

doi: [10.12097/gbc.2022.07.036](https://doi.org/10.12097/gbc.2022.07.036)

内蒙古苏尼特左旗恩格日音铀矿床 Th 地球化学特征及其对沉积环境的指示

蒋喆^{1,2}, 韩效忠³, 胡航³, 来强³, 郭鹏³, 李紫楠³

JIANG Zhe^{1,2}, HAN Xiaozhong³, HU Hang³, LAI Qiang³, GUO Peng³, LI Zinan³

1. 中国煤炭地质总局碳中和研究院, 北京 100040;

2. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116;

3. 中煤地质集团有限公司, 北京 100040

1. Institute for Carbon Neutrality, China National Administration of Coal Geology, Beijing 100040, China;

2. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China;

3. China Coal Geology Group Co., Ltd., Beijing 100040, China

摘要: 恩格日音铀矿床是近年来在二连盆地马尼特拗陷内新发现的砂岩型铀矿床。对苏尼特左旗恩格日音地区 31 个钻孔 278 件岩石样品 Th 元素地球化学含量特征、分布和变化规律进行归纳、整理, 分析了 Th 元素含量影响因素和指示意义。结果表明, 研究区 Th 含量值为 3×10^{-6} ~ 99.9×10^{-6} , 加权平均值为 24.03×10^{-6} , 显示出 Th 含量较拗陷南部火山岩平均值富集的特征。沉积岩样品中 Th 含量值主要与沉积物源 Th 含量、沉积物分选强弱、粒度、透水性、吸附性强弱等有关, 而与深度、沉积过程中新形成的含钍矿物、岩石 U 含量、氧化还原环境等无明显相关性。综合分析认为, 陆相盆地边缘沉积岩中 Th 元素的特征和相对含量的空间分布规律研究, 可用于识别沉积盆地的沉积物源、建立等时地层格架、划分沉积相带及砂体连通情况、判断古水流方向及恢复古河道展布。

关键词: 钍; 地球化学; 物源分析; 铀矿床; 内蒙古; 二连盆地

中图分类号: P619.14; P591 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)06-0926-12

Jiang Z, Han X Z, Hu H, Lai Q, Guo P, Li Z N. Geochemical characteristics of thorium and their sedimentary environment indication of Engeriyin uranium deposit in Sunid Left Banner, Inner Mongolia. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(6): 926-937

Abstract: Located in the Sunid Left Banner, the Engeriyin deposit is a newly discovered sandstone-type uranium deposit. Though summarized the geochemical characteristics and distribution of thorium contents in 278 samples from 31 boreholes in Engeriyin area of Manite depression in Erenhot Basin, this paper analyzed the influencing factors and indicating significance of thorium content. The findings indicate that the thorium level in this region is higher than that of the volcanic rocks to the south of the Manite depression, ranging from 3×10^{-6} to 99.9×10^{-6} with a weighted average of 24.03×10^{-6} . The primary determinants of thorium content in rock samples, as determined by data processing and analysis, are the source of the sediment, the distance and sorting of transportation, the granularity, the water permeability, and the adsorption strength of sedimentary rock, all of which affect the migration and differentiation of thorium-bearing minerals. Additionally, there is no discernible relationship with the uranium concentration, the redox reaction, sample depth, or newly generated thorium-bearing minerals during the deposition process. Numerical characterization and spatial distribution of Thorium in sedimentary rocks along the margins of terrestrial basins are useful for locating sedimentary sources within sedimentary basins, creating isochronous stratigraphic grids, defining sedimentary phases and sand connectivity, figuring out the direction of palaeocurrents, and reestablishing palaeochannel spreads.

收稿日期: 2022-07-19; 修订日期: 2022-10-31

资助项目: 中国地质调查局项目《内蒙古苏尼特左旗陆海地区铀矿地质调查》(编号: DD20190121-01) 和中国煤炭地质总局科技项目《煤系矿产资源勘查开发关键技术研究》(编号: ZMKJ-2021-ZX03)

作者简介: 蒋喆 (1991-), 男, 硕士, 工程师, 从事矿产勘查和矿床学研究。E-mail: jiangzhejz2014@163.com

Key words: thorium; geochemistry; provenance analysis; uranium deposit; Inner Mongolia; Erenhot Basin

Th 是一种放射性元素, 在自然界中不易溶解迁移, 受氧化-还原作用影响较小。Th⁴⁺硅酸盐和氧化物结构类型与 U⁴⁺相同, 主要以独立钍矿物、类质同象与铀共存或存在于副矿物中(孟艳宁等, 2013; 冯云磊等, 2024), 绝大部分铀矿床有 Th 异常的存在(付锦等, 2014)。前人对 Th 元素的研究多集中于火山岩微量元素地球化学或火山岩型钍铀矿床特征及含钍矿物特征方面: 江西相山居隆庵钍钍矿床 Th 与 U 主要以类质同象形式存在于副矿物(锆石、金红石、磷灰石等)中, 也含少量钍石和钍钍石(孟艳宁等, 2011); 白云鄂博钍-稀土矿床钍矿物元素主要以类质同象形式存在于稀土和稀有矿物的晶格中, 少

量以独立矿物析出(如钍石、铁钍石等)(俞嘉嘉等, 2020); 内蒙古乌拉特中旗新忽热地区矿石中 Th 元素主要以独立矿物形式存在, 或以类质同象形式存在于副矿物中(如磷灰石和独居石), 或以吸附形式存在于赤铁矿表面(刘正义等, 2016)。但对沉积盆地中 Th 的相对含量、分布特征及其对物质来源、沉积环境判别的指示作用少有探索。

恩格日音铀矿床(a 区)和格西铀矿床(b 区)位于内蒙古苏尼特左旗满都拉图镇北部(图 1、图 2), 二者属同一成矿带, 探获铀资源量已达大型铀矿床规模。本文在统计分析研究区及周边地区 Th 元素数值特征的基础上, 结合矿床地质及沉积构造特征, 分

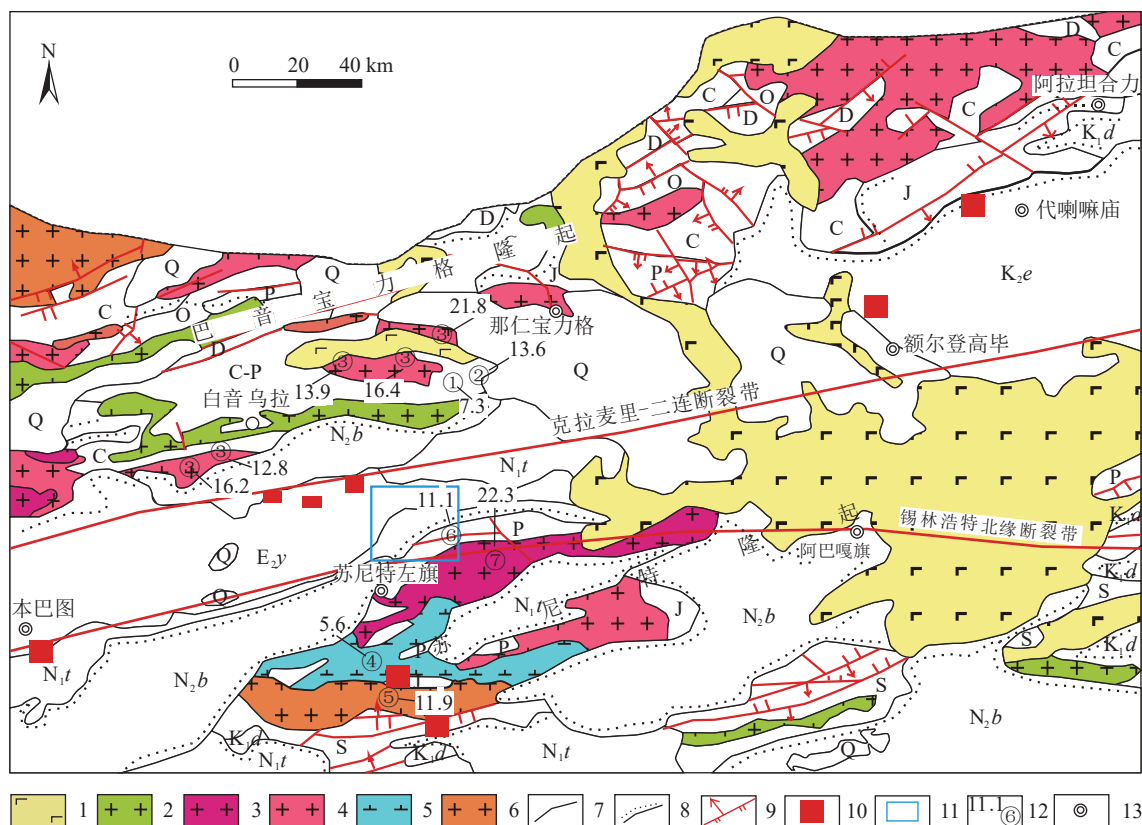


图 1 苏尼特左旗恩格日音地区区域地质图(据韩效忠等, 2018; 蒋喆等, 2020)

