doi: 10.11720/wtyht.2026.0016
吴江, 王金淼, 王作红, 等. 宁东地区延安组煤层元素地球化学特征与古生产力恢复[J]. 物探与化探, 2026, 50(5): 973-985. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.0016
Wu J, Wang J M, Wang Z H, et al. Element geochemistry and paleoproductivity reconstruction of coal seams in the Yan'an Formation, Ningdong area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(5): 973-985. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.0016

宁东地区延安组煤层元素地球化学特征与古生产力恢复

吴江[1], 王金淼[1], 王作红[1], 张跃恒[2], 李斌[3], 董振国[2]
(1. 国家能源集团 宁夏煤业有限责任公司麦垛山煤矿, 宁夏 银川, 750400; 2. 神华地质勘查有限责任公司, 北京 102241; 3. 韩山师范学院 地理科学与旅游学院, 广东 潮州 521041)

摘 要: 基于侏罗系延安组煤系地层发育, 但缺乏煤层地球化学特征、沉积环境、成煤条件和煤层赋存空间系统研究的现状, 本文系统采集了鄂尔多斯盆地西缘宁东地区侏罗系麦垛山煤矿延安组煤心样品 605 件, 获取了 6 655 个地球化学测试数据; 利用数据有效性检验、元素组合、判别图版等方法, 剖析了煤层元素地球化学特征和指相意义, 重建了延安期古气候、古氧相、古盐度、古水深及古生产力等, 揭示了延安期古沉积环境演变、煤层赋存特征和聚煤规律, 构建了该区"地球化学示踪—沉积环境反演—聚煤规律分析"的一体化研究框架。研究结果表明: ①延安组样品的 *ICV* 均值为 2.55, 反映煤岩未受风化作用影响, 样品代表性强; ②*CIA* 均值为 71.87%, 指示物源区经历中等化学风化作用, 对应温湿的气候背景, 推测当时古温度为 17.76 ℃ 左右, 降水量为 1 011.14 mm/a 左右; ③镁铝比(*m*)、钙铁比(*n*)、*w*(Sr)/*w*(Ba)等指标较高, 反映延安期古水体盐度较高; ④煤灰还原性指数(*K*)、全硫($S_{p,d}$)、*w*(Th)/*w*(U)等指标揭示沼泽以贫氧的弱还原环境为主, [*w*(Fe)+ *w*(Al)]/[*w*(Ca)+ *w*(Mg)]、*w*(Mn)/*w*(Ti)均值分别为 1.55、0.23, 指示为中水位沼泽, 覆水程度中等; ⑤*w*(P)/*w*(Al)、*w*(P)/*w*(Ti)、初级古生产力(*NPP*)均值分别为 0.03、0.7、331.53 g/(m^2·a), 反映延安期湖泊营养程度中等, 古生产力水平较高。综上, 鄂尔多斯盆地西缘宁东地区侏罗系延安组主要为陆相河流—三角洲平原沉积相, 该时期古气候为温暖潮湿类型, 成煤环境为弱还原的中水位沼泽, 水体盐度较高, 具有较高的古生产力水平, 为成煤植物的繁衍及其遗体堆积与保存创造了有利条件。该成果对恢复该时期盆地沉积格局、重建古地理及沉积矿产富集规律研究具有重要意义。

关键词: 鄂尔多斯盆地; 延安组; 地球化学; 古生产力; 地质意义
中图分类号: P595; P531; P31 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-8918(2026)05-0973-13

0 引言

鄂尔多斯盆地位于华北板块西部, 横跨陕、甘、宁、蒙、晋五省区, 面积约为 25×10^4 km^2, 为我国第二大陆相沉积盆地, 盆地内蕴含丰富的煤、油气、砂岩铀矿等资源[1]。宁东矿区位于该盆地西部, 规划面积 4 450 km^2, 煤炭资源丰富, 探明储量 331×10^8 t, 占宁夏煤炭的 85%, 是国家重要的能源供应基地。近年来勘探揭示, 该区延安组煤系地层发育, 但煤层数量多、厚度变化大, 且经多次构造抬升后, 煤系地层发生了多次相对位移, 导致煤层分岔、合并现象频现, 严重制约了煤矿生产部署和开采效率。而煤层地球化学指标因与古地理环境、沉积背景、成岩作用等密切相关, 故其在煤层识别、对比追踪及成煤环境恢复等方面具有重要意义。

泥炭沼泽地作为成煤的重要地质环境, 其所形成的煤层蕴含了丰富的古气候和古环境信息[2], 煤岩组分、元素特征等可有效反映成煤物质转化过程, 对恢复成煤环境具有不可替代的作用。目前, 国内外

收稿日期: 2026-01-15; **修回日期**: 2026-06-29
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)
第一作者: 吴江(1979-), 男, 工程师, 主要从事矿井地质、水文地质, 矿井水防治等工作。Email: 15020759@ceic.com
通讯作者: 李斌(1970-), 男, 博士, 高工, 从事沉积学、测井和地质地理信息系统教学和科研工作。Email:libin9600@sohu.com

学者主要利用沉积学、地球物理、地层古生物学、古煤相参数等对成煤环境进行研究，认为延安组沉积于温暖、潮湿的气候条件下，形成于陆相淡水环境，水体为贫氧—厌氧环境，具有较高的古生产力[3-6]；煤系地层沉积具有非均质性特征，古气候的冷暖变化影响了湖盆的古生产力条件，是陆相湖盆煤炭沉积的主控因素[7-8]；煤炭有机质主要为混合有机质，古生产力中等，形成于温暖、湿润的贫氧陆相淡水洼地环境[9]。因此，通过对煤层中元素丰度与组合特征的研究，有助于恢复成煤期古环境特征，并进一步评价有益元素的可利用性[10]。

由于前人对盆地西部延安组煤层缺乏系统的采样和精细测试，对煤层元素分布、富集特征以及物源、古地理、古环境关系等研究较少，导致该区煤层地球化学和古环境基础研究薄弱。因此，笔者以鄂尔多斯盆地西部宁东矿区麦垛山煤矿为研究对象，选取有代表性的延安组煤心进行系统采样，开展煤质工业分析、煤层元素含量和矿物质等测试，根据煤中元素含量、比值和分布规律等，探讨宁东煤田麦垛山煤矿延安期物源、沉积环境等，揭示物质来源、成煤环境和聚煤规律，以期为该地区煤炭资源勘查和评价研究提供依据。

1　地质概况

鄂尔多斯盆地西缘处于稳定的鄂尔多斯地块与活跃的秦祁褶皱带之间的交接地带，构造条件较复杂，在经历了印支、燕山和喜马拉雅多期构造运动发生褶皱、逆冲和整体抬升后[10]，形成现在的地质地貌特征（图 1a）。早、中侏罗世富县—延安期经历了湖盆的填平补齐、最大湖侵期、局部构造抬升、稳定充填期、湖盆萎缩以及再次构造抬升的河流泛滥阶段。

麦垛山煤矿位于盆地西缘北部宁东煤田鸳鸯湖矿区（图 1b），南北长约 14.00 km，东西宽约 4.50 km，面积约 65 km^2，地层主要有三叠系上统上田组 (T_3s)，侏罗系中统延安组 (J_2y)、直罗组 (J_2z) 及侏罗系上统安定组 (J_3a)，其中延安组 (J_2y) 为一套内陆湖泊三角洲沉积，是主要含煤地层，在该地区厚度平均为 358.25 m，岩性为灰、灰白色砂岩与深灰、灰黑色粉砂岩、泥岩互层，含煤、炭质泥岩及煤线（图 2），煤层常见裂隙充填状和分散粒状黄铁矿。

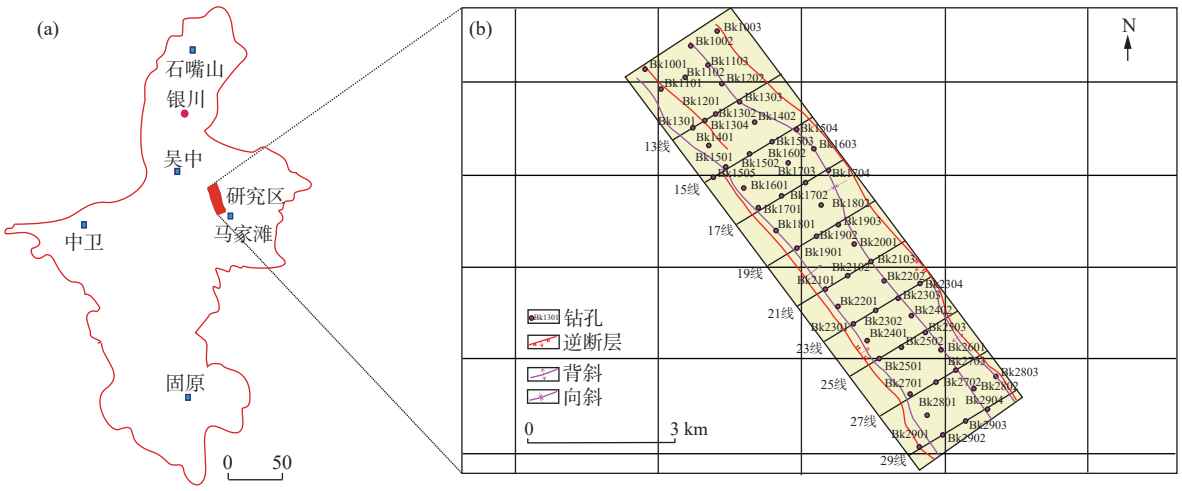


图 1　研究区位置 (a) 和采样点位 (b)

