

鄂尔多斯盆地东北部直罗组铀富集特征 及铀成矿模式探讨*

易超¹, 王贵², 李西得¹, 张康¹, 王永君²

(1 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;

2 核工业二〇八大队, 内蒙古 包头 014010)

摘要 鄂尔多斯盆地东北部的铀成矿作用过程比较复杂, 是多种流体叠加作用的结果。文章在梳理、分析前人资料和研究成果的基础上, 通过对铀的存在形式、砂岩的地球化学特征及 C、S 同位素组成特征、矿物蚀变特征及成矿年龄的研究, 总结了铀的富集特征, 划分了铀的成矿期次, 补充、完善了铀的成矿模式。研究表明, 该区直罗组砂岩中的铀主要以独立矿物及吸附态 2 种形式存在, 与黄铁矿、有机质、方解石、黏土矿物等关系密切, 独立矿物以铀石为主。含矿砂岩的还原性物质含量(有机质、黄铁矿等)高于其他类型砂岩。碳酸盐胶结物中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值为 $-24.6\% \sim -6.8\%$, 反映了碳酸盐胶结物中的碳与生物成因有关。各类砂岩中黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值均为负值, 分布在 $-8\% \sim -40\%$, 显示出明显的富 ^{32}S 、贫 ^{34}S 的特点, 生物成因的分馏特征明显。镜下鉴定结果表明, 研究区的古氧化砂岩中多处可见铁的氧化产物以及黑云母的强绿泥石化。结合对铀成矿年龄的研究和总结, 提出了研究区铀的富集具有“充足的还原性条件、强改造过程、微生物参与和多期次叠加”的特征, 既与潜水氧化作用有关, 又受古层间氧化作用的控制, 成矿后期还有深部还原性气体的二次还原改造, 地层的强还原环境是导致铀富集的主要原因; 在古层间氧化作用过程中, 地层中的微生物在铀的活化和沉淀过程中发挥了重要的作用; 成矿年龄反映出该区铀成矿具有多阶段性, 大致可分为中侏罗世直罗早期、中侏罗世直罗期—晚侏罗世、早白垩世—始新世以及渐新世之后等 4 个阶段。

关键词 地质学; 铀存在形式; 铀成矿年龄; 同位素; 铀富集特征; 成矿模式; 鄂尔多斯盆地东北部

中图分类号: P619.14

文献标志码: A

A tentative discussion on uranium enrichment characteristics and metallogenic model in Zhiluo Formation, northeastern Ordos Basin

YI Chao¹, WANG Gui², LI XiDe¹, ZHANG Kang¹ and WANG YongJun²

(1 Beijing Research Institute of Uranium Geology, CNNC Key Laboratory of Uranium Resource Exploration and Evaluation Technology, Beijing 100029, China; 2 No. 208 Geological Party, CNNC, Baotou 014010, Inner Mongolia China)

Abstract

Uranium mineralization process in northeastern Ordos basin was complicated and it was a result of several kinds of fluids superimposing. Through the researches on uranium occurrence forms, geochemical characteristics and C-S isotopic composition of sandstone, features of altered minerals and mineralization ages, this paper summarized the uranium enrichment characteristics, divided the stage of uranium mineralization and improved a uranium metallogenic model based on an analysis of the previous data and achievements. It is shown that uranium in

* 本文受中核集团集中研发项目(龙腾二期)“鄂尔多斯盆地北部砂岩型铀矿关键因素识别与靶区优选”(编号:地 LTD1601-2)和国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(编号:2015CB453004)项目联合资助

第一作者简介 易超,男,1985年生,高级工程师,主要从事砂岩型铀矿成矿特征与成矿机理研究。Email:40625688@qq.com。

收稿日期 2017-08-05;改回日期 2018-03-08。赵海杰编辑。

Zhiluo Formation in this region occurs as either independent minerals or adsorbent form. Uranium mineralization has a close relationship with pyrite, organic matters, calcite, clay minerals and some other minerals. Independent mineral of uranium is mainly coffinite. The content of reducing matter (organic matter, pyrite, etc.) of ore-bearing sandstone is higher than that of other types of sandstone. The $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ values range from -24.6% to -6.8% in carbonate cement, and these data indicate that the carbon in carbonate cements is related to biological causes. The $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ values range from -8% to -40% , and these data show the characteristics of rich ^{32}S and poor ^{34}S , with obvious fractionation characteristics of biogenic factors. The results of microscopic examination show that the oxidation products of iron and the strong chloritization of biotite can be seen in the paleo-oxidation sandstone of this area. Based on the research on mineralization ages, the authors believe that the enrichment of uranium was characterized by adequate reduction conditions, strong transformation process, participation of microorganisms and multistage superimposition, and this was not only related to phreatic-oxidation but also controlled by paleo-interlayer-oxidation and by secondary reducing transformation of gases at later stage of metallogenesis. Strong reducibility of the strata was the main reason leading to the enrichment of uranium and microorganism in the strata, which played an important role in uranium mobilization and precipitation during the paleo-interlayer oxidation. The mineralization ages show that uranium mineralization was characterized by multi-stages, and could be generally divided into the stage of syngenetic sedimentary enrichment in early Zhiluo period in middle Jurassic, the stage of phreatic-oxidation from Zhiluo period of middle Jurassic to late Jurassic, the stage of paleo-interlayer-oxidation from Early Cretaceous to Eocene and the stage of secondary reducing transformation of gases from Oligocene to the present.

Key words: geology, uranium occurrence forms, uranium mineralization age, isotope, uranium enrichment characteristic, metallogenic model, northeastern Ordos Basin

近年来,随着鄂尔多斯盆地东北部砂岩型铀矿勘查的持续大规模投入,继皂火壕铀矿床之后,又探明了纳岭沟和大营铀矿床,新发现了库计沟、巴音青格力、柴登等铀矿产地,使得鄂尔多斯盆地东北部已成为中国北方重要的砂岩型铀成矿带之一。国内众多学者针对皂火壕铀矿床的成矿机理、成矿特征及控矿因素方面的研究取得了丰硕的成果,如:皂火壕铀矿床成矿机理及成矿模式(樊爱萍等,2006;2007;李子颖等,2006;2007;2009;韩效忠等,2009);铀成矿年代学(夏毓亮等,2003;刘汉彬等,2007);铀成矿地球化学特征(朱西养等,2003;李荣西等,2006;吴柏林等,2006;林潼等,2007;潘爱芳等,2007;杨晓勇等,2006;2008;薛伟等,2010;张龙等,2015)。

目前,对本区的铀富集特征及富集机制还尚未有较为系统的总结与探讨。本文通过对纳岭沟和大营铀矿床铀的存在形式、直罗组砂岩地球化学特征、C、S同位素组成特征、矿物蚀变特征及成矿年龄的研究,结合作者及前人对皂火壕矿床的研究成果,全面归纳了鄂尔多斯盆地东北部直罗组砂岩中铀的富集特征,在前人建立的叠合铀成矿模式的基础上,进一步厘定了铀成矿的阶段,明确了铀的富集机制,恢

复了每一个成矿阶段中铀源-迁移-沉淀富集的成矿过程,进一步讨论和完善了成矿模式,旨在为铀矿调查评价和勘查部署提供理论依据。

1 地质概况

鄂尔多斯盆地属于典型的克拉通盆地,基底包括上太古界和下元古界结晶基底以及中新元古界和古生界直接基底(杨俊杰,2003;郭庆银,2010)。沉积盖层主要为三叠系—第四系,主体为侏罗系和白垩系,其中缺失上侏罗统、上白垩统、古近系、及新近系的中新统(韩效忠等,2008)。本次研究区位于鄂尔多斯盆地东北部,伊盟隆起南缘。区内地层呈单斜产出,倾角较缓,平均在 $1^{\circ}\sim 3^{\circ}$ 之间,出露的地层自老至新包括三叠系、侏罗系、白垩系、新近系及第四系(图1)。

铀矿化主要产于中侏罗统直罗组下段中,直罗组下段又可进一步划分为上、下2个亚段(易超等,2013)。直罗组下段整体为河流-三角洲沉积环境。其中,下亚段为辫状河-辫状河三角洲沉积体系,岩性主要为灰色、灰绿色、绿色中-粗砂岩,砂岩胶结程

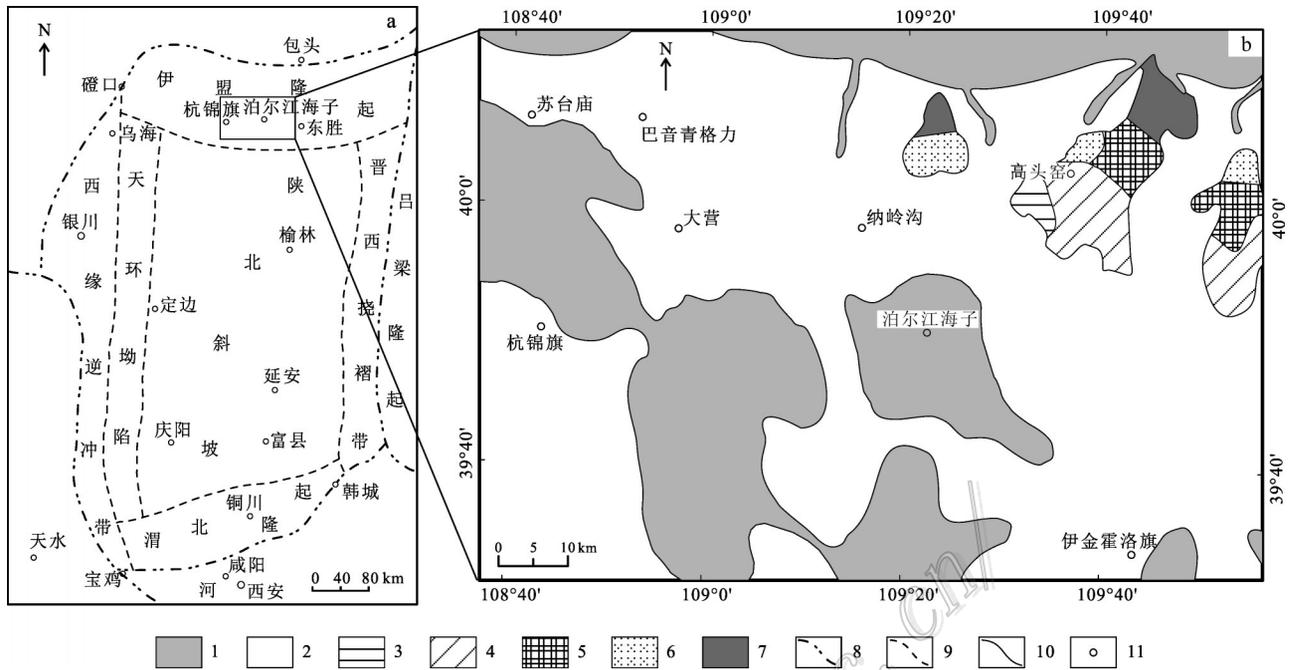


图 1 鄂尔多斯盆地构造分区图(a)和鄂尔多斯盆地东北部东胜地区地质简图(b)

