

李伟涛,张宇,刘武生,等. 银额盆地塔木素铀矿床富磷铀矿石的岩石矿物学、地球化学特征及成因探讨[J]. 世界核地质科学, 2025, 42(2): 246-262. doi: 10.3969/j.issn.1672-0636.2025.02.003

LI Weitao, ZHANG Yu, LIU Wusheng, et al. Petrology, mineralogy, geochemistry and genesis discussion of phosphorus-rich uranium ores in the Tamusu uranium deposit, Yin'e basin[J]. World Nuclear Geoscience, 2025, 42(2): 246-262(in Chinese).

银额盆地塔木素铀矿床富磷铀矿石的岩石矿物学、地球化学特征及成因探讨

李伟涛^{1,2,3}, 张宇⁴, 刘武生^{1,2,3}, 贾立城^{1,2,3}, 李天瑜⁵, 杨喆^{1,2,3}

- 1 铀资源探采与核遥感全国重点实验室, 北京 100029
- 2 核工业北京地质研究院, 北京 100029
- 3 中核集团铀资源勘查与评价技术重点实验室, 北京 100029
- 4 秦皇岛天元五一五钻探有限公司, 河北 秦皇岛 066013
- 5 核工业二〇八大队, 内蒙古 包头 014010

摘要 本研究聚焦于银额盆地塔木素铀矿床中发现的罕见铀矿化现象, 部分铀矿石中含大量的磷灰石。通过偏光显微镜、扫描电镜、电子探针、XRD、主微量元素、Sr同位素、全岩U-Pb同位素等方法对该类型铀矿石进行岩石学、矿物学及地球化学特征的详细分析, 并探讨其成因。富磷铀矿石岩石类型包括紫红色白云质磷质岩、灰白色白云质磷质岩、含磷粉砂岩、磷质中砂岩以及角砾状灰岩等。样品的全岩 P_2O_5 含量介于0.42%~27.74%之间, 主要含磷矿物为磷灰石, 呈微晶($\sim 0.5 \mu m$)集合体状, 其含量最高占全岩70%。磷灰石类型为含碳-氟磷灰石。U含量介于 $221 \times 10^{-6} \sim 3486 \times 10^{-6}$ 之间, 全岩 P_2O_5 与U含量呈较强的正相关, 表明铀的赋存与磷灰石密切相关。水爆角砾岩构造、稀土元素配分模式及较低的全岩Sr同位素值均指示热水沉积作用参与磷灰石形成。紫红色磷质岩全岩U-Pb等时线年龄(54 ± 5.2 Ma)暗示约60 Ma的宗乃山隆升引起的层间氧化作用对磷质岩进行改造。总之, 塔木素地区富磷铀矿石的形成是热水沉积作用-层间氧化作用等多种地质作用的结果。

关键词 塔木素铀矿床; 磷质岩; 铀矿化; 磷灰石; 热水沉积

中图分类号 P619.14; P611.2*2 文献标志码 A 文章编号 1672-0636(2025)02-0246-17

Petrology, mineralogy, geochemistry and genesis discussion of phosphorus-rich uranium ores in the Tamusu uranium deposit, Yin'e basin

LI Weitao^{1, 2, 3}, ZHANG Yu⁴, LIU Wusheng^{1, 2, 3}, JIA Licheng^{1, 2, 3}, LI Tianyu⁵, YANG Zhe^{1, 2, 3}

1 National Key Laboratory of Uranium Resources Exploration-Mining and Nuclear Remote Sensing, Beijing 100029, China

2 Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China

3 CNNC Key Laboratory of Uranium Resource Prospection and Evaluation Technology, Beijing 100029, China

4 Qinhuangdao Tianyuan 515 Drilling Engineering Co., Ltd., Qinhuangdao 066013, China

5 Geological Party No. 208, CNNC, Baotou 014010, China

基金项目: 核技术研发项目(编号: 地H2401)资助

收稿日期: 2025-02-27 改回日期: 2025-03-30

第一作者: 李伟涛, 男, 1991年生, 工程师, 博士, 主要研究方向为砂岩型铀矿成矿作用。E-mail: cnncliweitao@163.com

Supported by Nuclear Technology R&D Program (No.H2401)

Received date: 2025-02-27 revised date: 2025-03-30

First author: LI Weitao, male, born in 1991, engineer, PhD, focusing on sandstone-type uranium deposit mineralization. E-mail: cnncliweitao@163.com

Abstract: This study focuses on the rare uranium mineralization phenomenon discovered in the Tamsu uranium deposit of Yin' e basin that part of uranium ores contain a large amount of apatite. The lithology, mineralogy, and geochemistry of these uranium ores were studied in detail by microscope, SEM, EMPA, XRD and analysis of major and trace elements, strontium isotope and bulk rock U-Pb isotope, its genesis was also discussed. The rock types associated with phosphorus-rich uranium ores include purplish-red dolomitic phosphorite, grayish-white dolomitic phosphorite, phosphorus-bearing siltstone, medium phosphatic sandstone, and brecciated limestone. The whole rock P_2O_5 content of the samples ranges from 0.42 % to 27.74 %. The primary phosphorus-containing mineral is apatite which occurs as microcrystalline apatite (about 0.5 μm) aggregate and accounts for up to 70 % of the whole rock. These apatite were identified as carbonate-fluorapatite. Uranium content varies from 221×10^{-6} to 3486×10^{-6} and show a significant positive correlation with P_2O_5 content, the rock's water bursting breccia structure, REE patterns, and lower Sr isotope values indicated the participation of hydrothermal deposition during apatite formation. Whole rock U-Pb isochron age of purplish-red phosphorite is 54 ± 5.2 Ma, implying that the phosphorite suffered the alteration by the interlayer oxidation derived from the Zongnaishan uplift event around 60 Ma. In summary, the formation of phosphorus-rich uranium ores in the Tamsu area was the product of multiple geological processes including hydrothermal deposition and interlayer oxidation

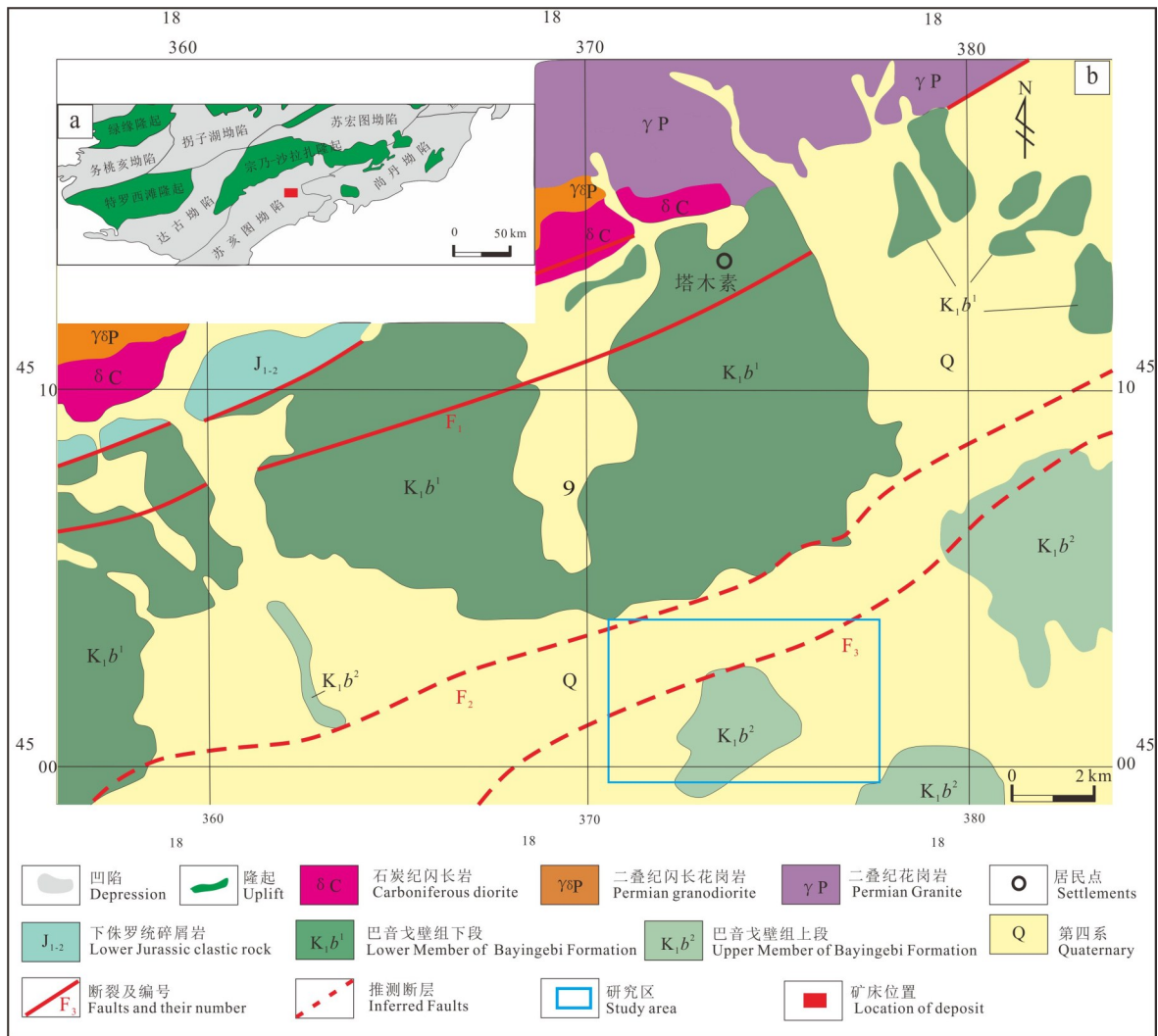
Keywords: Tamsu uranium deposit; phosphorite; uranium mineralization; apatite; hydrothermal deposition

银额盆地(铀矿系统以前称其东部为巴音戈壁盆地,西部为巴丹吉林盆地)是我国北方重要的沉积盆地之一,铀矿地质工作程度相对较低。塔木素特大型铀矿床是目前银额盆地发现的最主要铀矿床,以其丰富的铀矿化现象以及特殊的“硬”砂岩型铀矿石等特点而区别于我国北方的疏松砂岩型铀矿床^[1-2]。该矿床的研究程度相对较高。已有的研究涵盖了该矿床的沉积特征与铀成矿关系^[3]、构造演化与铀成矿关系^[4]、水文地质条件与铀成矿关系^[5]以及成岩作用与铀成矿关系^[1]。但对于该矿床的成矿作用及成因存在不同观点,包括同沉积叠加层间氧化^[6]、层间氧化叠加热流体改造^[7]、同沉积叠加层间氧化叠加热流体作用^[8]以及成岩作用叠加层间氧化作用^[9]等。使得以该矿床为典型进而指导银额盆地其他地区的找矿效果不明显。此外,近年来笔者在塔木素矿床发现一些特殊现象:首先,含矿段存在一些砂岩型铀矿中不常见的紫红色铀矿石及角砾状灰岩型铀矿石;其次,一些铀含量较高的铀矿石中未发现铀矿物,磷含量较高。类似的现象近年来在中国北方沉积盆地不同砂岩型铀矿床及矿化点陆续被发现^[10-13]。对塔木素地区新发现的这一铀矿化现象研究极少,其成因尚不明确。