Fig. 1　The location(a) and sampling points(b) of the study area

2　样品采集分析及指标选择

2.1　样品采集与分析

为确保采样的代表性，本次研究的样品取自麦垛山井田内布设的探煤孔钻井岩心，在系统观察岩心岩性序列、沉积构造及接触关系的基础上，依据《煤炭资源勘查煤质评价规范》（MT/T 1090—2009），采样分层厚度一般控制在 3 m 左右。重点选取延安组岩性典型且未受明显后期流体或氧化作用改造、代表性强的层段进行采样。本次共采集 38 口钻孔的煤心煤样 605 件，所有样品的工业分析、元素分析等均委托陕西煤田地质化验测试有限公司承担，采用全岩分析仪、光电显微镜、X 射线荧光光谱分析（XRF）、电感耦合等离子体质谱分析（ICP-MS）等方法，对煤岩煤质、显微组分、主微量元素含量等进行精确测定，分析质量可靠，误差率<5%，获取了 6 655 个地球化学测试数据。



(a) 延安组煤层　　(b) 延安组砂岩

图 2　宁东地区石沟驿剖面延安组典型煤岩特征

Fig. 2　Typical coal and rock characteristics of Yan'an Formation at Shigouyi section in Ningdong area

2.2　地球化学指标选择

地球化学指相元素是指在沉积或成岩过程中, 其含量、比值或组合特征能够敏感反映特定沉积环境(古气候、古水深、古生产力、古氧相、古盐度)的化学元素或元素组合。这些元素具有“指相性”, 即其地球化学行为受控于沉积介质的物理化学条件, 可用于判别地质沉积环境。本次研究采用主量元素判别古成煤环境、微量元素精细刻画水体条件的技术路线。

在实际应用中, 理想的指相指标需要满足 3 个核心条件: 环境敏感性、稳定性(抗干扰性)、物源一致性, 通常采用多元素组合和特征比值来消除单一元素的歧义性。本文选取的 5 个古环境指标分述如下, 各指标判别标准如表 1 所示。

表 1　地球化学示踪关键判别指标与标准

Table 1　Key discriminant indexes and standards for geochemical tracing

古环境指标		判别标准			延安组煤层均值
		干旱气候	半干旱—半湿润气候	温暖湿润气候	
古气候	*CIA* /%	<60	60～70	>70	71.87
	DSI	>1	0.3～1	<0.3	1.15
	w(Sr)/*w*(Cu)	>10	5～10	<5	17.65
		淡水	半咸水	咸水	
古盐度	*m*	<1	1～10	>10	24.07
	n	<0.5(盐度<13‰)	0.5～0.8	>0.8(盐度>22‰)	0.59
	w(Sr)/*w*(Ba)	<0.2	0.2～0.5	>0.5	0.41
		氧化环境	贫氧/弱还原环境	缺氧/还原环境	
古氧相	*K*	>0.35	0.35～0.7	>0.7	0.52
	$S_{p,d}$		<1	>2	0.57
	w(Th)/*w*(U)	>7	2～7	<2	0.83
	w(V)/[*w*(V)+ *w*(Ni)]	<0.46	0. 46～0.84	>0.84	0.7
		浅水	中等水深	深水	
古水深	[*w*(Fe)+ *w*(Al)]/[*w*(Ca)+ *w*(Mg)]	<1	1～2	>2	1.55
	w(Mn)/*w*(Ti)	>0.3	0.1～0.3	<0.1	0.23
	w(Co)/10^{-6}	<3	3～10	>10	4.4
		低生产力(贫养湖)	中等生产力(中养湖)	高生产力(富养湖)	
古生产力	*w*(P)/*w*(Ti)	<0.34	0.34～0.79	>0.79	0.7
	w(Ba)/10^{-6}	<200	200～1 000	>1 000	563.96
	NPP/(g·m^{-2}·a^{-1})	<200	200～350	>350	331.53

2.2.1　古气候指标

气候通过温度和降水/蒸发两个主要变量, 对湖泊和泥炭沼泽产生多层次的控制作用。泥炭沼泽的形成需满足 3 个条件: 温暖湿润气候、稳定的构造沉降、充足的可容空间, 其中气候条件是最关键的参数。古气候条件主要由化学蚀变指数 (*CIA*)、干旱指数(*DSI*)和 *w*(Sr)/*w*(Cu) 比值重建[11-13]。

1)化学蚀变指数(*CIA*)。化学蚀变指数计算公式为:

$$CIA=[Al_2O_3/(Al_2O_3+CaO^*+Na_2O+K_2O)]\times 100, \quad (1)$$

式中: 各氧化物分子式代表其分子摩尔数; CaO^*仅指硅酸盐矿物中的 CaO 摩尔数, 下同。*CIA* 值高(>70%), 反映源区物质经历了湿热条件下的强化学风化; 值低(<60%), 反映寒冷或干旱条件下的弱风化(表 1)。

2)干旱指数(*DSI*)。沉积岩中碱性元素可表示气候干旱程度,用来构建干旱指数(*DSI*),公式为[2]:

$$DSI=(K_2O+Na_2O+CaO^*)/(Al_2O_3), \quad (2)$$

式中:各氧化物分子式代表其分子摩尔数。*DSI* 值越高,表示气候越干旱,通常气候干旱地区的样品 *DSI* > 1.0,湿润地区的样品 *DSI* <0.3。

3)*w*(Sr)/*w*(Cu) 比值。通常,*w*(Sr)/*w*(Cu)>10 代表干旱炎热气候环境(蒸发量大);*w*(Sr)/*w*(Cu)<5 代表温湿气候环境(蒸发量小)。

2.2.2 古盐度指标

古盐度是区分咸水、半咸水、淡水或盐湖环境以及识别气候干湿变化的重要指标。利用自生沉淀的 Ca、Mg 与陆源输入的 Al、Fe 之间的比例关系可反演水体盐度,建立镁铝比值(m=100×w(MgO)/w(Al_2O_3))和 钙铁比值(n=w(Ca)/[w(Ca)+w(Fe)]),从而推算古盐度大小。由于 Ba 溶解度极低,在淡水环境中会优先沉淀;Sr 溶解度较高,需在盐度较高的环境中才沉淀,因此 *w*(Sr)/*w*(Ba) 比值会随水体盐度升高而增大[14]。

2.2.3 古氧相指标

底层水体的还原性对有机质保存和富集至关重要,还原性会抑制有机质分解,促进泥炭积累。煤灰还原性指数(*K*)主要反映沉积水体的酸碱度和相关的化学条件,计算公式如下:

$$K=(Fe_2O_3+CaO+MgO)/(SiO_2+Al_2O_3), \quad (3)$$

式中:各氧化物分子式代表其分子摩尔数。*K* 值高,指示偏碱性的沉积环境,多对应覆水较深、水体滞留、还原性强的泥炭沼泽,例如潟湖、分流间湾等;*K* 值低,指示偏酸性的弱氧化—弱还原环境,为覆水较浅的泥炭沼泽,如三角洲平原、泛滥平原等。

岩石颜色、自生矿物标志等是判断古氧相的直观证据。其中,黄铁矿硫主要来源于煤中黄铁矿,若煤中黄铁矿全硫($S_{p,d}$)含量较多,特别是莓球状黄铁矿的出现,则指示沉积环境为强还原环境。

煤中 *w*(Th)/*w*(U)<7、*w*(V)/[(*w*(V)+*w*(Ni)]>0.6 时,指示为贫氧的还原环境,水体有分层现象,有利于有机质保存[15]。

