

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0658.2024.40.021

湘西北北部地区黑色岩系铀多金属 成矿环境研究

王健, 王文全, 杨帆, 王振云, 李治兴

(核工业北京地质研究院 中核集团铀资源勘查与评价技术重点实验室, 北京 100029)

[摘要] 湘西北北部地区主要包括晓坪坳陷、慈利断陷盆地等区域, 是湘西北成矿带上有用元素种类和矿物类型最为丰富的地区。文章通过对湘西北北部地区开展系统的地质调查评价和取样分析, 研究表明区内铀多金属矿化形成环境主要为深水环境向浅水环境的过渡区域, 海洋中的边缘浅海环境具有更佳的铀成矿条件。微量元素特征参数表明, 研究区从震旦纪到寒武纪海洋环境是由相对富氧向缺氧环境的转变, 寒武纪在海水缺氧的大背景下, 发生过一到两次短时间小规模充氧事件。对 U、Th、稀土等元素的研究表明湘西北北部地区从震旦纪晚期到寒武纪早期 U 的富集速率明显加快, 而后 U 富集速率逐渐降低, 指示研究区在寒武纪早期海洋中的热水作用最为强烈, 而后逐步减弱, 且成矿作用过程中有深部物质的参与, 矿化越好, 受深部热水影响越强。对 Ce 的研究结果表明, 研究区震旦纪到寒武纪在大的海退背景下存在 3 个较为明显的海平面“升-降”转化界面, 可以将这段地质历史划分为 4 个海平面升降变化阶段, 在海平面升高阶段, 沉积物中 Ce 异常减小, 海洋中还原性增强, 有利于有机质和铀多金属元素的富集。研究区矿物学方面的发现与通过地球化学方法得出的结论具有较好的一致性, 品质铀矿、铀石等矿物的晶型、共生关系和所包含的 Y、Se 等元素指示寒武纪时期研究区黑色岩系成矿处于较高温度、强还原的条件下, 且海底热流喷涌过程中携带有深源物质参与成矿。

[关键词] 铀多金属; 黑色岩系; 成矿环境; 湘西北

[文章编号] 1000-0658(2024)02-0250-10 **[中图分类号]** P619.14 **[文献标志码]** A

湘西北铀多金属成矿带根据矿化类型和矿化元素组合的不同自北向南可以细分为 3 种不同类型的成矿带^[1], 其中北部成矿带是湘西北地区最早投入铀多金属勘查找矿工作的地区, 其范围主要包括晓坪坳陷、慈利断陷盆地等区域。从 20 世纪 60 年代开始, 在北部成矿带的黑色岩系中就相继发现了镍钼矿床、铀矿点、稀土矿床、油页岩等一大批我国当时建设生产中迫切需要的战略性资源^[2-3]。目前在湘西北北部成矿带中已经发现的有用元素种类超过 30 种, 这些有用元素绝大多数都赋存在区域内发育的早寒武世黑色岩系中。这套黑色岩系不仅广泛发育在湘西北地区, 而且在我国江西、云南、贵州等省份均有分布, 是我国南方重要的含矿层和矿源层, 南方很多稀有金属、非金属、油气资源的成矿均与这套黑色岩系中所蕴含的丰富元素密切相关

关^[4]。早先刘宝珺等^[5]、王成善等^[6]、漆富成等^[7]从大的成矿区带角度提出过我国南方地区的黑色岩系成因与海侵体系下的缺氧作用和海底喷流作用有关。近些年王健等^[1,8]结合具体的铀多金属找矿工作, 通过对这套黑色岩系开展系统的调查评价后认为, 湘西北北部地区的黑色岩系在整个成矿带上含矿性要优于中部和南部。要回答北部成矿带为何元素种类更为丰富, 元素含量更高, 地层含矿性更好等问题, 就要在大的成矿区带研究基础之上, 进一步对北部地区开展有针对性的精细化研究, 才能更好的查明北部地区铀多金属的成矿环境和成矿作用, 厘定出关键控矿要素, 为整个区域的找矿工作提供理论指导。本文利用近些年对于湘西北地区最新的勘查数据和成果, 通过对湘西北北部地区开展元素地球化学、矿物学等方面的研究, 提出

[基金项目] 中国核工业地质局地勘费项目“全国低品位大矿量易开发铀资源远景评价”(编号: 地 D202346-4) 资助。

[收稿日期] 2023-09-13 **[改回日期]** 2023-10-16

[作者简介] 王健 (1984—), 男, 高级工程师, 博士, 现从事铀多金属成矿研究。E-mail: wjcnn@126.com

一些关于北部地区成矿环境、成矿背景的精细化研究认识,以期能为湘西北地区黑色岩系找矿工作起到抛砖引玉的作用。

1 区域地质背景

研究区归属于湘西北成矿带(图1),位于扬子陆块东南缘构成的陆缘裂隙、深断裂带成矿体系中^[9],褶皱、断裂等构造活动强烈且活动历史漫长,区域以北东向构造为主,南部为华南造山带,东部为华夏陆块^[10]。区域内地层层序完整,出露良好,含有丰富的化石资

源和矿产资源,尤其是寒武纪黑色岩系中蕴藏有大量的铀、钒、镍、钼、银等稀有金属和贵金属,同时含有大量的磷矿资源。震旦纪—寒武纪早期,全球处于拉张的构造环境下,造成古陆解体,湘西北及整个华南地区由于发生解体和沉降,海平面快速升高,造成海水缺氧,沿大陆边缘沉积形成了这套广泛分布的黑色岩系^[5],形成的岩石类型主要有磷块岩、碳质页岩、碳质板岩、硅质板岩、粉砂质页岩等,岩层中常见有重晶石透透镜体。区域岩浆活动微弱,仅局部地区有小规模的基性岩侵入到变质岩地层中^[11]。

