



陇东地区山西组煤系地层高岭石黏土岩 岩石学特征及其成因分析

李笑天^{1,2},董倩云^{1,2},范倩倩^{1,2},夏辉^{1,2},周游³,张博⁴,
张伟^{1,2},曹江骏^{1,2},刘平^{1,2},马瑶⁵

1. 中国石油长庆油田分公司 勘探开发研究院,陕西 西安 710018;
2. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室,陕西 西安 710018;
3. 中国石油长庆油田分公司 气田开发事业部,陕西 西安 710018;
4. 中国石油长庆油田勘探事业部,陕西 西安 710018;
5. 西安石油大学 地球科学与工程学院,陕西 西安 710065)

摘要 煤系地层中的高岭石黏土岩为中国特色的煤系伴生矿产资源,成因类型多样,可提供地层学、年代学或构造地质学等地质意义。鄂尔多斯盆地陇东地区山西组煤系地层中发育一套厚层状灰白色高岭石黏土岩,运用岩心观察、岩石薄片鉴定、扫描电镜分析、X射线衍射分析(XRD)和主量元素分析,查明其矿物组成及岩石类型,探明其成因类型。结果表明,灰白色高岭石黏土岩主要成分为黏土矿物(质量分数平均74.96%),其次为石英(质量分数平均14.28%)和菱铁矿(质量分数平均10.46%)。所含黏土矿物以高岭石为主(质量分数平均76.2%),多为隐晶质集合体,石英多为微晶状,菱铁矿多呈团块状、鲕状、浸染状。其可进一步划分为3类:灰白色含菱铁矿高岭石黏土岩、灰白色菱铁矿质高岭石泥岩和灰白色高岭石黏土岩。灰白色高岭石黏土岩 Hinckley 指数(Hi)整体偏低(平均0.25),反映陆相搬运再沉积成因;(001)峰半高宽(FWHM)为0.269~0.567,计算结晶度为1.68~3.23,整体偏低,反映陆相搬运再沉积或火山物质蚀变型成因。主量元素显示, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 分子数比值为2.02,具有高 SiO_2 、较高 Al_2O_3 、较高 TFe_2O_3 以及极低 TiO_2 、 K_2O 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 的特征,反映并非火山灰蚀变成因,而主量元素含量分布也区别于风化残积型岩石特征。研究认为,灰白色高岭石黏土岩为风化搬运再沉积型成因,属于沉积成因类型。很高的化学蚀变指数指示其形成时物源区具有高化学风化强度和潮湿炎热的气候条件。灰白色高岭石黏土岩的发育反映了陇东地区物源区山西组沉积后期构造活动的存在以及潮湿炎热气候的转化,可作为小层对比划分的标志层,具有事件地层学的地质意义。菱铁矿的发育也为研究区发育弱还原环境的三角洲前缘-浅湖沉积提供证据。

关键词 高岭石黏土岩;成因类型;煤系地层;山西组;上古生界;陇东地区

中图分类号:TE121 **DOI**:10.16152/j.cnki.xdxbzr.2025-05-016

收稿日期:2024-07-15

基金项目:中国石油重大科技专项(2023ZZ25);中国石油长庆油田分公司项目(2023QCPJ03,2025D4QP12)。

第一作者:李笑天,男,博士,高级工程师,从事鄂尔多斯盆地油气储层研究,815357564@qq.com。

通信作者:马瑶,女,博士,副教授,从事沉积学与储层地质学研究,mayao90s@163.com。

Petrologic characteristics and genetic analysis of kaolinite claystone in coal-bearing strata of Shanxi Formation, Longdong Area

LI Xiaotian^{1,2}, DONG Qianyun^{1,2}, FAN Qianqian^{1,2}, XIA Hui^{1,2}, ZHOU You³, ZHANG Bo⁴, ZHANG Wei^{1,2}, CAO Jiangjun^{1,2}, LIU Ping^{1,2}, MA Yao⁵

- (1. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China;
- 2. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low Permeability Oil and Gas Fields, Xi'an 710018, China;
- 3. Gas Field Development Division, Changqing Oilfield Branch, PetroChina, Xi'an 710018, China;
- 4. Exploration Department, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China;
- 5. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract The kaolinite claystone in the coal-bearing strata is a characteristic coal associated mineral resource in China, with various types of genesis, which can provide geological significance such as stratigraphy, chronology or tectonic geology. A set of thick-bedded grayish-white kaolinite claystone is developed in the coal-bearing strata of Shanxi Formation, Longdong area, Ordos Basin. The mineral composition and rock type were identified by core observation, thin section identification, scanning electron microscope analysis, X-ray diffraction (XRD) analysis and major element analysis. And the genetic type was preliminarily identified. The results show that the gray-white kaolinite claystone is mainly composed of clay minerals (74.96% on average), followed by quartz (14.28% on average) and siderite (10.46% on average). The clay minerals contained are dominated by kaolinite (76.2% on average) which is mostly cryptocrystalline aggregates. Quartz is mostly microcrystalline. And siderite is mostly lumped, oolitic, and disseminated. It can be further divided into three categories: gray-white siderite-bearing kaolinite claystone, gray-white sideritic kaolinite claystone and gray-white kaolinite claystone. The Hinckley index (Hi) of the grayish-white kaolinite claystone is low (0.25 on average), reflecting the genesis of redeposition after continental transport. The peak half height width (FWHM) of peak (001) is 0.269~0.567, and the calculated crystallinity ranges from 1.68 to 3.23, which is low overall, reflecting the the genesis of redeposition after continental transport or the genesis of redeposition after continental transport genesis of volcanic material alteration type. The ratio of major elements $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ of is 2.02, which is characterized by high SiO_2 , high Al_2O_3 , high TFe_2O_3 , and very low TiO_2 , K_2O , MgO , CaO , and Na_2O , reflecting that it is not of volcanic ash alteration. The distribution of major elements contents is different from that of weathering residual sedimentary rocks. It is believed that the grayish white kaolinite claystone is formed by transport and redeposition after weathering, and belongs to the sedimentary genesis type. The high chemical alteration index (CIA) reflects the high intensity of chemical weathering and the tropical climate conditions in the sediment source areas of the rocks at the time of formation. The development of grayish white kaolinite claystone reflects the presence of tectonic activities in the late depositional stage of the Shanxi Formation and the transformation of the humid and hot climate in the source area of Longdong region, which can be used as a marker layer for the contrasting division of small layers and has geological significance of event stratigraphy. The development of siderite also provides evidence for the development of weakly reducing environment of delta front-shallow lake deposition in the study area.

Keywords kaolinite claystone; genetic type; coal-bearing strata; Shanxi Formation; Upper Paleozoic; Longdong Area

高岭石是一种铝硅酸盐类矿物蚀变的产物，是常见的黏土矿物之一，常作为砂岩填隙物、黏土岩及风化壳铝土岩的主要组成矿物出现^[1-3]。所含高岭石质量分数大于 50% 的黏土岩可称为高岭石黏土岩，矿床学上常称高岭土（软质）或者高岭岩（硬质），是一种重要的非金属矿产资源，可广泛用于造纸、橡胶、塑料等方面，具有重要的经济价值和社会效益^[4-5]。随着对高岭土矿床勘探

不断取得突破,其成因类型的研究一直是学者们关注的热点。中国高岭土矿床类型通常被分为风化型、热液蚀变型和沉积型 3 类^[4-8],最新分类方案总结为风化型、沉积型、热液蚀变型及烧变型等 4 种类型,并可进一步分为 8 种成因亚型以及 12 种矿床类型^[9]。

煤系高岭石黏土岩在中国分布广泛,储量丰富,质量优良,是中国特色的煤系伴生矿产资源^[10-13]。在煤系地层中作为煤层的顶、底板或夹矸存在时,多被认为是同沉积期火山灰蚀变而成,称为高岭石黏土岩夹矸(Tonstein)^[14-18],作为等时地层单位,有着重要的地层对比、年代学和构造地质学意义^[19]。除此之外,煤系地层高岭石黏土岩还有胶体凝聚型、碎屑沉积型(风化-搬运-沉积)^[20]、表生风化型、热液成因等类型^[21],每种类型都具有一定的地质意义。表生风化型高岭石黏土岩反映成岩处原地或就近发生了强烈的风化作用,往往反映风化壳的存在,多受构造运动的影响^[4];沉积型高岭石黏土岩反映源区存在强烈的风化作用,高岭石类风化产物形成后经机械搬运,聚集于滨海湖沼、河漫滩等地,多反映源区存在强烈的化学风化作用^[22]。

陇东地区庆阳气田城探 3 区块晚古生代沉积了一套厚层含煤岩系。研究区二叠系山西组和石盒子组天然气资源丰富,是庆阳气田的主要产气层位^[23-25]。在开展陇东地区城探 3 区块天然气勘探开发研究的过程中,发现山西组山 1 段地层中普遍存在一套灰白色高岭石黏土岩,其颜色特征显著异于正常煤系地层的暗色泥岩,岩性和电性均表现出明显的差异性,电性特征表现为明显的高伽马特征(>180 API),井间稳定性较好,可展开对比。而城探 3 区块上古生界井间砂体变化快,小层精细对比为困难,水平井作业也有一定难度。因此,本研究系统开展山西组中—上部灰白色高岭石黏土岩的岩石学、矿物学、地球化学等特征研究,分析其成因类型,探明其分布规律,为庆阳气田城探 3 区块的地层划分对比提供依据,更好地指导该区天然气的勘探开发工作。另外,已发现的华北地区上古生界煤系高岭石黏土岩多见于内蒙古、山西、山东、河北等地区的煤田中,构造位置上多邻近华北板块北部的构造活动区^[16],本研究对华北西南缘煤系地层中的高岭石黏土岩开展研究,有助于进一步认识华北西缘的构造演化;对于矿床学而言,也利于更全面地认识中国煤

