



引文格式: 王飞, 张一岚, 王小朗, 等. 陕西佳县王家砭高岭土矿地质特征、矿床成因及利用方向[J]. 西北地质, 2025, 58(2): 274-287. DOI: 10.12401/j.nwg.2024106

Citation: WANG Fei, ZHANG Yilan, WANG Xiaolang, et al. Geological Characteristics, Genesis and Resource Utilization of the Wangjiabian Kaolin Deposit in Jiaxian, Shaanxi Province[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(2): 274-287. DOI: 10.12401/j.nwg.2024106

陕西佳县王家砭高岭土矿地质特征、 矿床成因及利用方向

王飞^{1,2}, 张一岚², 王小朗³, 牛如², 雷东², 刘锦²

(1. 陕西地矿创新研究院有限公司, 陕西 西安 710054; 2. 西安地质矿产勘查开发院有限公司, 陕西 西安 710100;
3. 陕西地矿集团有限公司, 陕西 西安 710054)

摘要: 鄂尔多斯是在古生代华北克拉通盆地基础上发育的中新生代沉积盆地, 是中国重要的多能源和矿产共存富集地与产地。下侏罗统富县组是在印支运动后期三叠系抬升遭受侵蚀形成的剥蚀面上填平补齐沉积的产物, 陕西佳县王家砭高岭土矿赋存于鄂尔多斯盆地东缘下侏罗统富县组“细富县”砂岩-黏土岩建造中, 具有很大的找矿潜力。但其地质特征、矿床成因及利用方向仍不明确, 制约了区内高岭土矿的勘查与开发。笔者在总结该高岭土矿地质特征的基础上, 对矿层的 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、TiO₂、K₂O、Na₂O、CaO、MgO、MnO、烧失量、白度等以及烧成收缩率、耐火度、可塑性指数、干燥收缩率、烧结温度等物理性能指标进行了测试和实验, 探讨了矿床成因、构造背景, 总结了找矿标志, 对矿石品质进行了初步评价, 并提出了利用建议。

关键词: 王家砭高岭土矿; 鄂尔多斯盆地; 地质特征; 矿床成因; 利用方向; 陕西佳县

中图分类号: P611.2; P581

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)02-0274-14

Geological Characteristics, Genesis and Resource Utilization of the Wangjiabian Kaolin Deposit in Jiaxian, Shaanxi Province

WANG Fei^{1,2}, ZHANG Yilan², WANG Xiaolang³, NIU Ru², LEI Dong², LIU Jin²

(1. Shaanxi Geological and Mineral Innovation Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Xi'an Institute of Geological and Mineral Exploration Co., Ltd., Xi'an 710100, Shaanxi, China; 3. Shaanxi Geology and Mining Group Co., Ltd., Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Ordos is a Mesozoic-Cenozoic sedimentary basin developed on the basis of the Paleozoic North China craton, and is an important multi-energy and mineral resource-rich and concentrated location and production area in China. The lower Jurassic Fuxian Formation is the product of filling in the eroded and dissected surface formed by the Indosinian movement on the Triassic uplift. The Wangjiabian kaolin deposit in Jiaxian, Shaanxi

收稿日期: 2024-08-06; 修回日期: 2024-11-19; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 陕西地矿集团有限公司科研专项资金项目(KY202122), 佳县王家砭高岭土矿调查评价项目(YLXD2017-邀 020) 联合资助。

作者简介: 王飞(1984-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事矿产勘查、成矿作用与成矿预测研究。E-mail: wangfeix@126.com。

province is hosted in the sandstone-claystone structure of "the fine Fuxian" of the Lower Jurassic Fuxian Formation in the eastern margin of Ordos Basin, with great potential for mineral exploration. However, the geological characteristics, ore deposit genesis, and resource utilization of the deposit are still unclear, which restricts the exploration and development of kaolin deposit in this area. Based on the geological characteristics of this kaolin deposit, this paper conducted tests the chemical composition of SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , K_2O , Na_2O , CaO , MgO , MnO , volatile loss, whiteness and other physical properties, as well as the firing shrinkage rate, heat resistance, plasticity index, dry shrinkage rate, firing temperature and other physical properties, discussed the genesis and tectonic setting, summarized the exploration indicators, preliminarily evaluated the quality of the ore stone, and suggestions for resource utilization were proposed.

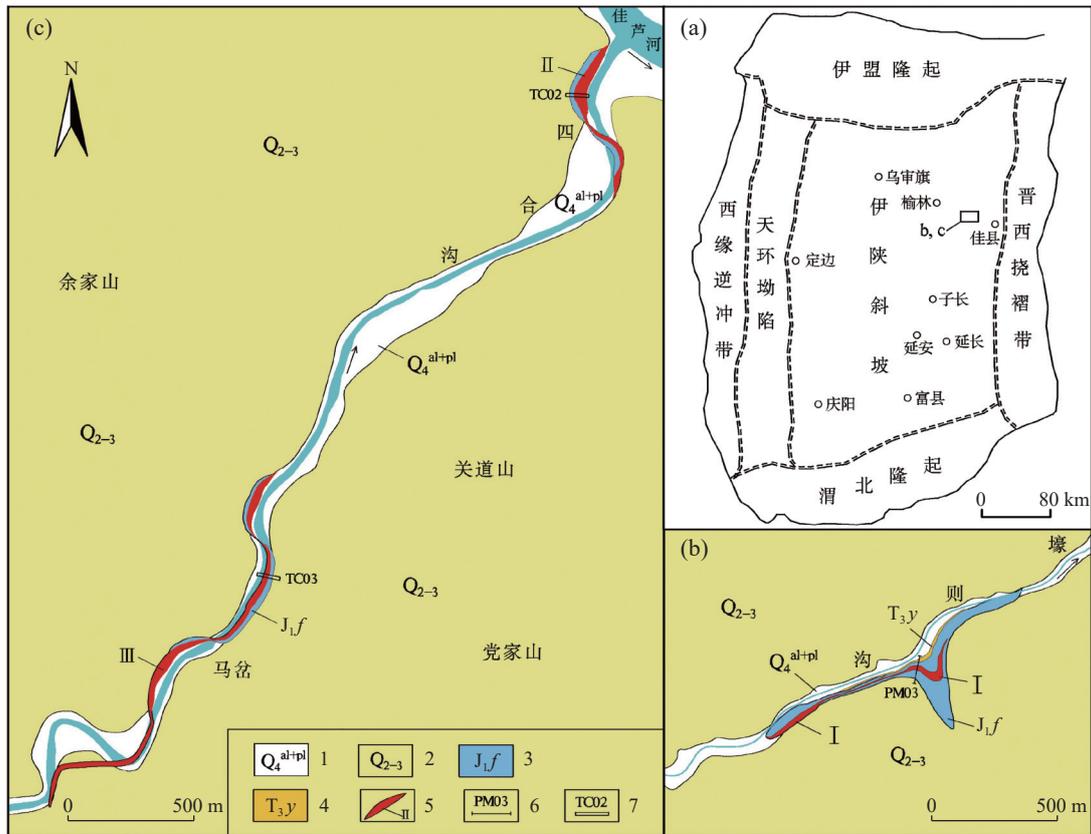
Keywords: Wangjiabian kaolin deposit; Ordos Basin; geological characteristics; ore deposit genesis; resource utilization; Jiaxian in Shaanxi Province

鄂尔多斯盆地位于华北板块西部, 横跨陕、甘、宁、蒙、晋五省区, 盆地面积约 25 万 km^2 , 是煤、石油、天然气等能源矿产同盆共存富集的盆地(刘池洋等, 2005, 2006), 同时富含铀矿、铝土矿、高岭土矿、盐岩等(Charles et al., 1996; 邓军等, 2005; 刘池洋等, 2005, 2006; 冯乔等, 2006; 顾广明等, 2006; 李增学等, 2006; 吴柏林等, 2006; 杨华等, 2006)。鄂尔多斯是在古生代华北克拉通盆地基础上发育的中新生代沉积盆地(杨俊杰, 2002)。盆地的形成演化经历了早古生代华北陆表海、晚古生代华北滨浅海、中生代内陆湖盆和新生代周缘断陷等多旋回演化阶段(陈刚等, 2005; 刘池洋等, 2006)。中新世代的建造和改造作用最终形成了鄂尔多斯盆地构造单元分区, 即西缘逆冲带、天环坳陷、晋西挠褶带、伊盟隆起、伊陕斜坡和渭北隆起(图 1a; Liu et al., 1998; Darby et al., 2002; 黄志龙等, 2004; 魏永佩等, 2004)。三叠纪末期, 受印支运动的影响鄂尔多斯盆地整体抬升并遭受剥蚀, 上三叠统与其上覆的下侏罗统为平行-微角度不整合接触关系(周鼎武等, 1994; 刘翠等, 2012; 邓秀芹等, 2013), 富县组是在印支运动后期三叠系抬升遭受侵蚀切割形成的剥蚀面上填平补齐沉积的产物(刘翠等, 2012; 杨合群等, 2023)。由于周边断裂的围限, 缺乏内部构造, 为能源矿产的保存创造了良好的条件(刘池洋等, 2005)。榆林佳县王家砭高岭土矿位于鄂尔多斯盆地东缘, 赋存于下侏罗统富县组下部砾岩之上的砂岩-黏土岩沉积建造中(陕西省地矿局第八地质队, 1993; 陕西省地质调查院, 2021)。王家砭高岭土矿工作程度较低, 尚未开展过较系统的调查与研究, 其地质特征、矿床成因及利用方向仍不明确, 制约了区内高岭土矿的勘查与开发。笔者在野外地质调查工作的基础上, 对