Fig. 1 Regional geological map of Engeriyin area, Sunid Left Banner

Q—第四系; N₂b—新近系宝格达乌拉组; N₁t—新近系通古尔组; E₂y—古近系伊尔丁曼哈组; K₂e—白垩系二连组; K₁d—白垩系大磨拐河组; J—侏罗系沉积地层; P—二叠系沉积地层; C—石炭系沉积地层; D—泥盆系沉积地层; O—奥陶系沉积地层; S—前志留系沉积地层; 1—更新世玄武岩; 2—侏罗纪花岗岩; 3—三叠纪花岗岩; 4—二叠纪花岗岩; 5—石炭纪闪长岩; 6—石炭纪花岗岩; 7—整合界线; 8—角度不整合; 9—断层; 10—铀矿床; 11—研究区位置; 12—取样位置及 Th 元素含量(10⁻⁶); 13—城镇。Th 元素含量数据: ①—北缘大石寨组安山岩(Zhang et al., 2017); ②—北缘大石寨组流纹岩(Zhang et al., 2017); ③—北缘碱长花岗岩(Zhang et al., 2015); ④—南部岩体花岗岩(Hu et al., 2015); ⑤—南部岩体花岗岩(Hu et al., 2015); ⑥—南部大石寨组流纹岩(梅可辰等, 2015); ⑦—东苏岩体二长花岗岩(俞初安等, 2016)

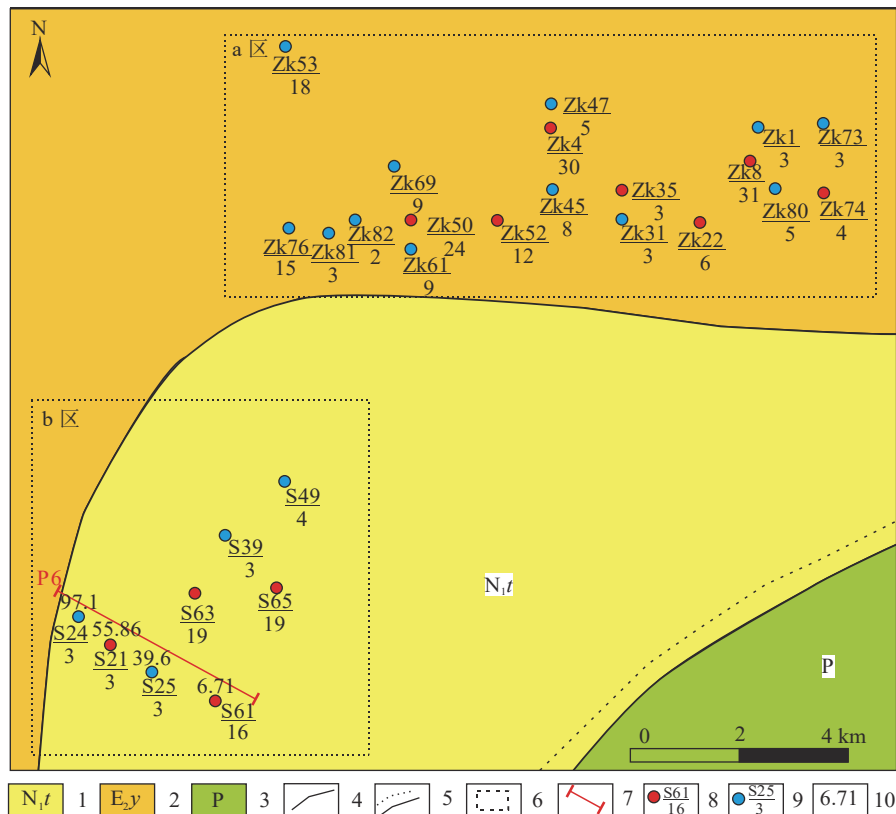


图2 恩格日音地区地质简图及钻孔分布

Fig. 2 Geological map and drilling distribution of the Engeriyin area

1—新近系通古尔组; 2—古近系伊尔丁曼哈组; 3—二叠系; 4—整合界线 5—角度不整合; 6—矿区边界; 7—典型剖面 P6 线;
8—铀工业钻孔/样品数; 9—铀矿化孔/样品数; 10—Th 含量(10^{-6})

别从赋矿地层、粒度、氧化还原影响、沉积物源、空间分布等方面研究 Th 元素的变化规律, 探讨影响其变化的主要因素, 并初步探索 Th 元素对于沉积盆地内物质来源、沉积环境判别等方面的指示意义, 为识别陆相沉积盆地物源区、划分等时地层格架、对比同时期沉积亚相、砂体连通情况、判断古水流方向、恢复古河道展布等方面提供线索及新思路。

1 地质概况及矿体特征

1.1 地质概况

研究区大地构造位置处于天山—兴蒙造山带扎兰屯—多宝山岛弧隆起北翼褶皱冲断带上, 属二连盆地中东部马尼特坳陷南缘地带 (图 1)。

马尼特坳陷基底埋深 380 ~ 3500 m (张万益等, 2008; 武跃勇等, 2016), 主要由古生代中—浅变质岩、侏罗纪含煤碎屑岩和火山岩及海西期、印支期、燕山期多期中基性—酸性岩浆岩构成。盖层主要由中生代下白垩统巴彦花群 (K_1B)、上白垩统二连组

(K_2e), 新生代古近系伊尔丁曼哈组 (E_2y)、新近系中新统通古尔组 (N_1t)、上新统宝格达乌拉组 (N_2b) 和第四系碎屑岩系构成, 局部发育第四纪玄武岩。巴彦花群自下而上分为阿尔善组 (K_1a)、腾格尔组 (K_1t) 和赛汉组 (K_1s), 其中腾格尔组为本区主要含油气地层, 赛汉组上、下段和二连组为本区主要含铀地层, 赛汉组中段为区内主要含煤地层。研究区内勘查揭露地层自下而上依次为下白垩统赛汉组, 古近系始新统伊尔丁曼哈组, 新近系通古尔组和第四系全新统 (Qh)。赛汉组厚度为 70 ~ 800 m (聂逢君等, 2015), 是矿区内主要的赋铀及赋煤地层, 自下向上可划分为以下三段。

(1) 赛汉组下段 (K_1s^1)。该段是研究区的主要含铀层位, 可分为下亚段 (K_1s^{1-1}) 和上亚段 (K_1s^{1-2})。下亚段岩性以杂色砾岩、砂砾岩夹泥岩为主, 具近源快速堆积的特点, 多为扇根—扇中相沉积组合。上亚段岩性主要为灰色—灰绿色长石石英砂岩夹少量含砾泥岩, 属扇三角洲或三角洲相沉积物。