系高岭土矿床的富集规律。

1 区域地质概况

研究区为陇东地区城探 3 区块,地理位置位于现今正宁—合水一带(见图 1);晚古生代仍属于华北板块的一部分,位于华北板块西部、后期形成的鄂尔多斯盆地西南缘。由于邻近中央古隆起^[26-27],陇东地区上古生界地层发育不全,研究区范围内缺失本溪组,太原组部分缺失^[24],上古生界由下而上依次发育下二叠统太原组、下二叠统山西组、中二叠统石盒子组和上二叠统石千峰组。太原组底部发育风化壳,富集铝土岩,并已获得铝土岩气藏勘探的重大突破^[28-30]。这套铝土岩具有分段特点,部分层段发育以高岭石为主的铝土质泥岩,不同程度富集一水硬铝石等铝质矿物^[31]。该套铝土岩形成于奥陶纪末期至晚石炭世华北板块持续隆升阶段,气候湿热,风化剥蚀强烈,属于喀斯特型(沉积型)铝土岩^[31-32]。

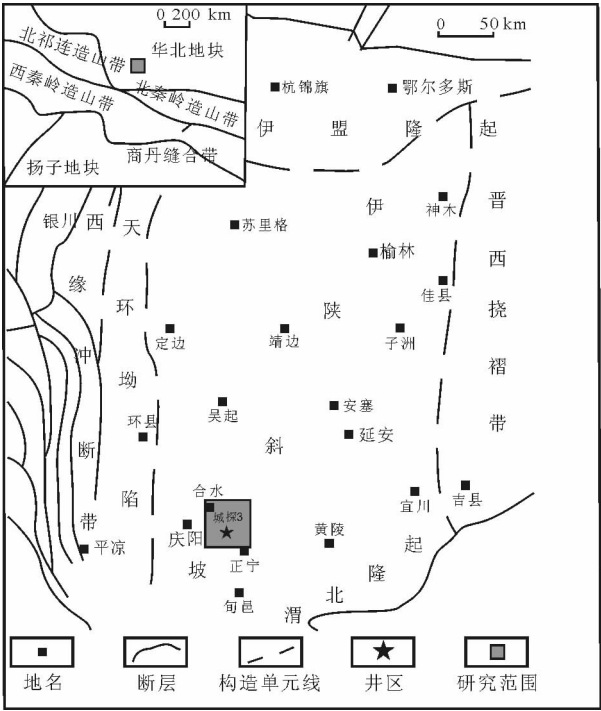


图 1 陇东地区城探 3 区块构造位置图
Fig. 1 Structural location map of Chengtan 3 block, Longdong Area

早二叠世,太原组沉积期海侵加剧,盆地西南部结束表生风化阶段,开始接受滨浅海沉积。至早二叠世山西组沉积期,地层厚度较为稳定,山西组已基本不受中央古隆起的影响^[24]。按照岩性、沉积旋回,山西组可划分为山 2 段和山 1 段两个

煤层,可产生酸性水体介质环境,有利于高岭石的发育。山1段几乎不发育煤层,这套高岭石黏土岩发育于煤系地层,但不属于煤层顶、底板或夹矸,那么,是否属于火山灰蚀变型高岭石黏土岩?研究区晚古生代沉积早期受中央古隆起影响大,风化壳铝土岩十分发育,而进入二叠系后,华北板块持续沉降背景下,是否会产生局部风化残积型高岭石黏土岩?而山西组山1段发育大规模的三角洲-湖泊沉积,是否属于河湖碎屑沉积型高岭石黏土岩?基于对这套高岭石黏土岩成因的疑惑,本研究利用岩心、普通薄片、扫描电镜、X射线衍射分析(XRD)以及主量元素分析,开展岩石学、矿物学及地球化学特征分析,明确这套高岭石黏土岩的发育特征及成因类型,加深对陇东地区上古生界地质演化的认识,从而更好地指导该区上古生界天然气的勘探开发,同时为中国煤系地层高岭土资源的勘查工作提供一定的理论参考。

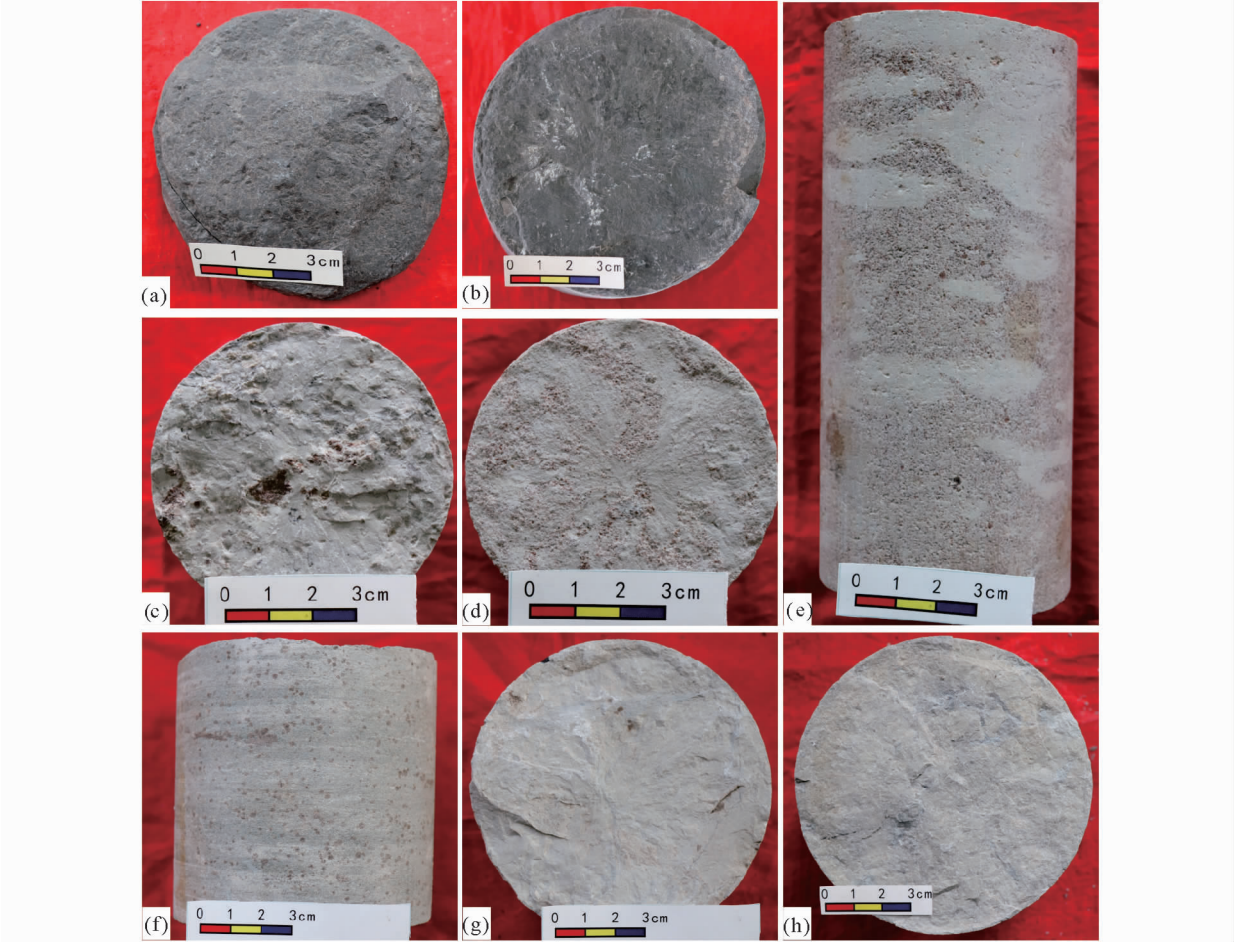
组	深度/m	岩性	0 _{GR} / _{API} 200	岩性描述	沉积环境		
盒8段	3 570			灰白色含砾粗砂岩	辫状河三角洲		
山1段				灰黑色泥岩		曲	
				浅灰色细砂岩	流		
	3 580			灰黑色粉砂质泥岩			河
				灰白色高岭石黏土岩			
				灰色粉砂质泥岩		角	
				灰黑色泥岩	洲		
				灰色粉砂质泥岩			洲
				灰黑色泥岩			
	3 600			灰色粉砂质泥岩		洲	
				灰黑色泥岩	洲		
		灰色泥质粉砂岩		洲			
3 610		灰色粉砂岩					洲
		浅灰色细砂岩				洲	
		灰黑色泥岩			洲		
		灰色粉砂质泥岩		洲			
3 620		浅灰色中砂岩					洲
		灰黑色泥岩				洲	
		重晶石	洲				
		灰色粉砂质泥岩		洲			
		灰黑色泥岩			洲		
3 630		铝土岩				铝土岩风化壳	
太原组			铝土岩				铝土岩风化壳
			铝土岩	铝土岩风化壳			
			铝土岩		铝土岩风化壳		
	3 640		铝土质泥岩			铝土岩风化壳	
奥陶系			奥陶系				
				奥陶系			
					奥陶系		
						奥陶系	

陇东地区城探3区块山西组山1段常见的泥岩颜色为深灰色、灰黑色〔见图3(a)、(b)〕,含植物碎屑化石者颜色略深,局部发育黑色碳质泥岩。灰白色高岭石黏土岩在陇东地区城探3区块大部分地区的钻井中发育,颜色、岩性特征显著,井间

发育厚度不等(2~8 m),呈厚层状分布,与上下地层分界清晰。大部分灰白色高岭石黏土岩中发育浸染状、鲕状、团块状菱铁矿〔见图 3(c)~(f)〕,少量灰白色泥岩不发育菱铁矿〔见图 3(g)~(h)〕。

菱铁矿在灰白色高岭石黏土岩中分布不均匀,垂向上具有明显的变化。灰白色高岭石黏土岩下段多发育浸染状菱铁矿〔见图 3(d)〕,颗粒细小,平均直径约 0.1 mm,分散均匀。中段菱铁

矿多呈稠密浸染状,较下段明显富集,成网脉状〔见图 3(e)〕,颗粒粒径有所增大,平均粒径约 0.2 mm。序列上段菱铁矿颗粒明显增大成鲕状,单颗粒平均粒径 1~2 mm,部分富集成团块状〔见图 3(c)〕。由下而上,菱铁矿颗粒粒径增大,富集程度增加。部分灰白色高岭石黏土岩中不发育菱铁矿或肉眼无法观察到菱铁矿〔见图 3(g)、(h)〕,其中可见灰色条带,疑似植物根茎遗迹〔见图 3(h)〕。



