

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.09.009

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

计波^{1,2}, 焦养泉³, 刘阳⁴JI Bo^{1,2}, JIAO Yangquan³, LIU Yang⁴

1.大陆动力学国家重点实验室,西北大学地质学系,陕西 西安 710069;

2.中国地质调查局西安地质调查中心,陕西 西安 710054;

3.中国地质大学资源学院,湖北 武汉 430074;

4.中国核工业集团地质调查院有限公司,陕西 西安 710199

1.State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China;

2.Xi'an Center, Geological Survey of China, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

3.Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;

4.Sino Shaanxi Nuclear Industry Group Geological Survey Co., Ltd., Xi'an 710199, Shaanxi, China

摘要:鄂尔多斯盆地东北部富县组底部发育一套石英砂岩,对其形成原因存在不同的认识。为了查明石英砂岩的成因及其物质来源,利用沉积学、岩石学、岩石地球化学等方法进行了研究。结果表明,富县组石英砂岩具有吉尔伯特型三角洲典型的“三层结构”,属湖泊扇三角洲相。石英砂岩的矿物组成以石英和高岭石占绝对优势,石英多为单晶石英,高岭石呈碎片状和折扇状,可能为原始沉积时带入。碎屑组分与岩石地球化学结果显示,其物源为盆地内部隆起提供的富石英质沉积岩。结合区域地质背景,推断印支期延长组顶部长石砂岩风化蚀变形成的富含石英与高岭石的源区物质是富县组底部石英砂岩形成的关键,此类型石英砂岩的形成与不整合面上强烈的风化剥蚀作用有关,且与高岭石土矿床紧密伴生,有可能作为识别不整合面存在的新证据。

关键词:鄂尔多斯盆地;石英砂岩;沉积特征;岩石地球化学;物源;地质调查工程

中图分类号:P534.52;P588.21⁺2.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2022)09-1601-12

Ji B, Jiao Y Q, Liu Y. Petrogenesis and provenance of the quartz sandstone from the bottom of Lower Jurassic Fuxian Formation, northeastern Ordos Basin. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(9): 1601-1612

Abstract: Abstract: A suite of quartz sandstones was deposited in the bottom of the Fuxian Formation in the northeast of Ordos Basin. There are different interpretations about its petrogenesis. The research of sedimentology, petrology and rock geochemistry was carried out on the quartz sandstones to reveal their petrogenesis and provenance. The study show that the quartz sandstones has the characteristic of “three-layer structure” as the Gilbert-type delta which belongs to the lake-fan delta facies. The quartz sandstones are mainly consisted of quartz and kaolinite. The Quartz is mostly single-crystal quartz, the kaolinite appeared to be fragmentary and pliciform, they may show characteristic of the provenance. The results of petrology and geochemistry indicate that the uplifted terrain in the interior of the basin provided large amount of sandstones which rich in quartz as the provenance. Combined with the regional geologic data, the survey results conclude that the arkose on the top of Yanchang Formation had formed the quartz-rich and kaolinite-rich

收稿日期:2021-02-24;修订日期:2021-05-17

资助项目:中国地质调查局项目《商丹—大柴旦地区区域地质调查》(编号:DD20190069)

作者简介:计波(1986-),男,高级工程师,从事区域地质调查、沉积学、岩石地球化学研究。E-mail:jiboxa@126.com

provenance by alteration in Indochina period, and it's the key to form the quartz sandstones in Fuxian formation. This type of quartz sandstone relate with strong weathering on the unconformity, and it closely associated with kaolin deposit. So it may be a new evidence to prove the exist of unconformity.

Key words : Ordos Basin; quartz sandstone; sedimentary characteristics; lithogeochemistry; provenance; geological survey engineering

鄂尔多斯盆地是晚古生代以来形成的大型内陆拗陷沉积盆地,也是中国中生代最大的含煤盆地和内陆含油气盆地。早侏罗世富县组沉积厚度巨大,油藏丰富^[1],是油气运移与储存的良好场所^[2-9]。近年来,在鄂尔多斯盆地东北部富县组底部发现一套纯净的石英砂岩,具有吉尔伯特型三角洲典型的三层结构,其岩石组合明显不同于传统认识的粗碎屑河流相沉积(粗富县)与河漫滩相的细粒沉积(细富县)^[2]。前人对该石英砂岩的形成环境与物质来源存在不同认识:葛道凯等^[10]根据岩石类型与沉积特征,将其划为湖滨三角洲相,并认为沉积受控于印支古侵蚀面,富县组底部石英砂与同时期的砂岩型高岭土矿床矿物组成相似;李思田等^[11]认为其属于河流沉积的产物,物源可能来自延长组顶部遭受强烈风化的长石砂岩、砂砾岩等沉积岩;焦养泉等^[12]认为,石英砂岩形成于吉尔伯特型三角洲环境,由于沉积物供给不足导致了砂岩的成分成熟度与结构成熟度极高。此外,关于富县组的研究成果更多地集中在“粗富县”与“细富县”的古地理环境、沉积相等方面^[1-2,13],缺乏对底部石英砂岩成因与物源的研究。

作为沉积盆地分析的重要手段,沉积学和岩石地球化学分析能够很好地揭示沉积物的沉积环境、物源性质及构造背景^[14-21]。本文以鄂尔多斯盆地考考乌素沟一带富县组底部的石英砂岩为研究对象,通过岩石学、沉积学、岩石地球化学等研究,确定富县组石英砂岩的沉积特征,揭示物源性质,以期深化认识富县组石英砂岩的成因和地质环境。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地是发育在太古宙—古元古代结晶基底之上的多旋回叠合盆地^[22],既具有稳定的板内克拉通盆地构造简单、地层平缓、地层总厚度小、缺乏岩浆活动的特点,又具有周边活动性强、地层褶皱变形、物源近的特点^[23]。研究区位于鄂尔多斯盆地东北部神木—准格尔旗一带(图1),岩浆活动

不发育,出露中、新生代地层,下侏罗统富县组、中侏罗统延安组及延长组分布广泛,地层序列相对完整。富县组为下侏罗统填平补齐的产物,厚度0~100 m,在低凹地带沉积厚,隆起地带沉积薄或缺失。考考乌素沟一带的富县组与下伏延长组呈平行不整合或微角度不整合接触,不整合面上残留灰白色硅铝型古风化层(图版I-a)。富县组底部岩石以灰色石英砂岩与富高岭石石英砂岩为主,石英碎屑颗粒含量极高,富含软体动物化石及植物化石。通过薄片鉴定、X射线衍射、扫描电镜、元素地球化学分析等测试手段,对鄂尔多斯盆地东北部富县组石英砂岩进行了沉积特征与物源的精细研究。

