



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2309199

引用格式:马风华,汪栋刚,何庆志,等.鄂尔多斯盆地西缘宁东煤田石炭-二叠纪太原组煤中主微量元素特征及其地质意义[J].科学技术与工程,2025,25(5):1783-1791.

Ma Fenghua, Wang Donggang, He Qingzhi, et al. Geochemical characteristics and geological significance of major and trace elements in the Permo-Carboniferous Taiyuan Formation coal from Ningdong coalfield at the western margin of Ordos Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(5): 1783-1791.

# 鄂尔多斯盆地西缘宁东煤田石炭-二叠纪太原组煤中主微量元素特征及其地质意义

马风华,汪栋刚,何庆志,王成,李通,王红

(宁夏回族自治区基础地质调查院(宁夏回族自治区地质矿产中心实验室),银川750021)

**摘要** 为了揭示宁东煤田石炭-二叠纪太原组海陆过渡相煤中主微量元素地球化学特征及地质意义,通过X射线荧光光谱(X-ray fluorescence, XRF)、电感耦合等离子体质谱(inductively coupled plasma-mass spectrometry, ICP-MS)、显微组分鉴定及工业分析方法研究了煤中主微量元素的来源、赋存状态及其环境指示意义。结果表明:宁东煤田太原组煤中主量元素丰度较高,仅 $Fe_2O_3$ 低于中国煤均值;煤中主量元素主要来源于陆源碎屑供给、离子态络合及动植物等生物成因;煤中微量元素总体不富集,仅韦州二矿煤中Rb(5.1)达到富集程度,其他元素在不同矿区有不同程度的轻度富集,煤中微量元素主要赋存于黏土矿物中,来源于陆源碎屑,呈与有机质、自生矿物结合的水溶态、离子态赋存。 $TiO_2/Al_2O_3$ 指示煤中矿物质主要来源于长英质碎屑岩,CaO与MgO的正相关性揭示两者同源共生以白云石形式存在;Sr/Cu、CaO/(MgO· $Al_2O_3$ )等参数揭示聚煤期为温暖潮湿环境,推测温度在15~30℃;Sr/Ba指示成煤沼泽为微咸水环境,说明受到海水的影响;Cu/Zn、V/(V+Ni)、Ni/Co、V/Cr等参数揭示聚煤泥炭沼泽整体处于厌氧的氧化还原环境。

**关键词** 宁东煤田;太原组;煤;微量元素;地球化学

**中图分类号** P595; **文献标志码** A

## Geochemical Characteristics and Geological Significance of Major and Trace Elements in the Permo-Carboniferous Taiyuan Formation Coal from Ningdong Coalfield at the Western Margin of Ordos Basin

MA Feng-hua, WANG Dong-gang, HE Qing-zhi, WANG Cheng, LI Tong, WANG Hong

(Geological Survey Institute of Ningxia Hui Autonomous Region(Geology and Mineral Center  
Laboratory of Ningxia Hui Autonomous Region), Yinchuan 750021, China)

**[Abstract]** In order to reveal the characteristics and geological significance of the main micronutrient geochemistry in the Carboniferous-Permian Taiyuan Formation in Ningdong coalfield which deposited in marine-land transition coal-accumulating environment, the X-ray fluorescence(XRF) spectrometry, inductively coupled plasma-mass spectrometry(ICP-MS), macerals identification and industrial analysis were used to study the source, occurrence and environmental significance of trace elements in coals. The results show that the content of major and trace elements in Carboniferous coals of Ningdong coalfield are varies greatly, except the  $Fe_2O_3$  content is lower than the mean content of China coals. The Rb(5.1) is enriched in Weierkuang while other elements are slightly enriched in different micronutrient. The major and trace elements in coal are mainly occurs in clay minerals, and come from the supply of terrigenous clasts and the combination with organic matter and authigenic minerals in water-soluble state and ion state. The ratio of  $TiO_2/Al_2O_3$  indicate that the minerals in the coal are mainly derived from felsic clastic rocks, and the positive correlation between CaO and MgO indicates that they coexist in the form of dolomite. The ratio of Sr/Cu and  $CaO/(MgO \cdot Al_2O_3)$  and the other parameters indicate the coal-accumulating period is in a warm and humid environment, it is inferred that the temperature is between 15 °C and 30 °C, the ratio of Sr/Ba indicates that the coal-forming marsh is a brackish water environment, which indicates that it is affected by seawater. The parameters of Cu/Zn, V/(V + Ni), Ni/Co and V/Cr revealed that the peat-formed bog was in an anaerobic redox environment.

**[Keywords]** Ningdong coalfield; Taiyuan Formation; coal; trace element; geochemistry

收稿日期:2023-11-22 修订日期:2024-07-19

基金项目:宁夏自然科学基金(2022AAC03650,2023AAC03765);中国矿产地质志项目(DD20221695,DD20190379,DD20160346)