王家砭高岭土矿层的出露范围、产出层位、矿体产态及规模进行了调查研究, 总结了矿床地质特征, 对矿层的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 、 K_2O 、 Na_2O 、 CaO 、 MgO 、 MnO 、烧失量、白度等以及烧成收缩率、耐火度、可塑性指数、干燥收缩率、烧结温度等物理性能指标进行了测试和实验, 研究了矿床成因、成矿潜力与找矿标志, 对矿石品质进行了评价, 并提出了利用方向建议。

1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地位于中国大陆中部, 是中国第二大沉积盆地, 其形成始于中三叠世纸坊期, 中晚三叠世延长期至早中侏罗世延安期为盆地发育的鼎盛时期(赵越等, 2004; 刘池洋等, 2006; 程爱国等, 2016)。早白垩世末期盆地消亡, 晚白垩世以来盆地在区域挤压应力的作用下整体抬升, 普遍缺失这一时期的地层记录(马晓军等, 2019)。研究区位于榆林佳县西北部王家砭镇一带, 区域构造上处于鄂尔多斯盆地东缘的伊陕斜坡上, 构造活动相对稳定, 岩层无大型褶皱和断裂, 地层南北向弧形展布, 形成向西至北西缓倾的单斜构造(陕西省地矿局第八地质队, 1993; 石婧等, 2024)。区域地层出露较为有限, 上三叠统延长组(T_3y)和下侏罗统富县组(J_1f)仅在深切沟谷中有少量出露, 大部分被第四系(Q)覆盖。延长组(T_3y)产状平缓, 仅在研究区东部壕则沟及程家沟一带出露, 出露厚度不大, 岩性较单调, 为灰白、灰绿色中-细粒厚层状砂岩(图 1、图 2a), 夹灰黑、蓝灰色泥岩、粉砂质泥岩, 砂岩中局部含少量黄铁矿结核。受印支运动的影响, 上三叠统延长组遭受到不同程度的剥蚀作用, 下侏罗统



a.鄂尔多斯大地构造图; b.壕则沟 I 号高岭土矿层地质图; c.四合沟 II 号及马岔 III 号高岭土矿层地质图; 1.全新统洪、冲积层砂、砾、卵石、亚砂土; 2.离石黄土、马兰黄土; 3.下侏罗统富县组; 4.上三叠统延长组; 5.高岭土矿层及编号; 6.地质剖面位置及编号; 7.探槽位置及编号

图1 鄂尔多斯大地构造图(Liu et al., 1998; Darby et al., 2002; 黄志龙等, 2004; 魏永佩等, 2004)及王家砭高岭土矿地质矿产图

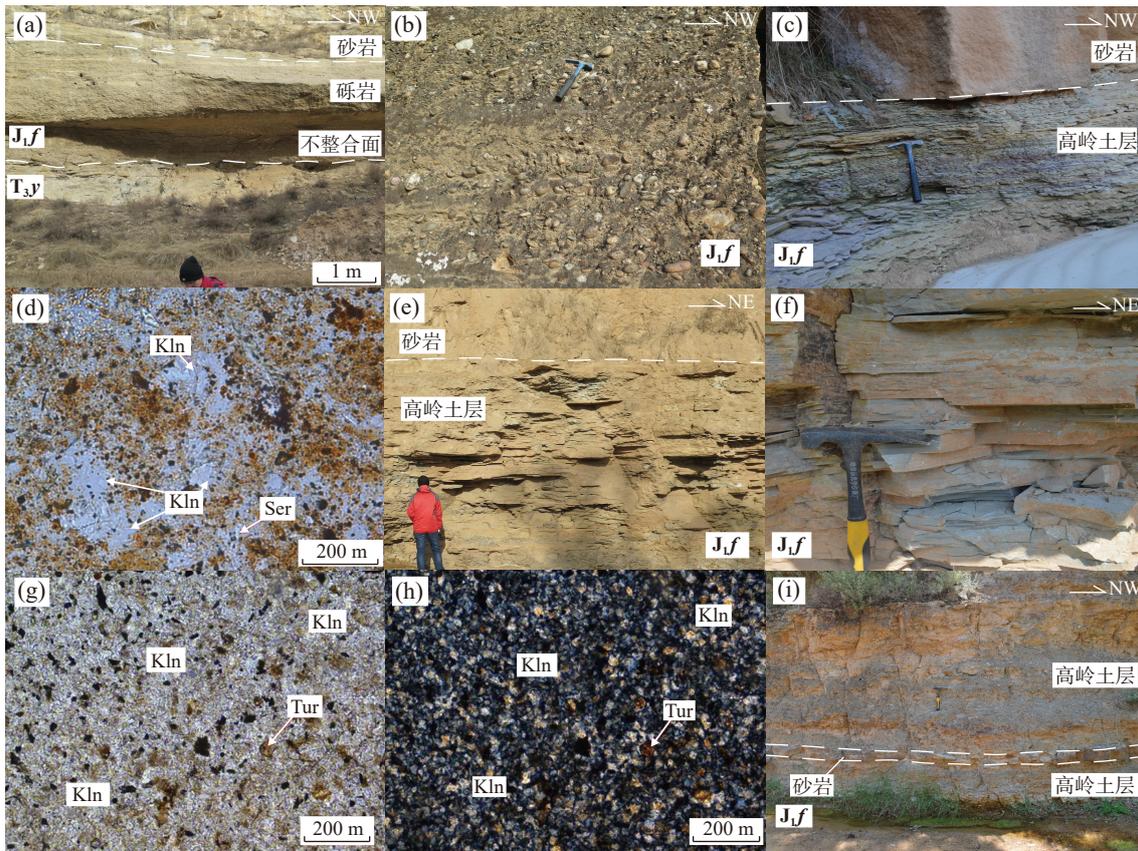
Fig. 1 Tectonic map of Ordos basin and the geological map of the Wangjiabian Kaolin Deposit

富县组(J_1^f)发育在区域角度不整合和起伏不平的古地形上, 沉积以填平补齐为特点, 其与下伏上三叠统延长组呈平行-微角度不整合接触(图 2a; 时志强等, 2003; 梁积伟, 2007; 张倩等, 2021)。富县组(J_1^f)岩性、岩相和厚度变化较大, 自下而上一般为含砾石英砂岩或石英砂岩, 黑灰色及深灰色泥岩或细砂岩与泥岩互层, 有时出现油页岩、灰绿色砂岩与紫杂色泥岩、粉砂质泥岩夹薄层细砂岩, 最上部为灰白色中粒至细粒石英砂岩或含砾石英砂岩, 且以石英砂岩含量较高为特点。王家砭高岭土矿赋存于富县组下部的砂岩-泥岩中, 又称砂岩-黏土岩建造中。前人对侏罗纪沉积体系做过较多的研究, 认为自早侏罗世富县期至晚侏罗世芬芳河期, 鄂尔多斯盆地岩相古地理演化经历了河流-冲积扇、湖泊-沼泽、河流-三角洲和冲积扇(庞军刚等, 2012; 李振宏, 2015; 郭艳琴等, 2019), 进一步的研究表明富县组形成于滨湖相亚环境和三角洲平原

亚环境, 而富含高岭土的沉积层应属于滨湖相亚环境(葛道凯等, 1991; 孙肇才, 2003; 陕西省地调院, 2017; 计波等, 2022)。

2 分析测试

本次 5 件 X-衍射分析样品在中国地质调查局西安地质调查中心实验测试中心进行测试, 在 D/max-2500 X 射线衍射仪上完成。本次 22 件化学成分样品由中国建筑材料工业地质勘查中心陕西测试研究所进行测试, 分析项目为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 、 K_2O 、 Na_2O 、 CaO 、 MgO 、 MnO 、烧失量和白度, 使用设备及型号为 SRJX2-4-9 型高温炉(SC-133)、ICAP-6300 电感耦合等离子体发射光谱仪(SC-195)、WSD-3C 全自动白度仪(SC-05)及 WFX-110B 原子吸收分光光度计(SC-146), 按《岩石矿物分析》(DZG20-2-2011)、《非金



a.程家沟上三叠统延长组与下侏罗统富县组不整合接触关系及下侏罗统砾岩标志层；b.壕则沟下侏罗统富县组底部砾岩层；c.壕则沟 I 号高岭土矿层；d.壕则沟 I 号高岭土矿层显微镜下照片(-)；e, f.四合沟 II 号高岭土矿层；g.四合沟 II 号高岭土矿层显微镜下照片(-)；h.四合沟 II 号高岭土矿层显微镜下照片(+); i.白土沟 III 号高岭土矿层；Kln.高岭石；Tur.电气石；Ser.绢云母

