



地质力学学报
Journal of Geomechanics
ISSN 1006-6616, CN 11-3672/P
中文核心期刊
中国科技核心期刊
CSCD 来源期刊（核心库）

《地质力学学报》预出版论文

论文题目：鄂尔多斯盆地特拉敖包铀矿床还原介质与铀成矿关系

作者：彭云彪，姜晓杰，鲁超，王龙辉，钟伟辉，杨勇，罗文塔

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2026074

投稿时间：2026-06-16

录用时间：2026-09-30

预出版时间：2026-09-30

预出版版权说明

预出版，是指在网络出版或纸质版印刷出版之前，文章的电子版本在网上提前公开，是正式出版的预备版本。预出版的文章是通过严格的“三审制”审查后，本刊确定录用的文章，其内容的著作权等受《著作权法》等法律法规保护。预出版的文章将在之后的印刷版上刊发，印刷版的文章可能与预出版的文章略有不同，预出版文章经录用后便以电子版本形式在网站发出，没有经过排版和编校，会存在部分文字及编排格式与正式出版有出入，但文章主体内容是完全一致的。

学者研究或引述预出版文章，应当以印刷纸质版内容为准；但如果牵涉首创权等时间问题，则应当以适当方式注明文章的预出版日期。

鄂尔多斯盆地特拉敖包铀矿床还原介质与铀成矿关系

彭云彪¹, 姜晓杰¹, 鲁超¹, 王龙辉¹, 钟伟辉¹, 杨勇¹, 罗文塔²

PENG Yunbiao¹, JIANG Xiaojie¹, LU Chao¹, WANG Longhui¹, ZHONG Weihui¹, YANG Yong¹, LuoWenta²

1. 核工业二〇八大队, 内蒙古 包头 014010;

2. 东华理工大学, 江西 南昌 330013

1. *Geologic Party NO.208, CNNC, Baotou 014010, Inner Mongolia, China;*

2. *East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China*

Relationship Between Reducing Media and Uranium Mineralization in the Telaaobao Uranium Deposit, Ordos Basin

Abstract: The Telaaobao uranium deposit is the first super-large uranium deposit hosted in the Lower Cretaceous strata in the northern Ordos Basin. Its sedimentary setting is markedly different from that of the numerous uranium deposits previously studied within the Middle Jurassic Zhiluo Formation. Uranium-bearing sandstone reservoirs in this deposit are notably deficient in traditional reducing agents such as carbonaceous debris and pyrite. The lack of systematic research on reducing media in this deposit has significantly hindered the refinement of uranium metallogenic models and the expansion of successful exploration. In this study, a combination of optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive spectroscopy (EDS), electron probe microanalysis (EPMA), fluorescence analysis, sulfur isotope analysis, and acidolysis hydrocarbon analysis was employed to identify multiple types of reducing media, including carbonaceous debris, pyrite, hydrocarbon-bearing fluids, and chlorite. Their genetic characteristics were summarized, and hydrocarbon-bearing fluids were determined to be the dominant reducing medium. Specifically, the carbonaceous debris was mainly allochthonous, derived from older strata; the sulfur in pyrite primarily originated from bacteriogenic sulfides and organic sulfides; the hydrocarbon-bearing fluids were sourced from deep coal-, oil-, and gas-bearing strata and migrated into the deposit via faults in its vicinity; chlorite can be subdivided into alteration products of mica and feldspar and authigenic chlorite. Based on the Telao Bao metallogenic model, the types and roles of reducing media during different mineralization stages were discussed: (1) During the sedimentary-diagenetic stage in the early Early Cretaceous, the main reducing media were carbonaceous debris and metal sulfides such as pyrite; (2) In the late Early Cretaceous large-scale reduction stage, the principal reducing medium was deep-sourced hydrocarbon-bearing fluids; (3) From the Late Cretaceous to the Oligocene, during the secondary oxidation-mineralization stage, chlorite further enhanced the reducing capacity of the sandstone reservoirs, ultimately leading to termination of redox-driven mineralization.

Keywords: Telaaobao uranium deposit; reducing media; carbonaceous debris; pyrite; hydrocarbon-bearing fluids

摘要: 特拉敖包铀矿床是鄂尔多斯盆地北部下白垩统首个特大型铀矿床,其沉积背景与以往重点研究的中侏罗统直罗组诸多铀矿床明显不同。该矿床铀储层砂体中缺乏炭质碎屑、黄铁矿等传统还原介质,而还原介质研究的不足严重制约了铀成矿机理的完善以及找矿成功的扩大。文章通过光学显微镜、扫描电镜、能谱仪、电子探

基金项目: 内蒙古自治区“英才兴蒙”工程项目[2026]1号

This research was financially supported by Inner Mongolia Autonomous Region“Elite Talent Boosting Mongolia”Project [2026] No. 1

第一作者: 彭云彪 (1965—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事铀矿地质勘查工作。Email: 3283928389@qq.com

通信作者: 姜晓杰 (1993—), 男, 工程师, 主要从事铀矿地质勘查工作。Email: 643165505@qq.com

针、荧光分析、硫同位素分析、酸解烃等多种实验手段,识别了该矿床中炭质碎屑、黄铁矿、含烃流体、绿泥石等多种还原介质类型,总结了其成因特征,并明确了含烃流体为最主要的还原介质类型。其中,炭质碎屑多为老地层异地搬运而来;黄铁矿中的硫主要来源于细菌成因硫化物和有机硫化物;含烃流体来源于深部含煤、含油、含气地层,并通过矿床附近的断裂运移;绿泥石按成因可分为云母、长石蚀变型和自生型2种。在特拉敖包成矿模式的基础上,探讨了该矿床成矿不同阶段还原介质的类型及作用。早白垩世早期沉积成岩阶段,还原介质以炭质碎屑、黄铁矿等金属硫化物为主;早白垩世中晚期大规模还原阶段,还原介质以来自深部的含烃类流体为主;早白垩世末期—渐新世二次氧化成矿阶段,绿泥石进一步增强砂体还原容量,最终氧化还原作用终止,成矿结束。

关键词: 特拉敖包铀矿床;还原介质;炭质碎屑;黄铁矿;含烃流体

中图分类号: P611 **文献标识码:** A **文章编号:**

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2026074

0 引言

鄂尔多斯盆地是中国重要的能源和矿产基地,拥有丰富的煤炭、石油、天然气和铀等资源。经过二十余年的勘探探索,先后在盆地北部中侏罗统直罗组发现多个中型、大型和特大型铀矿床,如大营铀矿床、巴音青格利铀矿床以及纳岭沟铀矿床等(易超等, 2017; Jin et al., 2020; 焦养泉等, 2021; Zhang et al., 2022; 刘源, 2024; Yue et al., 2024)。随着直罗组铀矿勘查的日渐饱和,自2019年起,下白垩统环河组成为新的找矿目的层,并于近年成功落实了首个特大型铀矿床——特拉敖包铀矿床,进一步扩大了鄂尔多斯盆地铀矿资源潜力(王龙辉等, 2023; 李振成等, 2024; 剡鹏兵等, 2024; 白一鸣等, 2025; 王果等, 2025)。砂岩型铀矿的形成依赖于铀的氧化-还原作用,因此铀储层中的还原介质是重要的控矿因素(Granger and Warren, 1969; 黄世杰, 1994; 张金带等, 2010; 王大钊等, 2022; Zheng et al., 2023)。过去对鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿床中还原介质的研究集中于直罗组。直罗组含铀岩系形成于潮湿沉积背景,发育大量炭质碎屑、黄铁矿等铀储层内部还原介质,以及煤层、暗色泥岩等铀储层外部还原介质(侯惠群等, 2016; 罗晶晶, 2017; 焦养泉等, 2018; 张帆, 2018; 朱强等, 2018; 乐亮, 2021)。然而,环河组含铀岩系中明显缺乏上述还原介质,其丰度远小于直罗组(王龙辉等, 2023; Zhong et al., 2025)。目前,对于环河组还原介质的研究仍十分薄弱,还原介质的类型、特征及其与铀成矿的关系尚不明确,制约了铀成矿机理的完善,限制了找矿成果的扩大。文章在钻孔岩芯宏观观察的基础上,综合利用光学显微镜、扫描电镜、能谱仪、电子探针、荧光分析、硫同位素分析、酸解烃等手段,识别并总结了特拉敖包铀矿床的主要还原介质类型与特征,从而探讨各类还原介质与铀成矿的关系,为完善特拉敖包铀矿床成矿机理奠定基础,对鄂尔多斯盆地地下白垩统找矿突破具有重要指导价值。