2.2.4 古水深指标

一定的湖水深度是有机质保存的关键因素,水深决定成煤环境的类型。Ca、Mg 为内源元素,在较浅、蒸发作用较强的水体中,Ca、Mg 含量高;Fe、Al 为陆源元素,化学性质相对稳定,在浅水区大量沉积,向深水区含量降低;因此,[*w*(Fe)+ *w*(Al)]/[*w*(Ca)+ *w*(Mg)] 可以有效地指示古水深,划分水体的深度,通常该比值越高,指示水体越深[16]。

Ti、Mn 元素化学性质差异较大,受到水介质特性的控制十分明显,Mn 更容易在浅水氧化环境沉淀,Ti 化学性质极其稳定,几乎全部来自陆源碎屑[16]。一般认为,*w*(Mn)/*w*(Ti) 比值在浅水区较高,在深水区较低,*w*(Mn)/*w*(Ti)=0.1~0.3,对应滨浅湖—辫状河三角洲前缘亚相沉积。

在泥炭沼泽环境中,有机质对 Co 有强烈的吸附和络合作用,根据 Co 含量可以判断泥炭沼泽水体的覆水深度 (浅水、中等、深水)[16]。

2.2.5 初级古生产力指标

海洋沉积物里的磷(P)、生物成因钡(Babio)和有机碳(Cdaf)等与当时的海洋生产力水平呈正相关。P 是生物体生长过程中必需的营养元素,可促进生产力的繁盛;Ba 主要来源于生物碎屑和陆源输入,常以重晶石($BaSO_4$)的形式沉淀下来,在沉积物中保存率高,生物成因钡是重建古生产力的理想示踪剂。由于 Ti、Al 是公认的陆源碎屑输入的代表性元素,*w*(P)/*w*(Ti) 比值能够更准确地反映湖泊营养程度,表征古生产力水平。研究发现,当 *w*(P)/*w*(Ti)> 0.34、*w*(Ba)>300×10^{-6} 时,认为古湖泊具有较高的营养程度和古生产力水平[17]。

利用有机碳法定量模型,可对古湖泊生产力进行数值化估算,从而更精确地划分湖泊的营养等级(如富营养湖、贫营养湖),当初级古生产力 *NPP* > 300 g/(m^2·a)时,指示湖泊具有中等营养和古生产力水平[17]。

3 数据结果及研究

3.1 主量元素含量特征

煤化学成分和元素组成与沉积期地质条件和古环境有关,煤的灰分主要来源于煤中的矿物质,矿物质含量越高,灰分越大。延安组煤样测试结果表明,其煤灰化学成分复杂,以酸性氧化物(SiO_2+Al_2O_3)为主,平均含量 57.27%,主要来自陆源碎屑,指示成煤沼泽始终受陆源碎屑输入影响;同时煤灰 CaO 和 SO_3 含量较高(平均 14.19% 和 7.40%),指示碳酸盐矿物和黄铁矿较为发育,反映还原条件下的自生沉淀(表 2)。

3.2 微量元素含量特征

煤中微量元素是指均量低于 0.1% 的元素,其中金属微量元素(如 Li、V、Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Sr、Ba、U、Th、Mo、Re 等) 对沉积环境(古盐度、古水深、氧化还原条件、物源区性质)的灵敏响应具有指相意义,被称为“地球化学指纹”。延安组煤样测试

表 2　延安组煤样主量元素含量

Table 2　Proportion of major elements in coal samples of Yan'an Formation

煤层	主量元素含量/%										
	SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	MnO_2	SO_3	P_2O_5
1	33.42	12.60	0.71	14.76	11.40	4.93	0.54	4.30	0.13	14.31	0.11
2	36.54	15.46	0.76	10.59	17.13	5.28	0.63	2.99	0.32	8.07	0.07
3-1	38.84	15.77	0.85	12.8	11.81	4.08	0.71	3.16	0.17	9.14	0.19
3-2	40.19	17.31	0.81	9.74	12.03	4.38	0.87	3.64	0.15	7.40	0.17
3下	32.89	11.73	0.74	15.48	17.54	5.78	0.37	3.13	0.30	9.30	0.13
4-1	42.69	16.78	0.81	10.56	10.62	3.72	0.96	3.24	0.14	7.69	0.17
4-2	41.69	16.20	1.53	10.12	11.35	4.12	0.95	3.27	0.16	8.48	0.19
4-3	38.09	15.48	1.04	9.88	13.27	4.39	0.79	5.12	0.21	8.84	2.50
5	23.18	11.09	0.43	8.32	36.68	4.18	0.19	2.22	0.17	8.84	1.47
6	37.20	16.21	0.74	10.35	15.41	4.26	0.66	2.65	0.34	8.66	0.89
7	46.79	18.75	0.87	7.78	10.05	3.37	0.83	2.47	0.12	5.96	0.52
8	43.79	17.51	0.81	6.33	15.02	4.23	0.86	2.71	0.15	6.19	0.51
9	50.21	18.77	0.98	7.20	8.19	3.26	0.89	3.12	0.11	4.79	0.28
10	44.74	17.51	0.83	9.30	11.11	3.27	0.78	2.45	0.13	6.90	0.49
12	49.38	19.94	0.87	5.96	9.69	2.97	1.00	1.96	0.12	5.19	0.50
16	46.35	17.26	0.75	7.62	11.60	3.00	0.87	2.43	0.15	6.89	0.34
17	47.20	16.64	0.88	7.98	13.13	3.09	0.67	1.85	0.25	3.91	0.57
18-1	42.45	17.02	0.80	9.17	14.90	3.47	0.63	2.27	0.18	6.10	0.65
18-2	37.96	16.03	0.74	9.59	18.76	3.91	0.58	2.24	0.19	6.78	0.57
18下	45.13	18.62	0.83	8.70	14.20	2.85	0.61	1.54	0.15	4.52	0.30
平均	40.94	16.33	0.84	9.61	14.19	3.93	0.72	2.84	0.18	7.40	0.53

结果表明: 煤样中元素丰度差异较大, 其中 Ba、Sr、Li 含量较高, 其含量平均值分别为 563.96×10^{-6}、243.67×10^{-6}、142.71×10^{-6}; 其他微量元素含量较低, 基本低于 50×10^{-6}[10](表 3)。

3.3　数据有效性检验

由于煤岩样品可能受风化淋滤和后期成岩作用的影响, 在利用煤岩地球化学参数开展古环境恢复时, 应对数据进行有效性检验, 排除淋滤和成岩作用的影响[18]。

1)碎屑经过搬迁和再循环沉积作用, 沉积岩中黏土矿物含量会增加, 利用成分变异指数(*ICV*)可检验碎屑岩的物质成熟度, 判断是否为再循环沉积物[18], 其公式定义为:

$$ICV=(Fe_2O_3+CaO+MgO+K_2O+Na_2O+MnO+TiO_2)/Al_2O_3, \quad (4)$$

当 *ICV* >1 时, 反映出源区物质成熟度较低, 碎屑颗粒的搬运距离短, 为首次沉积。研究区煤层的 *ICV* 均值为 2.55(图 3), 表明本次研究岩心样品较新鲜, 物质结构不成熟, 未受风化和成岩作用的影响, 可用来恢复成煤期古环境和成煤条件[18]。

2)若样品受淋滤作用改造显著, 微量元素(如锗、镓等)与 Al_2O_3 的含量会呈显著相关性。通过相关性分析可知, 锗、镓微量元素含量变化与 Al_2O_3 含量相关性差(图 4), 证明样品并没有遭受淋滤作用的改造, 因此地球化学特征指标反映的地质信息基本准确。

3.4　泥炭沼泽环境判别

煤炭是由植物遗体在泥炭沼泽中堆积埋藏后, 经成煤作用转变而成。古地理条件、沉积环境和水体介质等对泥炭沼泽的形成及植物遗体保存具有不同的影响, 不同的泥炭沼泽环境下形成的煤中矿物组分、灰分及元素组成等具有不同的地球化学特征[19]。

3.4.1　古气候条件识别

古气候控制泥炭沼泽陆源碎屑物质的供应, 也影响着泥炭沼泽中的植被茂盛程度、生长特征和分布区域, 通常气候越温暖湿润, 植被越茂盛, 成煤物质越丰富。

延安组煤样元素分析结果显示, 其 *CIA* 值为 57.96%～83.46%, 均值 71.87%, 表明研究区延安组主要处于温暖湿润的气候条件下, 源区物质经历了中等化学风化作用。A-CN-K 三元图的功能是区分“化学风化程度”与“后期成岩改造(钾交代)”, 如向 A 端发展, 指示化学风化作用增强, 长石发生分解, 黏土矿物增多; 如明显偏向 K 端, 说明样品可能经历了后期富钾流体的改造, 导致 K 含量异常偏高[20]。延安组煤层样品投点落在 A-CN-K 三元图斜长石附近,指示样品新鲜, 矿物中长石占主导地位, 延安组煤样投点与图中 UCC-PAAS 的风化趋势线一致, 主要靠近斜长石一侧, 与 A-CN 轴平行, 表明泥炭埋藏期仍处于斜长石风化早期的 Na、Ca 淋失阶段, 未发生后期

