

文章编号:1000-0550(2011)03-0520-09

鄂尔多斯盆地东胜—神木地区侏罗系煤中 常量元素地球化学特征^①

汪小妹¹ 焦养泉^{1,2,3} 吴立群¹ 荣辉¹ 王小明¹
潘松圻¹ 唐辉¹ 计波¹ 宋霁¹

(1. 中国地质大学 武汉 430074; 2. 构造与油气资源教育部重点实验室 武汉 430074;
3. 生物地质与环境地质教育部重点实验室 武汉 430074)

摘 要 对鄂尔多斯盆地东胜—神木地区侏罗系直罗组和延安组的 9 个煤样进行了工业分析和元素分析以及煤灰常量元素测试分析,探讨了成煤环境条件对煤样性质的影响,并揭示了不同聚煤体系煤灰中常量元素的特征及其控制因素。分析测试结果显示,直罗组和延安组不同聚煤体系中煤的灰分产率、矿物含量和有机 C 含量呈现明显的变化趋势,从延安组 II、III、IV 单元→延安组 V 单元→直罗组,煤矿物含量和灰分产率增加、有机 C 含量降低。此外,直罗组和延安组不同聚煤体系煤灰样的常量元素特征也具有明显的差异性和一定的变化规律,如:从延安组 II、III、IV 单元→延安组 V 单元→直罗组,煤灰样中 SiO₂ 含量增加;延安组煤灰样 K₂O 含量明显低于直罗组煤灰样 K₂O 含量;此外,延安组 II、III、IV 单元煤灰样中 TFe₂O₃ 含量远高于延安组 V 单元和直罗组。综合研究认为,延安组 II、III、IV 单元、延安组 V 单元和直罗组煤层煤的灰分产率、矿物含量和有机 C 含量的差异主要受控于成煤环境条件。成煤过程中所处的沼泽环境受河流所携带的碎屑物质影响的程度,影响着煤的矿物含量、灰分产率和有机 C 含量等特征。而延安组 II、III、IV 单元、延安组 V 单元和直罗组不同聚煤体系的煤灰常量元素特征及其差异性,则主要受成煤环境条件(陆源碎屑矿物的量)、环境气候条件和有机质的量等因素的控制。

关键词 煤 常量元素 侏罗系 鄂尔多斯盆地

第一作者简介 汪小妹 女 1982 年出生 博士 地球化学 E-mail: wangxiaomei2001@126.com

中图分类号 P595 **文献标识码** A

鄂尔多斯盆地是中国最大的聚煤盆地,也是优质煤的主要聚集地。盆地内分布着 10 个开发区(东胜、榆横、大保当、马家滩、神北、灵武、彬长、华安、黄陵、汝箕沟)和 7 个预测远景区(鄂托克旗、杭锦旗、盐池、靖定、环县、庆阳、旬东),含煤面积达 $11.1 \times 10^4 \text{ km}^2$,总资源量 $1.44 \times 10^{12} \text{ t}^{[1,2]}$ 。近年来,鄂尔多斯聚煤盆地研究取得了丰硕成果。王双明等^[3]研究了鄂尔多斯盆地含煤地层延安组孢粉组合特征及其在含煤地层中的分布规律,并以孢粉组合特征恢复古植被、古气候及古地理类型。代世峰等^[4]首次在鄂尔多斯盆地东北缘准格尔煤田煤中发现了超常富集的勃姆石及其特殊的矿物组合,还对鄂尔多斯盆地西北缘乌达矿区煤中硫的含量和硫同位素特征也进行了大量的研究工作^[5~7]。此外,有关鄂尔多斯侏罗纪盆地形成演化、聚煤作用和规律、找煤方向^[8~11],鄂尔多斯盆地侏罗系煤的煤层气开发潜力^[12],以及鄂

尔多斯准格尔矿区煤矿物学和地球化学特征^[13]等方面也有研究报道。

目前为止,对鄂尔多斯盆地东胜—神木地区煤矿物学和元素地球化学特征方面的基础性研究还比较薄弱,对煤中常量元素的赋存特征、影响因素及其指示意义等的了解还不够深入。从成因角度来看,煤中常量元素的含量和特征,既反映聚煤环境的地质背景,有时又能反映煤层形成后所经历的各种地质作用过程,有助于阐明煤层的成因、煤化作用、区域地质历史演化等基础理论问题^[14]。基于此,本文进行了鄂尔多斯盆地东胜—神木地区煤中常量元素地球化学特征研究,以期有助于今后在该区开展聚煤环境和聚煤规律以及沉积物源区等多方面的深入研究。

1 区域地质背景

鄂尔多斯盆地属华北地台西端的次级构造单元,

^①国家自然科学基金项目(批准号:40772072、40802023)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(编号:CUGL100253、CUGL090205)国家重点基础研究发展计划项目(编号:2003CB214603)、中国核工业地质局铀矿地质科技创新项目资助。
收稿日期:2009-12-26;收修改稿日期:2010-03-23

面积约 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。根据现今的构造形态, 结合盆地的演化历史, 鄂尔多斯盆地内可划分为伊盟隆起、渭北隆起、西缘冲断带、晋西挠褶带、天环坳陷、陕北斜坡等六个构造单元(图 1)。研究区主体位于鄂尔多斯盆地东北部东胜和神木地区(图 1)。鄂尔多斯盆地东北部侏罗系主要由富县组、延安组、直罗组和安定组组成^[15]。延安组是重要的含煤岩系^[16, 17], 而直罗组是重要的含铀岩系^[18, 19]。在直罗组底部也发现有煤层, 但是与延安组煤层相比, 直罗组煤层的厚度有限, 聚煤作用略差, 相对延安组为次要含煤岩系。