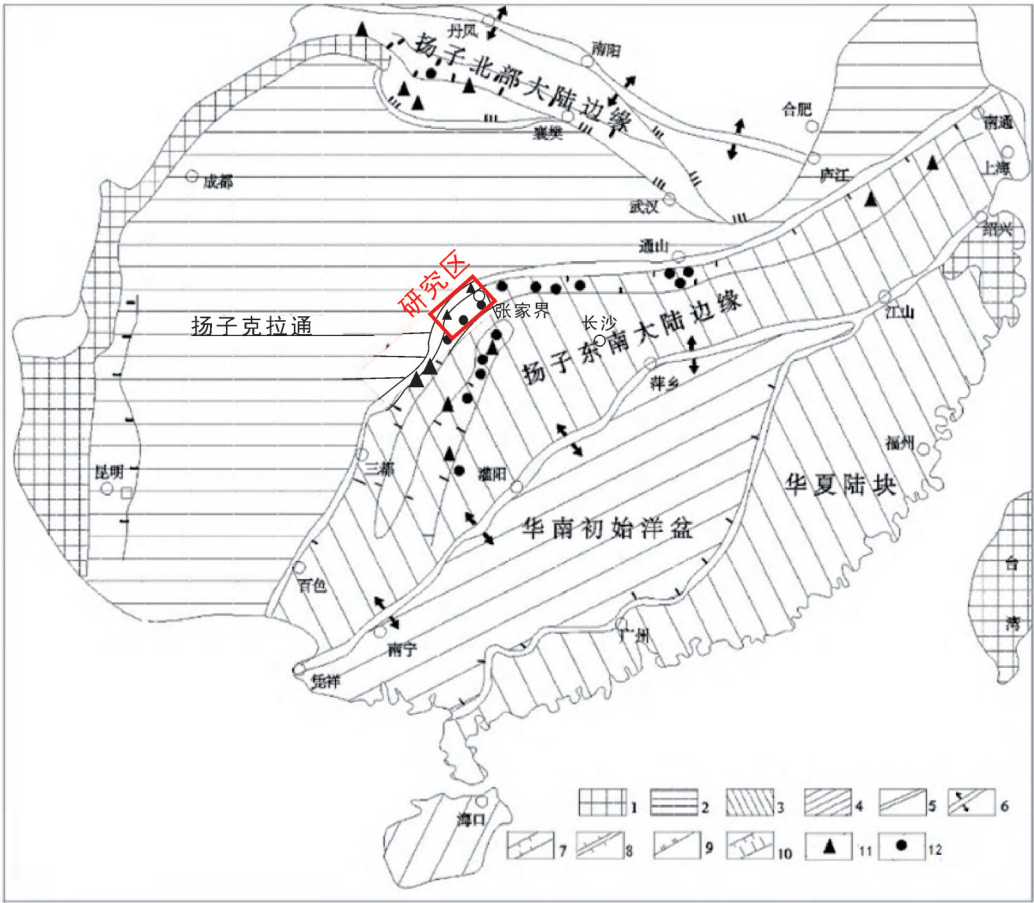


图1 中国南方寒武纪古构造图(据文献[9]修改)

Fig. 1 Paleotectonic map during Cambria in southern China (modified after reference[9])

1—克拉通古陆区; 2—克拉通沉积区; 3—大陆边缘区; 4—初始洋盆; 5—Ⅱ级构造单元界线; 6—扩张中心; 7—地堑; 8—地垒; 9—逆断层; 10—走滑断层、逆冲断层; 11—镍钼矿产地; 12—钒矿产地。

2 北部铀多金属成矿带地质特征

湘西北北部地区的黑色岩系铀多金属矿化,主要发育在晓坪拗陷和慈利断陷盆地中,含矿地层为下寒武统牛蹄塘组,主体呈环带状以北东-南西方向展布在扬子陆块东南缘的陆缘裂隙和拉张形成的深断裂体系中。晓坪拗陷和慈利断陷盆地被三

条断裂所夹持,北部为花垣-慈利断裂带,南部为四都坪-龙潭河断裂带,这两条断裂带走向北东近于平行,西侧的凤凰-吉首断裂带与上述两条断裂在晓坪拗陷西侧相交汇,断裂交汇部位发育有多处镍钼矿点和钒矿点^[12](图2),断裂通过处铀多金属矿化有变富的现象。赋矿地层牛蹄塘组的岩石类型

主要为含磷结核碳质页岩、磷块岩、硅质岩。牛蹄塘组发育在中厚层灯影组白云岩的风化剥蚀面上,所以牛蹄塘组的地层产状、厚度、规模均受到下伏地层影响。矿体呈透镜体状、似层状不等厚连续发育,厚度在0.5~3.5 m之间(图3),呈环带状向东北方向延伸,周长约50 km。

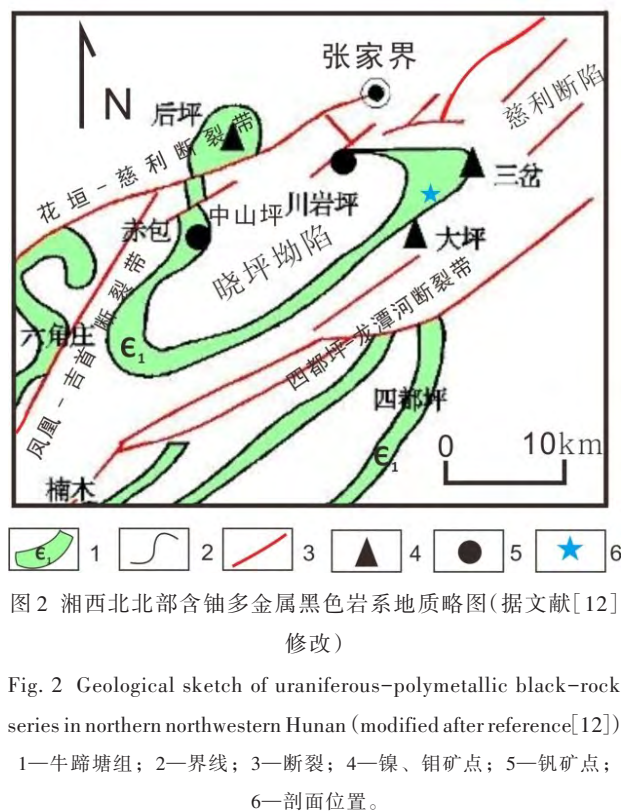


图3 研究区含铀多金属黑色岩系野外露头

Fig. 3 Outcrop of uraniferous-polymetallic bearing black-rock series in the study area