(2)赛汉组中段(K_1s^2)。该段为区内主要含煤地层,岩性为灰色—灰绿色泥岩、粉砂岩、砂岩、砾岩夹黑色炭质泥岩及煤层,主要为湖泊沼泽相沉积。

(3)赛汉组上段(K_1s^3)。a 区地处盆地边缘斜坡地带,部分上、中段地层遭剥蚀而极薄或缺失。b 区上段地层较发育。岩性组合由 2 个明显下粗上细的正旋回构成,以灰色、灰绿色和黄色长石石英质中粗砂岩、细砂岩、粉砂岩及泥岩为主,底部可见较清晰的冲刷面,河道相特征明显,主河道呈 NE 向产出,宽 1 km 左右。

马尼特坳陷断裂构造发育,呈 NE 向斜贯全区,控制了坳陷的主体形成演化(张万益等,2013;郭宏伟,2014)。研究区含矿目标层为倾向 NW 的单斜地层,褶皱不发育(聂逢君等,2015)。受区域断裂带控制,区内多为隐伏断裂带,以 NE 向为主(崔永谦等,2011),为深层还原流体上移提供了较好的通道。

坳陷及周缘地区岩浆活动频繁,岩体主要呈岩基和岩株状分布在南北侧苏尼特和巴音宝力格隆起带上,岩石类型以花岗闪长岩、二长花岗岩、石英二长岩、黑云母花岗岩等为主,其中巴音宝力格隆起黑云母花岗岩($P\gamma$)和苏尼特隆起二长花岗岩($T\gamma$)为坳陷内主要供铀源体(图 1)(郭宏伟,2014;刘佳林等,2020;李子颖等,2022)。

1.2 矿体特征

a 区矿体平面上总体呈近 EW 向展布(图 2),b 区呈近 NE 向,与苏尼特隆起北缘形态基本一致,二者属同一成矿带。主要矿体可分为 3 层,产状较平缓,倾角在 $1^\circ\sim5^\circ$ 之间。主要赋矿围岩为灰色含砾粗砂岩—砂砾岩,部分为中细粒砂岩或泥岩。

矿石分为低品位含铀碎屑岩型和泥岩型 2 种,矿石中铀以赋存于杂基中的吸附状态铀为主,另有少量沥青铀矿及含铀矿物。区内主要蚀变类型包括黄铁矿化、褐铁矿化、绿泥石化、粘土化等,其中黄铁矿化与铀矿化关系密切。

2 取样及分析方法

2.1 取样方法及其代表性

选取 a、b 区不同勘探线的 31 个钻孔(图 2;表 1),对单孔使用连续采样方式,采取代表不同沉积相、不同层位、不同深度、岩性及品位的典型样品共 278 件。取样时,选取采取率大于 85% 的样段,样长选取 0.1~0.5 m,大部分为 0.2 m,清除岩(矿)心泥浆

表 1 研究区单孔 Th 元素加权平均值

Table 1 Weighted average value of thorium contents in single hole in Engeriyin area

地区	钻孔号	Th加权/ 10^{-6}	样品数	地层	平均值/ 10^{-6}
a区	ZK76	7.6	9	K_1s^3	20.3
	ZK1	8.27	3	K_1s^3	
	ZK8	35.58	10	K_1s^3	
	ZK4	20.02	12	K_1s^3	
	ZK69	17.9	6	K_1s^3	
	ZK47	20.6	5	K_1s^3	
	ZK82	33.95	2	K_1s^3	25.2
	ZK81	18.3	3	K_1s^{1-2}	
	ZK4	20.64	18	K_1s^{1-2}	
	ZK8	32.86	21	K_1s^{1-2}	
	ZK22	22.81	6	K_1s^{1-2}	
	ZK31	21.41	4	K_1s^{1-2}	
	ZK35	21.5	3	K_1s^{1-2}	
	ZK52	27.25	12	K_1s^{1-2}	
	ZK50	27.85	14	K_1s^{1-2}	
	ZK61	32.49	9	K_1s^{1-2}	
	ZK80	26.9	5	K_1s^{1-2}	
	ZK69	21.02	3	K_1s^{1-2}	
	ZK76	23.4	6	K_1s^{1-1}	
	ZK74	16.67	4	K_1s^{1-1}	18.8 (包含收集数据)
	ZK73	29.85	4	K_1s^{1-1}	
收集a区	ZK42	15.86	6	K_1s^{1-1}	
	ZK45	21.2	8	K_1s^{1-1}	
	ZK50	19.2	10	K_1s^{1-1}	
	ZK3205	27.2	2	K_1s^{1-2}	俞初安等, 2020
收集a区	ZK3201	16	2	K_1s^{1-1}	
	ZK3209	14.9	2	K_1s^{1-1}	
b区	S21	55.87	3	K_1s^3	28.25
	S39	40.22	6	K_1s^3	
	S63	8.86	19	K_1s^3	
	S65	6.94	19	K_1s^3	
	S61	6.71	16	K_1s^3	
	S49	41.48	4	K_1s^3	73.33
	S25	39.6	3	K_1s^3	
	S24	97.13	3	K_1s^{1-1}	
	S39	49.53	3	K_1s^{1-1}	
	S39	49.53	3	K_1s^{1-1}	
北部	ZK53	9.58	18	K_1s^2	9.58

注: K_1s^3 —赛汉组上段; K_1s^2 —赛汉组中段; K_1s^1 —赛汉组下段

后,连续劈半取样。

2.2 样品岩石学特征

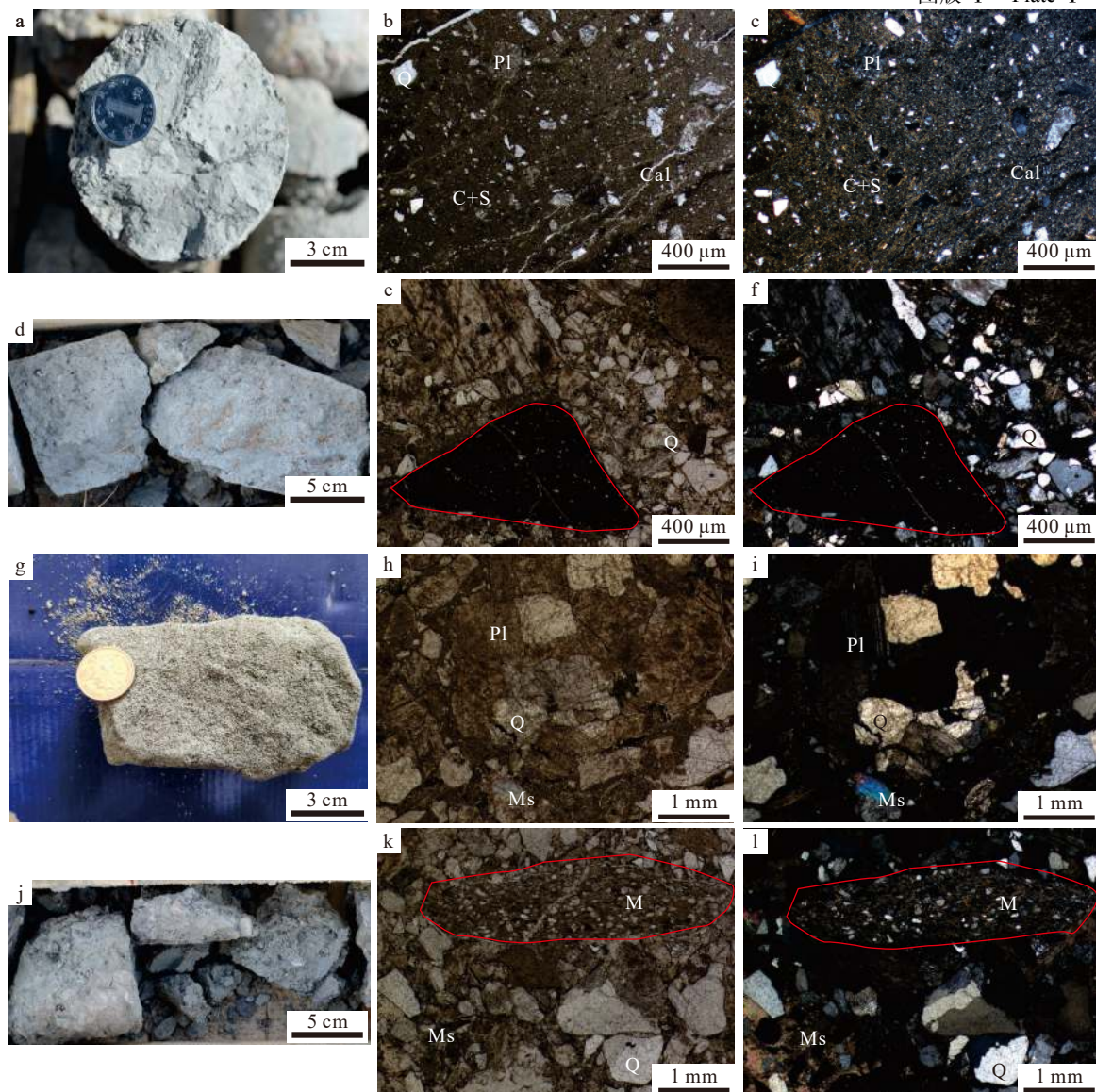
本次采集分析的样品主要以灰色、深灰色粗砂岩(图版 I-g)—中细砂岩(图版 I-a,d)及泥质砂砾岩为主(图版 I-j),少量红色泥岩。

