

贵州三穗龙湾铀矿床地质地球化学特征及成因^{*}

金中国¹ 刘开坤² 罗开³ 郑明泓¹ 杨胜发² 李艳桃² 范云飞² 王琼²

JIN ZhongGuo¹, LIU KaiKun², LUO Kai³, ZHENG MingHong¹, YANG ShengFa², LI YanTao², FAN YunFei² and WANG Qiong²

1. 贵州省有色金属和核工业地质勘查局, 贵阳 550005

2. 贵州省有色地质和核工业地质勘查局核资源地质调查院, 贵阳 555005

3. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081

1. *Non-Ferrous Metals and Nuclear Industry Geological Exploration Bureau of Guizhou, Guiyang 550005, China*

2. *Geological Survey Institute for Nuclear Resources, Non-Ferrous Metals and Nuclear Industry Geological Exploration Bureau of Guizhou, Guiyang 550005, China*

3. *State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy Sciences, Guiyang 550081, China*

2019-02-22 收稿, 2019-06-28 改回.

Jin ZG, Liu KK, Luo K, Zheng MH, Yang SF, Li YT, Fan YF and Wang Q. 2019. Geological, geochemical characteristics and genesis of Longwan uranium deposit, Sansui, Guizhou Province. *Acta Petrologica Sinica*, 35 (9): 2830 – 2844, doi:10. 18654/1000-0569/2019. 09. 14

Abstract Longwan deposit is located in the central Guizhou-northwestern Hunan uranium mineralization belt. It is the first discovered large-scale uranium deposit in Guizhou Province in recent years. Taking Longwan deposit as the research object, this study has focused on its mineralogy, geochemistry and genesis. The result shows that the primary uranium mineral in this ore consists mainly of pitchblende, while the secondary uranium ores formed under surface conditions are well developed, mainly including silicon calcium uranium, selenium, lead, titanium, uranium and urinal phosphate mineral, etc., with nanometer-micro level of granular (particle size of $<10\mu\text{m}$), stringer, or implicit crystalline forms occurring in the uranium minerals (organic matter, clay minerals, etc.). The ore-forming materials mainly come from ore-bearing horizon, and some may come from basement magmatic rocks. The ore-forming fluid is the mixture of deep fluid and meteoric precipitation. The enrichment of uranium and associated elements is closely related to carbonaceous mudstone with abundance of organic matter, phosphate mineral, iron ore and clay minerals. The formation of uranium ore is controlled by such factors as stratum (Laobao Formation), lithology (carbonaceous mudstones), structure (fault of Sansui syncline and oblique tangential syncline, interlayer fault), sedimentary environment (marine reductive sedimentary environment of continental rifts and rifts). It experienced the mineralization process of uranium enrichment during the formation of ore-bearing rock series under the action of seafloor jets in Xuefeng period, followed by leaching, hydrothermal superposition and re-enrichment under the background of intraplate extensional tectonic movement in Yanshan-Himalaya period, is described. Epigenetic metallogenic characteristics are obvious, and the deposit belongs to sedimentary-hydrothermal superposition transformation type. The research results of this paper have important guiding role and reference significance for promoting uranium mineralization prediction and prospecting exploration and enriching carbonaceous and siliceous mudstone uranium mineralization theory in eastern Guizhou.

Key words Uranium deposit; Carbonaceous-siliceous mudstone type; Ore controlling factors; Geochemical characteristics; Deposit genesis; Longwan, Sansui

摘要 三穗龙湾矿床位于黔中-湘西北铀成矿带内,是近年勘查发现的贵州第一个大型碳硅泥岩型铀矿床。本文对龙湾铀矿床开展了矿物学、地质地球化学及矿床成因等方面研究。结果表明,该矿床矿石中的原生铀矿物主要为沥青铀矿,表生条件下形成的次生铀矿物较发育,主要有硅钙铀矿、硒铅矿、钛铀矿及铀酰磷酸盐矿物等,它们以纳米-微米级粒状(粒径多 $<10\mu\text{m}$)、细脉状或隐晶质形式赋存于有机质、粘土矿物等聚铀矿物中;成矿物质主要来源于赋矿层位,可能有少量来自基底

^{*} 本文受国家自然科学基金和贵州喀斯特科学研究中心联合项目(U1812402)及贵州省基础性公益性项目(黔国土资发[2012]294-2、黔国土资发[2015]4号)联合资助。

第一作者简介:金中国,男,1965年生,博士,研究员,矿产普查与勘探专业,E-mail:gzkyjzg@sina.com

岩浆岩,成矿流体为深部流体与大气降水的混合;铀及共生元素的富集与炭质泥岩中富含有机质、磷矿物、铁矿物、粘土矿物密切相关;铀矿形成受层位(老堡组)、岩性(炭质泥岩)、构造(三穗向斜及斜切向斜的断层、层间断层)、围岩沉积环境(陆缘裂谷、裂隙的海相还原沉积环境)等因素控制,经历了雪峰期海底喷流作用下形成含矿岩系过程中铀的初始富集→燕山-喜马拉雅期板内伸展构造背景下淋滤、热液叠加改造再富集的成矿过程,后生成矿特征明显,矿床属沉积-热液叠加改造型。本文研究成果对推进黔东地区铀矿成矿预测和找矿勘查,丰富碳硅泥岩型铀矿成矿理论具有重要意义。

关键词 铀矿床;碳硅泥岩型;控矿因素;地球化学特征;矿床成因;三穗龙湾

中图法分类号 P595; P619.14

黔中-湘西北铀成矿带是我国碳硅泥岩型铀矿的主要成矿区之一,属华南大面积低温成矿域的组成部分(Hu *et al.*, 2008, 2017; 蔡煜琦等, 2015)。前人的研究表明,我国碳硅泥岩型铀矿床主要分布于晚震旦世至二叠纪海相沉积的炭质泥岩、碳酸盐岩、硅质泥岩建造中,成矿围岩受控于陆缘裂谷和陆缘裂隙环境,伴随海底喷流作用和海底火山喷发(漆富成等, 2012),铀矿床成矿年龄远晚于赋矿围岩时代,集中在燕山-喜马拉雅期(140~30Ma)(杜乐天和王玉明, 1984; 张祖还, 1986; Hu *et al.*, 2008; 赵凤民, 2009)。贵州境内的优势铀矿床类型为碳硅泥岩型,以往的研究程度低,且主要工作集中于对赋矿围岩为碳酸盐岩的开阳白马洞(504)等矿床进行了成矿规律、地质地球化学特征、成矿时代等方面的研究(唐俊儒和朱杰辰, 1986; 陈露明, 1990; 杨瑞东等, 2014; 黄凯平和郑懋荣, 2016; 王国坤等, 2018),而对以硅质岩、泥岩为赋矿围岩和容矿岩石的铀矿床研究甚少,仅近年有少量文献对黔东地区铀成矿的地质地球化学特征进行了论述(黄旋等, 2016; 加永泽巴等, 2017)。龙湾铀矿床是近年勘查发现的贵州省第一个大型铀矿床,赋矿围岩为炭质泥岩和硅质岩,矿床地质特征与湘西北的荔枝溪、永丰(张宇龙等, 2013)以及桂北的铲子坪等碳硅泥岩型铀矿床相似(曾天柱, 2002)。该矿床勘查中未发现独立原生铀矿物,对矿石矿物组成及矿床地球化学特征未进行深入研究,对矿床形成的主控因素不明,成矿物质来源及成因等科学问题尚未解决。本研究旨在深化对龙湾铀矿床成矿地质、地球化学特征认识的基础上,揭示成矿的主控因素,探讨成矿物质来源及矿床成因,进一步丰富该类型铀矿的成矿理论,更好地指导成矿预测和找矿勘查工作。

1 区域地质背景及矿床地质

1.1 区域地质背景

研究区位于扬子陆块南部与江南造山带的结合部位,基底为新元古代变质岩建造,盖层为生宙碳酸盐岩-碎屑岩建造(Hu and Zhou, 2012; Hu *et al.*, 2017),出露地层有青白口系浅变质岩,南华系浅变质岩、碎屑岩,震旦系-志留系及二叠系、三叠系碳酸盐岩、碎屑岩,白垩系地层在南西侧零星分布,缺失泥盆系、石炭系地层。震旦-寒武系老堡组(留茶坡组)($Z \in l$)、九门冲组(ϵ_{jm})为区内铀、钒的含矿层位。NNE、NE 和 EW 向断裂发育,代表性断层有 NNE 向石阡断层

(F_1)、铜仁断层(F_3),NE 向施洞口断层(F_4)和革东断层(F_7),EW 向施秉-镇远断层(F_6)。褶皱主要以紧密和宽缓相间的阿尔卑斯式形态展布,典型褶皱有雷公山复式背斜、梵净山复式背斜、三穗向斜等。岩浆活动弱,在梵净山见与武陵运动有关的超基性岩体和酸性岩体侵入,在从江见雪峰-加里东期喷溢玄武岩和侵入的酸性岩体,在施秉-镇远、剑河-雷山分别见与加里东运动、喜马拉雅运动有关的钾镁煌斑岩出露。区内有铀、钒、重晶石、金、锑、锰、汞及铅锌等矿产产出(图 1)。

1.2 区域构造演化与古地理环境

研究区(图 2)经历了武陵至喜马拉雅多次构造运动,历次构造运动对研究区地质构造产生的影响如下:(1)武陵运动使扬子地块与华夏地块汇聚碰撞形成华南陆块和隆起的褶皱基底,梵净山群、四堡群变形变质并遭受剥蚀(毛景文等, 2005);(2)雪峰运动导致华南陆块发生裂解,在南华裂谷海槽环境沉积了下江群、丹洲群;南华裂谷继续发展,在南华纪-志留纪接受了巨厚的海相沉积,同时区域性 NE 向普安-安顺-贵阳-石阡-江口深大断层初步形成;(3)加里东期碰撞造山运动形成一系列褶皱、断层,并导致扬子地块与华夏地块再次碰撞形成华南陆块,裂谷萎缩、消亡,偏碱性煌斑岩的侵入(贵州省地质调查院, 2017);(4)海西-印支期发生大规模碰撞造山事件,形成大量的推覆、走滑断层和冲断褶皱,古特提斯洋闭合,海相沉积结束;(5)燕山-喜马拉雅运动以板内伸展走滑作用为主,形成系列 NE、NNE 向褶皱和断裂,并叠加、改造前期构造,陆相沉积的中生代白垩系地层零星残留。

在老堡组顶部及九门冲组底部的炭质泥岩中,见钒矿呈层状、似层状产出,产状与层位一致,控制走向长 1~17km,延伸 1~3.4km,亦见 5 层矿(图 3),矿体厚 0.4~4.8m,平均约 2.0m, N_2O_5 0.57%~0.70%,平均 0.62%。铀矿层中共伴生 V 0.13%~0.15%、Mo 289.85×10^{-6} ~ 482.94×10^{-6} 、Se 30.34×10^{-6} ~ 50.73×10^{-6} 、Cd 29.03×10^{-6} ~ 62.34×10^{-6} 和 Ag 10.03×10^{-6} ,均达到综合利用评价指标,综合评价共伴生矿产资源量 V、Se 为大型矿床规模,Mo、Cd 为中型矿床(贵州省有色和核工业地质局核资源地质调查院, 2015^①)。