第一作者:马风华(1988—),男,回族,宁夏吴忠人,硕士,工程师。研究方向:能源矿产勘查、地质调查评价。E-mail:mfhacug@163.com。

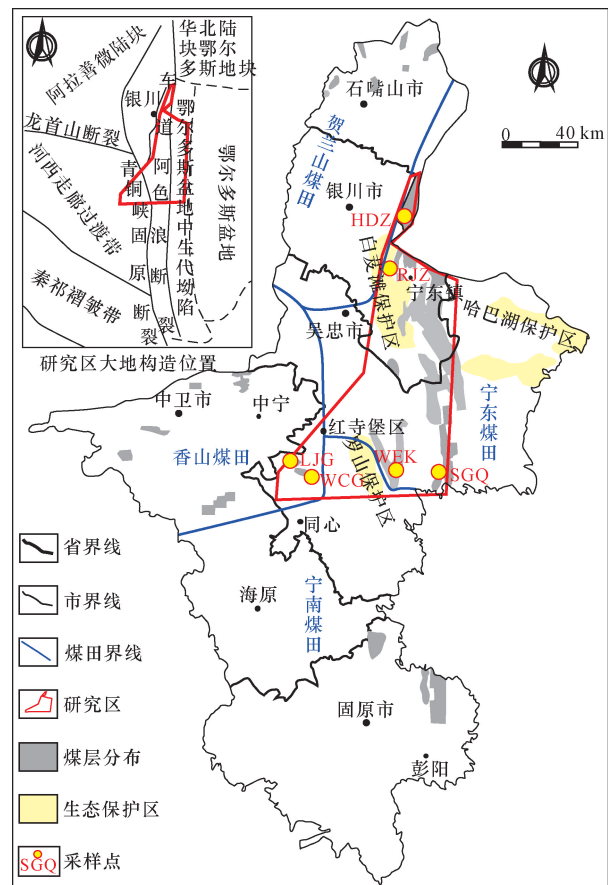
投稿网址:www.stae.com.cn

煤中主微量元素的研究在资源能源保障、煤炭清洁利用和聚煤环境研究等方面具有现实意义。在特定的地质条件下,可以富集锂、铝、钨、钛、钒、镓、锗、硒、锆、铌、钼、铀、稀土元素(包括镧系元素和钇)、贵金属等有益元素,并达到可利用的程度和规模<sup>[1]</sup>。余学海等<sup>[2]</sup>研究认为煤中矿物是微量元素的宿主;何静等<sup>[3]</sup>研究认为煤中微量元素尤其是对古环境具有指示意义的元素,如 Sr、Ba、B、V、Co、Ni 等元素,可以反映成煤泥炭沼泽中水体的古盐度、氧化还原等环境状态;Dai 等<sup>[4]</sup>统计了中国煤中主微量元素的均值,并探讨了煤中微量元素对人体健康以及供应开发利用的影响;李祥等<sup>[5]</sup>认为煤中微量元素的富集受沉积物源、成煤沼泽、成煤植物、古气候、岩浆热液和地下水等因素的影响。

宁东煤田是宁夏最重要的煤炭资源赋存基地<sup>[6]</sup>,针对该地区煤的研究具有深化地质认识和促进煤炭清洁高效利用双重意义。研究区晚古生代聚煤规律、煤岩煤质、有害元素及稀土元素方面研究成果众多。华芳辉等<sup>[7]</sup>研究认为宁东煤田红墩子矿区晚古生代煤形成于海陆过渡环境,主要包括障壁海岸沉积和河流三角洲沉积;吴蒙等<sup>[8]</sup>研究认为宁东煤田晚古生代煤中黄铁矿是微量元素 Cl、F、V、Pb 和 As 的重要载体,而有机硫决定了煤层中 Ga 的富集;秦国红<sup>[9]</sup>认为宁东煤田 5 号煤层富集 Li 和 Th;刘亢等<sup>[10]</sup>认为鄂尔多斯盆地西缘煤中 Li 和 Ga 较为富集;秦国红等<sup>[11]</sup>研究了鄂尔多斯盆地西缘煤中微量元素共生组合特征,认为晚古生代煤的物源为阿拉善地块和阴山古陆。但是,针对煤中主微量元素的来源、赋存特征、控制因素及蕴含的地质意义方面揭示得还不够具体,尤其是针对煤中主微量元素地球化学特征所反映的古环境研究基本处于空白。在前人研究的基础上,以煤中主微量元素含量、赋存特征、来源及相关参数比值为依据,开展主微量元素赋存特征及来源、物源、古气候、古盐度、古氧化还原环境等古环境方面的研究,以期丰富、深化研究区煤中主微量元素地球化学和古聚煤环境方面的认识。

## 1 地质背景

宁东煤田在大地构造上位于鄂尔多斯盆地西缘褶皱逆冲带中部(图 1),在晚石炭世受鄂尔多斯地块、阿拉善地块和秦岭-祁连造山带等多个构造域构造运动的影响<sup>[12]</sup>,晚古生代由于古亚洲洋持续向南俯冲闭合,阿拉善地块、阴山造山带成为盆地西缘物源区,至晚石炭世受海西运动影响,鄂尔多斯盆地整体沉降,早期受祁连海影响,晚期受祁连海与



HDZ 为红墩子二矿;RJZ 为任家庄煤矿;LJG 刘家沟湾煤矿;  
WEK 为韦州二矿;SGQ 为四股泉二矿

图 1 研究区位置及采样分布图

Fig. 1 The map of study area and sampling distribution

华北海共同影响,形成陆缘海,发育滨海相-三角洲相沉积<sup>[8,13]</sup>。区内发育太原组煤层 4~20 层,煤层平均厚度介于 8.98~21.21 m,煤层变质程度中等,煤类包含气煤、肥煤、焦煤、瘦煤及贫煤多个类别,煤质具有低灰-中灰、中低硫、低磷、中低氯等特征。

## 2 样品采集与测试

研究样品采自宁东煤田红墩子二矿、任家庄煤矿、刘家沟湾煤矿、湾岔沟煤矿、韦州二矿、四股泉二矿(图 1),每个生产煤矿各采样一件,共采集 6 件样品,采集煤层为晚古生代石炭-二叠纪太原组煤层。测试工作全部在中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室完成,测试工作符合国家相关标准。利用 2016048408 耶拿 specord 200 plus 紫外可见分光光度计和光学显微镜进行了煤的显微组分和镜质体反射率(Ro)测试;利用马弗炉和精准天平进行了煤的工业分析测试;利用波长色散 X 射线荧光光谱仪(ZSX Primus II)和电感耦合等离子体质谱仪(Agilent 7700e)进行了煤的主微量分析测试。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 煤岩煤质特征

如表 1 所示,宁东煤田太原组煤的有机显微组分以镜质组为主,含量介于 56.4% ~ 87.3%,惰质组含量介于 4.4% ~ 39.3%,壳质组含量介于 3.1% ~ 7.7%;镜质体最大反射率( $R_o$ )介于 0.5% ~ 2.21%,属中煤级煤。煤的干燥基挥发分含量介于 13.68% ~ 34.55%,灰分产率介于 7.34% ~ 34.48%;煤中硫的含量介于 0.33% ~ 5.26%,韦州二矿硫含量异常高,属特高硫煤。

表 1 宁东煤田太原组煤的煤岩煤质基础参数  
Table 1 Macerals and proximate parameters of Taiyuan Formation coal from Ningdong coalfield

样品	含量/%			$R_o$ /%	$V_{daf}$ /%	$A_d$ /%	$S$ /%
	镜质组	惰质组	壳质组				
红墩子二矿	56.4	39.3	4.3	0.50	28.60	19.10	0.32
刘家沟湾煤矿	87.3	9.6	3.1	2.21	20.61	34.48	1.51
任家庄煤矿	85.6	6.7	7.7	0.61	34.55	7.34	0.72
四股泉二矿	61.8	32.4	5.8	0.72	32.72	8.58	2.02
湾岔沟煤矿	80.6	4.4	15.0	2.01	13.68	18.26	0.33
韦州二矿	78.2	18.2	3.6	1.02	16.55	35.92	5.26

注: $V_{daf}$ 为干燥基挥发分含量; $A_d$ 为灰分产率; $S$ 为硫的含量。

#### 3.2 主量元素特征

煤的主量元素通常以氧化物形式表述,宁东煤田太原组煤的主量元素氧化物含量统计如表 2 所示,煤中  $SiO_2$  含量介于 3.78% ~ 21.91%,  $TiO_2$  含量介于 0.087% ~ 0.413%,  $Al_2O_3$  含量介于 3.13% ~ 10.06%,  $Fe_2O_3$  含量介于 0.1% ~ 2.15%,  $MnO$  含量介于