在对湘西北北部地区开展系统的地质调查评价工作的基础上,本文选取其中一条有代表性的典型剖面,对其进行元素地球化学和矿物学等方面的研究,所选剖面位于晓坪坳陷东部,大坪镇北部约2 km的位置(图2)。剖面底部为震旦系白云岩,上部为寒武系牛蹄塘组,两者之间呈平行不整合接触。寒武系自下而上分别为,层①:含磷结核薄层黑色碳质页岩,磷结核直径为1~2 cm,该层厚度为40 cm;层②:黑色块状磷块岩,岩石硬度小,易风化,厚度为30 cm;层③:寒武系黑色中薄层硅质岩,岩石硬度高,不易风化,厚度为15 cm;层④:中薄层黑色碳质页岩,夹重晶石透镜体,透镜体长轴约9 cm,厚约2 cm,该层厚度为95 cm;层⑤:含重晶石中薄层灰黑色硅质-碳质页岩,岩石硬度较高,重晶石无自形结构,呈蠕虫状分布,层厚125 cm;层⑥:含重晶石薄层黑色碳质页岩,内部发育直径1~1.5 cm的磷结核,层厚30 cm;层⑦:中薄层黑色碳质页岩,底部和顶部夹重晶石透镜体,中部含直径0.5 cm左右的磷结核,该层厚300 cm。每层的采样位置如图4所示。

所采剖面样品的主微量、稀土元素的数据分析工作在核工业北京地质研究院完成,所有分析测试工作均遵照DZ/T 0184.17—1997、GB/T 14506.28—2010等国家行业规范标准操作。分析结果表明,所选剖面主要的几种矿化元素 $w(U)$ 值为 $(1.51\sim 210)\times 10^{-6}$ 、 $w(Mo)$ 值为 $(2.74\sim 12\,406)\times 10^{-6}$ 、 $w(Ni)$ 值为 $(18.3\sim 6\,634)\times 10^{-6}$ 、 $w(V)$ 值为 $(26.3\sim 17\,812)\times 10^{-6}$ (表1)。这几种矿化元素的浓集达到了地壳平均含量的几十至上千倍,局部层段铀元素达到了非常规铀资源品位指标, Mo 、 Ni 达到了工业品位, Ga 、 Cd 、 V 、 Tl 等元素达到了非常规铀资源伴生组分综合利用指标^[13]。而后利用分析结果,计算得到用来判断研究区成矿环境和成矿条件的各项地球化学特征参数(表1)。

3 主量元素对成矿环境的判断

对研究区主量元素特征参数进行 $Al_2O_3/(Al_2O_3+Fe_2O_3)-TFe_2O_3/TiO_2$ 投图,可以直观的判断样品形成时的沉积构造环境^[14]。本次所选取的典型剖面,大部分样品的投点都落在了大陆边缘环境和远洋环境的交汇重叠区域(图5),剖面底部两个震旦纪白云岩和极个别寒武纪样品投点落在了远洋环境和大陆边缘环境之外的区域,重点关注的铀矿化样品投点结果表现出明显的规律性(剔除XP-3号矿化样品出现的投图飞点):①大部分铀矿化样品投点

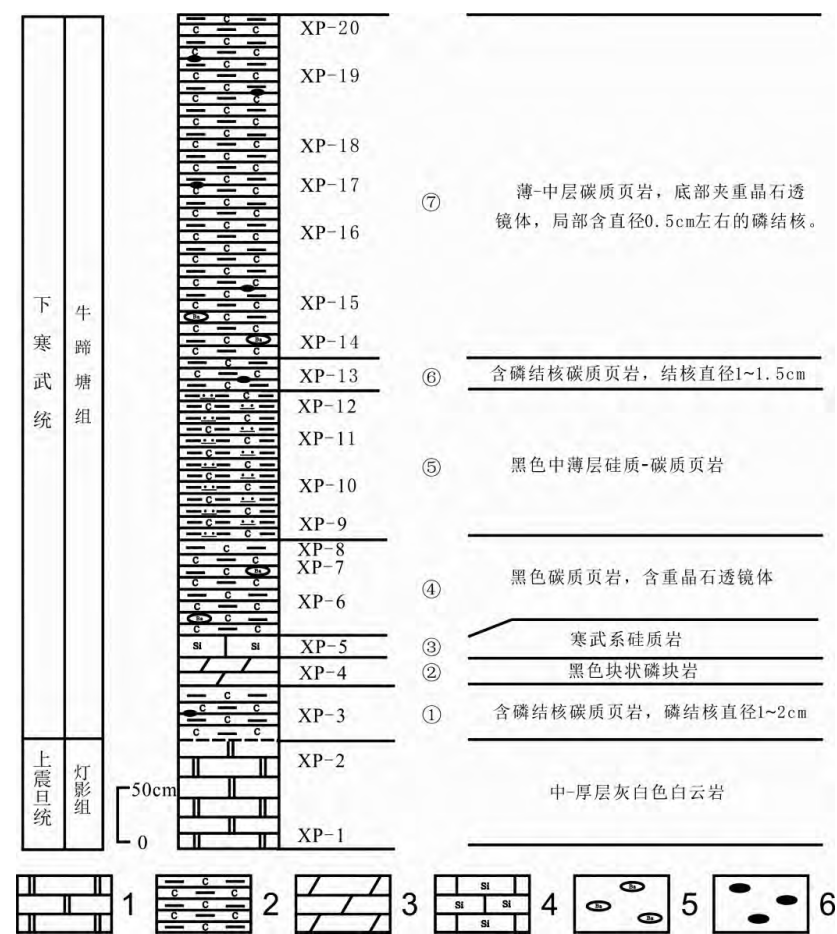


图4 黑色岩系铀多金属矿化典型剖面图

Fig. 4 Typical stratigraphic column of uraniferous-polymetallic black-rock series
1—白云岩; 2—碳质页岩; 3—磷块岩; 4—硅质岩; 5—重晶石透镜体; 6—磷结核。

表1 黑色岩系铀多金属矿化元素特征参数表

Table 1 Elements characteristic parameter of uraniferous-polymetallic black-rock series