本文详细分析了这种类型铀矿石的岩石矿物学特征和地球化学特征,探讨了铀的赋存形式以及富磷铀矿石成因,加深了对塔木素矿床成矿作用的理解。同时也为解释银额盆地其他铀矿化现象提供了新的视角,并为未来的铀矿勘查和采冶工作提供了科学依据。

1 地质背景

银额盆地位于塔里木、哈萨克斯坦、西伯利亚和华北等四大板块结合部位。盆地古生代为洋盆,晚古生代末洋盆消亡,板块拼合,并以形成恩格尔乌苏缝合带为标志。中生代燕山期、华北期和喜马拉雅期等多个构造活动都对本区产生了明显的影响,形成了大规模走滑拉张的构造背景,左行走滑和右行走滑多次更替,形成了一系列拉分盆地,并在盆地内各块段表现出明显的差异性。根据盆地内基底性质、岩浆活动、沉积地层和断裂活动的不同及盖层构造特征的差异等因素,将银额盆地中生代构造单元划分为3个隆起(绿园隆起、特罗西滩隆起和宗乃山—沙拉扎山隆起)和8个坳陷(居延海坳陷、务桃亥坳陷、达古坳陷、拐子湖坳陷、苏红图坳陷、苏亥图坳陷、尚丹坳陷和查干德勒苏坳陷)共计11个二级构造单元(图1a)。塔木素地区位于苏亥图坳陷北东部。



a—塔木素地区大地构造位置；b—研究区铀矿地质简图
a-Tectonic location of Tamusu area； b-Simplified uranium geological map.

图 1 塔木素地区大地构造位置及研究区铀矿地质简图
Fig.1 Tectonic location and simplified geological map of Tamusu area

2 矿床地质

塔木素地区地层由基底和盖层组成,基底主要为阿拉善陆块,岩性以深变质岩为主。盖层主要为侏罗系、白垩系等中生代地层。此外,在矿区东南部分布有第四系沉积物。侏罗系主要呈零星状分布于矿区的南西部和北东部。白垩系主要为下白垩统巴音戈壁组(K_1b),呈北东—南西方向分布于矿区中部(图1)。缺失下白垩统苏红图组(K_1s)。巴音戈壁组进一步分为巴音戈壁组上段(K_1b^2)和巴音戈壁组下段(K_1b^1)。下段主要分布于矿区的北西缘,由一套红色碎屑岩组成,即红色砾岩、砂砾岩、砂质泥岩夹粉砂质泥岩,局部发育灰色粉砂质泥

岩,厚度大于 300 m;上段主要出露于塔木素南西部,厚度大于 900 m。塔木素矿床范围内,巴音戈壁组上段是主要含矿层位,可进一步划分为下(K_1b^{2-1})、中 K_1b^{2-2} 、上 K_1b^{2-3} 三层岩段(图2)。每层均有铀矿化产出。下岩性段主要为扇三角洲—湖泊沉积,以大套深灰色、灰色泥岩为主,炭屑和黄铁矿较为发育,为一区域性一级标志层,其中形成泥岩型铀矿化;中岩性段主要为扇三角洲—湖泊沉积,以浅红色、紫红色、褐黄色、黄色、灰色砂岩和粉砂岩为主,夹薄层泥岩、泥灰岩和石膏夹层,为湿热—干旱古气候环境沉积的产物,形成砂岩型铀矿化,是塔木素地区主要找矿层位;上岩性段主要为扇三角洲—湖泊沉积,湖沼分布于整个矿床范围,

整体以灰色、深灰色泥岩为主,以区域性标志层。

塔木素矿区内断裂构造总体上沿袭了区域断裂控盆构造系统的特点,以 NE 向为主,区内共识别出 F_1 、 F_2 和 F_3 等 3 条主要断裂构造(图 1b),其中 F_1 断裂位于矿区北缘,相当于区域上的乌兰铁布科断裂,倾向 NW,倾角介于 $70^\circ \sim 85$ 之间 $^\circ$,表现为逆冲断层特点。 F_2 和 F_3 位于矿区南缘,其中 F_2 倾向 NW,倾角介于 $70^\circ \sim 87^\circ$

之间,表现为正断层特点,而 F_3 断裂倾向 SE,倾角介于 $57^\circ \sim 73^\circ$ 之间,表现为正断层特点。3 条断裂延伸均在 40 km 以上,NE 向断裂形成于燕山期,在喜马拉雅期仍有活动。区内岩浆岩主要分布于塔木素矿区西北部,是宗乃山隆起的重要组成部分,从志留纪—三叠纪均有,以二叠纪最为发育,志留纪少量。石炭纪以闪长岩为主,二叠纪以花岗岩、花岗闪长岩为主,三叠纪以花岗岩为主,少量辉长岩。

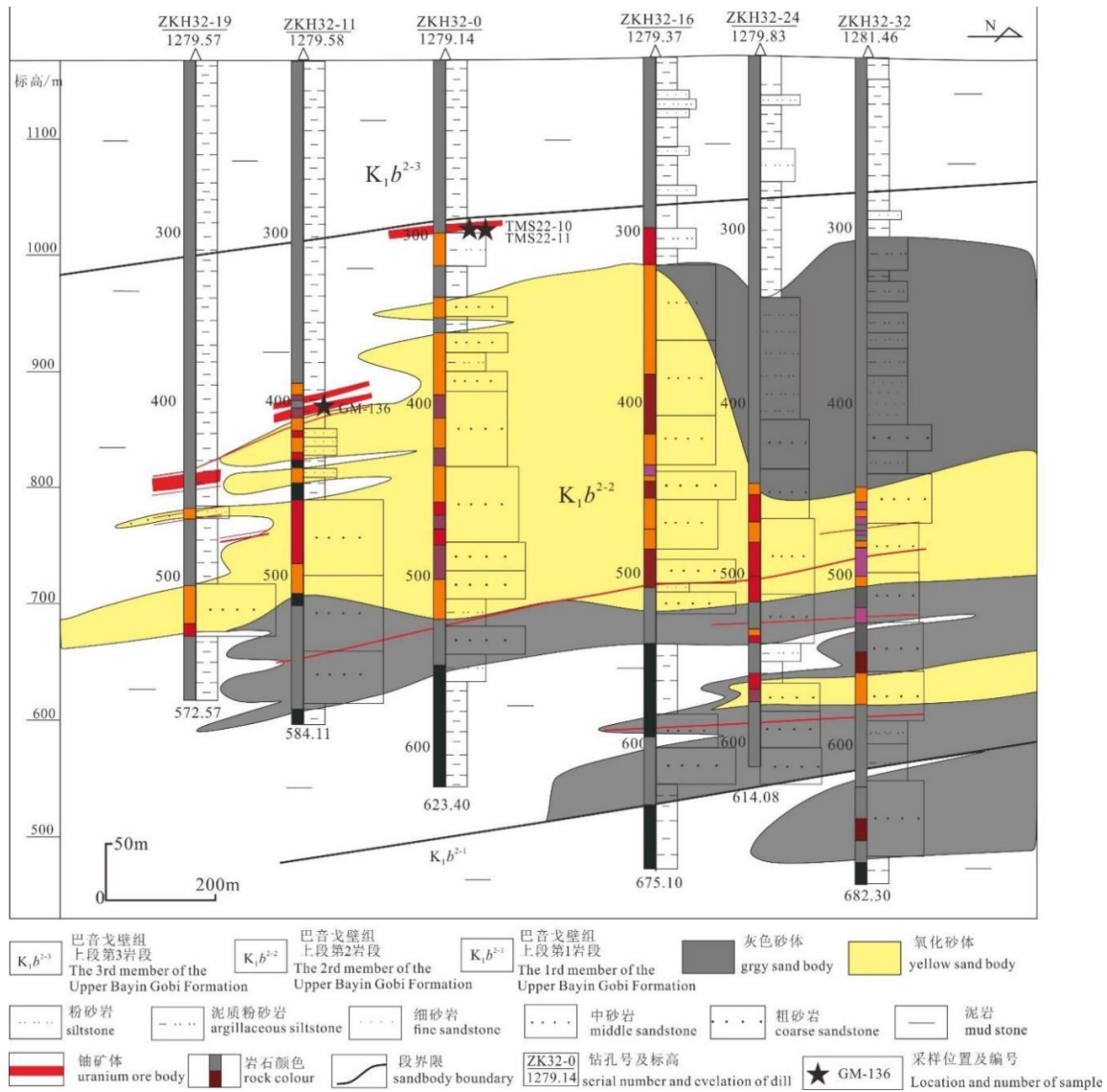


图 2 塔木素铀矿床 32 线剖面图(改自参考文献[8])

Fig. 2 Geological section of line 32 in Tamusu uranium deposit (modified after reference[8])

3 分析方法与样品信息

3.1 分析方法

扫描电镜、电子探针、主微量元素分析、X 射

线衍射、全岩铀同位素以及全岩 U-Pb 同位素等分析测试均在核工业北京地质研究院完成。扫描电镜仪器设备为 NanoSEM450 场发射扫描电子显微镜,电压为 20 kV,束斑直径为 1 μm 。电

子探针仪器型号为 JXA-8100,工作条件:加速电压为 15 kV,束流为 20 nA,束斑直径为 1 μm ,分析方式为波谱分析,修正方式为 ZAF。

3.2 样品信息

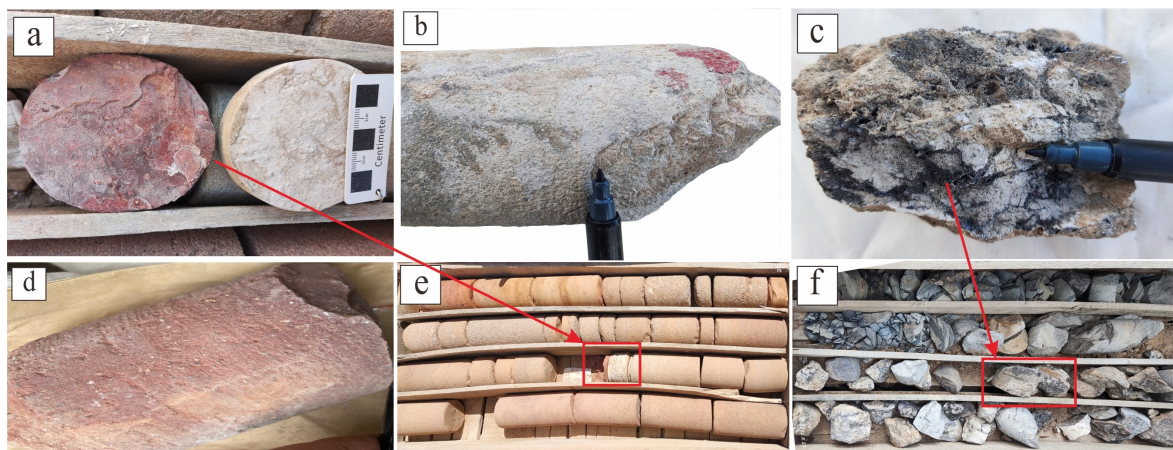
本次研究的富磷铀矿石样品有紫红色白云质磷质岩(图 3a、e)、灰白色白云质磷质岩(图 3b)、紫红色含磷粉砂岩(图 3d)、灰白色角砾状灰岩(图 3c、f)等。部分样品(角砾状灰岩以及部分磷质粉砂岩)沉积环境为湖相,位于

