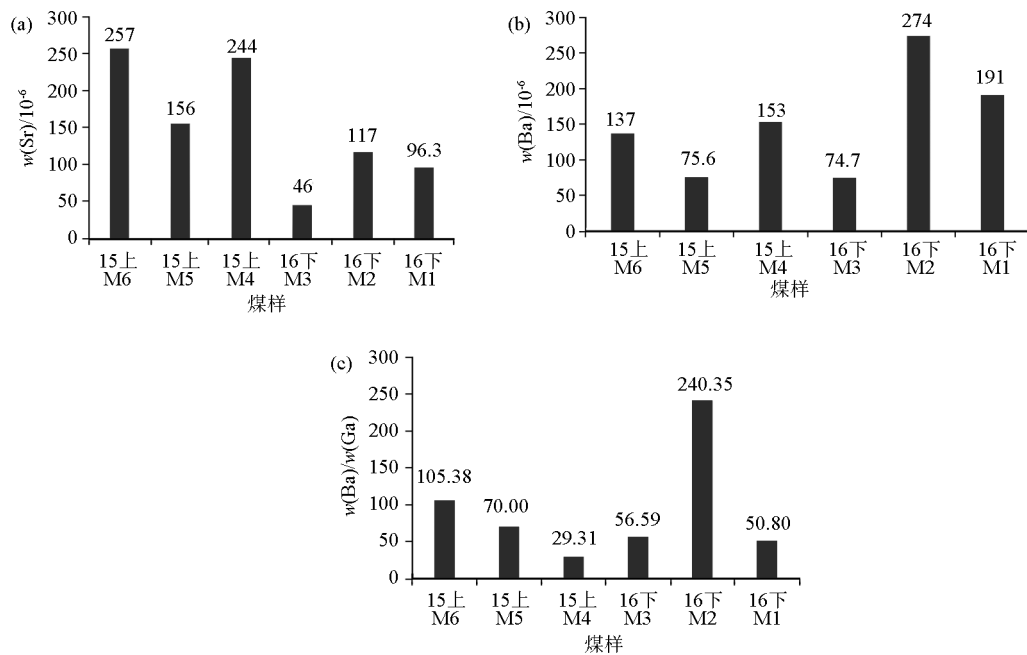
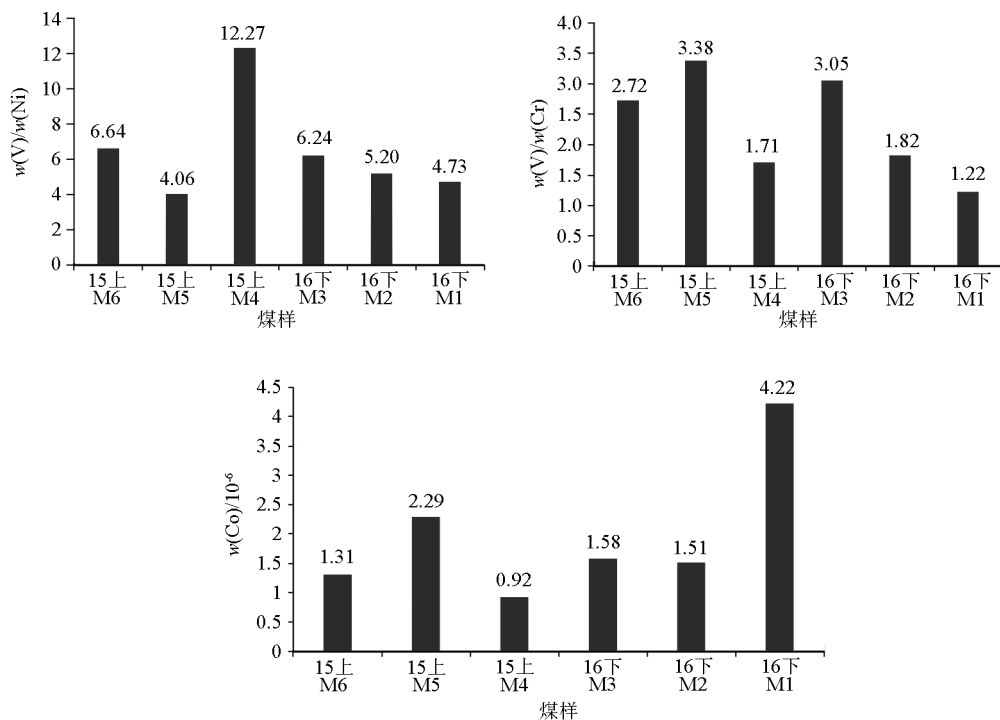
图4 伊敏组 15、16 煤组 Sr(a)、Ba(b) 含量及 $w(\text{Ba})/w(\text{Ga})$ 值(c) 特征Fig.4 The contents of Sr(a), Ba(b) and $w(\text{Ba})/w(\text{Ga})$ value(c) characteristics of coal groups 15 and 16 of Yimin Formation图5 伊敏组 15、16 煤组 $w(\text{V})/w(\text{Ni})$ 值、 $w(\text{V})/w(\text{Cr})$ 值及 Co 含量特征