灰黑色泥岩(a~b): (a) C321-08, 3 564.7 m; (b) CT35-10, 3 972.05 m。灰白色高岭石黏土岩: (c~f 灰白色含菱铁矿泥岩 g~h 灰白色泥岩) (c) C316-28, 358 0.28 m; (d) C316-30, 358 1.2 m; (e) C316-32, 3 582.24 m; (f) L55-21, 3 883.2 m; (g) L55-24, 3 884.3 m; (h) LI55-05, 366 9.1 m。

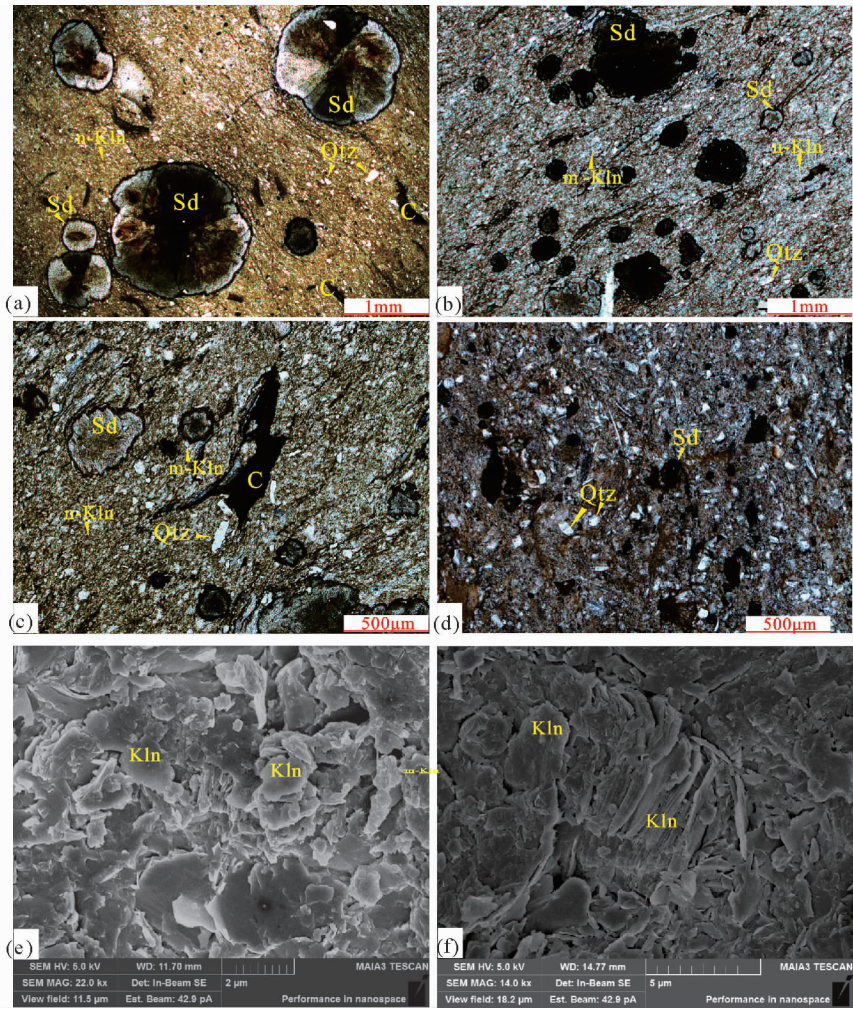
图 3 陇东地区山 1 段常见的灰黑色泥岩与灰白色高岭石黏土岩岩心特征
Fig. 3 Core characteristics of common ash black mudstone and grayish white kaolinite claystone in Shan 1 Member of Longdong Area

含菱铁矿的灰白色高岭石黏土岩普通薄片镜下显示,以高岭石、石英为主,高岭石多呈隐晶质、隐晶质集合体或微晶,单偏光下无色、淡黄色,石英多呈微晶—隐晶状、磨圆以次棱角状—次圆状为主,部分石英颗粒边缘圆化明显,可能与远距离搬运有关〔图 4(a)~(d)〕。扫描电镜下,高岭石

多呈不规则片状,边缘略卷曲,见少量书页状高岭石,区别于结晶程度高时的书页状、蠕虫状〔见图 4(e)、(f)〕。菱铁矿大小不一,镜下特征明显,单偏镜下呈现黄褐色—棕褐色,正高突起,正交镜下具高级白干涉色、十字消光等特征。团块状、鲕状分布的菱铁矿,镜下为直径>1 mm 的放射状颗粒

状,且外缘可见黑色包壳〔见图 4(a),(b)〕,常与炭屑等有机物质共生〔见图 4(a),(c)〕。可见泥质纹层绕菱铁矿发育,越靠近菱铁矿颗粒纹层越紧密〔见图 4(a)〕。浸染状分布的菱铁矿,镜下

显示为直径 0.1 ~ 0.2 mm 的黑色颗粒〔见图 4(c),(d)〕。纯灰白色高岭石黏土岩发育大量隐晶质高岭石及微晶石英颗粒,不发育菱铁矿。



普通薄片:(a) C316-28,3 580.28 m,基质为隐晶状高岭石,石英呈微晶—隐晶状,鲕状菱铁矿粒径多>1 mm,颗粒呈现十字消光特征,可见黑色不透明状炭屑发育,单偏光;(b) C316-30,3 581.2 m,高岭石多呈隐晶质集合体,局部可见微晶,石英多呈微晶状,菱铁矿粒径 0.25 ~ 1 mm,单偏光;(c) C316-32,3 582.24 m,高岭石多呈隐晶质或隐晶质集合体,局部发育高岭石微晶,石英呈微晶状、次棱状,菱铁矿粒径 0.1 ~ 0.5 mm,可见不规则状炭屑,单偏光;(d) L55-21,3 883.2 m,高岭石呈隐晶质集合体,微晶石英多呈次棱—次圆状,发育鲕状、浸染状菱铁矿,粒径多<0.2 mm,单偏光。扫描电镜:(e) C316-32,3 582.24 m,不规则片状高岭石,边缘略卷曲;(f) L55-05,3 669.1 m,高岭石多呈不规则片状,部分略显书页状。

注:n-Kln 高岭石隐晶质或隐晶质集合体;m-Kln 高岭石微晶;Qtz 石英;Sd 菱铁矿;C 炭屑。

图 4 山 1 段灰白色高岭石黏土岩普通薄片及扫描电镜特征

Fig.4 Thin section and SEM characteristics of grayish white kaolinite claystone in Shan 1 Member

XRD 全岩及黏土矿物数据结果显示(见表 1),山 1 段灰白色高岭石黏土岩矿物成分主要为黏土矿物,平均质量分数 74.96%,其次为石英,平均质量分数 14.28%,菱铁矿平均质量分数 10.46%,含极少量的钾长石及斜长石〔见图 5(a)〕。黏土矿物以高岭石为主,平均质量分数

76.2%,其次为绿泥石,平均质量分数为 14.3%,另发育少量伊利石,平均质量分数 7.0%,几乎不发育蒙脱石或伊蒙混层〔见图 5(b)〕。根据黏土岩定义,按照成分将其归属于灰白色高岭石黏土岩。据邵龙义等提出的以碎屑矿物(主要是长英质碎屑矿物)、黏土矿物和内源矿物作为三端元

的三棱柱图解分类方案^[40],辅以颜色,将山 1 段灰白色高岭石黏土岩进一步划分为 3 类:灰白色含菱铁矿高岭石黏土岩、灰白色菱铁矿质高岭石泥岩和灰白色高岭石黏土岩(见图 6)。

表 1 山 1 段灰白色高岭石黏土岩与灰黑色泥岩 XRD 分析数据

Tab. 1 XRD data of grayish white kaolinite claystone in Shan 1 Member

岩石类型	样号	深度/m	全岩矿物成分质量分数/%					黏土矿物成分质量分数/%			
			石英	钾长石	斜长石	菱铁矿	黏土总量	高岭石	绿泥石	伊利石	伊蒙间层
灰白色	C316-28	3 580. 28	4. 7	0. 0	0. 0	13. 2	82. 1	85	15		
含菱铁矿	C316-30	3 581. 20	5. 2	0. 2	0. 0	14. 1	80. 4	89	11		
高岭石	C316-32	3 582. 24	2. 5	0. 2	0. 0	18. 6	78. 7	89	11		
黏土岩	L2724-20	3 996. 79	24. 0	0. 0	0. 0	18. 2	57. 9	64	25	4	7
灰白色菱铁矿质高岭石泥岩	L55-21	3 883. 20	27. 7	0. 0	1. 3	28. 4	42. 6	67	15	18	
	L55-24	3 884. 30	7. 8	0. 0	0. 0	0. 0	92. 2	82	15	3	
灰白色	L55-26	3 884. 40	18. 1	0. 6	0. 0	0. 0	81. 4	85	12	3	
高岭石	L155-05	3 669. 10	20. 0	0. 0	0. 0	0. 0	80. 0	74	12	8	6
黏土岩	L2724-22	3 996. 73	18. 8	0. 0	0. 0	8. 3	72. 8	61	16	11	12
	H7-02	3 913. 30	14. 0	0. 0	0. 7	3. 8	81. 5	66	11	23	
	平均		14. 3	0. 1	0. 2	10. 5	75. 0	76. 2	14. 3	7. 0	2. 5
	C321-08	3 564. 70	55. 5	2. 3	0. 1	9. 8	32. 4	34	13	53	
灰黑色泥岩	L19-10	3 884. 80	41. 4	0.	0. 7	6. 4	51. 5	35	36	14	15
	L53-18	3 927. 70	54. 4	0. 0	0. 0	0. 0	45. 6	10	34	44	12
灰黑色	L53-19	3 928. 30	19. 1	0. 0	0. 0	0. 0	80. 9	8	67	14	11
黏土岩	CT35-10	3 972. 05	27. 5	0. 0	0. 0	0. 0	72. 5	15	47	20	18
	平均		39. 6	0. 5	0. 1	3. 2	56. 6	43. 6	21. 0	24. 2	1. 2