样号	$Al_2O_3/(Al_2O_3+TFe_2O_3)$	TFe_2O_3/TiO_2	$V/(V+Ni)$	Cu/Zn	U/Th	δCe	La/Yb	ΣREE	U	Mo	Ni	V
XP-1	0.25	11.87	0.38	0.02	6.20	0.50	3.96	79.90	5.21	2.74	70.5	42.7
XP-2	0.34	23.89	0.38	0.02	4.11	0.63	4.03	14.36	1.51	4.27	43.8	26.3
XP-3	0.90	27.91	0.84	0.78	51.94	0.49	3.20	299.58	134	186	190	981
XP-4	0.44	18.04	0.94	0.61	191.74	0.41	5.56	637.35	209	19.1	51.3	845
XP-5	0.22	54.83	0.86	0.28	12.41	0.45	5.75	21.45	8.65	21.8	18.3	114
XP-6	0.35	28.19	0.37	0.04	13.54	0.83	7.89	255.30	125	492	9 66	579
XP-7	0.63	8.85	0.99	0.34	5.23	0.59	7.25	159.16	49.8	193	77.0	5 520
XP-8	0.66	5.78	0.99	0.40	5.84	0.55	7.85	168.01	48.5	146	90.8	6 210
XP-9	0.57	9.51	0.97	0.28	6.54	0.55	5.11	107.06	38.1	133	144	4 728
XP-10	0.53	10.28	0.99	0.31	7.81	0.53	5.59	85.24	32.9	154	79.6	5 934
XP-11	0.56	11.37	0.98	0.29	6.20	0.54	5.31	181.03	72.5	291	401	17 812
XP-12	0.48	3.61	0.99	0.53	4.84	0.53	13.22	89.63	10.5	147	45.4	3 550
XP-13	0.60	7.61	0.98	0.26	30.70	0.54	7.22	329.57	210	836	132	6 988
XP-14	0.57	8.65	0.98	0.33	4.99	0.56	8.37	195.81	55.4	804	207	13 399
XP-15	0.59	8.48	0.81	1.54	3.45	0.70	11.92	193.29	39.0	267	132	552
XP-16	0.53	10.48	0.11	0.38	9.36	0.69	11.24	372.10	98.3	12 406	6 634	842
XP-17	0.59	10.72	0.92	1.05	4.51	0.79	7.98	138.75	48.3	202	200	2 224
XP-18	0.62	8.73	0.55	0.97	7.39	0.85	9.96	225.80	76.9	1 659	557	681
XP-19	0.58	9.61	0.85	1.60	7.44	0.86	14.15	206.41	78.9	220	125	701
XP-20	0.54	13.24	0.90	2.27	9.36	0.89	8.82	199.36	117	293	113	986

落在了远洋环境向大陆边缘环境的过渡区域;②越靠近大陆边缘环境矿化样品数量越多。因此从投图结果来分析,相比远洋的深海环境,大陆边缘的浅海环境具有最佳的铀成矿条件。

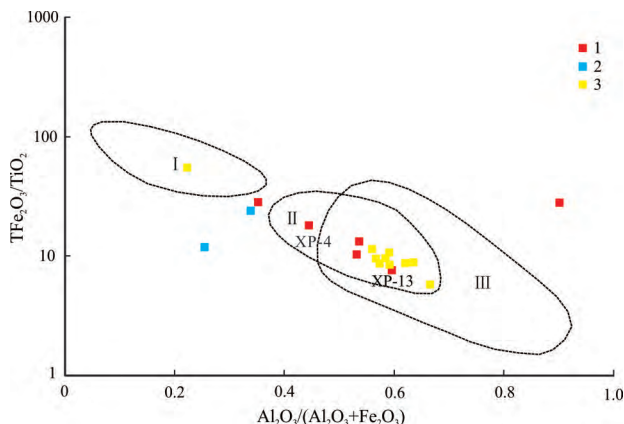


图5 黑色岩系样品 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$ - $\text{TFe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 图(底图据文献[14])

Fig. 5 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$ - $\text{TFe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ diagram of black-rock series samples (base map after reference[14])

I—洋中脊环境; II—远洋环境; III—大陆边缘环境。

1—铀矿化样品; 2—震旦纪样品; 3—寒武纪样品。

4 微量元素对成矿环境的判断

对于湘西北北部成矿带沉积成岩过程中海洋环境的精细化判断选取 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 和 Cu/Zn 两组特征参数来进行研究, V 、 Ni 两种元素离子价态较多且会跟随周围海洋中氧化还原环境的变化而不同, 氧化环境下 V 易被吸附沉淀, 而还原环境下 Ni 易被胶体和黏土吸附富集。因此可以根据这两种元素的不同特征, 利用 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 值进行沉积成岩时期海洋氧化还原环境的判断^[15], 当两者比值大于 0.46 时代表缺氧的海水环境, 反之代表富氧的海水环境。根据计算结果可知, 剖面底部的震旦纪白云岩 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 值均小于 0.46, 寒武纪样品除 XP-6 号和 XP-16 号样品外, 其余比值均远大于 0.46 (表 1), 表明从震旦纪到寒武纪海洋环境是由富氧环境向缺氧环境的转变, 但在寒武纪海洋缺氧的大背景下, 发生过两次短时间小规模充氧事件, 通常情况下这种现象是由于海平面的起伏造成的。 Cu/Zn 值可作为判断沉积环境的氧化还原条件的标值, 当两者比值小于 0.2 时指示富氧环境, 反之则指示缺氧的还原环境^[16]。通过对所选剖面 Cu/Zn 值的计算可知, 除震旦纪样品和一件寒武纪 XP-6 号样品 Cu/Zn 值小于 0.2 外, 其余均大于 0.2 (表 1), 说明震旦纪

时期样品沉积环境中氧气含量相对较高, 到寒武纪时海洋中沉积环境全面转变为缺氧环境, 但期间受海平面升降影响, 有过短时间的充氧事件发生。利用这两组微量元素特征参数可判断出的研究区黑色岩系沉积环境具有较好的一致性。

U 的富集沉积速率会在热水环境下加快, 在热水环境下形成的沉积岩中 U 会异常增高, 因此利用 U/Th 值可以判断区域沉积环境是正常海水还是热水沉积, 正常海水沉积的岩石 U/Th 值小于 1, 而热水沉积环境下形成的沉积岩 U/Th 值大于 1^[17]。通过典型剖面 U/Th 值的计算结果可以得知, 在整个沉积成岩过程中均有热水作用的参与 (表 1), 但不同时期热水作用的强度有所不同。根据所选典型剖面, 底部震旦纪样品中 $w(\text{U})$ 值平均为 3.36×10^{-6} , 寒武纪底部样品中 $w(\text{U})$ 值平均为 119.16×10^{-6} , 寒武纪中上部样品中 $w(\text{U})$ 值平均为 69.72×10^{-6} 。因此通过分析所选剖面底部到顶部 $w(\text{U})$ 值的变化可以得知, 从震旦纪晚期到寒武纪早期 U 的富集速率有一个明显的加速, 而后 U 沉积富集速率逐渐降低, 指示研究区在寒武纪早期海洋中的热水作用最为强烈, 而后逐步减弱, 但在总体减弱的过程中也伴随有阶段性的强弱波动, 造成指示元素富集速率的改变。利用指示元素 $\lg \text{U}$ - $\lg \text{Th}$ 判别图解进行投点, 两件震旦纪样品落在了石化热水沉积区范围内, 其余寒武纪样品几乎都落在了东太平洋热水沉积区周围, 指示研究区含铀多金属黑色岩系在沉积成岩的过程中有持续热水作用参与 (图 6)。