1—第四系;2—下白垩统;3—中侏罗统安定组;4—中侏罗统直罗组;5—中侏罗统延安组;6—上三叠统延长组;7—中三叠统二马营组;
8—盆地边界;9—构造边界;10—地质界线;11—地名

Fig. 1 Tectonic division map of Ordos basin(a) and geological map of Dongsheng area, northeast Ordos Basin(b)

1—Quaternary;2—Lower Cretaceous;3—Anding Formation, Upper Jurassic;4—Zhiluo Formation, Middle Jurassic;5—Yan'an Formation, Middle Jurassic;6—Yanchang Formation, Upper Triassic;7—Erma'ying Formation, Middle Triassic;8—Boundary of basin;
9—Boundary of structural units;10—Geological boundary;11—Place name

度弱,砂质疏松,灰色砂岩中富含碳屑、黄铁矿等还原性介质;上亚段为辫状河、曲流河、曲流河三角洲沉积体系,岩性胶结程度弱,砂质疏松,灰色砂岩中可见碳屑及黄铁矿(赵俊峰等,2008;张字龙等,2010;易超等,2014)。直罗组下段砂岩的碎屑成分以石英为主,次为钾长石。碎屑颗粒磨圆度差,多呈棱角、次棱角状,体现了近距离沉积的特点。钾长石发育不同程度的高岭石化,斜长石多绢云母化。岩屑含量较高,成分以变质岩岩屑为主;其次为花岗岩岩屑及少量沉积岩岩屑。胶结物主要是方解石、白云石等碳酸盐胶结物以及黄铁矿、褐铁矿等铁质胶结物。黄铁矿主要呈立方体状或胶状,偶见结核状分布(易超等,2014)。

直罗组沉积后,研究区受燕山期和喜山期构造运动的影响,发生了多次的构造抬升。其中,直罗组上覆中侏罗统安定组沉积后的燕山Ⅱ幕构造抬升运动中,盆地东部抬升幅度较大,导致上侏罗统的芬芳河组仅在盆地西缘的贺兰山-桌子山一带沉积,同时盆地东北部的安定组被大面积剥蚀,使得直罗组与

之后沉积的白垩系呈角度不整合接触。同时,多次的构造抬升也导致了盆地东北部直罗组局部出露地表,使含氧含水沿出露地表的岩层向下渗移,有利于直罗组中铀的活化和迁移。新近纪以来发生的东西跷变使得盆地东北部由原来的西高东低转变为东北高、西南低,这对盆地东北部铀矿的改造和富集起到了重要作用(韩效忠等,2008)。

目前,该区已探明了皂火壕、纳岭沟和大营3个特大型铀矿床。皂火壕和纳岭沟矿床的铀矿化均产自直罗组下段下亚段砂体中,大营矿床铀矿化在直罗组下段上、下亚段均有产出。铀矿体主要呈板状,垂向上产于绿色、灰绿色与灰色砂岩界面附近的灰色砂岩中。平面上,铀矿化受古层间氧化带(即绿色砂岩蚀变带)前锋线控制(易超等,2015a)。

2 样品采集与分析测试方法

研究样品采自鄂尔多斯盆地东北部纳岭沟和大

营铀矿床中侏罗统直罗组下段,垂向上兼顾各类蚀变砂岩,包括:绿色蚀变砂岩、矿化砂岩、灰色砂岩。样品采集后立即用密封袋封装,避免相互污染。扫描电镜分析在中国石油华北油田勘探开发研究院沉积实验室完成;电子探针分析、C、S同位素分析以及U-Pb同位素分析均在核工业北京地质研究院分析测试中心完成。

扫描电镜分析使用的设备为捷克的TESCAN VEGA II型扫描电子显微镜,能谱分析采用德国BRUKER XFlash6/60能谱仪,测试方法为《岩石样品扫描电镜显微镜分析方法》(SY/T 5162-2014)。

电子探针分析采用日本电子JXA-8100电子探针分析仪,加速电压为20 kV,束流10 nA,束斑直径2 μm ,测试方法为《电子探针定量分析方法通则》(GB/T 15074-2008),主量元素的分析精度小于 $\pm 2\%$ 。

C同位素测定使用MAT253气体同位素质谱仪完成,在预处理装置真空度达 1.0×10^{-2} Pa条件下,碳酸盐样品与100%的磷酸在25 $^{\circ}\text{C}$ 恒温水浴反应4 h以上,生成二氧化碳,用冷冻法分离除去反应所生成的水,收集并纯化二氧化碳进行测量,测量结果以国际标准即美国南卡罗莱纳州白垩系皮狄组内美洲拟箭石(PDB)为标准,记为 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 。样品分析精度小于 $\pm 0.2\%$ 。

黄铁矿颗粒的S同位素分析仪器采用德国Thermo Finnigan公司生产的Delta v plus气体同位素质谱仪,测试方法采用《硫化物中硫同位素组成的测定》(DZ/T 0184.14-1997)。样品分析精度小于 $\pm 0.2\%$ 。

U-Pb同位素定年方法是在室内对样品进行加工和分选,将全岩样品碎至200目,分别进行U、Ra、Pb含量和Pb同位素组成分析,测试方法采用《沥青铀矿、晶质铀矿的年龄测定方法》(EJ/T 693-2007)。

Pb同位素分析仪器采用英国GV公司的热电离质谱仪,仪器型号为ISOPROBE-T。

3 分析测试结果

3.1 铀的存在形式

研究区含矿砂岩主要为灰色细-粗砂岩。与区内绿色、灰色不含矿砂岩相比,含矿砂岩含有较多的碳屑及黄铁矿结核(图2a~c)。显微镜下可见含矿砂岩中黄铁矿主要呈微粒状立方体、胶状(图2d~f),还可见有草莓状。

扫描电镜及电子探针结果表明,直罗组含矿砂岩中的铀主要以独立矿物及吸附状态2种形式存在;铀矿物主要为铀石,少量沥青铀矿(表1,图2l),多呈短柱状、晶簇状、球粒状(图2g~i),单个铀矿物颗粒平均小于5 μm ,与黄铁矿、有机质、方解石、黏土矿物等关系密切。铀矿物以附着、围绕的形式产出于黄铁矿、有机质及方解石周围的现象比较常见(图2j~k)。还可见铀矿物吸附在高岭石、蒙皂石等黏土矿物表面。此外,铀矿物还呈微脉状穿切碎屑石英、长石等碎屑颗粒(苗爱生等,2010)。

3.2 C同位素组成特征

分析结果表明,本区直罗组砂岩碳酸盐胶结物中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值分布范围是 $-24.6\text{‰} \sim -6.8\text{‰}$,平均值为 -12.6‰ (表2),从 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值的分布特征不难看出,本区碳酸盐胶结物中的C同位素分布具有明显的富 ^{12}C 、贫 ^{13}C 的特征。C同位素在自然界的分馏效应比较明显, $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化范围也较大,引起C同位素分馏的主要机理是光合作用和热裂解作用的动力分馏,不同含碳化合物之间的同位素交换反应、碳的氧化还原反应的平衡分馏。其中,非生物成因的碳酸盐相对富集 ^{13}C ,而生物成因的碳酸盐则相对富集 ^{12}C 。根据Hoefs(2009)对自然界中C同位素分布的研究,本区

表1 鄂尔多斯盆地东北部直罗组砂岩电子探针分析结果

Table 1 Results of composition analysis through electron microprobe analysis of sandstone of Zhiluo Formation, northeastern Ordos Basin

序号	Na ₂ O	SiO ₂	UO ₂	SO ₃	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	PbO	MnO	K ₂ O	TiO ₂	ThO ₂	V ₂ O ₃	P ₂ O ₅	总和
<i>w</i> (B)/%																	
①	0.1	17.86	70.64	0.04	0.93	/	1.25	0.09	0.6	/	0.08	/	0.19	/	/	0.11	91.89
②	0.15	17.58	69.31	/	1.1	/	1.51	/	0.43	/	0.16	/	0.12	0.61	/	0.18	91.15
③	0.1	4.67	77.4	0.03	0.49	0.03	6.12	0.7	/	0.47	0.4	0.2	/	/	0.61	0.15	91.37
④	0.24	4.51	77.87	/	0.43	0.04	6.28	1.38	/	0.35	0.42	0.24	/	/	0.62	0.15	92.53