系域^[16, 22, 23]。其中低位体系域(LST)和高位体系域(HST)的河流沉积作用明显, 而湖泊扩展体系域(EST)则以湖泊三角洲为主^[22, 23]。直罗组也由三个沉积体系域组成^[24], 低位体系域由两个准层序组构成。其中, 下部准层序组系辫状河和辫状河三角洲成因, 是主要含(铀)矿层; 上部准层序组系曲流河和曲流河三角洲成因, 是次要含(铀)矿层^[25]。直罗组与延安组之间为一区域性(冲刷)不整合面。在盆地南部, 直罗组与延安组之间表现为角度不整合, 直罗组与下伏延安组的不同煤层组相接触, 局部缺失延安组的高位体系域(第 V 成因地层单元)。在盆地北部, 直罗组与延安组之间表现为平行不整合和冲刷接触关系。不整合面之下为保存程度不等的白色古风化壳, 局部风化壳受古地表水流改造可以形成砂岩型高岭土矿床。古风化壳之上局部保留底砾岩^[24]。由于古风化壳之上发育的直罗组底部砂体(铀储层)具有辫状河—辫状河三角洲的成因, 因此直罗组底部砂体的河道化作用明显, 下蚀作用在一些地区可以切穿下伏延安组顶部的 1~2 个工业煤层组。

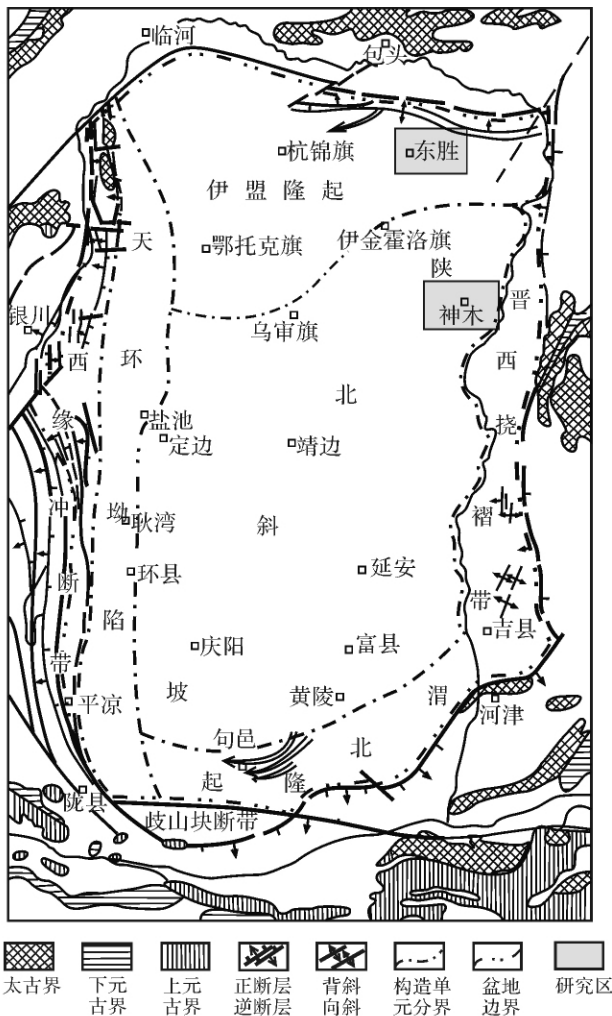


图 1 鄂尔多斯盆地构造单元划分及研究区位置, (修改自杨俊杰 [20])

Fig. 1 Tectonic division of the Ordos Basin and locations of the study areas (modified from Yang [20])

依据含煤层序和旋回结构把延安组地层单元划分为 5 段, 每段含有一个煤组^[21]; 最新层序地层学研究把延安组划分为 5 个成因地层单元和 3 个沉积体

2 样品情况及分析测试结果

本文研究的 9 个煤样中, 有 6 个煤样分别取自神木地区延安组的四个不同成因地层单元, 有 3 个煤样取自东胜地区直罗组下段的下亚段。根据前人研究资料和野外考察综合分析可知, 延安组的煤样沉积古环境为曲流河^[16, 26]和湖泊三角洲^[10, 16], 直罗组煤样的沉积古环境则为辫状河三角洲^[25, 27](表 1)。延安组煤形成于潮湿的古气候条件^[28], 而直罗组煤则形成于潮湿—干旱过渡的古气候条件^[29]。

煤工业分析和元素分析在中国地质大学资源学院煤及煤层气工程系实验室进行, 分析仪器分别为 HTGF-3000 型自动工业分析仪和 Vario EL III 元素分析仪。样品的 X 射线衍射分析(XRD)在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室完成, 分析仪器为 XPert Pro MPD X 射线粉晶衍射仪(荷兰帕纳科), CuK α 辐射, Ni 滤波, 管压 40 kV, 管流 40 mA, 扫描角度 $3^\circ \sim 65^\circ 2\theta$ 。煤灰样品是将原煤在 815°C 下燃烧后的残余物质, 煤灰样品中常量元素(Si、Al、Fe、Mg、Ca、Na、K、Ti、P 和 Mn)分析在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室进行, 分析方法参照国标 GB/T14506—1993 硅酸盐岩石化学分析方法。分析结果见表 1、2。

延安组煤样的灰分产率(即 A_d , 下同)低, 其中延

安组 II、III 和 IV 单元煤层煤样的灰分产率都小于 6% 而延安组 V 单元煤层煤样灰分产率在 9% ~ 18% 之间。相比而言,直罗组煤样灰分产率要高得多,都大于 45% (样品 ZKB29-376-M2 为碳质泥岩,但考虑到其与煤相似的成因过程,故放在一起讨论)。延安组煤样的有机 C 含量(即 C_{ad} ,下同) (54.45% ~ 74.28%) 远高于直罗组煤样的有机 C 含量(10.39% ~ 38.75%)。但延安组不同单元煤层煤样的有机 C 含量也有差异,主要体现在 II、III 和 IV 单元煤层煤样的有机 C 含量(71.06% ~ 74.28%) 明显高于 V 单元煤层煤样的有机 C 含量(54.45% ~ 68.51%)。

XRD 分析结果显示,直罗组煤样的矿物含量较高,矿物总含量一般占到了整个煤样的 50% 左右。主要为高岭石和石英,其次为绿泥石和伊利石,长石偶有出现。相比而言,延安组煤样的矿物含量较低。除 V 单元煤层煤样矿物含量稍高外(10% ~ 30%),