Fig.5 Characteristics of V/Ni value, V/Cr value and Co value of coal groups 15 and 16 of Yimin Formation

比值低指示干旱和寒冷气候条件^[22]。

研究区煤层 $w(\text{Sr})/w(\text{Cu})$ 比值为 6.64~50.29, 自下而上(16~15 煤层) $w(\text{Sr})/w(\text{Cu})$ 明显增加, 反映古气候由湿润向干旱过渡(图 6); $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$

为 0~0.06, 平均值 0.016, $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$ 比值较低, 表明古气温较高。

4.3.4 古盐度

在陆相淡水沉积环境下, 沉积岩中 Ba、Th 较

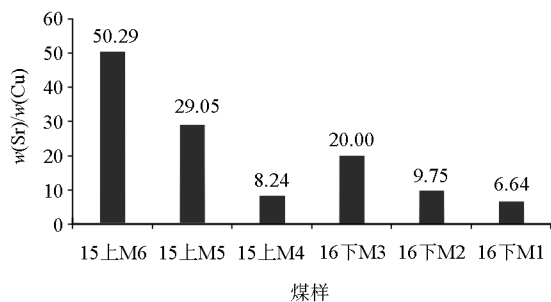
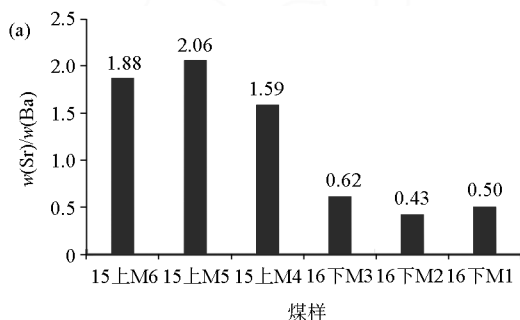


图6 伊敏组 15、16 煤组 $w(\text{Sr})/w(\text{Cu})$ 值特征
Fig.6 $w(\text{Sr})/w(\text{Cu})$ value characteristics of coal groups 15 and 16 of Yimin Formation



高, Sr、U 较低, 利用 $w(\text{Sr})/w(\text{Ba})$ 、 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 可判别水体介质的性质^[23]。一般来讲, $w(\text{Sr})/w(\text{Ba}) = 0.5 \sim 1.0$ 为半咸水, $w(\text{Sr})/w(\text{Ba}) > 1.0$ 为咸水沉积环境; 陆相沉积的煤岩 $w(\text{Th})/w(\text{U}) > 2.0$, 海相沉积的泥页岩 $w(\text{Th})/w(\text{U}) < 2.0$ ^[24]。

研究区煤层 $w(\text{Sr})/w(\text{Ba})$ 均值为 1.18, $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 均值为 3.31, 综合判别为陆相半咸水—咸水沉积环境(图 7)。自下而上(16~15 煤层), $w(\text{Sr})/w(\text{Ba})$ 比值逐渐增加, 表明水体介质的含盐量变高。

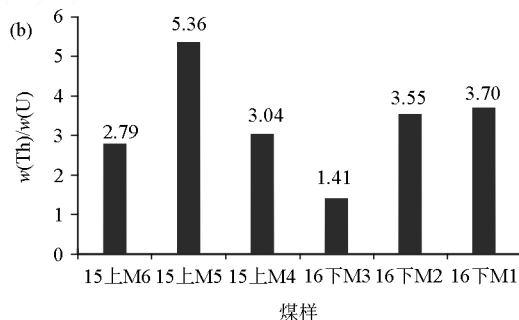


图7 伊敏组 15、16 煤组 $w(\text{Sr})/w(\text{Ba})$ 值(a)、 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 值(b)特征