注:①、②为铀石;③、④为沥青铀矿,“/”为未检出。

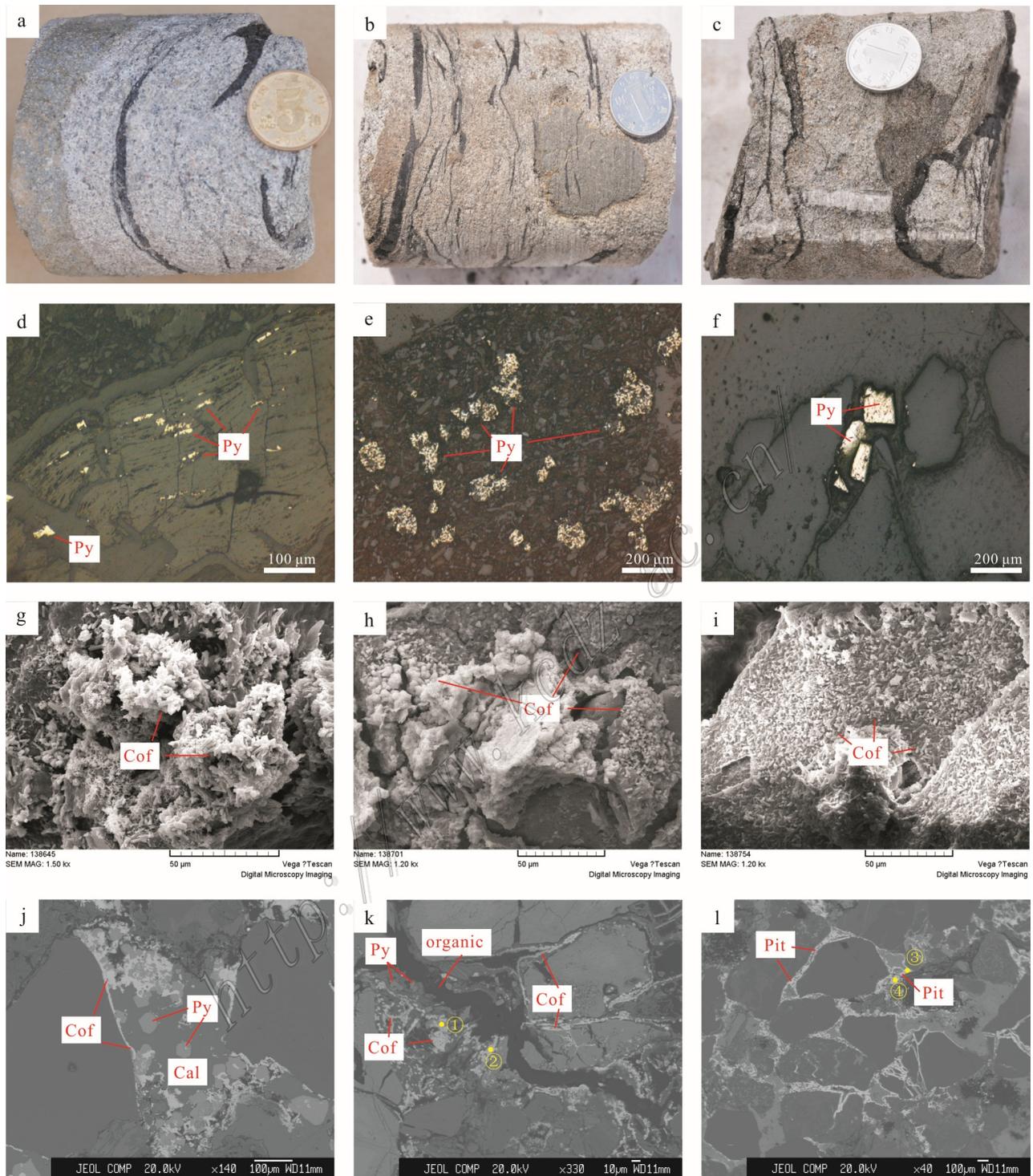


图 2 直罗组含矿砂岩扫描电镜、电子探针及显微镜下照片

a. 含矿砂岩含有有机质及黄铁矿结核, ZKQ51-28, 480.73 m; b. 含矿砂岩含有有机质及黄铁矿结核, ZKT79-31, 579.7 m; c. 含矿砂岩含有有机质, ZKT79-31, 573.7 m; d. 碳化植物碎屑中的黄铁矿微粒, ZKN35-12-1, 483 m, 反射光; e. 黄铁矿颗粒呈浸染状分布, ZKN35-12-1, 483 m, 反射光; f. 立方体状黄铁矿包裹于黑云母中, ZKN49-10-1, 522.7 m, 反射光; g. 短柱状、冰花状铀石, ZKN7-7, 417.8 m, 扫描电镜; h. 球粒状、短柱状铀石, ZKN0-13, 392 m, 扫描电镜; i. 粒表短柱状铀石, ZKN20-29, 388.7 m, 扫描电镜; j. 铀石围绕黄铁矿产出, ZKD111-48, 623.5 m, 电子探针; k. 铀石围绕有机质、黄铁矿产出, ZKN8-23, 384.2 m, 电子探针; l. 沥青铀矿产于碎屑颗粒孔隙中, ZKT79-0, 538.85 m, 电子探针

Cof—铀石; Pit—沥青铀矿; Py—黄铁矿; Cal—方解石

Fig.2 The images under SEM, EPMA and microscope of ore-bearing sandstone specimens of Zhiluo Formation

- a. Organic matters and pyrite nodules contained in the ore-bearing sandstone, ZKQ51-28, 480.73 m; b. Organic matters and pyrite nodules contained in the ore-bearing sandstone, ZKT79-31, 579.7 m; c. Organic matters contained in the ore-bearing sandstone, ZKT79-31, 573.7 m; d. Pyrite particles in the carbonized plant debris, ZKN35-12-1, 483 m, reflected light; e. Disseminated pyrite particles, ZKN35-12-1, 483 m, reflected light; f. Cubic pyrite wrapped in biotite, ZKN49-10-1, 522.7 m, reflected light; g. Short column or ice coffinite, ZKN7-7, 417.8 m, SEM; h. Globular and short column coffinite, ZKN0-13, 392 m, SEM; i. Short column coffinite with particles on surface, KN20-29, 388.7 m, SEM; j. Coffinite occurring around pyrite, ZKD111-48, 623.5 m, EPMA; k. coffinite occurring around organic matters and pyrites, ZKN8-23, 384.2 m, EPMA; l. pitchblende occurring in the pores of the detritus particles, ZKT79-0, 538.85 m, EPMA
- Cof—Coffinite; Pit—Pitchblende; Py—Pyrite; Cal—Calcite

的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均落入在生物成因的范围内(图3a,b),指示了微生物参与了本区碳酸盐胶结物的形成。

3.3 S同位素组成特征

本区岩芯中黄铁矿的宏观产状主要表现为结核

表2 直罗组砂岩碳酸盐胶结物C同位素分析结果

Table 2 Results of C isotope analysis of carbonate cement in sandstone of Zhiluo Formation

样品号	岩性	深度/m	$w(\text{U})/10^{-6}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}/\text{‰}$
EN14-223	灰绿色粗砂岩	371	34.4	-10.9
EN14-224	灰绿色中粗砂岩	373.4	7.1	-15
EN14-232	灰绿色中砂岩	382.4	52.4	-15.6
EN14-226	灰绿色中砂岩	375.4	29.9	-24.6
EN14-225	灰绿色中砂岩	375.2	21	-18.7
EN14-222	绿色粗砂岩	362.5	16.5	-16.1
EN14-196	绿色粗砂岩	363.8	14.4	-6.8
EN14-195	绿色中粗砂岩	361.7	8.95	-9.5
EN14-201	绿色中粗砂岩	370.8	30.1	-7.3
EN14-197	绿色中粗砂岩	364.8	8247	-11.9
EN14-230	灰色粗砂岩	379.3	3835	-14.1
EN14-227	灰绿色中砂岩	375.7	2041	-12
EN14-206	灰色粗砂岩	348.4	1938	-13.6
EN14-204	灰色中砂岩	350.4	1859	-14
EN14-205	灰色中粗砂岩	347.5	1663	-14.8
EN14-228	灰绿色中粗砂岩	377.6	1484	-15.1
EN14-229	灰绿色中粗砂岩	378.2	1147	-11.9
EN14-208	绿色中砂岩	340.6	1014	-10.9
EN14-198	绿色粗砂岩	366.4	911	-11.7
EN14-209	灰色粗砂岩	342.2	520	-12.9
EN14-231	灰绿色粗砂岩	380.4	501	-10.8
EN14-200	灰绿色中砂岩	370.37	478	-13.7
EN14-199	黄绿夹紫红中粗砂岩	368.7	224	-20.7
EN14-203	灰色中砂岩	346	93.5	-8.9
EN14-207	灰色中粗砂岩	349.4	56.7	-11.8
EN14-210	含砾灰色中粗砂岩	344.75	38.5	-9.9
EN14-233	灰色粗砂岩	383.2	13.7	-10.9
EN14-234	灰色粗砂岩	385.2	8.99	-9.7
EN14-202	灰色粗砂岩	345.3	5.83	-9

状、条带状、浸染状,其中以结核状黄铁矿最为常见。镜下黄铁矿主要表现为草莓状、胶状、粒状及裂隙充填黄铁矿(陈超等,2016)。前文已述,本区铀矿物的存在形式中,铀矿物与黄铁矿相伴产出的现象较为常见,可见黄铁矿与铀矿物的形成关系紧密。

文章分别采取、挑选了直罗组下段下亚段中不同类型砂岩中的黄铁矿颗粒,并进行了S同位素分析。分析结果表明,直罗组砂岩中黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值分布范围是 $-8\text{‰}\sim-40\text{‰}$,表现出明显的富 ^{32}S 、贫 ^{34}S 的分馏特点。其中,绿色的二次还原砂岩中黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 分布范围是 $-39.4\text{‰}\sim-8.5\text{‰}$,平均值为 -27.5‰ ;灰色的原生砂岩中黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 分布范围是 $-27.6\text{‰}\sim-21.2\text{‰}$,平均值为 -25.2‰ ;矿化砂岩中黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 分布范围是 $-35.9\text{‰}\sim-13.2\text{‰}$,平均值为 -26.8‰ (表3)。在无机化学(氧化-还原反应)过程中,S同位素的分馏主要是由于S-O键被打破的速率差异造成的, $^{32}\text{S-O}$ 比 $^{34}\text{S-O}$ 键更容易被打断,导致无机还原 SO_4^{2-} 产生的 H_2S 比硫酸盐富集约22%的 ^{32}S 。此外,在微生物还原过程中,硫酸盐还原菌对硫酸盐的还原作用可使形成的硫化氢或硫化物中富集更多的 ^{32}S (韩吟文等,2003)。结合本区直罗组砂岩中黄铁矿S同位素富 ^{32}S 的分馏特点,以及镜下见有微生物作用产生的草莓状黄铁矿的现象(Raiswell et al., 1988),作者认为本区黄铁矿可能是由无机化学作用叠加生物还原作用形成的。

参考霍夫斯提出的自然界中S同位素的组成特征发现,直罗组中大部分黄铁矿的S同位素值在沉积岩范围内,个别黄铁矿的S同位素值在沉积岩和变质岩的混合区域内(图4a,b)。王盟等(2013)通过对本区碎屑锆石U-Pb年龄及Hf同位素分析得出结论,东胜地区直罗组砂岩中新太古代的锆石可能来源于阴山地块古老的TTG片麻岩及基性麻粒岩,源区物质主要来源于亏损地幔(王盟等,2013)。东胜

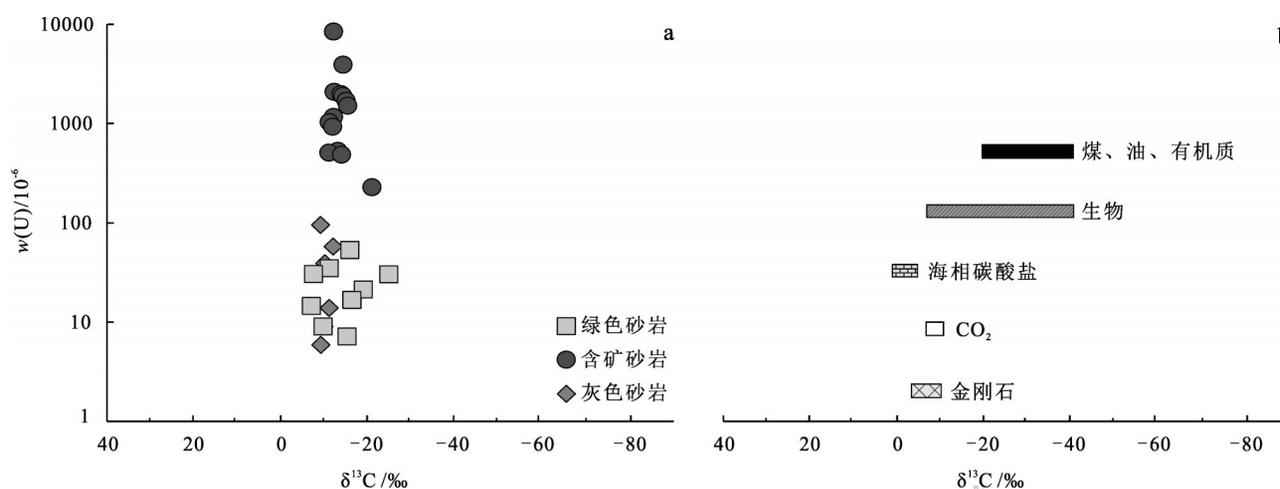


图 3 纳岭沟铀矿床 C 同位素分布特征(a)和部分重要地质体的 C 同位素值(b, 据 Hoefs, 2009)