其它煤样的矿物含量都 < 7%,特别是样品 245-8,几乎全为非晶态的有机质。

常量元素分析结果(表 2) 显示,所分析的煤灰样中主要成分为 SiO_2 和 Al_2O_3 。直罗组煤灰样中 SiO_2 和 Al_2O_3 含量变化不大,分别在 58.29% ~ 62.06% 和 24.57% ~ 28.01% 之间。而延安组煤灰样中的 SiO_2 和 Al_2O_3 含量变化较大。V 单元煤层煤灰样的 SiO_2 和 Al_2O_3 含量分别在 44.39% ~ 50.56% 和 26.88% ~ 34.7% 之间。相比而言,II、III 和 IV 单元煤层煤灰样的 SiO_2 和 Al_2O_3 含量明显偏低,其范围分别为 24.29% ~ 41.85% 和 16.62% ~ 22.05%。此外,从延安组 II、III、IV 单元 → 延安组 V 单元 → 直罗组,煤灰样 SiO_2 含量明显增加。延安组 II、III 和 IV 单元煤层煤灰样的 TFe_2O_3 含量(10.36% ~ 19.37%) 明显比延安组 V 单元煤层灰样的 TFe_2O_3 含量(1.28% ~ 5.68%) 和

表 1 煤样工业分析、元素分析和 XRD 分析结果

Table 1 Results of the proximate, ultimate and XRD analyses of coal samples

层位	古环境	样品编号	煤样工业分析结果(%)						煤样元素分析结果(%)					煤样 XRD 分析结果(半定量)
			M_{ad}	V_{ad}	V_{daf}	A_{ad}	A_d	FC_{ad}	FC_{daf}	C_{ad}	H_{ad}	N_{ad}	$S_{t,ad}$	
直罗组 J_2z	辫状河 三角洲	ZKB29-376-M2	5.95	12.23	69.25	76.39	81.22	5.43	30.75	10.39	1.508	0.202	0.125	绿泥石 10% + 伊利石 5% + 高岭石 15% + 石英 15% + 长石 3% + 非晶 态(为有机质,下同)
		CZK8-81-MZ	7.41	22.19	44.13	42.31	45.7	28.09	55.87	38.75	3.549	0.624	0.3	绿泥石 30% + 高岭石 20% + 石英 10% + 长石 4% + 非晶态
		A311-8-M1	5.15	26.81	52.59	43.87	46.25	24.17	47.41	34.02	3.559	0.514	3.961	高岭石 35% + 石英 20% + 非晶 态(包括粘土和有机质)
延安组 J_2y	V 单元煤层	曲流河 256-2-1	12.22	14.55	18.34	8.46	9.64	64.77	81.66	68.51	2.063	0.61	0.48	石英 10% + 非晶态
		255-1-1	11.51	27.28	37.47	15.68	17.72	45.53	62.53	54.45	3.848	0.728	0.559	高岭石 30% + 非晶态
	249-7	3.67	34.68	41.52	12.8	13.29	48.85	58.48	62.2	4.281	0.853	0.384	高岭石 7% + 石英 5% + 非晶态	
	IV 单元煤层	湖泊三角洲 248-1	7.29	25.06	28.55	4.93	5.32	62.72	71.45	71.06	4.102	0.766	0.313	高岭石 5% + 石英 2% + 非晶态
	III 单元煤层	WLQ-2	5.07	32.56	35.04	2.01	2.12	60.36	64.96	73.35	5.14	1.117	0.278	石英 2% + 方解石 3% + 非晶态
II 单元煤层	245-8	3.45	28.51	31.01	4.61	4.77	63.43	68.99	74.28	4.696	1.068	0.244	几乎全部为非晶态	

注: M_{ad} 空气干燥基水分; V_{ad} 空气干燥基挥发份; V_{daf} 干燥无灰基挥发份; A_{ad} 空气干燥基灰分; A_d 干燥基灰分; FC_{ad} 空气干燥基固定碳; FC_{daf} 干燥无灰基固定碳; C_{ad} 空气干燥基 C 含量; H_{ad} 空气干燥基 H 含量; N_{ad} 空气干燥基 N 含量; $S_{t,ad}$ 空气干燥基 S 含量。

表 2 煤灰常量元素组成(%)

Table 2 Concentrations of major elements in coal ashes (%)

样品编号	SiO_2	Al_2O_3	TFe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	MnO
ZKB29-376-M2	62.06	24.57	2.88	2.36	2.72	1.02	2.3	0.82	0.059	0.025
CZK-81-MZ	58.29	25.03	5.84	3.1	1.85	0.81	2.27	1.36	0.11	0.048
A311-8-M1	59.5	28.01	3.97	0.57	1.68	0.67	1.17	1.89	0.079	0.014
256-2	47.47	26.88	5.68	0.7	2.02	0.16	0.075	0.2	0.31	0.019
255-1-1	50.56	34.7	1.28	1.38	9.05	0.1	0.12	0.14	0.045	0.019
249-7	44.39	31.94	3.9	2.63	12.45	0.98	0.24	0.69	0.14	0.11
248-1	41.85	22.05	10.36	2.78	14.39	0.74	0.63	2.49	0.25	0.3
WLQ-2	37.37	17.57	16.1	2.02	14.83	0.53	0.8	0.78	0.077	0.15
245-8	24.29	16.62	19.37	1.79	20.43	1.76	0.23	0.39	11.31	0.055

直罗组煤灰样的 TFe_2O_3 含量(2.88%~5.84%) 高得多。延安组煤灰样的 CaO 含量多集中在9%~20% (除了V单元煤层煤样256-2外) 明显高于直罗组煤灰样的 CaO 含量(1.68%~2.72%)。而直罗组煤灰样的 K_2O 含量($\geq 1.17\%$) 明显高于延安组煤灰样的 K_2O 含量($\leq 0.8\%$)。

3 讨论

3.1 成煤环境条件和煤性质差异性分析

延安组沉积的早期,地层厚度主要受晚三叠世顶面构造古地貌控制。随着沉积作用进行,古高地逐渐消失,河流和三角洲体系已退缩至盆缘地区,湖泊中心(沉积中心)位于延安及其以东地区^[30]。延安组含煤岩系发育在盆地早侏罗世西高东低、类型多样的古地理基底上^[15,31,32]。延安组含煤岩系沉积发育史经历了初期古剥蚀面上的河流沉积充填、中期湖泊扩张超覆、晚期河流活动复活三个阶段,分别形成了不同的沉积体系空间配置格局,富煤带的分布也随沉积体系变化有明显的迁移,显示3种沉积体系域面貌^[32]。延安组成煤作用主要发生在河流沉积体系和湖泊三角洲沉积体系。前者发育在延安组的下部和上部,大面积分布的冲积平原、河间及废弃河道的泛滥平原有多期泥炭沼泽,富煤单元与河流沉积的砂体厚度呈正相关关系;后者发育在延安组中部,大规模的三角洲朵体有多期稳定的泥炭沼泽堆积,富煤单元与三角洲朵体分布相吻合^[15,31,32]。