图2 王家砭高岭土矿野外地质特征及矿石显微特征

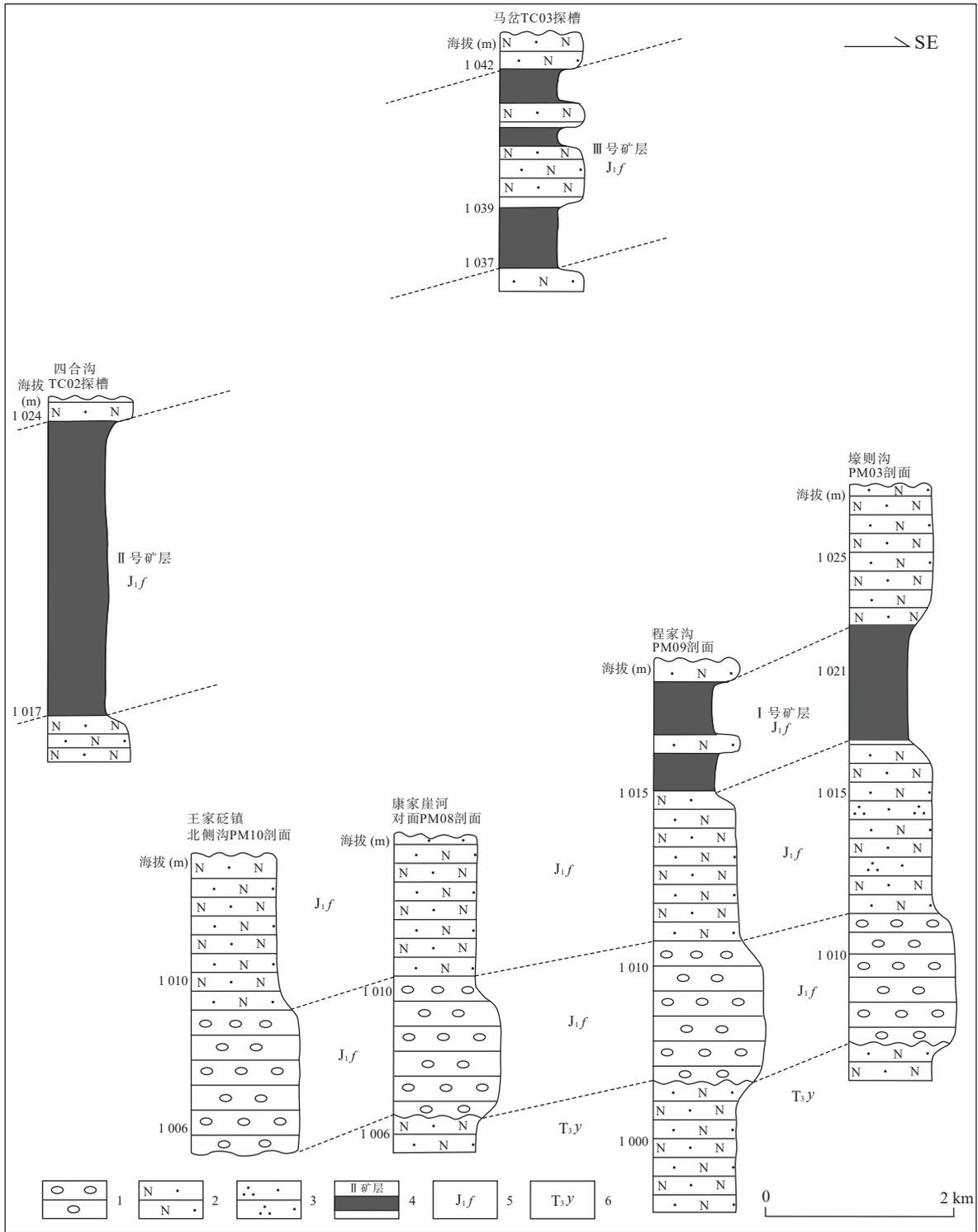
Fig. 2 Typical field and microscopic photos of the Wangjiabian kaolin deposit.

属矿物和岩石化学分析方法第 2 部分硅酸盐岩石、矿物及硅质原料化学分析方法》(JC/T1021.2-2007)及《建筑材料与非金属矿产品白度测量方法》(GB/T5950-2008)技术方法和流程进行测试。本次 30 件物理性能测试样品的块体密度在中国建筑材料工业地质勘查中心陕西测试研究所进行测试,烧成线收缩率、干燥收缩率、耐火度、烧结温度范围、可塑性指数由佛山市陶瓷研究所检测有限公司进行测试,按《工程岩体试验方法标准》(GB/T50266-2013)技术方法和流程进行测试。

3 矿床地质特征

王家砭高岭土矿位于陕西佳县王家砭镇一带,矿区构造简单,褶皱和断层不发育,地层总体呈 NW 缓倾单斜层,倾角 0~1.5°。矿区出露地层主要为下侏罗

统富县组,总厚 50~60 m,夹 3 层高岭土矿层,矿层产于富县组下部砾岩之上的砂岩-黏土岩建造中,自下而上依次为 I 号、II 号和 III 号矿层(图 1b、图 1c、图 2c、图 2e、图 2f、图 2i、图 3、图 4)。矿区富县组自下而上岩性组成为:①砾岩层,分布范围广,东至壕则沟、张家沟一带,西至程家沟一线,北起佳芦河沿岸,南至兴隆寺一带的深切沟谷中。该套砾岩位于侏罗系富县组的底部,为区内下侏罗统标志层(图 2a、图 2b),出露标高为 1005~1010 m。砾石成分以硅质岩为主,次之为砂岩及少量泥质岩。砾径多为 0.2~25 cm,大小混杂,分选性差,填隙物一般为砂泥质,局部含硅质,层厚 3~5 m。东部壕则沟河道砾岩层厚度变化较大,砾石砾径大小不一,泥质含量高,近水平产状的砾岩层呈“U”形切割近水平产状的上三叠纪延长组长石砂岩层。向西至王家砭镇一带,砾岩层厚趋于稳定,砾石砾径大小较均一,胶结物泥质含



1.砾岩; 2.长石砂岩; 3.石英砂岩; 4.高岭土矿层及编号; 5.下侏罗统富县组; 6.上三叠统延长组

图3 王家砭一带下侏罗统富县组地层层序对比示意图

Fig. 3 Schematic diagram of stratigraphic sequence comparison of the Lower Jurassic Fuxian Formation in Wangjiabian area

量低, 主要为砂质。② I号含粉砂质高岭土矿层, 为浅紫红色至灰白色, 厚度 2.4 m, 内夹薄层长石砂岩 (图 2c)。③ 浅灰、灰色厚层-块状细至中粒长石砂岩夹粉砂岩及薄层泥岩, 厚 25~30 m。④ II号高岭土矿

层, 为灰-灰白色, 矿层厚度稳定, 四合沟一带钻孔控制厚度为 7.40 m, 内部基本不含夹石, 倾向 NW, 倾角 0~0.5° (图 2e、图 2f)。⑤ 浅灰色细至中粒长石砂岩夹粉砂岩及多层泥岩, 总厚 10~20 m。⑥ III号高岭土

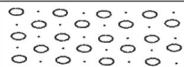
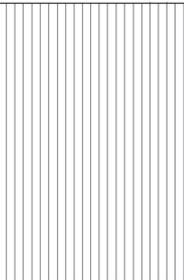
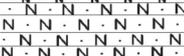
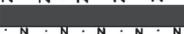
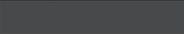
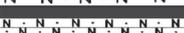
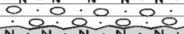
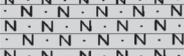
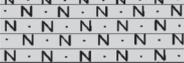
系	统	名称	柱状图	厚度 (m)	岩性描述
第四系	全新统	Q ₄ ^{al+pl}			全新统洪、冲积层: 砂、砾、卵石、亚砂土
	上更新统	马兰组 Q _{3m}		> 50 m	马兰组为浅黄色粉砂、亚砂土; 离石组为灰黄色粉土质亚黏土、亚砂土, 含钙质结核, 局部见夹红色土壤层。 未对马兰组和离石组进行区分
	中更新统	离石组 Q _{2l}			
侏罗系	下统	富县组 J _f		12~15	浅灰白褐色中粒长石砂岩
				4~4.5	浅灰白色-灰色高岭土层
					浅灰白色细粒长石砂岩
				7.4	浅灰白色-灰色高岭土层
				25~30	浅灰白色中粒长石砂岩
				2.4	浅紫红色至灰白色含粉砂高岭土层
				4~6	浅灰白色中粒长石砂岩
				3~7	浅灰褐色砂质粗砾岩
				15~26	浅灰绿色中细粒长石砂岩
三叠系	上统	延长组 T _{3y}			浅灰绿色中细粒长石砂岩

图 4 王家砭一带综合地层柱状图

Fig. 4 Comprehensive stratigraphic column of the Wangjiabian area

矿层, 为浅灰白至灰色, 薄层状, 上部矿石质量较好, 厚度 4.02~4.46 m, 内夹长石砂岩薄层(图 2i), 顶部局部遭受剥蚀, 第四系黄土不整合覆盖其上。王家砭一带下侏罗统富县组地层层序对比示意图见图 3, 综合地层柱状图见图 4。