① 贵州省有色和核工业地质局核资源地质调查院. 2015. 贵州省岑巩注溪-三穗南明铀矿整装勘查报告

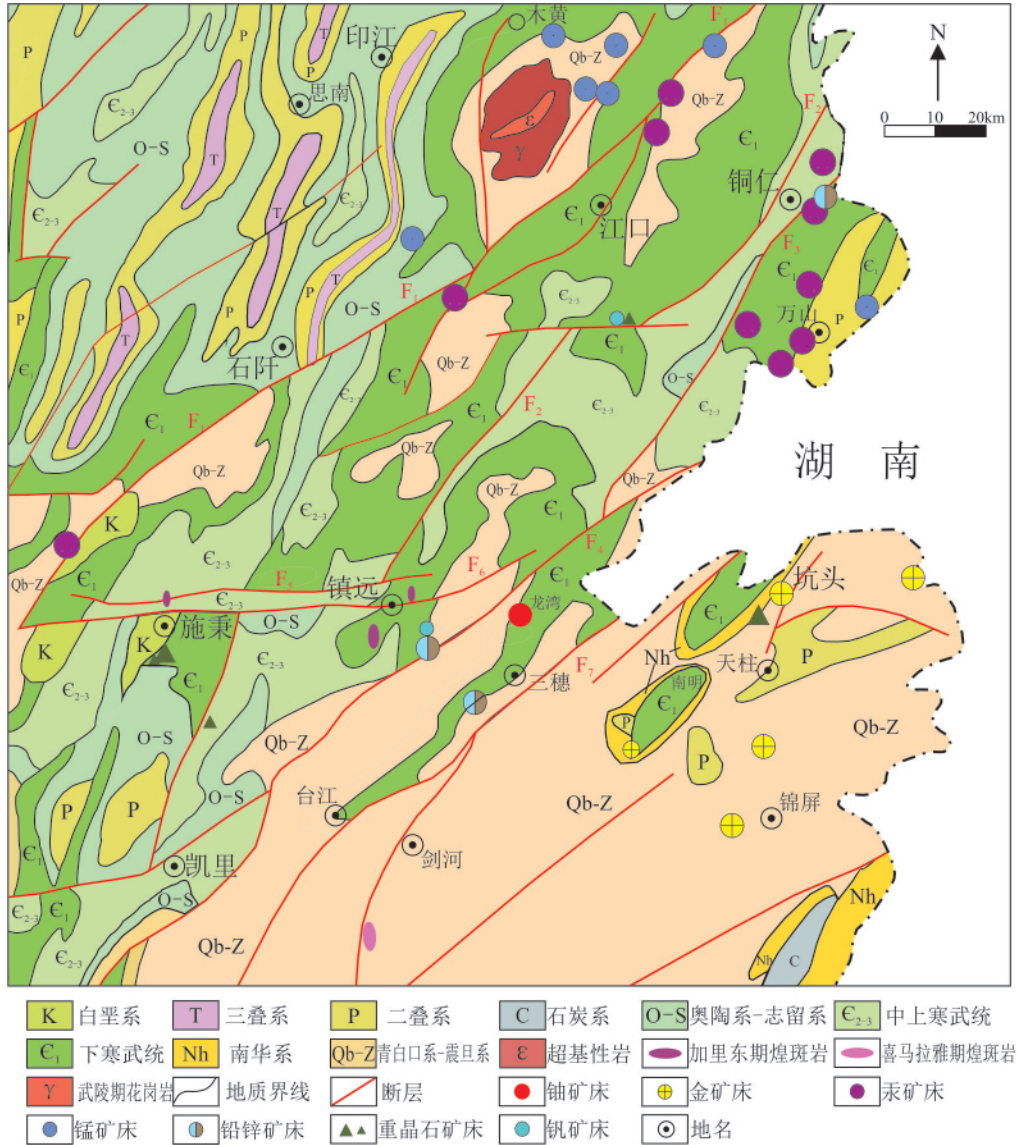


图1 贵州东部地质矿产略图
 Fig.1 Geological and mineral resource sketch map of eastern part of Guizhou

2 样品采集及分析方法

样品均采自龙滩矿床的槽探、剥土及钻探工程(表1)。L1~L13及L17~L31等28件样品的常量元素分析为电感耦合等离子体发射光谱法(其中容量法测定SiO₂、CaO;重量法测定LOI)、微量元素和稀土元素分析为电感耦合等离子体质谱法测定(U为激光荧光法,Se为原子荧光法),测试单位为四川省核工业辐射测试防护院。L14~L16等3件样品的微量元素分析为电感耦合等离子质谱法(ICP-MS),扫描电镜使用JSM-7800F型显微镜和EDAX TEAM Apollo XL能谱仪,由中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家实验室完成。常量、微量元素分析精度均优于10%。扫描电镜能

谱测试条件为加速电压20kV,电流10nA,电子束斑直径为1μm。

3 结果

3.1 矿石矿物组成

扫描电镜能谱分析表明,龙滩矿床中原生铀矿物主要为沥青铀矿,表生条件下次生氧化形成的铀矿物较发育,主要有硅钙铀矿、硒铅矿、钍铀矿及铀酰磷酸盐矿物(如芙蓉铀矿,Al₂(UO₂)(PO₄)₂(OH)₂·8H₂O)等,它们主要以纳米-微米级粒状(粒径多<10μm)、细脉状或隐晶质形式赋存于有机质、粘土矿物等聚铀矿物中。其中硅钙铀矿、钍铀矿沿黑色炭质泥岩裂隙呈脉状或不规则状产出(图4a,c),而沥青铀

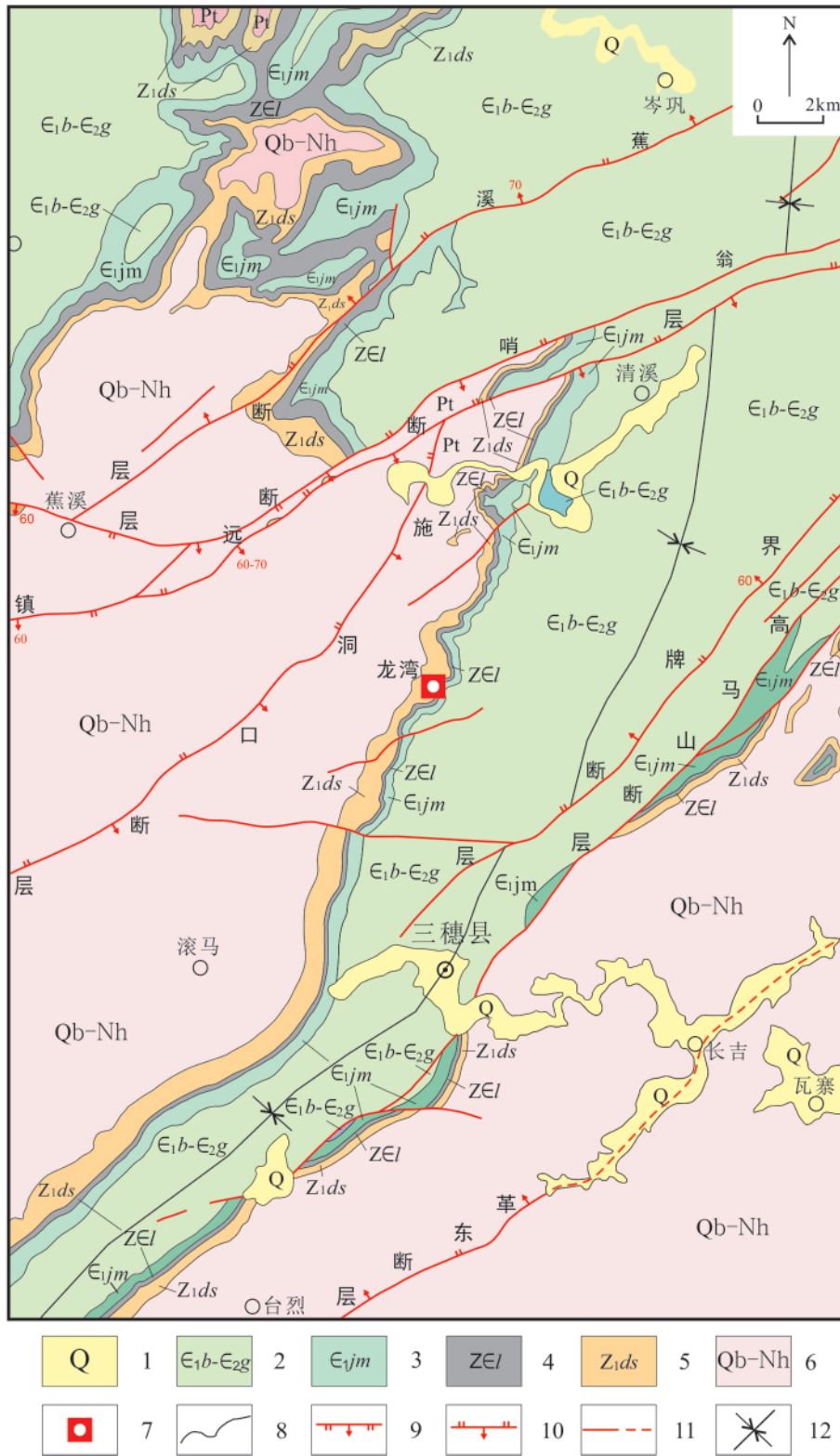


图2 三穗龙湾矿区地质图

1-第四系; 2-寒武系下统变马冲组-中统高台组; 3-寒武系下统九门冲组; 4-震旦系上统-寒武系下统老堡组; 5-震旦系下统陡山沱组; 6-青白口系-南华系; 7-铀矿床; 8-地层界线; 9-正断层; 10-逆断层; 11-性质不明及推测断层; 12-向斜轴

Fig. 2 Geological map of Longwan mine area in Sansui County

1-Quaternary System; 2-Lower Cambrian Changmachong Fm.-Middle Cambrian Gaotai Fm.; 3-Lower Cambrian Jiumenchong Fm.; 4-Upper Sinian-Lower Cambrian Laobao Fm.; 5-Lower Sinian Doushantuo Fm.; 6-Qingbaikou System-Nanhua System; 7-uranium deposit; 8-formation boundary; 9-normal fault; 10-thrust fault; 11-unknown and presumed fault; 12-syncline axis

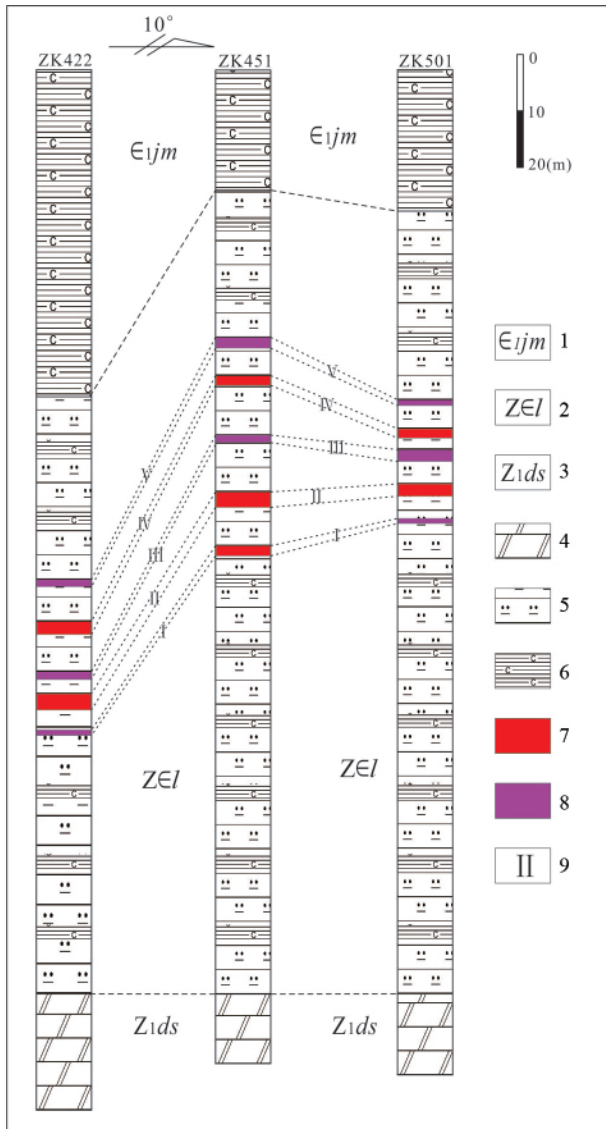


图3 三穗龙湾矿区见矿钻孔柱状图

1-九门冲组; 2-老堡组; 3-陡山沱组; 4-白云岩; 5-硅质岩; 6-炭质泥岩; 7-铀矿体; 8-铀矿(化)体; 9-铀矿(化)体编号

Fig. 3 Histogram of the drills encountered ore of Longwan mine ore, Sansui County