0.002% ~ 0.175%,  $MgO$  含量介于 0.09% ~ 4.75%,  $CaO$  含量介于 0.12% ~ 9.07%,  $Na_2O$  含量介于 0.05% ~ 0.30%,  $K_2O$  含量介于 0.02% ~ 0.93%,  $P_2O_5$  含量介于 0.016% ~ 0.118%;与中国煤均值相比<sup>[4]</sup>,研究区煤样中主量元素丰度总体较高;韦州二矿煤样的  $SiO_2$ 、 $MgO$ 、 $K_2O$  分别是其 2.6、2、4.9 倍,湾岔沟煤矿煤样的  $MnO$ 、 $MgO$ 、 $CaO$  分别是其 3.4、4.4、2.6 倍,刘家沟湾煤矿煤样的  $MnO$ 、 $MgO$ 、 $CaO$  分别是其 11.7、21.6、7.4 倍,所有样品中仅  $Fe_2O_3$  含量全部低于中国煤均值(4.85%)。

宁东煤田太原组煤中主量元素氧化物含量变化总体较大,反映了研究区不同煤样所代表区域在煤炭沉积作用、成岩作用过程中的复杂性和差异性。如表 3 的相关性统计显示,煤中  $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$ 、 $Na_2O$ 、 $K_2O$  与灰分产率呈显著相关性,  $TiO_2$ 、 $Fe_2O_3$ 、 $MnO$ 、 $CaO$  与灰分产率呈正相关性,但相关系数均小于 0.5,  $P_2O_5$  与灰分产率呈负相关性,相关系数为 0.46;上述相关性一方面反映了煤中灰分产率主要来源于黏土矿物与石英,另一方面指示不同矿区因黄铁矿、方解石等自生矿物含量不同而提供了不同程度的灰分物质组成;灰分产率与  $P_2O_5$  的负相关性表明煤中矿物质的增多会造成动植物提供 P 含量的相对减少。主要元素氧化物含量与高岭石矿物含量相关性均较差,而石英含量与  $SiO_2$ 、 $TiO_2$ 、 $Al_2O_3$ 、 $Na_2O$ 、 $K_2O$  有较好的相关性,表明煤中主量元素中 Si 占主导地位,和 Al 含量不具一致性,说明煤中 Si 除来源于黏土矿物外,还有相当部分以碎屑石英或其他  $SiO_2$  矿物形式存在,并伴随 Ti、Al、Na、K 等

表 2 煤中主量元素氧化物含量

Table 2 The oxide content of major elements in coal from Ningdong coalfield

样品	含量/%										
	$SiO_2$	$TiO_2$	$Al_2O_3$	$TFe_2O_3$	$MnO$	$MgO$	$CaO$	$Na_2O$	$K_2O$	$P_2O_5$	LOI
四股泉煤矿	3.87	0.120	3.13	1.03	0.003	0.09	0.32	0.05	0.04	0.118	90.93
韦州二矿	21.91	0.413	10.06	1.07	0.018	0.44	0.61	0.30	0.93	0.042	63.65
任家庄二矿	3.78	0.176	3.42	0.10	0.002	0.09	0.12	0.11	0.02	0.112	92.10
湾岔沟煤矿	6.48	0.087	4.22	0.48	0.051	0.97	3.25	0.14	0.07	0.016	83.16
刘家沟湾煤矿	9.15	0.176	6.61	2.15	0.175	4.75	9.07	0.22	0.22	0.050	65.89
红墩子二矿	8.48	0.319	7.13	0.21	0.003	0.10	0.35	0.07	0.05	0.054	83.28
中国煤	8.47	0.330	5.98	4.85	0.015	0.22	1.23	0.16	0.19	0.092	—

注: $TFe_2O_3$ 为总铁含量;LOI为烧失量。

表 3 宁东煤田煤中灰分与主要氧化物含量相关性统计

Table 3 Relationship between ash and oxide content of major elements in coal from Ningdong coalfield

主要氧化物	$SiO_2$	$TiO_2$	$Al_2O_3$	$TFe_2O_3$	$MnO$	$MgO$	$CaO$	$Na_2O$	$K_2O$	$P_2O_5$
灰分产率	0.66	0.31	0.74	0.44	0.36	0.36	0.31	0.77	0.56	-0.46
高岭石	-0.14	—	-0.04	-0.09	-0.16	-0.18	-0.16	-0.58	-0.23	0.08
石英	0.80	0.43	0.50	—	-0.05	-0.06	-0.07	0.55	0.84	-0.20

离子以碎屑形式进入沼泽,而高岭石在碎屑搬运、沉积及成岩作用过程中,因黄铁矿、方解石等矿物的形成及大量离子的交换,造成高岭石含量更为显著的变化,从而导致其与主量元素相关性变差。

为进一步对煤中主量元素进行类别、来源及归属等方面的研究,对主量元素氧化物进行聚类分析如图2所示,共得出3个组群;组群I包括 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 共5种主量元素,其主要来源于物源区,以矿物碎屑或离子的形式进入煤层,具有源区继承性,主要包括石英及黏土矿物;组群II包括 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 共4种主量元素,其在成煤成岩演化过程中,可能以离子或流体形式进入煤层,形成白云石、方解石、黄铁矿等自生、次生矿物;组群III包括 $\text{P}_2\text{O}_5$ 这1种主量元素,其主要来源于动植物等生物成因,聚类分析结果与前述相关性分析结果一致。

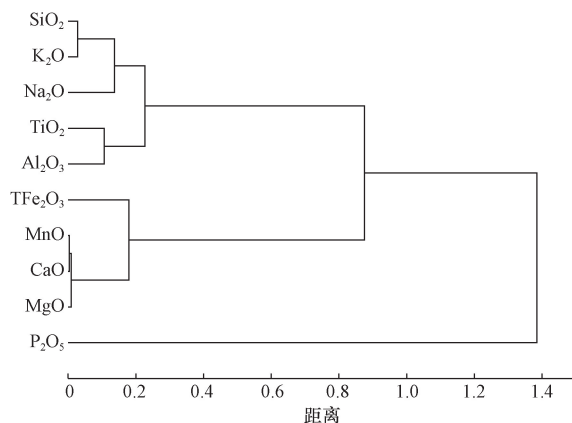


图2 宁东煤田煤中主量元素氧化物聚类分析

Fig. 2 Cluster analysis of oxide of major elements from coal in Ningdong coalfield