砂岩样品以长石石英砂岩为主,碎屑物主要为石英、条纹长石、斜长石、岩屑、云母(图版 I-a~i),见少量板岩、花岗岩岩屑及炭化植物碎屑,见黄铁矿

(图版 I-e, f)。填隙物以石英及粘土矿物为主,高岭土化、绢云母化普遍发育,结构及成分成熟度较低。

泥质砂砾岩含砾 15%~25%,砾径 2~10 mm。砾石成分为石英、岩屑、长石等。岩屑以钾长花岗岩(图版 I-k~l)、硅质岩、闪长岩为主,分选磨圆较差,次棱角状。杂基主要为粘土矿物,成分以高岭石、水云母及蒙皂石为主,多呈弯曲片状或碎片状集合体分布于碎屑颗粒之间。

图版 I Plate I



a. 浅灰色粉砂岩矿石(ZK74, 采样深度 170 m, Th 18.9×10^{-6}); b. 粉砂岩矿石镜下照片, 泥质填缝隙物发生绢云母及碳酸盐化(C+S), 见方解石(Cal)细脉, 单偏光(-); c. 粉砂岩矿石镜下照片, 斜长石(Pl)碎屑发生粘土化, 正交偏光(+); d. 浅灰色细砂岩矿石(ZK82, 采样深度 120 m, Th 34.6×10^{-6}); e. 细砂岩矿石镜下照片, 红色圈内为炭化植物碎屑, 单偏光(-); f. 细砂岩矿石镜下照片, 正交偏光(+); g. 绿灰色粗砂岩(ZK61, 采样深度 70 m, Th 6.9×10^{-6}); h. 粗砂岩样品镜下照片, 石英(Q)边缘见次生加大边, 单偏光(-); i. 粗砂岩样品镜下照片, 正交偏光(+); j. 浅灰色泥质砂砾岩(ZK52, 采样深度 110 m, Th 27.4×10^{-6}); k. 泥质砂砾岩镜下照片, 黑云母(Ms)发生轻微蚀变, 石英外围见粘土线, 红色圈内为岩屑, 单偏光(-); l. 泥质砂砾岩镜下照片, 正交偏光(+)

2.3 分析方法

分析测试在北京核工业地质研究院测试中心进行。样品制备参考 GB/T 14506.30—2010《硅酸盐岩石化学分析方法 第 30 部分: 44 个元素量测定》(中华人民共和国国家标准, 2010)。称取 0.05 g 试样于聚四氟乙烯溶样罐中, 润湿, 震动摇匀样品, 加入 2 mL 氢氟酸、1 mL 硝酸、1 mL 盐酸和 0.5 mL 高氯酸, 盖上溶样罐盖, 在电热板上 150℃ 加热溶解 72 h, 打开溶样罐, 在低温电热板上加热蒸至近干, 若未溶解完全则重复上述过程。蒸至近干后加入硝酸 2 mL, 盖上专用溶样罐盖焖置以溶解可溶性残渣。用蒸馏水稀释至 50 mL。分取 0.5 mL 试液放入石英皿中, 加入 4.5 mL 水稀释, 使用 NexION300D/ELEMENT XR 等离子体质谱仪测试并计算 Th 含量。

3 Th 地球化学特征

3.1 单样品 Th 含量特征

研究区 278 件样品分析得出, Th 含量(Q_{Th})为 $3 \times 10^{-6} \sim 99.9 \times 10^{-6}$, 算术平均值为 21.67×10^{-6} (标准误差 1.66), 变异系数为 0.71, 大于中国普通土壤 Th 元素含量均值 (15.4×10^{-6} , 曾文淇, 2018)。总体以偏低数值居多, 小于 25×10^{-6} 范围内共 170 件, 占统计总数的 61.2%。

元素含量频率曲线大致呈单峰状, 变化幅度一般(图 3-a)。对数分布图(图 3-b)显示出较明显的单峰, 趋势曲线较对称, 表明样品数据满足统计分析要求(图 3)。

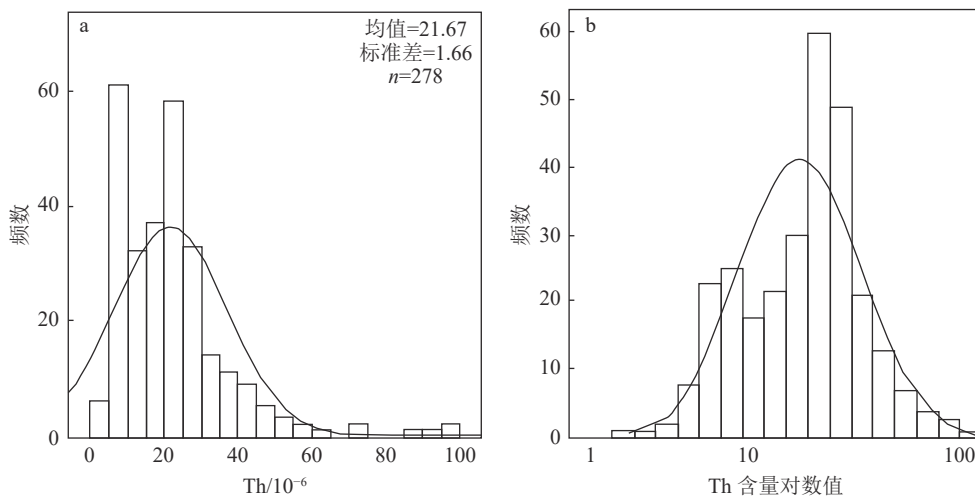


图 3 研究区 Th 元素质量分数频数直方图(a)及对数分布直方图(b)

Fig. 3 Frequency histogram (a) and logarithmic histogram (b) of thorium in study area

3.2 单孔平均 Th 含量计算

对单钻孔多个样品, 分别采用单样品 Th 含量与样品长度加权平均求得单孔平均 Th 含量。计算公式如下:

$$K_p^T = \frac{\sum_{i=1}^m (HQ_{Th})_i}{\sum_{i=1}^m (H)_i} \quad (1)$$

式中: K_p^T —平均平衡系数; H —第 i 个样品的长度; Q_{Th} —第 i 个样品的百分 Th 含量(10^{-6}); i —样品编号; m —样品总数。