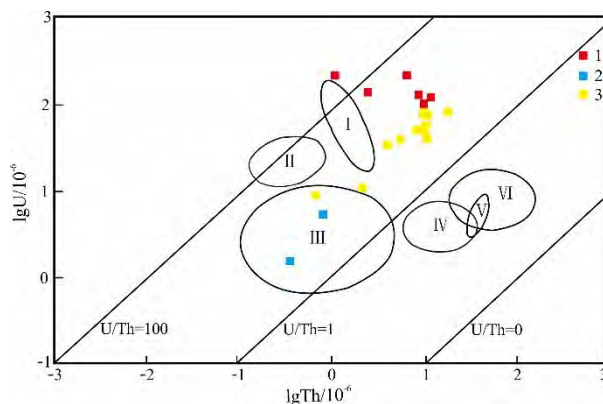


图6 黑色岩系样品 $\lg \text{U}$ - $\lg \text{Th}$ 图(底图据文献[17])

Fig. 6 $\lg \text{U}$ - $\lg \text{Th}$ diagram of black-rock series samples (base map after reference[17])

I—东太平洋热水沉积区; II—红海热卤水沉积区; III—石化热水沉积区; IV—普通深海沉积区; V—铝土矿区; VI—锰结构区。

1—铀矿化样品; 2—震旦纪样品; 3—寒武纪样品。

5 稀土元素对成矿环境的判断

稀土元素 Ce 在海洋中, 由于海水含氧量的变化, 会引起元素价态的变化, 从而被吸附沉淀或溶于海水中, 相应的在海洋沉积物中就会表现为 Ce 的正异常或者负异常, 当沉积物中出现 Ce 负异常时, 代表当时的海洋为缺氧的还原环境^[18]。本次的研究剖面 Ce 异常计算结果介于 0.41~0.89 之间, 均为负异常(表 1), 指示当时的海洋中沉积环境总体为缺氧环境, 但含氧量会阶段性的起伏变化, 从而阶段性影响成矿环境。同时, Wild 等^[19]通过研究指出, 利用全岩的 Ce 分析, 可以恢复出地质历史中精度为 1~10 Ma 的海平面升降变化。本次对研究区黑色岩系典型剖面开展 Ce 的研究结果表明, 研究区震旦纪到寒武纪在大的海退背景下存在 3 个较为明显的海平面“升-降”转化界面, 可以将这段地质历史划分为 4 个海平面升降变化阶段, 在海平面升高

阶段, 沉积物中 Ce 异常减小, 海洋中还原性增强, 有利于有机质和铀多金属元素的富集, 利用 Ce 异常判断出的研究区海平面升降变化曲线与前文利用微量元素 $V/(V+Ni)$ 判断出的海洋氧化还原曲线, 具有很好的背离对应关系(图 7), 说明两种方法得出的结论具有较好的一致性。

利用稀土元素 $\Sigma REE-La/Yb$ 图解也可以直观的判断沉积物在成岩过程中的环境和物质来源^[20]。从对所选剖面的投点结果可以看出, 两件震旦纪白云岩落在了沉积岩区域边部, 绝大部分寒武纪样品落在了沉积岩和玄武岩的重叠区域, 铀含量低的正常样品落点靠近沉积岩一侧, 铀含量高的矿化样品落点更靠近花岗岩一侧, 投点结果表明寒武纪时期有海底喷流热水参与了沉积成岩作用, 成岩过程中有深部物质的参与, 且矿化越好, 受深部来源的热水影响越强烈(图 8)。