### 3.3 微量元素特征

通过电感耦合等离子体质谱仪对煤中微量元素进行测试,结果如表4所示。按照代世峰等<sup>[1]</sup>提出的富集系数理论,选取中国煤中微量元素均值对研究区煤样进行了富集系数进行计算(图3)。与中国煤均值相比<sup>[4]</sup>,研究区煤中微量元素总体以正常或亏损为主,仅韦州二矿煤中Rb达到富集程度,其他微量元素在不同矿区有不同程度的轻度富集。四股泉二矿煤样中Ga(2.5)、Zr(3.2)轻度富集;韦州二矿煤样中Sc(2.2)、Ga(2.9)、Zr(3.6)、Nb(2.3)、Sn(2.1)、Cs(3.1)、Ba(3.2)轻度富集;任家庄二矿煤样Sr(3.5)轻度富集;湾岔沟煤矿煤样Co(2.0)轻度富集;刘家沟湾煤矿煤样Sc(2.4)、Zr(2.6)轻度富集;红墩子二矿煤样Be(2.3)轻度富集。

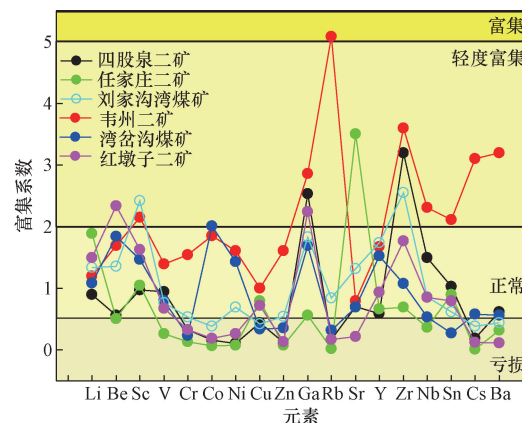


图3 宁东煤田石炭系煤中微量元素富集系数

Fig. 3 Concentration coefficients(CC) of trace elements in coals from Ningdong coalfield

表4 宁东煤田石炭系煤中微量元素含量

Table 4 Results of trace elements in coal from Ningdong coalfield

元素	四股泉二矿	韦州二矿	任家庄二矿	湾岔沟煤矿	刘家沟湾煤矿	红墩子二矿	研究区均值	中国煤	世界煤
Li	28.70	38.10	60.10	34.40	42.50	47.60	41.90	31.80	12.00
Be	1.19	3.57	1.08	3.88	2.86	4.94	2.92	2.11	1.60
Sc	4.26	9.42	4.58	6.44	10.60	7.13	7.07	4.38	3.90
V	33.10	48.90	9.42	27.90	26.90	23.70	28.32	35.10	25.00
Cr	5.09	23.70	2.03	3.60	8.20	5.15	7.96	15.40	16.00
Co	1.13	13.10	0.51	14.20	2.71	1.37	5.50	7.08	5.10
Ni	1.50	22.10	1.13	19.60	9.56	3.65	9.59	13.70	13.00
Cu	7.74	17.60	14.00	5.87	7.45	12.60	10.88	17.50	16.00
Zn	4.99	66.80	3.09	15.00	22.60	5.75	19.71	41.40	23.00
Ga	16.60	18.70	3.67	11.10	12.00	14.70	12.80	6.55	5.80
Rb	1.62	47.00	0.20	2.97	7.80	1.62	10.20	9.25	14.00
Sr	98.40	112.00	490.00	97.30	185.00	31.00	168.95	140.00	110.00
Y	10.70	30.40	12.20	27.70	31.60	17.10	21.62	18.20	8.40
Zr	286.00	322.00	62.50	96.00	228.00	158.00	192.08	89.50	36.00
Nb	14.10	21.80	3.43	5.07	8.16	8.06	10.10	9.44	3.70
Sn	2.18	4.45	1.90	0.58	1.31	1.69	2.02	2.11	1.10
Cs	0.22	3.51	0.02	0.66	0.44	0.14	0.83	1.13	1.00
Ba	98.80	508.00	50.60	89.70	71.00	19.00	139.52	159.00	150.00

注:富集系数(CC)为煤样与中国煤微量元素含量均值的比值。

为进一步分析煤中微量元素的控制要素,对宁东煤田太原组煤的微量元素与灰分产率、S 及主量元素氧化物进行相关性分析,如表 5 所示,并对微量元素进行聚类分析(图 4),聚类分析的统计量为相似性矩阵,聚类方法为质心聚类法,区间的相关性按照 Pearson 相关性进行计算,共得到 3 个大的组群。

组群 I:包括 Li、Sr 共两种元素与灰分产率、S 及主量元素氧化物相关性极差,说明这两种元素可能主要以有机质结合态赋存于煤中。

组群 II:包括 Be、Sc、Y、Co、Ni 共 5 种元素,该组群元素总体上与灰分产率、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、N<sub>2</sub>O 呈相对较好的正相关性,与 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>呈负相关性,表明该组群元素主要来源于物源区,伴随陆源碎屑的输入进入煤中,主要赋存于黏土矿物中。

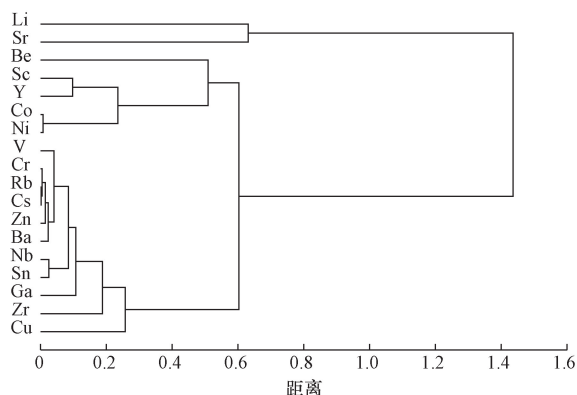


图 4 宁东煤田煤中微量元素聚类分析

Fig. 4 Cluster analysis of elements from coal in Ningdong coalfield

组群 III:包括 V、Cr、Rb、Cs、Zn、Ba、Nb、Sn、Ga、Zr、Cu 共 11 种元素,该组群元素与 S、SiO<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O 呈相对较好的正相关性,从来源上看该组元素属于陆源碎屑输入;从赋存状态看该组元素具有亲疏性,主要赋存于黏土矿物中;该组元素与灰分产率相关性总体一般,表明部分元素可能以水溶态或与有机质结合态赋存,这与聚类分析图中该组群由多个级次组合构成相一致。

## 4 主微量元素地质意义

用煤中元素组分、含量及其与某些元素的比值在判断沉积速率、水体盐度、古气候、氧化还原条件等方面具有广泛的应用<sup>[5]</sup>,是聚煤背景研究的有效指标。