3.1 I 号高岭石黏土矿层

I 号矿层赋存于下侏罗统富县组底部砾岩层之上(图 1b), 其出露范围东至张家沟一带, 向西经壕则沟至程家沟一带, 北起佳芦河两岸, 向南西延至兴隆寺乡兴隆寺河道一带, 为近水平层状-薄层状产出。壕则沟探槽控制厚度为 2.4 m(图 2c), 内夹 2~3 层薄层长石砂岩, 矿层底板高程为 1 013~1 014 m。

I 号矿层呈青灰色、棕灰色至浅紫红色, 具有含粉砂泥状结构, 条带状、层状构造。青灰色高岭土矿层呈薄片状, 表面具有蜡状光泽, 手感光滑细腻。棕灰色、紫红色高岭土含有少量砂质, 手触之砂质感较强。紫红色的高岭土矿层不均匀成层状分布于青灰色高岭土层中(图 2c)。矿物成分由黏土质矿物、成岩-后生作用形成的新生矿物以及陆源碎屑等三部分组

成。黏土质矿物呈隐晶质, 常与铁的氧化物集合体形成片状和条带状。成岩-后生作用形成的新生矿物是黏土质矿物重结晶形成的高岭石、水白云母、绿泥石等, 以高岭石为主(图 2d); 陆源碎屑呈粉砂级, 由石英、钾长石等组成。X 衍射分析数据显示各矿物的质量分数为: 高岭石含量为 59.0%, 石英含量为 35.0%, 伊利石含量为 5.0%, 钾长石含量为 1.0%(表 1)。

I 号矿层 SiO₂ 含量为 56.09%~56.69%, 平均值为 56.39%; Al₂O₃ 含量为 24.12%~24.92%, 平均值为 24.52%; SiO₂/Al₂O₃ 为 3.82~3.99, 平均值为 3.90; Fe₂O₃ 含量为 4.37%~4.75%, 平均值为 4.56%。组合样 K₂O 含量为 1.74%, Na₂O 含量为 0.094%, CaO 含量为 0.20%, MgO 含量为 0.48%, TiO₂ 含量为 0.87%, MnO 含量为 0.008 8%, 烧失量(LOI)为 10.09%(表 2、表 3)。

高岭土的物理性能是指在不发生化学变化的情况下, 通过物理特性来表现的性能, 是判断其具体应用与利用方向的参数指标(矿产资源工业要求参考手册, 2021)。本次对王家砭高岭土矿的块体密度、烧成收缩率、干燥收缩率、耐火度、烧结温度范围、可塑性

表1 王家砭高岭土矿X衍射分析结果(%)

Tab. 1 X-ray diffraction analysis results of the Wangjiabian kaolin deposit (%)

样品编号	X-HZG-01	X-SHG-01	X-BTG-02	X-MC-01	X-BTG-01
高岭石	59.0	78.0	78.5	60.5	74.5
石英	35.0	19.1	17.2	31.6	21.1
钾长石	1.0	0.4	0.8	3.4	0.9
伊利石	5.0	2.5	3.5	4.5	3.5
矿层编号	I号	II号		III号	

表2 王家砭高岭土矿层矿石化学成分分析结果(%)

Tab. 2 Chemical composition analysis results of the Wangjiabian Kaolin deposit (%)

样品编号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	TiO ₂	MnO	烧失量	白度	矿层编号
HZG-01	56.09	24.92	3.82	4.37	1.74	0.094	0.20	0.48	0.87	0.008 8	10.09	32.18	I号
HZG-02	56.69	24.12	3.99	4.75									
SHG-01	52.70	31.22	2.86	2.02	1.97	0.084	0.31	0.58	0.90	0.009 5	11.32	44.84	II号
SHG-02	51.95	30.64	2.88	3.12									
SHG-03	52.93	30.14	2.98	2.48									
BTG-03	53.01	31.00	2.90	1.92									
BTG-04	54.96	26.73	3.49	2.19	1.34	0.067	0.17	0.42	0.70	0.041	11.24	38.82	III号
MC-01	54.39	25.43	3.63	3.48									
MC-02	57.49	24.76	3.94	4.13									
MC-03	55.09	27.02	3.46	2.32	1.34	0.067	0.17	0.42	0.70	0.041	11.24	38.82	III号
BTG-01	52.08	31.47	2.81	2.18									
BTG-02	51.01	30.33	2.85	4.00									

表3 王家砭高岭土矿层化学成分含量平均值(%)

Tab. 3 Average chemical content of the Wangjiabian Kaolin deposit (%)

矿层编号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	TiO ₂	MnO	烧失量	SiO ₂ /Al ₂ O ₃
I号	56.39	24.52	4.56	1.74	0.09	0.20	0.48	0.87	0.01	10.09	3.90
II号	53.11	29.95	2.34	1.81	0.08	0.27	0.58	0.92	0.01	11.48	3.01
III号	54.01	27.80	3.22	1.87	0.09	0.25	0.54	0.76	0.04	10.42	3.30

指数等物理性能进行了实验测试。壕则沟I号矿层块体密度为2.59 g/cm³,烧成收缩率为8.88%,干燥收缩率为4.98%,耐火度为1640℃,烧结温度范围为1370~1430℃,可塑性指数为9.45,白度为32.18(表4)。

3.2 II号高岭土矿层

II号矿层赋存于侏罗系下统富县组下部,是富县组中最重要的矿层(图1c),位于I号矿层之上、III号矿层之下。矿层出露范围最西至四合沟,最东至白土沟-程家后沟一带。矿体呈规则的层状或板状,呈近水平状产出,产状为300~331°∠0.5~1°(图2e、图2e、

图2f)。矿层中部夹1~2层厚0.05~0.15 m灰白色、浅土黄色细粒含泥长石砂岩及长石石英砂岩。白土沟探槽控制矿层厚度为6.63 m,未见底板。1993年陕西省地矿局第八地质队四合沟口施工钻孔对矿层控制的最大厚度为7.40 m,且见底板,底板标高为1019~1057 m,岩性为粉砂岩(陕西省地矿局第八地质队,1993)。

II号矿层矿石呈青灰色、灰白色,呈厚板状(图2e、图2f)。矿石含砂量低,表面具蜡状光泽,手感光滑细腻,质软粘舌,吸水性较强。矿石主要矿物成分为高岭石,约占95%,其次含少量伊利石、石英、水白云母、

表4 王家砭高岭土矿物理性能测试结果

Tab. 4 Physical performance test results of Wangjiabian Kaolin deposit

样号	MD-HZG-01	MD-SHG-01	MD-BTG-02	MD-MC-01	MD-BTG-01	实验条件	
矿层编号	I号	II号		III号			
块体密度(g/cm ³)	2.59	2.5	2.43	2.53	2.53	烧成温度1200℃, 保温30 min	
矿层平均值(g/cm ³)	2.59	2.47		2.53			
烧成收缩率(%)	8.88	12.32	15.57	10.72	7.08		
矿层平均值(%)	8.88	13.95		8.9			
耐火度(℃)	1640	1680	1680	1640	1680		
矿层平均值(℃)	1640	1680		1660			
干燥收缩率(%)	4.98	8.28	4.76	7.08	2.72		
矿层平均值(%)	4.98	6.52		4.9			
烧结温度范围(℃)	1370~1430	1450~>1500	1450~>1500	1330~1400	1400~1470		试验温度最高至1500℃
矿层烧结温度范围	1370~1430	1450~>1500		1330~>1470			
可塑性指数	9.45	7.94	8.52	4.06	7.09		
矿层平均值	9.45	8.23		5.58			

黑云母等,副矿物为钼磷灰石、铁电气石、褐帘石、金红石等。两件X衍射分析数据显示各矿物的质量分数为:高岭石含量分别为78.0%、78.5%,石英含量分别为19.1%、17.2%,钾长石含量为0.4%、0.8%,伊利石含量为2.5%、3.5%(表1)。

四合沟II号矿层SiO₂含量为51.95%~52.93%,平均值为52.53%;Al₂O₃含量为30.14%~31.22%,平均值为30.67%;Fe₂O₃含量为2.02%~3.12%,平均值为2.54%。组合样K₂O含量为1.66%,Na₂O含量为0.07%,CaO含量为0.24%,MgO含量为0.58%,TiO₂含量为0.90%,MnO含量为0.0095%,烧失量为11.32%(表2、表3)。白土沟II号矿层SiO₂含量为53.01%~54.96%,平均值为53.99%;Al₂O₃含量为26.73%~31.00%,平均值为28.86%;Fe₂O₃含量为1.92%~2.19%,平均值为2.06%。组合样K₂O含量为1.97%,Na₂O含量为0.084%,CaO含量为0.31%,MgO含量为0.58%,TiO₂含量为0.94%,MnO含量为0.014%,烧失量为11.64%(表2、表3)。