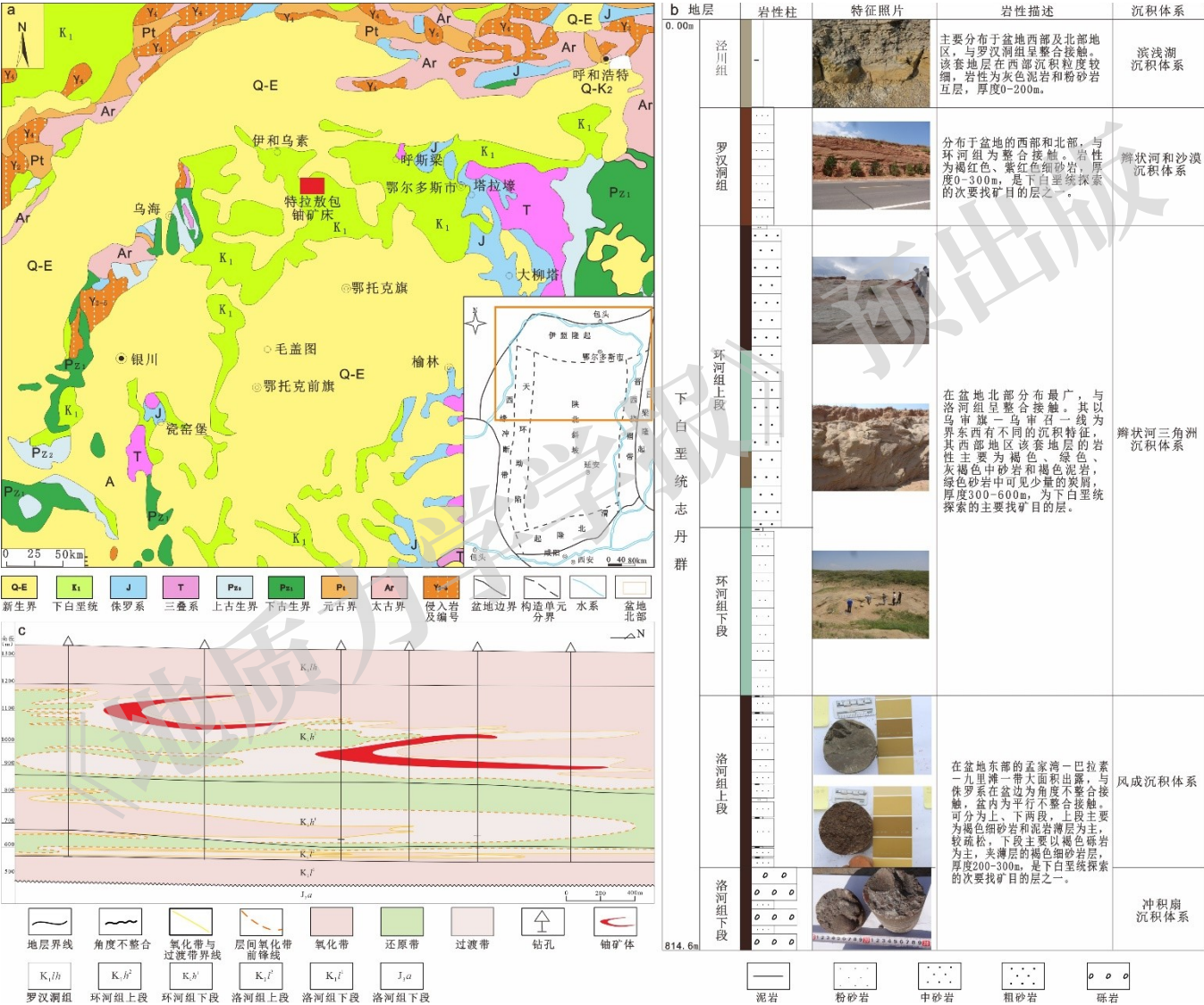
1 区域地质背景

鄂尔多斯盆地是中生代发育起来的大型叠加复合型内陆拗陷盆地,位于华北克拉通西部和特提斯-喜马拉雅构造交互位置。该盆地跨陕西、甘肃、宁夏、内蒙古及山西5个省(自治区),盆地南、北缘受东西向祁连-秦岭构造带及阴山构造带控制,西部以南北向的太行-吕梁构造带及贺兰山构造带为边界,整体呈矩形展布,面积约为 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。依据盆地构造特征,盆地可进一步划分为伊盟隆起褶皱带、晋西褶皱带、渭北构造带、陇西构造带和陕北斜坡5个构造单元(图1a; 任战利等, 2020; 邓军等, 2005; 何自新等, 2006)。特拉敖包铀矿床则位于伊盟隆起褶皱带北西部,矿床周边构造主要受三眼井断裂和乌兰吉林庙断裂影响(姜晓杰等, 2025)。根据二七〇研究所对该区域开展的地震解译结果,矿床附近还发育多条小的次级断裂。

鄂尔多斯盆地西北部下白垩统保存相对完整,部分地区直接出露地表(图1a)。自下而上依次发育洛河组、环河组、罗汉洞组、泾川组,其中洛河组与下伏侏罗系之间为平行不整合接触,且其顶部发育巨厚的风成

砂岩。环河组为主要的含矿目的层，可进一步划分为下段和上段。下段主要发育中、细砂岩，底部界面为初始湖泛面；上段主要发育中、粗砂岩，底部发育一套区域上连续的泥岩。罗汉洞组底部发育巨厚的风成砂岩。泾川组剥蚀较为严重，仅在盆地北西部见少量的露头，多为滨浅湖沉积。特拉敖包铀矿床主要富矿层位为环河组，其沉积环境为辫状河三角洲，砂体规模大，具有相对良好的顶、底板隔水层，是铀富集的理想场所（图1b）。

特拉敖包铀矿床属于层间氧化带型砂岩型铀矿床，其成矿氧化流体来自北东方向，层间氧化带向南依次演变为过渡带与还原带。铀矿体呈卷状，赋存于环河组上段层间氧化带前锋线附近的褐灰色、绿褐色和褐绿色的过渡带砂岩中，矿体空间展布受氧化前锋线的严格控制（图1c）。



a—鄂尔多斯盆地北部铀矿地质简图（据王龙辉等，2023 修改）；b—鄂尔多斯盆地北部下白垩统综合柱状图；c—特拉敖包铀矿床典型岩石地化剖面
图 1 鄂尔多斯盆地北部区域地质背景及矿床地质特征
Fig. 1 Tectonic setting of the study area and geological sketch map of uranium deposits
(a) Simplified geological map of uranium deposits in the northern Ordos Basin; (b) Comprehensive stratigraphic column of the Lower Cretaceous in the northern Ordos Basin; (c) Representative petrogeochemical profile of the Teleaobao uranium deposit

2 特拉敖包铀矿床还原介质类型

根据钻孔岩芯观察及显微分析结果，特拉敖包铀矿床的还原介质主要包括炭质碎屑、黄铁矿、绿泥石和含烃流体。

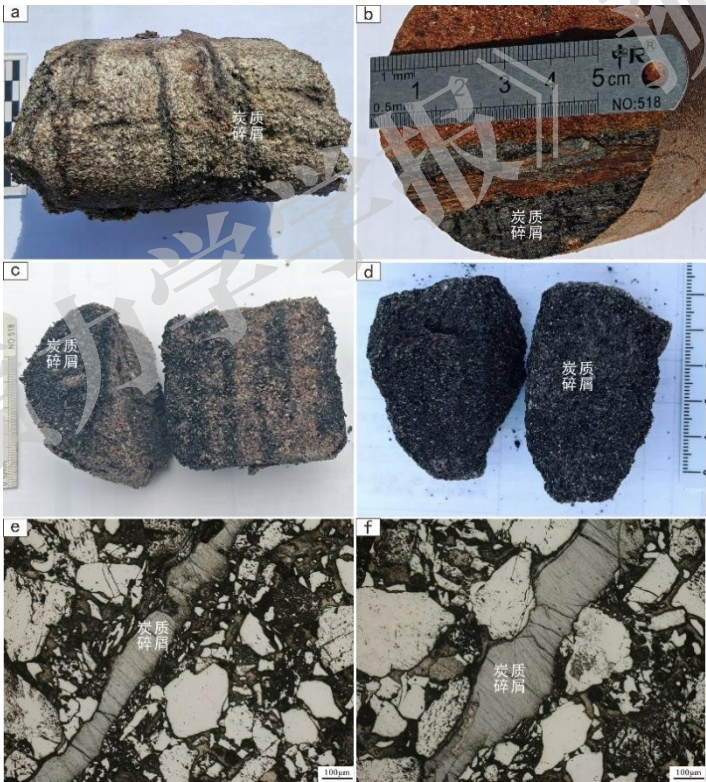
2.1 炭质碎屑

特拉敖包铀矿床受干旱沉积背景影响，铀储层砂体中炭质碎屑含量较少，钻孔中炭质碎屑宏观上多呈条带状（图 2a）。该类炭质碎屑主要自延安组、直罗组含煤岩系，经剥蚀、搬运后沉积；另有极少部分炭质碎屑来源于同沉积的植物茎干，并遭受了部分氧化（图 2b）。此外，部分浸染状炭质碎屑充斥于岩石矿物颗粒之间，呈层状发育（图 2c）或将整块岩芯浸染为黑色（图 2d）。反射光显微镜下观察表明，炭质碎屑的主要显微组分为镜质组（图 2e、2f）。

2.2 黄铁矿

2.2.1 黄铁矿形态特征

金属硫化物是还原介质重要的组成部分，常见类型包括黄铁矿、黄铜矿、白铁矿等，其中黄铁矿最为常见。特拉敖包铀矿床黄铁矿在宏观上仅见于部分钻孔，且多与炭质碎屑伴生。显微镜下，黄铁矿主要呈草莓状、胶状，多分布于岩石碎屑颗粒空隙间（图 3）。草莓状黄铁矿形成于沉积成岩早期或同沉积时期（图 3a、3b；吴仁贵等，2012），胶状和自形一半自形状黄铁矿多形成于沉积成岩中、晚期。其中，胶状黄铁矿单晶粒度极小，集合体大小受限于孔隙大小（图 3c、3d）。

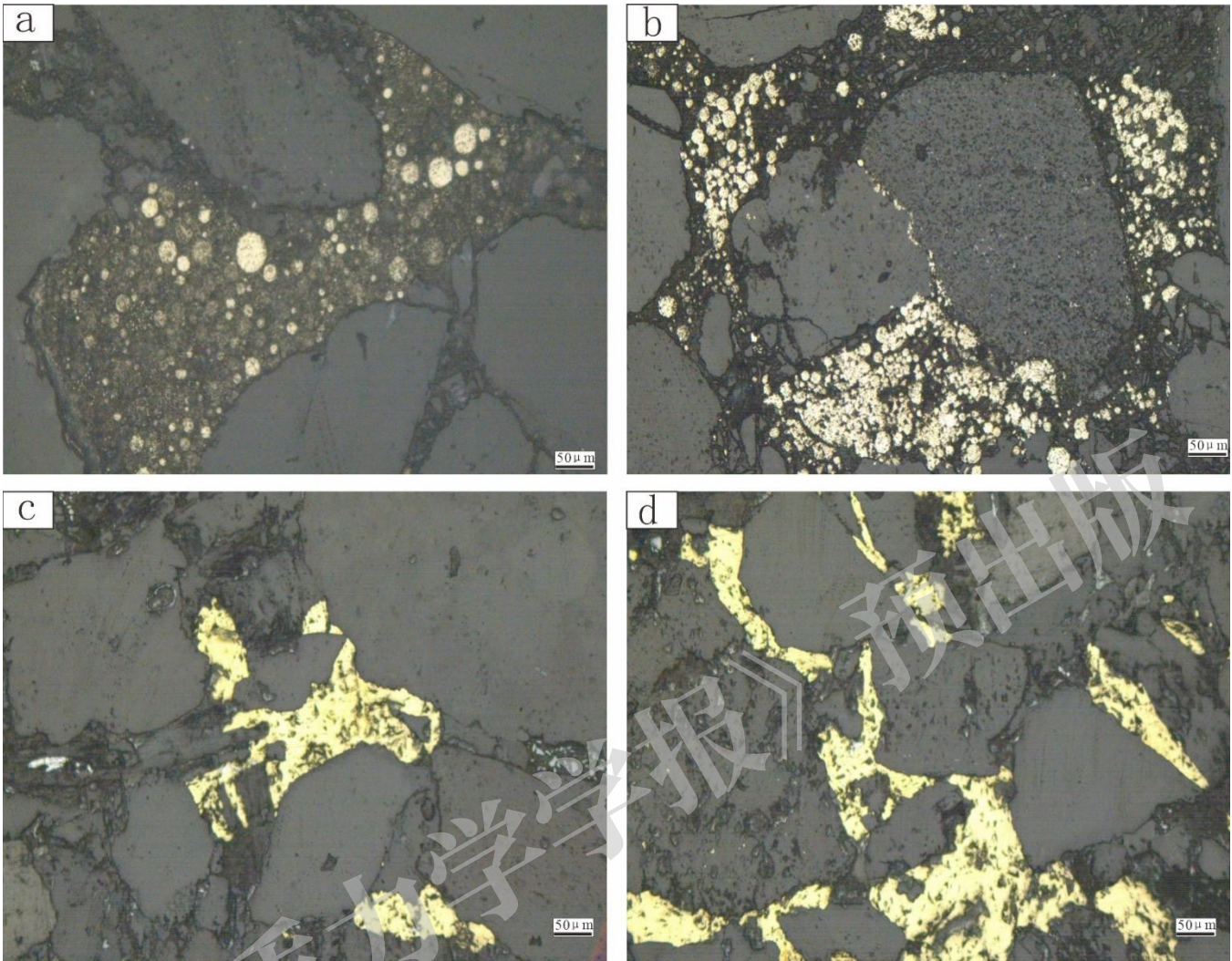


a—一条带状炭质碎屑；b—炭化植物茎干；c—炭质碎屑将砂岩浸染，呈层状展布；d—砂岩被浸染成黑色；e—反射光下镜质体条带赋存于砂岩基质中；f—反射光下砂岩中碎屑颗粒旁发育镜质体条带

图 2 特拉敖包铀矿床铀储层砂岩中炭质碎屑特征

Fig. 2 Characteristics of carbonaceous debris in uranium reservoir sandstones of the Telaaobao uranium deposit

(a) Banded carbonaceous debris; (b) Carbonized plant root and stem; (c) Sandstone impregnated by carbonaceous debris, showing layered distribution; (d) Sandstone thoroughly impregnated and blackened; (e) Vitrinite bands occur within the sandstone matrix under reflected light (f) Vitrinite bands develop beside detrital grains in sandstone under reflected light



a—草莓状黄铁矿分布在填隙物中，反射光；b—草莓状黄铁矿分布在碎屑颗粒间，反射光；c—胶状黄铁矿分布在碎屑颗粒间孔隙中，反射光；d—胶状黄铁矿将碎屑颗粒包裹

图3 特拉敖包铀矿床黄铁矿显微特征

Fig. 3. Microscopic characteristics of pyrite in the Telaaobao uranium deposit under reflected light.