### 4.1 沉积物源

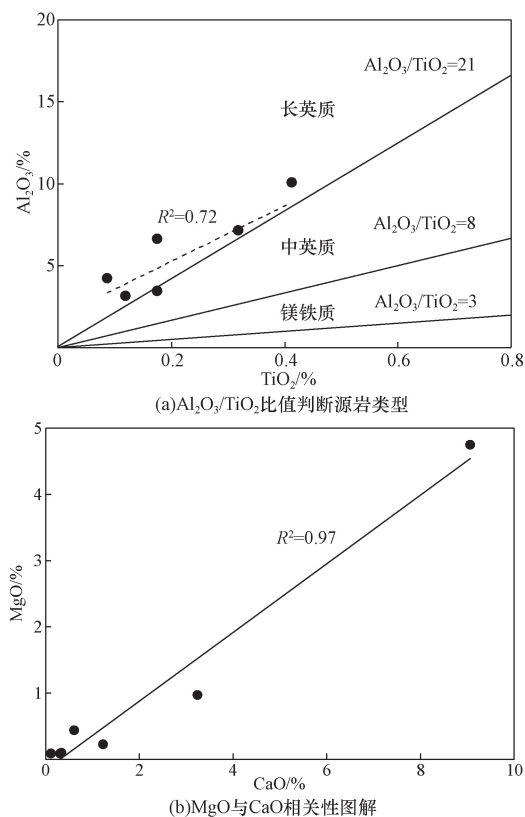
一般认为 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>O、TiO<sub>2</sub>代表煤中陆源碎屑物质组分,如长石、石英、黏土矿物等,而 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>O、CaO 代表生物源组分,是植物中常见的矿物质元素,宁东煤田太原组煤中主量元素氧化物以 Si、Al 为主,Fe、Na、Ca 含量相对较少,反映了煤炭沉积时物质来源主要以陆源碎屑物质供应为主。

SiO<sub>2</sub>和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>比值介于 1.11 ~ 2.18,仅韦州二矿、湾岔沟煤矿煤样高于中国煤均值(1.42),任家庄二矿煤矿低于高岭石的理论值(1.18),表明煤中 Al 主要以黏土矿物为载体,存在于富 Si 的矿物中。煤中 Ti 主要赋存于黏土矿物当中,研究区煤中 TiO<sub>2</sub>与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>呈正相关性[图 5(a)],相关系数为 0.72,说明两种具有同源性,都来源于陆源碎屑供应。煤中 Ca 主要以方解石形式存在,其与 Mg 为同主族亲

表 5 宁东煤田太原组煤中主微量元素相关性统计

Table 5 Relationship between major elements and trace elements in Taiyuan Formation coals from Ningdong coalfield

元素	A <sub>d</sub>	S	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Li	-0.03	-0.10	-0.02	0.03	0.00	-0.16	-0.01	0.00	-0.01	0.00	-0.04	0.06
Be	0.27	0.18	-0.20	0.22	0.39	0.47	0.00	0.00	-0.01	-0.05	-0.06	-0.70
Sc	0.96	0.00	0.49	0.24	0.64	0.00	0.51	0.51	0.45	0.65	0.37	-0.44
V	0.40	0.70	0.63	0.24	0.43	0.18	0.00	0.00	0.00	0.35	0.65	-0.15
Cr	0.58	0.90	0.95	0.60	0.75	0.13	0.00	0.00	0.00	0.70	0.98	-0.15
Co	0.22	0.17	0.35	0.03	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36	0.34	-0.57
Ni	0.46	0.27	0.52	0.08	0.33	0.05	0.05	0.02	0.04	0.59	0.49	-0.67
Cu	0.05	0.34	0.40	0.74	0.36	0.09	-0.22	-0.18	-0.29	0.16	0.41	0.01
Zn	0.64	0.81	0.94	0.47	0.70	0.14	0.01	0.01	0.00	0.84	0.98	-0.22
Ga	0.23	0.39	0.36	0.24	0.34	0.13	0.00	0.00	-0.01	0.07	0.32	-0.07
Rb	0.51	0.88	0.94	0.57	0.68	0.08	0.00	0.00	-0.01	0.72	0.99	-0.12
Sr	-0.13	-0.03	-0.10	-0.05	-0.16	-0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.04	0.27
Y	0.82	0.14	0.43	0.07	0.42	0.34	0.46	0.41	0.44	0.71	0.36	-0.72
Zr	0.28	0.66	0.37	0.20	0.29	0.39	0.01	0.02	0.00	0.19	0.43	0.00
Nb	0.25	0.86	0.61	0.40	0.42	0.12	-0.03	-0.02	-0.05	0.28	0.69	0.00
Sn	0.15	0.86	0.62	0.62	0.43	0.01	-0.12	-0.09	-0.18	0.30	0.73	-0.01
Cs	0.45	0.83	0.91	0.49	0.62	0.05	-0.01	0.00	-0.02	0.68	0.96	-0.17
Ba	0.35	0.91	0.83	0.45	0.51	0.05	-0.02	-0.02	-0.04	0.61	0.94	-0.07

图5  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{TiO}_2$  以及 MgO 和 CaO 相关图解Fig. 5 The relationship of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  and MgO/CaO

石元素, 研究区煤中 CaO 与 MgO 呈正相关性 [图 5(b)], 相关系数达 0.97, CaO/MgO 介于 1.33 ~ 5.59, 而白云石中 CaO/MgO 比值为 1.39, 铁白云石中 CaO/MgO 比值为 4.64, 表明存在碳酸盐矿物的煤中具有多种碳酸盐矿物且同源共生。

Hayashi 等<sup>[14]</sup>认为  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  比值是判断煤系沉积岩源岩类型的有效指标, 其中镁铁质为 3 ~ 8, 中英质为 8 ~ 21, 长英质为 21 ~ 70。研究区煤样的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  与  $\text{TiO}_2$  的比率范围为 19.4 ~ 48.5, 仅任家庄煤样值小于 21 [图 5(a)], 据此推断宁东煤田太原组煤炭沉积的无机物主要来源于长英质物源区。

郑玉龙等<sup>[15]</sup>认为沉积岩中  $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  值能够反映主要常量元素控制的矿物的状况, 其中黏土矿物中的  $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  一般小于 0.3; 研究区煤样的  $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  仅为 0.01 ~ 0.09, 明显小于 0.3, 一方面表明煤中主量元素主要由黏土矿物控制, 另一方面表明各矿区黏土矿物对主量元素的控制程度并不一致。 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{K}_2\text{O})$  能够反映沉积岩样品中稳定组分和不稳定组分的相对含量, 研究区煤样  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{K}_2\text{O})$  介于 0.71 ~ 24.43, 说明煤中稳定组分与不稳定组合差异极大, 指示除黏土矿物本身对主量元素控制程度的差异外, 在成煤、成岩及不同热演化背景下, 煤中进入的流体类型和自生、

次生矿物的生成对煤中稳定组分和不稳定组分含量有显著影响, 研究中湾岔沟煤矿、刘家沟湾煤矿煤样中较高含量的方解石、白云石就造成  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{K}_2\text{O})$  值的显著降低。