湖相泥岩与下部砂体的接触部位。这与银额盆地其他发育富磷铀矿石的铀矿床或矿化点(赛尔亥那地区^[13]、本巴图铀矿床)中磷质岩的产出部位类似。部分样品沉积环境为扇三角洲平原分流河道(图 3e)、扇三角洲前缘分流间湾等。图 3a、e 中紫红色白云质磷质岩与灰白色白云质磷质岩接触,其围岩有粉砂岩、细砂岩、中粗砂岩及含砾粗砂岩(图 2e)。具体样品信息见表 1,部分样品的采样位置见图 2。

表 1 塔木素矿床富磷铀矿石样品信息

Table 1 Samples information of phosphorus-rich uranium ores from Tamusu deposit

样品号	采样位置/m	岩性	γ 辐射仪测量值 nC/kg·h	U/ 10^{-6}	P ₂ O ₅ /%
GM-131	ZK56-8, 474	紫红色白云质磷质岩	20	2 299	14.93
GM-133	ZK36-11, 400	灰色磷质中砂岩	48	892	9.26
GM-136	ZK32-11, 403	紫红色白云质磷质粉砂岩	20	2 078	7.37
GM-140	ZK24-15, 406	灰白色磷质岩	20	3 468	27.74
GM-159	ZK34-11, 413	紫红色磷质粉砂岩	17	900	6.02
GM-162	ZK52-12, 481	紫红色含磷粉砂岩	10	285	1.49
TMS22-07	ZK44-16, 520	灰白色白云质磷质岩	22	623	15.7
TMS22-08	ZK40-28, 550	灰白色磷质细砂岩	25	792	11.6
TMS22-10	ZK32-0, 300.5	灰白色角砾状灰岩	25	760	2.68
TMS22-11	ZK32-0, 301	灰白色角砾状灰岩	25	540	3.7
TMS22-14	ZK24-3, 516.5	灰白色角砾状灰岩	15	424	1.55
TMS22-16	ZK15-0, 516	灰白色角砾状灰岩	10	221	0.418



a—紫红色白云质磷质岩及灰白色白云质磷质岩; b—灰白色白云质磷质岩; c—角砾状灰岩; d—紫红色含磷粉砂岩; e—图 a 样品所处岩心箱; f—图 c 中样品所处岩心箱。

a—Purplish red and grayish white phosphorite; b—Grayish white dolomitic phosphorite; c—Brecciated limestone; d—Purplish-red phosphorus-bearing siltstone; e—Core box containing the sample from figure a; f—Core box containing the sample from figure c.

图 3 塔木素铀矿床富磷铀矿石手标本

Fig. 3 Hand specimen of phosphorus-rich uranium ores of Tamusu uranium deposit

4 结果与讨论

4.1 富磷铀矿石岩石矿物特征

4.1.1 岩石类型

通过显微镜、扫描电镜(SEM)、全岩X射线衍射(XRD,数据见表2)及全岩主微量元素分析(表3)的综合鉴定,明确了塔木素矿床富磷铀矿石的岩石类型。根据颜色、岩性、构造、磷含量及物质组分占比,将富磷铀矿石样品主要划分为灰白色白云质磷质岩、紫红色白云质磷质岩、紫红色磷质粉砂岩、灰白色磷质细砂岩、灰色磷质中砂岩和灰白色角砾状灰岩。样品 P_2O_5 含量范围介于0.42%~27.74%之间,铀含量介于 221×10^{-6} ~ 3486×10^{-6} 之间,主要含磷矿物为含碳-氟磷灰石,最高含量达70%。

4.1.1.1 灰白色白云质磷质岩

GM-140和TMS22-07样品经XRD、SEM及偏光显微镜鉴定,磷灰石为最高含量矿物,分别占70%和40.2%,其次为白云石。未观察到其他含磷矿物,故认为磷主要来自磷灰石。根据《中华人民共和国国家标准GB/T 17412.2—1998岩石命名方案——沉积岩岩石命名方案》:当磷酸盐矿物含量 $\geq 40\%$,其他矿物 $< 60\%$ 时,定名为 $\times\times$ 质磷质岩,故上述样品被确定为白云质磷质岩。GM-140样品呈块状结构, P_2O_5 含量为27.74%,CaO含量为39.89%,U含量为 3468×10^{-6} 。估算磷灰石含量约70%(图4a)。显微镜下显示大量全消光区域,符合胶磷矿(微晶磷灰石集合体)光学特征(图4b)。其次含约15%粉晶或泥晶白云石、10%细晶或粉晶长石和石英碎屑。磷灰石呈超显微短柱状微晶(约0.5 μm),常构成集合体形式(图4c)。白云石以团块条带形式赋存,可见部分团块中嵌黄铁矿及长石颗粒。灰白色白云质磷质岩样品还含少量黏土矿物($< 0.5\%$)、铁氧化物、氧化锰和石膏,这些多分布于白云石周围的溶蚀孔洞中(图4d),可能指示后期氧化水作用。此外,这两个样品局部富集具有植物胞腔结构的碳化植物碎屑(图4e)。

4.1.1.2 紫红色白云质磷质岩

GM-131样品为紫红色白云质磷质岩,常被误认为泥岩型铀矿石,U含量为 2299×10^{-6} ,

P_2O_5 含量为14.93%。XRD结果显示,主要矿物包括磷灰石、石英、钾长石、斜长石、白云石和黏土矿物。偏光显微镜下见较多粉晶白云石及铁氧化物,其次为石英、长石碎屑。SEM观察显示,微晶磷灰石含量约40%,白云石约20%,定名为白云质磷质岩。磷灰石呈短柱状微晶(约0.5 μm)集合体。可见呈腔管形态的磷灰石集合体,可能是磷灰石交代生物遗迹(图4f)。

4.1.1.3 紫红色磷质粉砂岩

GM-159样品U含量为 900×10^{-6} , P_2O_5 含量为6.02%。SEM显示碎屑物约占50%,为粉砂级石英、长石和岩屑。其次含15%微晶磷灰石、10%铁氧化物和12%粉晶白云石。磷灰石呈短柱状微晶分散均匀分布。白云石发育氧化溶蚀现象,其晶体边部溶蚀孔隙中充填微晶磷灰石及针铁矿,晶体中部溶蚀孔洞中也赋存微晶磷灰石(图4g),指示此处的磷灰石形成晚于白云石。

4.1.1.4 灰白色磷质细砂岩

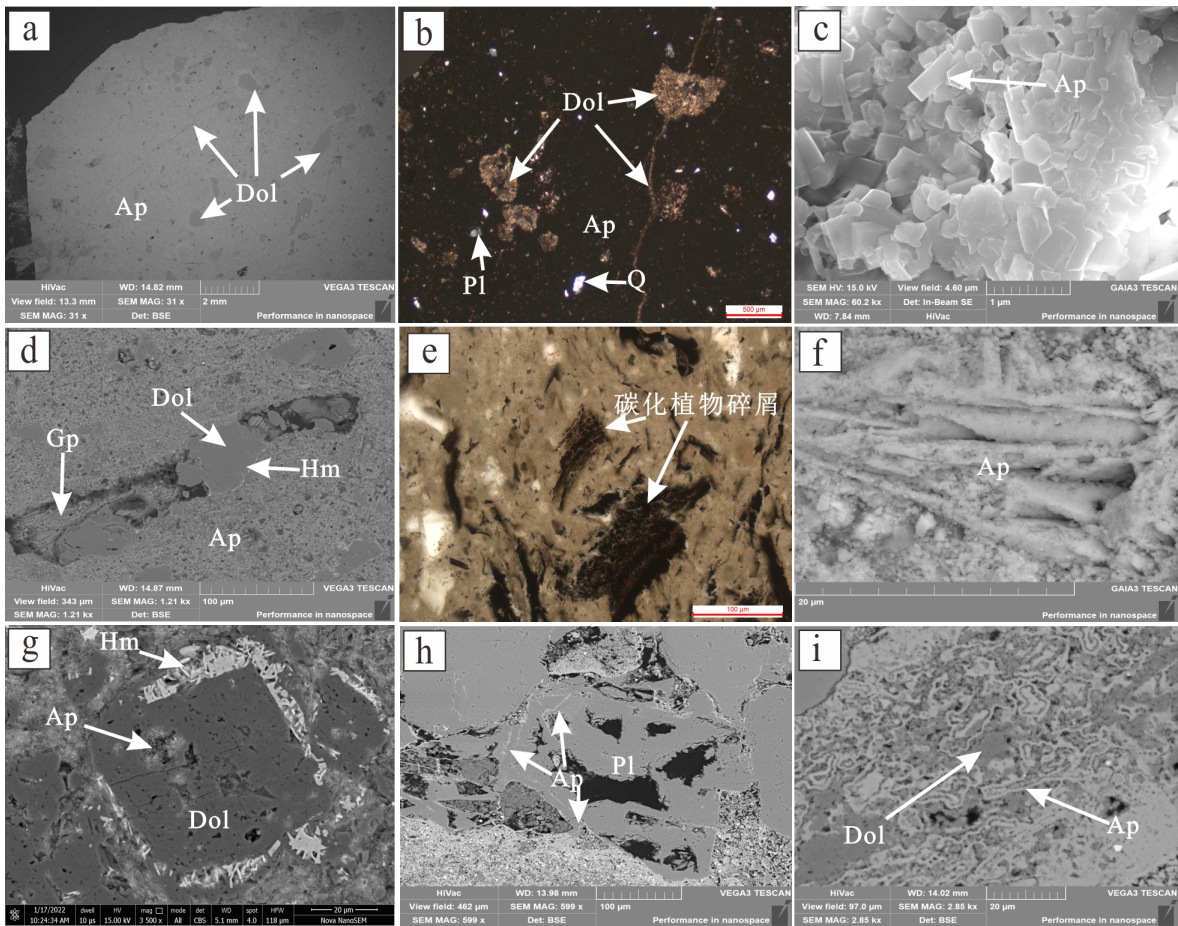
TMS22-08样品 P_2O_5 含量为11.6%,U含量为 792×10^{-6} 。XRD结果显示,磷灰石含量19.6%,斜长石含量41.2%,钾长石含量15.8%,石英含量8.5%,白云石含量10.2%,黏土含量4.4%。显微镜下见大量细砂级长石碎屑,白云石以粒间胶结物形式存在,见少量碳屑。