四合沟II号矿层块体密度为2.50 g/cm³,烧成收缩率为12.32%,干燥收缩率为8.28%,耐火度为1680℃,烧结温度范围为1450~>1500℃,可塑性指数为7.94,白度为44.84。白土沟II号矿层块体密度为2.43 g/cm³,烧成收缩率为15.57%,干燥收缩率为4.76%,耐火度为1680℃,烧结温度范围为1450~>1500℃,可塑性指数为8.52,白度为16.95(表4)。

3.3 III号高岭土矿层

III号矿层位于II号矿层之上(图1c、图3),出露

于马岔-白土沟一带的深切沟谷中。矿体呈规则的层状或板状产出,倾向NW,倾角约为1°(图2i)。西部马岔探槽中矿层总厚度为4.02 m,底板标高为1038 m;东部白土沟探槽中矿层厚度为4.46 m,底板标高为1065 m。矿层中部夹2~3层厚0.8~1.7 m的灰白色细粒长石石英砂岩。矿层顶部局部遭受剥蚀,与第四系黄土呈不整合接触。

矿石呈青灰色、灰白色,具有板状-薄层状构造,多呈薄片状,表面具蜡状光泽,质软(图2i)。风化后易破碎成1~4 cm的疏松碎片,手捻之成粉末,滑感较强。矿石主要由黏土质矿物以及陆源碎屑等组成。以隐晶质黏土质矿物为主,部分重结晶形成显微晶质高岭石团块。黏土质矿物估量64%左右,陆源碎屑估量35%左右,由石英、长石、黑云母、白云母、绿泥石、岩屑等组成。X衍射分析数据显示各矿物的质量分数为:高岭石含量为60.5%、74.5%,石英含量为31.6%、21.1%,钾长石含量为3.4%、0.9%,伊利石含量为4.5%、3.5%(表1)。

马岔III号矿层SiO₂含量为54.39%~57.49%,平均值为55.66%;Al₂O₃含量为24.76%~27.02%,平均值为25.74%;Fe₂O₃含量为2.32%~4.13%,平均值为3.31%。组合样K₂O含量为2.39%,Na₂O为0.10%,CaO含量为0.32%,MgO含量为0.67%,TiO₂为含量0.81%,MnO含量为0.029%,烧失量为9.60%(表2、表3)。白土沟III号矿层SiO₂含量为51.01%~52.08%,平均值为51.55%;Al₂O₃含量为30.33%~31.47%,平均值为30.90%;SiO₂/Al₂O₃为2.81~3.94,平均值为3.30;Fe₂O₃

含量为 2.18%~4.00%，平均值为 3.09%。组合样 K_2O 含量为 1.34%， Na_2O 含量为 0.067%， CaO 含量为 0.17%， MgO 含量为 0.42%， TiO_2 含量为 0.70%， MnO 含量为 0.041%，烧失量为 11.24% (表 2、表 3)。

马盆 III 号矿层物理性能实验结果见表 4，块体密度为 2.53 g/cm^3 ，烧成收缩率为 10.72%，干燥收缩率为 7.08%，耐火度为 $1640\text{ }^\circ\text{C}$ ，烧结温度范围为 $1330\sim 1400\text{ }^\circ\text{C}$ ，可塑性指数为 4.06，白度为 42.60；白土沟 III 号矿层块体密度为 2.53 g/cm^3 ，烧成收缩率为 7.08%，干燥收缩率为 2.72%，耐火度为 $1680\text{ }^\circ\text{C}$ ，烧结温度范围为 $1400\sim 1470\text{ }^\circ\text{C}$ ，可塑性指数为 7.09，白度为 38.82。

4 讨论

4.1 矿床成因与构造背景

印支期华北板块、秦岭和扬子板块全面碰撞汇聚造山，秦岭洋闭合，秦岭造山带伴随着强烈的岩浆事件与成矿作用 (殷鸿福等, 1998; 张国伟等, 2001, 2004; Meng et al., 2007; Zhu et al., 2011; Wang et al., 2022)，同时鄂尔多斯盆地发生抬升与边缘变形，盆地磷灰石裂变径迹与热释光研究成果也揭示了该期构造事件的影响 (孙少华等, 1997; 刘池洋等, 2016)。受印支运动的影响，三叠纪华北克拉通拗陷盆地向鄂尔多斯盆地发展转化，由海相、过渡相向内陆湖盆转变 (邓秀芹等, 2013)。晚三叠世鄂尔多斯盆地整体发生抬升并遭受剥蚀，使上三叠统和下侏罗统呈平行-微角度不整合接触 (周鼎武等, 1994; 刘攀等, 2012; 邓秀芹等, 2013)。下侏罗统富县组是在印支运动后期三叠系抬升遭受侵蚀切割形成的剥蚀面上填平补齐沉积的产物 (刘攀等, 2012; 计波等, 2022)，即形成富县组底部的砂砾岩 (即“粗富县”) 和砂砾岩上部的砂岩-黏土岩建造 (即“细富县”)。王家砭高岭土矿赋存于富县组下部砾岩之上的“细富县”砂岩-黏土岩建造中，形成于湖泊相，可进一步分为滨湖相亚环境和三角洲平原亚环境，而富含高岭土的沉积层应属于滨湖相亚环境 (葛道凯等, 1991; 孙肇才, 2003; 陕西省地调院, 2017; 计波等, 2022)。前人通过对富县组下部碎屑组分与岩石地球化学研究认为其物源为盆地内部隆起提供的沉积物，即上三叠统母岩区的长石、蒙脱石等风化蚀变为稳定的高岭石，形成了富集石英与高岭石的风化残积物与硅铝型古风化壳，为后期富县组石英砂岩和高岭土矿

床的形成提供了丰富的物源 (计波等, 2022)，源区物质经水体搬运进入湖泊相环境沉积形成下侏罗统富县组高岭土矿层。鄂尔多斯盆地上三叠统顶部的风化残留，甚至局部残留有风化淋滤型高岭土也佐证了这一观点，如盆地东北部赋存于上三叠统顶部的东胜砂岩型高岭土矿床即为受控于印支末古构造面风化作用的残留产物 (李思田等, 1992; 黄焱球等, 1999)。而佳县一带上三叠统与下侏罗统不整合面上没有形成高岭土矿层，可能与其所处的大地构造位置有关，具体是由于其位于华北板块的南部，受印支期华北与华南全面碰撞造山作用影响，盆地南部更早抬升并遭受更快速剥蚀不具备沉积保存的构造背景条件。刘池洋等 (2016) 研究表明鄂尔多斯盆地上三叠统与下侏罗统之间普遍存在印支期的角度或平行不整合面，形成一套晚三叠世活动型粗碎屑砂砾岩建造组合，盆地西南缘此次对应事件的年代在 $215\sim 195\text{ Ma}$ ，峰值年龄接近 $205\text{ Ma}\pm$ ；而盆地东北部则相对滞后，主要集中在 $205\sim 195\text{ Ma}$ 之间，峰值接近 $200\text{ Ma}\pm$ (刘池洋等, 2005, 2006)，印支运动挤压背景下鄂尔多斯盆地南部较北部先抬升。

王家砭一带高岭土矿具有稳定的沉积层位，为规则的层状或板状，呈近水平状产出，赋存于侏罗统富县组下部砾岩之上的砂岩-黏土岩建造中，不同于呈土状的风化淋滤型高岭土矿 (叶张煌等, 2016; 王国龙等, 2018; 孙洁, 2021; 梁海辉, 2022)，亦不同于产于岩浆岩外接触带热液型高岭土矿 (袁又申, 1984; 谢宽, 1986; 陕西省地质调查院, 2021)，其应为沉积型矿产。综上，佳县高岭土矿形成过程与成因如下：三叠纪末，在印支期挤压动力学背景下，鄂尔多斯盆地发生抬升，上三叠统成为隆起剥蚀区，剥蚀区风化壳的硅铝物质为下侏罗统富县组高岭土矿层的形成提供了成矿的物源。在洪水期由于水动力较强，多以碎屑形式与砂、粉砂等一起搬运进入汇水湖盆，随着能量减弱，由于机械分异作用，粗粒物质首先沉积，然后细粒物质沉积，致使汇水湖盆边缘部位常沉积含砂质高岭土；静水期，硅铝物质则以胶体形式搬运，进入汇水湖盆，由于水介质条件的变化，发生胶凝化作用沉积下来，形成高纯度高岭土矿层；水动力振荡期，往往形成夹砂岩的高岭土矿。另外，由于物源中黏土矿物 (水云母、多水高岭石等) 含量多少及硅铝物质比例差别也可能影响高岭石黏土岩的质量及类型，若其中的黏土矿物较

多, 硅铝比接近高岭石的硅铝比, 则可以生成优质的黏土岩型高岭土矿; 如果硅铝比大于高岭石的硅铝比, 则形成非优质高岭石黏土, 甚至不成矿。王家砭 I 号矿层为含粉砂质高岭土, 可能形成于汇水

湖盆边缘部位; II 号矿层具有厚度大纯度高的特点, 可能形成于汇水湖盆中部静态深水沉积环境; III 号矿层中夹多层(粉)砂岩薄层, 应形成于静态深水沉积环境, 其间出现短时间水动力振荡(图 5)。