#### 4.2 古气候

师晶等<sup>[16]</sup>研究认为 Sr 含量高可能代表干旱炎热气候条件下湖水浓缩沉淀或海水影响, 干旱炎热时 Sr 含量高, 温暖湿润时 Sr 含量低。因此, Sr/Cu 对气候变化敏感, 可以良好的记录气候变化信息, Sr/Cu 介于 1.3 ~ 5 指示温暖潮湿气候, Sr/Cu 大于 5 指示干旱炎热气候<sup>[17]</sup>, 研究区煤样 Sr/Cu 介于 2.5 ~ 35, 指示干旱炎热气候 [图 6(a)], 但考虑到研究区由海水影响可能导致 Sr 元素值的普遍偏高, 导致 Sr/Cu 的气候判别失真, 认为研究区煤层沉积总体处于温暖潮湿气候条件。

吴丰昌等<sup>[18]</sup>研究表明, 贵州红枫湖于 1960—1990 年在平均气温 15 °C 条件下, 沉积物中  $\text{CaO}/(\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3)$  主要分布在 0.043 ~ 0.104, 平均值为 0.075。研究区煤中  $\text{CaO}/(\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3)$  介于 0.14 ~ 1.14, 较贵州红枫地区沉积之值高, 据此推测研究区聚煤时期年平均古温度应大于 15 °C, 属于温暖潮湿气候。

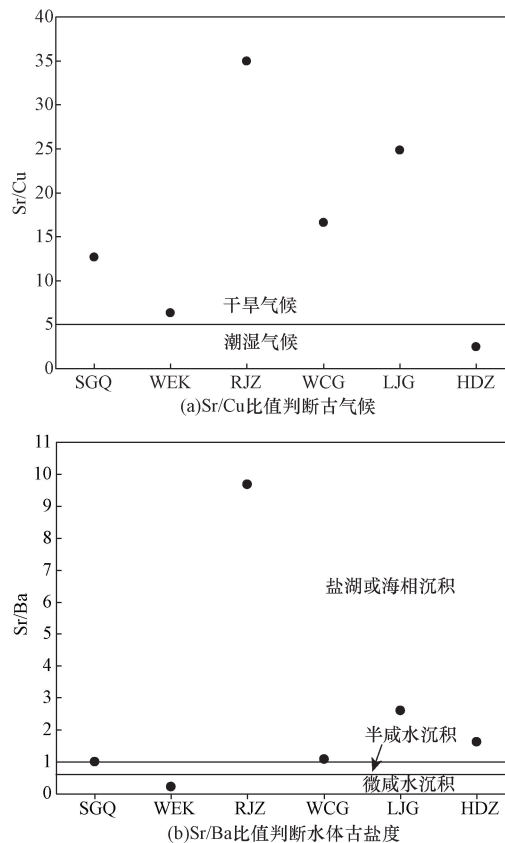


图6 古盐度与古气候分析

Fig. 6 The analysis of paleosalinity and paleoclimate in the study area

李振清等<sup>[19]</sup>、刘俊海等<sup>[20]</sup>通过 Sr 元素含量和古水体温度的研究,得出计算古水温的经验公式: $Y = 2578 - 80.8T$ ,其中  $Y$  为 Sr 元素含量,  $T$  为古水体温度,据此计算出研究区成煤沼泽的古水体温度在 25.8 ~ 31.5 °C。综上所述,宁东煤田石炭系煤的聚煤期为温暖潮湿气候背景。

### 4.3 古盐度

Ba 和 Sr 元素含量及两者的比值通常被用来判断水体的古盐度参数<sup>[21-25]</sup>。当 Sr/Ba 大于 1 是为盐湖或海相沉积, Sr/Ba 小于 0.6 为微咸水相沉积, Sr/Ba 在 0.6 ~ 1 为半咸水相沉积。研究区 Sr/Ba 为 0.22 ~ 9.68,其中韦州二矿为微咸水相沉积,其他 5 个采样区均属海相沉积[图 6(b)],同时煤中较高的 Sr 值也反映了海相沉积作用的影响,因此除韦州二矿外其他矿区在煤层沉积过程中受到海水不同程度的影响。

### 4.4 古氧化还原环境

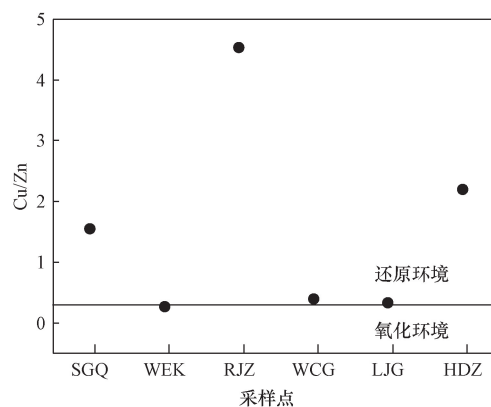
李祥等<sup>[5]</sup>、李艳芳等<sup>[26]</sup>、陆雨诗等<sup>[27]</sup>、马风华等<sup>[28]</sup>采用 Cu/Zn、 $V/(V+Ni)$ 、Ni/Co 是古氧化还原条件判断的有效指标,如 Cu/Zn 大于 0.3 反映还原条件,  $V/(V+Ni) > 0.54$  代表厌氧环境, Ni/Co 大于 1.8 代表还原环境。据此开展研究区煤层沉积氧化还原环境分析(图 7),结果显示宁东煤田煤炭形成时期泥炭沼泽总体处于厌氧的氧化还原环境, Ni/Co 揭示四股泉二矿、湾岔沟煤矿及韦州二矿为氧化环境[图 7(c)],原因可能为聚煤是沉积背景较为复杂,在海水和物源的共同作用下,煤中 Ni、Co 元素相对含量发生变化,导致 Ni/Co 比值降低的情况,从而造成处于氧化环境的假象。

Jones 等<sup>[29]</sup>通过对挪威北海地区古沉积水体氧化还原状态的研究发现,当  $V/Cr$  小于 2 时表示古氧化环境,  $V/Cr$  大于 2 时表示还原环境,研究区煤样的  $V/Cr$  介于 2.06 ~ 7.75,显示了较强的还原环境。

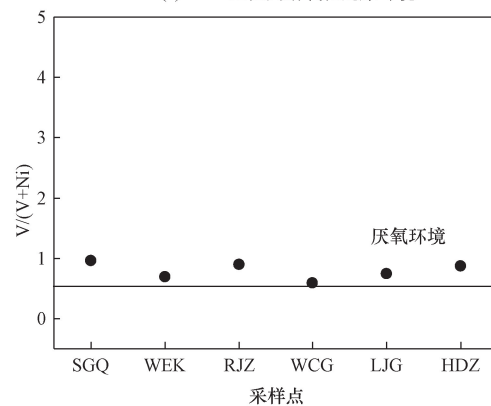
综上所述,宁东煤田太原组煤的煤岩煤质、主量元素、微量元素及其指示的聚煤背景显示,该地区石炭系聚煤期沉积构造背景相对稳定,但受局部微地形、微地貌、微环境及海水影响程度控制,导致成煤泥炭沼泽特征的不同,从而形成煤岩煤质与主微量元素不同的富集特征。