Fig. 3 Characteristics of the C isotope distribution in the Nalinggou uranium deposit (a) and $\delta^{13}C$ -values of some important carbon reservoirs (b, after Hoefs, 2009)

地区直罗组砂岩 REE 元素分布特征及岩屑成分特征表明,砂岩的物源主要来自北部太古宙花岗岩麻岩和斜长角闪岩等变质岩(李宏涛等, 2007)。由此可见,物源区古老变质岩可能为本区直罗组中黄铁矿的形成提供了一部分 S 源。

3.4 成矿年龄

作者选取了纳岭沟和大营铀矿床的 6 组铀矿

石,利用全岩 U-Pb 同位素等时线方法测定铀成矿年龄。

U-Pb 同位素分析结果表明,纳岭沟铀矿床铀矿石 U-Pb 同位素等时线方法测定年龄是 (94.5 ± 2.7) Ma、 (83.1 ± 2.4) Ma、 (75.2 ± 2.1) Ma、 (67.8 ± 2.4) Ma,均对应为晚白垩世(图 5a-d);大营铀矿床铀矿石 U-Pb 同位素等时线方法测定年龄为 (93.1 ± 3.5) Ma、 $(62.3 \pm$

表 3 纳岭沟铀矿床直罗组砂岩黄铁矿颗粒 S 同位素分析结果

Table 3 Results of S isotope analysis of pyrite in sandstone of Zhiluo Formation, the Nalinggou uranium deposit

分带	岩性	钻孔号	深度/m	矿物	$w(U)/10^6$	$\delta^{34}S_{V-CDT}/‰$
二次还原带	绿色含砾中粗砂岩	ZKN89-19	598.8	黄铁矿	68.8	-37.8
	绿色中细砂岩	ZKB32-15	452	黄铁矿	26.3	-39.2
	绿色中细砂岩	ZKB32-15	453.05	黄铁矿	20.4	-39.4
	绿色中粗砂岩	ZKD2014-1	688.4	黄铁矿	2.61	-9.7
	绿色中砂岩	ZKN56-123	395.2	黄铁矿	2.86	-30.2
	绿色粗砂岩	ZKN89-19	655.8	黄铁矿	4.84	-8.5
矿化带	绿色中粗砂岩	ZKN28-55	364.8	黄铁矿	8247	-19.4
	绿夹紫红色细砂岩	ZKN89-11	614	黄铁矿	1911	-13.2
	灰绿色粗砂岩	ZKN22-44-1	380.4	黄铁矿	501	-34.4
	灰色粗砂岩	ZKN89-1	636.5	黄铁矿	197	-34.6
	绿色细砂岩	ZKN89-19	597.5	黄铁矿	154	-23.5
原生带	灰绿色中粗砂岩	ZKN81-11	610.81	黄铁矿	130	-35.9
	灰色中粗砂岩	ZKN89-1	646.6	黄铁矿	14.2	-27.6
	灰色粗砂岩	ZKN56-123	368	黄铁矿	9.15	-21.2
	灰色粗砂岩	ZKN81-11	617.41	黄铁矿	10.1	-26.4
	灰色含砾粗砂岩	ZKN56-123	372.2	黄铁矿	10.9	-25.7

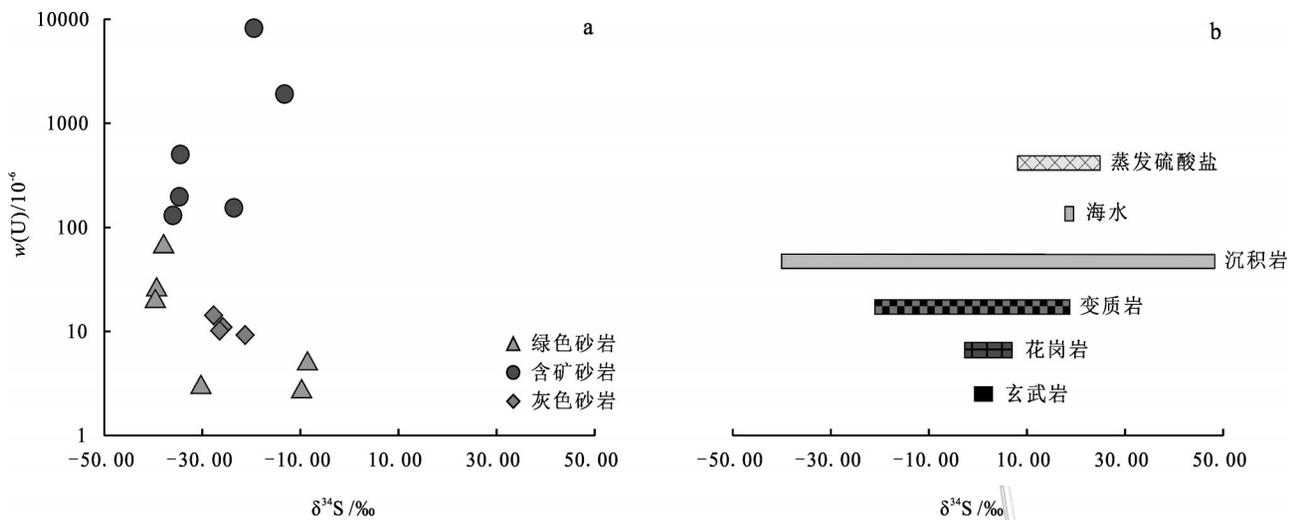


图4 纳岭沟铀矿床直罗组砂岩黄铁矿S同位素分布特征(a)和部分重要地质体的S同位素值(b,据Hoefs,2009)

Fig. 4 Characteristics of the S isotope distribution of pyrite in sandstone of Zhiluo Formation, the Nalinggou uranium deposit (a) and $\delta^{34}\text{S}$ values of some geologically important sulfur reservoirs (b, after Hoefs, 2009)

1.7)Ma,分别对应为晚白垩世和古新世(图5e、f)。6组U-Pb同位素等时线年龄的平均标准权重偏差(MSWD)均小于2,且只有1组数据MSWD为1.6,其余5组数据均小于1,最小为0.022,反映出本次分析数据具有较高的质量,可靠性强。

通过收集前人的测年数据,结合本次分析结果,文章汇总了鄂尔多斯盆地东北部直罗组铀成矿年龄统计表(表4)。不难看出,本区铀成矿年龄具有多期次叠加的特点,最老年龄为186Ma,对应为中侏罗世,与含矿目的层直罗组沉积时期相同;最新年龄为(8±1)Ma,对应为中新世(刘汉彬等,2007)。年龄数据中以晚白垩世年龄数据最多,有6组;其次为中侏罗世、早白垩世及中新世年龄数据,有2组;古新世年龄数据有1组。由此可见,本区的铀成矿作用从直罗组沉积时期便开始发生,早、晚白垩世均有成矿,其中以晚白垩世为主成矿时期,最新成矿时间为中新世。

4 讨论

4.1 铀富集特征

4.1.1 充足的还原条件导致铀富集

铀石为四价铀的硅酸盐,在砂岩型铀矿床中,它常与沥青铀矿共同产于强还原环境中,与黄铁矿、有机质共生,是强还原环境的产物(赵凤民等,1988)。探针分析结果表明,本区的铀矿物类型主要以铀石为主,少量沥青铀矿,与黄铁矿、有机质共生

现象较为普遍。在钻孔岩芯中,含矿砂岩中碳屑及黄铁矿结核的含量也明显高于不含矿砂岩。作者前期通过对本区各蚀变类型砂岩地球化学特征的研究发现,含矿砂岩有机碳c(TOC)平均达0.3%~0.6%,甲烷气体c(CH₄)平均达540~880 μL/kg,均高于其他类型砂岩;全岩w(S)达0.15%~0.4%,仅次于灰色的原生砂岩(易超等,2015b)。由此可见,无论是岩矿鉴定的铀矿物类型及产出特征,或是钻孔岩芯的宏观现象,还是分析测试获得的地球化学参数,均表明本区铀的富集是在充足的还原环境下形成的,同时也指示出本区铀成矿作用与黄铁矿、有机质等还原性物质具有紧密的联系。

有机质在氧化带中被氧化形成铀酰腐殖酸络合物,进入地下水随之迁移,当运移至氧化还原过渡带

表4 鄂尔多斯盆地东北部铀成矿年龄统计表

Table 4 The statistics of uranium mineralization ages in northeast Ordos Basin

序号	铀矿床名称	年龄/Ma	对应地质年代	备注
1		186、177±16	中侏罗世	
2	皂火壕	120±11、124±6	早白垩世	数据引自
3	铀矿床	80±5	晚白垩世	刘汉彬等
4		20±2、8±1	中新世	(2007)
5	纳岭沟铀矿床	94.5±2.7、83.1±2.4、75.2±2.1、67.8±2.4	晚白垩世	本文所
6	大营	93.1±3.5	晚白垩世	测数据
7	铀矿床	62.3±1.7	古新世	