2 石英砂岩的沉积特征

2.1 沉积相特征

Gillbert^[25]根据湖滨的地貌特点,提出吉尔伯特型三角洲,其具有典型的顶积层、前积层和底积层三层结构。富县组底部石英砂岩具有与其相同的结构与倒粒序的沉积特征(图2),且规模较小。底积层为远离河口的前三角洲沉积,形成于湖滨环境。岩石为灰色泥岩、粉砂质泥岩、灰色泥岩与灰白色细粒富高岭石石英砂岩互层,以细粒悬浮沉积物为主,具水平层理与韵律层理,韵律纹层厚2~10 mm,表明水动力较弱。底积层中生物扰动强烈,可见动物潜穴(图版I-b),层面上残留破碎的植物碎屑(图版I-c),表明河流带来的丰富有机质和营养物质有利于生物的大量繁殖,容易产生生物遗迹和生物扰动构造。前积层发育,层厚较大,属三角洲前缘沉积。前积层主要包含河口坝和分流河道环境下的沉积产物。河口坝主要由灰色泥岩和粉砂岩组成,砂质组分由下到上逐渐增多,具有远端河口坝的“泥包砂”与近端河口坝的“砂包泥”(图版I-d)结构,发育水平层理与低角度交错层理,偶见波状层理,层厚与延伸稳定,河口坝向前生长或迁移可产生切线形或“S”形前积层的板状交错层理(图版I-e),并出现动物潜穴等生物扰动构造。分

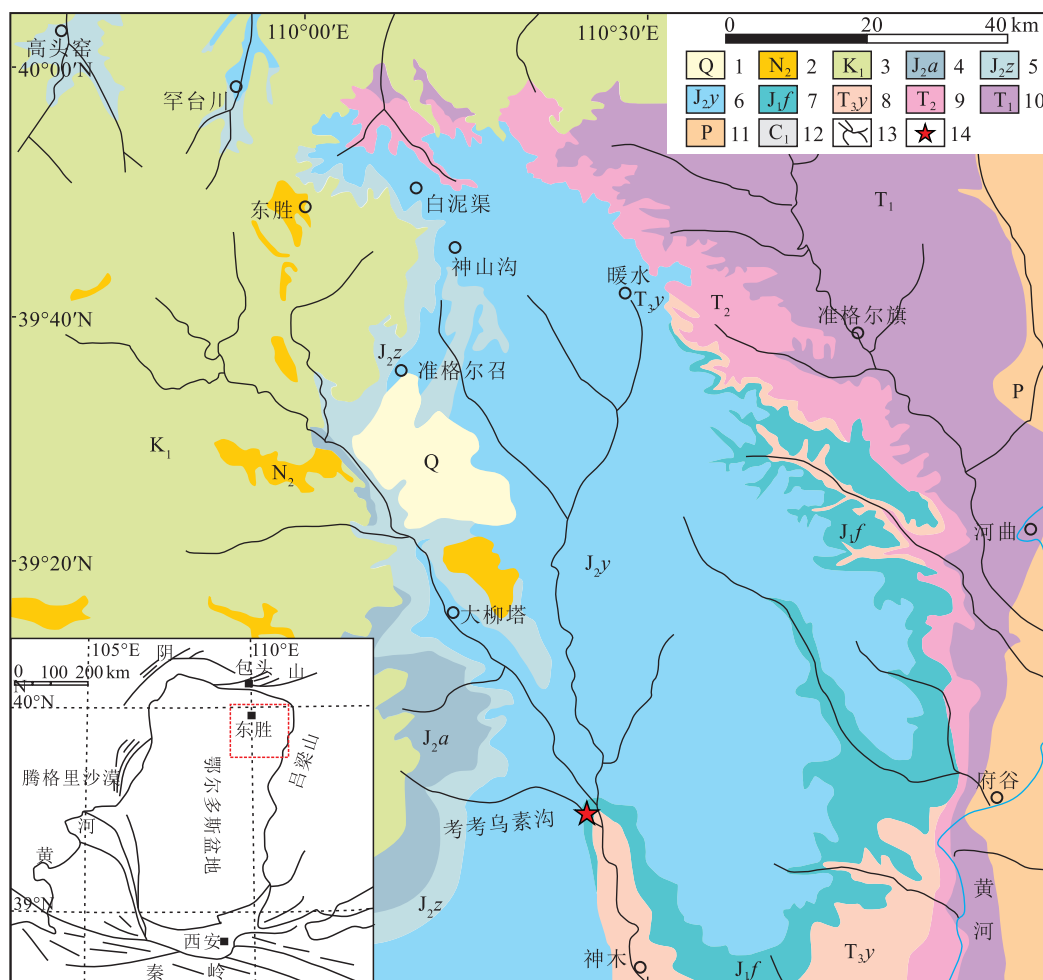
图 1 鄂尔多斯盆地东北部地质简图^[24]

Fig. 1 Schematic geological map of the northeastern Ordos Basin

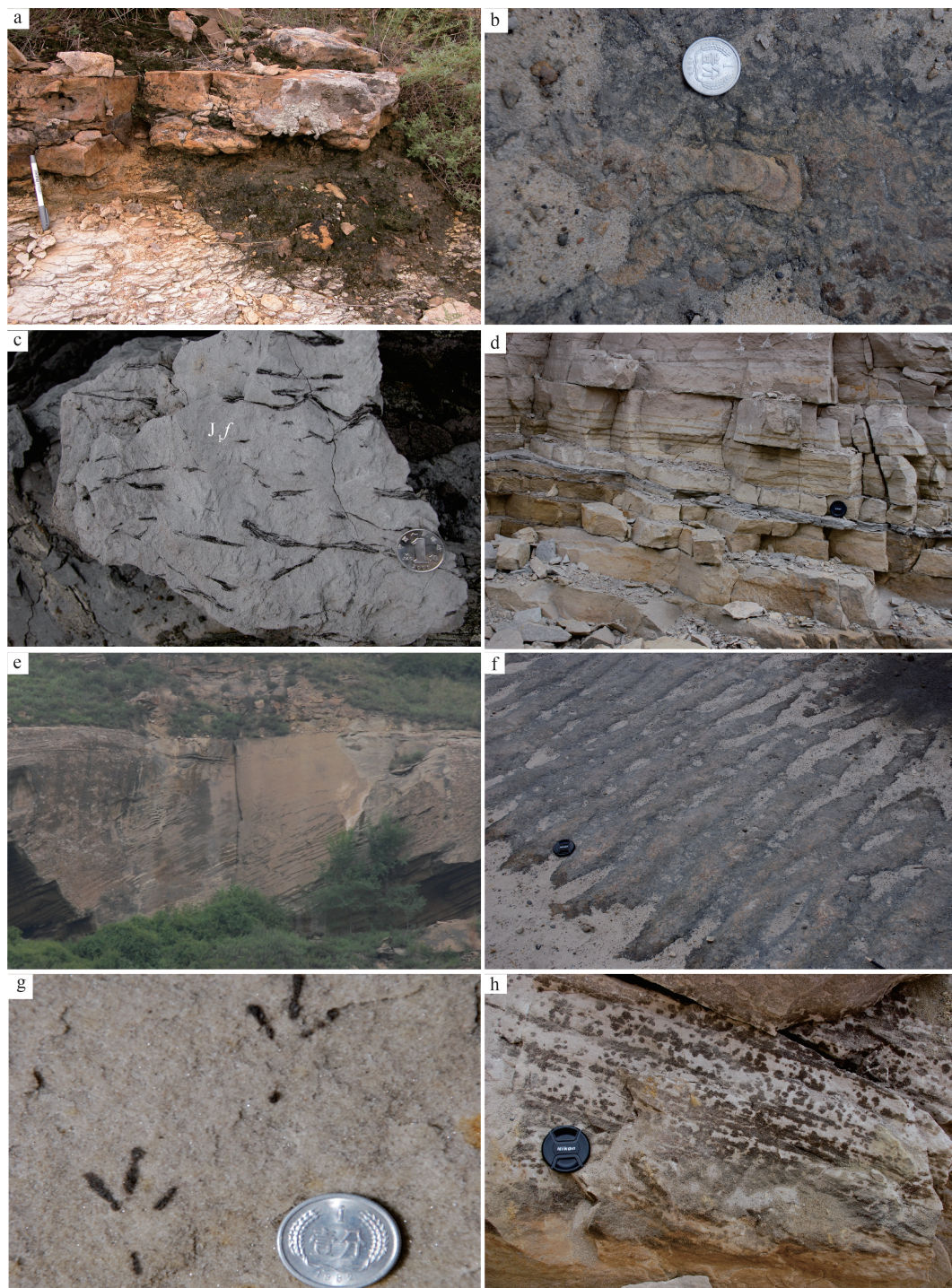
1—第四系;2—上新统;3—下白垩统;4—中侏罗统安定组;5—中侏罗统直罗组;6—中侏罗统延安组;7—下侏罗统富县组;
8—上三叠统延长组;9—中三叠统;10—下三叠统;11—二叠系;12—下石炭统;13—水系;14—采样位置