Fig.7 $w(\text{Sr})/w(\text{Ba})$ value(a) and $w(\text{Th})/w(\text{U})$ value(b) characteristics of coal groups 15 and 16 of Yimin Formation

5 沉积环境演化与聚煤规律

在早白垩世沉积初期, 构造运动减缓, 研究区沉积了大磨拐河组底部的凝灰质碎屑岩段, 将沉积盆地填平补齐。由于 SE 方向的断层 F_{10} 的活动强度大于 NW 方向的断层 F_{60} , 造成盆地沉积不对称, 靠近 F_{60} 一侧沉降速度较慢, 水体较浅, 而靠近 F_{10} 一侧沉降速度则较快, 水体较深, 因此, 从 F_{60} 到 F_{10} , 沉积环境由浅部位的洪积扇、冲积扇相过渡到湖泊沼泽相, 再到浅水—深水湖相, 在水深适中、水体相对稳定的地带, 即盆地的北西翼和中北部为聚煤中心, 沉积了煤系地层。在浅部则沉积了砾岩、砂砾岩、含砾粉砂岩等碎屑岩, 而在深部, 即靠近 F_{10} 一侧沉积了以粉砂岩为主的细碎屑岩, 中间夹有薄层砾岩及砂砾岩及砂砾岩, 在靠近 F_{10} 一侧大磨拐河组的泥岩段下部发育一套较厚的以粉砂岩为主的煤系地层, 粉砂岩中发育波状层理、斜层理及交错层理, 反映出当时沉积水体较为动荡, 水动力较大, 受控于 F_{10} 的震荡性活动^[25]。在大磨拐河组沉积晚期, F_{60} 活动加剧, 致使全区水域加深, 深水湖相沉积广泛发育, 此时盆地持续稳定下沉, 沉积了大磨拐河组上部的巨厚泥岩^[26]。

进入伊敏组沉积时期, 燕山运动加剧, 盆地的断

陷萎缩, 气候湿润, 古植物繁盛, 古地理单元经历了从以三角洲平原为主到以瓣状河道为主的水体变浅的演化过程, 三角洲平原泥炭沼泽相发育, 水体相对稳定, 使持续的泥炭堆积成为可能, 古盐度较高, 水体以长期缺氧还原环境为主, 使堆积泥炭能够长期保存, 聚煤作用较好, 形成了厚层煤层(图 8)。

6 结论

1) 伊敏组煤层颜色为深褐—黑褐色, 煤成分以暗煤为主, 其次为丝炭, 具有特低固定碳、高挥发分、富油、低硫的特点。

2) 煤层埋深较浅, 厚度较厚, 煤的变质程度较低, $R_0 = 0.37\%$, 煤层煤类为未变质的褐煤。

3) 主量元素成分以 SiO_2 和 Al_2O_3 为主, 其次为 CaO 、 Fe_2O_3 和 SO_3 , 灰分指数 K (均值 0.34) 较低, 推测煤层沉积时水体覆水程度较深, 为还原性较强的沼泽环境。

4) 煤岩的主量元素指标表明伊敏组煤层物源区经历初级—中等风化作用, 主要成煤期为低位泥炭沼泽环境; 微量元素指标判别煤层形成于以陆相为主的沉积环境, 是温湿气候条件下的产物, 底层水环境为长期缺氧的还原条件, 并伴随着多次短暂的贫氧, 古水体为淡水—半咸水。