(a) Framboidal pyrite is distributed in the interstitial materials under reflected light.; (b) Framboidal pyrite occurs between detrital grains under reflected light; (c) Colloform pyrite occurs in intergranular pores of detrital grains under reflected light. ; (d) Colloform pyrite envelops detrital grains.

2.2.2 黄铁矿 S 同位素特征

特拉敖包铀矿床中草莓状黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值分布范围为-30.85‰~-39.27‰，平均值-37.86‰；胶状黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值分布范围为-16.48‰~-27.09‰，平均值-23.94‰；自形一半自形黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 分布范围为-7.77‰~-19.44‰，平均值为-14.97‰。不同形态黄铁矿中 $\delta^{34}\text{S}$ 数值变化较大且均为负值（表1）。

表1 特拉敖包铀矿床环河组黄铁矿硫同位素分析结果

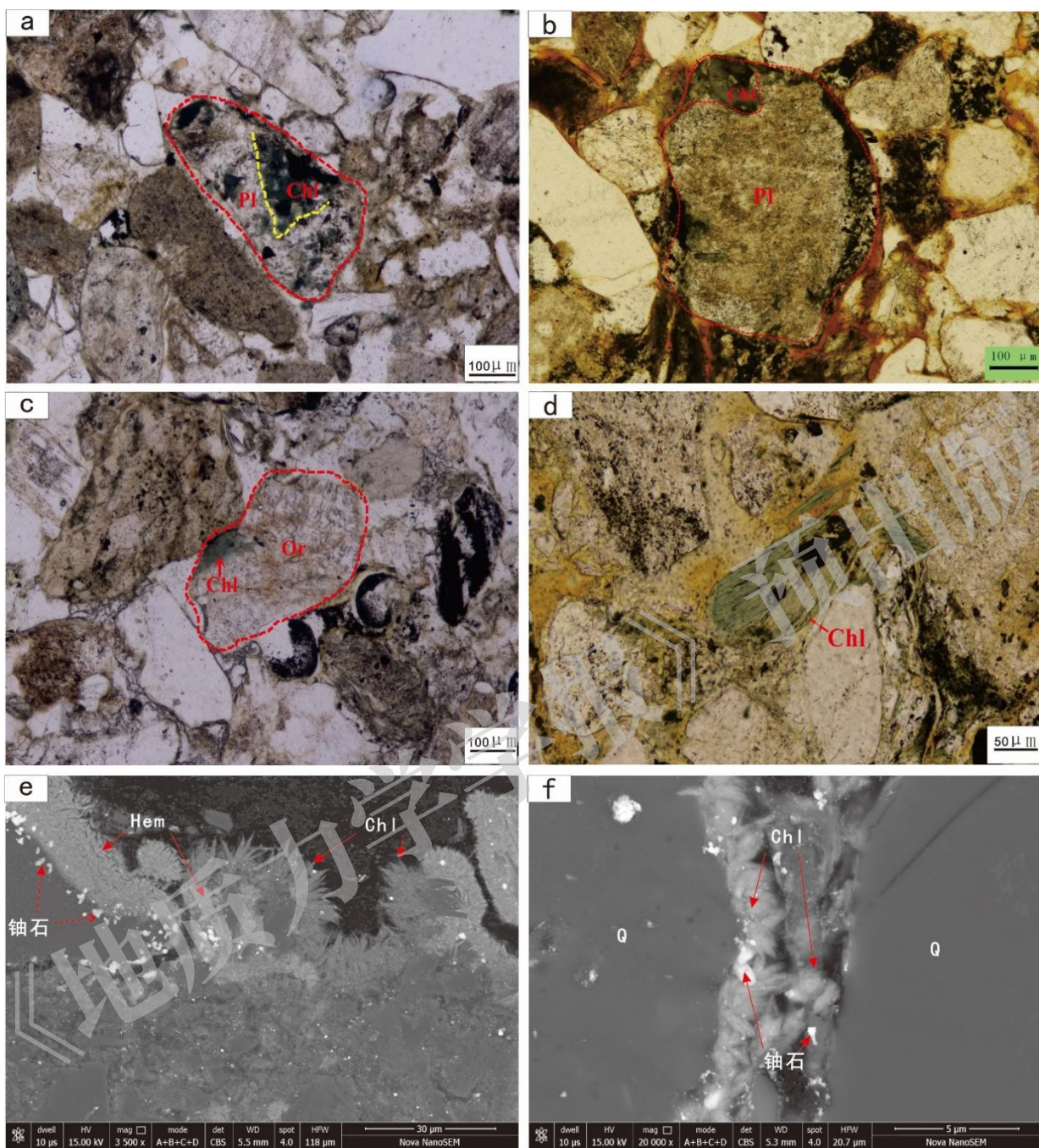
Table 1. Sulfur isotope compositions of pyrite from the Huanhe Formation in the Telaaobao uranium deposit

序号	测试点编号	岩性	黄铁矿形态	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$
1	S1-1	灰色细砂岩	自形一半自形	-19.23
2	S2-1	褐灰色中砂岩	胶状	-23.16
3	S2-2	褐灰色中砂岩	胶状	-23.04
4	S3-1	褐绿色细砂岩	自形一半自形	-7.77
5	S3-2	褐绿色中砂岩	自形一半自形	-11.53

6	S3-3	褐绿色中砂岩	胶状	-27.09
7	S3-4	褐绿色中砂岩	胶状	-26.11
8	S4-1	褐绿色粗砂岩	草莓状	-37.43
9	S4-2	褐绿色粗砂岩	草莓状	-30.85
10	S4-3	褐绿色粗砂岩	草莓状	-39.27
11	S4-4	褐绿色粗砂岩	草莓状	-38.27
12	S4-5	褐绿色粗砂岩	草莓状	-35.82
13	S5-1	褐红色粗砂岩	自形一半自形	-17.27
14	S5-2	褐红色粗砂岩	胶状	-16.48
15	S5-3	褐红色粗砂岩	自形一半自形	-19.44
16	S5-4	褐红色粗砂岩	自形一半自形	-15.58
17	S5-5	褐红色粗砂岩	自形一半自形	-18.94
18	S6-1	褐绿色粗砂岩	胶状	-26.63
19	S7-1	褐绿粗砂岩	胶状	-23.46
20	S8-1	褐绿色含砾砂岩	草莓状	-35.68
21	S9-1	绿褐色粗砂岩	草莓状	-41.94
22	S10-1	褐绿色中砂岩	草莓状	-40.15
23	S10-2	褐绿色中砂岩	草莓状	-40.38
24	S11-1	绿褐色粗砂岩	草莓状	-37.82
25	S12-1	褐绿色砂岩	草莓状	-37.23
26	S13-1	褐灰色粗砂岩	草莓状	-37.39
27	S14-1	褐灰色中砂岩	草莓状	-38.83
28	S15-1	褐灰色粗砂岩	草莓状	-38.91
29	S16-1	褐色砂岩	自形一半自形	-9.04
30	S17-1	紫红色砂岩	自形一半自形	-15.49
31	S18-1	褐红色砂岩	自形一半自形	-16.41
32	S19-1	褐绿色粗砂岩	自形一半自形	-17.95
33	S20-1	紫色砂岩	自形一半自形	-10.96
34	S21-1	褐红色粗砂岩	胶状	-22.18
35	S22-1	灰色中砂岩	胶状	-22.26
36	S23-1	褐绿色砂岩	胶状	-28.95

2.3 绿泥石

特拉敖包铀矿床黏土矿物主要为伊利石、蒙脱石、绿泥石和绿/蒙混层，其中绿泥石含量最高。绿泥石可由长石、黑云母蚀变而成（图 4a—4d），且部分黑云母蚀变而成的绿泥石表面被铁氧化物覆盖或部分绿泥石包裹铁氧化物（图 4d）。此外，亦可见绿泥石呈叶片状、毛发状，具有明显的生长痕迹，指示自生成因。该类绿泥石主要围绕碎屑颗粒生长（图 4e、4f）。



Chl—绿泥石；Pl—斜长石；Or—钾长石；Q—石英；Hem—赤铁矿

a—绿泥石交代斜长石呈暗绿色；b—绿泥石交代斜长石边部；c—绿泥石交代钾长石；d—绿泥石将黑云母完全交代；e—毛发状绿泥石赋存在赤铁矿表面；f—毛发状绿泥石生长在碎屑颗粒边部