流河道岩性以纯净的灰白色细粒石英砂岩为主,发育板状交错层理和水平层理,层面上偶见保存良好的水流波痕(图版 I -f)及植物根系遗迹与鸟类足迹(图版 I -g),局部见褐黑色含油斑石英砂岩,具有良好的含油显示(图版 I -h)。顶积层属三角洲平原沉积,岩性以灰白色中—细粒石英砂岩为主,底部见冲刷面和泥砾,主要为分流河道相,河道砂体发育,可见小型河道向上叠加的形态,砂体内部见板状交错层理与低角度前积纹层,具有明显的正粒序特征。分流河道之上为粉砂岩与灰色泥岩、黑色炭质泥岩互层,发育水平层理,植物根迹丰富,属河道边缘分流间湾的产物。野外露头特征表明,富县组石英砂岩形成于湖滨三角洲环境。

2.2 岩石矿物学特征

通过岩石样品薄片鉴定、扫描电镜分析及 XRD 衍射分析(图 3)可知,砂岩样品分为石英砂岩(Jf-1~Jf-5)与富高岭石石英砂岩(KQ-1~KQ-4)2 种类型。石英砂岩(Jf-1~Jf-5)的 $Q/(Q+F+L)$ 平均值为 0.99,碎屑成分几乎全为石英(图版 II -a、b),单晶石英占石英总量的 92%~96%,分选性中等,呈次棱角状—次圆状,石英颗粒呈紧密的凹凸接触关系,杂基含量低,部分石英具有溶蚀现象,胶结物以石英加大边为主(图版 II -c)。富高岭石石英砂岩以石英与高岭石为主(图版 II -d),两者总量大于 90%。碎屑颗粒以石英为主体,单晶石英占比比较多,含量为 45%~60%,分选性中等,呈次棱角状—

图版 I Plate I



a.富县组底部石英砂岩与风化壳;b.动物潜穴;c.泥质粉砂岩中的植物碎屑;d.近端河口坝中砂包泥结构;e.前积结构中的板状交错层理;f.水流波痕;g.鸟类足迹化石;h.前积层顶部含油斑砂岩。J₁f—下侏罗统富县组

次圆状;粘土矿物高岭石含量为 30%~55%,粒度粗细不一,充填于碎屑颗粒之间,正交偏光下为蠕虫状和碎屑状的集合体(图版 II-e),扫描电镜下呈碎片状和书页状(图版 II-f),完整的高岭石单晶晶体

不易见,可能为原始沉积时带入的高岭石碎片。从矿物组成看,富县组砂岩样品中易溶组分明显缺失,石英砂岩也不可能简单地在河流环境中形成^[25]。因此推测,其形成可能与成岩过程中强烈的

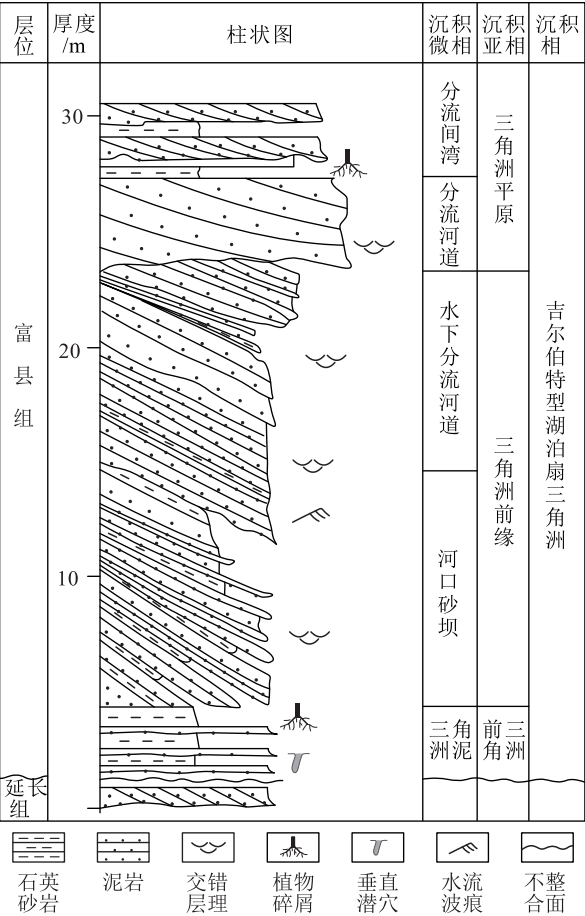


图 2 富县组底部石英砂岩垂向序列

Fig. 2 The sequence of the quartz sandstone in the bottom of Fuxian Formation

化学溶蚀作用或是源区富含石英碎屑物质有关。

3 测试方法

本次在考考乌素沟采集了 9 件富县组石英砂岩样品,采样位置见图 1。样品均采自基岩出露较好的部位,呈块状,岩石新鲜。岩石 X 射线衍射由中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室分析,采用 Pert Pro DY2198 X 射线衍射仪,衍射角精密度和重现性小于 0.002。主量、微量和稀土元素均由中国地质调查局西安地质调查中心自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室分析测试。主量元素采用 VF320 单道荧光光谱仪(XRF)测定,分析精度优于 5%;用碱熔法测 Fe_2O_3 ,用酸溶法测 FeO ;微量和稀土元素采用 Agilent 7500a 等离子体质谱仪(ICP-MS)测定,分析精度优于 5%~10%。

4 分析结果

4.1 主量元素

由富县组石英砂岩的主量元素分析结果可知(表 1),两类砂岩均以 SiO_2 和 Al_2O_3 为主,其含量之和为 89.58%~99.03%,说明富硅铝矿物占绝对优势。富县组石英砂岩的 SiO_2 含量为 91.73%~98.79%,平均值为 95.65%, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 值为 0.002~0.05,平均值为 0.02,表明砂岩中石英或富 SiO_2 的矿