对区内所有样品采用此方法进行样品长度加权, 得到地区 Th 含量加权平均值为 24.03×10^{-6} 。

3.3 地层 Th 含量特征

研究区地层中的 Th 含量与其产出的层位具有相关性, 但不明显(图 4)。a 区 K_1s^{1-1} Th 含量较 K_1s^{1-2} 及 K_1s^3 偏低, 显示出随地层演化发育, Th 元素不断累积的特点。b 区各地层 Th 含量均高于 a 区, 且 K_1s^1 层位数值明显偏高, 表明不同的沉积环境会显示出不同的 Th 元素含量特征。

3.4 粒度与 Th 含量的关系

岩石粒度与 Th 含量图显示出较明显的负相关(图 5), 随着粒度变细, Th 含量有升高的变化趋势。 K_1s^3 河道相粗粒岩石样品胶结程度较差, 透水性好, Th 含量平均值小于 10×10^{-6} , 远低于区内平均值; 而边滩及漫滩产出的中—细砂岩 Th 含量平均值为 37.14×10^{-6} , 含量明显偏高。 K_1s^{1-2} 岩性以三角洲相中粗粒砂岩为主, 整体连通性较好, Th 含量值基本相等。 K_1s^{1-1} 冲积扇相或扇上辫状河相中粉砂—泥岩

Th 含量为 36.3×10^{-6} , 中—细砂达到 73.3×10^{-6} , 显示出 Th 元素强烈富集并显著高于同层粗粒岩的特征。上述结果表明, 岩石粒度及透水性差异导致矿物运移能力及程度不同, 是 Th 含量差异的主要原因。

3.5 U 与 Th 含量的关系

统计发现, 样品中的 U、Th 含量没有显著的线性关系 (图 6), 说明区内 Th 含量不受 U 含量的影响。

3.6 氧化还原环境与 Th 的关系

同一含水层内粗砂岩中氧化-过渡带-还原带的 Th 含量无明显差异, 表明在砂体内, 氧化还原反应对 Th 元素迁移赋存影响不大 (图 7)。为查明氧化还原环境中 Th 元素的变化特征, 选取 b 区典型见矿钻孔 S61 (图 2、图 8) 进行连续取样。还原带中含炭质泥岩薄层的砂岩样品 Th 元素含量较纯砂岩明显偏高, 且随炭质含量增加, Th 元素含量呈上升趋势, 表

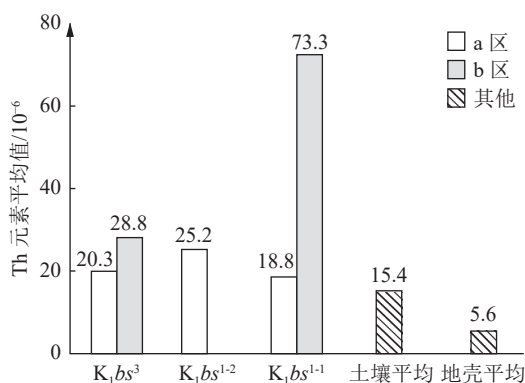


图 4 研究区 Th 元素质量分数与样品采集层位关系直方图

Fig. 4 Histogram of relationship between thorium content and sampling strata in study area

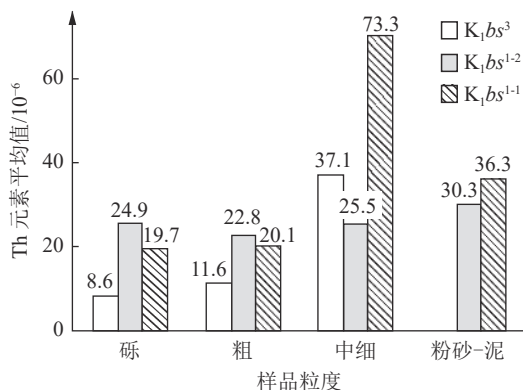


图 5 研究区 Th 元素质量分数与样品粒度关系直方图

Fig. 5 Histogram of relationship between thorium content and sample granularity in study area

明吸附能力与 U 和 Th 元素含量具正相关 (图 8)。

3.7 Th 的空间分布特征

研究区钻孔单孔 Th 元素加权平均值统计结果如表 1 所示。从空间上看, 区内 Th 含量具有较显著的空间分布规律 (图 9)。

研究区最北部钻孔 ZK53 位于 K_1s^2 湖沼相内, 其灰黑色细砂岩 Th 含量平均值为 9.58×10^{-6} , 表明该区只接受少量或未接受含钍矿物沉积。

b 区 K_1s^3 河漫滩-边滩相灰黑色细粉砂岩性虽然与 ZK53 岩性类似, 但因大量接受附近东南部或东北部源区运载的含钍矿物而使 Th 含量显著偏高 ($40.2 \times 10^{-6} \sim 55.8 \times 10^{-6}$)。相比之下, 位于河床-心滩相疏松含砾粗砂岩中的 Th 含量显著偏低 ($6.7 \times 10^{-6} \sim 8.9 \times 10^{-6}$)。 K_1s^1 冲积扇相红色泥岩及混杂的泥质砂砾岩中的 Th 含量为 $49.5 \times 10^{-6} \sim 97.1 \times 10^{-6}$, 平均为 73.33×10^{-6} , 显示出强烈的 Th 元素富集特征。

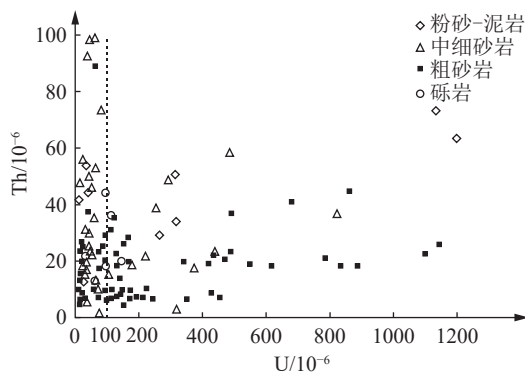


图 6 研究区样品中 Th 与 U 含量关系散点图

Fig. 6 Scatter plot of the relationship between thorium and uranium contents in study area

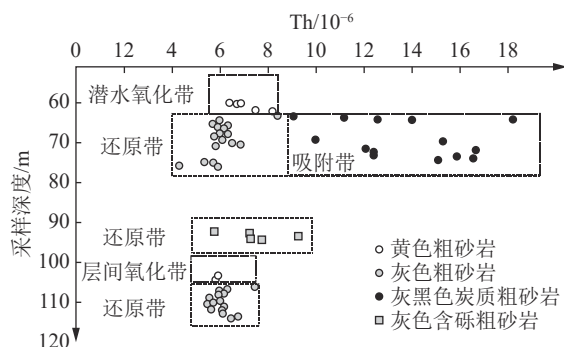


图 7 研究区典型钻孔 S61 样品 Th 元素分布特征散点图

Fig. 7 Scatter plot of Thorium element distribution characteristics of S61 samples in study area