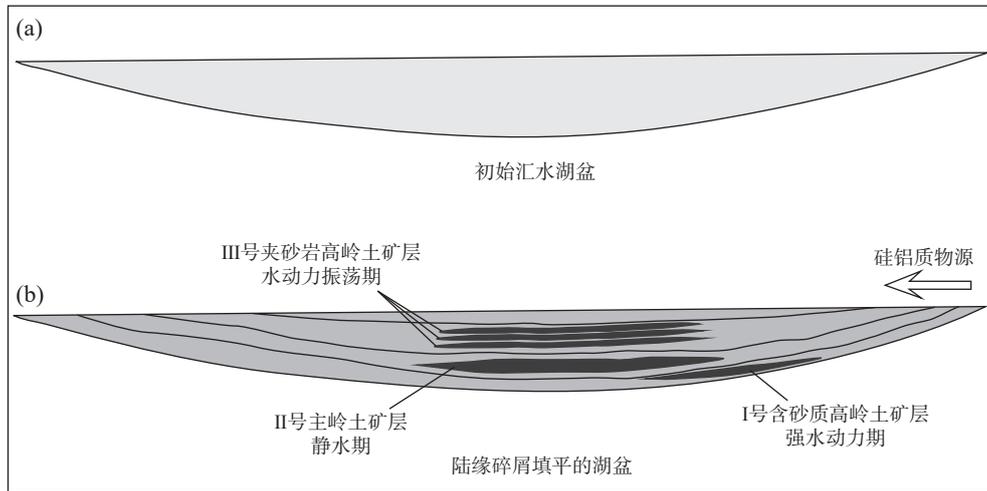


图5 王家砭高岭土矿成因模式图

Fig. 5 Genetic model of the Wangjiabian Kaolin deposit

4.2 成矿潜力与找矿标志

王家砭高岭土矿为沉积成因, 具有稳定的沉积层位和较稳定的沉积厚度(图 2c、图 2e、图 2f、图 2i)。I 号矿层壕则沟探槽控制厚度达 2.4 m; 四合沟口钻孔控制 II 号矿层厚度达 7.40 m(陕西省地矿局第八地质队, 1993), 马岔一带探槽控制 III 号矿层厚度达 4.46 m。区内东起史家沟-张家沟一带, 西至四合沟-马岔一带, 北起佳芦河沿岸, 南至兴隆寺河道一带, EW 向超 12 km, SN 向超 14 km 均有零星高岭土矿层露头或找矿标志发现, 显示出很大的找矿潜力。

王家砭高岭土矿找矿标志主要有 3 个, ①高岭土矿的宏观特征, 地表露头主要表现为青灰色至浅灰(白)色, 为近水平层状产出, 呈薄片状, 表面具有腊状光泽, 手感细腻光滑, 质软黏舌, 吸水性较强, 地表露头为直接的找矿标志(图 2e、图 2f、图 2i)。②下侏罗统“细富县”砂岩-黏土岩建造是高岭土矿的产出层位。③高岭土矿层位于富县组底部砾岩层位之上, 砾岩层是区内的标志地层, 也是重要的找矿标志层位(图 2a、图 2b)。

4.3 化学、物理性能特征及利用方向

I 号矿层 X 衍射分析数据显示高岭石质量分数含量分别为 59.0%, 陆源碎屑含量较高。Al₂O₃ 为 24.12%~24.92%, 平均值为 24.52%; Fe₂O₃ 为 4.37%~

4.75%, 平均值为 4.56%; TiO₂ 为 0.87%; Fe₂O₃+TiO₂ 平均值为 5.43%; LOI(烧矢量)为 10.09; 耐火度 1640 ℃, 可塑性指数 9.45。II 号矿层 X 衍射分析数据显示高岭石质量分数含量分别为 78.0%、78.5%, 平均含量为 78.3%; 伊利石质量分数含量分别为 2.5%、3.5%, 平均含量为 3.0%; Al₂O₃ 含量 26.73%~31.22%, 平均含量为 29.95%; Fe₂O₃ 含量 1.92%~2.48%(其中 1 个样 3.12%), 平均含量为 2.15%; TiO₂ 含量 0.90%~0.94%, 平均值为 0.92%; Fe₂O₃+TiO₂ 平均值为 3.26%; LOI 为 11.32~11.64, 平均 11.48; 耐火度为 1680 ℃; 可塑性指数 7.94~8.52, 平均值为 8.23。III 号矿层 X 衍射分析数据显示高岭石质量分数含量分别为 60.5%、74.5%, 平均 67.5%; 伊利石质量分数含量分别为 4.5%、3.5%, 平均含量为 4.0%; Al₂O₃ 含量为 24.76%~31.47%, 平均含量为 27.80%; Fe₂O₃ 含量为 2.18%~4.13%, 平均含量为 3.22%; TiO₂ 含量为 0.70%~0.81%, 平均值为 0.76%; Fe₂O₃+TiO₂ 平均值为 3.98%; LOI 为 9.60~11.24, 平均值为 10.24; 耐火度为 1640~1680 ℃, 平均值为 1660 ℃; 可塑性指数为 4.06~7.09, 平均值为 5.58。

黏土的耐火度主要取决于其化学组成, 一般随 Al₂O₃ 含量的增加而提高, 随杂质含量增加而降低。而 Fe₂O₃ 是建材和耐火材料的有害杂质, 会影响材料的化学稳定性、热稳定性和机械强度等。可塑性指数

越大表示成型水分范围越大,成型时不易受周围环境湿度及模具的影响,即成型性能越好。耐火度是判定其能否作为耐火材料的主要依据,耐火度越高越适合高温焙烧(高岭土、叶蜡石、耐火黏土矿产地质勘查规范(DZ/T 0206—2020);矿产资源工业要求参考手册,2021)。王家砭高岭土矿的矿物成分、化学成分与物理性能的综合对比认为,Ⅱ号矿层品质最好,Ⅲ号矿层次之,Ⅰ号矿层较差。

王家砭高岭土矿的 Fe_2O_3 、 TiO_2 含量较高,未达到《高岭土、叶蜡石、耐火黏土》矿产地质勘查规范(DZ/T 0206—2020)中 $\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2 < 2\%$ 、 $\text{TiO}_2 < 0.6\%$ 的高岭土矿一般工业指标。

耐火黏土是指耐火度大于 $1580\text{ }^\circ\text{C}$,由高岭石族矿物、铝的氢氧化物及少量水云母组成的黏土,主要用于冶金、建材、化工等行业。依其矿石特征、化学物理性能和工业用途,一般分为软质黏土、半软质黏土、硬质黏土和高铝质黏土4种矿石类型(矿产资源工业要求参考手册,2021)。王家砭高岭土矿石的黏土类矿物以高岭石为主,其次为伊利石,不含硬水铝石,矿石外观特征为片状,表面具有蜡状光泽,滑腻感较强,质软黏舌,吸水性较强。参照《高岭土、叶蜡石、耐火黏土》矿产地质勘查规范(DZ/T 0206—2020)中耐火黏土矿石类型应为软质黏土,化学、物理性能参数均达到了耐火黏土矿(软质黏土)Ⅱ级矿石品级 $\text{Al}_2\text{O}_3 > 26\%$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 2.5\%$ 、 LOI (烧失量) $\leq 18\%$ 、耐火度 $\geq 1610\text{ }^\circ\text{C}$ 、可塑性指数 ≥ 2.5 的一般工业指标;Ⅲ号矿层达到耐火黏土矿(软质黏土)Ⅲ级矿石品级 $\text{Al}_2\text{O}_3 > 22\%$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 3.5\%$ 、 $\text{LOI} \leq 18\%$ 、耐火度 $\geq 1580\text{ }^\circ\text{C}$ 、可塑性指数 ≥ 2.5 的一般工业指标。

另外,建议开展高岭土矿层的除铁试验,进一步提高其品质并扩大用途,不但要加强其在传统应用领域的用途研究,也要关注在环保、新能源等新兴领域的用途,为区内高岭土矿的勘查与开发利用注入新活力。

5 结论

(1)受印支构造运动影响鄂尔多斯盆地整体发生抬升并遭受剥蚀,使上三叠统延长组与下侏罗统富县组呈不整合接触关系,上三叠统风化壳硅铝物质为王家砭高岭土矿的成矿提供了物源。该矿赋存于下侏

罗统富县组下部的“细富县”砂岩-黏土岩建造中,为沉积成因类型矿产。

(2)王家砭高岭土矿分布范围大,产出层位稳定,沉积厚度大,具有很大的找矿潜力。高岭土地表露头是直接的找矿标志,其为青灰色至浅灰(白)色,呈层状,具有腊状光泽、手感细腻光滑、质软黏舌、吸水性较强的标志性特征;下侏罗统“细富县”砂岩-黏土岩建造是高岭土矿的产出层位;高岭土矿层位于富县组底部砾岩层位之上,砾岩层是区内的标志地层,也是重要的找矿标志层。

(3)Ⅱ、Ⅲ号矿层矿石工业类型为软质黏土,其化学成分、物理性能参数已达到耐火黏土矿一般工业指标,可用于耐火黏土材料,Ⅱ号与Ⅲ号矿层分别达到了Ⅱ级和Ⅲ级矿石品级。建议开展除铁相关试验,加强应用方向特别是在新兴领域的应用研究,为区内高岭土矿的勘查与开发利用注入新活力。

致谢:本文野外工作得到了榆林市佳县招商局和佳县王家砭镇政府的大力支持,实验测试得到了中国地质调查局西安地质调查中心实验测试中心、中国建筑材料工业地质勘查中心陕西测试研究所的支持和帮助,同时陕西地矿集团有限公司赵文平教授级高工、长安大学李永军教授对文章提出了宝贵意见,在此一并表示感谢!