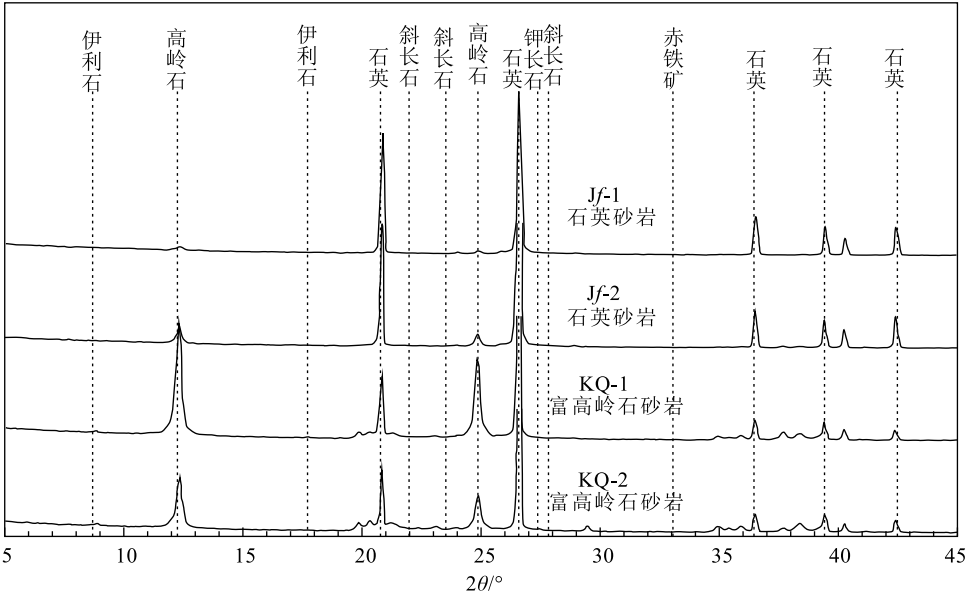
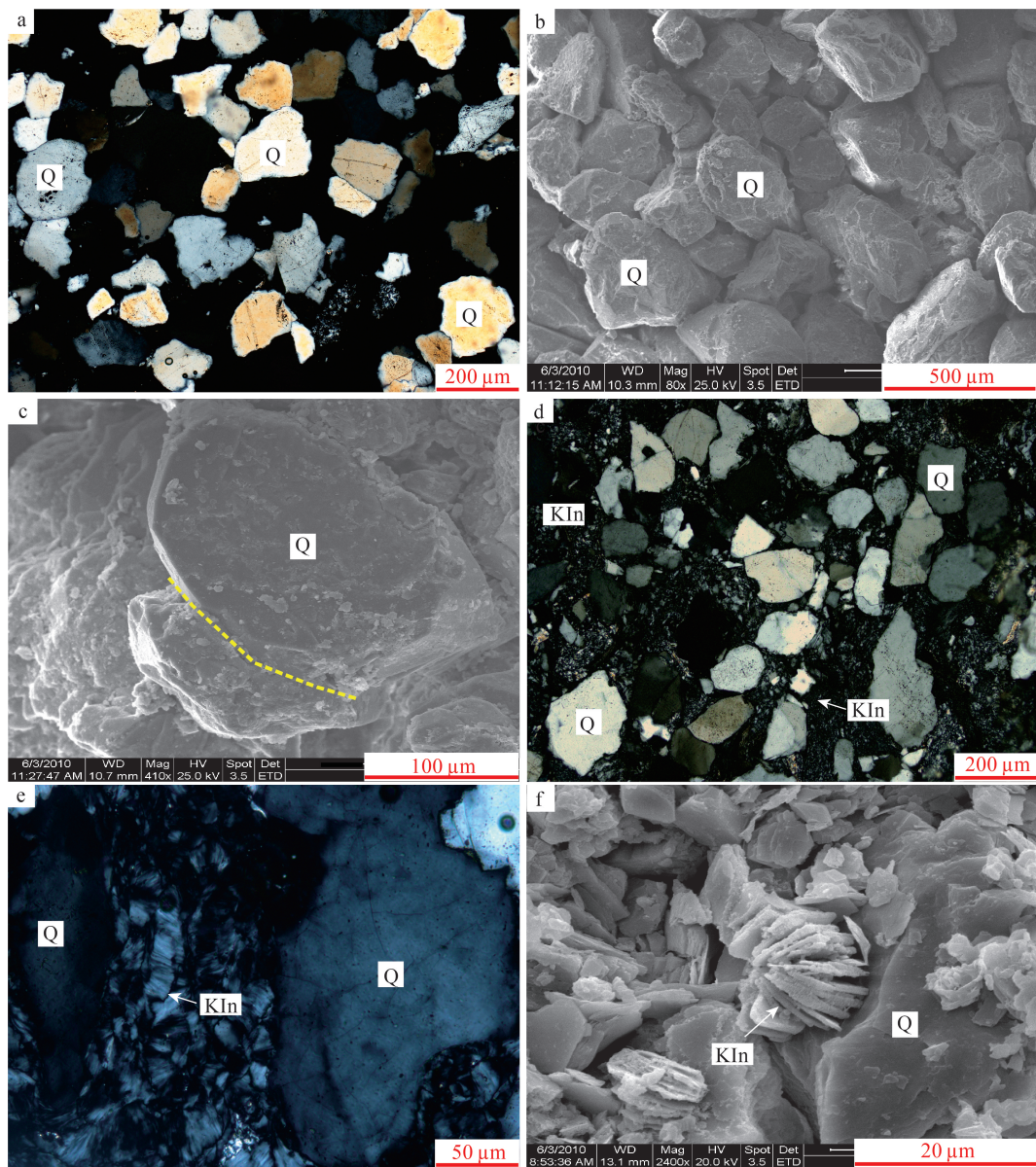


图 3 鄂尔多斯盆地东北部富县组石英砂岩 XRD 衍射图谱

Fig. 3 The XDR analysis of quartzs sandstone in the Fuxian Formation in the northeastern Ordos Basin

图版 II Plate II



a. 石英砂岩镜下特征, 正交偏光; b. 石英砂岩电镜下特征, 扫描电镜; c. 石英加大边, 扫描电镜; d. 富高岭石石英砂岩的镜下特征, 正交偏光; e. 富高岭石石英砂岩中的高岭石集合体, 正交偏光; f. 富高岭石石英砂岩中的折扇状与碎片状高岭石, 扫描电镜。Q—石英; Kln—高岭石

物含量极高, 与薄片鉴定结果一致。富高岭石石英砂岩的 SiO_2 含量为 70.29% ~ 84.27%, 平均值为 78.24%, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 值为 0.08 ~ 0.27, 平均值为 0.17。石英砂岩的 Al_2O_3 含量为 0.24% ~ 4.72%, 平均值为 2.28%, 而富高岭石石英砂岩的 Al_2O_3 含量明显较高, 为 9.45% ~ 19.29%, 平均值为 13.52%, 表明高岭石的富集程度决定了 Al_2O_3 含量的高低。由于 2 种石英砂岩中缺少长石, Na_2O 与 K_2O 含量均较低。

4.2 微量与稀土元素

由微量元素测试结果可知(表 2), 所有样品富

集 La、Ce、Nd、Sm、Tb, 亏损 K、Nb、Sr、Ti。微量元素蛛网图(图 4-a)呈“三峰三谷一平坦”型, 曲线呈阶梯状分布, 石英砂岩的 K 元素亏损严重, 这与钾长石的蚀变消失有关。Zr/Hf 值可反映原始的成因与物源, 石英砂岩样品的 Zr/Hf 值为 34.19 ~ 39.68, 平均值为 37.18, 表明石英砂岩的母岩可能为富含英质的酸性岩石。Sr/Ba 值与沉积时期的古气候相关, Sr/Ba 值越小, 显示古盐度越低, 气候越温湿, 石英砂岩 Sr/Ba 值为 0.07 ~ 0.52, 平均值为 0.30, 表明富县组沉积初期气候温暖潮湿。