表 3　延安组煤样微量元素含量[10]

Table 3　Proportion of trace elements in coal samples of Yan'an Formation [10]

煤层	微量元素含量/10^{-6}														
	Li	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	U	Rb	Sr	Zr	Ba	Th
3-1	165.16	25.50	39.56	5.24	13.92	14.80	21.81	3.56	2.97	13.26	2.00	116.02	22.77	411.12	3.68
3-2	97.49	13.37	6.08	10.50	12.75	6.51	14.30	2.09	4.40	13.91	0.79	151.77	12.14	746.32	2.29
4-1	196.22	12.15	4.80	2.77	7.64	8.74	13.40	2.37	4.66	6.49	1.09	123.93	13.51	416.62	2.30
4-2	56.23	29.53	20.01	3.13	9.12	14.15	25.40	6.59	4.40	2.37	9.93	651.93	34.22	1 092.92	4.54
4-3	204.55	22.14	15.22	2.47	9.33	12.74	20.55	3.99	4.21	1.70	3.56	426.85	22.80	849.49	3.71
4-4	207.79	23.56	13.86	3.30	8.49	10.90	8.99	3.35	4.07	1.43	4.24	77.32	20.67	266.78	3.28
4-5	190.54	44.36	40.78	2.76	9.74	16.15	16.36	8.42	4.29	3.62	25.63	68.68	38.64	311.33	6.92
4-6	193.01	23.07	13.34	7.17	12.01	12.58	15.12	4.73	6.87	22.89	11.58	175.51	23.22	489.99	4.33
4-7	163.82	11.76	0	3.56	8.36	10.55	13.12	3.57	3.58	5.63	5.65	123.81	17.99	273.35	3.47
5-1	95.27	18.87	9.82	5.71	11.52	10.12	13.73	3.49	4.18	4.53	1.47	411.21	17.50	886.90	3.07
5-2	100.95	24.14	14.48	7.06	8.26	11.86	14.06	4.38	4.53	2.62	8.39	384.49	25.75	728.76	4.00
5-3	146.06	37.37	26.83	9.00	15.05	16.93	28.73	6.67	4.65	2.45	12.92	271.76	34.23	602.30	6.38
5-4	163.26	31.01	22.07	3.32	7.28	12.49	18.72	5.24	4.08	1.91	8.38	230.53	23.10	522.90	5.32
6-1	50.77	17.86	10.26	2.86	10.55	10.62	5.12	3.54	5.15	6.13	2.75	126.64	16.61	447.86	2.99
6-2	142.13	28.44	20.14	3.07	8.46	15.73	19.30	6.04	3.78	2.69	6.68	560.55	28.00	950.57	4.70
6-3	41.21	17.82	10.18	3.09	10.32	9.62	5.51	3.08	3.75	3.15	2.57	129.78	12.29	349.04	2.63
6-4	182.39	27.48	3.83	3.91	10.78	12.51	12.22	4.90	5.47	2.82	6.85	99.24	30.28	272.58	4.87
6-5	260.94	26.38	18.39	2.47	6.24	14.92	25.03	4.23	5.56	4.39	2.19	108.84	23.90	269.03	5.00
6-6	196.76	45.53	17.80	8.54	16.16	25.80	35.84	6.57	5.40	3.43	9.41	412.25	28.10	699.36	10.12
6-7	71.64	37.00	22.73	3.36	7.90	19.32	29.69	8.07	6.29	4.44	17.67	189.76	44.34	495.98	6.09
6-8	203.31	36.13	24.01	3.45	8.63	19.38	24.86	7.86	5.70	4.23	16.15	190.48	39.17	499.42	6.12
6-9	94.78	19.8	22.10	2.90	12.68	10.66	12.38	4.32	4.30	2.51	3.89	174.62	18.98	490.91	3.62
7	122.37	21.69	20.19	3.25	8.83	11.74	33.58	4.55	5.59	2.73	4.39	178.47	24.89	554.78	4.82
9-1	78.38	30.98	36.38	2.78	11.79	11.77	13.65	4.83	3.24	11.37	6.91	247.65	24.23	906.72	4.62
平均	142.71	26.08	18.04	4.40	10.24	13.36	18.40	4.85	4.63	5.45	7.30	234.67	24.89	563.96	4.54

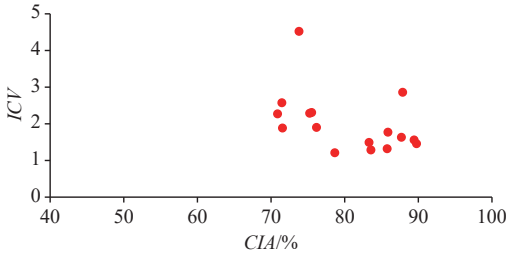


图 3　延安组煤样 *CIA-ICV* 交汇图

Fig. 3　Coal sample *CIA-ICV* scatter diagram of the Yanan formation

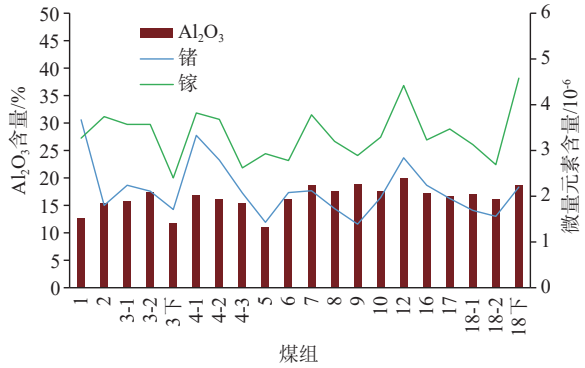


图 4　锗、镓与 Al_2O_3 的含量关系曲线

Fig. 4　Content relation curve of germanium, gallium and Al_2O_3

成岩改造(图 5)。

研究表明,利用 *CIA* 值可推算陆地地表温度[2]:

$$T_{陆地} = -120.82 + 32.45 \times \ln(CIA), \quad (5)$$

式中: $T_{陆地}$为陆地地表温度, ℃。经过计算,延安期陆地地表温度为 10.92～22.75 ℃,平均温度为 17.76 ℃(图 5)。

利用 *CIA* 值也可推算年平均降水量(*MAP*)[2]:

$$MAP = -1162.9 + 30.248 \times CIA, \quad (6)$$

式中: *MAP* 为年平均降水量, mm/a。经过计算,延安期平均降水量为 590.2～1 361.91 mm/a,平均值为 1 011.14 mm/a。推测当时为气温偏高、降雨量偏大的温湿型气候特征,与中国湖南省现今气候特征相似,是具有大陆性特点的亚热带季风温湿气候。

干旱指数(*DSI*)是通过计算"迁移能力弱的元素"与"易迁移元素"的比值,来反映干旱气候型元素与湿润气候型元素之间的关系。研究区延安组的 *DSI* 值为 0.63～3.52,均值 1.15,指示该地层形成于干旱型的气候条件下(图 6)。同时,研究区煤样中 *w*(Sr)/*w*(Cu) 均值为 17.65,同样指示为干旱气候特征。

通过样品 Sr 含量和古水体温度关系的研究,可以建立古水体温度的经验公式[20]:

$$T_{水体}=(2578-Y_{Sr})/80.8, \quad (7)$$

式中: $T_{水体}$为古水温, ℃; Y_{Sr} 为延安组煤样 Sr 含量的数值部分, 本文取 234.67。经换算得到古水体温度为 29.0 ℃, 与延安期温热类型的古气候背景特征匹配, 该气候能提升古植物光合效率, 促进植被繁茂, 为延安组厚煤层的发育提供了充足的物质基础。