图 4 特拉敖包铀矿床铀储层砂岩中的绿泥石特征

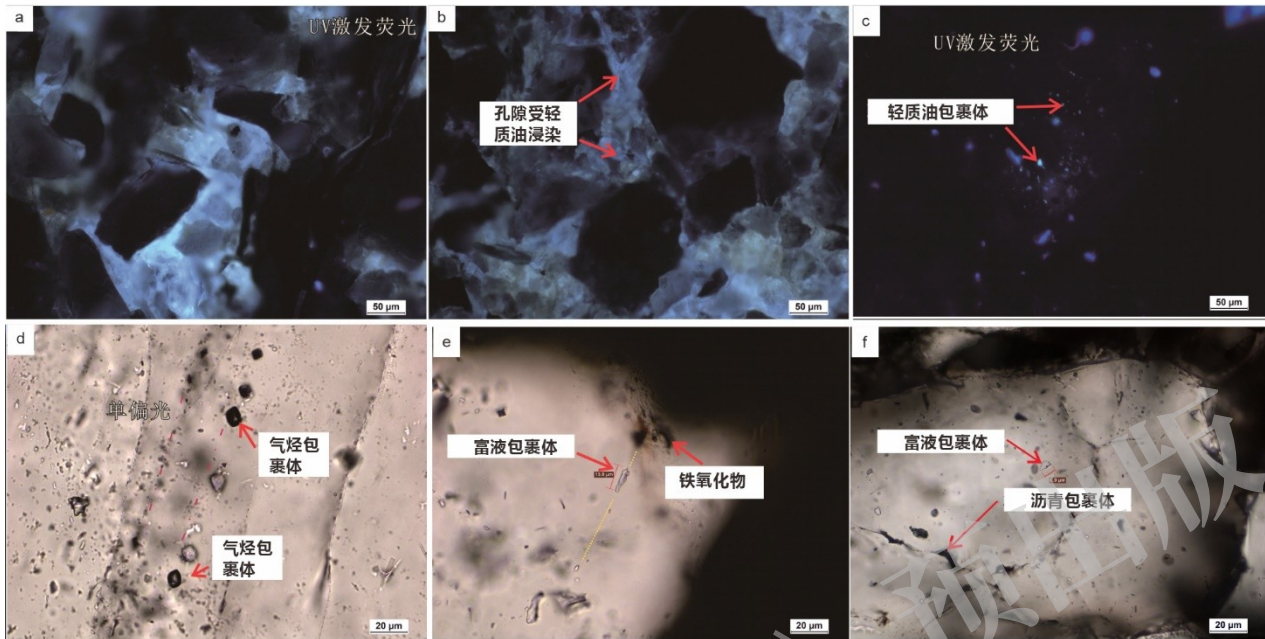
Fig. 4. Chlorite characteristics of uranium reservoir sandstone in the Telaobao uranium deposit

(a) Chlorite replaces plagioclase, appearing dark green.; (b) Chlorite replaces the margins of plagioclase; (c) Chlorite (Chl) replacing K-feldspar (Or); (d) Chlorite (Chl) completely replacing biotite; (e) Fibrous chlorite occurs on the surface of hematite ; (f) Fibrous chlorite grows along the margins of detrital grains.

2.4 含烃流体

特拉敖包铀矿床有机质含量整体相对较低，但在部分铀储层砂岩中可观察到轻质油包裹体、气烃包裹体等含烃流体的痕迹（图 5）。对特拉敖包铀矿床含矿砂岩进行酸解烃分析，结果表明（表 2），酸解烃组分以为

甲烷为主，其次为乙烷和丙烷（图 6）。其中，甲烷含量最高为 706 $\mu\text{L/kg}$ ，平均值 134.7 $\mu\text{L/kg}$ ，且通过工业矿孔和无矿孔的整孔岩芯进行取样对比，发现工业矿孔甲烷含量远高于无矿孔。



a—绿色细砂岩碎屑颗粒间有机质荧光响应（环河组上段）；b—绿色细砂岩碎屑物颗粒孔隙受轻质油浸染（环河组上段）；c—绿色中砂岩中轻质油包裹体及荧光响应（环河组下段）；d—褐色粗砂岩中的气态烃包裹体（环河组上段）；e—绿色中砂岩中沿裂隙分布的富液包裹体和铁氧化物（环河组下段）；f—绿色细砂岩中的沥青和富液包裹体（环河组下段）
图 5 特拉敖包铀矿床环河组铀储层砂岩中的含烃流体特征（据王龙辉等，2023；邱林飞等，2024 修改）
Fig. 5. in uranium-bearing reservoir sandstones from the Telaobao uranium deposit.
(a) Fluorescence response of organic matter between detrital grains in green fine-grained sandstone, Upper Huanhe Formation; (b) Green fine-grained sandstone clastic intergranular pores are impregnated by light oil;(c) Light oil inclusions and fluorescence response in green medium-grained sandstone, Lower Huanhe Formation; (d) Gaseous hydrocarbon inclusions in brown coarse-grained sandstone; (e) Liquid-rich inclusions and iron oxides distributed along fractures in green medium-grained sandstone, Lower Huanhe Formation; (f) Bitumen and liquid-rich inclusions in green fine-grained sandstone, Lower Huanhe Formation.

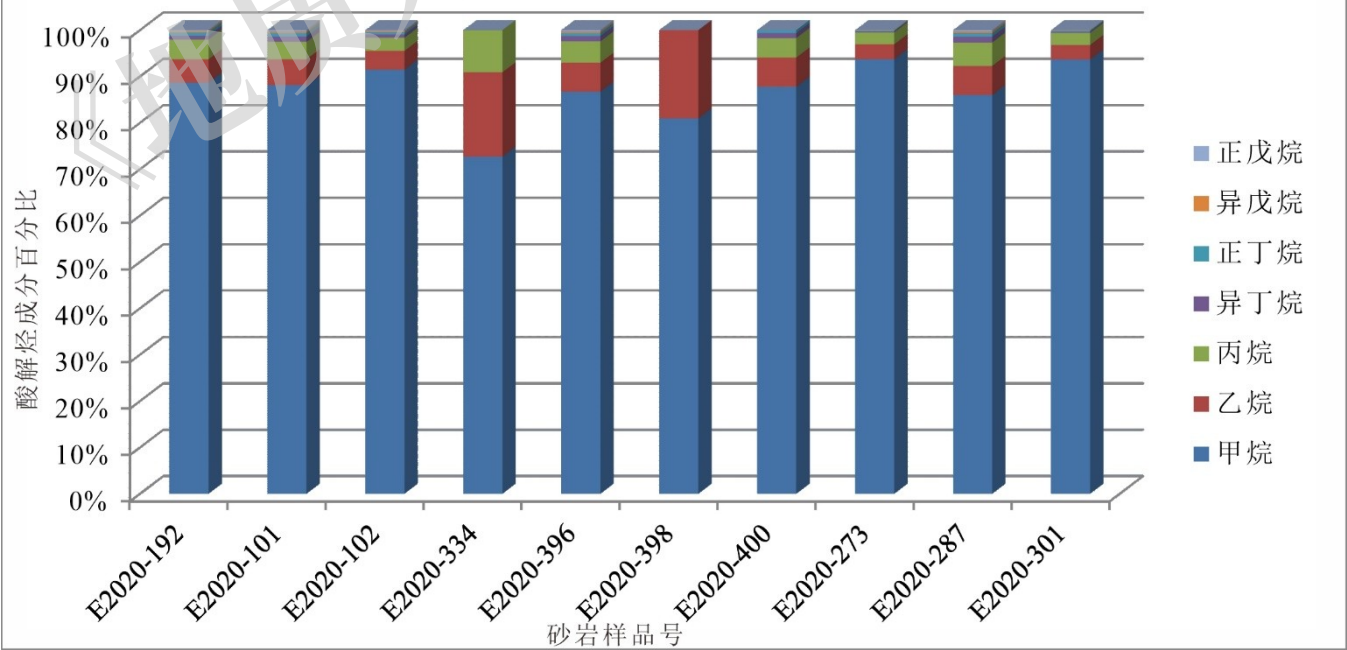


图 6 特拉敖包铀矿床酸解烃含量百分比特征图
Fig. 6. Proportional composition of acid-extractable hydrocarbons in the Telaobao uranium deposit

表 2 特拉敖包铀矿床环河组砂岩酸解烃分析结果

Table 2 Analysis results of acidolysis hydrocarbons from sandstones of the Huanhe Formation in the Tela'aobao uranium deposit

钻孔号	矿化情况	取样深度	岩性	甲烷	乙烷	丙烷	异丁烷	正丁烷	异戊烷	正戊烷
ZKW2020-1	工业矿孔	174.4	灰绿色粗砂岩	40.3	2.3	1.92	0.38	0.32	0.13	0.1
		378	灰绿色粗砂岩	13.9	0.88	0.59	0.18	0.12	0.05	0.05
		337.64	灰绿色粗砂岩	77.6	3.43	2.39	0.62	0.42	0.21	0.16
ZKW2019-3	矿化孔	155.46	褐灰色粗砂岩	16.4	1.18	0.87	0.22	0.12	0.06	0.06
		337.28	灰绿色粗砂岩	11.3	0.81	0.54	0.14	0.08	/	/
ZKW2019-1	工业矿孔	404.84	灰绿色粗砂岩	706	24.3	19.4	1.52	1.01	0.56	0.51
		500.72	灰绿色粗砂岩	16.4	1.2	0.96	0.24	0.14	0.07	0.06
		658.01	灰绿色粗砂岩	554	18.4	15.4	1.45	1.16	0.46	0.44

3 讨论

3.1 铀储层中炭质碎屑与铀矿化之间的关系

砂岩总有机碳（TOC）含量可在一定程度上反映岩石中有机质的总体丰度。对特拉敖包铀矿床中不同类型铀矿石和围岩进行 TOC 含量与铀含量对比分析发现，主要含矿目的层环河组上段铀矿石与围岩的有机质含量整体相对较低，TOC 含量多数分布于 0.008%~0.256%，仅在紫色铀矿石部分样品中达到 0.322%，该矿床砂岩中 TOC 含量较少，这一结果与在野外岩芯和显微镜下观察到的有机质较少的现象相一致。从 TOC 与铀含量关系中可知，两者线性关系较低（ $R^2=0.1221$ ；图 7）。总有机碳含量增高，可能是在沉积时期，来自延安组、直罗组剥蚀的炭质碎屑随地层同时期沉积，导致紫色铀矿石的 TOC 含量相对增高。特拉敖包铀矿床中炭质碎屑、TOC 含量整体较低，从而导致该矿床中砂体整体的还原能力较差，当来自北东部的氧化含矿流体途经矿区时（图 1c；王龙辉等，2023；剡鹏兵等，2024；王果等，2025），少量炭质碎屑的还原能力不足以使含矿流体中的铀发生大范围沉淀富集，因此炭质碎屑并不是该矿床不可或缺的还原介质。