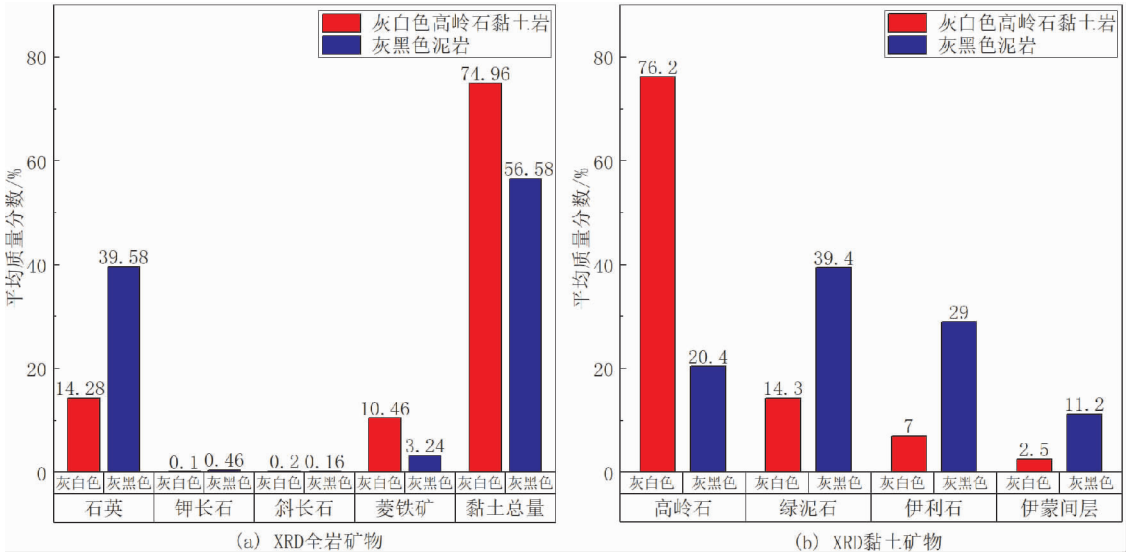
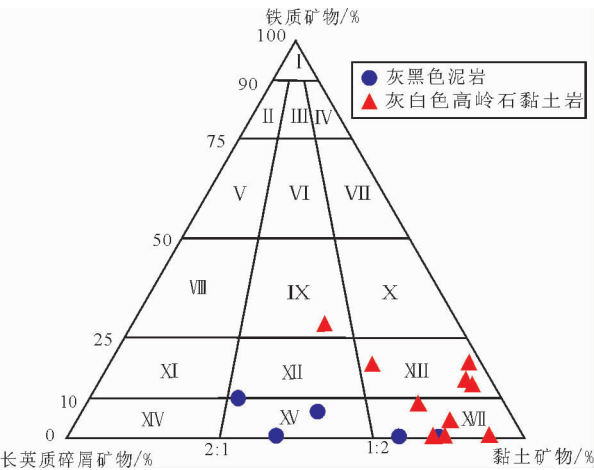


图 5 山 1 段泥岩 XRD 矿物平均含量直方图

Fig. 5 Histogram of average contents of XRD mineral analysis of mudstone in Shan 1 Member

山 1 段常见的灰黑色泥岩与之相比,在矿物成分上有明显的差异,石英质量分数升高(平均质量分数 39.58%),菱铁矿质量分数低(平均质量分数 3.24%),黏土矿物总量下降[见图 5(a)]。灰黑色泥岩的黏土矿物成分中,高岭石质量分数大幅降低,平均质量分数 20.4%,绿泥石

质量分数增高至平均 39.4%,伊利石质量分数明显升高,平均质量分数 29.0%;另外,伊蒙混层明显增加至质量分数平均 11.2%[见图 5(b)]。经三棱柱图解投点,山 1 段灰黑色泥岩可进一步命名为灰黑色泥岩和灰黑色黏土岩(见图 6),为方便研究,本文统称为灰黑色泥岩。



细粒内源沉积岩(×质岩): I (纯)×质岩; II 含粉砂质×质岩; III 含泥质×质岩; IV 含黏土质×质岩; V 粉砂质×质岩; VI 泥质×质岩; VII 黏土质×质岩。细粒陆源沉积岩(泥质岩): VIII ×质粉砂岩; IX ×质泥岩; X ×质黏土岩; XI 含×质粉砂岩; XII 含×质泥岩; XIII 含×质黏土岩; XIV (纯)粉砂岩; XV (纯)泥岩; XVI (纯)黏土岩。

图6 研究区山1段泥岩分类三角图(据文献[40]修改)
Fig. 6 Triangular diagram showing classification scheme of mudstone in Shan 1 Member of study area

4 高岭石黏土岩成因分析

4.1 高岭石结晶度分析

X衍射技术(XRD)能够反映晶体在长程范围的有序/无序特征,根据XRD谱图信息可以确定高岭石的结晶程度及有序度。依据XRD评价高岭石结晶程度的方法较多,常用的有Hinckley指数法(Hi)、(001)峰半高宽法等^[41-43]。研究认为,表生有机胶体化学沉积成因的高岭石的有序度、结晶度一般较高,而陆地搬运再沉积的高岭石的有序度、结晶度较低。火山灰蚀变而成的高岭石,蚀变晚于沉积型高岭石,有序度较沉积型高岭石更低^[21]。

1)Hinckley指数法(Hi)。Hinckley指数法常用于结晶度较好的高岭石。典型的高岭石特征图谱具有强烈而对称的 $d_{001}=7.15\times10^{-1}\text{nm}$ 和 $d_{002}=3.58\times10^{-1}\text{nm}$ 的基面反射峰,在 2θ 为 $18\sim30^\circ$ ($d=4.5\sim4.1\text{\AA}$)这一区间里,结晶好的高岭石具有4条清晰的衍射峰($d_{020}=4.46\text{\AA}$, $d_{1\bar{1}0}=4.36\text{\AA}$, $d_{1\bar{1}\bar{1}}=4.16\text{\AA}$, $d_{1\bar{1}\bar{1}}=4.41\text{\AA}$),峰形尖锐而对称,且随着结晶度的降低,上述4峰逐渐合并成丘状峰。Hinckley指数(Hi)是依据 2θ 区间的

(020)($1\bar{1}0$)和($1\bar{1}\bar{1}$)3个衍射峰的强度比值计算出来的^[42,44]。Hi指数越大,有序化程度越高,结晶度越好;随着Hi指数的减小,无序程度增加^[41,45]。前人通过大量的X射线衍射曲线形态统计,发现不同成因类型的高岭岩中的高岭石Hi指数有一定的分布规律。一般来讲,Hi指数在 $1.04\sim1.65$,为高度有序,常形成于胶体化学结晶作用;Hi指数在 $0.78\sim1.22$,为有序度中等,常由火山灰物质蚀变而来或经受成岩重结晶作用;Hi指数在 $0.25\sim0.99$,为无序,常经陆地流水搬运而来,于盆内低洼处再沉积形成^[46]。

研究区山1段灰白色高岭石黏土岩XRD图谱见图7。研究区16个灰白色高岭石黏土岩样品的Hi指数分布在 $0.15\sim0.30$,平均0.25(见表2)。Hi指数低,反映有序度很低,结晶程度差的特征。显微镜下薄片观察,其高岭石多为隐晶—微晶状,扫描电镜显示高岭石为不规则片状,部分边缘略卷曲,少量呈现书页状[见图4(e)、(f)]。镜下特征反映,样品中高岭石主要为陆地流水搬运后沉积形成,后期受成岩作用影响,部分晶体增大或重结晶。

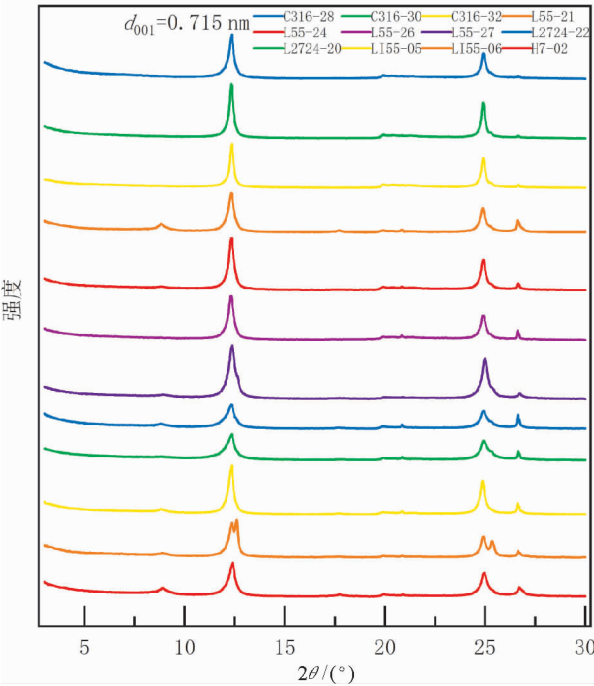


图7 山1段灰白色高岭石黏土岩样品XRD图谱特征
Fig. 7 XRD pattern of grayish white kaolinite claystone samples of Shan 1 Member

2)(001)峰半高宽法。当XRD图谱 2θ 在 $18^\circ\sim30^\circ$ 的4条衍射峰较难区分,($1\bar{1}0$)和($1\bar{1}\bar{1}$)峰分解不清晰,应用Hinckley指数法分析结晶度

较为困难时,可采用(001)峰半高宽法进行表征。两者综合分析,结晶度分析结果更为准确。(001)峰半高宽法是把(001)衍射峰简单地看作是一个三角形,峰的面积等于峰高乘以一半高度

处的宽度,这个半高处的高度即为“半高宽”,简称 FWHM。采用(001)峰半高宽的倒数来表征高岭石的结晶度,半高宽越大,其结晶度越低,矿物越无序^[6,43,47]。

表 2 灰白色高岭石黏土岩样品的 Hinckley 指数(Hi)、001 峰半高宽(FWHM)及结晶度
Tab.2 Hi values, FWHM and the crystallinity of grayish white kaolinite claystone samples

样号	深度/m	Hi	FWHM	结晶度	样号	深度/m	Hi	FWHM	结晶度
C316-28	3 580. 28	0. 15	0. 309	2. 48	L55-27	3 884. 60	0. 27	0. 482	2. 07
C316-30	3 581. 20	0. 30	0. 338	2. 96	L2724-22	3 996. 73	0. 22	0. 586	1. 71
C316-32	3 582. 24	0. 30	0. 403	3. 23	L2724-20	3 996. 79	0. 27	0. 597	1. 68
L55-21	3 883. 20	0. 28	0. 419	2. 39	LI55-05	3 669. 10	0. 28	0. 450	2. 22
L55-24	3 884. 30	0. 29	0. 400	2. 50	LI55-06	3 670. 14	0. 17	0. 576	1. 74
L55-26	3 884. 40	0. 26	0. 459	2. 18	H7-02	3 913. 30	0. 27	0. 531	1. 88