3.4.2　古盐度识别

根据古盐度判别指标, 延安组煤层 *m* 值为 14.89～

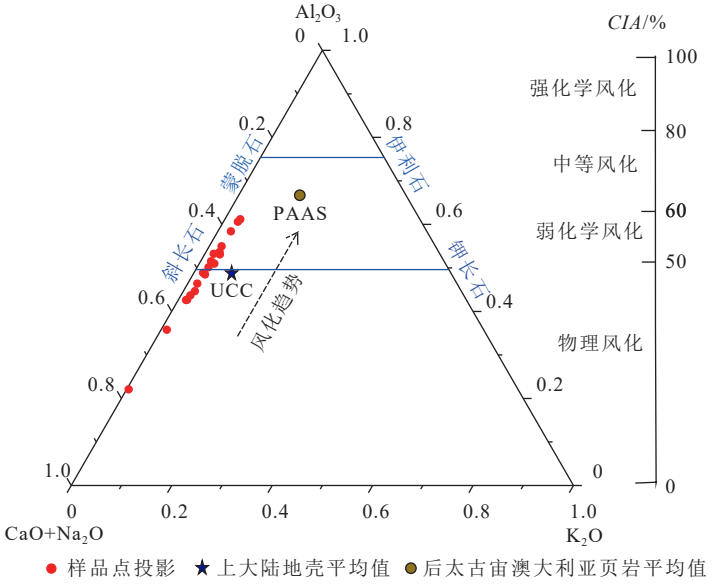


图 5　延安组煤样 *CIA* 和 A-CN-K 三元图

Fig. 5　*CIA* and A-CN-K ternary diagram of coal samples from Yan'an Formation

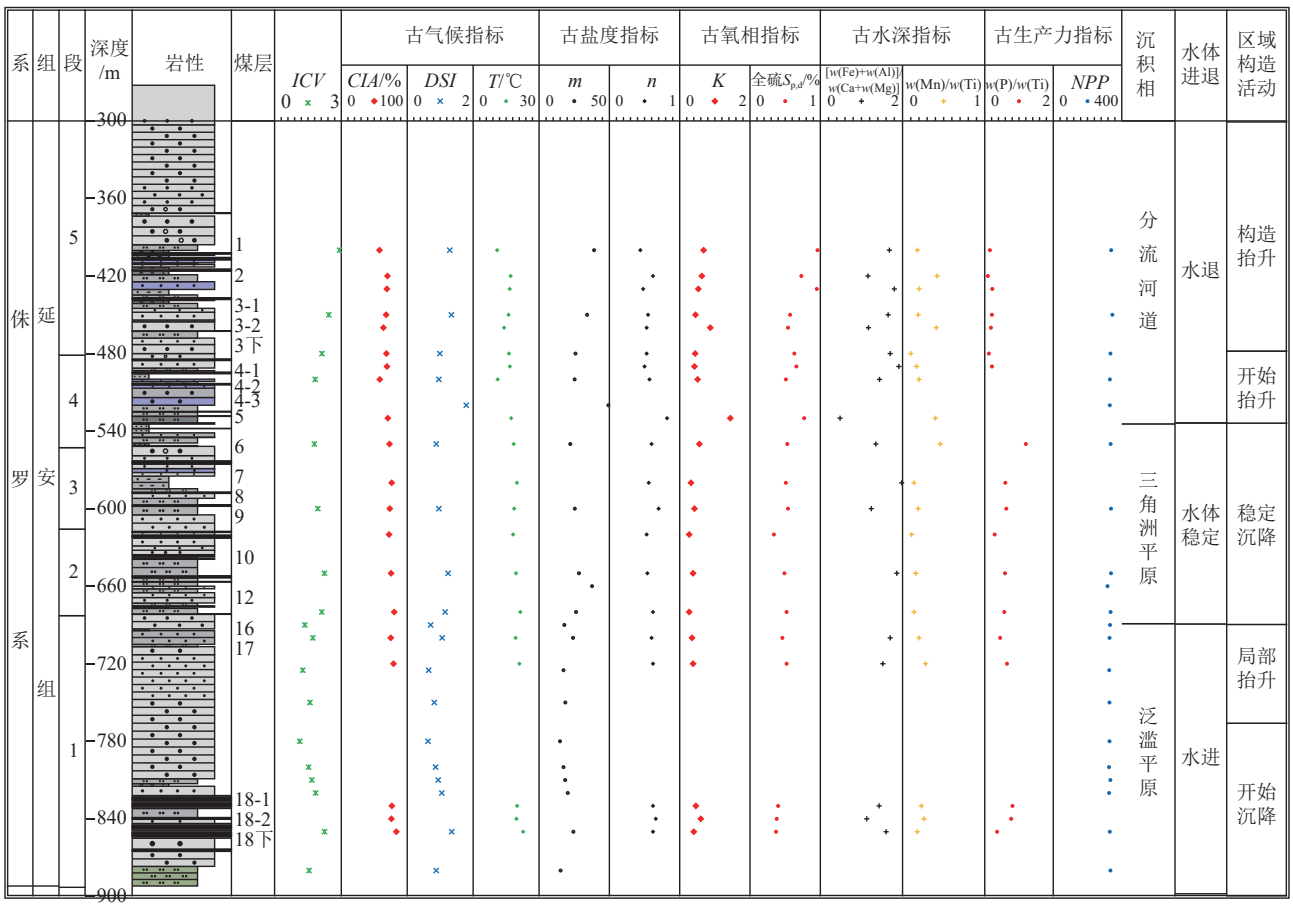


图 6　延安组元素地球化学指标垂向分布特征

Fig. 6　Vertical distribution characteristics of element geochemical indexes of Yan'an Formation

49.28, 均值 24.07, 指示咸水环境; n 值为 0.44～0.82, 均值 0.59, w(Sr)/w(Ba) 均值 0.41, 指示半咸水环境; 表明延安期水体盐度较高, 推测聚煤时期气温偏热, 具有一定的蒸发量, 水体相对较浅, 沼泽与外部水体连通性不畅, 导致水体中盐度增加。

3.4.3　古氧相识别

在还原条件下, Fe、Ca、Mg 元素容易从水体中沉淀富集, 其比值直接反映还原强度, 延安组 K 指数为 0.27～1.44, 均值 0.52, 指示为中等还原沼泽环境(覆水较深), 成煤条件中等。

延安组煤层全硫($S_{p,d}$)平均含量为 0.57%, 属陆相低硫煤, 主要以黄铁矿硫($S_{p,d}$ 均值 0.29%)、有机硫($S_{p,d}$ 均值 0.27%)为主; 黄铁矿硫依赖于水体铁(Fe)的供给, 强还原的滞水体环境有利于黄铁矿硫的形成。煤层黄铁矿硫的出现代表水体还原性较强, 而有机硫主要来源自陆生成煤植物和微生物合成[21]。

延安组煤层 w(Th)/w(U) 均值为 2.25、w(V)/[w(V)+w(Ni)] 均值为 0.64, 指示为弱还原的沼泽环境, 水体存在中等程度的分层, 有利于有机质保存。

3.4.4　古水深识别

铁、铝、锰等元素化合物是重要的陆相风化产物, 并常随着河流流动进入湖盆, 利用元素比值法可半定量恢复古水体深度[22]。研究区延安组煤层[w(Fe)+w(Al)]/[w(Ca)+w(Mg)] 均值为 1.55, 比值较高, 指示陆源输入充足, 属于浅水湖沼环境; w(Mn)/w(Ti)、w(Co) 均值分别为 0.23、4.4×10^{-6}, 判断为中水位的泥炭沼泽, 覆水中等。该组指标佐证延安组成煤环境是中水位、弱还原环境的泥炭沼泽。

3.4.5　古生产力识别

煤层作为泥炭地的产物和重要的沉积载体, 记录着泥炭地发育时期气候特征和古生产力等信息, 高古生产力有利于植物堆积与保存, 为成煤提供良好的物质基础。计算泥炭地碳聚集速率和初级生产力, 可实现古气候恢复和湖盆营养状况分析[22]。煤中的 P、Ti、Ba、有机碳含量等有助于识别湖泊营养状况和古生产力。

1)w(P)/w(Ti) 比值。P 是生物体必需的营养元素, 沉积物中较高的 P 含量, 反映了当时水体较高的古生产力水平, 延安组煤层 w(P)/w(Ti) 比值为 0.09～3.42, 均值 0.7, 大于日本 Ubara 二叠纪—三叠纪剖面中“高古生产力”的样品 w(P)/w(Ti) 比值(0.34), 表现出延安期湖泊具有较高营养状况和初级生产力水平。

2)Ba。硅藻、颗石藻等浮游植物通过代谢活动从水中吸收钡离子, 用于生长发育, 其吸收量与湖泊生产力密切相关, 沉积物中生物成因钡(Babio)的通量与表层海洋输出生产力之间存在良好的正相关关系。延安组煤层 Ba 含量均值为 563.96×10^{-6}, 指示延安期湖盆古生产力处于中等水平。