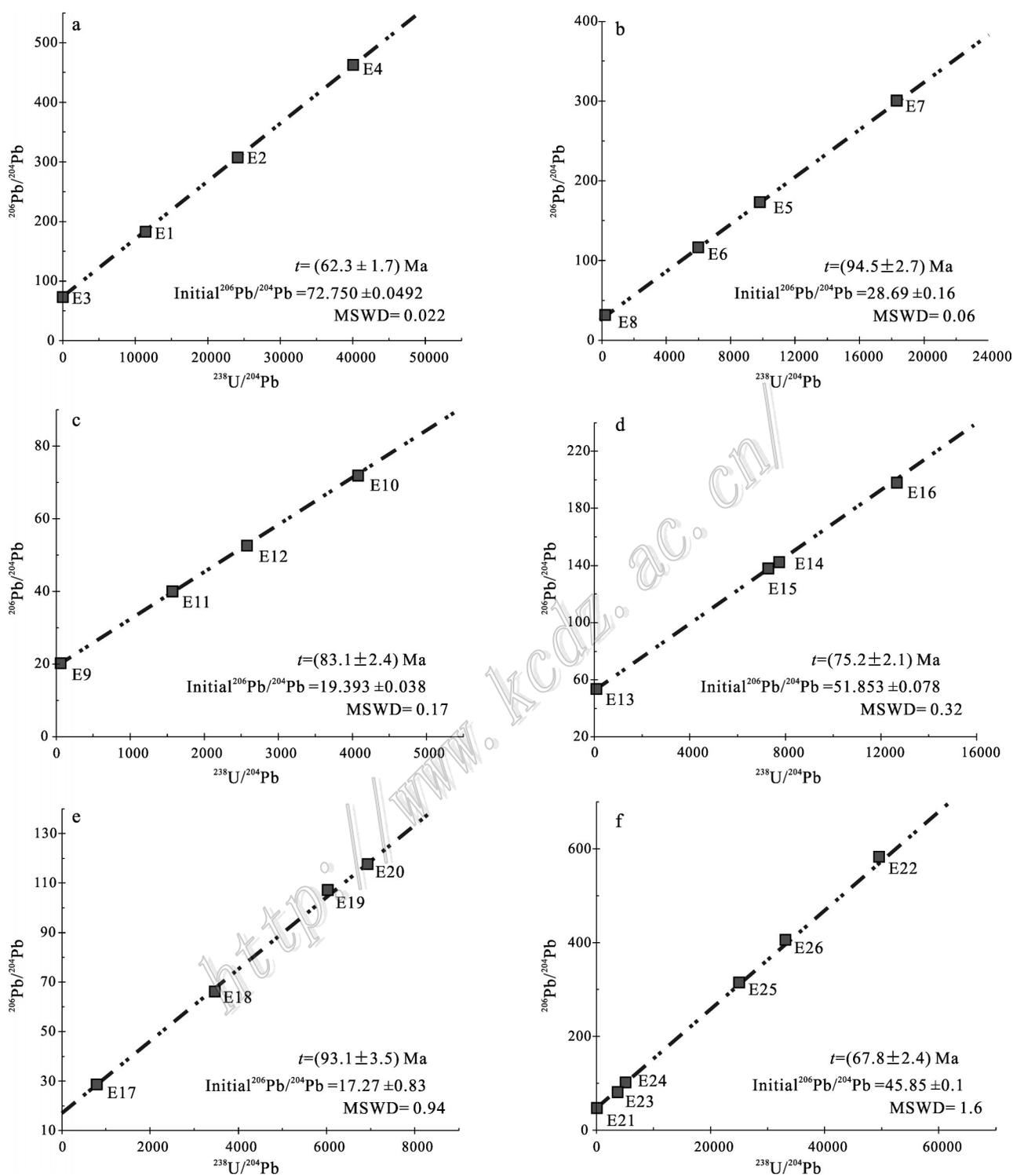


图 5 鄂尔多斯盆地东北部纳岭沟和大营铀矿床 U-Pb 等时线图

Fig. 5 The U-Pb isochron of Nalinggou and Daying uranium deposits in northeast Ordos Basin

时,以含铀腐殖酸盐的形式进入岩石裂隙和胶结物中沉淀下来(李金宝等,2006),从而导致含矿砂岩有机质含量高于氧化砂岩。前人研究表明,含矿砂岩

中铀含量与有机质丰度呈负相关,有机质的氯仿沥青“A”及 A/C 比值为 0.79%~32.34%,处在成熟阶段,铀富集成矿明显经历了伴随有机质氧化、成熟和分

解的晚成岩-后期含铀热液过程(薛伟等,2009)。含烃热流体的参对本区铀成矿起到了积极的促进作用,为铀的活化、迁移、富集成矿提供了有利条件(刘汉彬等,2012)。

4.1.2 铀富集伴随强改造过程

直罗组沉积后,先经历了早期的古氧化,砂岩被氧化为砖红色、紫红色,之后又经历了油气的二次还原作用,将砂岩还原为绿色,直接证据就是岩芯中还可可见绿色砂岩包裹砖红色、紫红色的氧化砂岩残留。绿色蚀变砂岩是强还原环境下的产物,是古氧化砂岩经二次还原形成(吴柏林等,2006)。作者前期针对本区砂岩地球化学特征的研究结果表明,紫红色、砖红色的古氧化残留砂岩具有低U、低S、低TOC、高Ca、高 Fe^{3+}/Fe^{2+} 的特征;绿色二次还原砂岩具有低U、低S、低TOC、低Ca、低 Fe^{3+}/Fe^{2+} 的特点(易超等,2015b)。2种砂岩的S和TOC含量均较低,反映出被氧化的特征。古氧化残留砂岩由于保留下其氧化特征,因此具有高 Fe^{3+}/Fe^{2+} 值,二次还原砂岩由于受到后期油气二次还原作用的影响,使得 Fe^{3+}/Fe^{2+} 值较低。岩矿鉴定结果表明,在本区的古氧化砂岩中多处可见铁的氧化产物,包括赤铁矿、褐铁矿、白钛石(钛铁矿的氧化产物)等,还可见强烈氧化的黑云母(图6a-i);绿色砂岩中可见多处黑云母的强绿泥石化(图6j-l)。

此外,在本区直罗组中绿色砂岩无论是平面上,还是剖面上,其分布范围均相当广泛,也表明本区的二次还原改造作用的影响范围较大(易超等,2015a)。由此可见,本区的氧化蚀变及二次还原蚀变现象是较为普遍的,且影响范围也较广泛,蚀变程度也是比较强的。直罗组自沉积后,经历了至少两次改造过程,即:早期酸性氧化改造、后期碱性二次还原改造。改造范围广、强度大,且多次改造作用与铀成矿作用均具有紧密的联系。

本区直罗组的成岩过程经历了早期的酸性氧化以及后期的碱性还原过程(樊爱萍等,2007)。酸性氧化过程中,来自蚀源区的含氧水与地层发生水-岩反映,造成长石的溶蚀,长石蚀变为高岭石释放出 Ca^{2+} ,同时活化了地层中的U,一同进入含氧水随之迁移。随着迁移距离的增加,水中的氧含量降低,当迁移至氧化还原过渡带,水中氧含量消耗殆尽,地层处于无氧环境,在硫酸盐还原菌的参与下,地层中的 SO_4^{2-} 被还原为 H_2S 气体及 CO_3^{2-} (Cai et al., 2007;李宏涛等,2007)。 CO_3^{2-} 与水中的 Ca^{2+} 产生 $CaCO_3$ 沉

淀下来,同时, H_2S 还原了水中的U使其沉淀富集,形成了铀矿物与方解石同时沉淀的现象。在显微镜下观察到铀石围绕方解石产出的现象以及本区的含矿砂岩中CaO含量较高的特点均证明了上述观点(易超等,2015b)。

4.1.3 微生物的参与铀富集过程

在铀成矿的氧化还原过程中,大多数情况下均有微生物(氧化硫铁杆菌、氧化硫杆菌、硫酸盐还原菌和生氢细菌等)的参与。综合本区C、S同位素的分布特征以及草莓状黄铁矿的产出,作者认为本区的铀成矿过程中也有微生物的参与。前人研究成果表明,在鄂尔多斯盆地北部砂岩型铀矿床中发现有微化石(Cai et al., 2007;蔡春芳等,2008)、脂肪酸甲脂(妥进才等,2006),指示了矿床中存在硫酸盐还原菌,且成矿以来,砂岩中一直存在硫酸盐还原菌(姜磊等,2012)。

喜氧菌在氧化带的地下水中较为活跃,氧化带砂岩中的金属硫化物在喜氧菌的作用下被氧化为硫酸,使地下水的 E_h 值升高,pH值降低(陈祖伊等,2010)。此时,岩石中的 U^{4+} 转变为较为活跃的 U^{6+} 随地下水进行迁移。当迁移至氧化带前锋,地下水随着迁移距离的增加及自身含氧量的降低,使得地层由富氧环境转变为缺氧环境,厌氧菌开始大量活动,在硫酸盐还原菌(厌氧菌)的作用下,地层中的 SO_4^{2-} 被还原为 H_2S 气体及 CO_3^{2-} ,pH值随之发生改变。 CO_3^{2-} 与地层中的 Ca^{2+} 形成 $CaCO_3$ 沉淀。 H_2S 气体具有很强的还原性,在其还原作用下,地下水中的 Fe^{3+} 被还原生成黄铁矿, U^{6+} 也被还原为 U^{4+} 沉淀,形成铀矿物。同时,pH值的改变导致一部分水中的铀酰离子被破坏,离解为 UO_2^{2+} 或水解为 UO_2OH^+ ,被地层中的负胶体吸附(图7)。

4.1.4 铀多期沉淀富集叠加成矿

从前人对本区铀成矿年龄的研究成果以及本次对铀成矿年龄的测定结果不难看出,本区铀成矿具有多期次叠加的特点。

中侏罗世直罗早期,盆地构造活动相对较弱,盆地相对稳定,沉积中心位于盆地中部,盆地北部直罗组发育了范围较大的河流相沉积,形成了有利于铀成矿的厚大且连通性好的砂体。此外,直罗组物源主要来自盆地北部的阴山山系,分布有铀含量较高的花岗岩岩体,为铀的初始富集提供了良好的铀源条件。局部地区铀富集成矿,从而形成了186 Ma和177 Ma的铀成矿年龄。