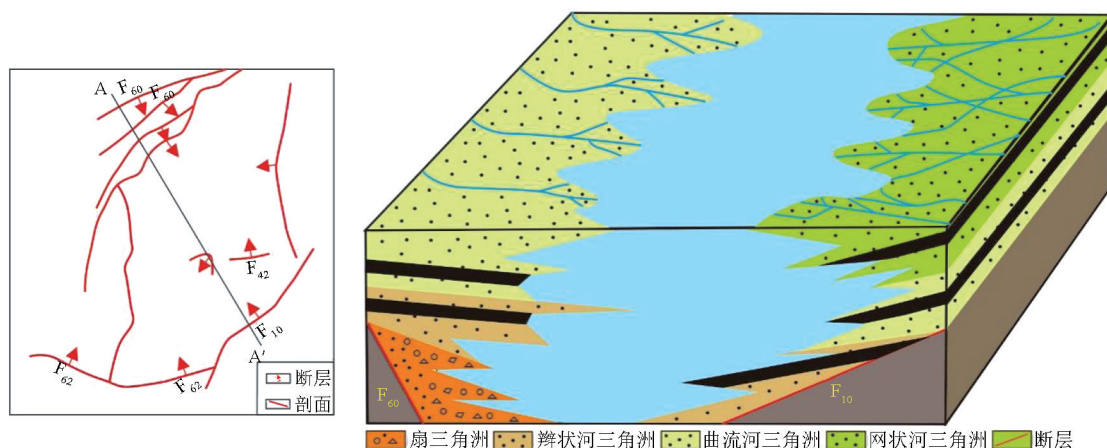


图 8 大磨拐河组—伊敏组沉积演化模式

Fig.8 Sedimentary evolution model of Damoguaihe Formation and Yimin Formation

5)大磨拐河期湖泊在逐渐淤浅(由深到浅、由大到小)的演化基础上,形成了伊敏期大面积、平坦的三角洲平原沼泽环境,泥沙不断充填、植物遗体的堆积为泥炭的形成提供了物质条件和堆积、保存空间,伊敏早、中期聚煤作用较好,煤层发育。

参考文献 (References):

- [1] 张云鹤,邵龙义,孙钦平,等.海拉尔盆地旧桥凹陷伊敏组层序——古地理及聚煤特征[J].煤炭科学技术,2018,46(4):177-187.
Zhang Y H, Shao L Y, Sun Q P, et al. Sequence-paleogeography and coal accumulation features of Jiugao Sag Yimin Formation in Hailaer Basin[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(4): 177-187.
- [2] 余坤,屈争辉,薛志文,等.二连盆地胜利煤田构造特征及成因机制[J].煤田地质与勘探,2018,46(6):59-66,73.
Yu K, Qu Z H, Xue Z W, et al. Structural characteristics and genetic mechanism of Shengli coalfield in Erlian Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(6): 59-66, 73.
- [3] 王东东,邵龙义,张强,等.二连盆地群下白垩统含煤地层聚煤特征分析[J].中国矿业大学学报,2013,42(2):257-265.
Wang D D, Shao L Y, Zhang Q, et al. Analysis of coal-accumulating characteristics in the lower Cretaceous coal-containing strata of the Erlian Basin Group[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(2): 257-265.
- [4] 李春柏.海拉尔盆地油气勘探历程与启示[J].新疆石油地质,2021,42(3):374-380.
Li C B. Petroleum exploration history and enlightenment in Hailaer Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(3): 374-380.
- [5] 梁虎珍,曾凡桂,相建华,等.伊敏褐煤中微量元素的地球化学特征及其无机—有机亲和性分析[J].燃料化学学报,2013,41(10):1173-1183.
Liang H Z, Zeng F G, Xiang J H, et al. Geochemical characteristics and inorganic-organic affinity of the trace elements in Yimin lignite[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2013, 41(10): 1173-1183.
- [6] 唐修义,黄文辉.中国煤中微量元素[M].北京:商务出版社,2004.
Tang X Y, Huang W H. Trace elements in coal of China[M]. Beijing: The Commercial Press, 2004.
- [7] 屈晓荣,李俊,孙彩蓉,等.鄂尔多斯盆地东缘柳林地区煤系泥页岩稀土元素地球化学特征[J].煤炭学报,2018,43(4):1083-1093.
Qu X R, Li J, Sun C R, et al. Geochemistry characteristics of rare earth elements in the late Paleozoic black shale from eastern Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(4): 1083-1093.
- [8] 黄文辉,万欢,杜刚,等.内蒙古自治区胜利煤田煤—锆矿床元素地球化学性质研究[J].地学前缘,2008,15(4):56-64.
Huang W H, Wan H, Du G, et al. Research on elemental geochemical characteristics of coal-Ge deposit in Shengli coalfield, Inner Mongolia, China[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(4): 56-64.
- [9] 韦恒叶.古海洋生产力与氧化还原指标——元素地球化学综述[J].沉积与特提斯地质,2012,32(2):76-88.
Wei H Y. Productivity and redox proxies of palaeo-oceans: An overview of elementary geochemistry[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2012, 32(2): 76-88.
- [10] 李玉坤,李广.吐哈盆地沙尔湖煤田煤质煤岩特征及煤相分析[J].煤炭科学技术,2019,47(5):198-205.
Li Y K, Li G. Analysis on quality, petrography and facies of coal seam in Shaerhu Coalfield of Turpan-Hami Basin[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(5): 198-205.
- [11] 王绍清,孙翊博,沙玉明.不同聚煤区内富氢煤有机地球化学特征研究[J].煤炭科学技术,2018,46(9):233-238.
Wang S Q, Sun Y B, Sha Y M. Study on organic geochemical features of rich hydrogen coal in different coal accumulation areas[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(9): 233-238.
- [12] 杜刚,夏斌,秦胜利,等.内蒙古胜利煤田共生锆矿与成煤沼泽微环境的成因关系[J].煤炭学报,2008,33(4):405-409.
Du G, Xia B, Qin S L, et al. Genetic relationship of Ge-coal deposit in Shengli Coalfield and micro-environment of coal-forming swamp[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(4): 405-409.
- [13] 董振国,赵伟,郭军军,等.胜利煤田胜利组褐煤地球化学特征