3) 有机碳法计算模型。在地质历史时期, 通过天文旋回精确限定时间尺度计算沉积速率, 并通过碳总量守恒(泥炭总碳=煤中残存碳+损失碳)反演初级生产力, 是恢复“深时”古气候和碳循环的重要方法。研究表明, 利用煤层物理化学参数和沉积速率, 计算单位面积、单位时间内煤中保存的碳量, 据此构建净初级生产力的计算模型[23]:

$$V_c = C_{daf}\times D_{ar}\times V, \tag{8}$$

$$V_p = K\times C_{daf}, \tag{9}$$

$$NPP = R\times V_p, \tag{10}$$

式中: V_c 为煤中碳聚集速率, g /(m^2·a); V_p 为原始碳聚集相对比例; NPP 为古生产力, g /(m^2·a); C_{daf} 为煤固定碳含量 (%, 干重); D_{ar} 为煤的视密度, g/cm^3; K 为碳恢复系数(K>1), 反映原始泥炭碳量与现存煤碳量的比值; V 为煤层的沉积速率, mm/a; R 为 NPP 与碳聚集速率的转换系数(经验比值)。

通常, 正常地层沉积速率取值范围是 0.2～0.4 mm/a。延安组成煤环境主要是三角洲平原相, 沉积速率为 0.4 mm/a。在泥炭到煤的演化过程中, 原始泥炭中的部分有机质(C、H、O)会以 CH_4 和 CO_2 形式散失掉, 不同煤阶损失率不同, 晚二叠世煤碳损 C_{loss} 约为 40%, 即 K=1.66; 侏罗世煤碳损 C_{loss} 约为 30%, 即 K=1.42 [24]。研究表明, 全新世热带泥炭地中, NPP 值约为碳聚集速率的 3～14 倍; 由图 7 可

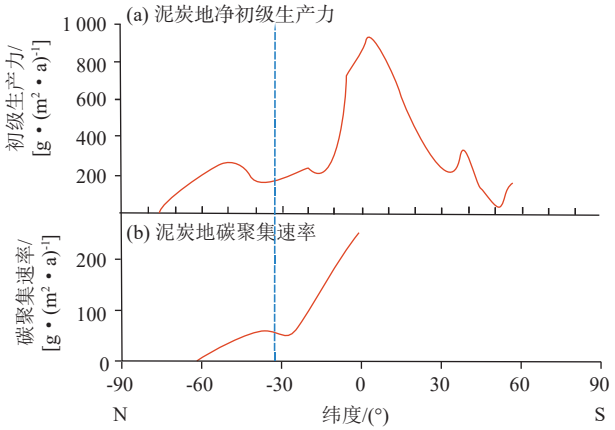


图 7　泥炭地净初级生产力(a)、碳聚集速率(b)与纬度的分布关系(据 Large[25] 修改)

Fig. 7　The distribution relationship between peatland net primary productivity (a), carbon accumulation rate (b) and latitude(modified according to Large[25])

知, 宁东地区在中侏罗世位于北纬 34°附近, 取 5 倍的经验系数 R 估算 NPP。

经过换算, 延安期煤碳聚集速率(V_c)均值为 46.41 g/(m^2·a), 原始聚集速率值(V_p)为 66.31 g/(m^2·a), NPP =5×66.31=331.53 g /(m^2·a), 泥炭地具有中等营养程度和生产力水平(表 4)。

表 4　泥炭地净初级生产力

Table 4　Net primary productivity of peatland

煤层	视密度/(g·cm^{-3})	沉积速率/(mm·a^{-1})	固定碳C_{daf}/%	V_c/[g·(m^2·a)$^{-1}$]	V_p/[g·(m^2·a)$^{-1}$]	NPP/[g·(m^2·a)$^{-1}$]
1	1.46	0.4	80.98	47.29	67.56	337.80
2	1.51	0.4	80.01	48.33	69.04	345.19
3-1	1.46	0.4	80.05	46.75	66.78	333.92
3-2	1.46	0.4	79.23	46.27	66.10	330.50
3下	1.44	0.4	80.25	46.22	66.03	330.17
4-1	1.46	0.4	80.27	46.88	66.97	334.84
4-2	1.48	0.4	79.73	47.20	67.43	337.14
4-3	1.46	0.4	80.84	47.21	67.44	337.22
5	1.41	0.4	78.65	44.36	63.37	316.85
6	1.46	0.4	80.22	46.85	66.93	334.63
7	1.45	0.4	79.98	46.39	66.27	331.35
8	1.43	0.4	80.41	45.99	65.71	328.53
9	1.43	0.4	79.99	45.75	65.36	326.82
10	1.44	0.4	79.76	45.94	65.63	328.16
12	1.43	0.4	80.39	45.98	65.69	328.45
16	1.41	0.4	80.8	45.57	65.10	325.51
17	1.45	0.4	80.46	46.67	66.67	333.33
18-1	1.43	0.4	79.84	45.67	65.24	326.20
18-2	1.45	0.4	79.69	46.22	66.03	330.14
18下	1.45	0.4	80.58	46.74	66.77	333.83
平均	1.45	0.40	80.11	46.41	66.31	331.53

3.4.6　成煤环境分析

鄂尔多斯盆地在侏罗纪时期为大型内陆坳陷盆地, 沉积了巨厚的陆相碎屑岩地层, 以河流 (砂岩)、湖泊 (泥岩、页岩) 和沼泽沉积 (煤层) 为代表的地层发育, 厚度巨大, 分布广泛, 矿产资源丰富。盆地西缘中侏罗世延安期沉积环境是以河流作用为主的湖泊三角洲, 煤层形成于冲积平原和三角洲平原之上的沼泽环境, 根据延安期气候—沉积环境的耦合分析, 将其划分成 5 个旋回: 旋回 5 形成于坳陷盆地初始形成期, 此时河流陆源物质向湖盆推进, 在湖盆边缘形成三角洲平原, 分流河道湖水蔓延, 形成了泛滥平原, 为煤层的形成提供了物质条件, 但此时分流河道较为稳定, 水动力较大, 物源供给较稳定, 分流河道主要沉积了厚层水平层理砂岩, 泛滥平原较为稳定, 沉积煤层较厚(如 18 煤); 旋回 4 形成于坳陷盆地发展期, 此时河水供给较大, 泛滥平原扩展, 但此时分流河道不稳定, 物源供给不充分, 主要沉积了厚层水平层理砂岩、脉状层理粉砂岩, 泛滥平原广阔, 湖水变化频繁, 沉积煤层较多, 但煤层较薄, 且不稳定, 连续性较差, 6 煤位于水位最高处, 相对稳定, 较厚; 旋回 1~3 形成于坳陷盆地萎缩期, 此时陆源物质供给较多, 泛滥平原萎缩, 但此时分流河道增多, 陆源供给迅速增加, 沉积了块状均匀层理砂岩, 湖水面下降, 早期沉积煤层较适中, 煤层数量减少, 连续性较好, 晚期煤层消失。因此, 延安期经历了泛滥平原发育—扩展—鼎盛—萎缩—消亡的 5 段式演化过程, 与延安组“辫状河—曲流河—三角洲前缘—三角州平原—河流”的沉积相演变完全匹配。延安组聚煤作用是受气候驱动下的盆地演化—湖平面升降—沉积环境变迁三位一体协同控制下的结果, 鼎盛期(旋回 4)温暖湿润气候与最大湖侵的叠合是形成优质厚煤层的关键(表 5)。延安组煤层赋存与古环境密切相关, 盆地边缘大面积发育浅水三角洲平原泥炭沼泽(图 8), 为植物遗体持续堆积提供了稳定的可容纳空间, 在盆地边缘普遍含煤, 造就了中国侏罗纪最核心的聚煤区之一。

在 BK1505、BK2901 等钻孔中, 延安组岩心以灰白色砂岩、深灰色粉砂岩、泥岩为主, 底部为灰白含砾粗砂岩, 含炭质泥岩、煤层、植物化石, 煤岩内生裂隙发育, 偶见黄铁矿和方解石充填, 可认定延安期古环境为水体较浅的泥炭沼泽, 与煤样地球化学研究成果一致(图 9)。

表 5　延安期成煤环境演化

Table 5　Evolution of coal formation environment of Yanan formation

气候旋回	煤层	古气候	古盐度	古水深	古氧相	古生产力	成煤有利性	沉积相
Ⅰ	1	干旱	中等	覆水变浅(水退)	强还原	低	差	河流
Ⅱ	2-4^2	温暖半湿润, 气候波动	中等—高	覆水变深	弱还原	低—中等	中等	三角洲平原
Ⅲ	5	冷干—温湿	高	覆水浅	强还原	极高	成煤中断(碳酸盐事件)	三角洲平原
Ⅳ	6-12	温暖湿润, 降水充沛	中等	覆水变深	中等—强还原	高	最优	三角洲前缘
Ⅴ	16-18下	炎热潮湿	低—中等	覆水中等(水进)	弱氧化—弱还原	较高	有利	河流