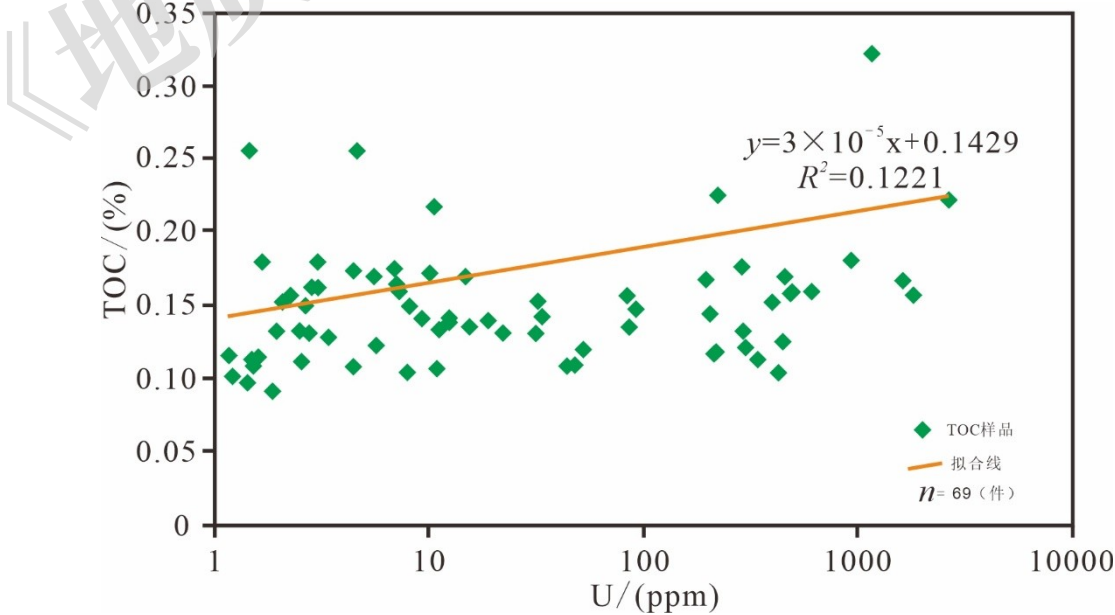


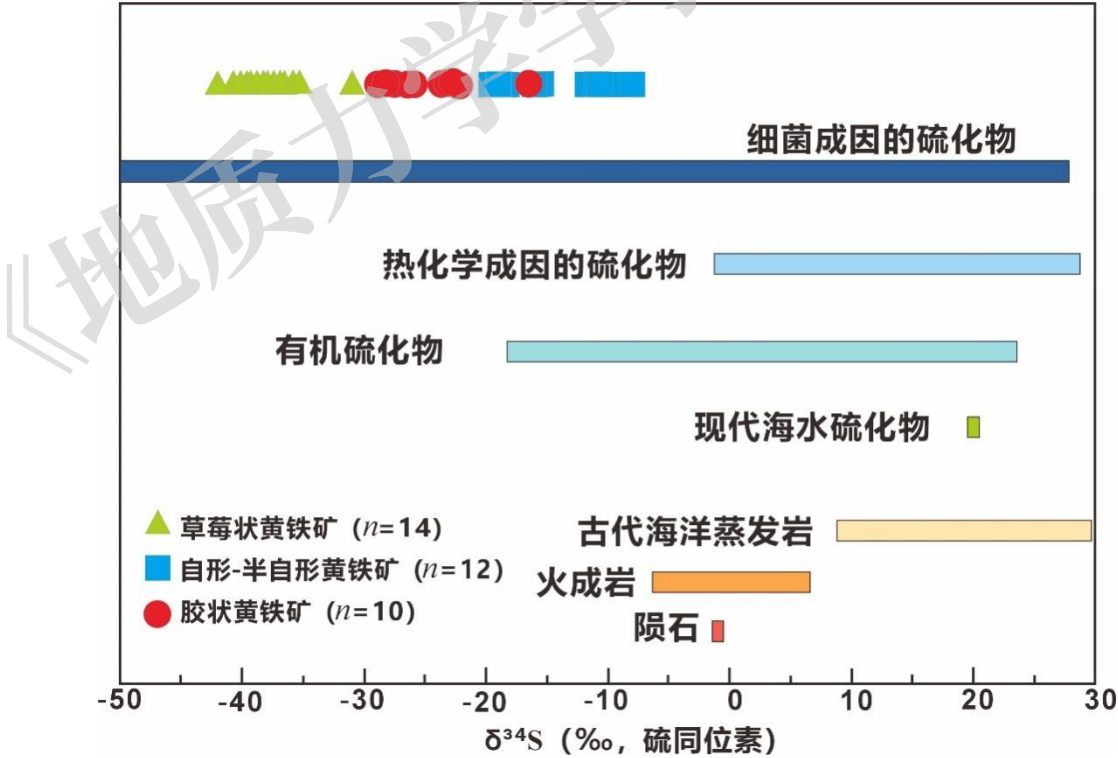
图 7 特拉敖包铀矿床铀储层砂岩中总有机碳（TOC）含量与铀含量散点图

Fig. 7. Scatter plot of total organic carbon (TOC) versus uranium content in uranium reservoir sandstones of the Tela'aobao uranium deposit

3.2 铀储层中黄铁矿与铀矿化之间的关系

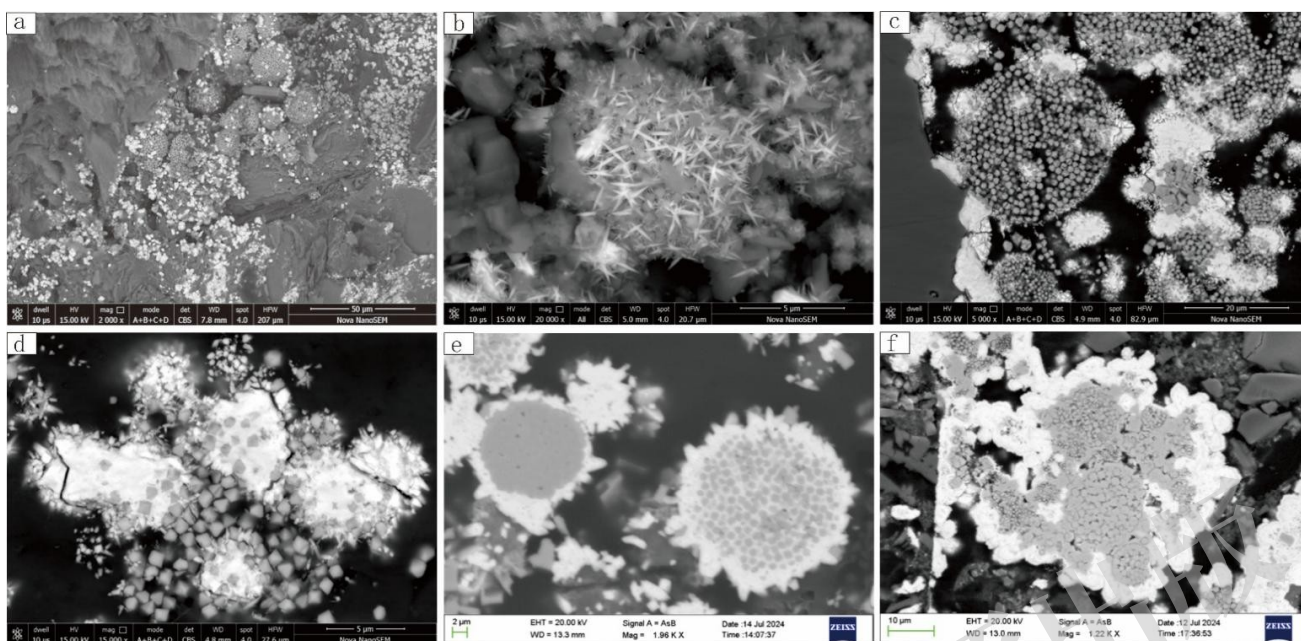
黄铁矿中的硫同位素可以记录微生物的活动信息以及成矿过程中的氧化还原环境。黄铁矿的形成和分解与微生物还原作用密切相关。³²S 和 ³⁴S 在物理、化学和生物过程中会发生同位素分馏：厌氧的硫酸盐在还原硫酸盐时生成 H₂S，会优先利用 ³²S；受生物作用影响 $\delta^{34}\text{S}$ 受生物沉积作用影响，其原始数值降低， $\delta^{34}\text{S}$ 值变化幅度较大，介于-40‰~50‰之间（Warren, 1972；Goldhaber et al., 1983；Northrop et al., 1990；Cai et al., 2007；Ingham et al., 2014；Hough et al., 2019）。对不同黄铁矿的硫同位素组成进行投图分析发现，草莓状黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ -45~-30‰之间，显著偏负，落在图中细菌成因硫化物的区间内，胶状黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 为-30~-15‰，相比草莓状， $\delta^{34}\text{S}$ 明显升高，介于细菌成因区间和热化学成因区间之间。自形-半自形黄铁矿硫同位素：-20 ~ -10‰， $\delta^{34}\text{S}$ 进一步偏重，部分样品已经靠近热化学成因硫化物范围。胶状黄铁矿和自形-半自形黄铁矿中的硫同位素明显重于草莓状黄铁矿（图 8），反映早期微生物成因硫化物受到后期含烃流体改造，伴随热化学硫酸盐还原（TSR）作用叠加。硫同位素特征与酸解烃指标可相互印证：深部运移的外来含烃流体为 BSR 提供有机质底物，促进草莓状黄铁矿生成；持续的流体活动引发 TSR 造成黄铁矿重结晶，形成胶状、自形黄铁矿，硫同位素逐渐变重。含烃流体活动产生的 H₂S 同时作为还原剂，驱动赤铁矿还原与铀酰沉淀，黄铁矿的硫同位素演化序列记录了深部含烃流体从早期微生物作用到后期热化学改造的完整成矿过程（张字龙等，2020；赵兴齐等，2015；李胜富等，2004）。

该矿床铀矿物以铀石为主，其次为铀-铁-铀混合物。铀石多以粒状、针状赋存在草莓状黄铁矿表面（图 9a、9b），随着铀石不断增长，逐渐包裹草莓状黄铁矿（图 9c—9f）；或者以不规则状充斥在草莓状黄铁矿集合体的空隙内（图 9c、9d）。胶状黄铁矿赋存于矿物颗粒孔隙内，且多被氧化为褐铁矿、赤铁矿，与铀矿物多形成铀-铁-铀混合物。特拉敖包铀矿床为层间氧化控矿成矿。研究发现，自工作区北部向南部，该矿床过渡带内的矿物颗粒空隙内被大量铁氧化物充斥，由此认为该区域存在一期或多期富含铁含矿流体参与成矿。不同形态的铀矿物代表了不同阶段，由此表明黄铁矿伴随了铀矿物生长的整个时期。



注：图中水平条带为不同硫源的 $\delta^{34}\text{S}$ 值域，样品投点用于判别硫来源

图 8 特拉敖包铀矿床不同成因类型硫化物及本区黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 同位素组成对比图（据 Zhao et al., 2018 修改）
Fig. 8. Figure X. Comparison of $\delta^{34}\text{S}$ isotopic compositions of sulfides with different genetic types and pyrite from the Telaobao uranium deposit (modified after Zhao et al., 2018)



a—粒状铀石赋存在草莓状黄铁矿周围；b—针状铀石赋存在草莓状黄铁矿表面；c—粒状铀石逐渐生长，将草莓状黄铁矿包裹；d—铀石充斥于草莓状黄铁矿空隙；e—铀石将草莓状黄铁矿包裹；f—铀石将草莓状向胶状过渡的黄铁矿包裹

图9 特拉敖包铀矿床铀储层砂岩中黄铁矿与铀矿物背散射电子照片

Fig. 9. Relationship between pyrite and uranium minerals in uranium reservoir sandstones of the Telaaobao uranium deposit.

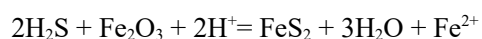
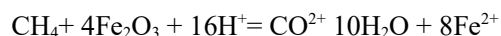
(a) Granular uraninite hosted within framboidal pyrite; (b) Acicular uraninite occurring in framboidal pyrite; (c) Granular uraninite progressively overgrowing and enclosing framboidal pyrite; (d) Uraninite infilling pores and interstices of framboidal pyrite; (e) Framboidal pyrite completely encased by uraninite.; (f) Coffinite encloses pyrite that transitions from framboidal to colloform.