## 5 结论

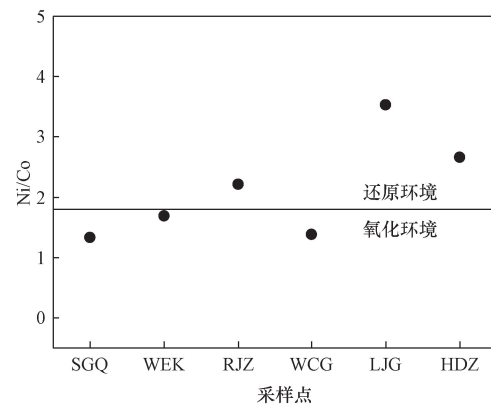
(1) 宁东煤田太原组煤的煤岩煤质变化程度较大,主微量元素富集程度也不一致,煤中  $Fe_2O_3$  低于中国煤均值,韦州二矿煤中 Rb(5.1)元素富集,其他煤样微量元素多数为正常或亏损,仅部分为轻度富集程度。



(a) Cu/Zn 比值判断氧化还原环境



(b)  $V/(V+Ni)$  比值判断氧化还原环境



(c) Ni/Co 比值判断氧化还原环境

图 7 古氧化还原环境分析

Fig. 7 Analysis of paleoredox environment in the study area

(2) 煤中  $SiO_2$ 、 $K_2O$ 、 $Na_2O$ 、 $TiO_2$ 、 $Al_2O_3$  来源于陆源碎屑供应,  $Fe_2O_3$ 、 $MnO$ 、 $CaO$ 、 $MgO$  主要来源于煤中自生矿物,  $P_2O_5$  源于动植物等生物成因;煤中 Li、Sr 以离子态赋存,且受海水影响, Be、Sc、Y、Co、Ni 主要来源于物源供应,且赋存于黏土中, V、Cr、Rb、Cs、Zn、Ba、Nb、Sn、Ga、Zr、Cu 元素来源于碎屑且赋存于黄铁矿及黏土矿物中。

(3) 宁东煤田太原组煤中碎屑物质主要来源于长英质陆源碎屑源区,聚煤期气候温暖潮湿,推测温度在 15 ~ 30 °C,聚煤沼泽为半咸水至海相,反映受到海水不同程度的影响,泥炭沼泽保存于厌氧的还原环境。

## 参 考 文 献

- [1] 代世峰, 任德胎, 周义平, 等. 煤型稀有金属矿床: 成因类型、赋存状态和利用评价[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1707-1715.  
Dai Shifeng, Ren Deyi, Zhou Yiping, et al. Coal-hosted rare metal deposits: genetic type, modes of occurrence, and utilization evaluation[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1707-1715.
- [2] 余学海, 孙平, 张军营, 等. 神府煤矿物组合特性及微量元素分布特性定量研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(11): 2683-2689.  
Yu Xuehai, Sun Ping, Zhang Junying, et al. Quantitative investigations on mineral matter and distributions of trace elements in Shengfu coal[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(11): 2683-2689.
- [3] 何静, 黄涛, 冯烁, 等. 三塘湖煤田西山窑组煤地球化学特征及沉积环境意义[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(5): 173-181.  
He Jing, Huang Tao, Feng Shuo, et al. Geochemical characteristics of coal and sedimentary environment significance in Xishanyao Formation of Santanghu coalfield[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(5): 173-181.
- [4] Dai S F, Ren D Y, Chou C-L, et al. Geochemistry of trace elements in Chinese coals: a review of abundances, genetic types, impacts on human health, and industrial utilization[J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 94: 3-21.
- [5] 李祥, 李伍. 淮北煤炭朱庄煤矿煤中微量元素地球化学特征[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(8): 178-191.  
Li Xiang, Li Wu. Geochemical characteristics of trace elements in Zhuzhuang coal mine of Huaibei coalfield[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(8): 178-191.
- [6] 何伟, 吴亮, 魏向成, 等. 宁东煤田中侏罗统延安组稀有稀散稀土元素地球化学特征及其对沉积环境的指示意义[J]. 岩矿测试, 2022, 41(6): 962-977.  
He Wei, Wu Liang, Wei Xiangcheng, et al. Geochemical characteristics of rare, dispersed, and rare earth elements in the middle Jurassic Yan'an Formation of the Ningdong coalfield and their indication for a sedimentary environment[J]. Rock and Mineral Analysis, 2022, 41(6): 962-977.
- [7] 华芳辉, 刘志飞, 张劲, 等. 宁东煤田红墩子矿区沉积环境对煤岩煤质的影响[J]. 中国煤炭地质, 2019, 31(3): 12-18.  
Huang Fanghui, Liu Zhifei, Zhang Jin, et al. Sedimentary environment impact on coal petrographic constituent and coal quality in Hongdunzi mine area, Ningdong coalfield[J]. Coal Geology of China, 2019, 31(3): 12-18.
- [8] 吴蒙, 秦云虎, 王晓青, 等. 宁东地区晚古生代煤中硫的地化特征及其对有害元素富集的影响[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S2): 932-942.  
Wu Meng, Qin Yunhu, Wang Xiaoqing, et al. Geochemical characteristics of sulfur and its impact on accumulation of hazardous trace elements in late Paleozoic coal from Ningdong area[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S2): 932-942.
- [9] 秦国红. 鄂尔多斯盆地晚古生代煤中微量元素富集特征与成因类型[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2020.  
Qin Guohong. Enrichment characteristics and genetic type of trace elements in the late Paleozoic coal from Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2020.
- [10] 刘亢, 曹代勇, 高科飞, 等. 宁东煤田南北段构造演化差异成因研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(6): 157-164.  
Liu Kang, Cao Daiyong, Gao Kefei, et al. Study on differentiation cause about tectonic evolution of northern and southern segments in Ningdong coalfield[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(6): 157-164.
- [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, 2016, 44(6): 8-14.  
Qin Guohong, Liu Kang, Xu Hao, et al. Paragenetic association features of trace elements in coals in western margin of Ordos Basin[J]. Coal Geology of China, 2016, 44(6): 8-14.
- [12] 赵红格, 刘池洋, 王峰, 等. 鄂尔多斯盆地西缘构造分区及其特征[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(2): 173-179.  
Zhao Hongge, Liu Chiyang, Wang Feng, et al. Structural division and characteristics in western edge of Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(2): 173-179.
- [13] 朱淑玥, 刘磊, 虎建玲, 等. 鄂尔多斯盆地西缘晚石炭世羊虎沟组源-汇系统特征及古地理格局[J]. 沉积学报, 2023, 41(5): 1430-1450.  
Zhu Shuyue, Liu Lei, Hu Jianling, et al. Characteristics of the Source-to Sink system and paleogeographical pattern from the upper Carboniferous Yanghugou Formation in Western margin of the Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2023, 41(5): 1430-1450.
- [14] Hayashi K I, Fujisawa H, Holland H D, et al. Geochemistry of 1.9Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1997, 61(19): 4115.
- [15] 郑玉龙, 马志强, 王伯长, 等. 黑龙江省柳树河盆地始新统八虎力组油页岩元素地球化学特征及沉积环境[J]. 地理学报, 2015, 17(5): 689-698.  
Zheng Yulong, Ma Zhiqiang, Wang Baichang, et al. Geochemistry characteristics and sedimentary environment of oil shale from the Eocene Bahuli Formation in Liushuhe Basin, Heilongjiang Province[J]. Journal of Palaeogeography, 2015, 15(5): 689-698.
- [16] 师晶, 黄文辉, 吕晨航, 等. 鄂尔多斯盆地临兴地区上古生界泥岩地球化学特征及地质意义[J]. 石油学报, 2018, 39(8): 876-889.  
Shi Jing, Huang Wenhui, Lü Chenhang, et al. Geochemical characteristics and geological significance of the Upper Paleozoic mudstones from Linxing area in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(8): 876-889.
- [17] 林景昱, 褚庆忠, 邵先杰, 等. 柳江盆地上寒武统崮山组微量元素地球化学特征及古环境指示意义[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(7): 2749-2758.  
Lin Jingyu, Chu Qingzhong, Shao Xianjie, et al. Geochemical characteristics of trace elements of the Upper Cambrian Kushan Formation in the Liujiang Basin and paleoenvironmental implications[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(7): 2749-2758.
- [18] 吴丰昌, 万国江, 黄荣贵. 贵州红枫湖纹层沉积物中近代气温记录[J]. 地理科学, 1996, 16(4): 345-350.  
Wu Fengchang, Wan Guojiang, Huang Ronggui. Recent temperature records of annually laminated sediments in Hongfeng Lake, Guizhou[J]. Scientia Geographica Sinica, 1996, 16(4): 345-350.