参考文献(References):

- 陈刚,李向平,周立发,等.鄂尔多斯盆地构造与多种矿产的耦合成矿特征[J].地学前缘,2005,12(4):535-541.
- CHEN Gang, LI Xiangpin, ZHOU Lifa, et al. Ordos basin tectonics relative to the coupling coexistence of multiple energy resources[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(4): 535-541.
- 程爱国,曹代勇,袁同兴,等.中国煤炭资源赋存规律与资源评价[M].北京:科学出版社,2016.
- CHENG Aiguo, CAO Daiyong, YUAN Tongxing, et al. Occurrence Law and Resource Evaluation of Coal Resources in China[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- 邓军,王庆飞,高帮飞,等.鄂尔多斯盆地演化与多种能源矿产分布[J].现代地质,2005,12(4):535-541.
- DENG Jun, WANG Qingfei, GAO Bangfei, et al. Evolution of Ordos Basin and its distribution of various energy resources[J]. Geoscience, 2005, 12(4): 535-541.
- 邓秀芹,罗安湘,张忠义,等.秦岭造山带与鄂尔多斯盆地印支期构造事件年代学对比[J].沉积学报,2013,31(6):939-953.

- DENG Xiuqin, LUO Anxiang, ZHANG Zhongyi, et al. Geochronological comparison on Indosinian tectonic events between Qinling Orogeny and Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(6): 939-953.
- 冯乔, 张小莉, 王云鹏. 鄂尔多斯盆地北部上古生界油气运聚特征及其铀成矿意义[J]. *地质学报*, 2006, 80(5): 748-752.
- FENG Qiao, ZHANG Xiaoli, WANG Yunpeng. Characteristics of Migration and Accumulation of Hydrocarbon and Its Deposit-Forming Signification in Upper Paleozoic in North Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(5): 748-752.
- 葛道凯, 杨起, 付泽明, 等. 陕西榆林侏罗纪煤系基底古侵蚀面的地貌特征及其对富县组沉积作用的控制[J]. *沉积学报*, 1991, 9(3): 65-73.
- GE Daokai, YANG Qi, FU Zeming, et al. The Palaeomorphologic Features of the Basement of the Jurassic Coal Measures and Its Control on the Sedimentation of Fuxian Formation in Yulin, Shaanxi[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1991, 9(3): 65-73.
- 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.
- 郭艳琴, 李文厚, 郭彬程, 等. 鄂尔多斯盆地沉积体系与古地理演化[J]. *古地理学报*, 2019, 21(2): 293-320.
- GUO Yanqin, LI Wenhui, GUO Bincheng, et al. Sedimentary systems and palaeogeography evolution of Ordos Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2019, 21(2): 293-320.
- 黄焱球, 程守田. 东胜煤系砂岩型高岭土的富集机理[J]. *煤田地质与勘探*, 1999, 27(3): 13-16.
- HUANG Yanqiu, CHENG Shoutian. The concentration mechanism of sandstone-type Kaolin coal-bearing strata in Dongsheng[J]. *Coal Geology & Exploration*, 1999, 27(3): 13-16.
- 黄志龙, 高岗, 庞雄奇, 等. 鄂尔多斯盆地北部盒8段古含气范围的地球化学特征[J]. *现代地质*, 2004, 18(4): 572-577.
- HUANG Zhilong, GAO Gang, PANG Xiongqi, et al. The geological-geochemical analysis of the ancient boundary of the gas reservoir of the 8 stratum in the Ordos basin[J]. *Geoscience*, 2004, 18(4): 572-577.
- 佳县王家砭高岭土地质普查报告[R]. 西安: 陕西省地矿局第八地质队, 1993.
- 计波, 焦养泉, 刘阳. 鄂尔多斯盆地东北部下侏罗统富县组底部石英砂岩成因与物源[J]. *地质通报*, 2022, 41(9): 1601-1612.
- JI Bo, JIAO Yangquan, LIU Yang. Petrogenesis and provenance of the quartz sandstone from the bottom of Lower Jurassic Fuxian Formation, northeastern Ordos Basin[J]. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(9): 1601-1612.
- 矿产资源工业要求参考手册编委会. 矿产资源工业要求参考手册[M]. 北京: 地质出版社, 2021.
- Mineral resources Industry requirements Reference Manual editorial board. Mineral resources Industry requirements Reference manual[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2021.
- 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[M]. 北京: 地质出版社, 1992.
- LI Sitian, CHENG Shoutian, YANG Shigong, et al. Sequence stratigraphy and depositional system analysis of the northeastern Ordos basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992.
- 李增学, 李江涛, 韩美莲, 等. 鄂尔多斯盆地中生界聚煤规律及对多能源共存富集的贡献[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2006, 25(2): 1-5.
- LI Zengxue, LI Jiangtao, HAN Meilian, et al. On the coal accumulating law of Mesozoic and its contribution to the concentration of multiple energy resources in Ordos Basin[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science)*, 2006, 25(2): 1-5.
- 李振宏. 鄂尔多斯盆地中-晚侏罗世构造事件的沉积响应[J]. *地球科学*, 2015, 36(1): 22-30.
- LI Zhenhong. Sedimentary response of Middle-Late Jurassic tectonic events in Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 36(1): 22-30.
- 梁海辉. 江西左坊镇高岭土矿成矿地质特征及找矿标志[J]. *新疆有色金属*, 2022, 1: 63-64.
- LIANG Haihui. Geological characteristics and prospecting indicators of kaolin deposit in Zuofang Town, Jiangxi Province[J]. *Xinjiang Youse Jinshu*, 2022, 1: 63-64.
- 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, 1-175.
- Liang Jiwei. 2007. Research on Sedimentary System and Sequence Stratigraphy of Jurassic of the Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2007, 1-175.
- 刘池洋, 赵红格, 王锋, 等. 鄂尔多斯盆地西缘(部)中生代构造属性[J]. *地质学报*, 2005, 79(6): 737-747.
- LIU Chiyang, ZHAO Hongge, WANG Feng, et al. Attributes of the Mesozoic Structure on the west margin of the Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79(6): 737-747.
- 刘池洋, 赵红格, 桂小军, 等. 鄂尔多斯盆地演化-改造的时空坐标及其成藏(矿)响应[J]. *地质学报*, 2006, 80(5): 617-638.
- LIU Chiyang, ZHAO Hongge, GUI Xiaojun, et al. Space-time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(5): 617-638.
- 刘池洋, 吴柏林. 油气煤铀同盆共存成藏(矿)机理与富集分布规律[M]. 北京: 地质出版社, 2016.
- LIU Chiyang, WU Bolin. Accumulation (mineralization) mechanism and spatial enrichment law of oil/gas, coal and uranium coexist-