1-Jiumenchong Fm.; 2-Laobao Fm.; 3-Doushantuo Fm.; 4-dolomite; 5-siliceous rocks; 6-carbonaceous mudstone; 7-uranium ore bodies; 8-uranium mineralization body; 9-uranium ore (chemical) body number

矿常呈胶态肾状、钟乳状产于有机质中(图4b, d) 部分呈不规则团块状或散点状分布于石英颗粒边缘(图4e, f) 硒铅矿(图4b)和铀酰磷酸盐矿物(图4d)呈不规则粒状产出。沥青铀矿、硅钙铀矿、硒铅铀矿与钛铀矿之间呈环带状分布,可能暗示该地区铀成矿与多期热流体叠加改造作用有关。

硫化物主要见黄铁矿,以细粒状产出为主(图4a、图5a)、半自形-他形颗粒状(图4e、图5b)、莓球状(图5c)产出,含量约5% 湘西上震旦统-下寒武统黑色岩系中黄铁矿特征

表1 样品采集及特征

Table 1 Sample collection and their properties

编号	工程号	样品性质	位置
L1	ZK502-H29	硅质岩	IV 矿层上部
L2	ZK502-H30	硅质岩	IV 矿层上部
L3	ZK502-H31	含铀炭质泥岩	IV 矿层
L4	ZK502-H32	硅质岩	IV 矿层下部
L5	ZK502-H33	硅质岩	IV 矿层下部
L6	ZK502-H34	含铀炭质页岩	III 矿层
L7	ZK502-H35	硅质岩	III 矿层下部
L8	ZK502-H36	硅质岩	III 矿层下部
L9	ZK502-H37	硅质岩	III 矿层下部
L10	ZK502-H38	硅质岩	III 矿层下部
L11	ZK502-H39	含铀炭质页岩	II 矿层
L12	ZK502-H40	硅质岩	II 矿层下部
L13	ZK502-H41	含铀炭质页岩	I 矿层
L14	BT3601-D1	含炭硅质岩	III 矿层上部
L15	BT3601-D2	含铀炭质页岩	III 矿层
L16	BT3601-D3	含炭硅质岩	III 矿层下部
L17	BT-1-H1	含铀炭质页岩	III 矿层下部
L18	BT-2-H1	含铀炭质页岩	III 矿层下部
L19	BT-3-H1	含铀炭质页岩	III 矿层下部
L20	BT-4-H1	含铀炭质页岩	IV 矿层
L21	BT-5-H1	含铀炭质页岩	IV 矿层
L22	BT-6-H1	含铀炭质页岩	IV 矿层
L23	BT-7-H1	含铀炭质页岩	IV 矿层
L24	BT-10-H1	含铀炭质泥岩	II 矿层
L25	BT-11-H1	含铀炭质粉砂岩	II 矿层
L26	BT-14-H1	含铀炭质泥岩	II 矿层
L27	BT-16-H1	含铀炭质泥岩	II 矿层
L28	TC-4-H1	含铀炭质泥岩	IV 矿层
L29	TC-5-H1	含铀炭质泥岩	IV 矿层
L30	TC-16-H1	含铀炭质泥岩	IV 矿层
L31	TC-17-H1	含铀炭质泥岩	IV 矿层

注: ZK-钻孔; BT-剥土; TC-探槽

相似(吴朝东等,1999a)。细粒黄铁矿发育,其形成可能为海平面迅速上升造成海底缺氧,有机质还原出大量的HS⁻,快速与游离的Fe²⁺结合形成所致(Wilkin et al.,1996;吴朝东等,1999b)。粘土矿物多呈隐晶质、胶状、团粒状结构,以鳞片集合体、针状集合体与硅质、铁质及钙镁质矿物混杂,含量大于20%(图4d、图5a-e)。石英与有机质、粘土矿物、白云石、重晶石等混杂分布,多呈不规则形状集合体、隐晶质结构产出,少量为自形粒状,粒径1~5μm,含量约7%(图5c, e, f)。白云石十分发育,以自形、半自形菱面体状为主,少量为他形粒状产于,粒径5~10μm,与含铀炭质泥岩混杂产出(图5a-c),含量约14%。矿石中石英和白云石的组成、结构构造特征揭示,铀成矿具有后生富集特点(张待时,1982);此外,零星可见磷灰石(图5b)、长石(图5d),硅质岩中见结晶较好的重晶石,推测为海底热液活动的产物(图5e)。

3.2 常量元素特征

矿(化)层中常量元素组成以SiO₂、LOI(烧失量)、CaO、

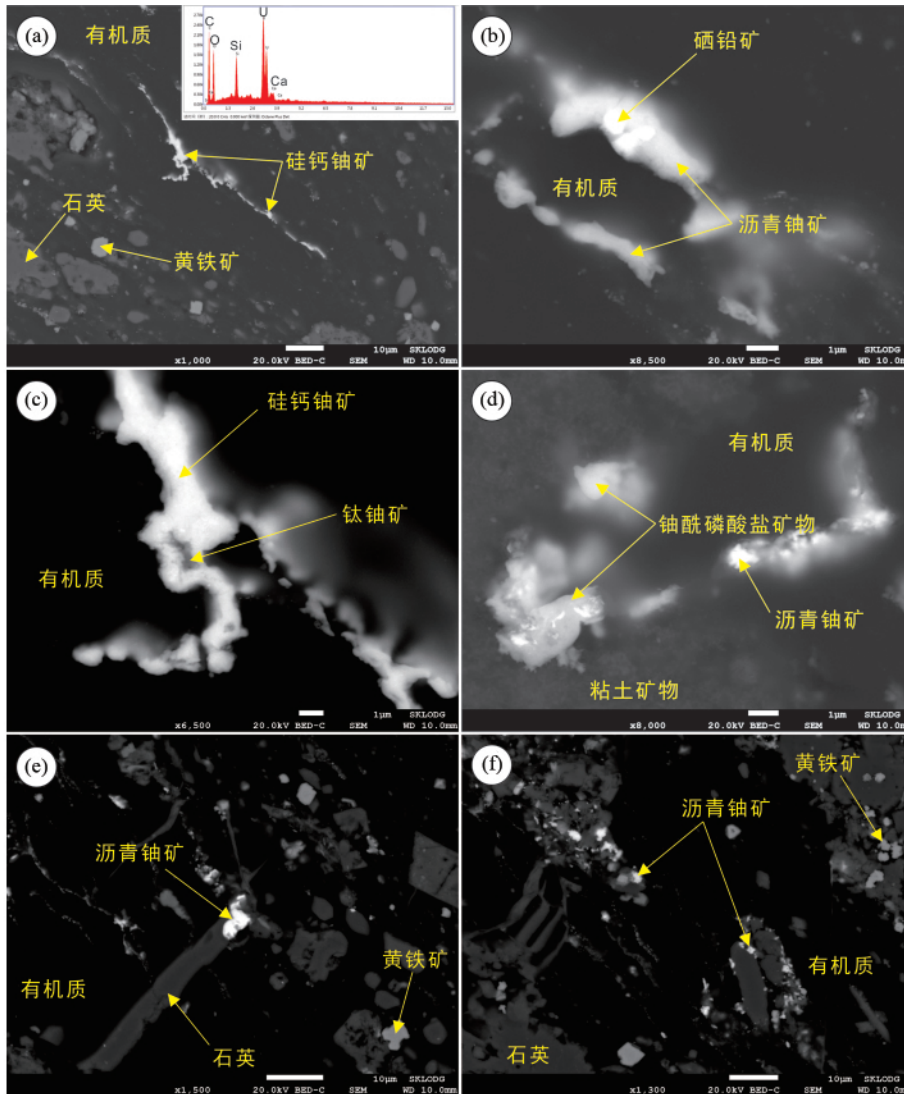


图4 龙湾铀矿床铀赋存形式 BSE 图像

(a) 硅钙铀矿呈细脉状及隐晶质形式分布于有机质中 附硅钙铀矿能谱峰图; (b) 硒铅矿被沥青铀矿包裹呈环带构造; (c) 钛铀矿与硅钙铀矿紧密伴生; (d) 沥青铀矿、铀酰磷酸盐矿物与粘土矿物紧密伴生; (e) 沥青铀矿呈团块状, 与石英紧密伴生; (f) 沥青铀矿呈散点状分布于石英颗粒边缘

Fig. 4 BSE images of uranium occurrence formed in Longwan uranium deposit

(a) uraninite distributed in the organic matter in the form of veinlets and cryptocrystalline, with spectral peak figure of uraninite; (b) selenium-lead ore presenting a ring structure surrounded by pitchblende; (c) titanium uranium closely associated with uraninite; (d) pitchblende, uranyl uranium deposit closely associated with clay minerals; (e) pitchblende clumpy and closely associated with quartz; (f) pitchblende distributed in scattered spots on the edge of quartz grain

MgO 为主, 四者之和为 74.56% ~ 94.99%, 平均 81.93%; 其次为 Fe₂O₃、P₂O₅、Al₂O₃, 平均含量 1.57% ~ 2.72%, 剩余元素含量较低(表 2)。围岩中以 SiO₂、LOI 含量高为特征, 分别为 46.35% ~ 80.96% (平均 64.21%) 和 3.08% ~ 19.29% (平均 10.74%), 同时显示 Al/(Al + Mn + Fe) 比值低、Fe/Ti 比值高的特点。据 Boström and Peterson (1969) 和 Boström *et al.* (1973) 研究, 与喷流作用有关的热液沉积物, 其 Al/(Al + Mn + Fe) 比值一般 < 0.35, Fe/Ti > 20, 研究区硅质岩的该比值为 0.12 ~ 0.35 (平均 0.19), Fe/Ti 为 39.56 ~ 141.3 (平

均 85.44), 具有典型的热液沉积特征。与漆富成等(2011) 研究扬子陆块东南缘、李有禹(1997) 研究湘西北张家界-慈利地区黑色岩系中喷流沉积的硅质岩成因相吻合。

3.3 微量元素特征

从表 3 及原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 6) 中看出, 在矿(化)层中, U、Se、Zn、Mo、Cu 显著富集, 其富集系数为 5.80 ~ 73.20, Ga 有富集趋势, 富集系数为 1.66, 而其余元素为贫化元素。在围岩中, U、Se、Zn、Mo、Cu 同样为富集元素,

表2 常量元素分析结果(wt%)

Table 2 Analysis results of constant element (wt%)