延安组沉积之后,早燕山运动使鄂尔多斯盆地整体抬升,呈现出东高西低的东西分布格局。地层暴露剥蚀,河流回春,强烈侵蚀下切,特别是在盆地东南部,延安组被剥蚀掉200 m以上,导致直罗组不整合于延安组不同层位上^[30]。在经过短暂的抬升之后,研究区又开始稳定沉降,接受直罗组的沉积。直罗组也由三个体系域组成^[24],低位体系域由两个准层序组构成,下部准层序组系辫状河和辫状河三角洲成因,其中辫状河三角洲平原构成了研究区的主体^[25]。

煤的工业分析和元素分析结果表明,延安组煤样相比于直罗组煤样,其灰分产率明显偏低,而有机C

含量明显偏高。进一步,延安组煤样还呈现出较为明显的二分特点:II、III和IV单元煤层煤样相比于V单元煤层煤样,灰分产率偏低,而有机C含量偏高。此外,煤样的矿物含量也呈现类似的特征,即延安组煤样的矿物含量远远低于直罗组煤样,同时,延安组II、III和IV单元煤层的矿物含量也低于延安组V单元煤层煤样的矿物含量。

煤以上性质的差异,可以用成煤环境的差异性来解释(表3)。煤矿物含量和灰分产率的高低,主要受成煤过程中河流碎屑物输入量的影响。延安组II、III和IV单元煤层的沉积环境为湖泊三角洲,泥炭聚集在废弃的湖泊三角洲前缘上,分流河道活动性很弱,陆源碎屑物质的输入量很小,因而煤的矿物质含量低、灰分产率低。延安组V单元煤层的沉积环境为曲流河,泥炭聚集在冲积平原上。伴随强烈的河流作用,距河道较近的部位,时常受到河流的影响,当河流溢岸时,陆源碎屑物质漂浮进入沼泽,从而导致煤的矿物质含量较高、灰分产率较高。研究区直罗组煤层的沉积环境为辫状河三角洲平原^[25]。根据前人的研究可知,辫状河三角洲平原主要是由众多的辫状河道或者辫状河平原相组成,受湍急洪水控制,常为季节性的沉积作用产生^[33]。直罗组煤样高矿物含量和高灰分产率的特点,可能是由于在成煤过程中,时常受到携带大量陆源碎屑物质的不稳定湍急洪水的影响,使得大量陆源碎屑物质得以加入,从而导致煤具有矿物含量高、灰分产率高的特点。此外,成煤环境条件也同样影响着煤灰常量元素组成特征,这将在下面的讨论中进一步详述。

3.2 煤灰常量元素多元统计分析

为了深入认识煤灰常量元素特征、元素之间的关系及元素组合的指示意义,揭示影响煤灰样常量元素组成的因素,对煤灰样常量元素等进行了多元统计分析。

3.2.1 聚类分析

聚类分析的出发点是研究不同对象之间可能存在的相似性和亲疏关系,并根据研究对象之间各种特征标志的相似程度或者相关程度的大小将它们进行分类归组。通过聚类分析研究,可以得出元素组合特

表3 不同煤层煤岩特征和古环境、古气候的对比

Table 3 Comparison of palaeoenvironment, palaeoclimate with coal properties of different coal seams

煤层	煤岩特征	古环境	古气候
直罗组	灰分产率 >45%, 矿物含量 ~50%, 有机C含量 <39%	辫状河三角洲	潮湿→干旱过渡期
延安组V单元	灰分产率 9%~18%, 矿物含量 10%~30%, 有机C含量 50%~70%	曲流河	潮湿
延安组II、III、IV单元	灰分产率 <6%, 矿物含量 <7%, 有机C含量 >70%	湖泊三角洲	潮湿

征,判定元素之间的亲疏关系,有助于分析影响煤灰常量元素组成的因素。根据前面列出的分析测试结果,对煤灰中常量元素、煤灰分产率(简称为灰分)及煤中有机C(简称为C)含量进行了R型聚类分析,并作出相关谱系图(图3)。根据谱系图中虚线位置可以分成三个组:(1) K_2O 组,包括 K_2O 、灰分、 SiO_2 和 Al_2O_3 ; (2) P、Na组,包括 Na_2O 、 P_2O_5 、 TFe_2O_3 、 CaO 和有机C; (3) Ti、Mn组,包括 TiO_2 、 MnO 和 MgO 。

R型聚类分析结果中 K_2O 组代表的是煤中陆源碎屑物质组分,如长石、石英、粘土矿物等,这些碎屑物质直接或者间接构成了煤灰组分。P、Na组代表着生物源组分,P、Ca、Na、Fe都是植物中常见的矿物质元素^[34]。Ti、Mn组可能反映的是火山岩组分的信息。前人的研究表明,二叠纪末鄂尔多斯盆地北缘的阴山褶皱带形成时伴随了强烈的中酸性岩浆的侵入与喷发,且这些活动一直持续到三叠纪^[35],在中生界砂岩中普遍含有来自北部的火山物质^[36]。因此我们推测在鄂尔多斯侏罗纪煤层形成过程中,这些火山物质将携带一定量的Ti、Mn、Mg等成分进入到煤层中。