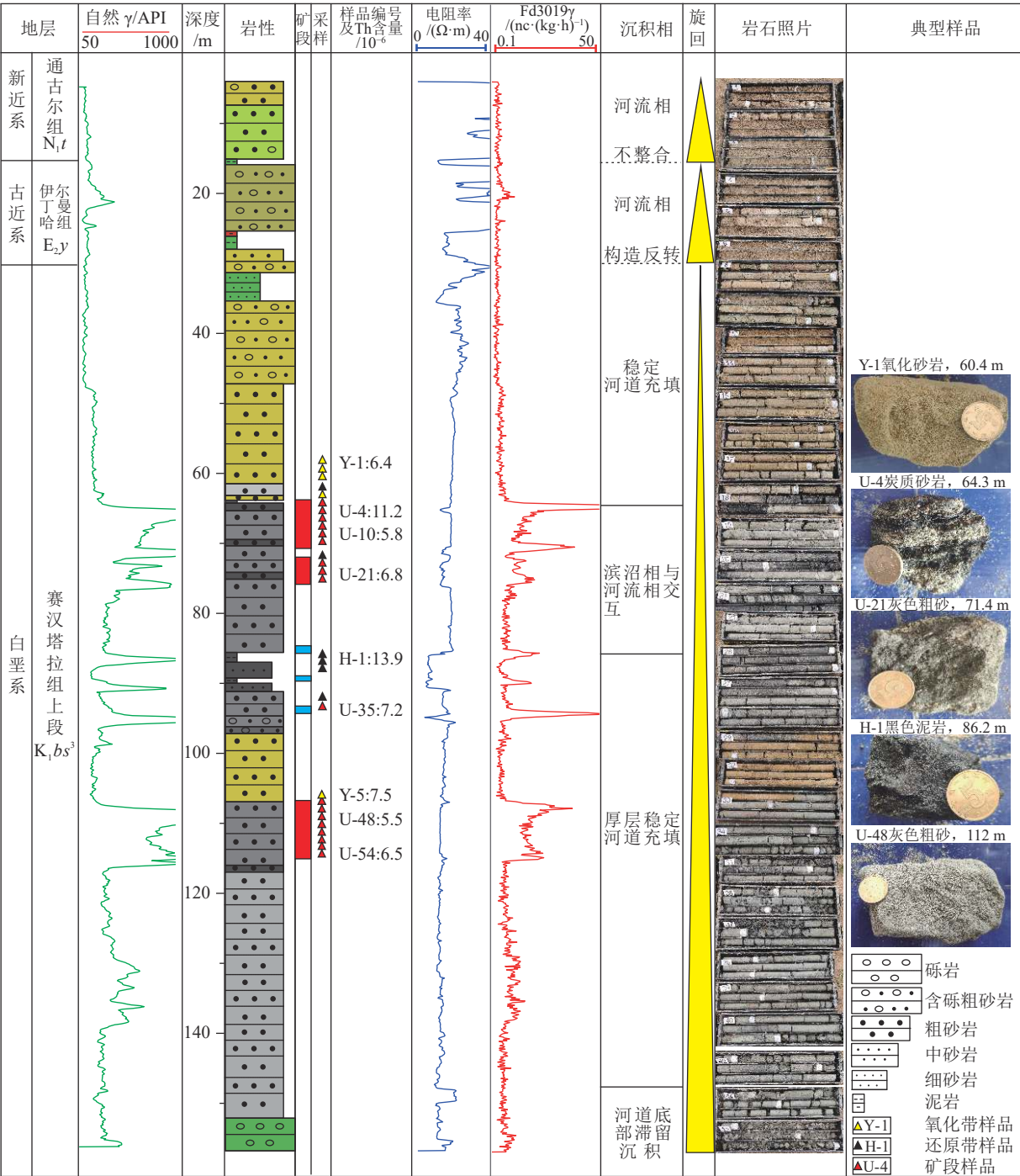


图 8 研究区 S61 钻孔柱状图

Fig. 8 Histogram of borehole S61 in study area

由于区域断层活动及地壳抬升作用, a 区南部 K_1s^3 及 K_1s^2 缺失, 北部部分残留(图 9 剥蚀线以南剥蚀殆尽)。总体来看, 残存的 K_1s^3 河道相样品 Th 含量偏低且与 b 区相近。区内 K_1s^{1-2} 属于三角洲相及少量后期发育的辫状河相沉积, 砂体总体连通性好, 同一含水层不同部位钻孔的 Th 含量变化范围较小

($14.7 \times 10^{-6} \sim 33.9 \times 10^{-6}$), 空间差异不明显, 并显示出由源区(中部)向沉降区(两侧)数值微弱增大的特征。 K_1s^{1-1} 冲积扇相砂体以泥质砂砾岩及薄层粉砂-泥岩夹层为主, 总体渗透率较差, 其 Th 含量为 $15.86 \times 10^{-6} \sim 29.85 \times 10^{-6}$, 平均 18.8×10^{-6} , 相较上述 b 区同地层砂体及源区火山岩偏低。

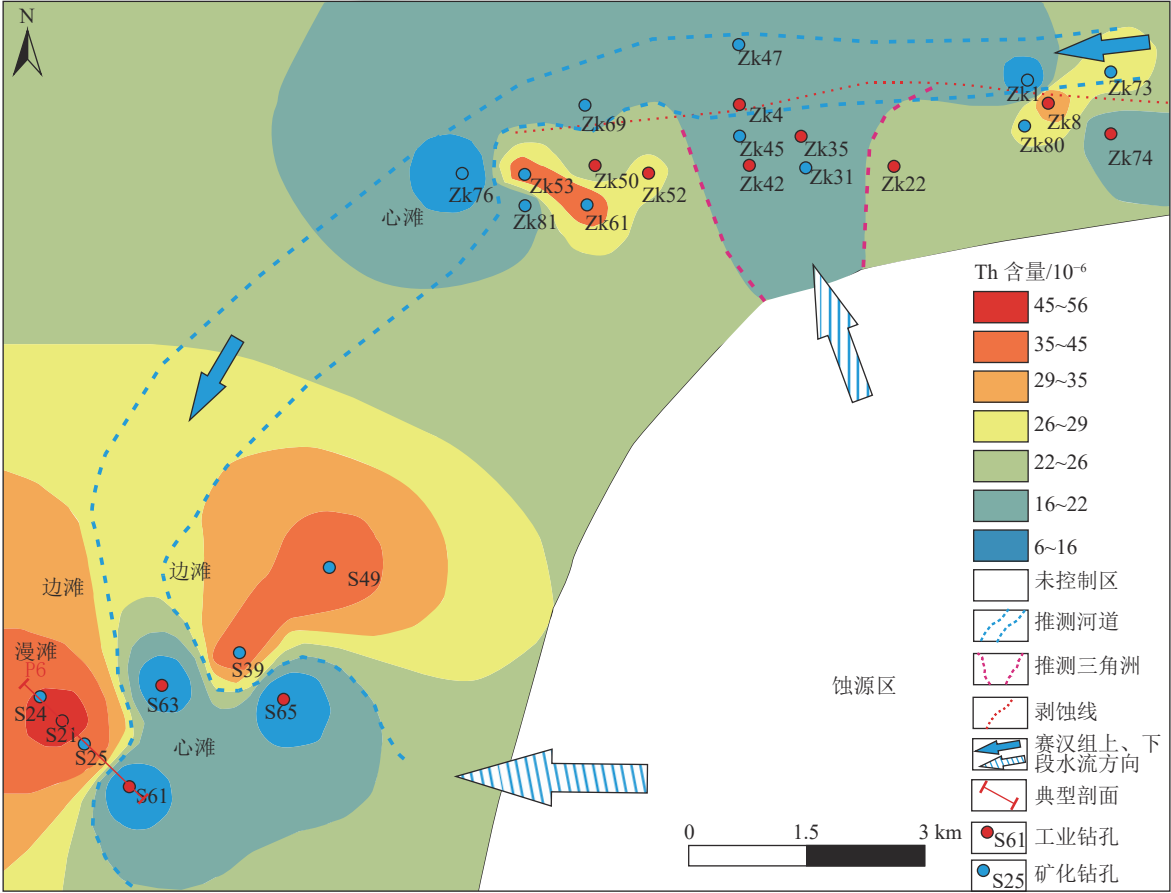


图 9 研究区单孔 Th 含量分布等值线图

Fig. 9 Isogram of single hole Th element distribution in study area

4 Th 含量分布规律及指示意义

风化产物由源区搬运至沉积区的过程中, 较易风化的轻矿物在运移过程中常被破坏、蚀变, 多在物源区附近聚集, 而重矿物多随水流作用运移至沉积区吸附于粘土矿物中。近地表环境, Th 通常赋存于砂级和粉砂级的独居石、锆石等稳定且难溶的重矿物中并随之迁移(杜洋, 2014; 罗旭佳, 2019), 因此随着水流方向 Th 含量逐渐增加(胡晨钰等, 2019; Khan et al., 2021)。根据该沉积特点, 结合地质条件等综合分析, 可对沉积物源判别、古水流方向指示及沉积相划分提供线索。