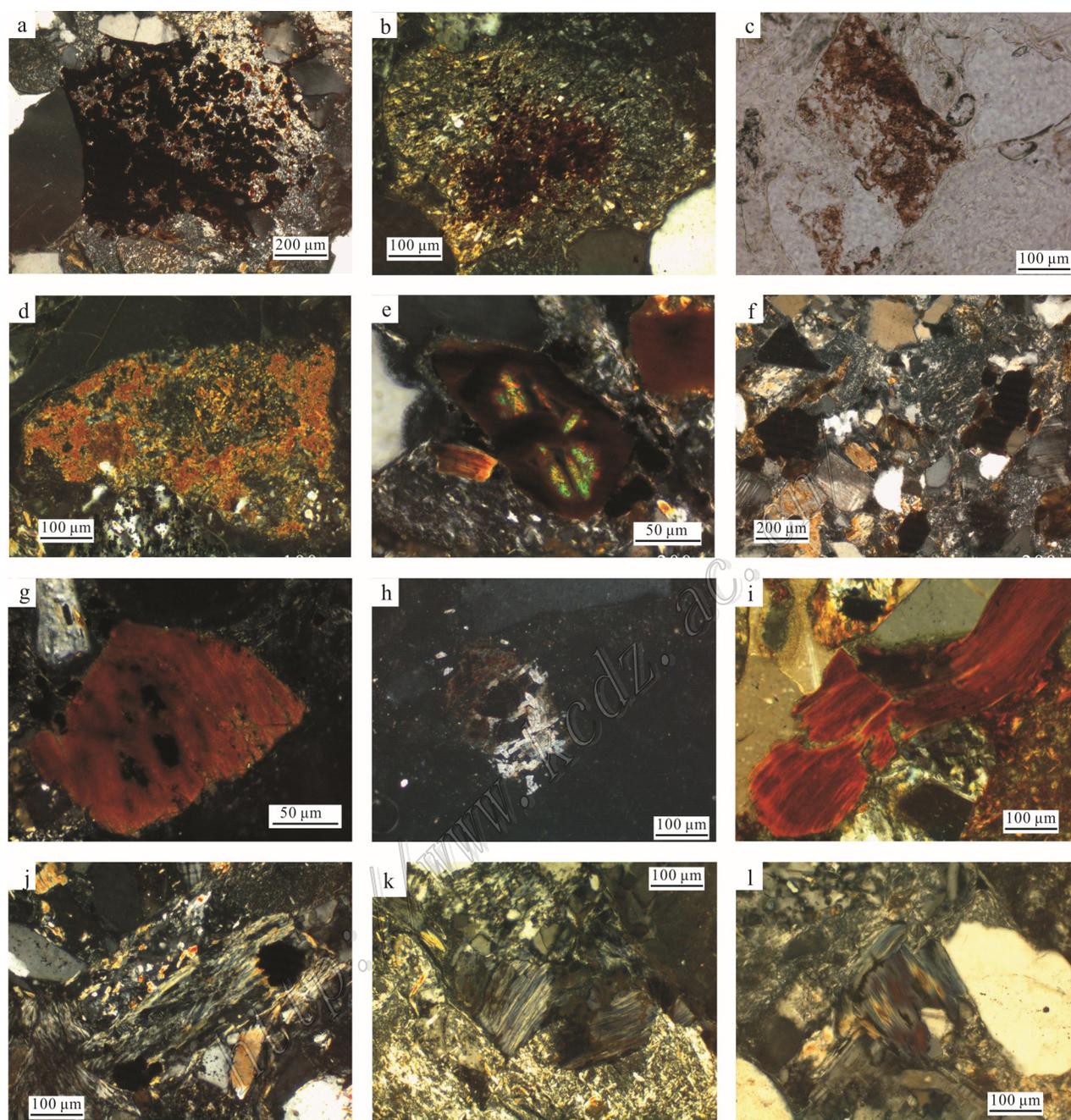


图 6 直罗组砂岩岩矿鉴定照片

a. 强氧化作用形成的铁氧化物, ZKN36-97-1, 350.3 m, 正交偏光; b. 岩屑中的赤铁矿, ZKN36-97-1, 352.8 m, 正交偏光; c. 岩屑中的赤铁矿, ZKN49-10-1, 474.6 m, 单偏光; d. 岩屑中强烈氧化作用形成的铁氧化物, ZKN36-97-1, 350.3 m, 正交偏光; e. 钛铁矿氧化后形成水针铁矿及锐钛矿, ZKN49-10-1, 522.7 m, 正交偏光; f. 金属矿物被不同程度的氧化, ZKN49-10-1, 522.7 m, 正交偏光; g. 磁铁矿强烈氧化为水针铁矿, ZKN49-10-1, 522.7 m, 正交偏光; h. 锐钛矿, 钛铁矿和赤铁矿, ZKN49-10-1, 474.6 m, 正交反光; i. 强烈氧化的黑云母, ZKN49-10-1, 393.4 m, 正交偏光; j. 黑云母绿泥石化, ZKN36-97-1, 369 m, 正交偏光; k. 黑云母强绿泥石化, ZKN49-10-1, 501.7 m, 正交偏光; l. 黑云母强绿泥石化, ZKN49-10-1, 501.7 m, 正交偏光

Fig.6 The microscopic images of sandstone in Zhiluo Formation

a. Iron oxide formed from strong oxidation, ZKN36-97-1, 350.3 m, crossed nicols; b. Hematite in debris, ZKN36-97-1, 352.8 m, crossed nicols; c. Hematite in debris, ZKN49-10-1, 474.6 m, plainlight; d. Iron oxide formed from strong oxidation in debris, ZKN36-97-1, 350.3 m, crossed nicols; e. Ilmenites oxidized to form hydrogoethites and anatases, ZKN49-10-1, 522.7 m, crossed nicols; f. Oxidized metal minerals, ZKN49-10-

l, 522.7 m, crossed nicols; g. Magnetites strongly oxidized to hydrogoethites, ZKN49-10-1, 522.7 m, crossed nicols; h. Anatases, ilmenites and hematite, ZKN49-10-1, 474.6 m, crossed nicols and reflected light; i. Strong oxidation of biotites, ZKN49-10-1, 393.4 m, crossed nicols; j. Chloritized biotites, ZKN36-97-1, 369 m, crossed nicols; k. Strongly chloritized biotites, ZKN49-10-1, 501.7 m, crossed nicols; l. Strongly chloritized biotites, ZKN49-10-1, 501.7 m, crossed nicols

中侏罗世直罗晚期,在直罗组下段河道砂体沉积后,上覆厚大泥岩阻挡层沉积之前,直罗组下段河道砂体直接接触大气降水,大气降水活化了早期预富集的铀,向下渗透,在潜水氧化界面形成规模不大的板状铀矿体。晚侏罗世,直罗组上覆安定组开始沉积,盆地北部先后经历了燕山Ⅱ幕构造抬升及燕山Ⅲ幕的次造山运动,直罗组向南西方向掀斜,局部被抬升出露地表。此时,局部出露地表的直罗组下段砂体开始接受大气降水的氧化改造,但并未形成具有规模的氧化带。同时,随着直罗组上覆地层逐渐沉积,受压实作用的影响,直罗组中的地下水受上覆厚大泥岩阻挡层的阻挡,无法排出地表,只能向下伏连通性好的砂体运移。运移过程中不断活化地层中前期富集的铀,随地下水垂向迁移。

早白垩世开始,白垩系开始沉积。到了晚白垩世,盆地表现为整体抬升,直罗组被大面积抬升出露地表,接受来自大气降水的层间氧化改造;与此同时,来自蚀源区的含氧含铀水也对直罗组下段渗透性好的河道砂体进行层间氧化改造。本区开始大规模的层间氧化作用,形成了规模巨大的层间氧化带。氧化流体活化了早期富集的铀继续迁移,在适合的

地球化学环境处发生铀的沉淀,富集成矿,成矿过程一直延续到始新世,形成了62.3~124 Ma之间的铀矿体。其中,以晚白垩世(67.8~94.5 Ma)为主成矿期。

渐新世之后,河套断陷形成,切断了来自蚀源区的含铀水补给,盆地最高夷平面向西掀斜抬升,古地下水向西流动。皂火壕铀矿床受构造抬升运动影响,处于地势高处,直罗组直接出露地表接受大气降水,使得地层内早期形成的铀矿体再次活化迁移,并沿着连通性好的可渗透砂岩运移,并在适合的氧化还原环境下沉淀富集,形成叠加矿体,如皂火壕铀矿床的20 Ma和8 Ma的铀矿既是在这时期形成。此时,来自深部的油气沿断层向上运移,对地层进行二次还原改造,同时对已形成的铀矿起到保护作用。

综合以上对构造演化史的分析,作者认为本区的铀成矿大致可分为中侏罗世直罗早期、中侏罗世直罗期—晚侏罗世、早白垩世—始新世、渐新世之后等多个阶段,其中晚白垩世为主成矿时期。

4.2 成矿模式

鄂尔多斯盆地北部的铀成矿具有极为复杂的过程,是一个多流体、多成矿作用、多阶段叠加成矿的

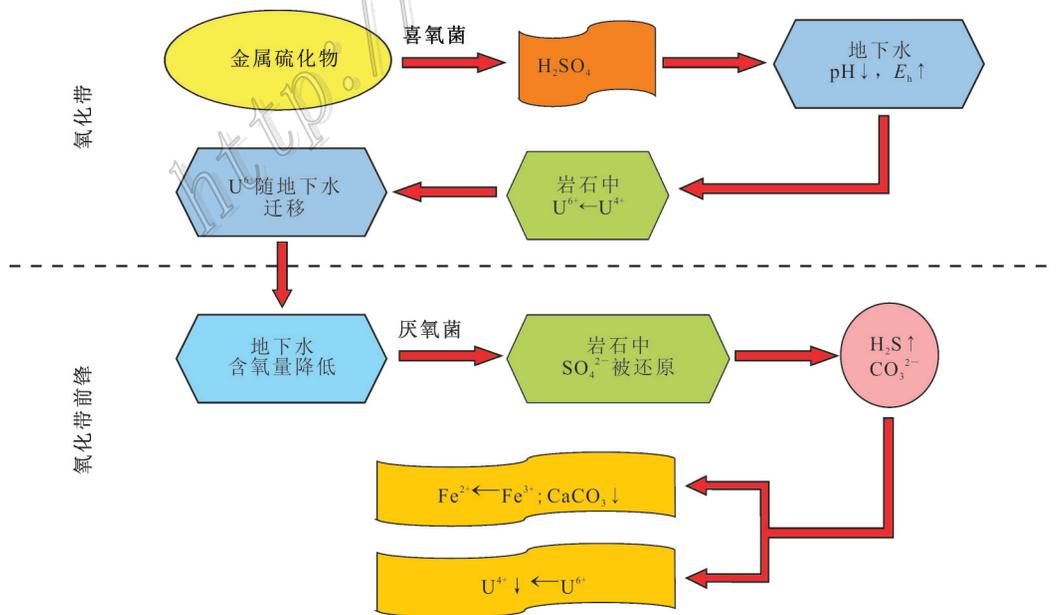


图7 铀富集机制示意图

Fig.7 Sketch map of uranium enrichment mechanism

过程(李子颖等,2006;2009),受多次构造运动的影响,既有潜水氧化作用、又有古层间氧化作用,成矿后期还伴有深部还原性气体的二次还原作用。作者在前人叠合成矿模式的基础上,通过对成矿年龄及铀富集特征的研究,进一步梳理了该区的铀成矿期次,明确了铀富集的机制,提出铀成矿大致分为中侏罗世直罗早期的同沉积富集阶段、中侏罗世直罗期—晚侏罗世的潜水氧化阶段、早白垩世—始新世的古层间氧化阶段和渐新世之后的还原性气体再改造阶段(图8)。

(1) 同沉积富集阶段(中侏罗世直罗早期)

研究区物源主要来自于盆地北部阴山山系,分布有大面积上太古界和下元古界结晶岩系、不同时期侵入的花岗岩岩体,铀含量一般较高,不仅可作为直罗组中铀初始富集的铀源,同时也为后期成矿提供一定的铀源。直罗组在温暖潮湿气候条件下接受沉积,富含的大量腐殖质、炭质和煤层可吸附铀,使地层本身在沉积过程中就富集了大量的铀,为后期层间氧化成矿作用提供了二次铀源(图8a)。

(2) 潜水氧化阶段(中侏罗世直罗期—晚侏罗世)

如图8b所示,中侏罗世直罗期,在直罗组下段河流相砂体沉积之后,可能有一段时间没有形成上覆的泥岩隔水层,直罗组砂体可直接接受大气降水,大气降水沿地层中砂体向下渗透,淋滤地层中的铀,在潜水氧化界面形成规模不大的板状矿体(张金带,2016)。晚侏罗世,受构造抬升运动的影响,局部地区的直罗组被抬升出露地表,接受大气降水对地层的氧化改造,但并未形成具有一定规模的层间氧化带。随着直罗组埋深逐渐增大,压实作用逐渐增强,导致直罗组上段中的孔隙水(地下水)无法排出地表,只能向直罗组下段厚度大且连通性好的砂体垂向运移,运移过程中活化了前期富集的铀随之垂向迁移(韩效忠等,2008)。

(3) 古层间氧化阶段(早白垩世—始新世)

早白垩世开始,白垩系开始沉积,到晚白垩世,燕山运动造成盆地的整体抬升,导致盆地北部中侏罗统的直罗组大面积出露地表接受从蚀源区带来的含氧含铀水以及大气降水的氧化改造,此时的古气候为干旱-半干旱气候。在层间氧化的过程中,地下水不仅将地层中的岩石氧化为砖红色、褐红色,同时,还在喜氧菌的参与下,将地层中的金属硫化物氧化为硫酸,使长石发生蚀变释放出 Ca^{2+} ,并将地层本