3.3 深部含烃流体与铀矿化之间的关系

已有研究认为，在沉积初期或后期，地层中的植物、动物遗骸分解，释放大量的甲烷等烃类气体。该类气体与氧化含矿流体中 SO_4^{2-} 离子发生反应，形成大量的 H_2S 气体； H_2S 气体进一步与 Fe^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 等离子发生反应，形成黄铁矿、闪锌矿、方铅矿等金属硫化物（邱林飞等，2024；王果等，2025）。

由于下白垩统为干旱背景下的红色沉积，其地层本身的有机质、黄铁矿等还原介质缺乏，地层本身有机质含量较少，所以酸解烃的含量也会随之较少，矿床成矿必须有外源还原性流体参与（焦养泉等，2026）。同时特拉敖包地区的含矿砂岩酸解烃含量与地层中的 TOC 含量没有明显的负相关性，表明该区域不具有明显生烃的砂岩，含矿砂岩中酸解出来的含烃类气体不是来自地层本身的原位有机质，而是来自深部的含烃类流体。

含烃类流体沿矿床附近断裂向上运移，从而进入地层逸散，致使该矿床地层具有较高的还原容量。在适宜的物理化学条件（酸碱度、氧逸度、温压）下，深部还原性流体形成大规模的还原障，为铀矿富集沉淀提供了强有力的条件；镜下薄片观察亦可见少量沥青。深部还原性流体参与成矿反应式（Awadh and Nejbert, 2016；王果等，2025）：



随着对鄂尔多斯盆地北部遥感测量的不断加密，在盆地北部共布设了 10 条地震剖面。目前，在特拉敖包地区共解译出 9 条断裂（图 10），这些断裂主要位于特拉敖包北部、南部和北西部。其中，三眼井断裂和乌兰吉林庙断裂是鄂尔多斯盆地北部的的主要断裂带，对该区域铀成矿起到主导控制作用；同时，这两条大断裂衍生出的多条小型断裂进一步强化了对特拉敖包地区的成矿控制。综合现有研究认为，深部的还原性流体是特拉敖包地区铀成矿的主要还原介质，而该区域周边的众多断裂带不仅为深部的还原性流体提供了稳定的运移通道，还为该区域提供了稳定的还原环境，使其还原能力优于其他区域。由此认为，断裂带的分布情况是判断深部还原性流体的主要分布范围的重要依据。

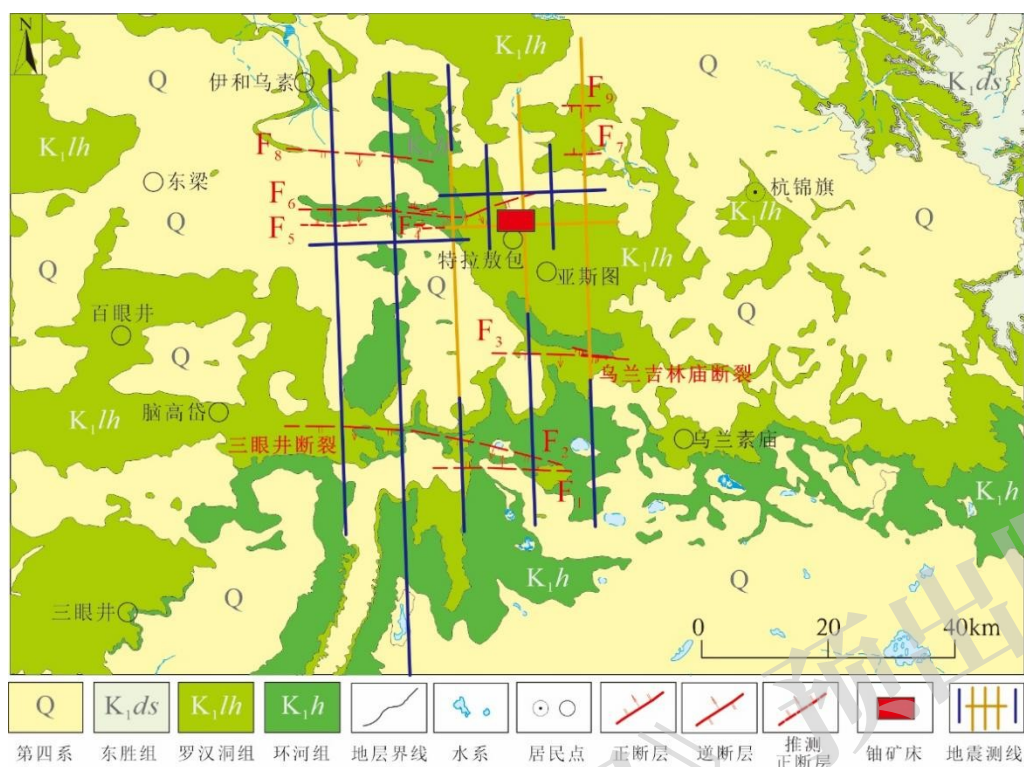
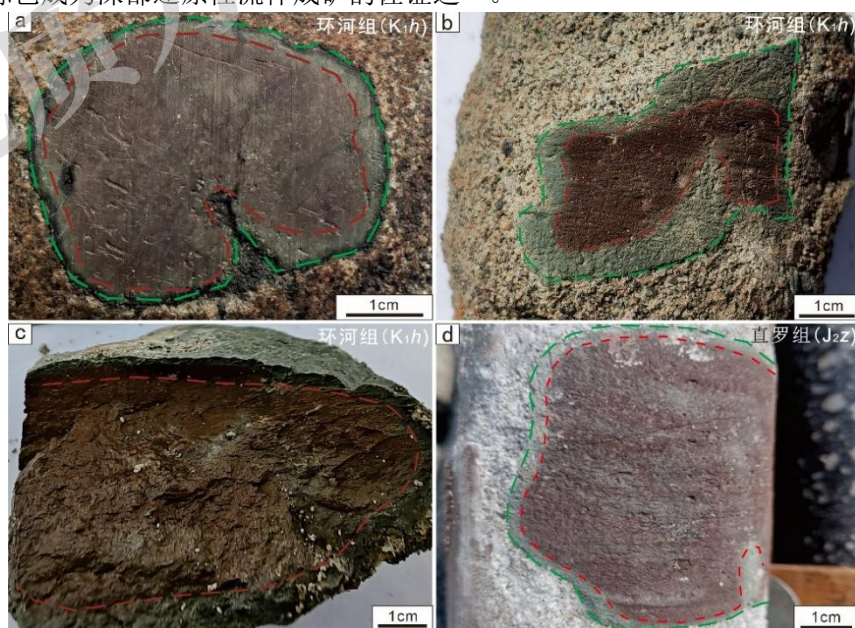


图 10 特拉敖包地区断裂分布图

Fig. 10. Distribution of faults in the Telaaobao area

在鄂尔多斯盆地地下白垩统内，常见核部呈褐红色、边部呈绿色的泥砾（图 11a—11c）；直罗组内亦可见此类泥砾（图 11d）。该类型泥砾可能指示，直罗组含矿目的层在铀成矿过程中，深部的还原性流体沿断裂向上运移时，其还原能力将褐红色泥砾边部还原为绿色。由此推测，特拉敖包铀矿床存在来自深部的还原性流体参与成矿，该类型泥砾也成为深部还原性流体成矿的佐证之一。



a—环河组核部为褐色，边部为绿色的椭圆状泥砾；b—环河组核部为褐色，边部为绿色的扁平状泥砾；c—环河组椭圆状泥砾劈半，核部为褐色，边部为绿色；d—直罗组核部为褐色，边部为绿色的扁平状泥砾

图 11 特拉敖包铀矿床铀储层砂岩中泥砾宏观特征

Fig. 11. Macroscopic characteristics of mud gravels in uranium reservoir sandstones of the Telaaobao uranium deposit

(a) Elliptical mud clasts in the Huanhe Formation with brown cores and green margins; (b) Flattened mud clasts in the Huanhe Formation with brown cores and green margins; (c) Split elliptical mud clast in the Huanhe Formation, showing brown core and green margin; (d) Flattened mud clasts in the Zhiluo Formation with brown cores and green margins.

3.4 绿泥石与铀矿化之间的关系

绿泥石通常形成于偏碱性、富 Fe^{2+} – Mg^{2+} 的介质中。其稳定存在要求环境具有一定还原程度，以抑制 Fe^{3+} 氧化物大量沉淀，但又未达到强还原条件下黄铁矿大规模富集的阶段。因此，绿泥石可作为沉积期—早成岩期弱还原环境的辅助指示矿物（Aagaard et al., 2000; 黄思静等, 2004; 姚涇利等, 2011）。

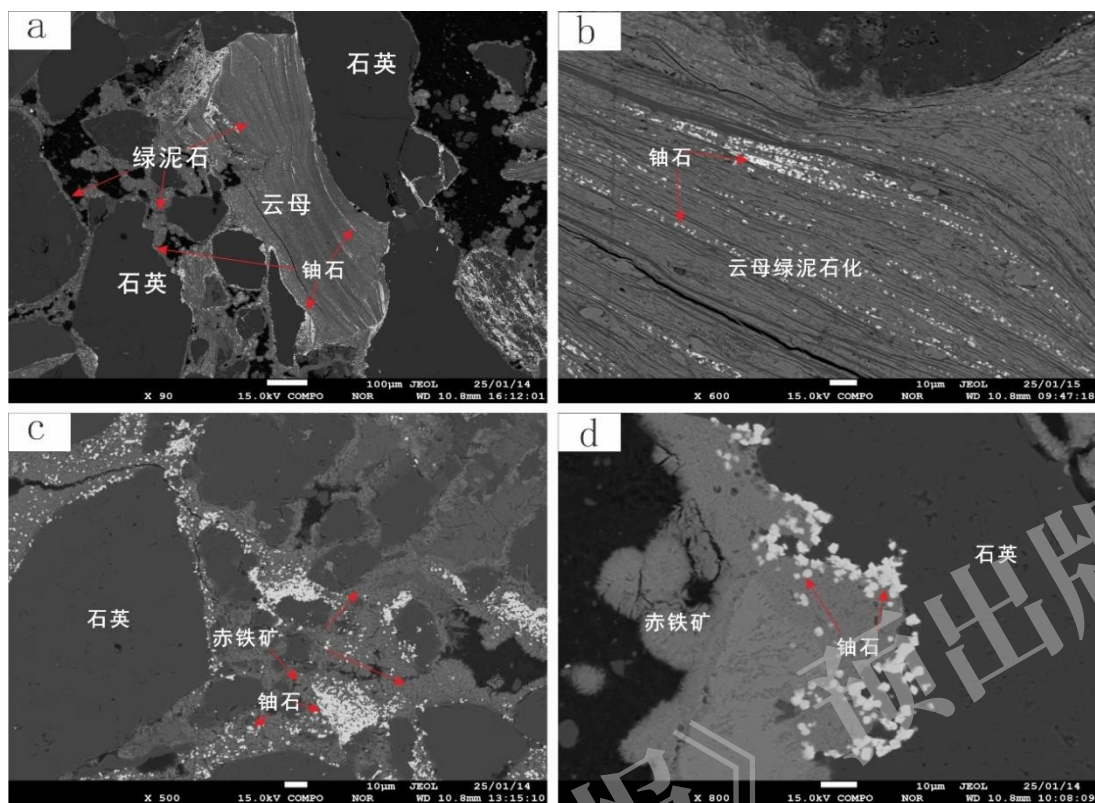
特拉敖包铀矿床中的绿泥石主要有 2 种成因：一类由云母、长石蚀变而成（图 4a—4d），另一类为自生绿泥石（图 4e、4f）。由云母蚀变形成的绿泥石主要沿云母解理、边缘蚀变。由于绿泥石具有特定的层间结构和表面电荷，可以有效地吸附 UO_2^{2+} ，致使铀矿物围绕其表面生长。部分铀石充填在蚀变的云母裂隙内（图 12a、12b），且铀石与绿泥石接触但不交代绿泥石，依据矿物交切关系，推测该类型绿泥石形成时间早于铀石。自生绿泥石主要赋存在赤铁矿表面，呈针状、毛发状（图 4e、4f）。依据镜下观察的矿物交切关系显示，赤铁矿包裹围绕在石英颗粒边缘的铀石（图 12c、12d），随后赤铁矿表面可见自生的绿泥石（图 4e）。据此认为，地层早期形成的黄铁矿表面多生长有针状、粒状铀石；受多期次富铁氧化流体影响，黄铁矿被氧化为赤铁矿，部分赤铁矿依旧保留黄铁矿假晶；后期绿泥石赋存在赤铁矿表面生长，并包裹赤铁矿表面铀石。由此推断，自生绿泥石形成时间晚于铀石。