4.1.1.5 灰色磷质中砂岩

GM-133样品U含量为 892×10^{-6} , P_2O_5 含量为9.24%。SEM未发现独立铀矿物。该样品为灰色中砂岩,碎屑颗粒主要为石英和长石,胶结方式包括接触胶结和基质胶结,胶结物为微晶磷灰石和白云石。估算磷灰石占全岩约25%,白云石11%,黄铁矿2%。定名为磷质胶结中砂岩。该样品中可见部分长石发育溶蚀和蚀变,高岭石为蚀变矿物,溶蚀孔中见磷灰石(图4h)和黄铁矿,表明磷灰石形成晚于长石溶蚀。此外,该样品中偶见疑似腕足类被磷灰石和白云石交代形成的假形(图4i)。

4.1.1.6 角砾状灰岩

角砾状灰岩呈灰白色,具角砾状及结核状构造(图5a)。该类样品 P_2O_5 含量介于0.42%~



a—扫描电镜下灰白色白云质磷质岩中的磷灰石 (Ap) 及白云石 (Dol); b—显微镜 (正交光) 下微晶磷灰石呈全波干涉; c—扫描电镜下磷灰石短柱状微晶集合体; d—灰白色白云质磷质岩中白云石团块周围发育赤铁矿 (Hm) 以及石膏 (Gp); e—灰白色白云质磷质岩中的疑似碳化植物碎屑; f—微晶磷灰石形成的腔管结构; g—紫红色白云质磷质粉砂岩中白云石胶结物溶蚀孔洞中发育赤铁矿及微晶磷灰石; h—含磷中砂岩长石碎屑溶蚀孔洞内发育微晶磷灰石; i—含磷中砂岩填隙中疑似交代腕足类结构的磷灰石及白云石。

a—SEM image of Apatite (Ap) and dolomite (Dol) in grayish white dolomitic phosphorite; b—Microcrystalline apatite showing full wave retardation under a microscope (crossed polarized light); c— SEM image of aggregates of short-columnar microcrystalline apatite; d—Hematite (Hm) and gypsum (Gp) developed around dolomite aggregates in grayish white dolomitic phosphorite; e—Suspected carbonized plant debris in grayish white dolomitic phosphorite; f—Tubular structures formed by microcrystalline apatite; g—Hematite and microcrystalline apatite developed within dissolution pores of dolomite cement in purplish red dolomitic phosphatic siltstone; h— Microcrystalline apatite developed within dissolution pores of feldspar debris in phosphorus-bearing medium sandstone; i—Apatite and dolomite suspected to be replacing brachiopod structures within the matrix of phosphorus-bearing medium sandstone.

图 4 塔木素矿床富磷铀矿石矿物学特征

Fig. 4 Petrology and mineralogy of phosphorus-rich uranium ores in Tamushu deposit

表 2 塔木素矿床富磷铀矿石样品 X 射线衍射分析结果/%

Table 2 XRD data of phosphorus-rich uranium ore samples in Tamusu deposit/%

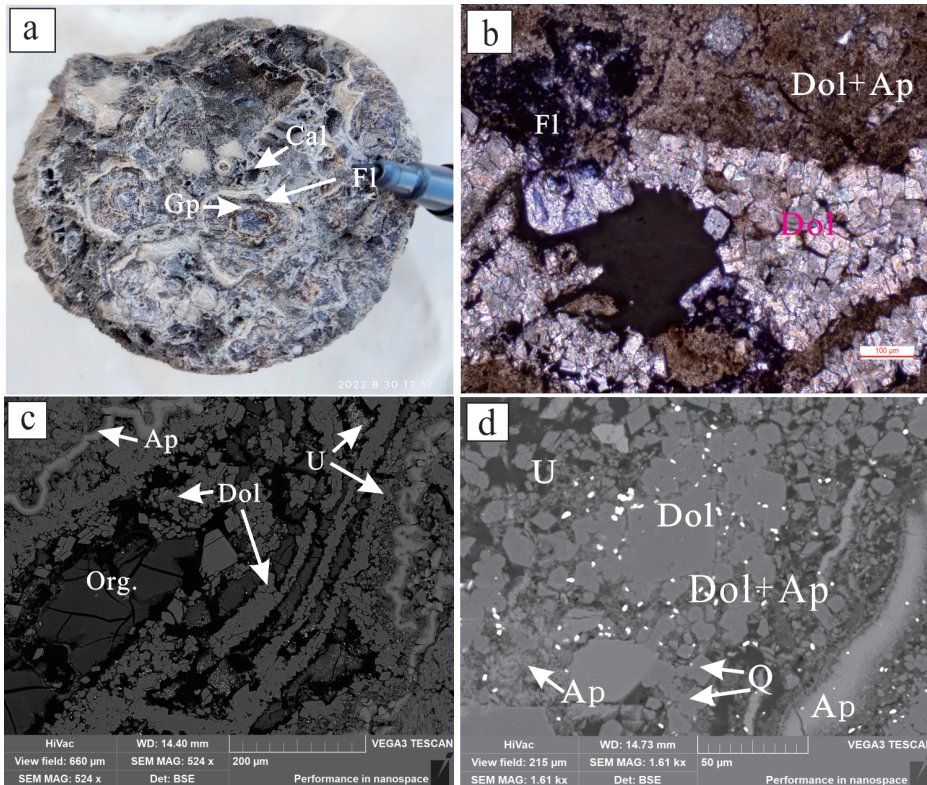
样品号	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	黄铁矿	赤铁矿	磷灰石	石膏	黏土矿物
TMS-22-07	4.7	5	14.8	—	35.3	—	—	40.2	—	—
TMS-22-08	8.5	15.8	41.2	—	10.5	—	—	19.6	—	4.4
TMS-22-10	6.1	—	—	51.3	35.8	—	—	4.7	2.1	—
TMS-22-14	1.2	—	—	78.3	13.4	—	—	2.4	—	4.7
TMS-22-16	2.2	—	—	75.5	22.3	—	—	—	—	—

注：“—”表示低于检测限。

3.7%之间,U含量介于 $221 \times 10^{-6} \sim 760 \times 10^{-6}$ 之间。角砾部分由粉晶碎屑石英、微晶白云石、磷灰石、黄铁矿、少量黏土矿物及铀矿物组成,角砾间充填方解石脉、白云石脉(图5b)、沥青脉(图5c)、萤石脉、石膏脉以及少量微粒铀矿物(2~8 μm)(图5d)。XRD显示,方解石含量介于51.3%~78.0%之间,白云石含量介于13.4%~35.8%之间,磷灰石含量介于2.4%~4.7%之间,石英含量介于1.2%~6.1%之间,石膏含量<2.1%,黏土含量<4.7%。角砾状灰岩内部发育晶洞,见约0.5 cm长的犬牙状碳酸盐晶体及立方体黄铁矿晶体。部分样品中可见方解石脉、白云石脉、萤石脉和石膏脉呈同心环状分布(图5a)。SEM显示,磷灰石在角砾中以微晶形式分散分布,在角砾的边缘以及脉中呈由微晶磷灰石集合体形成的脉状薄膜分布(图5c、d)。

4.1.2 磷灰石类型

对灰白色磷质岩中磷灰石微晶集合体开展电子探针分析,结果显示(数据见表4) $w(\text{CaO})$ 介于46.2%~50.17%之间(平均48.24%), $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 介于30.9%~34.92%之间(平均33.56%), $w(\text{F})$ 介于3.61%~4.22%之间(平均3.87%), $w(\text{MgO})$ 介于0.2%~0.32%之间(平均0.25%), $w(\text{UO}_2)$ 介于0.2%~0.72%之间(平均0.4%), $w(\text{Cl})$ 介于0.04%~0.1%之间(平均0.06%),总量介于85.15%~91.18%之间(平均88.21%)。鉴于电子探针分析的精度,Cl和U的含量可能存在一定的不准确性,但可以确认磷灰石中含有一定量的U。F含量较高、Cl含量较低,结合 $w(\text{CaO})/w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 比值(1.38~1.61,平均1.45)介于氟磷灰石和碳氟磷灰石的理论比值之间,表明该磷灰石为含碳-氟磷灰石^[14]。



a—角砾状灰岩中发育碳酸盐脉包裹石膏(Gp)及萤石(Fl); b—显微镜(单偏光)下角砾中的粉晶白云石及微晶磷灰石、白云石脉以及萤石脉; c—扫描电镜下角砾岩中碳酸盐脉与沥青脉互相穿插; d—角砾中含粉晶白云石、石英、微晶磷灰石(Ap)、铀矿物。

a—Carbonate veins enclosing gypsum (Gp) and fluorite (Fl) in brecciated limestone; b—Microscopic image of breccia containing fine-crystalline dolomite and microcrystalline apatite as well as dolomite and fluorite veins; c—SEM image of interpenetrated carbonate veins and bitumen veins in the breccia; d—Fine-crystalline dolomite, quartz, microcrystalline apatite (Ap) and uranium minerals in breccia

图5 塔木素矿床角砾状灰岩铀矿石岩石矿物特征

Fig. 5 Petrology and mineralogy of brecciated limestone uranium ore in Tamusu deposit

表 3 塔木素矿床富磷轴矿石样品主量/ $\times 10^{-6}$ 、微量/ $\times 10^{-6}$ 、稀土元素/ $\times 10^{-6}$ 分析测试结果

Table 3 Analytical results of major elements/%, trace elements/ $\times 10^{-6}$, and rare earth elements/ $\times 10^{-6}$ analysis results of phosphorus-rich uranium ore samples from Tamusu deposit