表 1 富县组石英砂岩主量元素分析结果
Table 1 The concentration of major element for quartz sandstone in Fuxian Formation

%

样品号	Jf-1	Jf-2	Jf-3	Jf-4	Jf-5	KQ-1	KQ-2	KQ-3	KQ-4	富县组(平均值)		
岩性	细砂岩	细砂岩	细砂岩	细砂岩	细砂岩	细砂岩	细砂岩	细砂岩	中砂岩	样品	石英砂岩	富高岭石石英砂岩
SiO ₂	91.73	94.48	98.79	95.22	98.05	80.92	77.46	70.29	84.27	87.91	95.65	78.24
Al ₂ O ₃	4.72	2.98	0.24	2.73	0.72	11.01	14.33	19.29	9.45	7.27	2.28	13.52
Fe ₂ O ₃	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.09	0.22	0.36		<0.01	
FeO	0.62	0.38	0.27	0.21	0.18	1.67	0.6	1	0.9	0.65	0.33	1.04
CaO	0.09	0.11	0.17	0.14	0.2	0.09	0.68	0.65	0.24	0.26	0.14	0.42
MgO	0.09	0.1	0.18	0.12	0.13	0.1	0.1	0.11	0.26	0.13	0.12	0.14
K ₂ O	0.06	0.05	0.02	0.03	0.03	0.12	0.16	0.59	0.28	0.15	0.04	0.29
Na ₂ O	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.05	0.07	0.08	0.05	0.05	0.04	0.06
TiO ₂	0.64	0.54	0.22	0.3	0.18	1.4	0.68	0.38	0.27	0.51	0.38	0.68
P ₂ O ₅	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.02	0.03	0.06		<0.01	0.03
MnO	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.03	0.02	0.02	0.01		<0.01	0.02
烧失量	4.07	5.95	0.38	2.12	0.87	5.38	11	14	7.24	5.67	2.68	9.41
总和	98	98.68	99.93	98.79	99.52	95.4	94.21	92.66	96.15	97.04	98.98	94.61
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	0.05	0.03	0.002	0.03	0.01	0.14	0.18	0.27	0.11	0.09	0.02	0.18
K ₂ O/Na ₂ O	1.2	1.25	0.5	0.75	1	2.4	2.29	7.38	5.6	2.49	0.94	4.42
F ₁	-6.96	-8.04	-9.27	-7.9	-8.91	-3.69	-0.91	2.51	-3.36			
F ₂	-6.32	-6.45	-6.87	-6.57	-6.75	-5.76	-5.23	-4.56	-6.14			

富县组石英砂岩稀土元素含量与特征比值如表 3 所示。由于稀土元素主要吸附于粘土矿物,部分吸附在石英颗粒中,所以粘土矿物越少,稀土元素总量(ΣREE)越小。其中富县组石英砂岩 ΣREE 含量为 $10.65 \times 10^{-6} \sim 59.97 \times 10^{-6}$,平均值为

35.52×10^{-6} , ΣREE 与 SiO_2 存在较好的负相关性。 $\Sigma \text{LREE} / \Sigma \text{HREE}$ 值为 7.22~15.76,平均值为 11.4,反映轻稀土元素富集,重稀土元素亏损; δEu 值为 0.39~0.70,平均值为 0.56,负 Eu 异常明显; δCe 值为 1.00~1.75,平均值为 1.29,显示正异常特征; La / Yb

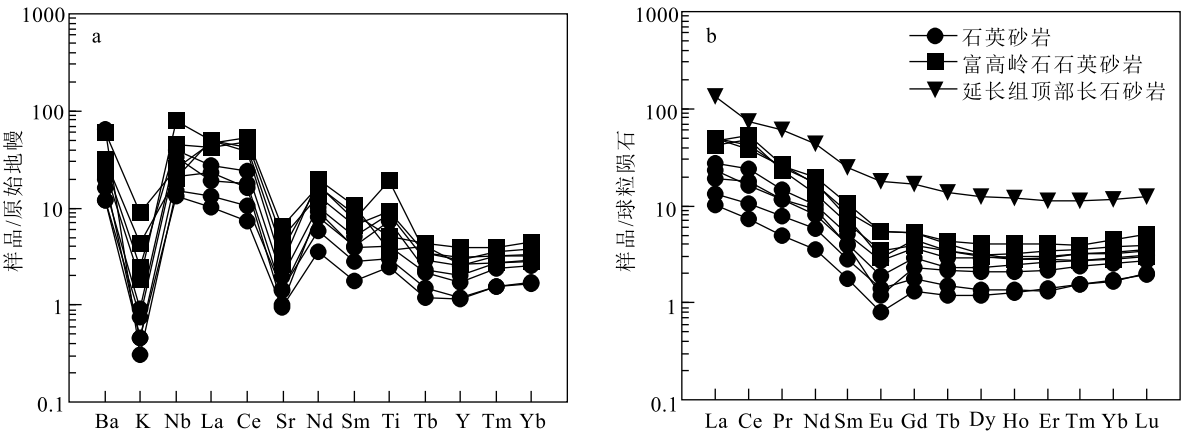


图 4 富县组石英砂岩微量元素标准化蛛网图(a)与球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(b)^[27]
Fig. 4 The trace element spider diagrams(a) and REE patterns(b) for quartz sandstones in Fuxian Formation

表 2 富县组石英砂岩微量及稀土元素分析结果
Table2 The concentration of trace element and REE for quartz sandstone in Fuxian Formation