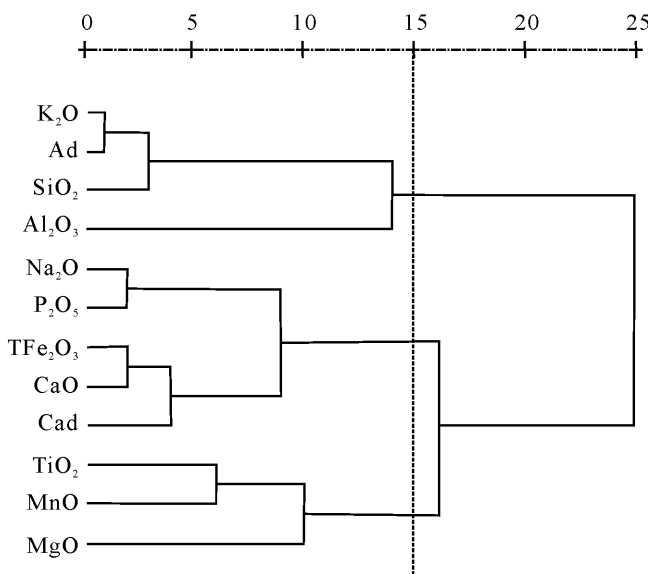


图2 R型聚类分析谱系

Fig. 2 The dendrogram of R-type cluster analysis

3.2.2 因子分析

因子分析能在尽量少损失地质信息的前提下,将众多的变量组合成少量的新变量——“因子”,有助于对地质现象进行简明的分析、再现原始变量之间的相关关系。本文采用的R型因子分析以累积方差贡献率达到85%为标准,选取3个因子代表影响煤中常

量元素组成的因素,表4列出了利用正交因子旋转中常用的方差极大法旋转后得到的方差极大正交旋转矩阵。各因子中确定的元素组合与聚类分析结果基本一致。根据元素组分在各因子上的载荷值及符号,确定各因子的正负属性及其所代表的元素组合,探讨各因子所代表的地质意义。

表4 煤灰成分方差极大正交因子载荷矩阵

Table 4 The varimax factor solution matrix of coal ash composition

	F_1	F_2	F_3
SiO_2	0.785	-0.616	0.037
Al_2O_3	0.129	-0.788	-0.302
TFe_2O_3	-0.481	0.795	0.155
MgO	0.151	0.254	0.712
CaO	-0.692	0.590	0.174
Na_2O	0.170	0.895	0.105
K_2O	0.896	0.090	0.349
TiO_2	0.165	-0.081	0.811
P_2O_5	-0.230	0.870	-0.319
MnO	-0.491	0.061	0.849
Ad	0.983	-0.082	-0.014
Cad	-0.965	0.172	0.038
方差贡献率/%	36.802	30.479	18.918
累积方差贡献率/%	36.802	67.281	86.199

第一主因子 F_1 的方差贡献为36.72%。因子 F_1 有正、负二重性,灰分、 K_2O 、 SiO_2 与其正相关, Na_2O 、 TiO_2 、 MgO 、 Al_2O_3 与其呈弱的正相关;而煤中有机C含量、 CaO 、 MnO 、 TFe_2O_3 及 P_2O_5 与其负相关。元素 K_2O 、 SiO_2 代表长石、石英等无机矿物组分;而煤中有机C含量代表着煤中有机组分的信息。因此,可以认为主因子 F_1 代表了陆源碎屑和有机质组分,这两种组分互为消长,成为控制研究区煤化学成分的最主要因素。当主因子 F_1 正值增加时,表示煤中陆源碎屑组分增加,有机质组分减少,同时煤灰产率增加,元素 K_2O 、 SiO_2 含量增加。元素 CaO 、 MnO 、 TFe_2O_3 及 P_2O_5 与煤中有机C含量呈正相关关系,说明煤中的这些元素至少部分是以与有机质结合的形式存在的。

主因子 F_2 的方差贡献为30.54%,兼有正、负二重性,与其正相关的元素组合有 Al_2O_3 和 SiO_2 ,与其负相关的元素组合有 Na_2O 、 P_2O_5 、 TFe_2O_3 和 CaO 。主因子 F_2 反映的可能是环境对煤组分的影响。 Al_2O_3 和 SiO_2 代表高岭石, TFe_2O_3 和 CaO 代表含铁方解石。据前人研究报道,温暖潮湿、偏酸性的环境有利于高岭石的形成与保存,而相对较干旱、偏弱碱性的环境则有利于方解石的形成和保存^[37~40]。因此当

主因子 F_2 的正值增加时,意味着环境偏干旱及偏弱碱性,有利于碳酸盐矿物的形成和保存,而不利高岭石的形成和保存。 Na_2O 和 P_2O_5 与 CaO 的正相关关系表明, Na_2O 和 P_2O_5 可能以吸附态存在于方解石中。

主因子 F_3 的方差贡献为 18.92%,以正因子为主,元素组合有 MnO 、 TiO_2 和 MgO ,可能代表了火山岩物质的影响。

有的元素参与到两个以上的因子当中,如 CaO 、 MnO 和 TFe_2O_3 等,说明控制这些元素的因素也有两个以上。

3.3 煤灰常量元素特征对比及其控制因素分析

结合聚类分析和因子分析的结果,我们可以更加深入的理解直罗组和延安组以及延安组不同单元煤层煤灰样之间的常量元素的特征和差异。煤灰样的 SiO_2 含量受河流带入沼泽的碎屑物质多少的影响,从延安组 II、III、IV 单元→延安组 V 单元→直罗组,煤灰样中 SiO_2 含量依次增加,说明河流所携带的碎屑物质的量依次增加。煤灰样的 Al_2O_3 含量特征没有像 SiO_2 这样截然清晰的递变关系,这是因为煤灰样的 Al_2O_3 含量的受控因素不仅仅是河流所携带的陆源碎屑物质,更重要的是, Al_2O_3 含量主要受环境气候因素的控制。 TFe_2O_3 含量在延安组 II、III、IV 单元煤灰样中远远偏高,而在延安组 V 单元和直罗组煤灰样中的含量范围比较相近,从因子分析的结果可知,环境气候是影响 TFe_2O_3 含量的主要因素,同时 TFe_2O_3 含量还受有机质的量的影响。这就说明,延安组 II、III、IV 单元煤层形成时,环境气候条件加上高的有机质含量(有机 C)有利于 Fe 的沉淀聚留。虽然延安组 V 单元煤样的有机质含量比直罗组煤样的有机质含量高,但在直罗组煤形成时,其环境比延安组 V 单元煤形成时更有利于 Fe 的聚留(表 3,直罗组煤层古气候为潮湿→干旱过渡期,而延安组 V 单元煤层古气候为潮湿),致使直罗组煤灰样和延安组 V 单元煤灰样的 TFe_2O_3 含量比较接近。与 TFe_2O_3 相似,煤灰样中 CaO 含量也主要受环境和有机质的量的影响,但煤灰样中 CaO 含量主要受控于有机质的量。因此,从延安组 II、III、IV 单元→延安组 V 单元→直罗组,煤灰样中 CaO 含量依次降低。但延安组 V 单元煤样 256-2 煤灰的 CaO 含量稍偏低,可能受其它未知的偶然因素影响。煤灰样中的 K_2O 含量也主要受陆源碎屑物质的影响,延安组煤灰样的 K_2O 含量明显低于直罗组煤灰样的 K_2O 含量,但延安组 II、III、IV 单元相对