样品	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	MnO	CaO	LOI	Total	
围岩	L1	55.64	1.93	5.14	0.75	1.75	0.13	6.42	0.08	11.50	11.60	94.97	
	L2	65.11	1.29	4.49	0.63	2.63	0.07	1.35	0.06	6.00	10.55	92.19	
	L4	46.35	2.88	4.07	1.32	3.45	0.15	6.70	0.12	14.88	14.76	94.70	
	L5	78.57	1.26	4.45	0.47	0.84	0.07	3.54	0.07	6.34	3.26	98.89	
	L7	80.96	0.87	3.64	0.28	0.65	0.06	2.84	0.04	6.07	3.08	98.52	
	L8	69.36	1.88	4.57	0.76	2.61	0.08	0.95	0.09	6.44	9.46	96.22	
	L9	59.04	0.94	5.05	0.44	3.96	0.07	0.40	0.04	10.05	13.41	93.43	
	L10	55.26	1.61	4.6	0.75	3.66	0.10	0.43	0.07	0.03	9.87	19.29	95.68
	L12	67.62	1.14	4.48	0.53	2.93	0.08	0.36	0.05	0.03	6.54	11.29	95.04
	L3	39.35	3.05	4.05	1.67	4.63	0.13	0.48	0.13	0.02	11.36	27.44	92.31
L6	23.10	1.12	4.03	0.48	9.63	0.07	0.38	0.05	0.03	18.16	41.77	98.82	
L11	32.05	1.78	2.55	0.99	6.06	0.13	1.09	0.07	0.02	13.62	35.02	93.38	
L13	59.39	1.61	5.14	0.61	3.67	0.08	3.10	0.07	0.03	10.09	11.43	95.23	
L15	16.35	2.12	1.78	1.05	6.65	0.08	0.55	0.09	0.01	12.15	56.37	97.20	
L17	27.7	2.66	3.00	1.24	5.47	0.21	0.91	0.12	0.02	9.52	47.88	98.73	
L18	13.97	2.23	2.52	1.14	7.48	0.16	0.61	0.095	0.02	11.62	54.69	94.54	
L19	15.91	2.24	1.86	1.11	6.86	0.18	1.68	0.100	0.02	12.55	53.4	95.91	
L20	13.85	1.86	1.58	0.76	11.81	0.10	0.54	0.08	0.02	18.06	45.92	94.58	
矿(化)层	L21	12.46	2.05	1.71	0.97	8.53	0.14	0.77	0.09	13.67	52.66	93.07	
	L22	14.11	1.96	2.24	0.89	8.96	0.16	0.59	0.08	14.62	50.14	93.78	
	L23	39.02	6.81	4.07	2.74	3.94	0.19	2.71	0.35	9.61	29.32	98.78	
	L24	42.60	3.18	2.45	1.22	3.45	0.24	0.55	0.13	11.5	29.96	95.30	
	L25	31.1	4.16	2.88	1.39	1.72	0.17	8.75	0.18	0.01	17.2	28.22	95.78
	L26	13.70	2.95	1.54	0.88	8.82	0.19	0.41	0.09	0.02	15.7	49.38	93.68
	L27	79.40	0.70	1.59	0.25	1.80	0.07	0.16	0.03	0.02	3.02	12.55	99.59
	L28	36.51	4.80	3.82	0.72	0.40	0.10	1.70	0.23	0.01	1.83	44.36	94.47
	L29	18.85	2.87	2.26	1.36	2.98	0.22	0.77	0.13	0.01	5.42	63.63	98.50
	L30	37.77	2.63	2.56	1.13	4.81	0.18	4.62	0.12	0.02	14.11	28.12	96.07
	L31	22.7	2.57	2.20	1.28	5.94	0.19	1.00	0.12	0.02	10.35	51.83	98.20

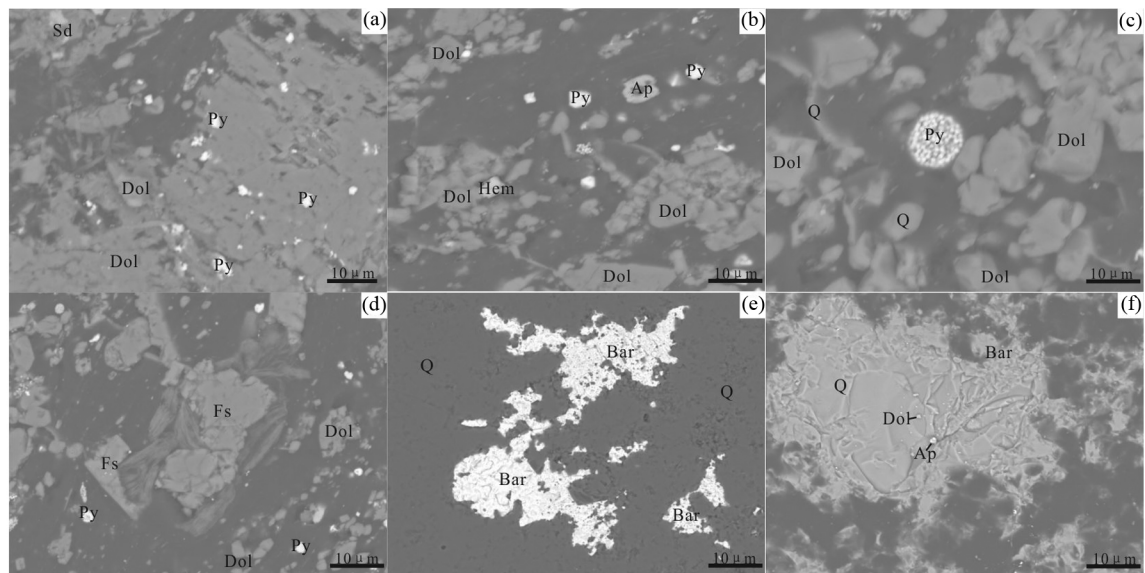


图5 龙湾铀矿床矿石扫描电镜背散射图像

Ap-磷灰石; Bar-重晶石; Dol-白云石; Hem-菱铁矿; Fs-长石; Py-黄铁矿; Q-石英

Fig. 5 Scanning electron microscope backscattering images of uranium ore in Longwan uranium deposit

Ap-apatite; Bar-barite; Dol-dolomite; Hem-siderite; Fs-feldspar; Py-pyrite; Q-quartz

表 3 微量元素分析成果 ($\times 10^{-6}$)

Table 3 Trace element analysis results ($\times 10^{-6}$)

样品	Co	Mo	Cd	Ni	Cu	Zn	W	Bi	Se	Ga	Nb	U	Th	
围岩	L1	6.88	109.4	12.65	94.56	141.5	461.7	4.60	1.07	0.66	4.42	1.51	157.5	3.40
	L2	5.17	41.87	2.31	57.41	64.79	146.7	2.38	0.12	0.21	3.06	2.42	32.50	2.30
	L4	4.66	163.2	11.01	101.8	218.2	302.4	3.00	0.12	3.79	4.31	1.06	171.8	5.60
	L5	2.66	16.90	1.94	48.96	125.7	140.4	0.89	0.13	0.69	2.03	0.65	26.60	2.50
	L7	2.19	31.27	20.72	48.68	106.1	294.8	1.21	0.08	2.08	3.25	1.03	45.5	2.50
	L8	4.96	41.92	3.72	57.93	78.31	136.4	1.98	0.11	0.62	2.70	2.70	117.0	2.50
	L9	3.50	81.18	0.68	38.84	41.57	31.82	6.98	0.14	0.09	2.05	2.16	117.4	1.65
	L10	4.92	142.7	0.81	51.77	58.92	32.63	5.85	0.11	0.15	3.84	3.10	192.9	1.46
	L12	2.62	96.38	0.43	23.74	35.68	19.55	3.04	0.07	0.06	2.06	1.80	181.5	1.85
	平均值	4.17	92.28	3.64	54.82	106.1	174.0	3.33	0.22	0.93	3.08	1.83	115.9	2.64
	富集系数	0.04	1.85	0.09	0.03	3.54	3.16	0.11	0.09	12.40	0.77	<0.01	5.71	0.03
	矿(化)层	L3	10.15	332.6	3.98	123.0	113.7	127.4	6.07	0.15	1.21	5.48	6.82	357.1
L6		7.30	336.4	2.68	122.7	73.60	85.68	7.77	0.11	0.24	4.40	4.90	661.7	2.85
L11		3.91	103.3	0.57	36.87	41.40	28.14	5.11	0.06	0.01	4.17	2.23	122.7	1.79
L13		3.14	161.0	1.78	67.75	53.00	62.23	2.65	0.07	0.40	3.19	1.20	227.0	2.50
L15		26.49	697.0	3.79	221.1	105.5	339.0	81.10	0.13	55.16	6.63	5.53	813.0	2.21
L17		14.6	1050	5.04	312	134	480	4.68	0.24	5.25	8.06	6.48	812	3.79
L18		10.2	584	2.94	158	154	319	6.14	0.16	0.89	6.43	6.59	681	2.98
L19		7.88	655	1.77	140	90.2	204	6.81	0.16	1.77	7.11	6.08	814	2.65
L20		7.77	498	3.27	166	75.6	260	5.22	0.15	1.69	4.13	4.97	652	2.20
L21		7.93	634	3.06	148	78.1	284	7.21	0.16	1.59	5.88	6.05	679	2.49
L22		9.73	476	8.38	210	288	1160	6.56	0.15	2.86	5.6	5.86	433	2.33
L23		14.4	588	14.2	318	222	500	4.9	0.33	5.78	11.3	9.26	200	6.41
L28		2.49	67.2	1.48	22.6	23.9	21.1	2.66	0.18	0.43	2.36	1.57	64	0.94
L29		21.8	108	120	114	458	412	7.17	0.34	0.66	13.4	8.7	1110	3.49
L30		14.8	548	32.9	147	738	394	3.59	0.41	2.23	8.82	7.92	804	3.54
L31	9.68	224	10.6	162	136	648	4.48	0.26	2.39	9.43	4.54	229	3.05	
平均	10.77	441.3	13.53	154.3	174.1	332.8	10.13	0.19	5.49	6.65	5.54	541.2	2.97	
富集系数	0.10	8.83	0.34	0.08	5.80	6.05	0.35	0.08	73.20	1.66	0.01	26.66	0.04	
地幔丰度	105	50	40	1960	30	55	29	2.5	0.075	4	658	20.3	79.5	

注: 地幔丰度据 McDonough and Sun (1995)

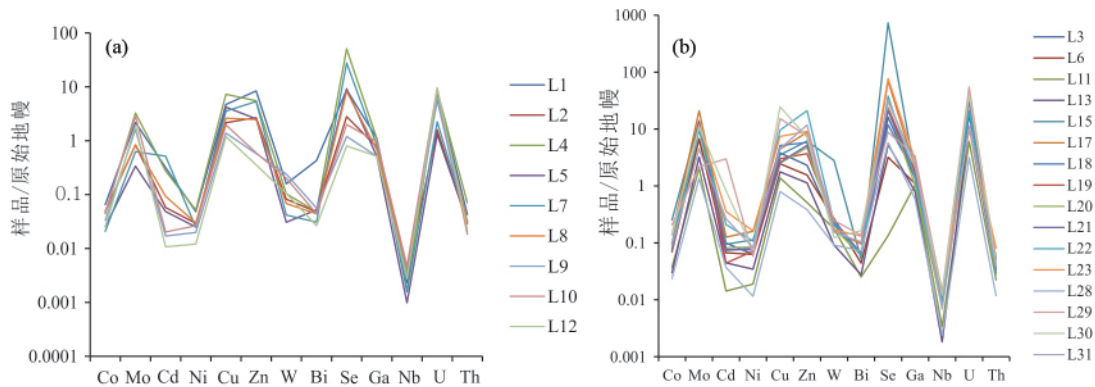


图 6 围岩 (a) 和矿石 (b) 原始地幔标准化微量元素蛛网图

Fig. 6 Primitive mantle-normalized trace element spidergrams of surrounding rock (a) and ore (b)

富集系数为 1.85 ~ 12.40。矿(化)层及围岩中微量元素富集特征相似,推测为 U 与这些元素在沉积成岩、成矿过程中地球化学性质相近,具有同迁移、同沉淀的特征。