身含有的铀活化出来继续沿氧化方向迁移。随着运移距离的增加,地下水中的氧气逐渐消耗,氧化能力逐渐降低,在适合的还原障附近,水中的氧消耗殆尽,地层为无氧环境,pH值也发生了改变。在硫酸盐还原菌等厌氧菌的参与下, SO_4^{2-} 被还原为 H_2S 及 CO_3^{2-} 。 H_2S 将水中的 Fe^{3+} 还原为黄铁矿的同时也将 U^{6+} 还原为 U^{4+} 沉淀富集,且随着pH值的改变,水中铀酰离子被破坏,离解为 UO_2^{2+} 或水解为 UO_2OH^+ ,被地层中的负胶体吸附,而 Ca^{2+} 则与 CO_3^{2-} 反应生成 CaCO_3 。在此成矿阶段中,晚白垩世为主成矿时期。受直罗组产状平缓、近似水平的影响,层间水运移动力不足,导致可能在此阶段还伴有潜水氧化作用,使得本区的铀矿体基本为板状,而非层间氧化的卷状(张金带,2016)。但不可否认是,层间氧化作用仍是本阶段活化、迁移早期富集铀的最主要因素(图8c)。

(4) 还原性气体再改造阶段(渐新世以后)

渐新世,河套断陷形成,切断了来自蚀源区的含氧含铀水补给。同时,盆地最高夷平面向西掀斜抬升,古地下水向西流动。此时,东胜东部的直罗组被抬升出露地表,接受大气降水的氧化改造,活化了早期已成规模的铀矿带,沿着连通性好的可渗透砂岩向西运移,并在适合的氧化还原环境下沉淀富集,从而形成皂火壕铀矿床20 Ma和8 Ma的铀矿体。盆地深部含油气地层生成的烃类气体,不断沿区内发育的断裂构造向上逸散,对早期氧化砂岩进行二次还原改造,将古氧化的砖红色、褐红色还原为绿色、灰绿色,并对已形成的铀矿体起到了保护的作用。局部地段由于还原的不彻底,仍可见到早期氧化的砖红色、褐红色古氧化残留斑点。成矿富集带中含有的油气包裹体证明了在成矿作用时期油气参与了成矿-还原作用(图8d)。

5 结论

(1) 鄂尔多斯盆地东北部铀的存在形式主要以独立矿物及吸附状态两种形式存在,铀矿物类型以铀石为主,形态呈短柱状、晶簇状、球粒状,与黄铁矿、有机质、方解石、黏土矿物等关系密切。

(2) 综合对铀成矿年龄数据、构造演化史及古地下水流向的分析,划分了区域铀成矿期次,认为本区的铀成矿大致可分为中侏罗世直罗早期、中侏罗世直罗期—晚侏罗世、早白垩世—始新世、渐新世之后等4个阶段,其中晚白垩世为主成矿时期。

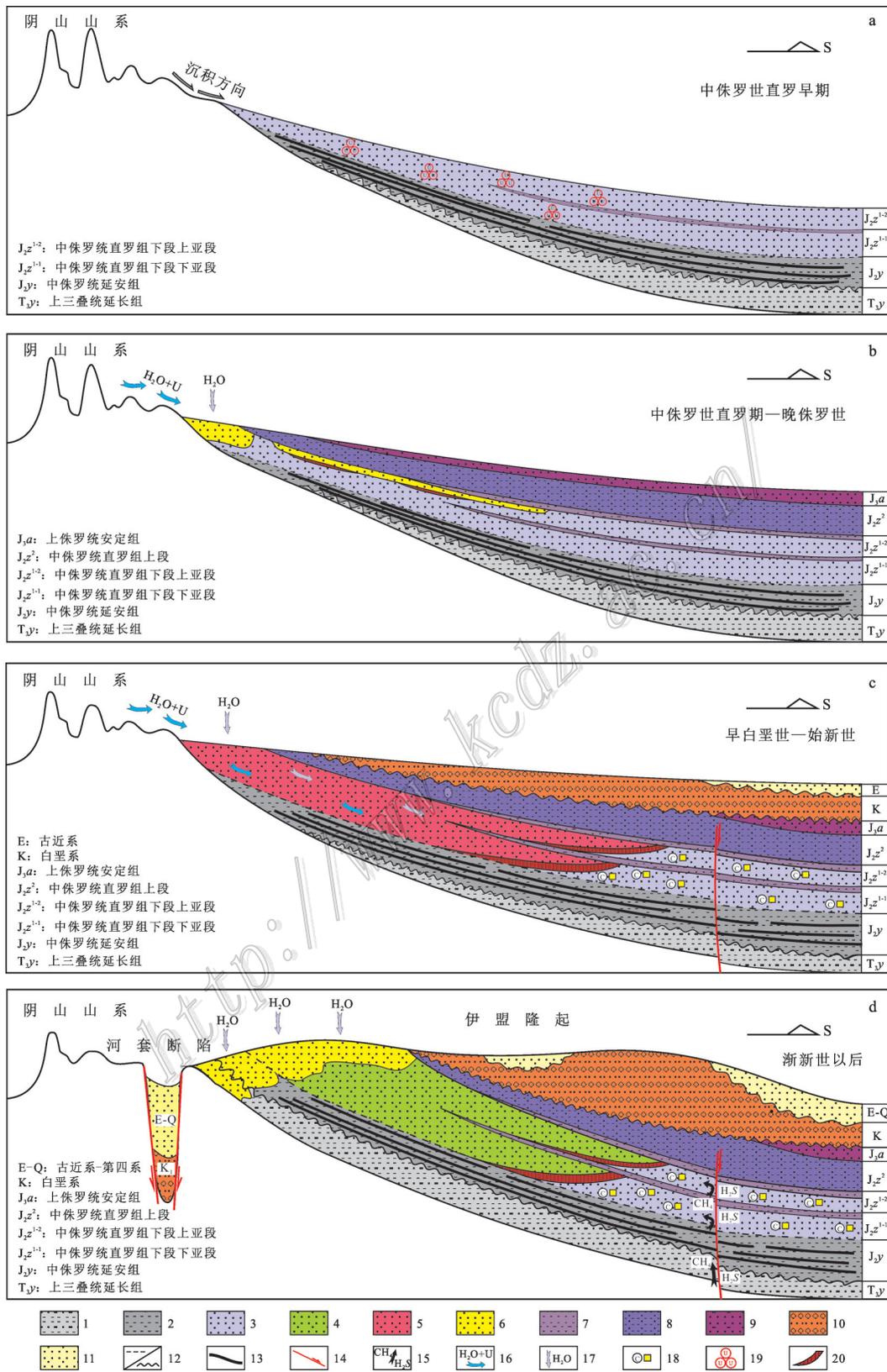


图8 鄂尔多斯盆地东胜地区油成矿模式示意图

1—浅灰色砂泥岩互层; 2—暗灰色泥岩; 3—灰色砂岩; 4—绿色砂岩; 5—紫红色、褐红色砂岩; 6—黄色砂岩; 7—杂色泥岩; 8—杂色泥岩夹砂岩; 9—紫红色砂岩; 10—砖红色砂砾岩; 11—浅黄色砂岩; 12—平行不整合, 角度不整合; 13—煤层; 14—断层; 15—还原性气体;

16—含氧含铀水;17—大气降水;18—有机质和黄铁矿;19—初始富集的铀;20—铀矿体

Fig.8 The sketch map of metallogenic model in Dongsheng area, Ordos basin

1—Light gray sandstone and mudstone interbedding; 2—Dark gray mudstone; 3—Gray sandstone; 4—Green sandstone; 5—Purple and brownish red sandstone; 6—Yellow sandstone; 7—Variegated mudstone; 8—Variegated mudstone interlayered with sandstone; 9—Purple sandstone; 10—Brick red sandy conglomerate; 11—Light yellow sandstone; 12—Parallel unconformity and angular unconformity; 13—Coal seam; 14—Fault; 15—Reductive gas; 16—U-O bearing water; 17—Meteoric water; 18—Organic matter and pyrite; 19—Pre-concentrated uranium; 20—Uranium orebody

(3) 总结了鄂尔多斯盆地东北部铀富集特征,提出了铀富集具有“充足的还原条件、强改造过程、微生物参与、多期次叠加成矿”的特点。直罗组充足的还原条件及微生物在铀的活化、沉淀过程中发挥的作用是导致铀富集的主要原因。直罗组沉积后,经历了多次改造作用,包括早期酸性的潜水氧化改造及层间氧化改造,成矿后期的碱性二次还原改造,早期的酸性氧化流体与后期的碱性还原流体为铀的活化、迁移、沉淀及富集成矿后的保护。在古层间氧化作用过程中,喜氧菌、厌氧菌等微生物不仅充当了地层中铀的活化剂,同时也是 H_2S 等铀的还原剂形成过程中不可或缺的参与者,为铀的沉淀富集作出了贡献。地层的强还原环境则是导致本区铀富集的主要原因。

(4) 在前人建立的叠合铀成矿模式的基础上,进一步理清了本区铀成矿的阶段性,铀成矿可大致分为中侏罗世直罗早期的同沉积富集阶段、中侏罗世直罗期一晚侏罗世的潜水氧化阶段、早白垩世—始新世的古层间氧化阶段和渐新世之后的还原性气体再改造阶段。

志 谢 核工业二〇八大队地勘二处的领导和同仁们在野外工作中给予了作者大力的支持,审稿专家在百忙之中对本文提出了大量有建设性的意见,在此一并志以最真挚的感谢!

References

Cai C F, Dong H L, Li H T, Xiao X J, Ou G X and Zhang C M. 2007. Mineralogical and geochemical evidence for coupled bacterial uranium mineralization and hydrocarbon oxidation in the Shashagetai deposit, NW China[J]. *Chemical Geology*, 236: 167-179.

Cai C F, Li H T, Li K K and Jiang L L. 2008. Anaerobic oxidation of petroleum coupled with reduction of uranium mineralization-cases from Dongsheng and Qianjiadian uranium deposits[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 30(5): 518-521 (in Chinese with English

abstract).

Chen C, Liu H J, Hou H Q, Han S Y, Ke D, Bai Y S, Ou G X and Li Y R. 2016. The relationship between pyrite and sandstone-hosted uranium mineralization of the Zhiluo Formation in the Northern Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(12): 3375-3380 (in Chinese with English abstract).

Chen Z Y and Guo Q Y. 2010. The mechanism of rare elements concentration in the redox front area of interlayer oxidation type sandstone hosted uranium deposits[J]. *Uranium Geology*, 26(1):3-10 (in Chinese with English abstract).

Fan A P, Liu Y Q, Yang R C and Zhang F X. 2006. Diagenesis and paleo-fluid migration events in the Zhiluo Formation in Dongsheng area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(5):82-87, 169(in Chinese with English abstract).