- 及古环境地质意义[J].煤炭科学技术,2020,48(11):172-181.
- Dong Z G, Zhao W, Guo J J, et al. Geochemical characteristics of lignite from Shengli Formation and Paleo-environmental geological significance in Shengli Coalfield[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(11): 172-181.
- [14] 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 W H, Jiu B, Li Y. 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.
- [15] 岳立孝, 石彦强. 沁水煤田玉溪井田煤系沉积环境及聚煤规律[J]. 中国煤炭地质, 2017, 29(12): 50-54, 71.
- Yue L X, Shi Y Q. Coal measures sedimentary environment and coal accumulation pattern in Yuxi minefield, Qinshui coalfield[J]. Coal Geology of China, 2017, 29(12): 50-54, 71.
- [16] 秦身钧, 陆青锋, 吴士豪, 等. 重庆中梁山晚二叠世煤有机地球化学特征[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 1973-1982.
- Qin S J, Lu Q F, Wu S H, et al. Organic geochemistry of the Late Permian Coal from the Zhongliangshan mine, Chongqing[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7): 1973-1982.
- [17] 孙莎莎, 姚艳斌, 吝文. 鄂尔多斯盆地南缘铜川地区油页岩元素地球化学特征及古湖泊水体环境[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(3): 642-645.
- Sun S S, Yao Y B, Lin W. Elemental geochemical characteristics of the oil shale and the paleo-lake environment of the Tongchuan area, southern Ordos Basin[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2015, 34(3): 642-645.
- [18] 王双杰, 王金喜, 李世龙. 平朔矿区安太堡煤矿 9[#] 煤的有机地球化学特征[J]. 中国煤炭地质, 2014, 26(12): 20-23.
- Wang S J, Wang J X, Li S L. Organic geochemical characteristics of coal No. 9 in Antaibao coalmine, Pingshuo mining area[J]. Coal Geology of China, 2014, 26(12): 20-23.
- [19] 刘国, 姚忠岭, 董淑丽. 呼和诺尔大型煤田地质特征及沉积环境分析[J]. 产业与科技论坛, 2012, 11(4): 122-123.
- Liu G, Yao Z L, Dong S L. Geological characteristics and sedimentary environment analysis of Huhe Nuoerte large coalfield[J]. Industrial & Science Tribune, 2012, 11(4): 122-123.
- [20] 张运周, 徐胜林, 陈洪德, 等. 川东北旺苍地区栖霞组地球化学特征及其古环境意义[J]. 石油实验地质, 2018, 40(2): 210-217.
- Zhang Y Z, Xu S L, Chen H D, et al. Geochemical characteristics and paleo-environmental implications of middle Permian Qixia Formation in Wangcang, northern Sichuan[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(2): 210-217.
- [21] 徐晓琴. 内蒙古胜利煤田 0-1 孔煤中微量元素地球化学特征[J]. 岩石矿物学杂志, 2017, 36(6): 933-940.
- Xu X Q. Trace element geochemical features of the coals in 0-1 borehole of the Shengli coal field in Inner Mongolia[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2017, 36(6): 933-940.
- [22] 徐发. 内蒙古新巴尔虎左旗诺门罕煤田地质背景及沉积环境聚煤规律分析[J]. 矿产与地质, 2010, 24(5): 440-444.
- Xu F. Geological background and analysis on coal accumulating law in sedimentary environment of Nomonhan coal field in Inner Mongolian new Barag left Banner[J]. Mineral Resources and Geology, 2010, 24(5): 440-444.
- [23] 王善博, 杨君, 李建国, 等. 鄂尔多斯盆地西缘宁东地区侏罗系含铀地层元素地球化学特征[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(6): 19-25, 32.
- Wang S B, Yang J, Li J G, et al. Elemental geochemical characteristics of Jurassic uranium-bearing strata in Ningdong Area, western Ordos Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(6): 19-25, 32.
- [24] 焦叶红. 呼山煤盆地伊敏组煤层特征及聚煤环境分析[J]. 中国煤炭, 2013, 39(10): 31-34, 70.
- Jiao Y H. Analysis on characteristics of Yimin Formation coal seam in Hushan coal basin and coal accumulating environment[J]. China Coal, 2013, 39(10): 31-34, 70.
- [25] 张才利, 高阿龙, 刘哲, 等. 鄂尔多斯盆地长 7 油层组沉积水体及古气候特征研究[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(4): 582-587.
- Zhang C L, Gao A L, Liu Z, et al. Study of character on sedimentary water and palaeoclimate for Chang7 oil layer in Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(4): 582-587.
- [26] 万欣. 呼和诺尔盆地伊敏组含煤特征分析[J]. 中国煤炭地质, 2010, 22(5): 23-28.
- Wan X. Coal-bearing characteristic analysis of yimin formation in Hohnur Basin, Inner Mongolia[J]. Coal Geology of China, 2010, 22(5): 23-28.