样品号	Jf-1	Jf-2	Jf-3	Jf-4	Jf-5	KQ-1	KQ-2	KQ-3	KQ-4	富县组(平均值)		
										样品	石英砂岩	富高岭石石英砂岩
岩性	细砂岩	细砂岩	细砂岩	细砂岩	细砂岩	细砂岩	细砂岩	细砂岩	中砂岩			
Pb	9.84	8.05	16.80	9.92	15.00	11.40	28.30	34.40	7.00	15.63	11.92	20.28
Zn	9.17	10.60	29.90	13.00	24.30	20.80	72.10	70.40	27.40	30.85	17.39	47.68
Cr	24.10	16.60	9.45	11.90	7.40	47.00	45.80	22.70	18.60	22.62	13.89	33.53
Ni	2.83	3.01	3.56	2.91	5.88	13.00	11.00	7.19	16.40	7.31	3.64	11.90
Co	0.97	0.87	0.72	0.63	0.72	2.75	5.34	3.36	7.09	2.49	0.78	4.64
Rb	2.62	2.15	1.02	2.06	1.48	5.38	8.42	21.30	13.00	6.38	1.87	12.03
Cs	0.26	0.15	0.05	0.14	0.11	0.49	0.92	0.56	0.37	0.34	0.14	0.59
Sr	14.40	10.20	10.70	7.38	6.99	26.40	35.60	45.90	19.40	19.66	9.93	31.83
Ba	38.40	28.80	158.00	48.20	28.80	58.40	69.00	148.00	75.60	72.58	60.44	87.75
V	21.40	16.20	4.80	10.20	3.27	50.50	67.50	50.70	24.90	27.72	11.17	48.40
Sc	2.68	2.19	0.69	1.23	0.68	6.78	7.41	12.20	4.03	4.21	1.49	7.61
Zr	97.60	64.70	175.00	130.00	100.00	106.00	98.30	94.60	89.50	106.19	113.46	97.10
Hf	2.66	1.85	4.42	3.40	2.52	3.10	2.69	2.48	2.45	2.84	2.97	2.68
Th	1.87	1.76	1.12	3.53	1.71	9.15	8.33	3.96	3.06	3.83	2.00	6.13
La	6.45	4.55	3.16	5.42	2.40	11.60	9.83	11.00	11.80	7.36	4.40	11.06
Ce	14.50	10.90	6.54	9.80	4.52	25.60	29.30	32.90	23.20	17.47	9.25	27.75
Pr	1.40	1.11	0.75	1.12	0.47	2.35	2.22	2.53	2.46	1.60	0.97	2.39
Nd	4.75	3.77	2.74	4.29	1.65	8.00	6.14	7.72	9.08	5.35	3.44	7.74
Sm	0.79	0.61	0.43	0.60	0.27	1.17	1.03	1.33	1.61	0.87	0.54	1.29
Eu	0.16	0.11	0.08	0.07	0.05	0.17	0.20	0.32	0.32	0.16	0.09	0.25
Gd	0.75	0.59	0.36	0.48	0.27	0.93	0.81	1.10	1.07	0.71	0.49	0.98
Tb	0.11	0.09	0.06	0.08	0.05	0.13	0.13	0.16	0.15	0.11	0.08	0.14
Dy	0.73	0.59	0.35	0.54	0.30	0.80	0.77	1.03	0.82	0.66	0.50	0.86
Ho	0.17	0.14	0.08	0.12	0.07	0.18	0.16	0.23	0.16	0.15	0.12	0.18
Er	0.50	0.43	0.22	0.36	0.23	0.56	0.48	0.66	0.46	0.43	0.35	0.54
Tm	0.08	0.07	0.04	0.06	0.04	0.09	0.08	0.10	0.07	0.07	0.06	0.09
Yb	0.54	0.49	0.28	0.43	0.29	0.64	0.57	0.76	0.48	0.50	0.41	0.61
Lu	0.09	0.08	0.05	0.07	0.05	0.10	0.09	0.13	0.08	0.08	0.07	0.10
La/Th	3.45	2.59	2.82	1.54	1.40	1.27	1.18	2.78	3.86	2.32	2.36	2.27
ΣREE	31.02	23.53	15.14	23.44	10.65	52.32	51.81	59.97	51.76	35.51	20.76	53.97
ΣLREE/ ΣHREE	9.45	8.51	9.56	9.95	7.22	14.25	15.76	13.38	14.75	11.43	8.94	14.54
δEu	0.63	0.55	0.63	0.39	0.53	0.48	0.65	0.79	0.70	0.59	0.55	0.66
(La/Yb) _N	8.57	6.66	8.10	9.04	5.94	13.00	12.37	10.38	17.63	10.19	7.662	13.345

值为 8.28~24.58,平均值为 14.20;(La/Yb)_N 值为 5.94~17.63,平均值为 10.19。球粒陨石配分型式表

现为右倾斜(图 4-b),轻稀土元素相对富集,重稀土元素平坦。

表 3 富县组石英砂岩样品碎屑颗粒组分
Table 3 Detrital mode of quartzs sandstone in Fuxian Formation

样品号	Qm	Qp	Q	P	K	F	Ls	Lt	Q/(Q+F+L)	Qm/Q
Jf-1	301	18	319	0	0	0	2	20	0.99	0.94
Jf-2	289	19	308	0	0	0	3	22	0.99	0.94
Jf-3	302	14	316	0	0	0	2	16	0.99	0.96
Jf-4	276	23	299	0	0	0	3	26	0.99	0.92
Jf-5	284	16	300	0	0	0	3	19	0.99	0.95
KQ-1	256	21	277	4	6	10	6	27	0.95	0.92
KQ-2	238	41	279	3	5	8	5	46	0.96	0.85
KQ-3	243	27	270	4	8	12	10	37	0.92	0.90
KQ-4	240	34	274	5	12	17	12	46	0.90	0.88

注: Qm—单晶石英; Qp—多晶石英碎屑(包括燧石); Q—石英颗粒总数; Pl—斜长石; Kf—钾长石; F—长石颗粒总数; Ls—沉积岩和变质岩岩屑; L—不稳定岩屑(L=Lv+Ls); Lt—多晶质岩屑(L+Qp)

5 讨 论

5.1 物源分析

5.1.1 碎屑组分

砂岩碎屑组分分析是物源区分析的重要途径, 其中 Dickson 图解是最有效的方法之一, 可以直接反映物源区母岩性质及构造背景^[28-31]。Dickinson 等^[29]指出, 大陆板块来源与再旋回造山来源在 Q-F-L 图解的 Q 极点有部分重合, 两者不易区分, 而 Qm-F-Lt 能较好地地区分。碎屑组分分析结果(表 3)显示, 石英砂岩以单晶石英为主, 长石颗粒与岩屑组分较少。在 Q-F-L 图解(图 5-a)中, 富县组砂岩样品点均落于大陆板块物源区与再旋回造山物源区边缘; 在 Qm-F-Lt 图解(图 5-c)中, 所有砂岩样品点基本都落入大陆板块物源区; 在 Qm-P-K

图解(图 5-b)中, 砂岩样品投点显示其物源来自成熟度较高的大陆板块或再旋回造山带。上述证据表明, 石英砂岩的物源为大陆板块克拉通, 盆地内部隆起提供的碎屑物质, 且其成分成熟度较高, 源区可能为富含长英质的岩浆岩或石英质含量较高的沉积岩。

5.1.2 岩石地球化学

沉积盆地中碎屑岩的化学组成受到物源、风化、剥蚀、搬运、沉积、成岩等一系列因素影响, 但主要受控于沉积物的物源, 因此碎屑岩的地球化学性质能够反映源区岩石的特征。在砂岩的主量元素多变量环境判别图(图 6)中, 除 1 个砂岩样品外, 其余样品均落入富含石英质沉积岩物源区, 表明物源来自古老的地质体、克拉通或再旋回造山带。微量元素对碎屑沉积岩物源区同样具有指示意义^[33], 铁