微量元素 Ba、As、Sb、U、Bi 等含量较高,以及 U/Th > 1 是热水沉积的重要标志(彭军等 2000; 谢桂青等 2001)。研究区硅质岩的 Ba、As、Sb、U、Bi 元素平均含量分别为 2985×10^{-6} 、

表4 矿石及围岩(ME-MS)分析结果($\times 10^{-6}$)Table 4 (ME-MS) analysis results of mine and surrounding rock ($\times 10^{-6}$)

样品	Sr	Ba	V	U	Th	Sb	As	Cr	Be	Sc	Se	Ni	Mo	Tl
L14(围岩)	27.8	1600	1500	29.3	0.54	9.40	17.5	124	0.34	0.6	15	74.4	31.3	2.00
L15(矿石)	164.5	680	389	813	2.22	11.85	62.6	53	3.70	2.5	55	221	697	6.45
L16(围岩)	105.5	4370	72	16.6	0.43	0.91	10.4	38	0.33	0.3	5.0	38.9	12.50	0.53
地壳丰度	350	700	60.0	2.50	9.6	0.20	1.80	35.0	2.80	10.00	0.05*	20.0	1.50	0.45

注:地壳丰度据 Rudnick and Gao 2003; * 据刘英俊等,1986

表5 围岩稀土元素含量($\times 10^{-6}$)及特征值Table 5 Contents($\times 10^{-6}$) and characteristic values of rare earth elements in surrounding rocks

样品号	L1	L2	L4	L5	L7	L8	L9	L10	L12
La	20.24	5.56	11.49	8.51	16.30	22.43	15.99	21.61	9.31
Ce	24.02	8.43	14.91	9.36	14.19	24.74	17.83	23.93	12.57
Pr	6.67	2.09	5.09	3.01	4.29	4.31	2.42	3.21	1.53
Nd	32.54	10.89	26.76	14.74	20.71	17.72	10.59	13.13	6.40
Sm	7.35	2.77	6.79	3.59	4.84	3.59	1.84	2.28	1.11
Eu	1.74	0.70	1.66	0.99	1.41	0.93	0.52	0.58	0.36
Gd	7.55	3.05	7.05	3.70	5.20	3.79	2.05	2.49	1.22
Tb	1.33	0.58	1.30	0.69	0.98	0.65	0.34	0.40	0.20
Dy	9.54	4.35	9.54	4.84	7.09	4.54	2.23	2.62	1.28
Ho	2.01	0.93	1.99	1.05	1.48	0.94	0.49	0.55	0.26
Er	6.27	2.84	6.30	3.30	4.58	2.89	1.44	1.63	0.80
Tm	0.99	0.46	0.97	0.55	0.74	0.46	0.21	0.23	0.12
Yb	6.39	2.85	6.47	3.76	4.73	2.92	1.28	1.33	0.69
Lu	1.14	0.46	1.13	0.67	0.78	0.50	0.19	0.20	0.11
Y	86.91	37.61	75.76	39.77	54.83	35.87	22.74	25.86	11.93
Σ REE	214.7	83.56	177.2	98.61	142.1	126.3	80.16	100.0	47.89
Σ LREE	92.57	30.44	66.72	40.27	61.69	73.72	49.19	64.75	31.28
Σ HREE	122.1	53.12	110.6	58.36	80.38	52.59	30.93	35.35	16.58
Σ Ce/ Σ Y	0.76	0.57	0.60	0.69	0.77	1.40	1.59	1.83	1.89
δ Ce	0.47	0.56	0.44	0.90	0.39	0.57	0.65	0.66	0.76
δ Eu	0.71	0.73	0.73	0.82	0.86	0.76	0.81	0.74	0.94
(La/Sm) _N	0.41	0.30	0.25	0.36	0.51	0.93	1.30	1.42	1.26
(Gd/Yb) _N	0.68	0.62	0.63	0.57	0.64	0.75	0.93	1.09	1.02
(La/Yb) _N	0.23	0.14	0.13	0.17	0.25	0.56	0.92	1.20	0.99

13.95×10^{-6} 、 5.16×10^{-6} 、 22.95×10^{-6} (表4)、 0.22×10^{-6} (表3),含量分别是地壳丰度(Rudnick and Gao, 2003)的4.3、7.8、25.8、9.2、1.3倍, $U/Th = 35.5$ 远大于1,具备热水沉积硅质岩的微量元素地球化学特征。而Mo、Tl、V富集跟黑色含铀炭质泥岩中富有机质含量和粘土矿物有关,有机质和粘土矿物会对Mo、Tl、V强烈吸附(刘英俊等,1986)。含铀的炭质泥岩中Se超常富集,这与 Se^{2-} 、 S^{2-} 的离子半径(1.92Å、1.84Å)、离子电位(-1.05eV、-1.01eV)、晶格系数(1.10、1.15)均相近有关,因此在沉积成岩和成矿过程中易发生类质同象赋存于硫化物或硫酸盐矿物中(漆富成等,2014)。

矿石中LOI含量高,U与LOI呈明显的正相关关系(图7),推测为矿石富含炭质、铀矿物富含水化合物所致。U与CaO呈正相关关系,可能与 Ca^{2+} (1.12Å)、 U^{4+} (1.00Å)离子

半径相近,在成岩成矿过程中相互以类质同象置换有关(刘英俊等,1986;余海东等,2018);U与 SiO_2 呈负相关关系,可能为容矿岩石对U、Si有较大的吸附差异和碱性还原条件下,部分Si以 HSO_3^- 流失,而U沉淀富集所致。

3.4 稀土元素特征

稀土元素特征显示(表5、表6),围岩中 Σ REE = 47.89 $\times 10^{-6}$ ~ 214.7 $\times 10^{-6}$ (平均119.0 $\times 10^{-6}$),其 Σ LREE/ Σ HREE = 0.57 ~ 1.89(平均1.12), δ Ce = 0.46 ~ 0.88(平均0.64), δ Eu = 0.71 ~ 0.94(平均0.79);矿(化)层中 Σ REE = 43.68 $\times 10^{-6}$ ~ 349.0 $\times 10^{-6}$ (平均156.1 $\times 10^{-6}$), Σ LREE/ Σ HREE = 0.64 ~ 2.47(平均1.36), δ Ce = 0.47 ~ 1.18(平均0.72), δ Eu = 0.62 ~ 1.04(平均0.84)。总体显示:(1)围岩和矿(化)层中 Σ REE含量变化均较大,LREE相对富集, δ Ce、

表6 矿(化)层稀土元素含量($\times 10^{-6}$)及特征值

Table 6 Contents($\times 10^{-6}$) and characteristic values of rare earth elements in ore (mineralization) layer

样品号	L3	L6	L11	L13	L15	L17	L18	L19	L20	L21	L22	L23	L27	L29	L30	L31
La	8.90	27.5	9.79	20.6	26.4	40.1	12.8	13.2	29.6	30.7	23.80	36.00	9.98	15.00	47.20	37.20
Ce	17.3	29.5	12.9	19.7	31.7	48.1	25.6	28	33.4	38.4	28.80	45.00	16.20	23.10	45.40	43.90
Pr	3.21	3.96	1.47	4.50	4.53	7.44	2.42	2.22	5.12	4.58	3.90	8.19	1.76	2.88	9.68	6.85
Nd	16.5	15.7	5.76	20.5	18.5	28.8	8.64	10.1	19.3	18.4	16.40	31.60	6.79	11.4	39.7	27.6
Sm	3.84	2.70	0.95	5.33	3.57	5.76	1.7	2.1	3.66	3.94	3.22	6.64	1.30	2.23	8.11	5.50
Eu	0.92	0.62	0.23	1.37	0.79	1.77	0.56	0.76	1.08	1.09	1.01	1.98	0.41	0.84	2.74	1.61
Gd	4.23	2.94	1.00	5.94	4.24	6.52	1.8	2.37	4.16	4.24	3.77	7.10	1.48	2.72	9.88	6.34
Tb	0.76	0.46	0.15	1.04	0.63	1.28	0.34	0.45	0.78	0.8	0.69	1.38	0.26	0.47	1.90	1.18
Dy	5.63	3.01	0.93	7.30	3.98	9.28	2.24	3.34	5.96	5.68	4.88	8.96	1.5	2.7	12.6	7.74
Ho	1.22	0.66	0.19	1.45	0.87	1.98	0.45	0.64	1.19	1.28	1.06	2.03	0.34	0.64	2.98	1.70
Er	3.85	2.06	0.61	4.26	2.34	5.12	1.17	1.48	3.48	3.37	2.75	5.74	0.79	1.82	8.66	4.48
Tm	0.61	0.32	0.087	0.62	0.31	0.78	0.18	0.24	0.56	0.52	0.43	0.92	0.12	0.29	1.34	0.72
Yb	3.97	2.13	0.56	3.63	1.76	4.3	1.02	1.24	2.96	2.94	2.44	5.66	0.64	1.68	7.62	4.06
Lu	0.69	0.39	0.098	0.58	0.23	0.68	0.18	0.20	0.48	0.46	0.40	0.97	0.12	0.26	1.18	0.64
Y	57.67	33.40	8.95	59.34	46.30	88.88	19.98	24.18	61.68	66.00	51.00	83.80	11.70	29.80	150.0	82.80
Σ REE	129.2	125.4	43.68	156.2	146.2	249.9	79.00	90.44	173.3	182.4	144.6	246.0	53.39	95.83	349.0	232.3
Σ LREE	50.60	80.05	31.09	72.02	85.49	132.0	51.72	56.38	92.16	97.11	77.13	129.4	36.44	55.45	152.8	122.7
Σ HREE	78.64	45.36	12.59	84.16	60.66	117.9	27.28	34.06	81.17	85.29	67.42	116.6	16.95	40.38	196.2	109.7
Σ Ce/ Σ Y	0.64	1.76	2.47	0.86	1.41	1.12	1.90	1.66	1.14	1.14	1.14	1.11	2.15	1.37	0.78	1.12
δ Ce	0.74	0.64	0.78	0.47	0.66	0.64	1.05	1.18	0.62	0.74	0.68	0.60	0.88	0.80	0.48	0.63
δ Eu	0.69	0.67	0.72	0.74	0.62	0.88	0.97	1.04	0.84	0.81	0.71	0.73	0.90	1.04	0.93	0.83
(La/Sm) _N	0.35	1.53	1.55	0.58	1.11	1.04	1.13	0.94	1.21	1.17	1.11	0.81	1.15	1.01	0.87	1.01
(Gd/Yb) _N	0.62	0.80	1.03	0.95	1.39	0.88	1.02	1.11	0.81	0.83	0.89	0.73	1.34	0.94	0.75	0.90
(La/Yb) _N	0.16	0.95	1.27	0.42	1.10	0.68	0.92	0.78	0.73	0.77	0.72	0.47	1.14	0.65	0.45	0.67