4.1 Th 含量对沉积物源的指示

马尼特坳陷周缘地区火山岩 Th 含量见图 10, Th/U 值见图 11。可以看出, 周缘酸性岩 Th 含量较中基性岩值明显偏高, 这与其锆石、独居石等富 Th 矿物含量较多相关。

一般认为, 由于不稳定 U 元素易迁移流失, 而

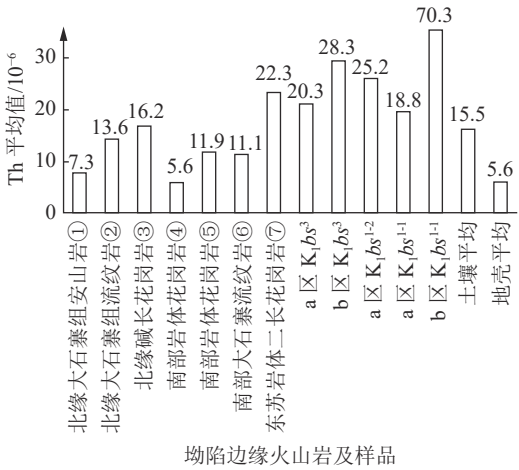


图 10 恩格日音地区南北缘火山岩 Th 元素质量分数直方图

Fig. 10 Histogram of thorium contents of volcanic rocks in Engeriyin area

Th 元素倾向于保存于原地, 因此 Th/U 值可以大致反映火山岩形成后 U 的迁出情况。坳陷南缘花岗岩

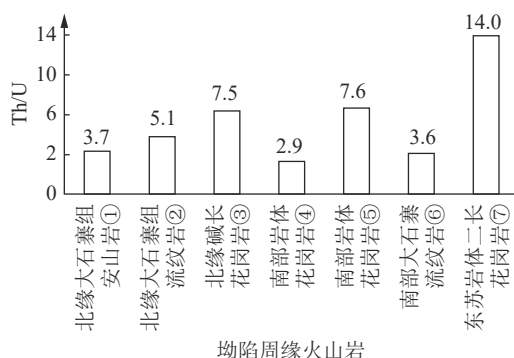


图 11 恩格日音地区南北缘火山岩 Th/U 值直方图

Fig. 11 Histogram of Th/U in volcanic rocks around Engeriyin area

类 Th 含量和 Th/U 值明显偏高(可达 7.6~14),尤其是研究区东部的三叠纪东苏二长花岗岩体的 Th/U 值可达 14,明显高于火山岩平均值(3~4),表明该岩体在形成后 U 迁出程度较高,提供了大量 U,结合赛汉组上段沉积时期区域范围内河道总体流向(NE—SW)及镜下物质成分分析,推测其可能为区内 K_1s^3 河道相主要的成岩或成矿物质来源。

研究区 K_1s^1 沉积物属近源堆积物,对源岩具有较好的继承性,且由于透水性差,受后期水流作用影响小,铀钍石、锆石等稳定含钍矿物得以保存,因此其全岩 Th 含量应与物源区火山岩相似。a 区 K_1s^{1-1} 冲积扇相泥质砾岩中 Th 含量偏低,因此认为东南部低 Th 火山岩(7~11)可能为其提供了部分物质来源。b 区 K_1s^{1-1} 冲积扇相粉砂-泥质砾岩显示出 Th 强烈富集的特征,其原因可能为在风化剥蚀沉积阶段,沉积物受近地表氧化还原及搬运沉积作用影响,发生过重矿物的预富集,产生了同生沉积的 Th 和 U 元素异常。因此,a、b 两地区原生沉积地层(冲积扇相)Th 含量的明显差异指示了不同的沉积物源及沉积特征。

4.2 对建立等时地层格架的指示

区内赛汉组形成于快速沉降时期,并在后期发生构造反转遭受剥蚀,且未发现明显标志层,因此在该区建立等时地层格架较困难。从研究区不同时代地层对比可知,a 区不同层位 Th 元素平均值具有较明显的差异(图 4)。早白垩世晚期,断层逆冲导致马尼特凹陷南缘地层抬升,沉积物源以近 S—N 方向山间运移为主,早期形成的 K_1s^{1-1} 可能发生风化剥蚀并为晚期 K_1s^{1-2} 提供了部分物源,使沉积物中富钍重矿物再次富集,因此 K_1s^{1-2} 中 Th 含量较其他地层偏

高。至 K_1s^3 河流相形成时期,地层物源运移总体以 NE—SW 向为主,其 Th 含量偏低,与下伏地层表现出差异。由此判断,上、下段地层沉积主体物质来源不同。b 区受构造活动影响较弱,地层保存较好,下段地层 Th 含量高且未遭受强烈剥蚀,与上覆地层 Th 含量差距更加明显。

总体来看,不同时期的地层及砂体形成于不同的沉积环境,其物质来源、氧化还原条件、物理化学反应等方面均存在较大差别,直接表现为不同的砂体具有不同的地球化学特征。通过 Th 含量特征及其相对含量差异,可判断不同钻孔部位砂体连通情况,将不同期次相似地层及砂体区分开来,有助于建立区域沉积地层等时地层格架。

4.3 沉积相带划分

由图 9 可以看出,a、b 区残留的 K_1s^3 河道相砂体 Th 的平均含量几乎一致($6 \times 10^{-6} \sim 9 \times 10^{-6}$),沿河流走向方向 Th 含量变化不明显。结合地区蚀源区展布情况及钻孔揭露的岩性、水文地质特征等数据,可推断两区上段砂体具有连通性,应属于同一河流体系。

b 区选定典型剖面 P6 线示意图(图 2、图 12)表明,自 NW 向 SE 方向显示出明显的地层倾斜特征,沿该方向地层厚度及砂体粒度逐渐加大、分选性和磨圆度逐渐变差,显示出古河道由漫滩—边滩—河道相分带特征,由河流相边部至中心部位 Th 含量显著降低,到河道相中部或心滩相达到最低值。

综上所述,在河道或三角洲体系水流运移分选过程中,河道中部河床相、沙坝相或三角洲相为流体作用活跃区,粗粒砂岩中的含钍矿物损失,导致全岩 Th 含量偏低,而边滩、漫滩、三角洲前缘及湖沼相作为沉积区,稳定重矿物被富含有机质的或粘土矿物的岩层吸附,逐渐富集于中细粒砂岩或粉砂岩中,Th 含量一般偏高。因此,沉积体系中砂体分带明显的河道相及渗透性较差的冲积扇相为主的砂体 Th 含量在各沉积亚相中分异较大,而总体连通性较好、差异性运移作用不明显的三角洲相砂体差异较小。

沉积盆地边缘 Th 含量在水流作用活跃区偏低,向停滞区则逐渐增高,因此其元素分布特征可以指示不同沉积相之间的差异,并通过对比相同沉积相内不同部位 Th 含量的相对大小,可以推断后生水流作用方向及沉积分带特征。