样品	GM-131	GM-133	GM-136	GM-140	GM-159	GM-162	TMS-22-07	TMS-22-08	TMS-22-10	TMS-22-11	TMS-22-14	TMS-22-16
SiO ₂	20.97	44.21	25.87	8.94	32.73	45.73	15.30	40.00	10.20	22.20	1.54	1.90
Al ₂ O ₃	7.90	9.27	5.63	2.89	7.12	16.53	3.48	10.30	0.33	0.49	0.34	0.28
TFe ₂ O ₃	7.67	1.39	17.63	0.28	13.01	4.34	1.46	2.56	0.24	0.63	0.14	0.19
MgO	3.68	2.94	5.39	2.71	5.46	3.93	7.23	1.39	5.81	8.79	3.53	4.37
CaO	25.73	18.53	19.55	39.89	17.17	7.56	31.70	19.40	41.50	31.00	49.80	48.60
Na ₂ O	2.26	3.44	1.80	1.82	2.56	2.65	1.40	3.25	0.29	0.35	0.18	0.11
K ₂ O	2.13	1.77	1.76	0.67	1.82	5.46	1.36	2.11	0.07	0.10	0.08	0.07
MnO	0.12	0.08	0.10	0.23	0.11	0.06	0.09	0.10	0.03	0.02	0.02	0.02
TiO ₂	0.34	0.06	0.13	0.11	0.16	1.59	0.08	0.22	0.02	0.04	0.05	0.04
P ₂ O ₅	14.93	9.26	7.37	27.74	6.02	1.49	15.70	11.60	2.68	3.70	1.55	0.42
烧失量*	11.36	7.79	13.92	9.64	13.69	10.49	19.16	7.60	38.40	29.62	42.23	43.59
U含量	2 299.00	892.00	2 078.00	3 468.00	900.00	285.00	623.00	792.00	760.00	540.00	424.00	221.00
Li	20.00	11.70	10.70	15.80	10.70	22.20	5.49	10.60	8.12	14.60	9.62	8.87
Be	2.33	1.92	2.69	2.82	1.82	1.25	2.05	2.99	0.38	0.51	0.25	0.20
Sc	15.20	7.10	8.72	11.30	11.70	7.33	11.30	13.10	6.62	5.69	1.34	1.56
V	112.00	31.20	65.10	16.40	129.00	118.00	54.60	55.00	25.10	34.10	29.10	34.60
Cr	21.20	8.98	13.80	4.10	13.90	25.00	13.70	14.60	2.88	2.79	2.65	3.73
Co	3.20	2.40	6.41	5.00	7.30	10.10	4.55	6.22	1.08	1.56	1.61	1.49
Ni	11.70	11.80	12.10	21.80	15.70	22.50	17.10	14.70	14.00	12.30	18.70	18.40
Cu	27.20	4.99	3.43	4.72	4.50	70.80	6.60	10.30	1.85	5.99	1.36	1.35
Zn	50.80	7.61	37.10	41.40	31.30	39.30	8.23	19.20	3.62	4.08	4.24	5.27
Ga	7.20	9.79	6.88	4.71	10.10	13.30	3.75	11.00	0.73	0.97	0.67	0.65
Rb	64.40	51.40	37.80	23.80	43.30	164.00	54.20	75.40	2.35	3.06	4.25	3.76
Sr	2 668.00	1 478.00	1 693.00	2 648.00	931.00	406.00	2 818.00	1 504.00	1 214.00	1 350.00	2 837.00	2 527.00
Y	152.00	29.60	62.20	92.00	64.90	124.00	31.80	26.10	2.62	2.06	1.48	2.11
Mo	6.48	1.22	9.05	1.19	9.55	3.32	0.74	0.72	0.77	1.02	1.77.00	1.72
Cd	0.06	0.03	0.13	0.03	0.08	0.03	0.03	0.05	0.01	<0.002	0.68	0.01
In	0.04	0.01	0.02	0.02	0.03	0.07	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00
Sb	2.37	0.51	7.54	0.10	5.59	2.71	0.36	0.38	0.11	0.12	0.08	0.06
Cs	1.39	1.04	1.78	0.84	1.51	1.99	0.30	1.05	0.14	0.18	0.31	0.29
Ba	190.00	414.00	171.00	241.00	195.00	161.00	151.00	308.00	47.20	779.00	210.00	259.00

表 3 (续)

样品	GM-131	GM-133	GM-136	GM1-140	GM-159	GM-162	TMS-22-07	TMS-22-08	TMS-22-10	TMS-22-11	TMS22-14	TMS22-16
W	3.25	0.53	2.84	1.47	2.27	5.21	1.69	1.55	0.76	1.62	0.85	1.54
Re	0.01	0.00	0.06	0.00	0.00	0.02	<0.002	0.04	<0.002	0.00	<0.002	<0.002
Tl	0.36	3.51	0.54	0.26	0.31	1.69	1.18	1.08	0.07	0.09	0.01	0.03
Pb	47.00	24.20	26.60	63.00	30.70	22.80	14.30	27.50	6.63	15.10	6.97	3.85
Bi	0.50	0.11	0.19	0.16	0.26	0.81	0.15	0.23	0.07	0.14	0.03	0.04
Th	131.00	19.40	144.00	154.00	187.00	57.90	21.00	9.44	4.96	2.71	5.77	10.50
Nb	6.35	1.12	2.14	2.06	2.97	27.00	1.37	4.22	0.23	0.25	0.55	0.45
Ta	0.56	0.20	0.26	0.24	0.30	1.76	0.14	0.38	0.03	0.02	0.03	0.02
Zr	55.80	22.90	32.40	28.80	44.50	44.80	28.90	59.00	11.10	14.20	6.10	3.61
Hf	1.42	0.76	0.88	0.64	1.40	1.97	0.64	1.55	0.24	0.35	0.11	0.08
La	37.20	14.90	22.90	14.20	45.60	43.90	13.50	22.90	4.25	5.68	1.47	1.28
Ce	54.80	28.40	37.40	27.70	76.30	82.50	20.30	42.80	8.80	10.30	2.63	2.07
Pr	5.27	3.65	3.83	3.00	8.22	9.73	2.23	4.85	0.97	1.19	0.31	0.25
Nd	19.40	14.80	15.40	11.30	33.70	38.90	7.48	18.00	3.36	3.91	1.24	1.01
Sm	3.61	3.09	2.98	2.40	7.69	7.34	1.44	3.22	0.69	0.61	0.18	0.16
Eu	0.84	0.76	0.72	0.51	1.92	1.46	0.34	0.73	0.11	0.04	0.02	0.05
Gd	4.52	2.99	3.30	2.85	8.78	6.60	1.32	2.69	0.58	0.56	0.13	0.16
Tb	1.34	0.65	0.76	0.90	2.07	1.34	0.27	0.51	0.09	0.07	0.03	0.03
Dy	13.00	4.25	6.17	8.69	12.30	11.00	2.63	2.71	0.46	0.32	0.16	0.19
Ho	4.15	1.01	2.18	2.78	2.30	3.81	1.01	0.76	0.09	0.07	0.06	0.07
Er	16.40	3.39	9.80	10.80	5.65	12.80	4.40	3.94	0.45	0.32	0.20	0.40
Tm	3.62	0.71	2.21	2.23	0.80	2.17	1.01	1.00	0.16	0.11	0.06	0.09
Yb	27.30	6.29	16.90	17.80	5.18	12.60	9.37	10.20	2.27	1.85	0.50	0.86
Lu	4.32	1.17	2.60	3.08	0.80	1.56	1.47	1.77	0.51	0.44	0.09	0.15
ΣREE	195.77	86.06	127.15	108.24	211.31	235.71	66.77	116.08	22.81	25.46	7.08	6.76
LREE	121.12	65.60	83.23	59.11	173.43	183.83	45.29	92.50	18.19	21.73	5.85	4.81
HREE	74.65	20.46	43.92	49.13	37.88	51.88	21.48	23.59	4.62	3.74	1.23	1.95
LREE/HREE	1.62	1.31	1.53	1.83	1.22	1.28	1.47	1.25	1.25	1.17	1.21	1.41
La _N /Yb _N	0.10	0.17	0.10	0.06	0.65	0.26	0.11	0.17	0.14	0.23	0.22	0.11
Eu/Eu*	0.98	1.18	1.08	0.92	1.10	0.99	1.15	1.16	0.85	0.28	0.65	1.41
Ce/Ce*	0.90	0.89	0.92	0.98	0.91	0.92	0.85	0.94	1.00	0.91	0.90	0.85

注: Eu/Eu*=Eu_N²/(Sm_N*Gd_N); Ce/Ce*=Ce_N²/(La*Pr); Eu_N, Sm_N 等代表相应元素经澳大利亚后太古代平均页岩标准化值。

4.1.3 铀矿物

仅在角砾状灰岩中发现铀矿物,主要为微粒或短柱状,粒径介于 $2\sim 8\ \mu\text{m}$ 之间。以浸染状分布于角砾或白云石脉、沥青脉中(图 5c、d)。磷灰石脉中亦偶见微粒铀矿物。

4.2 地球化学特征

4.2.1 全岩主微量元素特征

样品 P_2O_5 含量介于 $0.41\%\sim 27.74\%$ 之间(平均 8.54%), CaO 含量介于 $7.56\%\sim 49.8\%$ 之间(平均 29.2%), SiO_2 含量介于 $8.94\%\sim 45.73\%$ 之间(平均 22.46%), Al_2O_3 含量介于 $2.36\%\sim 16.53\%$ 之间(平均 7.17%), TFe_2O_3 (全铁)介于 $0.28\%\sim 17.63\%$ 之间(平均 4.13%), MgO 含量介于 $1.39\%\sim 8.39\%$ 之间(平均 4.6%), Na_2O 含量介于 $0.11\%\sim 3.44\%$ 之间(平均 1.67%), K_2O 含量介于 $0.07\%\sim 5.46\%$ 之间(平均 1.45%), MnO 含量介于 $0.02\%\sim 0.23\%$ 之间(平均 0.08%), TiO_2 含量介于 $0.02\%\sim 1.59\%$ 之间(平均 0.24%),烧失量介于 $7.6\%\sim 43.59\%$ 之间(平均 20.6%)。U与 P_2O_5 含量呈较强的正相关(图 6a);除角砾状灰岩外,其余样品的U与 CaO 含量呈较弱正相关(图 6b)。 P_2O_5 与 MnO 之间呈显著的正相关($R^2=0.84$)(图 6c),U与 MnO 呈显著的相关性($R^2=0.76$); TFe_2O_3 与U及 MnO 含量无显著相关性; SiO_2 、 Al_2O_3 、 Na_2O 和 K_2O 之间互相呈较好的正相关(图 6d),均与U均呈较弱的负相关关系; TiO_2 与U无明显相关性;烧失量与 CaO 呈显著的正相关。上述数据之间相关性指示U、Mn赋存与磷灰石关系密切,与铁氧化物及黏土关系不大。 P_2O_5 与 MnO 之间高度

相关可能是由于磷和锰在还原性或者轻微氧化环境中通常表现出相似的行为,在研究区沉积期高盐度湖泊环境^[15]的沉积阶段以及低温流体或早成岩阶段, Mn^{2+} 和 PO_4^{3-} 常常共沉淀^[16]。微量元素方面,含量相对较高的是Sr、U、Ba、Y、Th、V和Rb。Sr含量介于 $406\times 10^{-6}\sim 2\ 837\times 10^{-6}$ 之间(平均 839.5×10^{-6});U含量介于 $221\times 10^{-6}\sim 3\ 463\times 10^{-6}$ 之间(平均 $1\ 106.42\times 10^{-6}$);Ba含量介于 $47.2\times 10^{-6}\sim 779\times 10^{-6}$ 之间(平均 260.52×10^{-6});Y含量介于 $1.48\times 10^{-6}\sim 152\times 10^{-6}$ 之间(平均 49.24×10^{-6});Th含量介于 $2.71\times 10^{-6}\sim 187\times 10^{-6}$ 之间(平均 62.31×10^{-6});V含量介于 $16.4\times 10^{-6}\sim 129\times 10^{-6}$ 之间(平均 58.68×10^{-6});Rb含量介于 $2.35\times 10^{-6}\sim 164\times 10^{-6}$ 之间(平均 43.98×10^{-6})。这些元素多为亲氧元素,易在氧化条件下形成氧化物或其他含氧化合物。例如,Sr、Ba、Y和Th常形成碳酸盐或硅酸盐矿物,而U和V则在氧化环境中形成稳定的六价氧化物。 ΣREE 介于 $6.76\times 10^{-6}\sim 235.71\times 10^{-6}$ 之间,其中角砾状灰岩的 ΣREE 相对较低,介于 $6.76\times 10^{-6}\sim 22.81\times 10^{-6}$ 之间,其余样品的 ΣREE 介于 $66.77\times 10^{-6}\sim 235.71\times 10^{-6}$ 之间。样品的 Ce/Ce^* 值介于 $0.85\sim 1.0$ 之间, Eu/Eu^* 值介于 $0.28\sim 1.41$ 之间。对样品的稀土元素进行PASS(澳大利亚后太古代页岩)标准化后,稀土配分模式见图7,呈重稀土相对富集轻稀土相对亏损的“左倾”曲线。