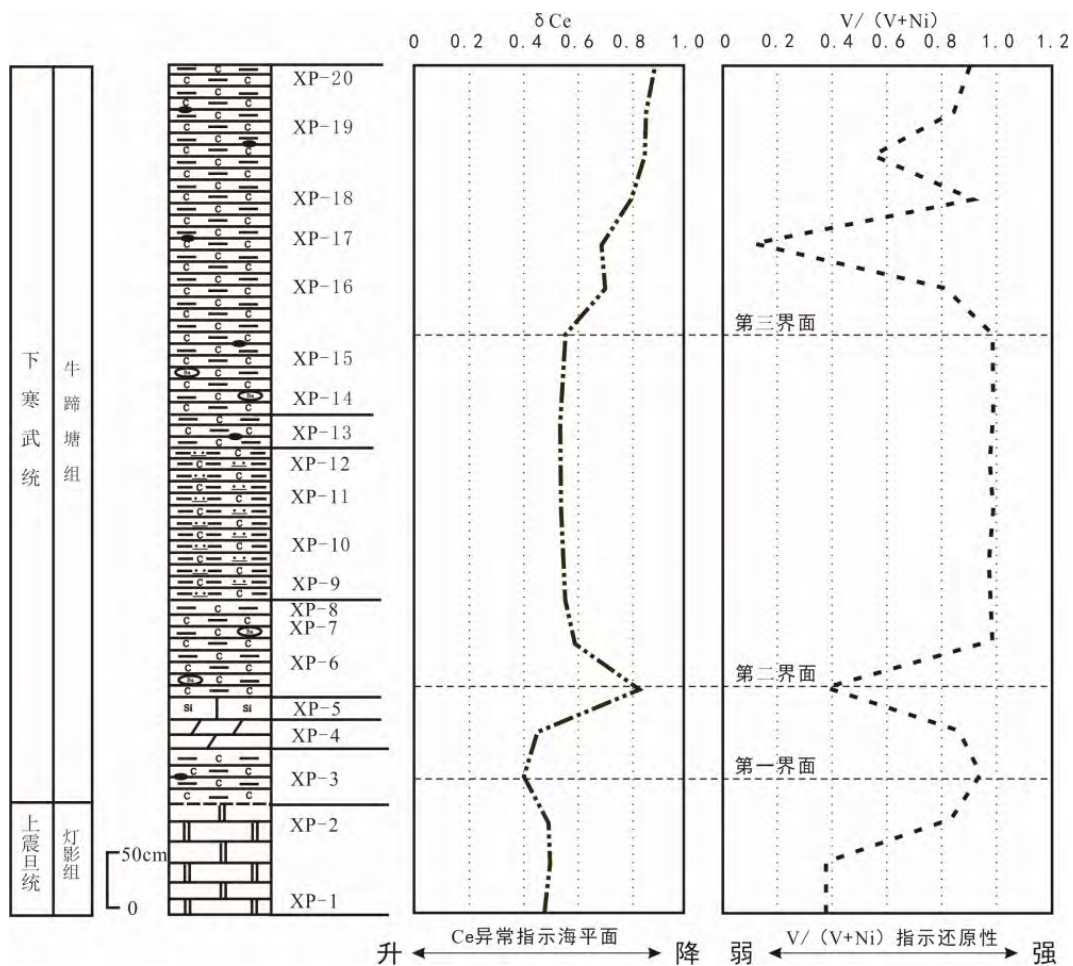


图7 研究区Ce异常指示海平面升降变化图

Fig. 7 Sea level eustasy diagram indicated by cerium anomaly in research area

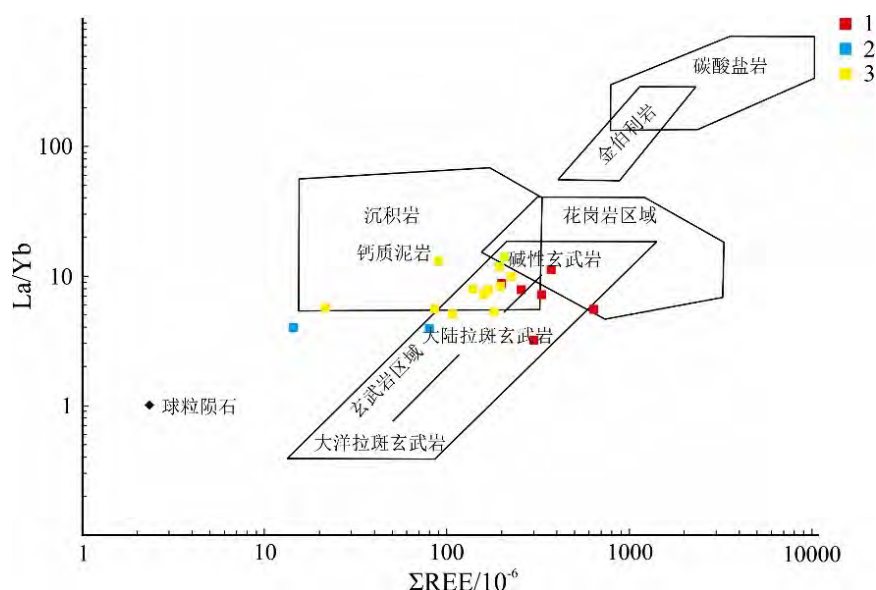


图 8 黑色岩系样品 Σ REE-La/Yb 图(底图据文献[20])

Fig. 8 Σ REE-La/Yb diagram of black-rock series samples(base map after reference[20])

1—铀矿化样品；2—震旦纪样品；3—寒武纪样品。

6 矿物特征对成矿环境的指示

研究区矿物学方面的发现与上述通过地球化学方法得出的结论也具有较好的一致性。湘西北部地区牛蹄塘组黑色岩系中发现的铀矿物种类主要有沥青铀矿、晶质铀矿和铀石,成矿带中发现的晶质铀矿晶型较好,大部分以立方体状和立方体聚形晶的形态产出(图 9)。晶质铀矿不同的晶型产出形态,代表了不同的形成环境和结晶条件,高温条件下形成的晶质铀矿,以立方体状和菱形十二面体聚形晶的形态为主,温度较低条件下结晶的晶质铀矿主要呈短柱状和不规则状^[21-22]。在开展镜下鉴定和扫描电镜工作中发现如图 10 的矿物共生现象,晶质铀矿左侧边部与重结晶的磷灰石相接触,两者的接触边平滑完整,过渡自然,下部与叶腊石相接触,接触边也平直完整,没有交代溶蚀作用,说明晶质铀矿与磷灰石、叶腊石具有共生边结构,表明这几种矿物在相同的条件下一起发生沉淀结晶。根据斯特林格的热液矿物合成实验,磷灰石、叶腊石和绢云母共同沉淀结晶需要在 340~400 °C 的高温条件下才能完成^[23],因此根据矿物共生关系和结构关系,也间接证明研究区寒武纪时期存在较为强烈的海底热水作用,使当时海洋中的成矿温度阶段性的增高。湘西北部地区的另一种常见铀矿物为铀石,铀石常与沥青铀矿相共生(图 11),铀石的形成条件严苛,必须在强

还原条件下才能结晶生成^[24],铀石的出现指示当时的成矿环境处于一个较强的还原条件下。部分铀石和晶质铀矿中都可以检测到稀土元素 Y, Y 是铀矿物形成温度较高的标型特征^[25],铀石周围的重晶石中含有亲地核的深源元素 Se^[26]。Y、Se 两种元素的出现也指示寒武纪时期研究区的黑色岩系成矿处于相对较高的温度环境,且海底热流喷涌过程中携带有深源物质的参与^[27]。这些发现也进一步佐证了范德廉等^[28]、赵凤民^[29]所提出的海底喷流成矿作用对湘西北部地区黑色岩系成矿的影响。