本研究对 16 个样品的 XRD 结果运用 Origin 软件处理图谱并进行峰值拟合分析,结果表明,(001)峰半高宽分布在 0. 269 ~ 0. 567,以其倒数表征的结晶度分布在 1. 68 ~ 3. 23。已知结晶度高的高岭石样品(001)峰半宽高法所得结晶度一般高于 2. 5 ~ 4^[43]。对比可知,研究区样品的结晶度整体为低—中等。其中,C316 井的 3 个样品(001)峰半宽高法所得结晶度为 2. 48 ~ 3. 23,平均为 2. 89,结晶度中等。L55 井的 4 个样品的结晶度为 2. 07 ~ 2. 50,平均为 2. 28,结晶度较低。其余钻井样品的结晶度均较低。从半高宽得出的结晶度可见,研究区高岭石黏土岩并非胶体化学结晶形成,而更倾向于陆相搬运再沉积或火山物质蚀变型成因。

通过高岭石结晶度分析研究区煤系地层山 1 段灰白色高岭石黏土岩的成因,排除胶体化学结晶作用,其有序度、结晶度低,且呈现出再经受成岩作用的影响,应为陆地搬运再沉积形成,按照最新成因分类^[9],应归属为沉积型成因。但是,该地层下伏太原组发育风化壳,铝土岩系中亦发育高岭石富集的黏土岩,风化成因型高岭石结晶度也较低。因此,仍需明确其成因是陆源风化搬运再沉积形成,还是火山灰蚀变沉积成岩形成(即 Tonstein 型),抑或风化成因。

4.2 主量元素分析

研究区灰白色高岭石黏土岩样品的主量元素结果显示(见表 3),其主量元素以 SiO₂ 和 Al₂O₃ 为主。SiO₂ 质量分数最高,平均值 51. 20%; Al₂O₃ 的质量分数在不同的样品中较均衡,平均值 24. 95%。LOI 平均值为 14. 07%。纯净的高岭

石黏土岩与高岭石矿物的理论成分相近,高岭石的化学式为 Al₂O₃ · 2SiO₂ · 2H₂O 或 Al₄[Si₄O₁₀](OH)₈,SiO₂/Al₂O₃ 分子数理论比值为 2. 0^[43]。因含其他杂质,可导致高岭石黏土岩的化学成分偏离高岭石的理论值。整体来看,本研究所有样品的 SiO₂/Al₂O₃ 平均值为 2. 02,符合标准高岭石黏土岩组分的特征。C316 井中的 3 个样品的 SiO₂/Al₂O₃ 比值偏低,平均为 1. 5,较理论值明显负偏,与所含石英减少而铁质矿物较高有关。其余 5 块灰白色高岭石黏土岩样品的 SiO₂/Al₂O₃ 比值接近 2. 0 或者略大于 2. 0,主要与含有较多的石英有关。

研究区灰白色高岭石黏土岩样品含有较多的 TFe₂O₃,但样品间分布不均衡,最高质量分数可达 14. 75%,最低质量分数仅为 1. 87%,平均质量分数为 8. 84%,这与岩心显示菱铁矿等含铁矿物垂向分布不均有关;含有少量的 TiO₂,平均质量分数为 0. 96%,这符合中国大多煤系高岭石黏土岩的 TiO₂ 质量分数特征。TiO₂ 质量分数低可能与泥炭沼泽中的有机酸对钛的溶解并使其流失有关。基本可以排除火山灰蚀变成因,高 TiO₂ 质量分数被认为是火山成因的特点^[48]。K₂O 质量分数同样较低,平均值为 0. 65%,这与岩石中含有少量伊利石有关,钾长石的贡献不大(X 衍射显示样品不含钾长石或含量极低)。MgO、CaO、Na₂O 含量极少,总质量分数约 1. 13%。这与煤系地层有关,煤系地层有机质分解形成的大量有机酸和 CO₂ 形成酸性介质环境,Na₂O、K₂O、MgO、CaO 等碱金属、碱土金属被大量溶解分离而缺失^[49]。山

1 段灰黑色泥岩中 SiO₂ 质量分数明显升高,平均值 63.33%;Al₂O₃ 质量分数和 TFe₂O₃ 明显下降,平均值分别为 19.28%、4.23%;K₂O 质量分数上

升至平均 2.26%,LOI 平均值下降至 8.42%。两种颜色泥岩的主量元素含量有明显差异。

表 3 山 1 段不同类型泥岩主量元素质量分数

Tab. 3 Major elements analyses of different mudstone in Shan 1 Member													%	
岩性	样号	井深/m	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	LOI	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	CIA	CIX
灰白色含菱铁矿高岭石黏土岩	C316-28	3 580.28	40.76	27.25	12.75	0.46	0.46	0.21	0.32	0.87	16.42	1.50	96.31	97.52
	C316-30	3 581.20	44.55	27.76	8.84	0.40	0.38	0.17	0.14	1.02	16.34	1.60	97.54	98.50
	C316-32	3 582.24	38.32	27.90	12.87	0.47	0.40	0.13	0.09	1.21	18.08	1.37	98.16	98.89
	L2724-20	3 996.79	47.19	19.35	14.75	0.42	0.34	0.32	0.47	1.34	14.51	2.44	92.98	94.90
灰白色菱铁矿质高岭石泥岩	L55-21	3 883.20	53.48	20.41	10.82	0.44	0.15	0.24	1.47	0.88	11.50	2.62	90.71	91.13
灰白色高岭石黏土岩	L55-24	3 884.30	54.11	28.32	1.87	0.15	0.12	0.20	0.50	0.95	13.33	1.91	96.53	97.01
	L155-05	3 669.10	60.20	24.60	2.15	0.19	0.13	0.22	1.05	0.51	10.61	2.45	93.59	94.26
	L2724-22	3 996.73	53.90	24.02	6.69	0.34	0.19	0.33	1.18	0.86	11.78	2.24	92.13	92.96
	平均值		49.06	24.95	8.84	0.36	0.27	0.23	0.65	0.96	14.07	2.02	94.74	95.65
	C316-23	3 573.35	65.01	18.27	2.91	0.77	0.27	0.64	2.81	0.66	8.25	3.56	80.16	81.68
灰黑色泥岩	C321-06	3 563.50	68.88	17.31	0.95	0.28	0.24	0.66	1.88	0.63	8.80	3.98	83.13	84.70
	C321-07	3 564.15	60.07	23.30	1.94	0.38	0.19	0.48	1.74	0.40	10.93	2.58	88.66	89.71
	C321-08	3 564.70	62.61	16.77	7.52	0.95	0.25	0.51	2.44	0.59	7.93	3.73	81.40	82.76
	C321-15	3 583.70	65.62	17.93	3.37	0.99	0.61	0.81	2.49	0.60	7.34	3.66	77.89	81.63
	CT35-10	3 972.05	63.41	21.21	2.45	0.42	0.30	0.51	2.26	0.61	8.49	2.99	84.83	86.54
	L19-10	3 884.80	58.63	20.14	7.19	0.97	0.28	0.48	2.83	0.66	8.45	2.91	82.35	83.92
	L53-18	3 927.70	62.38	19.29	7.53	0.65	0.21	0.43	1.60	0.56	7.13	3.23	87.22	88.74
	平均值		63.33	19.28	4.23	0.68	0.29	0.57	2.26	0.59	8.42	3.33	83.21	84.96

注:化学蚀变指数 CIA = [Al₂O₃ / (Al₂O₃ + CaO * + Na₂O + K₂O)] × 100,其中 CaO * 仅为硅酸盐矿物中 CaO 的含量,且当 CaO * > Na₂O 时,CaO * = Na₂O,当 CaO * < Na₂O 时,CaO * = CaO;改进版化学蚀变指数 CIX = [Al₂O₃ / (Al₂O₃ + Na₂O + K₂O)] × 100,公式中的氧化物单位均为摩尔数。

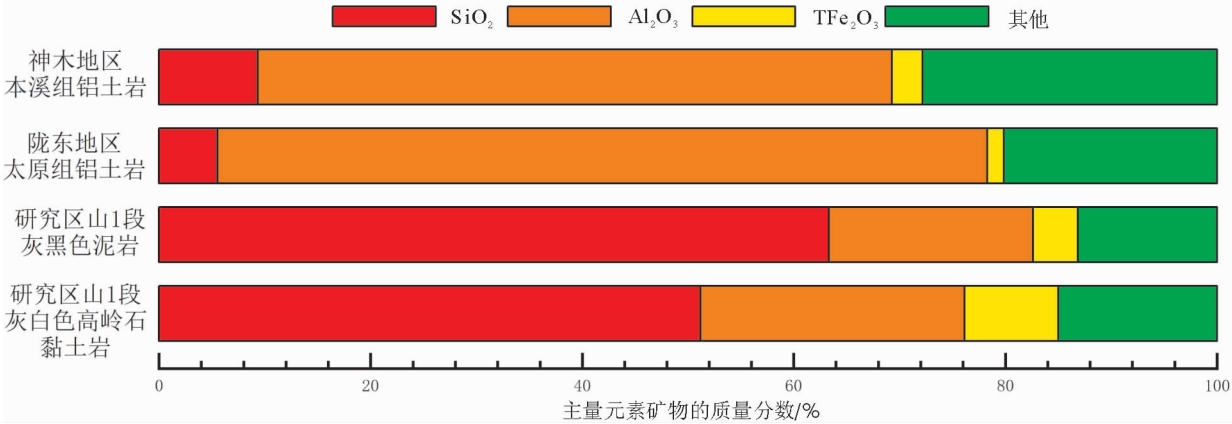
原岩风化层的风化过程实质上是脱硅富铁铝的过程,硅质越少而铁铝质越富集,反映风化越彻底,风化程度越高。陇东地区太原组及榆林地区本溪组铝土岩具有明显的分层段特征,部分层段发育富含高岭石的铝土质泥岩,已明确为风化壳产物。将两处铝土岩与研究区高岭石黏土岩的主量元素特征进行对比(见图 8),可见陇东地区太原组底部铝土岩的主量元素表现为“低 SiO₂、高 Al₂O₃、低 TFe₂O₃”的特点(SiO₂、Al₂O₃、TFe₂O₃ 平均质量分数分别为 5.54%、72.76%、1.57%)^[32],盆地东部榆林—神木地区本溪组铝土岩的主量元素同样表现出“低 SiO₂、高 Al₂O₃、低 TFe₂O₃”的特点(SiO₂、Al₂O₃、TFe₂O₃ 平均质量分数分别为 9.35%、59.92%、2.91%)^[50]。这充分反映两套铝土岩为风化残积成因且风化程度高的特征。而山 1 段灰白色泥岩的主量元素表现为“高 SiO₂、较高 Al₂O₃、较高 TFe₂O₃”的特点,平均质量分数分别为 51.20%、24.95%、8.84%,明显不同于风化壳铝土岩特征,说明研究区山 1 段灰白色泥岩并非风化残积成因。另外,据研究,含煤建造沉积型高岭石黏土岩的 SiO₂/Al₂O₃ 分子数