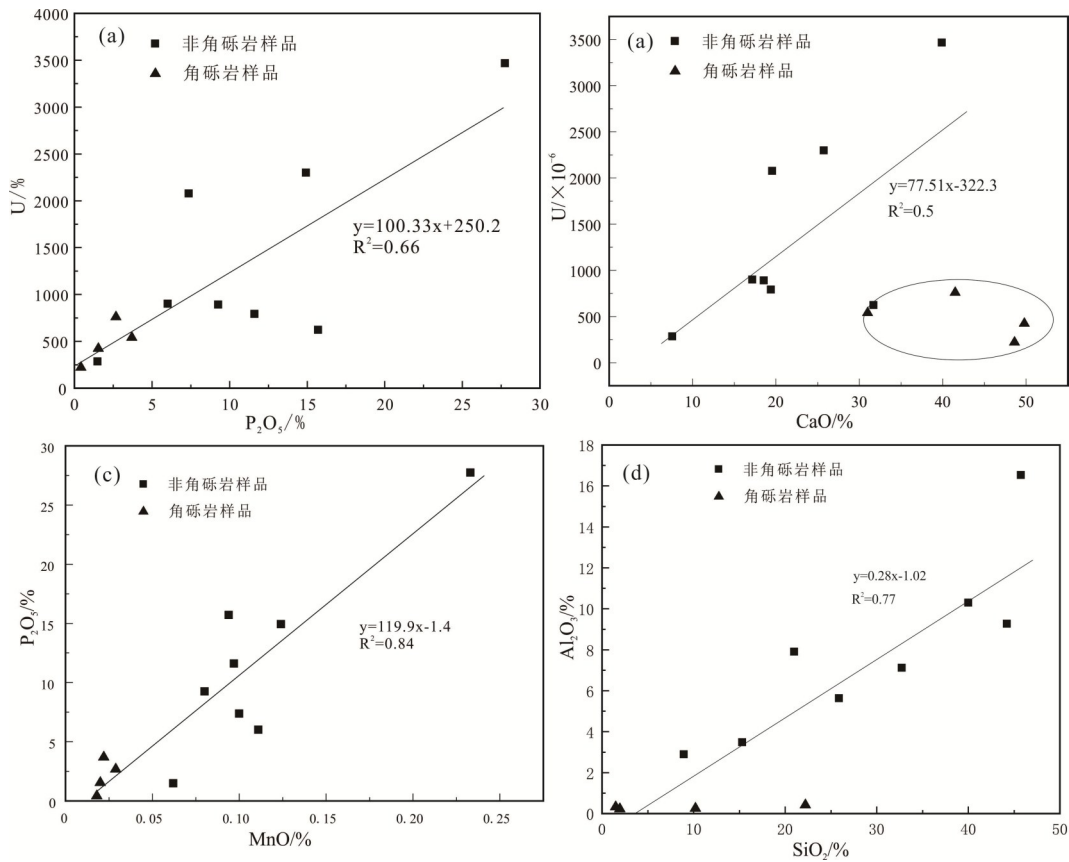
角砾岩样品的全岩U含量与Sr含量无明显相关性,而其他样品的全岩U含量与Sr含量则呈现较弱的正相关。U与Pb之间表现出

表 4 塔木素矿床铀富磷铀矿石样品磷灰石电子探针分析结果/%

Fig. 4 EMPA analyzed result/% of apatite from phosphorus-rich uranium ore of Tamusu deposit

测点	F	CaO	P_2O_5	Na_2O	SrO	UO_2	MgO	FeO	MnO	BaO	Cl	K_2O	ThO_2	TiO_2	Al_2O_3	总量
GM-131-1	4.22	50.17	34.64	1.99	0.69	0.65	0.2	0.16	0.05	0.05	0.07	0.04	—	—	0.02	91.18
GM-131-2	3.88	48.2	34.92	1.89	0.76	0.72	0.22	0.16	0.06	—	0.1	0.08	—	0.02	—	89.38
GM-131-3	4.05	46.46	33.49	2.23	1.12	0.29	0.23	0.13	0.06	—	0.04	—	—	—	—	86.4
GM-131-4	3.61	46.2	32.81	2.09	1.17	—	0.23	0.09	0.09	0.38	—	—	—	—	—	85.15
GM-131-5	3.76	49.94	30.9	2.29	1.16	0.2	0.32	0.07	0.05	0.06	0.02	—	0.09	0.08	—	87.41
GM-131-6	3.68	48.48	34.61	2.51	1.16	0.16	0.32	0.13	0.09	0.15	—	—	—	—	—	89.74
TMS22-10-1	3.05	45.73	31.81	1.61	0.75	0.66	0.34	0.03	0.03	—	0.13	—	—	0.05	—	85.24
TMS22-10-2	4.78	49.73	34.13	1.68	0.89	0.65	0.30	—	—	—	0.14	—	0.10	0.10	—	93.17
TMS22-10-3	5.00	50.30	34.18	1.42	0.92	0.38	0.30	—	—	—	0.09	0.02	—	—	—	92.66

注:“—”表示低于检测限。



a—U 与 P₂O₅ 相关性; b—U 与 CaO 相关性; c—U 与 SiO₂ 相关性; d—Al₂O₃ 与 SiO₂ 相关性。

a—Correlation between U and P₂O₅; b—Correlation between U and CaO; c—Correlation between U and CaO; d—Correlation between Al₂O₃ and SiO₂.

图 6 塔木素矿床富磷铀矿石元素含量相关性图

Fig. 6 Correlation diagram of element content in phosphorus-rich uranium ores from Tamusu deposit

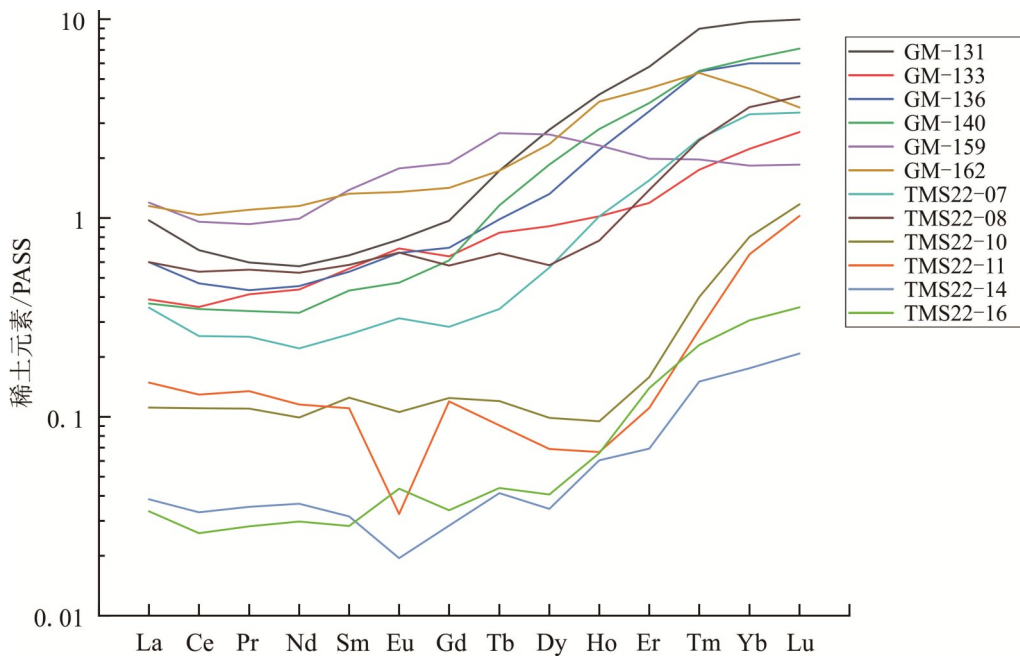


图 7 塔木素矿床富磷铀矿石全岩稀土配分曲线 (PASS 标准化)

Fig. 7 Whole rock REE distribution curve of phosphorus-rich uranium ores from Tamusu deposit (normalized to post-Archean Australian Shale, PASS)

较强的正相关 ($R^2=0.7$), U 与 Σ HREE (重稀土元素总量) 则呈较弱的正相关 ($R^2=0.4$)。除角砾状灰岩样品外, 其余样品的 P_2O_5 含量与 Sr 含量显示出显著的正相关 ($R^2=0.7$); 而 TFe_2O_3 (全铁含量) 与 Sr 含量无明显相关性。微量元素 Zr、Hf、W、Bi、Sb、Cs、Ga、Co、V 和 Zn 之间均呈现显著的正相关, 并且与稀土元素 (以 Σ REE 计) 以及 Si、Al 含量也表现出显著正相关, 这表明上述微量元素可能主要赋存在长石等碎屑矿物中。 TFe_2O_3 与 Σ REE 呈弱正相关, 暗示部分稀土元素赋存在铁氧化物中。 P_2O_5 与 Σ REE 的相关性不显著, 但与 Σ HREE 呈较弱正相关 ($R^2=0.27$), 这可能与磷灰石中稀土元素含量相对较低, 对全岩稀土元素总

量的贡献不如长石碎屑有关。由于大部分磷质岩样品的全岩 Si、Al 含量较高, 表明其受到了较强的陆源碎屑物质输入影响。因此, 本文暂不对样品全岩微量元素与其形成环境的指示意义进行深入讨论。

4.2.2 全岩 U-Pb 同位素年龄

对磷质岩型铀矿石进行了全岩 U-Pb 同位素定年分析。在 GM-131 样品周边 20 cm 范围内, 采集了 4 块岩性相同的样品, 分别为 GM-131-1、GM-131-2、GM-131-3 和 GM-131-4。测得的全岩 U-Pb 等时线年龄为 54.0 ± 5.2 Ma (MSWD=0.41) (图 8), 这一年龄可能对应于晚白垩世至古近纪期间由于盆地由北向南抬升推覆所引发的层间氧化铀成矿事件^[8]。