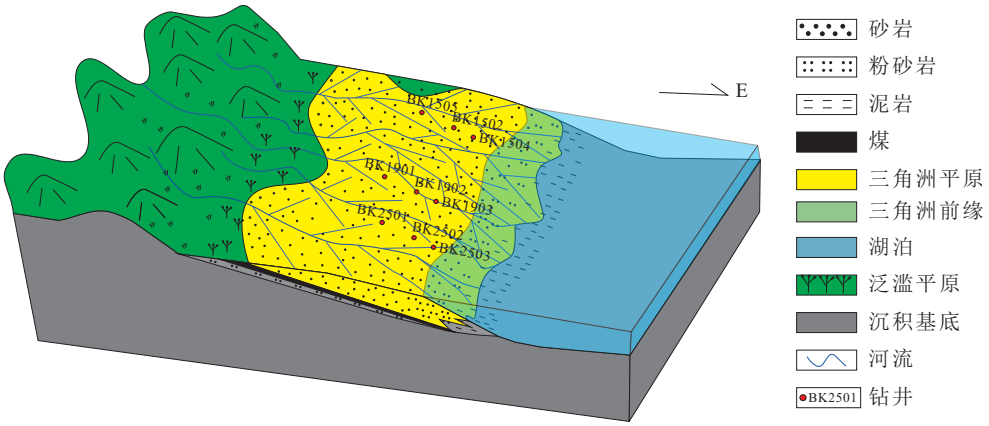


图 8　延安组沉积模式

Fig. 8　Sedimentary model of Yan'an Formation



(a) BK1505: 373~376 m煤层和泥岩夹于砂岩　　(b) BK2901: 500~520 m，大套泥岩，煤层顶底泥岩

图 9　延安组岩心照片

Fig. 9　Core photos of Yan'an Formation

4　结论

鄂尔多斯盆地西缘宁东地区侏罗纪延安期主要为河流—三角洲平原沉积环境, 属于陆相温暖湿润气候条件下的贫氧沼泽沉积, 还原性和覆水条件中等, 古生产力较高, 有利于成煤植物的生长和堆积保存。该成果对恢复该时期盆地沉积格局、重建古地理及沉积矿产富集规律研究具有重要意义。具体结论如下:

1)研究区延安组煤层主量元素以酸性氧化物(SiO_2+Al_2O_3)为主, 其次为碱性氧化物(Fe_2O_3+CaO+MgO); 微量元素以 Ba、Sr、Li 等为主, Ni、Co 和 Cr 等含量较低。

2)延安组煤层 *CIA*、*DSI*、*w*(Sr)/*w*(Cu) 等指标反映了延安期古气候条主要为温暖潮湿类型, 源区物质经历中等化学风化作用, 根据 *CIA* 计算, 推测当时古气温约为 17.76 ℃, 降水量约为 1 011.14 mm/a; 煤层 *m*、*n*、*w*(Sr)/*w*(Ba) 均值分别为 24.07、0.59、0.41, 表明延安期为半咸水—咸水环境; 煤还原性指数(*K*)、全硫($S_{p,d}$)、*w*(Th)/*w*(U) 分别为 0.52、0.57%、2.25, 反映弱还原环境; [*w*(Fe)+*w*(Al)]/[*w*(Ca)+*w*(Mg)]、*w*(Mn)/*w*(Ti)、Co 含量分别为 1.55、0.23、4.4×10^{-6}, 判断为中水位的泥炭沼泽。

3)延安组煤层 *w*(P)/*w*(Ti)、Ba 含量均值分别为 0.7、563.96×10^{-6}、泥炭地净初级生产力(*NPP*)均值为 331.53 g /(m^2·a), 表明延安期古湖泊营养程度中等、初级生产力较高。

4)延安组聚煤期古气候为温暖湿润类型, 在该气候背景下, 成煤沼泽呈现覆水中等、弱还原、水介

质呈碱性、物源供给丰富、初级生产力较高等特征，为古植物繁茂、遗体堆积与埋藏、泥炭的聚集与成煤演化提供了有利条件，主要煤层发育于三角洲平原（分流间湾、泛滥平原和分流河道间）潮湿森林沼泽相带。

参考文献（References）：

[1] 范柏江，师良，杨杰，等. 鄂尔多斯盆地中部湖相有机质沉积环境特征 [J]. 石油与天然气地质，2022，43（3）：648−657.
Fan B J, Shi L, Yang J, et al. Sedimentary environment of lacustrine organic matter in the central Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(3): 648−657.

[2] 董国旗，王东东，刘海燕，等. 鄂尔多斯盆地南部延安组巨厚煤层内古气候旋回分析 [J]. 煤田地质与勘探，2020，48（3）：51−58.
Dong G Q, Wang D D, Liu H Y, et al. Analysis of paleoclimatic cycles in the ultra thick coal seam of Yan'an Formation in the southern Ordos Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(3): 51−58.

[3] 游君君，柳波，胡德胜，等. 珠江口盆地文昌凹陷烃源岩发育时期湖盆古生产力构成及分布规律 [J]. 地质论评，2024，70（2）：624−642.
You J J, Liu B, Hu D S, et al. Composition and distribution of lacustrine paleoproductivity during the deposition of hydrocarbon source rocks in Wenchang Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Geological Review, 2024, 70(2): 624−642.

[4] 吴文前，门少斌，申连凯，等. 延安组煤与页岩沉积古环境对比——以鄂尔多斯盆地南部芦村二号矿为例 [J]. 西安科技大学学报，2024，44（5）：934−941.
Wu W Q, Men S B, Shen L K, et al. Comparison of sedimentary paleoenvironment between coal and shale in Yan'an Formation—A case study of Lucun No. 2 Mine in southern Ordos Basin[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2024, 44(5): 934−941.

[5] 尹锦涛，俞雨溪，姜呈馥，等. 鄂尔多斯盆地张家滩页岩元素地球化学特征及与有机质富集的关系 [J]. 煤炭学报，2017，42（6）：1544−1556.
Yin J T, Yu Y X, Jiang C F, et al. Relationship between element geochemical characteristic and organic matter enrichment in Zhangjiatan Shale of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(6): 1544−1556.

[6] 薛楠，邵晓州，朱光有，等. 鄂尔多斯盆地平凉北地区三叠系长7段烃源岩地球化学特征及形成环境 [J]. 岩性油气藏，2023，35（3）：51−65.
Xue N, Shao X Z, Zhu G Y, et al. Geochemical characteristics and formation environment of source rocks of Triassic Chang 7 member in northern Pingliang area, Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2023, 35(3): 51−65.

[7] 孟庆涛，刘招君，胡菲，等. 桦甸盆地始新世古湖泊生产力与有机质富集机制 [J]. 中国石油大学学报：自然科学版，2012，36（5）：38−44.
Meng Q T, Liu Z J, Hu F, et al. Productivity of Eocene ancient lake and enrichment mechanism of organic matter in Huadian Basin[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2012, 36(5): 38−44.

[8] 刘方凯，刘小平，赵贤正，等. 高频层序格架内富有机质页岩沉积特征及其主控因素——以渤海湾盆地沧东凹陷孔二段湖相页岩为例 [J]. 天然气地球科学，2025，36（12）：2338−2353.
Liu F K, Liu X P, Zhao X Z, et al. Sedimentary characteristics and main controlling factors of organic-rich shale in high-frequency sequence framework: A case study of lacustrine shale in the second member of Kongdian Formation in the Cangdong Sag, Bohai Bay Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2025, 36(12): 2338−2353.

[9] 杨俊，徐清海，母彩霞，等. 鄂尔多斯盆地西南缘侏罗系延安组油页岩发育特征及其古环境恢复 [J]. 地质科技通报，2025，44（3）：182−196.
Yang J, Xu Q H, Mu C X, et al. Characteristics of oil shale development and paleoenvironment restoration of Jurassic Yan'an Formation in southwestern Ordos Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(3): 182−196.

[10] 马风华，王成，杨文明，等. 宁夏香山南麓侏罗纪延安组煤的主微量元素地球化学特征及其地质意义 [J/OL]. 煤炭科学技术，2026：1−13[2026-06-28]. https://link.cnki.net/urlid/11.2402.td.20260304.1134.010.
Ma F H, Wang C, Yang W M, et al. Geochemical characteristics of major and trace elements of Jurassic Yan'an Formation coal at the southern foot of Xiangshan Mountain in Ningxia and its geological significance [J/OL]. Coal science and technology, 2026: 1−13[2026-06-28]. https://link.cnki.net/urlid/11.2402.td.20260304.1134.010.