比值 < 2.0, Al₂O₃ 含量偏高;而风化残积型高岭石黏土岩的 SiO₂/Al₂O₃ 分子数比值 > 2.0,呈现高硅低铝的特征,SiO₂ 含量偏高,这与母岩风化残留石英有关^[6]。研究区灰白色高岭石黏土岩的 SiO₂/Al₂O₃ 分子数比值说明其更符合沉积型成因特征,同时受风化作用影响,本研究认为其属于风化搬运再沉积型成因。

通过主量元素地球化学特征分析,发现山 1 段灰白色高岭石黏土岩的特征与一般灰黑色泥岩的特征存在明显差异,且排除了山 1 段灰白色高岭石黏土岩火山灰蚀变成因(Tonstein 型)及风化残积成因,明确了其为陆源风化搬运再沉积的产物,归属于沉积型成因类型。

4.3 化学风化强度分析

源区母岩中的主量元素随化学风化的进程会发生稳定元素聚集、不稳定元素流失的分异作用,因此,稳定元素与不稳定元素的比值可作为评判源区化学风化程度的指标。化学风化反应程度受制于气候条件,寒冷干旱气候下风化作用较弱,而温暖潮湿气候下化学风化较强^[51]。



注:陇东地区太原组铝土岩数据引自文献[32];神木地区本溪组铝土岩数据引自文献[50]。

图 8 研究区山 1 段泥岩、榆林地区及陇东地区风化壳铝土岩的主要元素分布对比

Fig. 8 Comparison of major element contents among mudstone of Shan 1 Member in study area and weathering crust bauxite in Yulin Area and Longdong Area

本研究选取化学蚀变指数 (Chemical index of alteration, 缩写 CIA) 来表征岩石样品母岩的风化程度。 $CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)] \times 100$, 其中各化合物含量为摩尔质量。CIA 随着化学风化程度的增强而明显增加。一般认为: CIA 值为 50 ~ 65 时, 反映低化学风化强度, 形成于较寒冷的气候条件; CIA 值为 65 ~ 85 时, 反映化学风化强度中等, 形成于温暖湿润的气候条件; CIA 值 > 85 时, 反映存在很高的化学风化强度以及炎热潮湿的气候条件^[52-53]。将主要元素氧化物的单位换算为摩尔数后, 计算研究区山西组山 1 段灰白色高岭石黏土岩样品的 CIA 值 (见表 3) 分布在 90.71 ~ 98.16, 平均值为 94.74,

反映岩石母源区高的化学风化强度和潮湿炎热的气候条件。另外, 对比同一钻井不同深度的灰白色高岭石黏土岩样品的 CIA 值, 可见随深度的减小, CIA 值变小, 反映早期化学风化强度较强, 后期化学风化逐渐减弱的特征 (见表 3)。因 CIA 值易受成岩过程中胶结作用导致的 Ca 的二次富集影响, 本研究另外计算了不考虑 CaO 的化学蚀变指数 (Chemical Index of Alteration that does not consider CaO, 缩写 CIX)。灰白色高岭石黏土岩 CIX 值与 CIA 值呈正线性相关, 相关系数 $R^2 = 0.9698$, 表明本次样品几乎不受碳酸盐胶结作用的影响 (见图 9)。

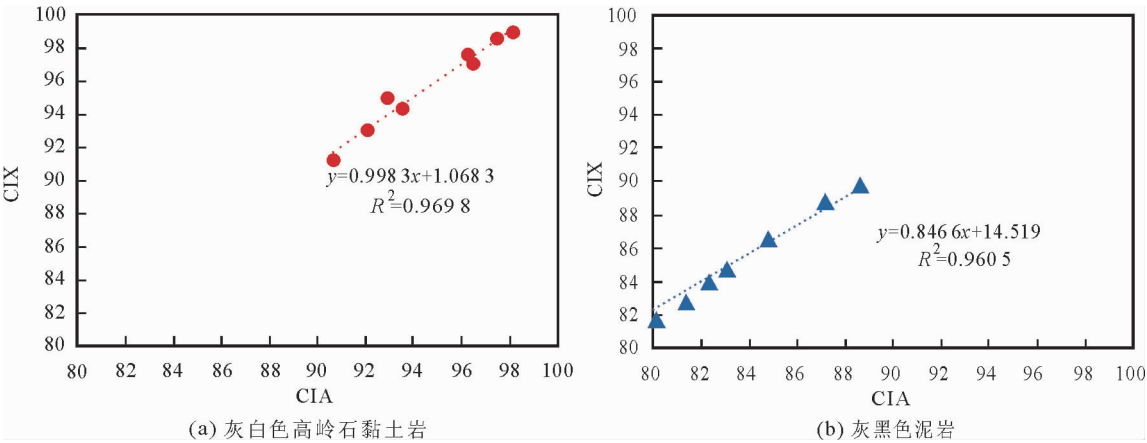


图 9 灰白色高岭石黏土岩与灰黑色泥岩的 CIA 与 CIX 相关性

Fig. 9 Correlation of CIA with CIX of grayish white kaolinite claystone and ash black mudstone

5 地质意义

成因分析认为,陇东地区山1段灰白色高岭石黏土岩属于沉积成因型高岭岩,其物质来源主要为陆地搬运来的高岭石黏土矿物,且陇东地区山西组山1段沉积时,其物源区存在强烈的化学风化作用和有利于化学风化发生的潮湿炎热的气候条件。结合前人对于物源的研究可知,陇东地区物源区或为北秦岭造山带,在山西组山1段沉积期存在过构造抬升事件或强烈的气候环境转换,导致物源区强烈的化学风化作用发生。前人通过大量沉积学证据,认为陇东地区山西组山1段发育浅水三角洲及湖泊沉积体系^[54-55],而正宁—合水一带进入三角洲前缘及浅湖沉积。陇东地区山西组山1段高岭石黏土岩的形成过程可总结为:物源区的酸性火成岩^[56]在潮湿炎热的气候条件和岩体抬升的构造环境下发生强烈的表生风化作用,山西组煤系地层的酸性水介质环境促进了高岭石风化产物的形成;随后,在陇东地区发育的曲流河三角洲水体流动的作用下,搬运至水体安静的低洼处后再沉积而成。因此,山1段高岭石黏土岩的发育反映了物源区在山西组沉积后期构造活动的存在以及潮湿炎热的气候转化。

从测井曲线上看,研究区山1段灰白色高岭石黏土岩的自然伽马值较高,多大于160~180 API,在缺乏岩心资料的情况下,可通过测井曲线进行识别。因其风化搬运再沉积的成因属性,形成速率较快,平面上分布较广,在研究区分流间湾、浅湖等静水环境均有发育,因此可作为地层对比良好的标志层进行小层对比划分,具有地层内部事件地层学的地质意义。

菱铁矿是铁的碳酸盐矿物,在上古生界煤系地层中较为常见,且多见于湖泊、沼泽沉积中。研究区山1段高岭石黏土岩中菱铁矿的铁物质来自于物源区古陆的风化剥蚀。北秦岭构造带的陆源风化产物随地表水流输送至研究区,为菱铁矿的形成提供了铁源。菱铁矿的形成和保存需要稳定发育的弱还原环境^[57]。山1段三角洲前缘及浅湖具备稳定的覆水还原环境,三角洲前缘分流间湾及浅湖湖湾水体安静,使得铁质聚集而不易散失,这为菱铁矿的发育及富集提供了有利的弱还原环境;岩心及薄片并未观察到黄铁矿,也能说明成岩环境未达到强还原的条件。菱铁矿的形成

除了铁源,还需要充足的 CO_3^{2-} 存在。山1段不发育碳酸盐岩,缺乏无机碳,但所属煤系地层,植物炭屑大量发育,所含有机质在参与微生物分解作用及热脱羧反应过程中,会形成 CO_2 并转化为 CO_3^{2-} ^[58-59],与 Fe^{2+} 化合形成菱铁矿。菱铁矿是一种典型的成岩矿物,大多数形成于成岩期。在薄片镜下观察可见泥质纹层绕菱铁矿发育,且越靠近菱铁矿颗粒纹层越紧密[见图4(a)],推测这些鲕状菱铁矿形成于同生成岩阶段。菱铁矿的发育也为研究区发育弱还原环境的三角洲前缘—浅湖沉积提供了证据。

6 结论

1) 陇东地区山西组山1段煤系地层中发育的灰白色高岭石黏土岩,其主要成分为黏土矿物(平均质量分数74.96%),其次为石英(平均质量分数14.28%)和菱铁矿(平均质量分数10.46%),黏土矿物以高岭石为主(平均质量分数76.2%),高岭石多为隐晶质集合体,石英多为微晶状,菱铁矿多呈团块状、鲕状、浸染状。其岩石学特征明显区别于山西组常见的灰黑色泥岩,可进一步划分为灰白色含菱铁矿高岭石黏土岩、灰白色菱铁矿质高岭石泥岩和灰白色高岭石黏土岩等3种类型。

2) 山1段灰白色高岭石黏土岩成因分析发现,XRD图谱显示高岭石结晶度整体较低,反映高岭石黏土岩为陆源搬运再沉积或火山物质蚀变型成因;主量元素特征显示, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 分子数比值为2.02,具有高 SiO_2 、较高 Al_2O_3 、较高 TFe_2O_3 以及极低 TiO_2 、 K_2O 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 的特征,反映并非火山灰蚀变成因,也区别于风化残积型岩石特征。研究认为,山1段灰白色高岭石黏土岩为风化搬运再沉积型成因,属于沉积型成因;化学蚀变指数90.71~98.16,指示其形成时具备强烈的化学风化作用。

3) 研究区山1段高岭石黏土岩的发育反映了陇东地区物源区构造活动的存在以及潮湿炎热的气候转化。物源区强烈的表生风化作用产生大量的高岭石风化产物,并经地表水流搬运至分流间湾等水体安静处沉积而成。高自然伽马的测井曲线特征及成因属性,使其可作为小层对比划分的标志层,具有事件地层学的地质意义。高岭石黏土岩中发育的菱铁矿也为研究区发育弱还原环

境的三角洲前缘—浅湖沉积提供证据。

参考文献

[1] 陈骏,王鹤年. 地球化学 [M]. 北京:科学出版社, 2005.