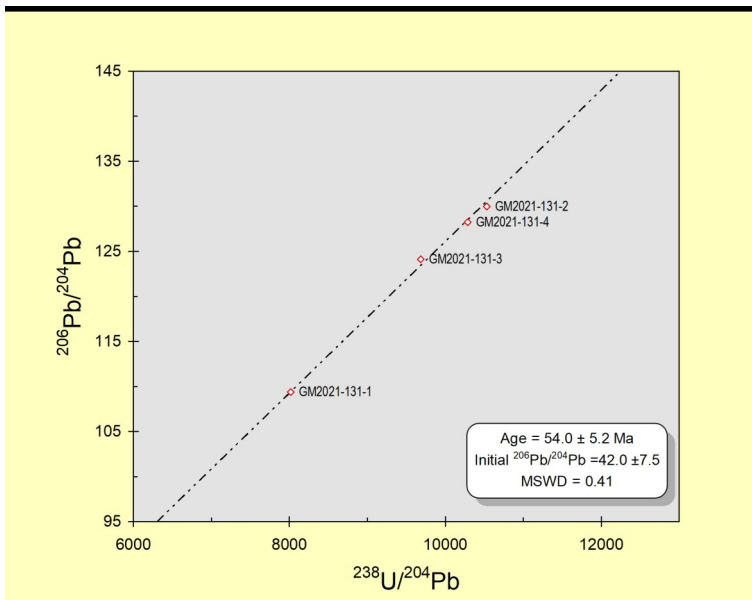


图 8 塔木素矿床紫红色白云质磷质岩铀矿石全岩 U-Pb 同位素等时线图

Fig. 8 Isochron diagram of U-Pb isotope of purplish red dolomitic phosphorite uranium ores from Tamusu deposit

4.2.3 全岩锶同位素

锶同位素是地球化学研究中的重要指标, 广泛应用于示踪成矿与成岩物质的性质及来源, 揭示岩石和矿物的成因机制^[17-19]。在地壳演化过程中, 壳源物质因富含 Rb, 其中的 ^{87}Rb 通过衰变成 ^{87}Sr , 导致壳源物质 ^{87}Sr 含量较高, 其 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值也随之升高, 全球平均值为 0.719^[20]。本次研究分析了白云质磷质岩、磷质粉砂岩、角砾状灰岩及白云质泥岩样品的锶同位素组成 (表 4)。其中, 白云质磷质岩和磷质细砂岩的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值分别为 0.709 565 和

0.709 089; 角砾状灰岩的比值介于 0.708 482 至 0.708 594 之间; 灰色白云质泥岩的比值则介于 0.709 916 至 0.710 082 之间。这些磷质岩样品的锶同位素值显著高于全球幔源平均值 0.703 5, 略高于早白垩世海水锶同位素值 0.707 401, 但低于全球壳源平均值 0.711 9。与巴音戈壁组上段热水沉积成因的白云质泥岩和泥质白云岩^[15]相比, 本次研究的白云质磷质岩 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值更低。这一特征表明, 白云质磷质岩及角砾状灰岩可能混入了幔源锶成分, 暗示其形成过程中存在热水沉积作用的影响。

表 4 塔木素铀矿床富磷铀矿石样品全岩锶同位素

Table 4 Whole rock strontium isotope of phosphorus-rich uranium ore samples from Tamusu deposit

样品号	采样位置/m	岩性	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Stderr
TMS22-07	ZKH44-16, 520	灰白色白云质磷质岩	0.709 565	0.000 13
TMS22-08	ZKH40-28, 550	灰白色磷质粉砂岩	0.709 089	0.000 018
TMS22-14	ZKH24-3, 516.5	灰白色角砾状灰岩	0.708 594	0.000 016
TMS22-16	ZKH15-0, 516	灰白色角砾状灰岩	0.708 482	0.000 013
ZKT136-40-34	ZKT136-40, 156.4	灰色白云质泥岩	0.709 916	0.000 017
ZKT136-40-50	ZKT136-40, 442	浅灰色白云质泥岩	0.710 082	0.000 018

4.3 富磷铀矿石成因及其聚铀机理探讨

磷灰石是富磷铀矿石中的主要含磷矿物,而磷灰石根据成因环境可分为岩浆成因、沉积成因和变质成因三类。岩浆成因磷灰石主要存在于火成岩中,是岩浆中磷的主要载体;沉积成因磷灰石广泛分布于沉积岩中,尤其在磷矿层中,常通过生物作用或化学沉淀形成;变质成因磷灰石则与区域变质作用相关,通常伴随重结晶和结构调整。磷灰石的聚铀机理主要有三种,分别是共沉淀、吸附及离子交换。共沉淀是指在当铀和磷浓度适宜时,铀可与磷酸根共同化学沉淀形成含铀磷灰石^[20];吸附则是磷灰石表面的磷酸基团能与 U^{6+} 离子配位,将铀吸附至矿物表面^[21];离子交换则是磷灰石与碳酸盐、铁矿物等之间的离子交换作用^[22]。本研究涉及的样品均产于沉积地层,呈层状分布,除角砾状灰岩外,其余未见明显热液脉特征。近年来这种富磷铀矿石在银额盆地已被笔者广泛发现,其产状具有明显的受沉积相带控制的特征。例如,在银额盆地的赛尔亥那地区^[13]、本巴图铀矿床、伊肯乌苏地区,富磷铀矿石大多产在湖相泥岩中或者湖相泥岩与下部扇三角洲前缘砂体的接触界面部位。尤其是磷质岩中磷灰石含量超过 40%,最高达 70%,为主要造岩矿物。并且这些磷质岩中含碎屑石英、长石、碳化植物碎屑等并伴有生物腔管结构及疑似腕足类化石被磷灰石交代的现象,暗示微生物作用可能参与了磷灰石的形成。此外,样品的磷和锰含量呈显著正相关,这种情形常见于高盐度湖泊或者浅海体系,在此条件下磷和锰易以氧化物和磷酸盐形式富集。以上这些证据表明磷质岩是沉积作用的产物,是铀与磷酸根在湖水共沉淀形成富铀磷

灰石。银额盆地及其邻近的二连盆地川井坳陷普遍发育早白垩世热水沉积岩^[23-24],塔木素地区巴音戈壁组白云质泥岩具有典型热水沉积构造组合及矿物组合特征^[15]。此次研究采集的部分磷质岩、白云质磷质岩以及角砾状灰岩与具有典型热水沉积岩构造及矿物组合特征的网脉状、纹层状、斑点状白云质泥岩以及同生塑性变形白云质泥岩紧密相邻,处于热水沉积岩段中。角砾状灰岩是热水沉积岩中的水爆角砾岩^[25]。这种角砾状构造的形成是喷流口内超温超压热水突破上覆沉积层与底层静水压力,导致沉积物被震碎并原地堆积,较粗大角砾因难以搬运被迅速胶结。磷质岩和角砾状灰岩较低的锶同位素值暗示热水喷流作用带来深部 Sr 元素。磷质岩样品的稀土元素(REE)配分模式(经 PASS 标准化)与贵州瓮安灯影组磷块岩^[26]、四川陈家湾磷矿床^[27]及贵州梅树村磷块岩^[28]等这些具有热水沉积作用参与的磷块岩相似,表现为 REE 总量较低,轻重稀土分异较弱,重稀土相对富集,伴有 Ce 负异常及部分样品 Eu 正异常,也同样佐证了塔木素地区热水沉积作用对磷质岩形成的显著影响。此外,部分样品中可见长石溶蚀孔洞中赋存微晶磷灰石,表明成岩过程中有磷灰石的形成。虽然前人对塔木素矿床的成矿作用过程有不同观点,但该矿床的氧化带分带、空间展布(图 2)等诸多特征使得学者们普遍认同该矿床发育层间氧化作用。此次研究的紫红色白云质磷质岩宏观上处在氧化还原分带中的氧化带中,而氧化带中其他岩性如砂岩中发育白云石胶结物的氧化溶蚀现象^[2]。该紫红色白云质磷质岩经岩矿鉴定同样发育铁氧化物分布于白云石溶蚀孔洞中的氧化溶蚀现象(图

4g), 并且紫红色白云质磷质岩中并无明显热液蚀变矿物及元素响应。因此, 认为紫红色白云质磷质岩是灰白色白云质磷质岩经层间氧化水氧化溶蚀形成的, 而非热液红化。紫红色磷质岩的全岩 U-Pb 等时线年龄与约 60 Ma 宗乃山隆升事件^[8]的对应关系。研究表明: 在成岩-后生改造过程中, 磷灰石中铀含量会随着磷灰石的重结晶或分解发生改变, 其减少或增加主要取决于流体性质, 在氧化性流体作用下磷灰石中铀含量减少, 在还原性流体作用下, 铀含量有所增加^[22]。因此, 结合前文研究, 推测紫红色白云质磷质岩原生是灰白色白云质磷质岩, 其在层间氧化过程中处于氧化-还原过渡带时铀含量增加(相对于热水沉积阶段), 后随着氧化带的推进被氧化为紫红色白云质磷质岩(处于氧化带中), 铀含量有所降低。层间氧化过程改变了磷灰石的铀含量及 U-Pb 同位素体系。综上所述, 塔木素地区富磷铀矿石的形成是热水沉积作用-层间氧化作用等多种地质作用的结果。

5 结 论

1) 塔木素铀矿床富磷铀矿石的岩石类型包括灰白色白云质磷质岩、紫红色白云质磷质岩、紫红色磷质粉砂岩、紫红色含磷粉砂岩、灰白色磷质细砂岩、灰色磷质中砂岩和灰白色角砾状灰岩。全岩 P_2O_5 含量介于 0.42% ~ 27.74% 之间, 铀含量介于 221×10^{-6} ~ $3\ 486 \times 10^{-6}$ 之间, 主要含磷矿物为含碳-氟磷灰石, 呈短柱状微晶(约 0.5 μm), 最高含量可达 70%。磷灰石在磷质岩中作为造岩矿物, 在磷质砂岩中以胶结矿物存在, 在角砾状灰岩中以微晶形式分散分布或形成细脉。

2) 样品全岩 P_2O_5 与 U 含量的较强相关性以及电子探针分析结果反映铀富集与磷灰石密切关联, 铀可能赋存在磷灰石中。稀土元素(REE)配分模式显示重稀土富集、轻稀土亏损, 伴有 Ce 负异常和部分 Eu 正异常。Sr 同位素($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)值介于 0.708 482 ~ 0.709 565 之间, 暗示幔源 Sr 输入及热水喷流作用。

3) 紫红色白云质磷质岩全岩 U-Pb 等时

线年龄 54 ± 5.2 Ma 与约 60 Ma 宗乃山隆升及层间氧化事件对应, 结合其空间展布特征、氧化溶蚀现象等, 指示层间氧化作用的改造。塔木素铀矿床的富磷铀矿石是热水沉积作用-层间氧化作用等多种地质作用的结果。