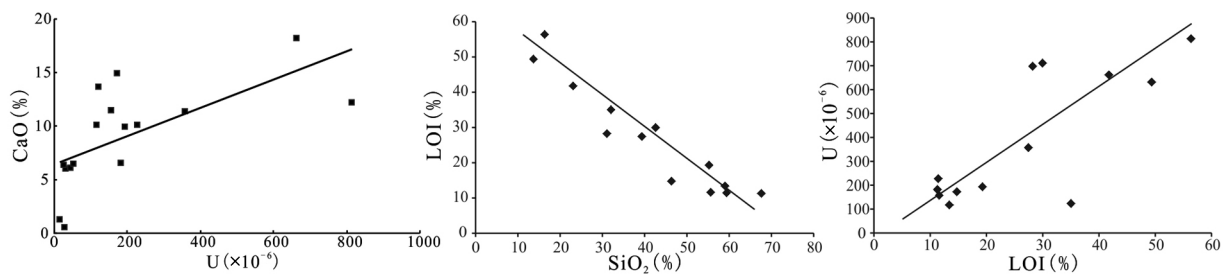


图7 元素的相关性图解

Fig.7 Diagrams of the correlation of elements

δ Eu 呈中等负异常,矿(化)层较围岩更富集 REE; (2) (La/Sm)_N、(La/Yb)_N 和 (Gd/Yb)_N 比值反映围岩和矿(化)层中 LREE 与 HREE、HREE 元素之间分异均不明显,但矿(化)层中 LREE 有弱分异特征; (3) 稀土元素配分模式均为形态相似的右倾平坦型(图 8)、HREE 随原子量增大逐渐富集,与赣北保源地区碱硅泥岩型铀矿床、湘西地区晚震旦世-早寒武世黑色岩系稀土配分模式相同(郭葆堃等,1995;吴朝东等,1999b),揭示成矿物质可能主要来自赋矿地层。 δ Eu 负异常为铀矿形成于还原环境, Eu²⁺ 与 REE³⁺ 发生分异的反映; δ Ce 负异常为弱碱-碱性、还原-氧化的海相沉积条件下(pH = 7.0 ~ 7.8, Eh = -0.7 ~ +0.7), Ce³⁺ 可转变为 Ce⁴⁺ (李胜荣和高振敏,1995), Ce⁴⁺ 相对于其他 LREE 有较高的离子电势和较

低的流动性,易与其他 LREE³⁺ 发生分离而贫 Ce(Esmaily *et al.*, 2010)。

4 讨论

4.1 成矿物质来源

4.1.1 成矿的铀来源

龙湾铀矿床矿(化)层样品在 La/Yb- Σ REE 图解中的投影大部分落入钙泥质沉积岩范围,极少点落入大洋拉斑玄武岩、大陆拉斑玄武岩和花岗岩中(图 9),认为主成矿元素 U 富集成矿的物源主要来自赋矿围岩,可能有少量来自武陵-雪峰期喷溢玄武岩、侵入花岗岩,与梵净山花岗岩体 U 含量

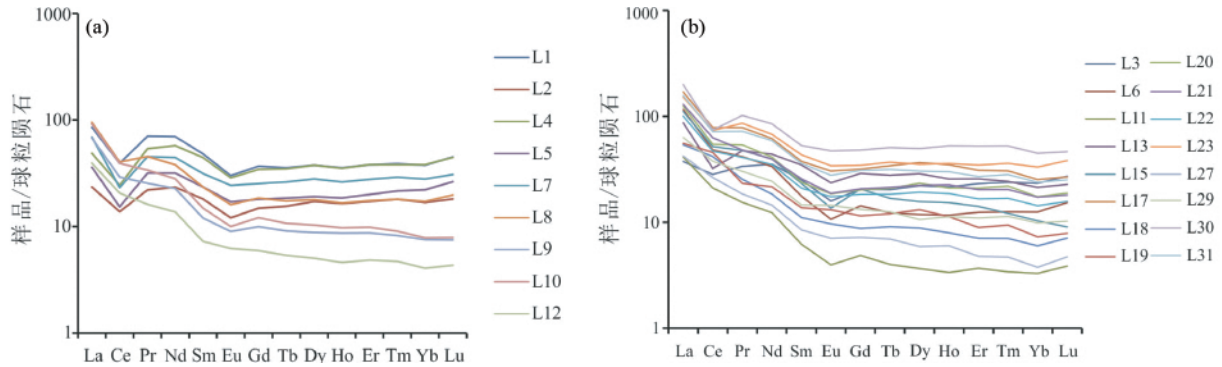


图8 围岩(a)及矿体(b)的球粒陨石标准化稀土元素配分曲线

Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns of in surrounding rock (a) and ore body (b)

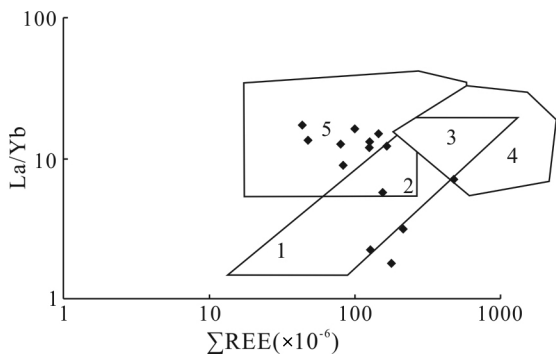


图9 龙湾铀矿床矿(化)层 La/Yb-ΣREE 图解中的投影(据 Allegre and Michard, 1974)

1-大洋拉斑玄武岩; 2-大陆拉斑玄武岩; 3-碱性玄武岩; 4-花岗岩; 5-钙泥质沉积岩

Fig. 9 La/Yb vs. ΣREE diagram of mineralization layer in Longwan uranium deposit (after Allegre and Michard, 1974)

1-ocean ridge basalt; 2-continental basalt; 3-alkali basalt; 4-granite; 5-carbonate and clastic rock

高($52.3 \times 10^{-6} \sim 62.8 \times 10^{-6}$) (贵州省有色金属和核工业地质勘查局七总队, 2013^①), 可能提供物源部分初始物源有关, 也与商朋强等(2007)利用大量 S、Pb、Sr、Rb 等同位素对华南热液铀矿床的物源研究结果一致。这是由于在华南震旦-寒武纪过渡时期, 雪峰运动导致基底梵净山群、下江群及其侵入或喷溢其中的岩体隆起, 风化剥蚀为形成富铀的老堡组提供物源, 海相裂谷还原环境沉积了铀地球化学背景高 (290×10^{-6} , Zhang, 1983)、($14 \times 10^{-6} \sim 270 \times 10^{-6}$, 杜乐天和王玉明, 1984) 的老堡组碳硅泥岩建造。同时海底喷流热水作用可能带来 U、V、Mo、Zn、Cu 等成矿物质及对铀成矿具有重要控制作用的 CO₂ 等深源矿化剂 (Hu *et al.*, 2008, 2009; 漆富成等 2012), 促进铀富集成矿。

4.1.2 成矿流体来源

研究表明, 华南地区铀成矿流体与成矿物质并非同源, 成矿早期以深源流体与向下循环地下水混合为主, 含矿围岩中的铀在主要以晶质铀矿、含铀副矿物和分散吸附态存在;

成矿中晚期演化为大气降水为主的成矿热液, 铀主要以碳酸铀酰络合物 $UO_2(CO_3)_2^{-2}$ 和 $UO_2(CO_3)_4^{-3}$ 形式迁移 (徐达忠, 1990; 胡瑞忠等 2004, 2015; Kalin *et al.*, 2005; Hu *et al.*, 2008, 2009; 蔡郁文等 2017), 迁移过程中依赖于深部循环的矿化剂 (主要为 ΣCO_2)、白垩纪-第三纪张性断裂构造活动及其热动力的驱动, 在一定部位由于温度、压力等物理化学条件变化, U^{6+} 被还原为 U^{4+} 沉淀。龙湾矿床矿石 (40 件样品)、硅质岩 (36 件样品) 中, $\delta U = 2U/(U + Th/3)$ 分别为 1.96 ~ 1.99 (平均 1.98) 和 1.78 ~ 1.99 (平均 1.96), 均远大于 1 (Wignall, 1994); $Al/(Al + Fe + Mn)$ 均值为 0.19, $Fe/Ti > 20$, 且发育大量重晶石 (图 5e), 区域上 Z *l* 硅质岩 $\delta^{30}Si$ 、 $\delta^{18}O$ 均值分别为 0.314‰ 和 17.3‰ (张位华等 2003), 表明该区硅质岩壳源特征明显, 热液活动强烈, 揭示沉积成岩期的流体主要来自深源, 后期成矿流体主要来自大气降水, 与区域成矿流体特征一致。

4.1.3 热源

尽管在 140 ~ 30Ma 铀成矿期, 研究区仅在外围的剑河-雷山一带零星见喜马拉雅期 (古近纪) 煌斑岩体, 未见大规模的岩浆活动的报道, 但这时期大陆气候炎热、干燥, 构造 (尤其张性构造) 活动频繁, 推测热液铀矿的热源以大地热流生热为主, 其次有构造生热和放射性生热 (商朋强等 2007)。

4.2 成矿机制及成因

在震旦-寒武纪陆缘裂谷和陆缘裂陷缺氧还原环境下, 伴随海底喷流热水作用, 沉积了富炭质、硅质、磷质、碳酸盐岩及成矿物质的碳硅泥岩建造, 在继承蚀源区较丰富铀的同时, 又不断吸附溶解在海水中的铀 (约 3.3×10^{-6} , 蔡郁文等, 2017), 初始富集形成华南地区铀地球化学背景高的铀源层。白垩纪-第三纪的燕山-喜马拉雅构造运动导致区域断层的复活、加剧岩石圈伸展活动的发生发展, 形成系列断陷盆地 (Hu *et al.*, 2008, 2009), 层间断层破碎带和不同序次的褶

① 贵州省有色金属和核工业地质勘查局七总队. 2013. 贵州省铀矿分布规律和成矿预测

皱、断层,为铀的活化迁移和富集成矿提供通道和场所。地壳拉张形成的断陷盆地利于水源汇集,深切基底和盖层的大断裂形成了较好的水文地质循环系统,构造应力驱动作用,促使深源水上涌,并不断与下渗的大气降水混合形成混合热水溶液,在白垩纪-第三纪为干燥炎热的古气候条件(区内零星分布白垩系地层),向下渗的大气降水含氧度高,U含量为 $n \times 10^{-5}$ g/L,比潮湿地区高1~2个数量级(李延河等,2016)。混合热水溶液在运移的途中不断吸收、浸取地层内的近源成矿物质,并与携带的远源含矿物质形成富 U^{+6} 的碳酸铀酰络合物成矿流体,迁移进入老堡组碳硅泥岩建造,其有机质在热演化及新生代古近纪煌斑岩(剑河-雷山地区)的侵入作用下(贵州省地质调查院,2017),产生大量 H_2 、 CH_4 、 H_2S 、 CO 、 CO_2 等还原剂,形成还原地球化学障(漆富成,2015;李延河等,2016;蔡郁文等,2017),成矿热液中 U^{+6} 被还原为 U^{+4} 沉淀,并与初始富集的铀叠加形成工业铀矿体。成因属沉积-热液叠加改造的铀矿床。

4.3 主要控矿因素

4.3.1 层位及岩性控矿

龙湾铀矿床矿体呈层状、似层状产于震旦-寒武系老堡组中上部硅质岩与炭质泥岩互层的炭质泥岩内,其它层位中未见铀(化)矿体,铀矿产出受老堡组控制明显。老堡组炭质泥岩中细粒黄铁矿等含铁矿物发育,隐晶质、胶状粘土矿物及有机质丰富,特殊的岩性组合不仅为铀初始聚集提供了较好的吸附剂,而且还为后生铀矿床的形成提供了有利的环境与储矿场所。据研究(蔡郁文等,2017),含铁矿物(Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 具氧化-还原性)、含磷矿物(磷酸根具络合性)、粘土矿物(具吸水膨胀、可塑、吸附、离子交换、表面积大等特性)、有机质(具还原、络合、吸附和吸收等作用)在沉积成岩水体中对铀有强烈的吸附性,后生成矿过程中对铀的迁移及富集起着主导作用,且粘土矿物在后生成矿过程中是最有利的聚铀剂,超过黄铁矿的5倍(Zhang,1983)。因此,层位和岩性是铀成矿的必要条件。