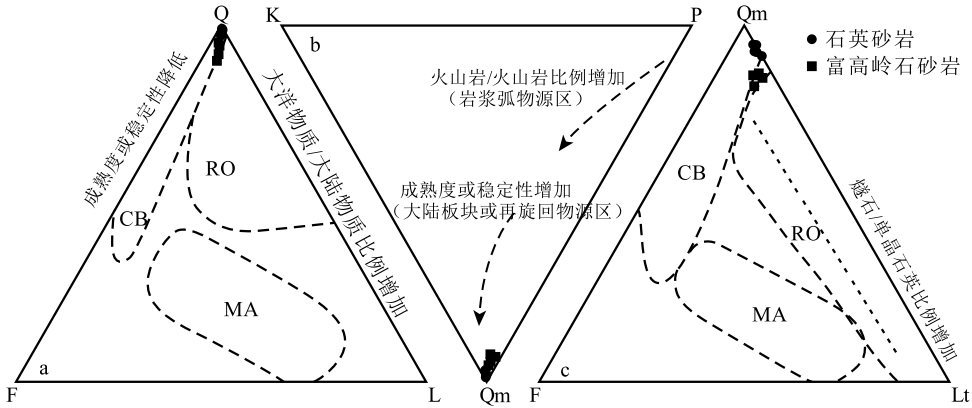
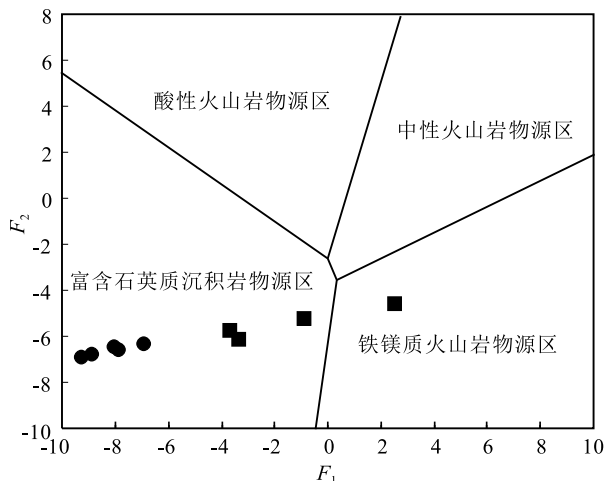


图 5 富县组石英砂岩 Q-F-L(a)、Qm-P-K(b)和 Qm-F-Lt(c)物源区大地构造背景判别图^[29]

Fig. 5 Q-F-L(a), Qm-P-K(b) and Qm-F-Lt(c) tectonic settings discriminating diagrams for quartz sandstone in Fuxian Formation
CB—大陆板块物源区; RO—再旋回造山物源区; MA—岩浆弧物源区

图6 富县组石英砂岩 F_1 - F_2 物源判别图解^[32]Fig. 6 Discrimination function diagram (F_1 - F_2) for illustrating sedimentary provenance of quartz sandstones in Fuxian Formation

镁质岩石会导致碎屑沉积物中 Sc、V、Co 等元素含量升高,而与上地壳相比,所有砂岩的 Sc、V 和 Co 含量明显偏低,表明缺少铁镁质矿物。Bhatia 等^[33]研究认为,Cr/Zr 值可以反映镁铁质与长英质岩石对沉积物的相对贡献。富县组砂岩样品的 Cr/Zr 值为 0.05~0.47,平均值为 0.23,表明砂岩物源主要来自长英质岩石。稀土元素能够可靠地保存源区岩石的特征^[33]。所有样品的 δEu 值为 0.39~0.79,平均值为 0.59,显示负 Eu 异常,表明石英砂岩的源岩都存在 Eu 亏损,且物源更可能来自花岗岩和长英质变质岩或大陆源区的沉积岩。Hf-La/Th 判别

图解(图 7-a)显示,石英砂岩样品的物源来自长英质岩石,而 $\Sigma\text{REE-La/Yb}$ 图解(图 7-b)显示,石英砂岩的源岩主要为沉积岩。结合碎屑组分分析结果,推断富县组石英砂岩的物源应该为来自盆地内部隆起提供的富石英质沉积岩。

5.2 石英砂岩成因

石英砂岩常见的成因有:①与海洋或风的沉积作用有关^[26,35-36];②与古老沉积物多旋回沉积有关^[26,37];③与基准面的夷平及源区的强烈化学风化作用有关^[26,38]。综合富县组底部石英砂岩的沉积特征与物源分析结果,笔者认为,其成因可能与基准面的夷平及源区的强烈化学风化作用有关。延长组顶部砂岩的长石含量较高^[39],并具有高岭石化的特征,杂基主要为蒙脱石和高岭石,其在合适条件下经强烈风化可转变为富含石英和高岭石的物质^[10],成为富县组石英砂岩的物质来源^[11],两者相似的稀土元素配分曲线(图 4-b)表明它们可能存在亲缘关系。印支运动时期,温湿的气候和延长组顶部的不整合面为其形成提供了有利的古气候和古地貌背景,使延长组母岩和较远剥蚀区其他类型富长石母岩中的长石、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储备了丰富的物源。在此之后,源区的高岭石通过多价阳离子和腐殖质与石英紧密地联结在一起,形成大量稳定结合的高岭石-腐殖质-石英复合体^[40],再经河流近距离搬运至邻近的小型湖泊

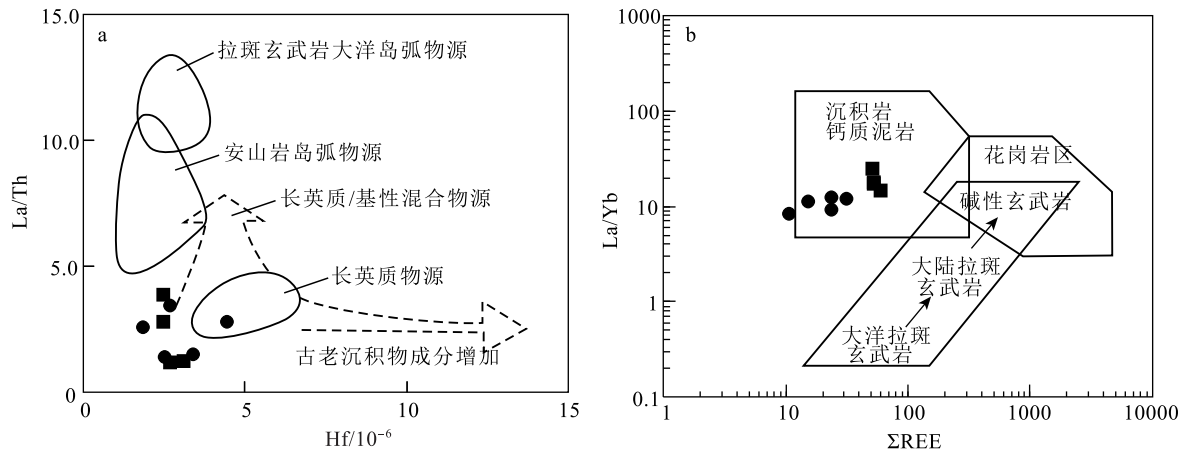
图7 富县组石英砂岩源区判别图解^[34]

Fig. 7 Discrimination diagrams illustrating sedimentary provenance of the quartz sandstones in Fuxian Formation

a—Hf-La/Th 图解;b— $\Sigma\text{REE-La/Yb}$ 图解

中,形成吉尔伯特型湖泊扇三角洲。同时,在鄂尔多斯盆地东北部印支不整合面上直接赋存有大型的沉积型高岭土矿床,其物质来源与富县组石英砂岩十分相似,可能为同一时期不同沉积的产物。因此,由延长组顶部长石砂岩风化蚀变而成的富含石英与高岭石的源区物质是富县组底部石英砂岩形成的关键。同时,在研究区富县组之上,延安组与直罗组之间的燕山不整合面上发育与印支不整合面上相似的石英砂岩与高岭土矿床,两者具有明显的成因联系^[11]。综上所述,此类型石英砂岩的形成与不整合面上强烈的风化剥蚀作用有关,且与高岭石土矿床紧密伴生,有可能作为识别不整合面存在的新证据。