Geochemical characteristics and sedimentary environment of coal seams in the Yimin Formation in the Yimin Basin

Li Bin¹, Zhang Yue-Heng², Hong Lian-Han¹, Yuan Jing-Yi¹, Gao Ting¹, Dong Zhen-Guo²

(1. School of Geography and Tourism, Hanshan Normal University, Chaozhou 521014, China; 2. Shenhua Geological Exploration Co., Ltd., Beijing 102211, China)

Abstract: The Yimin Formation hosts shallow and stable coal seams, which are rich in coal resources and suitable for open-pit mining. To ascertain the distributions of coal seams in the Yimin Formation and reveal the coal accumulation patterns, it holds critical geological significance to identify the provenance setting and coal-forming environment using geochemical methods. This study systematically collected coal samples from drilling cores in the study area for testing and analysis of coal quality. Furthermore, this study reconstructed the

paleogeographic information and sedimentary environment during the formation of coal seams for comprehensive research. The results show that: (1) The coal seams of the Yimin Formation are primarily composed of lignite, with durain being the dominant component, followed by fusain. Their coal samples exhibited average vitrinite reflectance (R_0) of 0.37%, average oil content of 7.66% in raw coal, and average total sulfur content of 1.32%; (2) The average CIA value of 58.45 suggests that the source area experienced primary to moderate weathering. The average $w(\text{Si})/w(\text{Al})$ ratio of 2.72 indicates that minerals in the coal originated from terrestrial argillaceous sediments. The ash index (K) of 0.34 implies that the coal seams formed in a low-level peat swamp environment. The $w(\text{Sr})/w(\text{Cu})$, $w(\text{Sr})/w(\text{Ba})$, $w(\text{Mg})/w(\text{Al})$ (m), and $w(\text{Ca})/w(\text{Fe})$ (n) ratios signify warm and humid paleoclimate, significant evaporation, and high salinity of ancient water bodies during the coal seam sedimentation stage. The Sr, Ba, and $w(\text{Ba})/w(\text{Ga})$ values denote that the coal seams resulted from continental sedimentation. The $w(\text{V})/[w(\text{V})+w(\text{Ni})]$, $w(\text{V})/w(\text{Cr})$, $w(\text{Ni})/w(\text{Co})$, and $w(\text{V})/w(\text{Sc})$ ratios demonstrate that the coal seams formed under anoxic reducing conditions. This study posited that the early sedimentary stage of the Yimin Formation saw the reduced continental faulted basin, humid climate, and lake siltation, forming a peat swamp environment in the deltaic plain, thus creating favorable conditions for coal generation and accumulation.

Key words: lower Cretaceous; coal seam quality; element abundance; sedimentary environment; Yimin Basin

(本文编辑:蒋实)