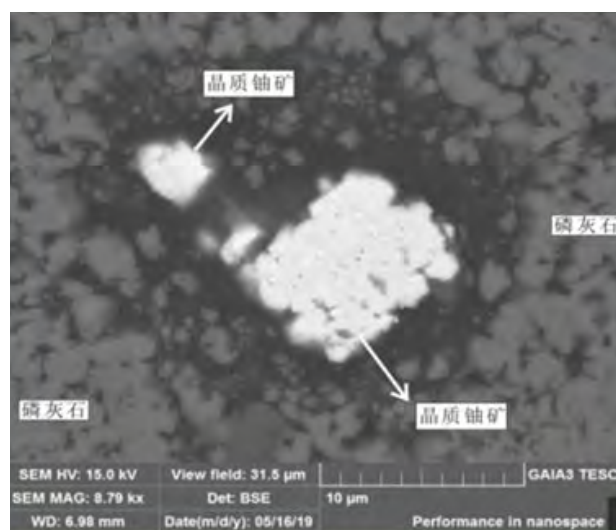


图 9 晶质铀矿背散射图像

Fig. 9 BSE image of uraninite

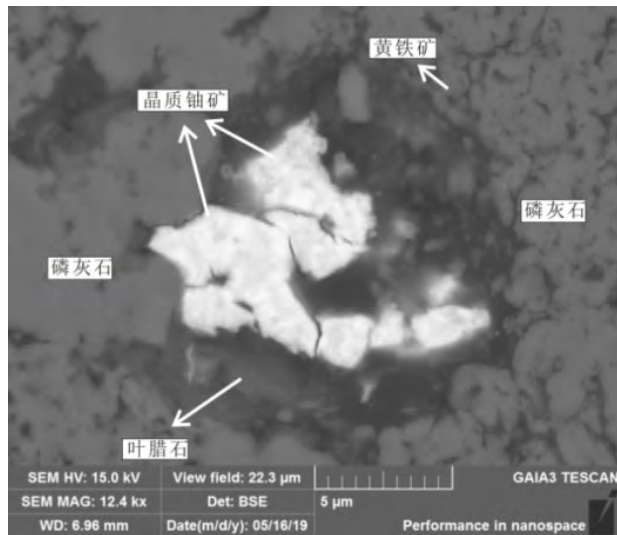


图10 晶质铀矿与磷灰石叶腊石背散射图

Fig. 10 BSE image of uraninite, apatite and pyrophyllite

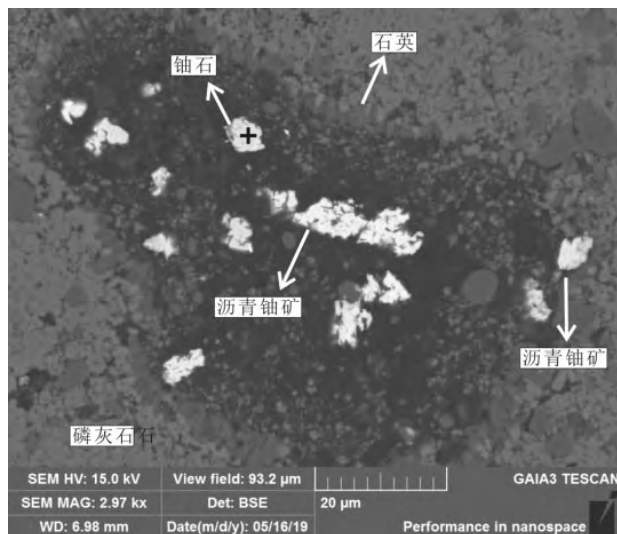


图11 铀石与沥青铀矿背散射图

Fig. 11 BSE image of pitchblende and coffinite

7 结论

1)主量元素特征参数表明,湘西北北部地区铀多金属矿化形成环境主要为深水环境向浅水环境的过渡区域,海洋中的边缘浅海环境具有最佳的铀成矿条件。

2) $V/(V+Ni)$ 和 Cu/Zn 两组特征参数表明,湘西北北部地区从震旦纪到寒武纪海洋环境是由相对富氧向缺氧环境的转变,寒武纪在海水缺氧的大背景下,发生过一到两次短时间小规模的充氧事件。

3) U 、 Th 、稀土等元素的研究结果表明湘西北北部地区从震旦纪晚期到寒武纪早期 U 的富集速率明显加快,而后 U 富集速率逐渐降低,指示研究区在寒

武纪早期海洋中的热水作用最为强烈,而后逐步减弱,成矿作用过程中有深部物质的参与,且矿化越好,受深部热水影响越强。

4)研究区 Ce 的研究结果表明,震旦纪到寒武纪在大的海退背景下存在3个较为明显的海平面“升降”转化界面,可以将这段地质历史划分为4个海平面升降变化阶段,在海平面升高阶段,沉积物中 Ce 异常减小,海洋中还原性增强,有利于有机质和铀多金属元素的富集。

5)湘西北北部地区矿物学方面的发现与通过地球化学方法得出的结论具有较好的一致性,晶质铀矿、铀石等矿物的晶型、共生关系和所包含的 Y 、 Se 等元素指示寒武纪时期研究区黑色岩系成矿处于较高温、强还原的条件下,且海底热流喷涌过程中携带有深源物质参与成矿。

[参考文献]

- [1] 王健,漆富成,王文全,等.湘西北含铀多金属黑色岩系矿化元素组合划分及矿物赋存特征[J].铀矿地质,2021,37(6):1049-1065.
WANG Jian, QI Fucheng, WANG Wenquan, et al. Association type of mineralization elements and mineral occurrence of uranium polymetallic-bearing black-rock series in northwestern Hunan[J]. Uranium Geology, 2021, 37(6):1049-1065(in Chinese).
- [2] 王敏,孙晓明.华南黑色岩系铂多金属矿床地质地球化学及成因[M].北京:地质出版社,2007.
- [3] 蒋红安,范鹏飞,欧阳平宁,等.湘西北凤凰地区黑色岩系地球化学特征及地质意义[J].铀矿地质,2023,39(1):71-83.
JIANG Hong'an, FAN Pengfei, OUYANG Pingning, et al. Geochemical characteristics and geological significance of black rock series in Fenghuang area of northwestern Hunan [J]. Uranium Geology, 2023, 39(1):71-83(in Chinese).
- [4] 李治兴,秦明宽,王文全,等.白竹峪铀多金属磷块岩矿床地球化学特征[J].铀矿地质,2022,38(1):25-37.
LI Zhixing, QIN Mingkuan, WANG Wenquan, et al. Geochemical characteristics of Baizhuyu U-polymetallic phosphorite deposit[J]. Uranium Geology, 2022, 38(1):25-37(in Chinese).
- [5] 刘宝珺,许效宋,潘兴南,等.中国南方古大陆沉积地壳演化与成矿[M].北京:科学出版社,1993.
- [6] 王成善,陈洪德,寿建峰,等.中国南方海相二叠系层序地层与油气勘探[M].成都:四川科学技术出版社,1998.
- [7] 漆富成,张子龙,何中波,等.扬子陆块东南缘黑色岩系