4.3.2 构造控矿

前述,该区经历了武陵-喜马拉雅的多次构造运动,其中燕山-喜马拉雅期板内伸展构造运动与区域碳硅泥岩型铀成矿关系密切。研究区构造发育,并具有分级控矿特征,具体表现为石阡断层(F_1)、施洞口断层(F_4)-铜仁断层(F_3)控制区域铀矿及其他矿产呈NE向带状展布(图1),高马山断层、施洞口断层夹持的三穗断陷盆地(向斜)控制了铀富含矿岩系分布及矿床产出(图2),白垩-第三纪的燕山-喜马拉雅期伸展构造运动背景,导致地壳拉张、深大断裂复活或形成,促进了地幔与地壳表层的沟通(胡瑞忠等,2004),斜切向斜的断层为铀活化迁移提供了热源、运移通道,断陷盆地(向斜)含矿岩系断层叠加部位或次级褶皱发育区,为铀富集成为工业矿体提供了储存条件。构造是铀成矿的通道和富集、聚集的外动力。

4.3.3 沉积环境控矿

上扬子地台在震旦纪/寒武纪的转折期存在一次较大规模的缺氧事件,发育广泛的硅质岩、炭质泥岩是地壳伸展-差异升降-热液上升(伴随火山活动)-快速海侵(伴随上升洋流)-表层生产力增强-加剧海底缺氧的复合动力学背景形成的沉积产物,缺氧还原环境对有机质、黄铁矿等聚铀剂的保存和演化较为有利(吴朝东等,1999a;陈兰等,2006;汪正江等,2011)。

前述研究区老堡组硅质岩的 $\delta^{30}Si$ 、 $\delta^{18}O$ 均值为0.314‰和17.3‰,Sr/Ba比值总体<1显示,其沉积环境为深海-半深海滞流环境(张位华等,2003),与区域含矿岩系形成于陆缘裂谷海槽台地边缘斜坡相(灯影期)和陆缘裂陷的深水滞流陆棚相(牛蹄塘期)一致。龙湾矿床炭质泥岩矿石中矿物组合为黄铁矿+石英或玉髓+磷灰石+有机质,硅质岩中为重晶石+微晶石英+有机质组合。弱碱性还原-弱还原环境($pH=7.0\sim 7.8$, $Eh=-0.3\sim 0.1v$)沉积的含铀海相碳硅泥岩建造,富含有机质、细粒黄铁矿和胶状粘土矿物,为U、Se、Mo等多金属初始富集提供了条件(李胜荣和高振敏,1995;漆富成等,2015)。有利沉积环境是铀初始富集、保存的场所。

4.4 找矿预测

2011年前,黔东南地区上震旦统-下寒武统的地质找矿工作,主要针对赋存在九门冲组的钒矿和老堡组的重晶石矿,对铀矿的系统勘查一直未涉及。近年,在龙湾矿区不足20km²范围内探获的铀总资源量达超大型的矿床,综合评价的Se、V、Mo、Cd等共伴生矿产也达中大型矿床规模,找矿取得重大突破。区域成矿背景相同、地质条件相似的三穗向斜区轴部及外围的北部、东北部含矿岩系老堡组分布面积>500km²,且在桂北、湘西北地区的该层位中已探明碳硅泥岩型大中型铀矿床10余个(漆富成等,2011),表明该区找矿远景好、潜力大,建议应加强铀矿地质找矿勘查工作和区域成矿规律研究,进一步扩大铀资源储量的同时,丰富碳硅泥岩型铀矿成矿理论。

5 结论

(1)扫描电镜分析表明,龙湾铀矿床原生铀矿主要为沥青铀矿,表生条件下氧化形成的次生铀矿物较发育,主要有硅钙铀矿、硒铅矿、钽铀矿及铀酰磷酸盐矿物等,它们以纳米-微米级赋存于有机质、粘土矿物等聚铀矿物中。矿床成因属沉积-热液叠加改造型。

(2)La/Yb-ΣREE图解及稀土配分模式显示,成矿物质U主要来源于赋矿地层,可能部分来自基底岩浆岩体,成矿流体为深部流体与大气降水的混合。有机质的热演化及拉张环境煌斑岩的侵入作用产生的大量还原剂,是铀沉淀富集成矿的重要地球化学障。

(3) 震旦-寒武系老堡组及其发育的炭质泥岩是铀矿床形成的必要条件, 陆缘裂谷和陆缘裂陷还原沉积环境有利铀初始富集, 干燥炎热气候和富氧地表水沿联通基底和盖层的构造通道渗滤淋积含铀层位, 是后生富铀矿成矿的重要因素。

致谢 对审稿专家胡瑞忠研究员、黄智龙研究员、陈佑纬副研究员提出的宝贵修改意见及编辑部诸位老师付出的辛勤劳动表示衷心感谢!

References

- Allegre CJ and Michard G. 1974. Introduction to Geochemistry. Boston: D. Reidel Pub. Co., 1-153
- Boström K and Peterson MNA. 1969. The origin of aluminum-poor ferromanganous sediments in areas of high heat flow on the East Pacific Rise. *Marine Geology*, 7(5): 427-447
- Boström K, Rydell H and Joensuu O. 1973. Langban: An exhalative sedimentary deposit? *Economic Geology*, 74(5): 1002-1011
- Cai YQ, Zhang JD, Li ZY, Guo QY, Song JY, Fan HH, Liu WS, Qi FC and Zhang ML. 2015. Outline of uranium resources characteristics and metallogenetic regularity in China. *Acta Geologica Sinica*, 89(6): 1051-1069 (in Chinese with English abstract)
- Cai YW, Wang HJ, Wang XM, He K, Zhang SC and Wu CD. 2017. Formation conditions and main controlling factors of uranium in marine source rocks. *Advances in Earth Science*, 32(2): 199-208 (in Chinese with English abstract)
- Chen L, Zhong H, Hu RZ and Xiao JF. 2016. Composition of organic carbon isotope of Early Cambrian black shale in the Xiang-Qian area and its significances. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 26(1): 81-85 (in Chinese with English abstract)
- Chen LM. 1990. Discussion on the origin of uranium deposit No. 504. *Uranium Geology*, 6(3): 135-145 (in Chinese with English abstract)
- Du LT and Wang YM. 1984. Uniform metallogenic mechanism among the granite, volcanic, carbonaceous-siliceous-pelitic rock and sandstone-hosted uranium deposits in South China. *Radioactive Geology*, (3): 1-10 (in Chinese)
- Esmacily D, Rahimpour-Bonab H, Esna-Ashari A and Kananian A. 2010. Petrography and geochemistry of the Jajarm karst bauxite ore deposit, NE Iran: Implications for source rock material and ore genesis. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 19: 267-284
- Guizhou Geological Survey. 2017. The Regional Geology of China, Guizhou Province. Beijing: Geological Press House, 1-1098 (in Chinese)
- Guo BC, Zhang DS, Li SX and Zhu JC. 1995. Genesis of the carbonate-siliceous-pelitic type uranium deposits in Baoyuan area. *Uranium Geology*, 11(5): 266-272 (in Chinese with English abstract)
- Hu RZ, Bi XW, Su WC, Peng JT and Li CY. 2004. The relationship between uranium metallogenesis and crustal extension during the Cretaceous-Tertiary in South China. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 153-160 (in Chinese with English abstract)
- Hu RZ, Bi XW, Zhou MF, Peng JT, Su WC, Liu S and Qi HW. 2008. Uranium metallogenesis in South China and its relationship to crustal extension during the Cretaceous to Tertiary. *Economic Geology*, 103(3): 583-598
- Hu RZ, Burnard PG, Bi XW, Zhou MF, Peng JT, Su WC and Zhao JH. 2009. Mantle-derived gaseous components in ore-forming fluids of the Xiangshan uranium deposit, Jiangxi Province, China: Evidence from He, Ar and C isotopes. *Chemical Geology*, 266(1-2): 86-95
- Hu RZ and Zhou MF. 2012. Multiple Mesozoic mineralization events in South China: An introduction to the thematic issue. *Mineralium Deposita*, 47(6): 579-588
- Hu RZ, Mao JW, Hua RM and Fan WM. 2015. Intra-Continental Mineralization of South China Craton. Beijing: Science Press, 1-903 (in Chinese)
- Hu RZ, Fu SL, Huang Y, Zhou MF, Fu SH, Zhao CH, Wang YJ, Bi XW and Xiao JF. 2017. The giant South China Mesozoic low-temperature metallogenic domain: Reviews and a new geodynamic model. *Journal of Asian Earth Sciences*, 137: 9-34
- Huang KP and Zheng MR. 2016. Geochemical characteristics and genesis of Baimadong uranium deposit in Guizhou. *Mineral Resources and Geology*, 30(4): 609-614 (in Chinese with English abstract)
- Huang X, Chun G and Wang GK. 2016. Geological and geochemical characteristics and genesis of carbonaceous-siliceous-pelitic rock type uranium deposits in eastern Guizhou. *Mineral Resources and Geology*, 30(1): 99-103 (in Chinese with English abstract)
- Kalin M, Wheeler WN and Meinrath G. 2005. The removal of uranium from mining waste water using algal/microbial biomass. *Journal of Environmental Radioactivity*, 78(2): 151-177
- Kayun ZB, Wang GH, Langka WQ and Wang C. 2015. Uranium mineralization characteristics and ore-prospecting prospect of a synclinal black rock series in southeastern Guizhou Province. *Modern Mining*, (2): 37-39, 42 (in Chinese)
- Li SR and Gao ZM. 1995. REE characteristics of black rock series of the Lower Cambrian Niutitang Formation in Hunan-Guizhou provinces, China, with a discussion on the REE patterns in marine hydrothermal sediments. *Acta Mineralogica Sinica*, 15(2): 225-229 (in Chinese with English abstract)
- Li YH, Duan C, Zhao Y, Pei HX and Ren SL. 2016. The role of oxidizing reducing barrier in mineralization of hydrothermal uranium ore. *Acta Geologica Sinica*, 90(2): 201-218 (in Chinese with English abstract)
- Li YY. 1997. The geological characteristics of sea-floor exhalation-sedimentary chert in Lower Cambrian black shales in Dayong-Cili area, Hunan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 13(1): 121-126 (in Chinese with English abstract)
- Liu YJ, Cao LM, Li ZL, Wang HN, Chu TQ and Zhang JR. 1986. *Geochemistry of Elements*. Beijing: Science Press, 1-517 (in Chinese)
- Mao JW, Xie GQ, Li XF, Zhang ZH, Wang YT, Wang ZL, Zhao CS, Yang FQ and Li HM. 2005. Geodynamic process and metallogeny: History and present research trend, with a special discussion on continental accretion and related metallogeny throughout geological history in South China. *Mineral Deposits*, 24(3): 193-205 (in Chinese with English abstract)
- McDonough WF and Sun SS. 1995. The composition of the earth. *Chemical Geology*, 120(3-4): 223-253
- Peng J, Tian JC, Yi HS and Xia WJ. 2000. The Late Precambrian hot water sedimentation of the Southeast Yangtze Plate continental margin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 18(1): 107-113 (in Chinese with English abstract)
- Qi FC, Zhang ZL, He ZB, Li ZX, Wang WQ, Su XL and Zhang C. 2011. Uranium-polymetallic ore-forming system and mechanism of the black rock series in the southeast continental margin of Yangtze plate. *Uranium Geology*, 27(3): 129-135, 145 (in Chinese with English abstract)
- Qi FC, Zhang ZL, Li ZX, He ZB and Wang WQ. 2012. Temporal and spatial evolution pattern of carbonaceous-argillaceous rock type uranium deposits in China. *Uranium Geology*, 28(2): 65-71 (in Chinese with English abstract)
- Qi FC, Li ZX, Zhang ZL, Wang WQ, Wang WG, Yang ZQ and Zhang Y. 2014. The discovery of onofrite and uraninite in marine phosphorite and its geological significance, northwestern Hunan. *Uranium Geology*, 30(3): 129-134, 167 (in Chinese with English abstract)
- Qi FC, Li ZX, Zhang ZL, Wang WQ, Yang ZQ and Zhang Y. 2015. Hydrothermal decarburization and uranium-polymetallic ore-mineralization in marine phosphorite, northwestern Hunan. *Earth*