6 结 论

(1)鄂尔多斯盆地东北部下侏罗统富县组底部石英砂岩形成于湖泊扇三角洲环境,具有吉尔伯特型三角洲典型的“三层结构”,其矿物碎屑组分以石英为主。

(2)富县组石英砂岩的碎屑组分与岩石地球化学分析显示,其物源为盆地内部隆起提供的富石英质沉积岩。

(3)印支运动时期,延长组顶部长石砂岩风化蚀变形成的富含石英与高岭石的源区物质是富县组底部石英砂岩形成的关键。此类型石英砂岩的形成与不整合面上强烈的风化剥蚀作用有关,且与高岭石土矿床紧密伴生,有可能作为识别不整合面存在的新证据。

致谢:野外工作中得到中国地质大学资源学院吴立群与荣辉教授的大力支持;成文过程中获得中国地质调查局西安地质调查中心李向民研究员与郭亚鹏工程师的帮助;审稿专家对文稿提出了很好的修改意见,在此一并感谢。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 赵俊兴,陈洪德,张锦泉,等.鄂尔多斯盆地地下侏罗统富县组沉积体系及古地理[J].沉积与特提斯地质,1999,19(5): 40-46.
- [3] 李凤杰,王多云,刘自亮,等.鄂尔多斯盆地华池地区中侏罗统延安组延9油层组河流沉积及演化[J].古地理学报,2009,11(3): 275-283.
- [4] 唐波,陈义才,林杭杰,等.定边地区富县组储层砂岩成岩作用及孔隙演化特征[J].湖北文理学院学报,2011,32(5): 37-41.

- [5] 陈俊丽,唐波,古伟,等.定边地区富县组油气成藏条件研究[J].湖北文理学院学报,2011,32(11): 60-63.
- [6] 张云霞,陈纯芳,宋艳波,等.鄂尔多斯盆地南部中生界烃源岩特征及油源对比[J].石油实验地质,2012,34(2): 173-177.
- [7] 李龙龙,李超,王平平,等.鄂尔多斯盆地胡154富县组油藏建产有利区分析[J].石油化工应用,2015,34(2): 81-83.
- [8] 吕振华,齐亚林,孟令涛.鄂尔多斯盆地西北部地区侏罗系成藏主控因素研究[J].新疆石油天然气,2016,12(1): 19-24.
- [9] 蒋代琴,文志刚,汤仁文,等.鄂尔多斯盆地吴起地区古地貌对侏罗系下部油藏形成和富集控制机制分析[J].地质力学学报,2018,24(5): 45-52.
- [10] 葛道凯,杨起,付泽明.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.
- [11] 李思田,程守田,杨士恭.鄂尔多斯盆地东北部层序地层及沉积体系[M].北京:地质出版社,1992.
- [12] 焦养泉.曲流河与湖泊三角洲沉积体系及典型骨架砂体内部构成分析[M].武汉:中国地质大学出版社,1995.
- [13] 刘攀,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,2002,24(3): 74-78.
- [14] Roser B P, Korsch R J. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO_2 content and $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ratio[J]. Journal of Geology, 1986, 94: 635-650.
- [15] Roser B P, Korsch R J. Geochemical characterization, evolution and source of a Mesozoic accretionary wedge: The Torlesse terrane, New Zealand[J]. Geological Magazine, 1999, 136: 493-51.
- [16] McLennan S M, Hemming S R, McDaniell D K, et al. Geochemical approaches to sedimentation, provenance and tectonics[C]//Johansson M J, Basu A. Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments. Special Paper of Geological Society America, 1993, 284: 21-40.
- [17] 杨守业,李从先.REE示踪沉积物物源研究进展[J].地球科学进展,1999,14(2): 164-167.
- [18] Hill I G, Worden R H, Meighan I G. Geochemical evolution of a palaeolaterite: The interbasaltic formation, Northern Ireland [J]. Chemical Geology, 2000, 166: 65-84.
- [19] 闫义,林舸,王岳军,等.盆地陆源碎屑沉积物对源区构造背景的指示意义[J].地球科学进展,2002,17(1): 85-90.
- [20] 闫臻,肖文交,刘传周,等.祁连山老君山砾岩的碎屑组成及源区大地构造背景探讨[J].地质通报,2006,25(1/2): 83-98.
- [21] 闫臻,王宗起,王涛,等.秦岭泥盆系形成构造环境:来自碎屑岩组成和地球化学方面的约束[J].岩石学报,2007,23(5): 1023-1042.
- [22] 刘池阳,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.
- [23] 柳益群,李继红,冯乔,等.鄂尔多斯盆地三叠-侏罗系的成岩作用及其成藏成矿响应[J].岩石学报,2009,25(10): 2331-2339.
- [24] 张龙,刘池阳,雷开宇,等.鄂尔多斯盆地东北部侏罗系延安组漂白砂岩成因和古风化壳形成环境探讨[J].地质学报,2017,91(6): 1345-1359.
- [25] Gilbert G K. The topographic features of lake shores[J]. United States

- Geological Survey Annual Report, 1885, 5: 104–108.
- [26] 姜在兴. 沉积学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
- [27] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: Implication for mantle composition and processes[C]//Saunders A D, Norry M J. Magmatism in Oceanic Basins. Spec. Publ. Geol. Soc. Lond., 1989, 42(1): 313–345.
- [28] Dickinson W R. Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones [J]. Provenance of Arenites. Nato Advanced Study Institute Series, 1985, 148: 333–361.
- [29] Dickinson W R, Suczek C A. Plate tectonic and sandstone compositions[J]. AAPG Bulletin, 1979, 63(12): 2164–2182.
- [30] Grazanti E. Sedimentary evolution and drowning of a passive margin shelf (Giumal Group; Zaskar Tethys Himalaya, India): Palaeoenvironmental changes during final break-up of Gondwana land[J]. Geological Society of London, Special Publications, 1993, 74: 277–298.
- [31] 王成善, 李祥辉. 沉积盆地分析原理与方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [32] Roser B P, Korsch R J. Provenance signatures of sandstone–mudstone suite determined using discriminant function analysis of major–element data[J]. Chemical Geology, 1988, 67(1/2): 119–139.
- [33] Bhatia M R, Crook K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins[J]. Contribution to Mineralogy and Petrology, 1986, 92(2): 97–113.
- [34] Floyd P A, Leveridge B E. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: Framework Mode and Geochemical Evidence from Turbiditic Sandstones[J]. Journal of the Geological Society, 1987, 144(4): 531–542.
- [35] 桑隆康, 马昌前. 岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 2012.
- [36] 王剑, 谭富文, 付修根, 等. 沉积岩工作方法. 北京: 地质出版社, 2015.
- [37] Suttner L J, Basu A, Mack G H. Climate and the origin of quartz arenites[J]. Journal Sedimentary Petrology, 1981, 51: 1235–1246.
- [38] Avigad D, Sandler A, Kolodner K, et al. Mass production of Cambro–Ordovician quartz–rich sandstone as a consequence of chemical weathering of Pan–African terranes: Environmental implications [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 240(3/4): 818–826.
- [39] 胡艳飞, 孔庆莹. 鄂尔多斯盆地西南部长 8 油层储层主控因素及分布规律[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(4): 1078–1090.
- [40] 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: 13–16.