- 铀多金属成矿体系和成矿机制[J]. 铀矿地质, 2011, 27(3): 129-135, 145.
- QI Fucheng, ZHANG Zilong, HE Zhongbo, et al. Uranium-polymetallic ore-forming system and mechanism of the black rock series in the southeast continental margin of Yangtze Plate [J]. Uranium Geology, 2011, 27(3): 129-135, 145 (in Chinese).
- [8] 王健, 漆富成, 李治兴, 等. 湘西北黑色岩系非常规铀资源成矿地质特征及成矿时代[J]. 铀矿地质, 2020, 36(1): 27-33.
- WANG Jian, QI Fucheng, LI Zhixing, et al. Geological features and metallogenic age of unconventional uranium resources connecting with black-rock series in northwest of Hunan [J]. Uranium Geology, 2020, 36(1): 27-33 (in Chinese).
- [9] 蒲心纯, 周浩达, 王熙林, 等. 中国南方寒武纪岩相古地理与成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [10] 湖南省地质矿产局. 湖南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1988.
- [11] 中南三〇九队十队岩矿组. 对当冲组硅化带型铀矿床成矿特点的某些认识: 湖南南北带二叠系当冲组硅质角砾岩成因汇编[R]. 长沙: 中南地勘档案馆, 1993: 3-32.
- [12] 鲍振襄. 湘西北地区镍钼钒多金属矿床及金银矿化的地质特征与成矿条件[J]. 地质找矿论丛, 1990, 5(3): 49-62.
- BAO Zhenxiang. Geological features and metallogenic condition of Ni-Mo-V ore deposits in the northwest Hunan province [J]. Contribution to Geology and Mineral Resources Research, 1990, 5(3): 49-62 (in Chinese).
- [13] 国家国防科技工业局. 黑色岩系非常规铀资源预测评价技术指南[S]. 北京: 中华人民共和国核行业标准, 2019.
- [14] 侯东壮. 黔东南地区黑色岩系地球化学特征及沉积环境研究[D]. 湖南: 中南大学, 2011.
- [15] ARTHUR M A, SAGEMAN B B. Marine shales: depositional mechanisms and environments of ancient deposits [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1994, 22: 499-551.
- [16] 邓宏文, 钱凯. 沉积地球化学与环境[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 378.
- [17] RONA P A, SCOTT S D. A special issue on sea-floor hydrothermal mineralization: New perspectives [J]. Economic Geology, 1993, 88(8): 1935-1976.
- [18] SHOLKOVITZ E R, SCHNEIDER D L. Cerium redox cycles and rare earth elements in the Sargasso Sea [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1991, 55(10): 2737-2743.
- [19] WILD P, QUINBY-HUNT M S, ERDTMANN B D. The whole-rock cerium anomaly: A potential of eustatic sea-level changes in shales of the anoxic facies [J]. Sedimentary Geology, 1996, 101(1-2): 43-53.
- [20] 陈兰, 钟宏, 胡瑞忠, 等. 湘黔地区早寒武世黑色页岩有机碳同位素组成变化及其意义[J]. 矿物岩石, 2006, 26(1): 81-85.
- CHEN Lan, ZHONG Hong, HU Ruizhong, et al. Composition of organic carbon isotope of Early Cambrian black shale in the Xiang-Qian area and its significances [J]. Mineralogy and Petrology, 2006, 26(1): 81-85 (in Chinese).
- [21] 闵茂生, 张富生. 成因铀矿物学概论[M]. 北京: 原子能出版社, 1992.
- [22] 张静宜, 王爱珍, 李秀英, 等. 中国铀矿物志[M]. 北京: 原子能出版社, 1995: 23-38.
- [23] 陈光远, 孙岱生, 殷辉安. 成因矿物学与找矿矿物学[M]. 重庆: 重庆出版社, 1987.
- [24] 王德萌, 傅永全. 铀矿物学[M]. 北京: 原子能出版社, 1986.
- [25] 张成江, 王德萌, 傅永全, 等. 铀矿物学[M]. 北京: 原子能出版社, 2007.
- [26] 涂光炽. 分散元素可以形成独立矿床. 中国矿物岩石地球化学研究新进展(一)[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1994.
- [27] 王健, 王文全, 漆富成, 等. 湘西北晚坪坳陷黑色岩系铀多金属矿物赋存特征及指示意义[J]. 铀矿地质, 2022, 38(5): 940-948.
- WANG Jian, WANG Wenquan, QI Fucheng, et al. Indicating meaning and mineral occurrence feature of uranium polymetallic-bearing black-rock series in Xiaoping depression northwestern Hunan [J]. Uranium Geology, 2022, 38(5): 940-948 (in Chinese).
- [28] 范德廉, 张焘, 叶杰. 中国的黑色岩系及其有关矿床[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [29] 赵凤民. 中国铀矿床研究评价碳硅泥岩型铀矿床卷[R]. 北京: 中国核工业地质局, 2010.

Study on the Metallogenic Environment of Uraniferous–Polymetallic Black Rock Series in the Northern Part of Northwestern Hunan

WANG Jian, WANG Wenquan, YANG Fan, WANG Zhenyun, LI Zhixing

(CNNC Key Laboratory of Uranium Resources Exploration and Evaluation Technology, Beijing Research Institute of Uranium Geology,
Beijing 100029, China)

Abstract: The northern part of northwestern Hunan mainly includes Xiaoping depression and Ciligraben basin, which is the most abundant area of useful elements and minerals in the whole metallogenic belt. Based on the systematic geological evaluation and sampling analysis in the northern part of northwestern Hunan, the results show that the environment of uranium polymetallic mineralization in the study area was mainly a transition from deep–water to shallow–water environment, and that the marginal shallow–sea environment in the ocean is better for uranium mineralization. The characteristic parameters of trace elements indicated that the marine environment in the study area changed from relatively oxygen–rich to anoxic environment from Sinian to Cambrian period, in the context of seawater hypoxia, there were one or two short, small–scale oxygenation events in the Cambrian period. The study of elements such as U, Th, and rare earths have shown that the enrichment of U in the northern part of northwestern Hunan accelerated significantly from Late Sinian period to Early Cambrian period, and then gradually decreased, indicating that the hydrothermal process in the ocean in the study area was the strongest in Early Cambrian period, and then gradually weakened, and deep materials involvement the process of mineralization, the better mineralization was the result of the stronger influence of hydrothermal process. The study results of Ce showed that there were three obvious sea level "rise–fall" transition in the study area from Sinian to Cambrian in the context of the large sea regression, and this geological history can be divided into four stages of sea level rise and fall changes. Anomalous reduction of Ce in sediments and the reducibility in the ocean increased during the sea level rise phase favor enrichment of organic matter and uranium polymetallic. The findings of mineralogy in the study area are in good agreement with the conclusions obtained by geochemical methods. The crystal type, symbiosis and Y, Se and other elements of uraninite ore and coffinite indicated that the mineralization of black rock series in the study area was under the condition of high temperature and strong reducing conditions during the Cambrian period, and that deep source materials were carried during the seafloor heat flow gushing process to participate in the mineralization.

Keywords: uranium polymetallic; blackrock series; metallogenic environment; northwestern Hunan