[2] 武强,涂坤,曾一凡. “双碳”目标愿景下我国能源战略形势若干问题思考 [J]. 科学通报, 2023, 68 (15): 1884-1898.

WU Q, TU K, ZENG Y F. Research on China's energy strategic situation under the carbonpeaking and carbonneutrality goals [J]. Science Bulletin, 2023, 68 (15): 1884-1898.

[3] 申继学,马鸿文. 高岭土资源及高岭石合成技术研究进展 [J]. 硅酸盐通报, 2016, 35 (4): 1150-1158.

SHEN J X, MA H W. Kaolin resources and advances on synthesis techniques of kaolinite[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(4): 1150-1158.

[4] 廖紫慧,王春连,黄可可,等. 中国高岭土矿床的分布、类型、应用及找矿远景[J]. 中国地质, 2025, 52 (4): 1-17.

LIAO Z H, WANG C L, HUANG K K, et al. Distribution, types, applications and prospecting of kaolin deposits in China [J]. Geology in China, 2025, 52 (4): 1-17.

[5] 元春英,刘星,周跃飞. 高岭土的综合利用与发展前景 [J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2003, 28 (2): 4-7.

QI C Y, LIU X, ZHOU Y F. Kaolin's comprehensive utilization and developing prospect [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Science and Technology), 2003, 28(2): 4-7.

[6] 崔晓南,黄文辉,敖卫华,等. 漳州风化残积型高岭土矿床的矿物学特征 [J]. 矿物学报, 2016, 36 (3): 377-381.

CUI X N, HUANG W H, AO W H, et al. Mineralogical features of weathered residual kaolin deposit in Zhangzhou Area, China [J]. Acta Mineralgica Sinica, 2016, 36(3): 377-381.

[7] 吴铁轮. 我国高岭土行业现状及发展前景 [J]. 非金属矿, 2000, 23(2): 5-7.

WU T L. Kaolin industry status and development prospects in China [J]. Nonmetallic Ore, 2000, 23(2): 5-7.

[8] 郑直,吕达人,冯墨林. 中国高岭土矿床[M]. 北京:地质出版社,1994.

[9] 程宏飞,高宇龙,梁绍暹,等. 中国高岭土(岩)矿床新成因分类 [J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(5): 1110-1117.

CHENG H F, GAO Y L, LIANG S X, et al. New genetic classification of kaolin deposits in China [J]. Journal of Earth Science and Environment, 2023, 45 (5): 1110-1117.

[10] 孙升林,吴国强,曹代勇,等. 煤系矿产资源及其发展趋势 [J]. 中国煤炭地质, 2014, 26(11): 1-11.

SUN S L, WU G Q, CAO D Y, et al. Mineral resources in coal measures and development trend [J]. Coal Geology of China, 2014, 26(11): 1-11.

[11] 张帅,刘钦甫,程宏飞,等. 我国煤系高岭土的研究进展 [J]. 中国非金属矿工业导刊, 2012(3): 4-6,35.

ZHANG S, LIU Q F, CHENG H F, et al. Research progress of coal-bearing kaolinite in China [J]. China Non-metallic Mineral Industry, 2012(3): 4-6,35.

[12] 张利珍,吕子虎,谭秀民,等. 我国煤系共伴生矿物资源及开发利用现状 [J]. 中国矿业, 2012, 21 (11): 59-61.

ZHANG L Z, LYU Z H, TAN X M, et al. Resources survey and exploitation situation of coal-derived minerals in China [J]. China Mining Magazine, 2012, 21 (11): 59-61.

[13] 刘钦甫,杨晓杰,张鹏飞,等. 中国煤系高岭岩(土)资源成矿机理与开发利用 [J]. 矿物学报, 2002, 22(4): 359-364.

LIU Q F, YANG X J, ZHANG P F, et al. Mineralization mechanism of kaolinitic rocks in China's coal measures, and their development and utilizaion [J]. Acta Mineralgica Sinica, 2002, 22(4): 359-364.

[14] WANG L J, LYU D W, ZHANG Z H, et al. Geochronology, mineralogy, and geochemistry of the tonsteins from the permo-carboniferous Benxi Formation, Ordos Basin, North China Craton [J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2023, 97(5): 1355-1371.

[15] PAUL C. An appalachian isochron: A kaolinized carboniferous air-fall volcanic-ash deposit [J]. Geological Society of America Bulletin, 1992, 104 (11): 1515-1527.

[16] 彭格林,钟蓉. 华北西缘太原组火山事件沉积的发现及太原组地层对比 [J]. 现代地质, 1995, 9 (1): 108-118,137.

PENG G L, ZHONG R. Discovery of volcanic event deposits and stratigrafic correlation of Taiyuan Formation in western margin of north China [J]. Geoscience, 1995, 9(1): 108-118,137.

[17] 周义平, BURGER K, 汤大忠. 中国西南地区晚二

- 叠世含煤岩系中黏土岩夹矸(TONSTEINS)研究的新进展[J]. 云南地质, 1988, 7(3): 213-228.
- ZHOU Y P, BURGER K, TANG D Z. A new development of research on the tonsteins (glay rock partings) in late Permian coal measures, southwest China [J]. Yunnan Geology, 1988, 7(3): 213-228.
- [18] 梁绍暹, 王水利, 姚改焕. 华北聚煤区火山灰蚀变黏土岩夹矸的研究[J]. 中国煤田地质, 1995, 7(1): 59-63.
- LIANG S X, WANG S L, YAO G H. Study of synsedimentary volcanic-ash-deriver clayrock bands in carboniferous-permian coal-bearing formation of north China [J]. Coalfield Geology of China, 1995, 7(1): 59-63.
- [19] 冯宝华. 我国北方石炭—二叠纪火山灰沉积水解改造而成的高岭岩[J]. 沉积学报, 1989, 7(1): 101-108.
- FENG B H. Carboniferous-Permian tonsteins formed by hydrolytic reformation of volcanic ash sediments in northern China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1989, 7(1): 101-108.
- [20] 肖万山. 大同煤田煤系高岭土矿地质特征及成因探讨[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2023(1): 20-23.
- XIAO W S. Geological characteristics and genesis of coal-series kaolinite deposits in Datong coalfield [J]. China Non-metallic Mineral Industry, 2023(1): 20-23.
- [21] 张鹏飞. 含煤岩系沉积学研究的几点思考[J]. 沉积学报, 2003, 21(1): 125-128.
- ZHANG P F. Some problems on lithofacies paleogeography in oil and gas area [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(1): 125-128.
- [22] 焦丽香, 郭加朋, 程伟. 山东高岭土矿成矿特征及成矿规律探讨[J]. 山东国土资源, 2021, 37(1): 10-18.
- JIAO L X, GUO J P, CHENG W. Study on metallogenic characteristics and regularity of kaolin in Shandong Province [J]. Shandong Land and Resources, 2021, 37(1): 10-18.
- [23] 蒙晓灵, 艾庆琳, 王金成, 等. 鄂尔多斯盆地庆阳气田深层致密砂岩气藏成藏条件[J]. 天然气勘探与开发, 2021, 44(1): 104-110.
- MENG X L, AI Q L, WANG J C, et al. Reservoir-forming conditions of deep tight sandstone gas reservoirs, Qingyang Gasfield, Ordos Basin [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2021, 44(1): 104-110.
- [24] 付金华, 魏新善, 罗顺社, 等. 庆阳深层煤成气大气田发现与地质认识[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(6): 1047-1061.
- FU J H, WEI X S, LUO S S, et al. Discovery and geological knowledge of the large deep coal-formed Qingyang Gas Field, Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(6): 1047-1061.
- [25] 付金华, 范立勇, 刘新社, 等. 鄂尔多斯盆地天然气勘探新进展、前景展望和对策措施[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(4): 418-430.
- FU J H, FAN L Y, LIU X S, et al. New progresses, prospects and countermeasures of natural gas exploration in the Ordos Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(4): 418-430.
- [26] 何登发, 包洪平, 孙方源, 等. 鄂尔多斯盆地中央古隆起的地质结构与成因机制[J]. 地质科学, 2020, 55(3): 627-656.
- HE D F, BAO H P, SUN F Y, et al. Geologic structure and genetic mechanism for the central uplift in the Ordos Basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2020, 55(3): 627-656.
- [27] 雷小乔. 论鄂尔多斯盆地中央古隆起对石炭—二叠纪聚煤作用的控制[J]. 中国煤炭地质, 2020, 32(5): 1-6.
- LEI X Q. Study on central paleouplift control on Permian-Carboniferous coal accumulation in Ordos Basin [J]. Coal Geology of China, 2020, 32(5): 1-6.
- [28] 孟卫工, 李晓光, 吴炳伟, 等. 鄂尔多斯盆地宁古3井太原组含铝岩系天然气成藏特征及地质意义[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(3): 79-87.
- MENG W G, LI X G, WU B W, et al. Research on gas accumulation characteristics of aluminiferous rock series of Taiyuan Formation in Well Ninggu 3 and its geological significance, Ordos Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(3): 79-87.
- [29] 付金华, 李明瑞, 张雷, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区铝土岩天然气勘探突破与油气地质意义探索[J]. 天然气工业, 2021, 41(11): 1-11.
- FU J H, LI M R, ZHANG L, et al. Breakthrough in the exploration of bauxite gas reservoir in Longdong area of the Ordos Basin and its petroleum geological implications [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(11): 1-11.
- [30] 杜广宏, 姚泾利, 张盟勃, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区构造特征及其对古生界铝土岩气藏的控制作用[J]. 天然气地球科学, 2024, 35(8): 1387-1395.
- DU G H, YAO J L, ZHANG M B, et al. Tectonic background and controlling factors of Palaeozoic bauxite for-