3.5 不同成矿阶段还原介质的形成演化

已有的研究表明，特拉敖包铀矿床以层间氧化为主，且根据成矿模式可划分为 4 个成矿阶段：早白垩世早期沉积成岩氧化期、早白垩世中晚期大规模还原期、早白垩世末期—渐新世二次氧化成矿期和中新世—今氧化作用终止期（图 13; 王龙辉等, 2023; 剡鹏兵等, 2024）。其中，主成矿期的起始时间为早白垩世末期，与铀矿体的 U-Pb 定年结果基本一致（席党鹏等, 2019; 王龙辉等, 2023）。在目前已有的特拉敖包成矿模式基础上，进一步了解研究在不同的成矿阶段，不同还原介质在成矿过程中的主导作用。

3.5.1 早白垩世早期沉积成岩阶段

早白垩世早期，受燕山期构造挤压运动影响，盆地进入稳定的沉积时期，沉积了洛河组和环河组。该时期气候干旱，植被发育较少，炭质碎屑等还原介质多来自延安组、直罗组煤层的剥蚀，炭质碎屑随地层沉积。在沉积过程中，炭质碎屑、有机质及动植物遗骸释放的含烃类气体与 SO_4^{2-} 离子发生反应，形成大量的 H_2S 气体； H_2S 气体与 Fe^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 等离子发生反应形成黄铁矿、闪锌矿、方铅矿等金属硫化物，共同形成了初步还原障。泥岩中铀含量数据表明，该时期含氧流体中铀的含量整体较高。当含氧流体进入特拉敖包铀矿床并与初期形成的还原障接触时，炭质碎屑与黄铁矿基本被氧化殆尽，含氧含铀水中的铀初步卸载沉淀，但受还原容量的影响，流体中的铀大部分被带走，仅存留了部分矿体。



a—绿泥石、铀石与云母伴生；b—云母绿泥石化并与铀石伴生；c—赤铁矿与铀石伴生；d—针状、毛发状绿泥石与赤铁矿、铀石伴生；

图 12 特拉敖包铀矿床绿泥石、赤铁矿与铀矿物背散射电子照片

Fig. 12. Relationship between chlorite and uranium minerals in the Telaaobao uranium deposit.

(a) Chlorite and uraninite associated with mica; (b) Chloritized mica coexisting with uraninite; (c) Hematite associated with uraninite; (d) Acicular to hair-like chlorite occurring together with hematite and uraninite; (e) Hematite associated with uraninite; (f) Chlorite associated with uraninite.

3.5.2 早白垩世中晚期大规模还原阶段

特拉敖包铀矿床地震解译结果表明，三眼井断裂和乌兰吉林庙断裂是该区域的主要控矿断裂，两条大断裂衍生的小断裂分布在特拉敖包铀矿床周边。早白垩世中晚期，气候相对干旱，区域构造断裂可能切穿早期形成的油气藏，深部含烃类的还原性流体沿着断裂通道向上运移，逐渐散逸在下白垩统地层内，致使沉积时期形成的红色氧化砂体被还原为绿色砂体，被还原的绿色砂体形成了巨大的还原障；同时，早期残留炭质碎屑、黄铁矿的砂体还原容量进一步增加。受还原作用影响，该时期的潜水氧化和层间氧化并不突出。

3.5.3 早白垩世末期白垩世—渐新世二次氧化成矿阶段

早白垩世末期—渐新世，气候更加干旱，潜水氧化和层间氧化占据主导地位。当氧化流体进入地层后，与含烃类流体形成的还原障相接触，形成了氧化—还原界面；同时，该时期的云母、长石蚀变为早期的绿泥石，其吸附能力和还原能力进一步提高了地层中的还原容量。含矿流体中以碳酸铀酰根络合物形式迁移的铀从 U^{6+} 转变为 U^{4+} ，进而从含矿流体中卸载沉淀、富集成矿。该阶段中后期，富铁的含氧流体多期次进入地层，早期形成的草莓状黄铁矿逐渐被氧化为赤铁矿；随后在含烃流体的作用下，赤铁矿表面逐渐形成具有一定还原能力的自生绿泥石。

3.5.4 中新世—今氧化作用终止阶段

该阶段，在盆地整体抬升的背景下，强烈的隆起抬升对盆地边缘产生改造作用。随着盆地周缘断陷加剧，发育了河套断陷、汾渭断陷和银川断陷盆地，新的构造运动打破了盆地原有的地下水动力系统；除盆地北部地区仍有含铀含氧水渗入外，大部分区域呈现外泄型。此时，还原介质与表生流体达到了新的平衡点，氧化作用基本终止，矿体进入稳定期。

利益冲突说明: 本文作者声明不存在任何与本研究相关的利益冲突。

the authors declare no conflicts of interest.: The authors declare that there are no conflicts of interest regarding the publication of this paper.

References

- AAGAARD P, JAHREN J S, HARSTAD A O, et al., 2000. Formation of grain-coating chlorite in sandstones. Laboratory synthesized vs. natural occurrences[J]. *Clay Minerals*, 35(1): 261-269.
- AWADH S M, NEJBERT K, 2016. Polymetallic sulfide ores hosted in Late Permian carbonate at the Alanish locality, northern Iraq: petrography and mineral chemistry[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(9): 540.
- BAI Y M, LIU B, LI H M, 2025. Geochemical characteristics and indicative significance of green sandstone in Mesozoic uranium-producing horizon in Northern Ordos Basin[J]. *Uranium Geology*, 41(1): 13-28. (in Chinese with English abstract)
- CAI C F, DONG H L, LI H T, et al., 2007. Mineralogical and geochemical evidence for coupled bacterial uranium mineralization and hydrocarbon oxidation in the Shashagetai deposit, NW China[J]. *Chemical Geology*, 236(1-2): 167-179.
- DENG J, WANG Q F, GAO B F, et al., 2005. Evolution of Ordos Basin and its distribution of various energy resources[J]. *Geoscience*, 19(4): 538-545. (in Chinese with English abstract)
- GOLDHABER M B, REYNOLDS R L, RYE R O, 1983. Role of fluid mixing and fault-related sulfide in the origin of the Ray Point uranium district, South Texas[J]. *Economic Geology*, 78(6): 1043-1063.
- GRANGER H C, WARREN C G, 1969. Unstable sulfur compounds and the origin of roll-type uranium deposits[J]. *Economic Geology*, 64(2): 160-171.
- HE Z X, HUANG D J, ZHENG C B, 2006. Modification and geology implication of Ordovician paleogeomorphology and paleogeosyncline distribution models in Ordos Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 11(2): 25-28. (in Chinese with English abstract)
- HOU H Q, LI Y R, LIU H J, et al., 2016. The organic matter characteristics of the Zhiluo Formation and its relationship with uranium mineralization in the North Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(12): 3367-3374. (in Chinese with English abstract)
- HOUGH G, SWAPP S, FROST C, et al., 2019. Sulfur isotopes in biogenically and abiogenically derived uranium roll-front deposits[J]. *Economic Geology*, 114(2): 353-373.
- HUANG S J, 1994. Formation conditions and prospecting criteria for sandstone uranium deposit of interlayered oxidation type[J]. *Uranium Geology*, 10(1): 6-13. (in Chinese with English abstract)
- HUANG S J, XIE L W, ZHANG M, et al., 2004. Formation mechanism of authigenic chlorite and relation to preservation of porosity in nonmarine Triassic reservoir sandstones, Ordos Basin and Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 31(3): 273-281. (in Chinese with English abstract)
- INGHAM E S, COOK N J, CLIFF J, et al., 2014. A combined chemical, isotopic and microstructural study of pyrite from roll-front uranium deposits, Lake Eyre Basin, South Australia[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 125: 440-465.
- JIANG X J, LU C, WANG L H, et al., 2025. Study on the characteristic and uranium enrichment mechanism of purple uranium ore in the upper member of Huanhe Formation in Telaaobao Area, Northwestern Ordos Basin[J]. *Uranium Geology*, 41(3): 387-402. (in Chinese with English abstract)
- JIAO Y Q, WU L Q, RONG H, 2018. Model of inner and outer reductive media within uranium reservoir sandstone of sandstone-type uranium deposits and its ore-controlling mechanism: case studies in Daying and Qianjiadian uranium deposits[J]. *Earth Science*, 43(2): 459-474. (in Chinese with English abstract)
- JIAO Y Q, WU L Q, RONG H, et al., 2021. Coal accumulation regularity of Zhiluo Formation and its indication to paleoclimate and uranium metallogenic environment, Ordos Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 46(7): 2331-2345. (in Chinese with English abstract)
- JIN R S, TENG X M, LI X G, et al., 2020. Genesis of sandstone-type uranium deposits along the northern margin of the Ordos Basin, China[J]. *Geoscience Frontiers*, 11(1): 215-227.
- JU Y W, WANG W, REN Z L, et al., 2025. Multi-stage evolution of the Ordos Basin: Its coupled basin-mountain systems and energy resource[J]. *Science China Earth Sciences*, 68(8): 2426-2473.