- 345-350.
- [19] 李振清,周洪瑞,陈建强. 山东淄博地区上寒武统沉积地球化学特征及其层序地层学意义[J]. 现代地质, 2001, 15(4): 377-382.
- Li Zhenqing, Zhou Hongrui, Chen Jianqiang. Sedimental geochemical characteristics and application of the Upper Cambrian in Zibo area, Shandong[J]. Geoscience, 2001, 15(4): 377-382.
- [20] 刘俊海,吴志轩,于水,等. 丽水凹陷古新统微量元素地球化学特征及其地质意义[J]. 中国海上油气, 2005, 17(1): 8-11.
- Liu Junhai, Wu Zhixuan, Yu Shui, et al. Paleocene trace element geochemistry and its geological significance in Lishui Sag [J]. China Offshore Oil and Gas, 2005, 17(1): 8-11.
- [21] 邹建华,刘东,田和明,等. 内蒙古阿刀亥矿晚古生代煤的微量元素和稀土元素地球化学特征[J]. 煤炭学报, 2013, 38(6): 1012-1018.
- Zou Jianhua, Liu Dong, Tian Heming, et al. Geochemistry of trace and rare earth elements in the Late Paleozoic coal from Adao-hai Mine, Inner Mongolia [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(6): 1012-1018.
- [22] 蒋美霞,刘平辉,向龙,等. 内蒙古二连盆地川井坳陷赛汉组泥岩地球化学特征[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(26): 11118-11128.
- Jiang Meixia, Liu Pinghui, Xiang Long, et al. Geochemical characteristics of Saihan Mudstone in Chuanjing Depression, Erlan Basin, Inner Mongolia[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(26): 11118-11128.
- [23] 李浩,陆建林,李瑞磊,等. 长岭断陷下白垩统湖相烃源岩形成古环境及主控因素[J]. 地球科学, 2017, 42(10): 1774-1786.
- Li Hao, Lu Jianlin, Li Ruilei, et al. Generation paleoenvironment and its controlling factors of Lower Cretaceous Lacustrine hydrocarbon source rock in Changling Depression, south Songliao Basin [J]. Earth Science, 2017, 41(10): 1744-1786.
- [24] 常海亮,张宏伟,杜春彦,等. 鹿邑凹陷太原组—山西组泥岩元素地球化学特征及对沉积环境的指示[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(25): 10845-10856.
- Chang Hailiang, Zhang Hongwei, Du Chunyan, et al. Geochemical characteristics of elements in Taiyuan Formation-Shanxi Formation and their implications for sedimentary environment in Luyi Sag [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(25): 10845-10856.
- [25] 吴灿灿,曹静,赵景宇. 淮北煤田宿州矿区山西组泥质岩地球化学特征及地质意义[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(5): 190-197.
- Wu Cancan, Cao Jing, Zhao Jingyu. Geochemical characteristics and geological significance of shaly rocks in Shanxi Formation of Suzhou mining area, Huaibei coalfield [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(5): 190-197.
- [26] 李艳芳,邵德勇,吕海刚,等. 四川盆地五峰组—龙马溪组海相页岩元素地球化学特征与有机质富集的关系[J]. 石油学报, 2015, 36(12): 1470-1483.
- Li Yanfang, Shao Deyong, Lü Haigang, et al. A relationship between elemental geochemical characteristics and organic matter enrichment in marine shale of Wufeng Formation-Longmaxi Formation, Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 36(12): 1470-1483.
- [27] 陆雨诗,胡勇,侯云东,等. 鄂尔多斯盆地西缘羊虎沟组微量元素地球化学特征及沉积环境指示意义[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(28): 11999-12009.
- Lu Yushi, Hu Yong, Hou Yundong, et al. Geochemical characteristics of trace elements in Yanghugou Formation in the western margin of Ordos Basin and their implications for sedimentary environment [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(28): 11999-12009.
- [28] 马风华,潘进礼,马瑞赞,等. 华北板块南缘六盘山盆地固参1井马东山组泥页岩段古沉积环境研究[J]. 地质论评, 2019, 65(5): 1123-1130.
- Ma Fenghua, Pan Jinli, Ma Ruiyun, et al. Paleo-sedimentary environmental study of mud-shale member of Madongshan Formation of well Gucan-1 in Liupanshan Basin, North China Plate [J]. Geological Review, 2019, 65(5): 1123-1130.
- [29] Jones B, Manning D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. Chemical Geology, 1994, 111(1/4): 111-129.