- mation in Longdong area of Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2024, 35(8): 1387-1395.
- [31] 姚泾利, 石小虎, 杨伟伟, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区二叠系太原组铝土岩系储层特征及勘探意义[J]. *沉积学报*, 2023, 41(5): 1583-1597.
- YAO J L, SHI X H, YANG W W, et al. Reservoir characteristics and exploration significance of the Permian Taiyuan Formation bauxite series in the Longdong area of the Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023, 41(5): 1583-1597.
- [32] 王慧玲, 姚泾利, 石小虎, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区太原组铝土岩系地球化学特征及其地质意义[J]. *天然气地球科学*, 2024, 35(8): 1502-1517.
- WANG H L, YAO J L, SHI X H, et al. Geochemical characteristics and geological significance of the Taiyuan Formation bauxite series in the Longdong area of the Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2024, 35(8): 1502-1517.
- [33] 郭艳琴, 赵灵生, 郭彬程, 等. 鄂尔多斯盆地及周缘地区下二叠统沉积特征[J]. *古地理学报*, 2021, 23(1): 65-80.
- GUO Y Q, ZHAO L S, GUO B C, et al. Sedimentary characteristics of the lower Permian in Ordos Basin and its adjacent areas [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2021, 23(1): 65-80.
- [34] 李文厚, 张倩, 李克永, 等. 鄂尔多斯盆地及周缘地区晚古生代沉积演化[J]. *古地理学报*, 2021, 23(1): 39-52.
- LI W H, ZHANG Q, LI K Y, et al. Sedimentary evolution of the late Paleozoic in Ordos Basin and its adjacent areas [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2021, 23(1): 39-52.
- [35] 夏辉, 王龙, 张道锋, 等. 鄂尔多斯盆地庆阳气田二叠系山西组山 1 段层序结构与沉积演化及其控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(6): 1397-1412.
- XIA H, WANG L, ZHANG D F, et al. Sequence architecture, sedimentary evolution and controlling factors of the Permian Shan-1 Member, Qingyang gas field, southwestern Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(6): 1397-1412.
- [36] 罗顺社, 潘志远, 吕奇奇, 等. 鄂尔多斯盆地西南部上古生界碎屑锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. *中国地质*, 2017, 44(3): 556-574.
- LUO S S, PAN Z Y, LYU Q Q, et al. The Upper Paleozoic detrital zircon U-Pb geochronology and its tectonic significance in southwestern Ordos Basin [J]. *Geology in China*, 2017, 44(3): 556-574.
- [37] 王峰, 刘新社, 赵伟波, 等. 鄂尔多斯盆地南部二叠系砂岩碎屑锆石年代学特征及地质意义[J]. *沉积学报*, 2023, 41(5): 1396-1413.
- WANG F, LIU X S, ZHAO W B, et al. Detrital zircon U-Pb geochronology characteristics of Permian sandstone and its constraints on the tectonic evolution of the southern Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023, 41(5): 1396-1413.
- [38] SUN J P, YANG L, DONG Y P, et al. Permian tectonic evolution of the southwestern Ordos Basin, North China: Integrating constraints from sandstone petrology and detrital zircon geochronology[J]. *Geological Journal*, 2020, 55(12): 8068-8091.
- [39] CUI H, ZHU S F, TAN M X, et al. Depositional and diagenetic processes in volcanic matrix-rich sandstones from the Shanxi and Shihezi formations, Ordos Basin China: Implication for volcano-sedimentary systems [J]. *Basin Research*, 2022, 34(6): 1859-1893.
- [40] 邵龙义, 张天畅. 泥质岩定义及分类问题的探讨[J]. *古地理学报*, 2023, 25(4): 742-751.
- SHAO L Y, ZHANG T C. Discussion on definition and classification of mudrock [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2023, 25(4): 742-751.
- [41] 许乃岑, 沈加林, 骆宏玉. X 射线衍射和红外光谱法分析高岭石结晶度[J]. *资源调查与环境*, 2014, 35(2): 152-156.
- XU N C, SHEN J L, LUO H Y. Analysis for crystallinity of kaolinites by X-ray diffractometer and infrared spectroscopy [J]. *Resources Survey and Environment*, 2014, 35(2): 152-156.
- [42] HINCKLEY D N. Variability in "crystallinity" values among the kaolin deposits of the Coastal Plain of Georgia and South Carolina [J]. *Clays and Clay Minerals*, 1963, 11: 229-235.
- [43] 魏俊峰. 风化型和含煤建造沉积型高岭土的物质组成对比研究[J]. *华东地质学院学报*, 2000, 23(3): 184-187.
- WEI J F. A comparative study on material composition between weathering residual kaolin and coal bearing formation sedimentary one [J]. *Journal of East China Geological Institute*, 2000, 23(3): 184-187.
- [44] 赵杏媛, 张有瑜. 黏土矿物与黏土矿物分析[M]. 北京: 海洋出版社, 1990.
- [45] 陈双喜, 冯敏, 方磐. 安徽淮北等地高岭石有序度研究[J]. *安徽地质*, 1992, 2(1): 60-65.
- CHEN S X, FENG M, FANG P. Study on the order state of kaolinites in Huaibei and etc., Anhui [J]. *Geology of Anhui*, 1992, 2(1): 60-65.

- [46] 刘钦甫, 许红亮, 张鹏飞. 煤系不同类型高岭岩中高岭石结晶度的区别 [J]. 煤炭学报, 2000, 25 (6): 576-580.
LIU Q F, XU H L, ZHANG P F. Crystallinity difference for various origin of kaolinites in coal measures [J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25 (6): 576-580.
- [47] 赵明, 季峻峰, 陈振岩, 等. 大民屯凹陷古近系高岭石亚族和伊/蒙混层矿物特征与盆地古温度 [J]. 中国科学:地球科学, 2011, 41(2): 169-180.
ZHAO M, JI J F, CHEN Z Y, et al. Evolution of kaolinite subgroup minerals and mixed-layer illite/smectite in the Paleogene Damintun Depression in Liaohhe Basin of China and its implication for paleotemperature. [J]. Science China Earth Sciences, 2011, 41 (2): 169-180.
- [48] 刘钦甫, 张鹏飞. 华北晚古生代煤系高岭岩物质组成和成矿机理研究 [M]. 北京: 海洋出版社, 1997.
- [49] 赵存良. 鄂尔多斯盆地与煤伴生多金属元素的分布规律和富集机理 [D]. 北京: 中国矿业大学 (北京), 2015.
- [50] 潘博, 赵伟波, 刘蝶, 等. 鄂尔多斯盆地神木—米脂地区本溪组含铝岩系地球化学特征 [J]. 天然气地球科学, 2023, 34(6): 1072-1089.
PAN B, ZHAO W B, LIU D, et al. Geochemical characteristics of the Benxi Formation aluminum bearing rock series in the Shenmu-Mizhi area of the Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34 (6): 1072-1089.
- [51] 李雅楠. 华北板块石炭—二叠纪冰室期—温室期古环境记录 [D]. 北京: 中国矿业大学 (北京), 2021.
- [52] NESBITT H W, MARKOVICS G. Weathering of granodioritic crust long-term storage of elements in weathering profiles and petrogenesis of siliciclastic sediments [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1997, 61 (8): 1653-1670.
- [53] 罗婷婷, 周立发. 鄂尔多斯盆地南缘下石盒子组碎屑岩地球化学特征 [J]. 西北大学学报 (自然科学版), 2013, 43(5): 765-775.
LUO T T, ZHOU L F. Geochemistry characteristic of the clastic rocks from Xiashihezi Formation in the South of Ordos Basin [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2013, 43(5): 765-775.
- [54] 贺敬聪. 鄂尔多斯盆地陇东地区盒8段山1段“源汇”系统研究 [D]. 北京: 中国石油大学 (北京), 2017.
- [55] 朱世发, 崔航, 陈嘉豪, 等. 浅水三角洲沉积体系与储层岩石学特征——以鄂尔多斯盆地西部地区山1—盒8段为例 [J]. 沉积学报, 2021, 39 (1): 126-139.
ZHU S F, CUI H, CHEN J H, et al. Sedimentary system and sandstone reservoir petrology of a shallow-water delta: Case study of the Shan-1 and He-8 members in the western Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(1): 126-139.
- [56] 贺敬聪, 朱筱敏, 李明瑞, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区二叠系山西组—石盒子组母岩类型和构造背景 [J]. 古地理论, 2017, 19(2): 285-298.
HE J C, ZHU X M, LI M R, et al. Parent rock types and tectonic setting of the Permian Shanxi and Shihezi Formations in Longdong Area, Ordos Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2017, 19(2): 285-298.
- [57] 侯中帅, 梁钊, 陈世悦. 华北东部晚古生代过渡相煤系地层低阻成因、控制因素与地质意义 [J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(3): 159-168.
HOU Z S, LIANG Z, CHEN S Y. Genesis, controlling factors and geological significance of low resistivity in Late Paleozoic transitional coal measures in Eastern North China [J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(3): 159-168.
- [58] 朱祥坤, 张衍, 张飞飞, 等. 蓟县中元古界下马岭组中菱铁矿的发现及其意义 [J]. 地质论评, 2013, 59(5): 816-822.
ZHU X K, ZHANG K, ZHANG F F, et al. Discovery of siderite concretions in Mesoproterozoic Xiamaling Formation Jixian Section [J]. Geological Review, 2013, 59(5): 816-822.
- [59] WANG D D, MAO Q, LIU K Y, et al. Genetic mechanism of Carboniferous-Permian coal measures siderite nodules in an epicontinental sea basin: An example from the Zibo area in North China [J]. Ore Geology Reviews, 2023, 154: 105254.

(编辑 雷雁林)