- LI Z C, LI H M, YAN P B, et al., 2024. Characteristics and ore-controlling factors of uranium mineralization in Telaaobao Area, Northern Ordos Basin[J]. *Uranium Geology*, 40(5): 899-910. (in Chinese with English abstract)
- LIU C H, LI Z Y, HE F, et al., 2024. Quantitative analysis of provenance in the Lower Cretaceous of the northwestern Ordos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 31(3): 80-99. (in Chinese with English abstract)
- LIU Y, 2024. Mineralization of sandstone-hosted uranium deposit in the northern Ordos Basin[D]. Wuhan: China University of Geosciences. (in Chinese with English abstract)
- LUO J J, 2017. Coal organic matter characteristic and metallogenic significance in Daying sandstone-type uranium deposit, Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University. (in Chinese with English abstract)
- LUO Q, 2010. Concept, principle, model and significance of the fault controlling hydrocarbon theory[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 37(3): 316-324.
- NORTHROP H R, GOLDBERGER M B, LANDIS G P, et al., 1990. Genesis of the tabular-type vanadium-uranium deposits of the Henry Basin, Utah[J]. *Economic Geology*, 85(2): 215-269.
- QIU L F, LI Z Y, ZHANG Z L, et al., 2024. Characteristics of organic matter in Lower Cretaceous ore-bearing sandstones and its relationship with uranium mineralization in the northern Ordos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 31(4): 281-296. (in Chinese with English abstract)
- REN Z L, QI K, LIU R C, et al., 2020. Dynamic background of Early Cretaceous tectonic thermal events and its control on various mineral accumulations such as oil and gas in the Ordos Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(4): 1213-1234. (in Chinese with English abstract)
- WANG D Z, LENG C B, QIN C J, et al., 2022. Geochemical characteristics and mineralization of uranium[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 46(2): 282-302. (in Chinese with English abstract)
- WANG G, LIU B, BAI Y M, et al., 2025. Geological characteristics and metallogenic mechanism of Lower Cretaceous uranium mineralization in northern Ordos basin[J]. *World Nuclear Geoscience*, 42(3): 485-503. (in Chinese with English abstract)
- WANG L H, YAN P B, JIAO Y Q, et al., 2023. Uranium metallogenic model of the Lower Cretaceous in the northern Ordos Basin[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 42(3): 222-233. (in Chinese with English abstract)
- WARREN C G, 1972. Sulfur isotopes as a clue to the genetic geochemistry of a roll-type uranium deposit[J]. *Economic Geology*, 67(6): 759-767.
- WU R G, XU Z, GONG W J, et al., 2012. Discussion on the genesis of Baixintu uranium deposit in Sonliao Basin[J]. *Uranium Geology*, 28(3): 142-147. (in Chinese with English abstract)
- XI D P, WAN X Q, LI G B, et al., 2019. Cretaceous integrative stratigraphy and timescale of China[J]. *Science China Earth Sciences*, 62(1): 256-286.
- YAN P B, WANG L H, LI H M, et al., 2024. Metallogenic mechanism and exploration achievements of sandstone-type uranium in the Lower Cretaceous strata of the northern Ordos Basin[J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 47(5): 409-420. (in Chinese with English abstract)
- YAO J L, WANG Q, ZHANG R, et al., 2011. Forming mechanism and their environmental implications of chlorite-coatings in Chang 6 sandstone (Upper Triassic) of Hua-Qing Area, Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 29(1): 72-79. (in Chinese with English abstract)
- YI C, LI X D, ZHANG K, et al., 2017. Relationship between reducing materials and uranium mineralization in the northeastern Ordos Basin[J]. *Geological Review*, 63(S1): 139-140. (in Chinese with English abstract)
- YUE L, 2021. The formation process and evolution law of pyrite in uranium reservoir in Zhiluo Formation, northern Ordos Basin[D]. Wuhan: China University of Geosciences. (in Chinese with English abstract)
- YUE L, JIAO Y Q, WU L Q, et al., 2024. Framboidal pyrite in Dongsheng sandstone-hosted uranium deposit, northern Ordos Basin: implications for fluid evolution and uranium mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, 174: 106303.
- ZHANG F, 2018. Enhancement of organic matter maturation of carbonaceous debris due to radiogenic heat from the sandstone-type uranium deposits, Ordos basin[D]. Wuhan: China University of Geosciences. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG F, JIAO Y Q, WANG S M, et al., 2022. Origin of dispersed organic matter within sandstones and its implication for uranium mineralization: a case study from Dongsheng uranium ore field in China[J]. *Journal of Earth Science*, 33(2): 325-341.
- ZHANG J D, XU G Z, LIN J R, et al., 2010. The implication of six kinds of new sandstone-type uranium deposits to uranium resources potential in North China[J]. *Geology in China*, 37(5): 1434-1449. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Z L, HE F, LI Z Y, et al., 2024. Material composition characteristics of uranium ore from Telaaobao mineral occurrence, northwestern Ordos Basin[J]. *Uranium Geology*, 40(1): 16-28. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO L, CAI C F, JIN R S, et al., 2018. Mineralogical and geochemical evidence for biogenic and petroleum-related uranium mineralization in the Qianjiadian

- deposit, NE China[J]. Ore Geology Reviews, 101: 273-292.
- ZHENG F X, TENG Y G, ZHAI Y Z, et al., 2023. Geo-environmental models of in-situ leaching sandstone-type uranium deposits in North China: a review and perspective[J]. Water, 15(6): 1244.
- ZHONG W H, WU L Q, WANG L H, et al., 2025. The distinctiveness of carbonaceous debris in uranium reservoirs under arid sedimentary backgrounds and its implication for uranium mineralization: a case study of northern Ordos Basin[J]. Ore Geology Reviews, 179: 106526.
- ZHU Q, YU R A, LI J G, et al., 2018. Control of reducing medium on uranium deposit of sandstone in Tarangole area, northeastern Ordos basin[J]. Coal Geology & Exploration, 46(6): 11-18. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 白一鸣, 刘波, 李华明, 2025. 鄂尔多斯盆地北部中生代产铀层位绿色砂岩地球化学特征及其指示意义[J]. 铀矿地质, 41 (1): 13-28.
- 邓军, 王庆飞, 高帮飞, 等, 2005. 鄂尔多斯盆地演化与多种能源矿产分布[J]. 现代地质, 19 (4): 538-545.
- 何自新, 黄道军, 郑聪斌, 2006. 鄂尔多斯盆地奥陶系古地貌、古沟槽模式的修正及其地质意义[J]. 海相油气地质, 11 (2): 25-28.
- 侯惠群, 李言瑞, 刘洪军, 等, 2016. 鄂尔多斯盆地北部直罗组有机质特征及与铀成矿关系[J]. 地质学报, 90 (12): 3367-3374.
- 黄世杰, 1994. 层间氧化带砂岩型铀矿的形成条件及找矿判据[J]. 铀矿地质, 10 (1): 6-13.
- 黄思静, 谢连文, 张萌, 等, 2004. 中国三叠系陆相砂岩中自生绿泥石的形成机制及其与储层孔隙保存的关系[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 31 (3): 273-281.
- 姜晓杰, 鲁超, 王龙辉, 等, 2025. 鄂尔多斯盆地北部特拉敖包地区紫色铀矿石特征及富集机理研究[J]. 铀矿地质, 41 (3): 387-402.
- 焦养泉, 吴立群, 荣辉, 2018. 砂岩型铀矿的双重还原介质模型及其联合控矿机理: 兼论大营和钱家店铀矿床[J]. 地球科学, 43 (2): 459-474.
- 焦养泉, 吴立群, 荣辉, 等, 2021. 鄂尔多斯盆地直罗组聚煤规律及其对古气候和铀成矿环境的指示意义[J]. 煤炭学报, 46 (7): 2331-2345.
- 李振成, 李华明, 剡鹏兵, 等, 2024. 鄂尔多斯盆地北部特拉敖包地区铀矿化特征及控矿因素分析[J]. 铀矿地质, 40 (5): 899-910.
- 刘源, 2024. 鄂尔多斯盆地北部砂岩型铀矿成矿作用研究[D]. 武汉: 中国地质大学.
- 罗晶晶, 2017. 鄂尔多斯盆地北部大营砂岩型铀矿煤屑有机质特征及其成矿意义[D]. 西安: 西北大学.
- 邱林飞, 李子颖, 张宇龙, 等, 2024. 鄂尔多斯盆地北部下白垩统赋矿砂岩中有机质特征及其与铀成矿的关系[J]. 地学前缘, 31 (4): 281-296.
- 任战利, 祁凯, 刘润川, 等, 2020. 鄂尔多斯盆地早白垩世构造热事件形成动力学背景及其对油气等多种矿产成藏(矿)期的控制作用[J]. 岩石学报, 36 (4): 1213-1234.
- 王大钊, 冷成彪, 秦朝建, 等, 2022. 铀的地球化学性质与成矿作用[J]. 大地构造与成矿学, 46 (2): 282-302.
- 王果, 刘波, 白一鸣, 等, 2025. 鄂尔多斯盆地北部下白垩统环河组铀成矿地质特征及成矿机理研究[J]. 世界核地质科学, 42 (3): 485-503.
- 王龙辉, 剡鹏兵, 焦养泉, 等, 2023. 鄂尔多斯盆地北部下白垩统铀成矿模式[J]. 地质科技通报, 42 (3): 222-233.
- 吴仁贵, 徐喆, 宫文杰, 等, 2012. 松辽盆地白兴吐铀矿床成因讨论[J]. 铀矿地质, 28 (3): 142-147.
- 席党鹏, 万晓樵, 李国彪, 等, 2019. 中国白垩纪综合地层和时间框架[J]. 中国科学: 地球科学, 49 (1): 257-288.
- 剡鹏兵, 王龙辉, 李华明, 等, 2024. 鄂尔多斯盆地北部下白垩统砂岩型铀成矿机理与找矿成果[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 47 (5): 409-420.
- 姚泾利, 王琪, 张瑞, 等, 2011. 鄂尔多斯盆地华庆地区延长组长6砂岩绿泥石膜的形成机理及其环境指示意义[J]. 沉积学报, 29 (1): 72-79.
- 易超, 李西得, 张康, 等, 2017. 鄂尔多斯盆地东北部还原性物质与铀成矿关系探讨[J]. 地质论评, 63 (S1): 139-140.
- 乐亮, 2021. 鄂尔多斯盆地北部直罗组铀储层中黄铁矿的形成过程与演化规律[D]. 武汉: 中国地质大学.
- 张帆, 2018. 鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿衰变生热对炭质碎屑成熟度的催化影响[D]. 武汉: 中国地质大学.
- 张金带, 徐高中, 林锦荣, 等, 2010. 中国北方6种新的砂岩型铀矿对铀资源潜力的提示[J]. 中国地质, 37 (5): 1434-1449.
- 朱强, 俞弼安, 李建国, 等, 2018. 鄂尔多斯盆地东北部塔然高勒地区还原介质对砂岩型铀矿的控制[J]. 煤田地质与勘探, 46 (6): 11-18.
- 李盛富, 张蕴. 砂岩型铀矿床中铀矿物的形成机理 [J]. 铀矿地质, 2004,20 (02):80-84.
- 赵兴齐, 李西得, 史清平, 刘武生, 张宇龙, 易超, 郭强. 鄂尔多斯盆地东胜区直罗组砂岩中烃类流体特征与铀成矿关系 [J]. 地质学报, 2016,90 (12):3381-3392.
- 张宇龙, 贺锋, 李子颖, 刘鑫扬, 李华明, 王龙辉, 刘持恒, 李西得, 张艳, 罗腾. 鄂尔多斯盆地西北部特拉敖包矿产地华池—环河组黄铁矿特征及其

成因探讨 [J]. 铀矿地质, 2020,36 (04):457-466.

《地质力学学报》预出版