参考文献

- 1 王凤岗, 侯树仁, 张良, 等. 巴音戈壁盆地南部塔木素铀矿床水岩作用特征及其与铀成矿关系研究[J]. 地质论评, 2018, 64(3): 633-646.
WANG Fenggang, HOU Shuren, ZHANG Liang, et al. Study on the characteristics of water-rock interaction and its relation to uranium mineralization in Tamusu uranium deposit, southern Bayin Gobi Basin [J]. Geological Review, 2018, 64(3): 633-646(in Chinese).
- 2 刘武生, 李伟涛, 杨喆, 等. 巴音戈壁盆地塔木素铀矿床成矿作用新认识: 热水白云石化-渗出叠加-渗入改造模式[J]. 铀矿地质, 2023, 39(6): 1002-1018.
LIU Wusheng, LI Weitao, YANG Zhe, et al. Hydrothermal dolomitization-exudation superposition-infiltration transformation model for uranium metallogenesis of Tamusu deposit in Bayin Gobi basin [J]. Uranium Geology, 2023, 39(6): 1002-1018(in Chinese).
- 3 何中波, 罗毅, 马汉峰, 等. 巴音戈壁盆地含矿目的层沉积相特征与砂岩型铀矿化的关系[J]. 世界核地质科学, 2010, 27(1): 11-18.
HE Zhongbo, LUO Yi, MA Hanfeng, et al. Sedimentary facies characteristics of ore-bearing target horizon and its relationship to sandstone-type uranium mineralization in Bayingebi basin [J]. World Nuclear Geoscience, 2010, 27(1): 11-18(in Chinese).
- 4 田玉川. 巴音戈壁盆地构造演化对砂岩型铀成矿作用的制约[J]. 矿物岩石, 2019, 39(4): 41-48.
TIAN Yuchuan. Constraints of tectonic evolution on sandstone-type uranium mineralization in Bayingebi basin [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2019, 39(4): 41-48(in Chinese).
- 5 高俊义. 塔木素地区水文地质特征与铀成矿关系的研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2010, 29(增刊1): 133-135.
GAO Junyi. Study on the hydrogeological characteristics and uranium mineralization relationship in Tamusu area [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2010, 29(Sup.1): 133-

- 135(in Chinese).
- 6 吴仁贵,周万蓬,刘平华,等. 巴音戈壁盆地塔木素地段砂岩型铀矿成矿条件及找矿前景分析[J]. 铀矿地质,2008,24(1):24-31.
WU Rengui, ZHOU Wanpeng, LIU Pinghua, et al. Analysis of metallogenic condition and prospecting potential of sandstone type uranium deposit in Tamusu district of Bayinggebi basin [J]. Uranium Geology, 2008, 24(1):24-31(in Chinese).
 - 7 张成勇. 内蒙古巴音戈壁盆地塔木素地区流体作用特征与铀成矿事件研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2019.
ZHANG Chengyong. Characterization of ore-forming fluids and uranium mineralization events in the Tamusu sandstone type uranium deposit, Bayinggebi basin, China [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2019(in Chinese).
 - 8 刘波,时志强,彭云彪,等. 巴音戈壁盆地塔木素铀矿床地质特征及铀成矿模式研究[J]. 矿床地质,2020,39(1):168-183.
LIU Bo, SHI Zhiqiang, PENG Yunbiao, et al. Geological characteristics and uranium metallogenic model of Tamusu uranium deposit in Bayin Gobi Basin [J]. Mineral Deposits, 2020, 39(1): 168-183 (in Chinese).
 - 9 王凤岗,张字龙,侯树仁,等. 塔木素铀矿床下白垩统巴音戈壁组含铀砂岩成岩特征及其与铀矿化关系研究[J]. 沉积学报,2021,39(4):894-907.
WANG Fenggang, ZHANG Zilong, HOU Shuren, et al. Study of the diagenetic characteristics of uraniferous sandstone and its relationship with uranium mineralization of the Bayin Gobi formation, Lower Cretaceous Tamusu deposit [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(4): 894-907(in Chinese).
 - 10 朱斌,吴玉,钟军,等. 新疆准噶尔盆地北部黄花沟地区铀矿化特征及成因探讨[J]. 铀矿地质, 2023, 39(6): 1037-1051.
ZHU Bin, WU Yu, ZHONG Jun, et al. Characteristics and genesis of uranium mineralization in Huanghuagou area, northern Junggar basin, Xinjiang [J]. Uranium Geology, 2023, 39(6): 1037-1051(in Chinese).
 - 11 刘旭,夏菲,张成勇,等. 巴音戈壁盆地塔木素铀矿床紫红色铀矿石矿化特征[J]. 矿物学报,2023, 43(3): 325-336. doi: 10.16461/j. cnki. 1000-4734.2023.43.039.
LIU Xu, XIA Fei, ZHANG Chengyong, et al. Mineralization characteristics of the purplish red uranium ore in the Tamusu uranium deposit within the Bayan Gobi basin [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2023, 43(3): 325-336 (in Chinese). doi: 10.16461/j. cnki.1000-4734.2023.43.039.
 - 12 张成勇,聂逢君,张鑫,等. 巴音戈壁盆地砂岩型铀矿找矿新发现与意义[J]. 地质学报,2023,97(2):467-479. doi:10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2023208.
ZHANG Chengyong, NIE Fengjun, ZHANG Xin, et al. New discovery and significance of sandstone type uranium deposit prospecting in the Bayinggebi basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(2): 467-479 (in Chinese). doi:10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2023208.
 - 13 李伟涛,刘武生,纪宏伟,等. 银额盆地赛尔亥那地区铀矿化特征及成因研究[J]. 铀矿地质,2024, 40(1): 143-156.
LI Weitao, LIU Wusheng, JI Hongwei, et al. Study on the characteristics and genesis of uranium mineralization in Saierhaina area in Yin'e Basin [J]. Uranium Geology, 2024, 40(1): 143-156(in Chinese).
 - 14 潘家华,刘淑琴,杨忆,等. 西太平洋海山磷酸盐的常量、微量和稀土元素地球化学研究[J]. 地质论评,2002,48(5):534-541.
PAN Jiahua, LIU Shuqin, YANG Yi, et al. Research on geochemical characteristics of major, trace and rare-earth elements in phosphates from the west Pacific seamounts [J]. Geological Review, 2002, 48(5): 534-541(in Chinese).
 - 15 许亚鑫,戴朝成,刘晓东,等. 巴音戈壁盆地地下白垩统热水沉积岩地球化学特征及成因探讨[J]. 地质论评,2022,68(1):122-137.
XU Yaxin, DAI Chaocheng, LIU Xiaodong, et al. Geochemical characteristics and genesis of hydrothermal sedimentary rocks of Lower Cretaceous in Bayinggebi basin [J]. Geological Review, 2022, 68(1): 122-137(in Chinese).
 - 16 CHEN Q, WANG J, ZHU M, et al. Manganese(III) dominates the mobilization of phosphorus in reducing sediments: Evidence from Aha reservoir, Southwest China [J]. Science of the Total Environment, 2024, 954: 176564.
 - 17 EXLEY R A, JONES A P. ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr in kimberlitic carbonates by ion microprobe: Hydrothermal alteration, crustal contamination and relation to carbonatite [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1983, 83: 288-292.
 - 18 黄思静,石和,张萌,等. 锶同位素地层学在碎屑岩成岩研究中的应用[J]. 沉积学报,2002,20(3):

- 359-366.
- HUANG Sijing, SHI He, ZHANG Meng, et al. Application of strontium isotope stratigraphy to diagenesis research[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(3):359-366(in Chinese).
- 19 冯轲,徐胜林,陈洪德,等. 四川盆地西南部中二叠统白云岩成因分析——来自锶同位素、稀土元素证据[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(5):659-670.
- FENG Ke, XU Shenglin, CHEN Hongde, et al. Genesis of the Middle Permian dolomite in the southwestern Sichuan basin: Evidence from strontium isotope and rare earth elements[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(5):659-670(in Chinese).
- 20 PALMER M R, EDMOND J M. The strontium budget of the modern ocean[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 1989, 92(1):11-26.
- 21 FULLER C C, BARGAR J R, DAVIS J A, et al. Mechanisms of uranium interactions with hydroxyapatite: Implications for groundwater remediation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36(2):158-165.
- 22 MCARTHUR J M. Francolite geochemistry-compositional controls during formation, diagenesis, metamorphism and weathering [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1985, 49(1):23-35.
- 23 陈志鹏,任战利,于春勇,等. 银额盆地哈日凹陷下白垩统热水沉积岩特征及成因[J]. *地球科学*, 2018, 43(6):1941-1956.
- CHEN Zhipeng, REN Zhanli, YU Chunyong, et al. Characteristics and genetic analysis of hydrothermal sediment of Lower Cretaceous in Hari depression, Yin'e basin[J]. *Earth Science*, 2018, 43(6):1941-1956(in Chinese).
- 24 郭强,钟大康,张放东,等. 内蒙古二连盆地白音查干凹陷下白垩统湖相白云岩成因[J]. *古地理学*, 2012, 14(1):59-68.
- GUO Qiang, ZHONG Dakang, ZHANG Fangdong, et al. Origin of the Lower Cretaceous lacustrine dolostones in Baiyinchagan sag of Erlian basin, Inner Mongolia[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2012, 14(1):59-68(in Chinese).
- 25 郑荣才,文华国,范铭涛,等. 酒西盆地地下沟组湖相白烟型喷流岩岩石学特征[J]. *岩石学报*, 2006, 22(12):3027-3038.
- ZHENG Rongcai, WEN Huaguo, FAN Mingtao, et al. Lithological characteristics of sublacustrine white smoke type exhalative rock of the Xiagou formation in Jiuxi basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(12):3027-3038(in Chinese).
- 26 丁亚龙,谢宏. 贵州瓮安夏安灯影组磷块岩稀土元素地球化学特征[J]. *地质与勘探*, 2015, 51(5):923-931.
- DING Yalong, XIE Hong. REE geochemistry of the Dengying formation phosphorites in the Xia'an area, Weng'an county, Guizhou province[J]. *Geology and Exploration*, 2015, 51(5):923-931(in Chinese).
- 27 陈超,程文琪,郑毅,等. 四川金阳陈家湾磷矿床地球化学特征及成因意义[J/OL]. *矿物岩石*, 2025: 1-43 [2025-02-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1143.td.20241217.1730.006.html>.
- CHEN Chao, CHENG Wenqi, ZHENG Yi, et al. Geochemical characteristics and genetic significance of the Chenjiawan phosphate deposit in Jinyang county, Sichuan province[J/OL]. *Mineralogy and Petrology*, 2025:1-43 [2025-02-26](in Chinese).
- 28 SHIELDS G, STILLE P. Diagenetic constraints on the use of cerium anomalies as palaeoseawater redox proxies: An isotopic and REE study of Cambrian phosphorites[J]. *Chemical Geology*, 2001, 175(1/2):29-48.