于延安组 V 单元的煤灰样并没有显示出低的 K_2O 含量,推测其原因可能有两点:一是陆源碎屑物质中 K 含量较低,需要有较大量的物质质量的积累才能体现出明显的 K_2O 含量的差异;二是可能还存在影响煤灰样中 K_2O 含量的其它因素。煤灰样中 MnO 、 TiO_2 和 MgO 含量主要受输入的火山物质的控制,与河流携带的陆源碎屑物质的量没有必然联系,因此,在延安组 II、III、IV 单元、延安组 V 单元和直罗组三者中没有显示出有规律的变化趋势。

4 结论

对鄂尔多斯盆地东胜—神木地区直罗组和延安组煤样进行了工业分析、元素分析和煤灰常量元素测试,探讨了研究区不同成煤环境条件对煤性质的影响,同时在聚类分析和因子分析的基础上,研究了不同聚煤体系煤灰常量元素特征的差异及其控制因素。主要得出以下认识:

(1) 延安组 II、III、IV 单元、延安组 V 单元、直罗组煤层煤的灰分产率、矿物含量和有机 C 含量的差异主要受控于成煤环境条件。

(2) 聚类分析和因子分析的结果表明,煤灰常量元素主要有三种来源:即陆源碎屑矿物来源、有机质来源和火山物质来源。陆源碎屑组分含量和有机质组分含量间彼此消长的关系控制着煤灰中大部分常量元素的组成特征(如 K_2O 、 SiO_2 、 Al_2O_3 和 CaO 、 MnO 、 TFe_2O_3 及 P_2O_5 等),此外环境气候条件对煤灰常量元素组成也有一定的影响(如 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 和 CaO 等)。

(3) 延安组 II、III、IV 单元、延安组 V 单元、直罗组煤层煤灰常量元素特征存在一定的差异性,这些差异性是由成煤环境条件(陆源碎屑矿物的量)、环境气候条件和有机质的量等单一因素或多种因素综合作用的结果。

致谢 本文样品的测试分析得到了中国地质大学煤及煤层气工程系的潘思东老师和硕士生原玉东的热情帮助,此外,煤样 XRD 分析在中国地质大学过程与矿产资源国家重点实验室 X 射线衍射实验室完成,煤灰常量元素测试由中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室的潘勇老师完成,在此对以上给予帮助的个人和单位一并致谢!

参考文献(References)

- 1 李小彦,王杰玲,赵平.鄂尔多斯盆地优质煤的分类与评价[J].