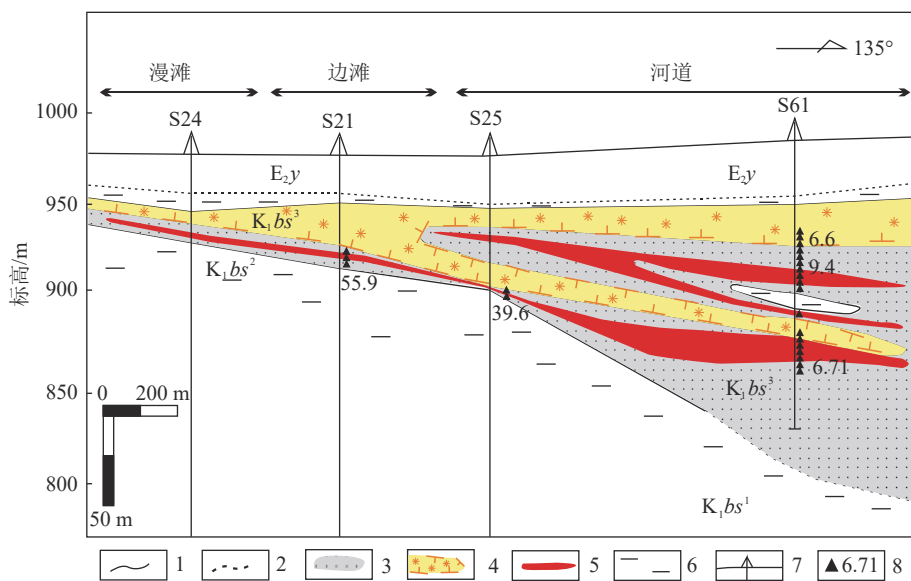


图 12 恩格日音地区典型剖面 p6 线示意图

Fig. 12 P6 line schematic diagram of Engeriyin area

E_2y —古近系伊尔丁曼哈组; K_1bs^3 —白垩系赛汉组上段; K_1bs^2 —白垩系赛汉组中段; K_1bs^1 —白垩系赛汉组下段; 1—整合界线;
2—角度不整合; 3—还原砂体; 4—氧化砂体及前锋线; 5—铀矿体; 6—泥岩; 7—钻孔; 8—采样位置及样段加权平均值

5 结 论

(1) 恩格日音地区 Th 含量加权平均值为 24.03×10^{-6} , 大于中国土壤平均含量及拗陷南缘火山岩体, 总体表现出 Th 元素富集的特征。

(2) 影响含钍矿物差异沉积的主要因素为沉积物源 Th 含量、搬运距离及分选强弱、粒度粗细、沉积岩的透水性及吸附性等, 而与样品采集深度、沉积过程中新形成的含钍矿物、U 含量、氧化还原反应无明显相关性。

(3) 陆相盆地边缘沉积岩中 Th 元素的数值特征和相对含量空间分布规律, 可用于识别沉积盆地的沉积物源、建立等时地层格架、划分沉积相带及砂体连通情况、判断古水流方向及恢复古河道展布。

致谢: 北京核工业地质研究院测试中心对本文样品实验分析提供了帮助和指导, 两位审稿专家为本文提出了建设性的修改意见, 在此一并表示诚挚感谢。

参考文献

Hu C S, Li W B, Xu C, et al. 2015. Geochemistry and zircon U-Pb-Hf isotopes of the granitoids of Baolidao and Halatu plutons in Sonidzuqi area, Inner Mongolia: Implications for petrogenesis and geodynamic setting[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 97: 294–306.

Khan R, Mohanty S, Sengupta D. 2021. Elemental distribution in core sediments of Podampata coast, eastern Odisha, India: potentiality of rare earth elements and Th exploration[J]. Arabian Journal of Geosciences, 14(2): 1–11.

Zhang X H, Yuan L L, Xue F H, et al. 2015. Early Permian A-type granites from central Inner Mongolia, North China: Magmatic tracer of post-collisional tectonics and oceanic crustal recycling[J]. Gondwana Research, 28(1): 311–327.

Zhang Z C, Chen Y, Li K, et al. 2017. Geochronology and geochemistry of Permian bimodal volcanic rocks from central Inner Mongolia, China: Implications for the late Palaeozoic tectonic evolution of the south-eastern Central Asian Orogenic Belt[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 135(MAR.): 370–389.

曾文淇. 2018. 南方某铀矿尾矿砂、钍核素在降水淋滤过程中的浸出模拟研究[D]. 东华理工大学硕士学位论文.

崔永谦, 刘喜恒, 孙朝辉, 等. 2011. 内蒙古二连盆地深层地球物理特征和上古生界的地质结构[J]. 地质通报, 30(2/3): 235–242.

杜洋. 2014. 721 矿尾矿库中核素(铀、钍)迁移特征及其对库区水环境影响[D]. 东华理工大学硕士学位论文.

冯云磊, 张万益, 于维满, 等. 2024. “双碳”背景下的清洁能源资源——钍[J]. 地质通报, 43(1): 101–116.

付锦, 赵宁博, 裴承凯, 等. 2014. 中国铀、钍、钾元素地球化学场特征及与铀矿化关系[J]. 物探与化探, 38(2): 200–204.

郭宏伟. 2014. 内蒙古巴彦乌拉铀矿床成矿特征及成矿规律研究[D]. 中国地质大学(北京) 博士学位论文.

韩效忠, 吴兆剑, 司马献章, 等. 2018. 二连盆地马尼特拗陷南北双向供源铀成矿模式探讨[J]. 煤田地质与勘探, 46(6): 1–10.

胡晨钰, 胡光明, 何幼斌, 等. 2019. 放射性元素钍测井在物源分析中的应用[J]. 地质科技情报, 38(5): 54–63.

- 蒋喆, 韩效忠, 胡航, 等. 2020. 二连盆地恩格日音砂岩型铀矿床地质特征及成矿作用初探[J]. 大地构造与成矿学, 44(4): 742–753.
- 李子颖, 刘武生, 李伟涛, 等. 2022. 内蒙古二连盆地哈达图砂岩铀矿渗出铀成矿作用[J]. 中国地质, 49(4): 1009–1047.
- 刘佳林, 刘武生, 虞航, 等. 2020. 二连盆地巴彦乌拉铀矿区花岗岩锆石 U–Pb 年龄和 Hf 同位素特征及地质意义[J]. 地质通报, 39(8): 1285–1295.
- 刘正义, 李西得, 孟艳宁, 等. 2016. 白云鄂博矿床钍矿化岩石类型及其控制因素[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 39(3): 201–209, 222.
- 罗旭佳. 2019. 某铀尾矿库区钍和铀的吸附迁移规律研究[D]. 东华理工大学硕士学位论文.
- 梅可辰, 李秋根, 王宗起, 等. 2015. 内蒙古中部苏尼特左旗大石寨组流纹岩 SHRIMP 锆石 U–Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义[J]. 地质通报, 34(12): 2181–2194.
- 孟艳宁, 范洪海, 孙志富, 等. 2011. 相山矿田居隆庵矿床钍矿物特征研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 30(2): 180–188.
- 孟艳宁, 范洪海, 王凤岗, 等. 2013. 中国钍资源特征及分布规律[J]. 铀矿地质, 29(2): 86–92.
- 聂逢君, 李满根, 严兆彬, 等. 2015. 内蒙古二连盆地砂岩型铀矿目的层赛汉组分段与铀矿化[J]. 地质通报, 34(10): 1952–1963.
- 武跃勇, 姜海蛟, 寇帅. 2016. 内蒙古苏尼特左旗查干敖包地区早白垩世火山岩地质及地球化学特征[J]. 地质调查与研究, 39(1): 1–14, 23.
- 俞嘉嘉, 邱林飞, 周万蓬, 等. 2020. 内蒙古乌拉特中旗新忽热地区富钍岩体钍元素赋存形式及地球化学特征[J]. 铀矿地质, 36(1): 34–45.
- 俞初安, 胡鹏, 曾威, 等. 2016. 内蒙古苏尼特左旗东苏 A 型花岗岩的锆石 U–Pb 年龄、地球化学特征及地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 35(2): 229–241.
- 俞初安, 吴兆剑, 司马献章, 等. 2020. 二连盆地马尼特拗陷南缘赛汉塔拉组砂岩碎屑锆石年龄及其地质意义[J]. 地球科学, 45(5): 1609–1621.
- 张万益, 聂凤军, 江思宏, 等. 2008. 内蒙古查干敖包石英闪长岩锆石 SHRIMP U–Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, (3): 177–184.
- 张万益, 聂凤军, 刘树文, 等. 2013. 大兴安岭南段西坡金属矿床特征及成矿规律[J]. 中国地质, 40(5): 1583–1599.
- 中华人民共和国国家标准. 2010. 硅酸盐岩石化学分析方法第 30 部分: 44 个元素量测定 (GB/T 14506.30—2010)[S].