[11] 秦国红，刘亢，徐浩，等. 鄂尔多斯盆地西缘煤中微量元素共生组合特征 [J]. 中国煤炭地质，2015，27（7）：1−6，18.
Qin G H, Liu K, Xu H, et al. Paragenetic association features of trace elements in coals in western margin of Ordos Basin[J]. Coal Geology of China, 2015, 27(7): 1−6, 18.

[12] Yang J H, Cawood P A, Du Y S, et al. Global continental weathering trends across the Early Permian glacial to postglacial transition: Correlating high- and low-paleolatitude sedimentary records[J]. Geology, 2014, 42(10): 835−838.

[13] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. Nature, 1982, 299(5885): 715−717.

[14] 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.
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.

[15] 徐小涛，宁树正，孙杰，等. 准噶尔盆地东部西山窑组煤地球化学特征及古环境意义 [J]. 煤炭科学技术，2024，52（S1）：153−163.
Xu X T, Ning S Z, Sun J, et al. Geochemical characteristics and paleoenvironmental significance of the Xishanyao Formation coal in the eastern Junggar Basin[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(S1): 153−163.

[16] 阚留杰，谭忠健，胡云，等. 元素录井沉积岩相古地理特征研究探索 [J]. 录井工程，2020，31（4）：149−152，157.
Kan L J, Tan Z J, Hu Y, et al. Research and exploration on the Pale-

ogeographic features of sedimentary lithofacies in element logging[J]. Lujing Gongcheng, 2020, 31(4): 149−152, 157.

[17] 邵龙义, 汪浩, Large D J. 中国西南地区晚二叠世泥炭地净初级生产力及其控制因素 [J]. 古地理学报, 2011, 13(5): 473−480.
Shao L Y, Wang H, Large D J. Net primary productivity and its control of the Late Permian peatlands in southwestern China[J]. Journal of Palaeogeography: Chinese Edition, 2011, 13(5): 473−480.

[18] Cox R, Lowe D R, Cullers R L. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(14): 2919−2940.

[19] 黄鹏程, 张小五, 张志峰, 等. 宁东煤田侏罗纪煤中硫分、灰分特性及成因探讨 [J]. 中国煤炭, 2020, 46(7): 86−91.
Huang P C, Zhang X W, Zhang Z F, et al. Discussion on sulfur and ash characteristics and origin in Jurassic coal in Ningdong coalfield[J]. China Coal, 2020, 46(7): 86−91.

[20] 杜芳鹏, 刘池洋, 宁树正, 等. 鄂尔多斯盆地侏罗系延安组煤岩特征及其主控因素分析 [J]. 地质学报, 2024, 98(12): 3751−3772.
Du F P, Liu C Y, Ning S Z, et al. Coal macerals characteristics and the main control factor of Jurassic Yan'an Formation in Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2024, 98(12): 3751−3772.

[21] 张有河, 王晓明, 刘东娜. 准格尔煤田西南部 6 上煤层煤岩煤质及沉积环境特征 [J]. 中国煤炭, 2015, 41(2): 35−39, 83.
Zhang Y H, Wang X M, Liu D N. Characteristics of coal petrology and quality and sedimentary environment for No. 6 upper coal seam in southwestern Jungar coalfield[J]. China Coal, 2015, 41(2): 35−39, 83.

[22] 王志军, 王剑, 王克超, 等. 广西钦州湾表层沉积物常量元素分布特征及其地质意义 [J]. 物探与化探, 2024, 48(5): 1377−1387.
Wang Z J, Wang J, Wang K C, et al. Distribution of macroelements in surface sediments and their geological implications from Qinzhou Bay, Guangxi[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(5): 1377−1387.

[23] 李雅楠, 邵龙义, 闫志明, 等. 中侏罗世泥炭地净初级生产力及控制因素——以准噶尔盆地南缘煤田为例 [J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(10): 1324−1334.
Li Y N, Shao L Y, Yan Z M, et al. Net primary productivity and its control of the Middle Jurassic peatlands: An example from the southern Junggar coalfield[J]. Scientia Sinica: Terrae, 2018, 48(10): 1324−1334.

[24] 闫志明, 邵龙义, 王帅, 等. 早白垩世泥炭地净初级生产力及其控制因素——来自二连盆地吉尔嘎郎图凹陷 6 号煤的证据 [J]. 沉积学报, 2016, 34(6): 1068−1076.
Yan Z M, Shao L Y, Wang S, et al. Net primary productivity and its control factors of Early Cretaceous peatlands: Evidence from No. 6 coal in the jiegalangtu sag of the erlian basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2016, 34(6): 1068−1076.

[25] Large D J. A 1.16 Ma record of carbon accumulation in western European peatland during the Oligocene from the Ballymoney lignite, Northern Ireland[J]. Journal of the Geological Society, 2007, 164(6): 1233−1240.

Element geochemistry and paleoproductivity reconstruction of coal seams in the Yan'an Formation, Ningdong area

WU Jiang[1], WANG Jin-Miao[1], WANG Zuo-Hong[1], ZHANG Yue-Heng[2], LI Bin[3], DONG Zhen-Guo[2]

(1. *Maiduoshan Coal Mine, Ningxia Coal Industry Co., Ltd., CHN Energy, Yinchuan* 750400, *China*; 2. *Shenhua Geological Exploration Co., Ltd., Beijing* 102241, *China*; 3. *College of Geographic Sciences and Tourism, Hanshan Normal University, Chaozhou* 521041, *China*)

Abstract: The Jurassic Yan'an Formation exhibits well-developed coal measure strata. However, there remains a lack of systematic research on the geochemistry, sedimentary environment, coal-forming conditions, and spatial distribution of these coal seams. In this study, 605 coal core samples were systematically collected from the Jurassic Yan'an Formation of the Maiduoshan coal mine in the Ningdong area along the western margin of the Ordos Basin, with 6 655 data points obtained from geochemical tests. The element geochemical characteristics of the coal seams and their implications were analyzed through data validation, element association, and discriminant diagrams. The paleoclimate, paleo-oxygen facies, paleosalinity, paleo-water depth, and paleoproductivity during the deposition of the Yan'an Formation were reconstructed. Accordingly, the paleo-sedimentary environment evolution, coal seam occurrence characteristics, and coal accumulation patterns during this period were revealed. Furthermore, an integrated framework for research on geochemical tracing, sedimentary environment inversion, and analysis of coal accumulation patterns was established for the study area. The results show that the coal samples from the Yan'an Formation exhibited an average index of compositional variability (*ICV*) of 2.55. This finding indicates that these samples were free from weathering and thus are highly representative. The samples yielded an average chemical index of alteration (*CIA*) of 71.87%, suggesting that the provenance area underwent moderate chemical weathering, corresponding to a warm and humid climatic setting. Based on these, the paleotemperature and paleo-precipitation of the Yan'an Formation during the deposition of the formation were estimated at approximately 17.76 ℃ and 1 011.14 mm/a, respectively. The high w(Mg)/w(Al) ratios (m), w(Ca)/w(Fe) ratios (n), and w(Sr)/w(Ba) ratios of the coal samples suggest high paleosalinity during the deposition of the Yan'an Formation. The indicators, including the coal ash composition index (K), total sulfur ($S_{p,d}$), and w(Th)/w(U) ratio, reveal that the swamp in the Yan'an Formation pri-

marily exhibited a dysoxic, weakly reducing environment. Besides, the swamp showed average [*w*(Fe) + *w*(Al)]/[*w*(Ca) + *w*(Mg)] and *w*(Mn)/*w*(Ti) ratios of 1.55 and 0.23, respectively, indicating a medium-water-level swamp with moderate-degree overlying water. The average *w*(P)/*w*(Al) and *w*(P)/*w*(Ti) ratios and the net primary paleoproductivity (*NPP*) were 0.03, 0.7, and 331.53 g/(m²·a), respectively, reflecting a moderately nutrient paleolake environment and high paleoproductivity during the deposition of the Yan'an Formation. Overall, the Jurassic Yan'an Formation in the Ningdong area predominantly features the continental fluvial-deltaic plain sedimentary facies. During its deposition, this formation showed a warm and humid paleoclimate, a coal-forming environment of weakly reducing, medium-water-level swamp, high-salinity water bodies, and high paleoproductivity. These conditions are favorable for the proliferation of coal-forming plants, as well as the accumulation and preservation of plant remains. The findings of this study hold great significance for reconstructing the paleosedimentary framework and paleogeography of the basin and understanding the enrichment patterns of minerals deposited in the basin during the deposition of the Yan'an Formation.

Key words: Ordos Basin; Yan'an Formation; geochemistry; paleoproductivity; geological implication

（本文编辑: 蒋实）