- 煤田地质与勘探, 2007, 35(4): 1-4 [Li Xiaoyan, Wang Jieling, Zhao Ping. Classification and evaluation of the high quality coal in Ordos Basin [J]. *Coal Geology and Exploration*, 2007, 35(4): 1-4]
- 2 顾广明, 李小彦, 晋香兰. 鄂尔多斯盆地优质煤资源分布及有利区块[J]. *地球科学与环境学报*, 2006, 28(4): 26-30 [Gu Guangming, Li Xiaoyan, Jin Xianglan. Resource distribution and available block of high quality coal in Ordos coal basin [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2006, 28(4): 26-30]
 - 3 王双明, 李锋莉, 佟英梅. 鄂尔多斯盆地含煤地层延安组孢粉组合及其地质意义[J]. *中国煤田地质*, 1997, 9(1): 25-29 [Wang Shuangming, Li Fengli, Tong Yingmei. Sporopollen assemblages from coal-bearing strata of Yan'an Formation in Ordos Basin, and their geological significance [J]. *Coal Geology of China*, 1997, 9(1): 25-29]
 - 4 代世峰, 任德贻, 李生盛. 鄂尔多斯盆地东北缘准格尔煤田煤中超常富集勃姆石的发现[J]. *地质学报*, 2006, 80(2): 294-302 [Dai Shifeng, Ren Deyi, Li Shengsheng. A discovery of extremely enriched boehmite from coal in the Junger coalfield, the northeastern Ordos Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(2): 294-302.
 - 5 Dai S F, Ren D Y, Tang Y G, *et al.* Distribution, isotopic variation and origin of sulfur in coals in the Wuda coalfield, Inner Mongolia, China [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2002, 51: 237-250
 - 6 代世峰, 任德贻, 唐跃刚, 等. 高硫煤中硫的地质演化模式——以内蒙古乌达矿区为例[J]. *地质论评*, 2001, 47(4): 383-387 [Dai Shifeng, Ren Deyi, Tang Yuegang, *et al.* Model of sulphur accumulation in the high-sulphur coal: A case study from the Wuda coalfield, Inner Mongolia [J]. *Geological Review*, 2001, 47(4): 383-387]
 - 7 代世峰, 任德贻, 宋建芳, 等. 应用 XPS 研究煤中有机硫的存在形态[J]. *中国矿业大学学报*, 2002, 31(3): 225-228 [Dai Shifeng, Ren Deyi, Song Jianfang, *et al.* Application of XPS in research on occurrence of organic sulfur in vitrain [J]. *Journal of China University of Mining Science and Technology*, 2002, 31(3): 225-228]
 - 8 王双明, 张玉平. 鄂尔多斯侏罗纪盆地形成演化和聚煤规律[J]. *地学前缘*, 1999, 6(增刊): 147-155 [Wang Shuangming, Zhang Yuping. Study on the formation, evolution and coal-accumulating regularity of the Jurassic Ordos Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, 6 (Suppl.): 147-155]
 - 9 贾高隆, 李永成. 内蒙古鄂尔多斯侏罗纪煤层聚积规律及找煤方向[J]. *中国煤田地质*, 1997, 9(1): 22-24 [Jia Gaolong, Li Yongcheng. Accumulation patterns of Jurassic coal seam and trend of finding coal in Ordos, Inner Mongolia [J]. *Coal Geology of China*, 1997, 9(1): 22-24]
 - 10 焦养泉, 李思田, 杨士恭. 三角洲-湖泊沉积体系及聚煤研究——以鄂尔多斯盆地神木地区延安组 II 单元为例[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 1992, 17(2): 113-120 [Jiao Yangquan, Li Sitian, Yang Shigong. Delta-lacustrine depositional system and coal accumulation research [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 1992, 17(2): 113-120]
 - 11 Yang Renchao, Han Zouahen, Li Zengxue, *et al.* Base-level cycles and episodic coal accumulation [J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2006, 16(4): 439-442
 - 12 张培河. 低变质煤的煤层气开发潜力——以鄂尔多斯盆地侏罗系为例[J]. *煤田地质与勘探*, 2007, 35(1): 29-33 [Zhang Peihe. Coalbed methane (CBM) development potential of low rank coal: A case study from Ordos Basin [J]. *Coal Geology and Exploration*, 2007, 35(1): 29-33]
 - 13 Dai S F, Ren D Y, Chou C L, *et al.* Mineralogy and geochemistry of the No. 6 Coal (Pennsylvanian) in the Junger Coalfield, Ordos Basin, China [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2006, 66: 253-270
 - 14 Ward C R. Analysis and significance of mineral matter in coal seams [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2002, 50: 135-168.
 - 15 张泓, 李恒堂, 熊存卫. 中国西北侏罗纪含煤地层与聚煤规律 [M]. 北京: 地质出版社, 1998 [Zhang Hong, Li Hengtang, Xiong Cunwei. *Jurassic Coal-bearing Strata and Characteristics of Coal Accumulation in Northwestern China* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998]
 - 16 李思田, 程守田, 杨士恭, 等. 鄂尔多斯盆地东北部层序地层及沉积体系分析——侏罗系富煤单元的形成、分布及预测基础 [M]. 北京: 地质出版社, 1992 [Li Sitian, Chen Shoutian, Yang Shigong, *et al.* *Sequence Stratigraphy and Depositional System Analysis of the Northeastern Ordos Basin* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992]
 - 17 王双明. 鄂尔多斯盆地聚煤规律及煤炭资源评价 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996 [Wang Shuangming. *Coal Accumulation and Coal Resource Evaluation of Ordos Basin* [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1996, 333]
 - 18 Chen A P, Ma A S, Wu R G, *et al.* Mineralization characteristics of Dongsheng uranium mineralized area in Ordos Basin, China [C] // IAEA, edit *Recent Developments in Uranium Resources and Production with Emphasis on In Situ Leach Mining*. IAEA-TECDOC-1396, IAEA, Vienna, 2004: 69-78.
 - 19 Li Z Y, Fang X H, Chen A P, *et al.* Origin of gray-green sandstone in ore bed of sandstone type uranium deposit in north Ordos Basin [J]. *Science in China (Series D): Earth Sciences*, 2007, 50(2): 165-173
 - 20 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2002 [Yang Junjie. *Tectonic Evolution and Oil-Gas Distribution of Ordos Basin* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002]
 - 21 钱丽君, 白清昭, 熊存卫, 等. 陕西北部侏罗纪含煤地层及聚煤特征 [M]. 西安: 西北大学出版社, 1987 [Qian Lijun, Bai Qingzhao, Xiong Cunwei, *et al.* *Jurassic Coal-Bearing Strata and the Characteristics of Coal Accumulation from Northern Shanxi* [M]. Xi'an: Northwest University Press, 1987]
 - 22 Li S T, Yang S G, Hu Y X, *et al.* Analysis of depositional processes and architecture of the lacustrine delta, Jurassic Yanan Formation, Ordos basin [J]. *China Earth Sciences*, 1990, 1(3): 217-231
 - 23 李思田, 林畅松, 解习农, 等. 大型陆相盆地层序地层学研究——以鄂尔多斯中生代盆地为例 [J]. *地学前缘*, 1995, 2(3-4): 133-136 [Li Sitian, Lin Changsong, Xie Xinong, *et al.* Approaches of nonmarine sequence stratigraphy: A case study on the Mesozoic Ordos

- Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 1995, 2(3-4): 133-136]
- 24 Jiao Y Q, Wu L Q, Wang M F, *et al.* Forecasting the occurrence of sandstone-type uranium deposits by spatial analysis: An example from the northeastern Ordos Basin, China[C]// Mao, Bierlein, eds. *Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2005: 273-275
- 25 焦养泉, 陈安平, 王敏芳, 等. 鄂尔多斯盆地东北部直罗组底部砂体成因分析——砂岩型铀矿床预测的空间定位基础[J]. *沉积学报*, 2005, 23(3): 371-379 [Jiao Yangquan, Chen Anping, Wang Mingfang, *et al.* Genetic analysis of the bottom sandstone of Zhiluo Formation, Northeastern Ordos Basin: Predictive base of spatial orientation of sandstone-type uranium deposit [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(3): 371-379]
- 26 王敏芳, 焦养泉, 杨琴, 等. 鄂尔多斯盆地东北部延安组铀异常与沉积体系的关系[J]. *现代地质*, 2006, 20(2): 307-314 [Wang Minfang, Jiao Yangquan, Yang Qin, *et al.* Relationship between Uranium anomaly and depositional system of Yan'an Formation, northeast margin of Ordos Basin [J]. *Geoscience*, 2006, 20(2): 307-314]
- 27 焦养泉, 吴立群, 杨生科, 等. 铀储层沉积学——砂岩型铀矿勘查与开发的基础[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 213-304 [Jiao Yangquan, Wu Liqun, Yang Shengke, *et al.* *Uranium Reservoir Sedimentology: The Basis of Exploration and Exploitation of Sandstone-type Uranium Deposits* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 213-304]
- 28 张字龙, 韩效忠, 李胜祥. 鄂尔多斯盆地直罗组砂体地球化学特征及其铀成矿作用[J]. *世界核地质科学*, 2008, 25(2): 79-85 [Zhang Yulong, Han Xiaozhong, Li Shengxiang. Geochemical characteristics and uranium metallogenesis of sand bodies in Zhiluo Formation, Ordos Basin [J]. *World Nuclear Geoscience*, 2008, 25(2): 79-85]
- 29 邵世忠. 鄂尔多斯盆地榆林—延安地区侏罗系沉积体系与主要砂体研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2005 [Shao Shizhong. Study on Jurassic Sedimentary System and Main Sand Bodies in Yulin-Yan'an Area, Ordos Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2005]
- 30 梁积伟. 鄂尔多斯盆地侏罗系沉积体系和层序地层学研究[D]. 西安: 西北大学, 2007 [Liang Jiwei. Research on Sedimentary System and Sequence Stratigraphy of the Jurassic in Ordos Basin [D]. Xi'an: Northwest University 2007]
- 31 张泓, 白清昭, 张笑薇, 等. 鄂尔多斯聚煤盆地形成与演化[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1995 [Zhang Hong, Bai Qingzhao, Zhang Xiaowei, *et al.* Formation and Evolution of Ordos Coal-accumulating Basin [M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 1995]
- 32 李小彦, 武彩英, 晋香兰. 鄂尔多斯盆地侏罗纪成煤模式与煤质[J]. *中国煤田地质*, 2005, 17(5): 18-21 [Li Xiaoyan, Wu Caiying, Jin Xianglan. Jurassic coal-forming pattern and coal quality in Ordos Basin [J]. *Coal Geology of China*, 2005, 17(5): 18-21]
- 33 薛良清, Galloway W E. 扇三角洲、辫状河三角洲与三角洲体系的分类[J]. *地质学报*, 1991, 65(2): 141-153 [Xue Liangqing, Galloway W E. Fan-delta, braid delta and the classification of delta systems [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1991, 65(2): 141-153]
- 34 韩德馨主编. 中国煤岩学[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 1996: 68 [Han Dexin. *Chinese Coal Petrology* [M]. Beijing: China University of Mining and Technology Press, 1996: 68]
- 35 柳益群, 李文厚, 冯乔. 鄂尔多斯盆地东部上三叠统含油砂岩的古地温及成岩阶段[J]. *地质学报*, 1997, 2(1): 65-74 [Liu Yiqun, Li Wenhou, Feng Qiao. Palaeotemperatures and diagenetic stage of the upper Triassic oil sandstones in the eastern Ordos Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1997, 2(1): 65-74]
- 36 柳益群, 李继红, 冯乔, 等. 鄂尔多斯盆地三叠-侏罗系的成岩作用及其成藏成矿响应[J]. *岩石学报*, 2009, 25(10): 2331-2339 [Liu Yiqun, Li Jihong, Feng Qiao, *et al.* Diagenesis with its response of ore-forming on Triassic and Jurassic in Ordos Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(10): 2331-2339]
- 37 王秋兵, 王慧强, 韩春兰, 等. 辽宁地区古红土黏土矿物特征及其环境学意义[J]. *土壤通报*, 2008, 39(4): 924-927 [Wang Qiubing, Wang Huiqiang, Han Chunlan, *et al.* Clay mineral characteristics of paleosol as well as environmental significance in Liaoning [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(4): 924-927]
- 38 姚合法, 林承焰, 侯建国, 等. 苏北盆地黏土矿物转化模式与古地温[J]. *沉积学报*, 2004, 22(1): 29-35 [Yao Hefa, Lin Chengyan, Hou Jianguo, *et al.* The pattern of clay mineral transformation and palaeo-temperature in North Jiangsu Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(1): 29-35]
- 39 汤艳杰, 贾建业, 谢先德. 粘土矿物的环境意义[J]. *地学前缘*, 2002, 9(2): 337-344 [Tang Yanjie, Jia Jianye, Xie Xiande. Environment significance of clay minerals [J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(2): 337-344]
- 40 王国栋, 程日辉, 于民凤, 等. 沉积物的矿物和地球化学特征与盆地构造、古气候背景[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2006, 36(2): 202-206 [Wang Guodong, Cheng Rihui, Yu Minfeng, *et al.* Basin tectonic setting and paleoclimate revealed from minerals and geochemistry of the sediments [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2006, 36(2): 202-206]

Major Element Geochemistry of Jurassic Coal in Dongsheng-Shenmu Area , Ordos Basin

WANG Xiao-mei¹ JIAO Yang-quan^{1 2 3} WU Li-qun¹ RONG Hui¹ WANG Xiao-ming¹
PAN Song-qi¹ TANG Hui¹ JI Bo¹ SONG Ji¹

(1. China University of Geosciences ,Wuhan 430074;

2. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education , Wuhan 430074;

3. Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology of Ministry of Education ,Wuhan 430074)

Abstract Nine coal samples of Jurassic Zhiluo and Yan'an Formation , collected from Dongsheng-Shenmu area of Ordos Basin , have been analysed for their proximates , ultimates and major elements. In order to discuss the influence of coal-forming environmental conditions on coal properties , and study the characteristics and its control factors of major elements in coal ash of different coal accumulating systems. Ash production , mineral and organic carbon content of coal samples from different coal accumulating systems of Zhiluo and Yan'an Formation show obvious change trend. From coal seam II , III , IV of Yan'an Formation → coal seam V of Yan'an Formation → Zhiluo Formation , mineral content and ash production increase , organic carbon content decreases. In addition , major element contents of coal ash also have clear diversities and certain variation rules. For example , from coal seam II , III , IV of Yan'an Formation → coal seam V of Yan'an Formation → Zhiluo Formation , SiO₂ contents of coal ash samples increase; K₂O contents in coal ash samples from Yan'an Formation are apparently less than those from Zhiluo Formation; besides , TFe₂O₃ contents of coal ash samples from coal seam II , III , IV of Yan'an Formation are far more than those from coal seam V of Yan'an Formation and Zhiluo Formation. Based on synthetic analysis , the authors hold that the diversities of ash production , mineral content and organic carbon content of coal seam II , III , IV of Yan'an Formation , coal seam V of Yan'an Formation and Zhiluo Formation , are mainly controlled by coal-forming environmental conditions. The degree of influence on coal by detrital material during coal forming process affects mineral content , ash production and organic carbon content of coals. However , the characteristics and diversities of coal ash major elements of different coal accumulating systems of coal seam II , III , IV of Yan'an Formation , coal seam V of Yan'an Formation and Zhiluo Formation are mainly controlled by the factors of coal-forming environmental condition (the content of terrigenous clasts) , climatic environmental condition and organic matter content.

Key words coal; major elements; Jurassic; Ordos Basin