- ing in the same basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2016.
- 刘翠, 李凤杰, 侯景涛, 等. 鄂尔多斯盆地吴起地区下侏罗统富县组沉积相特征[J]. *岩性油气藏*, 2012, 24(3): 74-78.
- LIU Jiang, LI Fengjie, HOU Jingtao, et al. Sedimentary facies of the Lower Jurassic Fuxian Formation in Wuqi area, Ordos Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2012, 24(3): 74-78.
- 马晓军, 梁积伟, 李建星, 等. 鄂尔多斯盆地中西部中生代构造抬升及演化[J]. *西北地质*, 2019, 52(4): 127-136.
- MA Xiaojun, LIANG Jiwei, LI Jianxing, et al. Meso-cenozoic tectonic uplift and evolution of central and western Ordos Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(4): 127-136.
- 庞军刚, 陈全红, 李文厚, 等. 鄂尔多斯盆地延安组标志层特征及形成机理[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2012, 42(5): 806-812.
- PANG Jungang, CHEN Quanhong, LI Wenhong, et al. The characteristics and forming mechanism of marker bed in Yanan Formation, Ordos Basin[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2012, 42(5): 806-812.
- 石婧, 何登发. 鄂尔多斯盆地东缘晋西挠褶带中段构造特征及演化[J]. *地质科学*, 2024, 59(3): 723-731.
- SHI Jing, HE Dengfa. Tectonic characteristics and evolution of the middle segment of the Jinxi flexure fold belt in the eastern margin of the Ordos Basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2024, 59(3): 723-731.
- 时志强, 韩永林, 赵俊兴, 等. 鄂尔多斯盆地中南部中侏罗世延安期沉积体系及岩相古地理演化[J]. *地球学报*, 2003, 24(1): 49-54.
- SHI Zhiqiang, HAN Yonglin, ZHAO Junxing, et al. Depositional system and paleogeographic evolution of the Middle Jurassic Yan'anian stage in the central and southern Ordos Basin[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2003, 24(1): 49-54.
- 陕西省地质调查院. 中国矿产地质志-陕西卷非金属矿产[M]. 北京: 地质出版社, 2021.
- Shaanxi Institute of Geological Survey. Geology of mineral resources in China volume of Shaanxi non-metallic minerals[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2021.
- 孙洁. 江西吉安高岭土矿床地质特征及找矿远景分析[J]. *现代矿业*, 2021, 626: 46-49.
- SUN Jie. Geological characteristics and prospecting prospect of Kaolin deposit in Ji'an county, Jiangxi Province[J]. *Modern Mining*, 2021, 626: 46-49.
- 孙少华, 李小明, 龚革联. 鄂尔多斯盆地构造热事件研究[J]. *科学通报*, 1997, 42(3): 306-309.
- SUN Shaohua, LI Xiaoming, GONG Gelian. Research on Structural Thermal Events in the Ordos Basin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(3): 306-309.
- 孙肇才. 板内形变与晚期成藏[M]. 北京: 地质出版社, 2003.
- SUN Zhaocai. Intra plate deformation and late stage reservoir formation[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003.
- 陕西省地质调查院. 中国区域地质志-陕西[M]. 北京: 地质出版社, 2017.
- Shaanxi Geological Survey Institute. Regional Geology of China-Shaanxi[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017.
- 王国龙, 胡金山, 胡福林, 等. 景德镇脉型高岭土矿特征及找矿方向探讨—以鹅湖高岭土矿为例[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 41(4): 379-388.
- WANG Guolong, HU Jinshan, HU Fulin, et al. Characteristics and prospecting direction of pulse type kaolin in Jingdezhen—A case of study in Ehu kaolin deposit[J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 2018, 41(4): 379-388.
- 魏永佩, 王毅. 鄂尔多斯盆地多种能源矿产富集规律的比较[J]. *石油与天然气地质*, 2004, 25(4): 385-392.
- WEI Yongpei, WANG Yi. Comparison of enrichment patterns of various energy resources in Ordos basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2004, 25(4): 385-392.
- 吴柏林, 刘池洋, 张复新, 等. 东胜砂岩型铀矿后生蚀变地球化学性质及其成矿意义[J]. *地质学报*, 2006, 80(5): 740-747.
- WU Bolin, LIU Chiyang, ZHANG Fuxin, et al. Geochemical Characteristics of Epigenetic Alteration in Dongsheng Sandstone-type Uranium Deposit and its Metallogenic Signification[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(5): 740-747.
- 谢宽. 浙江东南地区高岭土(瓷土)矿床类型及成矿规律的初步探讨[J]. *浙江地质*, 1986, 2(2): 40-48.
- XIE Kuan. A preliminary discussion on the type and ore-forming law of Kaolin deposits in south-east Zhejiang[J]. *Geology of Zhejiang*, 1986, 2(2): 40-48.
- 岩石矿物分析编委会. 岩石矿物分析(DZG20-2-2011)[M]. 北京: 地质出版社, 2011.
- Editorial Committee for Rock and Mineral Analysis. Rock mineral analysis (DZG20-2-2011)[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011.
- 杨合群, 赵国斌, 陈高潮, 等. 鄂尔多斯地区成矿谱系及成矿演化史[J]. *西北地质*, 2023, 56(2): 175-186.
- YANG Hequn, ZHAO Guobin, CHEN Gaochao, et al. Metallogenic Pedigree and Metallogenic Evolution History in Ordos Area, China[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(2): 175-186.
- 杨华, 席胜利, 魏新善, 等. 鄂尔多斯多旋回叠合盆地演化与天然气富集[J]. *中国石油物探*, 2006(1): 17-24.
- YANG Hua, XI Shengli, WEI Xinshan, et al. Evolution and natural gas enrichment of multicycle superimposed basin in Ordos basin[J]. *Petroeum Geology*, 2006(1): 17-24.
- 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, 1-213.
- YANG Junjie. Tectonic evolution and oil-gas preservoirs distribution

- in Ordos basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002, 1-213
- 叶张煌, 闫强, 王安建, 等. 广西合浦县耀康高岭土矿地质特征和矿床成因[J]. *桂林理工大学学报*, 2016, 36(2): 207-213.
- YE Zhanghuang, YAN Qiang, WANG Anjian, et al. Geological characteristics and ore genesis of Yaokang kaoline deposit in Hepu, Guangxi[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2016, 36(2): 207-213.
- 殷鸿福, 张克信. 中央造山带的演化及其特点[J]. *地球科学*, 1998, 23(5): 438-442.
- YIN Hongfu, ZHANG Kexin. Evolution and characteristics of the central orogenic belt[J]. *Earth Science*, 1998, 23(5): 438-442.
- 袁又申. 苏州阳山高岭土矿床中玻屑、低温热液和蚀变矿物的发现以及对矿床成因的新认识[J]. *沉积学报*, 1984, 2(3): 100-109.
- YUAN Youshen. Discovery of vitroclastic ash and minerals of low-temperature hydrothermal alteration of Yangshan Kaolin deposit, Suzhou, and new understanding of its genesis[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1984, 2(3): 100-109.
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- ZHANG Guowei, ZHANG Benren, YUAN Xuecheng, et al. Qinling orogenic belt and continental dynamics[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- 张国伟, 程顺有, 郭安林, 等. 秦岭—大别中央造山系南缘勉略缝合带的再认识—兼论中国大陆主体的拼合[J]. *地质通报*, 2004, 23(9-10): 846-853.
- ZHANG Guowei, CHENG Shunyou, GUO Anlin, et al. Mianlue paleo-suture on the southern margin of the Central Orogenic System in Qinling-Dabie with a discussion of the assembly of the main part of the continent of China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2004, 23(9-10): 846-853.
- 张倩, 李文厚, 刘文汇, 等. 鄂尔多斯盆地侏罗纪沉积体系及古地理演化[J]. *地质科学*, 2021, 56(4): 1106-1119.
- ZHANG Qian, LI Wenhui, LIU Wenhui, et al. Jurassic sedimentary system and paleogeographic evolution of Ordos Basin[J]. *Chinese Journal of geology*, 2021, 56(4): 1106-1119.
- 赵越, 徐刚, 张栓宏, 等. 燕山运动与东亚构造体制的转变[J]. *地学前缘*, 2004, 11(3): 319-328.
- ZHAO Yue, XU Gang, ZHANG Shuanhong, et al. Yanshanian movement and conversion of tectonic regimes in East Asia[J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(3): 319-328.
- 周鼎武, 赵重远, 李银德, 等. 鄂尔多斯盆地西南缘地质特征及其与秦岭造山带的关系[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- ZHOU Dingwu, ZHAO Chongyuan, LI yinde, et al. Geological features of southwest margin of Ordos basin and its relationships with Qinling orogenic belt[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.
- DZ/T 0206-2020, 高岭土、叶蜡石、耐火黏土矿产地质勘查规范[S].
- DZ/T 0206-2020, Specifications for Kaolin, pyrophyllite, refractory-clay mineral exploration[S].
- JC/T1021.2-2007, 非金属矿物和岩石化学分析方法第2部分硅酸盐岩石、矿物及硅质原料化学分析方法[S].
- JC/T1021.2-2007, Methods for chemical analysis of nonmetal mineral and rock Part 2: methods for chemical analysis of silicate rock, mineral and kiesel material[S].
- GB/T5950-2008, 建筑材料与非金属矿产品白度测量方法[S].
- GB/T5950-2008, Method for measurement of whiteness of building materials and non-metal mineral products[S].
- GB/T50266-2013, 工程岩体试验方法标准[S].
- GB/T50266-2013, Standard for test methods of engineering rock mass[S].
- Charles S. The role of organic matter in the formation of uranium deposits in sedimentary rocks[J]. *Ore Geology Reviews*, 1996, 11(1-3): 53-69.
- Darby J, Bradley D. Mesozoic contractional deformation in the middle of the asian tectonic collage: the in traplate Western Ordos fold thrust belt, China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 205(1-2): 13-24.
- Liu Shaofeng. The coupling mechanism of basin and orogen in the western Ordos Basin and adjacent regions of China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 1998, 16(4): 369-383.
- Meng Qingren, Qu Hongjie, Hu Jianmin. Triassic deep-marine sedimentation in the western Qinling and Songpan terrane[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(Supp.II): 246-263.
- Wang Fei, Li Decheng, Fan Jili, et al. Petrogenesis of the Triassic Sihaiping granite in the South Qinling orogen, central China: Implications for Mo-W mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, 2022, DOI: 10.1016/j.oregeorev.2022.105166.
- Zhu Laimin, Zhang Guowei, Chen Yanjing, et al. Zircon U-Pb ages and geochemistry of the Wenquan Mo-bearing granitoids in West Qinling, China: Constraints on the geodynamic setting for the newly discovered Wenquan Mo deposit[J]. *Ore Geology Reviews*, 2011, 39: 46-62.