- Science Frontiers, 22(4): 188 – 199 (in Chinese with English abstract)
- Rudnick RL and Gao S. 2003. Composition of the continental crust. In: Heinrich DH and Turekian KK (eds.). Treatise on Geochemistry. Oxford: Elsevier-Pergamon, 1 – 64
- Shang PQ, Hu RZ, Bi XW, Liu L and Zhang GQ. 2007. Discussion of some problems on the hydrothermal uranium mineralization in South China. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 26(3): 290 – 294 (in Chinese with English abstract)
- She HD, Fan HR, Hu FF, Yang KF, Yang ZF and Wang QW. 2018. Migration and precipitation of rare earth elements in the hydrothermal fluids. Acta Petrologica Sinica, 34(12): 3567 – 3581 (in Chinese with English abstract)
- Tang JR and Zhu JC. 1986. Metallogenetic chronology of certain stratabound uranium deposits, Guizhou Province. Uranium Geology, 2(6): 349 – 353 (in Chinese with English abstract)
- Wang GK, Jin ZG, Liu KK, WQ and Li YT. 2018. Analysis on the exploration prospect of carbonate rock type uranium deposits in Guizhou. Uranium Geology, 34(1): 9 – 14 (in Chinese with English abstract)
- Wang ZJ, Wang J, Zhuo JW, Yang P, Liu JH and Xie SK. 2011. Crust extensional activity during the transition from Sinian (Ediacaran) to Cambrian in Yangtze block: Evidences from the depositional sequence and its geochemical data. Geological Review, 57(5): 731 – 742 (in Chinese with English abstract)
- Wignall PB. 1994. Black Shales. Oxford: Clarendon Press, 1 – 46
- Wilkin RT, Barnes HL and Brantley SL. 1996. The size distribution of framboidal pyrite in modern sediments: An indicator of redox conditions. Geochimica et Cosmochimica Acta, 60(20): 3897 – 3912
- Wu CD, Chen QY and Lei JJ. 1999a. The genesis factors and organic petrology of black shale series from the Upper Sinian to the Lower Cambrian, Southwest China. Acta Petrologica Sinica, 15(3): 453 – 462 (in Chinese with English abstract)
- Wu CD, Yang CY and Chen QY. 1999b. The origin and geochemical characteristics of Upper Sinian-Lower Cambrian black shales in western Hunan. Acta Petrologica et Mineralogica, 18(1): 26 – 39 (in Chinese with English abstract)
- Xie GQ, Hu RZ, Fang WX and Qi L. 2001. Geochemistry of depositional environment of siliceous rocks from Mojiang gold deposit in Yunnan Province. Geochimica, 30(5): 491 – 497 (in Chinese with English abstract)
- Xu DZ. 1990. A study of major metallogenic factors and conditions of the Dongkeng uranium deposit. Mineral Deposits, 9(1): 70 – 76 (in Chinese with English abstract)
- Yang RD, Ren HL, Liu K and Gao JB. 2014. Geochemical characteristics of uranium mineralization rock in Baimadong, Kaiyang County, Guizhou Province. Geoscience, 28(5): 905 – 914 (in Chinese with English abstract)
- Zeng TZ. 2002. Discussion on metallogenetic characteristics, formation mechanism and prospecting vistas of carbonaceous-siliceous-argillitic rock type uranium deposits. Uranium Geology, 18(1): 46 – 51 (in Chinese with English abstract)
- Zhang DS. 1983. Uranium distribution and concentration in some sedimentary carbonates, silicalites and pelitic rocks. Chinese Science Bulletin, 28(11): 1519 – 1524
- Zhang WH, Jiang LJ, Gao H and Yang RD. 2003. Study on sedimentary environment and origin of black siliceous rocks of the Lower Cambrian in Guizhou Province. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 22(2): 174 – 178 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZH. 1986. On the geological background of the mineralization of carbonate-siliceous-pelitic stratabound uranium deposits in South China and variety of their metallogenesis. Uranium Geology, 2(6): 321 – 329 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZL, Qi FC, Li ZX, Wang WQ and Yang ZQ. 2013. Metallogenetic pattern of carbonaceous-siliceous-argillaceous type uranium deposits in Xuefengshan-Miaoershan area. Uranium Geology, 29(4): 208 – 214 (in Chinese with English abstract)
- Zhao FM. 2009. An review on geology study of carbonaceous-siliceous-pelitic rock type uranium deposit in China and the strategy for its development. Uranium Geology, 25(2): 91 – 97 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 蔡煜琦, 张金带, 李子颖, 郭庆银, 宋继叶, 范洪海, 刘武生, 漆富成, 张明林. 2015. 中国铀矿资源特征及成矿规律概要. 地质学报, 89(6): 1051 – 1069
- 蔡郁文, 王华建, 王晓梅, 何坤, 张水昌, 吴朝东. 2017. 铀在海相烃源岩中富集的条件及主控因素. 地球科学进展, 32(2): 199 – 208
- 陈兰, 钟宏, 胡瑞忠, 肖加飞. 2006. 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. 矿物岩石, 26(1): 81 – 85
- 陈露明. 1990. 504 铀矿床成因探讨. 铀矿地质, 6(3): 135 – 145
- 杜乐天, 王玉明. 1984. 华南花岗岩型、火山岩型、碳硅泥岩型、砂岩型铀矿成矿机理的统一性. 放射性地质, (3): 1 – 10
- 贵州省地质调查院. 2017. 中国区域地质志·贵州志. 北京: 地质出版社, 1 – 1098
- 郭葆瑾, 张待时, 李胜祥, 朱杰辰. 1995. 保源地区碳硅泥岩型铀矿床成因. 铀矿地质, 11(5): 266 – 272
- 胡瑞忠, 毕献武, 苏文超, 彭建堂, 李朝阳. 2004. 华南白垩-第三纪地壳拉张与铀成矿的关系. 地学前缘, 11(1): 153 – 160
- 胡瑞忠, 毛景文, 华仁民, 范蔚茗. 2015. 华南陆块陆内成矿作用. 北京: 科学出版社, 1 – 903
- 黄凯平, 郑懋荣. 2016. 贵州省白马洞铀矿床地球化学特征及成因. 矿产与地质, 30(4): 609 – 614
- 黄旋, 淳果, 王国坤. 2016. 黔东地区碳硅泥岩型铀矿地质、地球化学特征及其成因分析. 矿产与地质, 31(1): 99 – 103
- 加永泽巴, 王光辉, 朗卡旺青, 王超. 2017. 黔东南某向斜黑色岩系铀矿化特征与找矿远景. 现代矿业, (2): 37 – 39, 42
- 李胜荣, 高振敏. 1995. 湘黔地区牛蹄塘组黑色岩系稀土特征——兼论海相热水沉积岩稀土模式. 矿物学报, 15(2): 225 – 229
- 李延河, 段超, 赵悦, 裴浩翔, 任顺利. 2016. 氧化还原障在热液铀矿成矿中的作用. 地质学报, 90(2): 201 – 218
- 李有禹. 1997. 湖南大庸慈利一带下寒武统黑色页岩中海底喷流沉积硅岩的地质特征. 岩石学报, 13(1): 121 – 126
- 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 王鹤年, 储同庆, 张景荣. 1986. 元素地球化学. 北京: 科学出版社, 1 – 517
- 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 张作衡, 王义天, 王志良, 赵财胜, 杨富全, 李厚民. 2005. 大陆动力学演化与成矿研究: 历史与现状——兼论华南地区在地质历史演化期间大陆增生与成矿作用. 矿床地质, 24(3): 193 – 205
- 彭军, 田景春, 伊海生, 夏文杰. 2000. 扬子板块东南大陆边缘晚前寒武纪热水沉积作用. 沉积学报, 18(1): 107 – 113
- 漆富成, 张字龙, 何中波, 李治兴, 王文全, 苏香丽, 张超. 2011. 扬子陆块东南缘黑色岩系铀多金属成矿体系和成矿机制. 铀矿地质, 27(3): 129 – 135, 145
- 漆富成, 张字龙, 李治兴, 何中波, 王文全. 2012. 中国碳硅泥岩型铀矿床时空演化规律. 铀矿地质, 28(2): 65 – 71
- 漆富成, 李治兴, 张字龙, 王文全, 王文广, 杨志强, 张岩. 2014. 湘

- 西北海相含铀磷块岩中硒汞矿和晶质铀矿的发现及其地质意义. 铀矿地质, 30(3): 129-134, 167
- 漆富成, 李治兴, 张字龙, 王文全, 杨志强, 张岩. 2015. 湘西北海相磷块岩的热液脱碳与铀多金属成矿作用. 地学前缘, 22(4): 188-199
- 商朋强, 胡瑞忠, 毕献武, 刘雷, 张国全. 2007. 华南热液铀矿成矿作用若干问题探讨. 矿物岩石地球化学通报, 26(3): 290-294
- 余海东, 范宏瑞, 胡芳芳, 杨奎锋, 杨占峰, 王其伟. 2018. 稀土元素在热液中的迁移与沉淀. 岩石学报, 34(12): 3567-3581
- 唐俊儒, 朱杰辰. 1986. 贵州某些层控铀矿成矿时代. 铀矿地质, 2(6): 349-353
- 王国坤, 金中国, 刘开坤, 王琼, 李艳桃. 2018. 贵州碳酸盐岩型铀矿找矿前景分析. 铀矿地质, 34(1): 9-14
- 汪正江, 王剑, 卓皆文, 杨平, 刘家洪, 谢尚克. 2011. 扬子陆块震旦纪-寒武纪之交的地壳伸展作用: 来自沉积序列与沉积地球化学证据. 地质论评, 57(5): 731-742
- 吴朝东, 陈其英, 雷家锦. 1999a. 湘西震旦-寒武纪黑色岩系的有机岩石学特征及其形成条件. 岩石学报, 15(3): 453-462
- 吴朝东, 杨承运, 陈其英. 1999b. 湘西黑色岩系地球化学特征和成因意义. 岩石矿物学杂志, 18(1): 26-39
- 谢桂青, 胡瑞忠, 方维萱, 漆亮. 2001. 云南墨江金矿床硅质岩沉积环境的地球化学探讨. 地球化学, 30(5): 491-497
- 徐达忠. 1990. 董坑铀矿床成矿要素及条件的研究. 矿床地质, 9(1): 70-76
- 杨瑞东, 任海利, 刘坤, 高军波. 2014. 贵州开阳白马洞铀矿化岩层地球化学特征. 现代地质, 28(5): 905-914
- 曾天柱. 2002. 碳硅泥岩型铀矿成矿特征、形成机理及找矿前景的讨论. 铀矿地质, 18(1): 46-51
- 张位华, 姜立君, 高慧, 杨瑞东. 2003. 贵州寒武系底部黑色硅质岩成因及沉积环境探讨. 矿物岩石地球化学通报, 22(2): 174-178
- 张祖还. 1986. 论华南碳硅泥岩型层控铀矿床的形成地质背景和成因的多样性. 铀矿地质, 2(6): 321-329
- 张字龙, 漆富成, 李治兴, 王文全, 杨志强. 2013. 雪峰山-苗儿山地区碳硅泥岩型铀矿成矿规律. 铀矿地质, 29(4): 208-214
- 赵凤民. 2009. 中国碳硅泥岩型铀矿地质工作回顾与发展对策. 铀矿地质, 25(2): 91-97