Fan A P, Liu Y Q, Yang R C, Feng Q, Zhang F X and Han Z Z. 2007. Study on diagenesis of sandstone type uranium deposits in Dongsheng area, Ordos Basin[J]. *Science in China(Series D: Earth Science)*, 37(S1):166-172(in Chinese).

Guo Q Y. 2010. Tectonic evolution at the western margin of Ordos Basin with respect to metallogenesis of sandstone type uranium deposits (doctoral dissertation) [D]. Supervisor: Zhou M F and Yan D P. Beijing: China University of Geosciences.13-15.

Han X Z, Zhang Z L, Yao C L, Li X D, Li S X, Miao A S and Yang J X. 2008. Discussion on metallogenic model for sandstone-hosted uranium deposits in northeastern Ordos Basin[J]. *Mineral Deposits*, 27(3):415-422(in Chinese with English abstract).

Han X Z, Zhang Z L, Yao C L, Li S X, Miao A S and Yang J X. 2009. Structural characteristic and its control to uranium mineralization in the northeast of Ordos Basin[J]. *Uranium Geology*, 25(5): 277-283(in Chinese with English abstract).

Han Y W, Ma Z D, Zhang H F, Zhang B R, Li F L, Gao S and Bao Z Y. 2003. *Geochemistry*[M]. Beijing: Geological Publishing House. 254-255(in Chinese).

Hoefs J. 2009. *Stable isotope geochemistry*[M]. Sixth Edition. Springer: 72.

Jiang L, Cai C F, Zhang Y D, Mao S Y, Sun Y G, Li K K, Xiang L and

- Zhang C M. 2012. Lipids of sulfate-reducing bacteria and sulfur-oxidizing bacteria found in the Dongsheng uranium deposit[J]. Chinese Science Bulletin, 57(12): 1028-1036(in Chinese).
- Li H T, Cai C F, Luo X R and Li K K. 2007. Geochemical evidence for sedimentary provenance of middle Jurassic sandstones in Dongsheng area, Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Geology, 42(2): 353-361(in Chinese with English abstract).
- Li J B, Che M, Li X, Li J H and Li R X. 2006. Preliminary study on metallization of Dongsheng uranium ore in Ordos Basin[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 28(2): 37-40(in Chinese with English abstract).
- Li R X, He Y, Li J B, Li J H and Li X. 2006. Isotope composition of fluid inclusion and tracing to the source of mineralization fluid in Dongsheng uranium deposit, North Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 80(5): 141-148(in Chinese with English abstract).
- Li Z Y, Chen A P, Fang X H, Ou G X, Zhang K, Jiao Y Q, Xia Y L, Chen F Z, Zhou W B, Liu Z H, Wu R G, Xiao X J and Sun Y. 2006. Metallogenic mechanism and superposition metallogenic model of the sandstone type uranium deposits in northeastern Ordos Basin[J]. Mineral Deposits, 25(S1): 245-248(in Chinese).
- Li Z Y, Fang X H, Chen A P, Ou G X, Xiao X J, Sun Y, Liu C Y and Wang Y. 2007. Genesis of grayish green sandstones in target Formation of sandstone-type uranium deposits in northern Ordos Basin[J]. Science in China(Series D: Earth Science), 37(S1): 139-146(in Chinese).
- Li Z Y, Fang X H, Chen A P, Ou G X, Sun Y, Zhang K, Xia Y L, Zhou W B, Chen F Z, Li M G, Liu Z H and Jiao Y Q. 2009. Superposition metallogenic model of sandstone-type uranium deposition the northeastern Ordos Basin[J]. Uranium Geology, 25(2): 65-70(in Chinese with English abstract).
- Lin T, Luo J L, Liu X H and Zhang S. 2007. Characteristics of fluid inclusions in sandstone-type uranium deposit and origin of uranium mineralization in Zhiluo formation of Dongsheng area[J]. Acta Petrolei Sinica, 28(5): 76-82,88(in Chinese with English abstract).
- Liu H B, Xia Y L and Tian S F. 2007. Study on geochronology and uranium source of sandstone-type uranium deposit in Dongsheng area[J]. Uranium Geology, 23(1): 23-29(in Chinese with English abstract).
- Liu H B, Li Z Y, Qin M K, Sun Y, Han J, Jin G S and Li J J. 2012. Progress in geochemistry of sandstone-type uranium deposit in North Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 19(3): 143-150(in Chinese with English abstract).
- Miao A S, Lu Q, Liu H F and Xiao P. 2010. Electronic microscopy study on the uranium minerals of Dongsheng sandstone-type uranium deposit in Ordos Basin[J]. Geoscience, 24(4): 145-152(in Chinese with English abstract).
- Pan A F, Li R J and He Y. 2007. Geochemical characteristics of elements in the Dongsheng uranium deposit, Ordos Basin[J]. Journal of northwest University (Natural Science Edition), 37(2): 291-296(in Chinese with English abstract).
- Raiswell R, Buckley F, Robert A, Berner and Anderson T F. 1988. Degree of pyritization of iron as a paleo-environmental indicator of bottom water oxygenation[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 58(5): 812-819.
- Tuo J C, Zhang M F and Wang X B. 2006. The content and significance of fatty acid methyl esters in Dongsheng sedimentary uranium ore deposits, Ordos Basin, China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 24(3): 432-439(in Chinese with English abstract).
- Wang M, Luo J L, Li M, Bai X J, Cheng C and Yan L W. 2013. Provenance and tectonic setting of sandstone-type uranium deposit in Dongsheng area, Ordos Basin: Evidence from U-Pb age and Hf isotopes of detrital zircons[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(8): 2746-2758(in Chinese with English abstract).
- Wu B L, Liu C Y, Zhang F X, Fang X H and Liu X. 2006. Geochemical characteristics of epigenetic alteration in Dongsheng sandstone-type uranium deposit and its metallogenic significance[J]. Acta Geologica sinica, 80(5): 740-747(in Chinese with English abstract).
- Xia Y L, Lin J R, Liu H B, Fan G and Hou Y X. 2003. Research on geochronology of sandstone-hosted uranium ore-formation in major uranium-productive basins, northern China[J]. Uranium Geology, 19(3): 129-136(in Chinese with English abstract).
- Xue W, Xue C J, Tu Q J, Kang M and Gao Y L. 2009. Some relations of uranium mineralization and organic matter in Jurassic strata on the northeastern margin of Ordos Basin, China[J]. Geological Review, 55(33): 59-67(in Chinese with English abstract).
- Xue W, Xue C J, Chi G X, Peng Y B and Wang K. 2010. Trace element and REE geochemical characteristics of sandstone-type uranium deposit in the Dongsheng area of the Ordos Basin, China[J]. Geoscience, 24(4): 776-784(in Chinese with English abstract).
- Yang J J. 2003. Tectonic evolution and oil-gas distribution in Ordos Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press. 1-228(in Chinese).
- Yang X Y, Ling M X, Sun W, Miao J Y and Liu C Y. 2006. Characteris-

- tics of fluid inclusions in sandstone-type uranium deposit of Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 27(6):32-37 (in Chinese with English abstract).
- Yang X Y, Luo X D, Ling M X and Lai X D. 2008. Geochemical features of sandstone-type uranium deposits in the Ordos Basin and their geological significances[J]. *Geological Review*, 54(4): 539-549 (in Chinese with English abstract).
- Yi C, Zheng Y L and Wang M L. 2013. Heterogeneity of uranium host rocks in Zhiluo Formation in Dongsheng area and its relation to uranium mineralization[J]. *Uranium Geology*, 29(3): 139-145 (in Chinese with English abstract).
- Yi C, Han X Z, Li X D, Zhang K and Chen X L. 2014. Study on sandstone petrologic feature in the Zhiluo Formation and its controls on uranium mineralization in northeastern Ordos Basin[J]. *Geological Journal of China Universities*, 20(2): 1-15 (in Chinese with English abstract).
- Yi C, Chen X L, Li X D, Zhang K, Wang M T and Li J X. 2015. Metallogenic characteristic of the paleo interlayer oxidation type sandstone-hosted uranium deposits in northeastern Ordos Basin[J]. *Uranium Geology*, 31(S1): 247-257 (in Chinese with English abstract).
- Yi C, Gao H W, Li X D, Zhang K, Chen X L and Li J X. 2015. Study on indicative significance of major elements for sandstone-type uranium deposit in Zhiluo formation in northeastern Ordos Basin[J]. *Mineral Deposits*, 34(4): 801-813 (in Chinese with English abstract).
- Zhao F M, Chen Z R, Zhang J Y and Wang W G. 1988. Identification manual of uranium mineral[M]. Beijing: Atomic Energy Press. 118-121 (in Chinese).
- Zhang J D. 2016. Innovation and development of metallogenic theory for sandstone type uranium deposit in China[J]. *Uranium Geology*, 32(6): 321-332 (in Chinese with English abstract).
- Zhang L, Liu C Y, Zhao Z P, Wang F F and Song Z S. 2015. Fluid evolution and mineralization of Hangjingqi sandstone-type uranium deposit, Ordos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(3): 372-385 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z L, Han X Z, Li S X, Yao C L and Zhao Y A. 2010. Sedimentary facies of the lower part of Middle Jurassic Zhiluo Formation in northeastern Ordos Basin and its controls on uranium mineralization[J]. *Journal of Palaeogeography*, 12(6): 749-758 (in Chinese with English abstract).
- Zhao J F, Liu C Y, Zhao J S and Wang X M. 2008. Sedimentary facies and its evolution of Jurassic Zhiluo Formation in Ordos Basin[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 38(3): 480-486 (in Chinese with English abstract).
- Zhu X Y, Wang Y L, Wang Z C, Zhang C J and Liu J H. 2003. Trace element geochemistry of sandstone-type uranium deposits in Dongsheng area[J]. *Geology-Geochemistry*, 31(2): 39-45 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蔡春芳, 李宏涛, 李开开, 姜磊. 2008. 油气厌氧氧化与铀还原的耦合关系——以东胜和钱家店铀矿床为例[J]. *石油实验地质*, 30(5): 518-521.
- 陈超, 刘洪军, 侯惠群, 韩邵阳, 柯丹, 白云生, 欧光习, 李言瑞. 2016. 鄂尔多斯盆地北部直罗组黄铁矿与砂岩型铀矿化关系研究[J]. *地质学报*, 90(12): 3375-3380.
- 陈祖伊, 郭庆银. 2010. 砂岩型铀矿床层间氧化带前锋区稀有元素富集机制[J]. *铀矿地质*, 26(1): 3-10.
- 樊爱萍, 柳益群, 杨仁超, 张复新. 2006. 东胜直罗组砂岩成岩作用过程与古流体运移事件分析[J]. *地质学报*, 80(5): 82-87, 169.
- 樊爱萍, 柳益群, 杨仁超, 冯乔, 张复新, 韩作振. 2007. 鄂尔多斯盆地东胜地区砂岩型铀矿成岩作用研究[J]. *中国科学(D辑:地球科学)*, 37(增刊1): 169-175.
- 郭庆银. 2010. 鄂尔多斯盆地西缘构造演化与砂岩型铀成矿作用(博士论文)[D]. 导师:周美夫、颜丹平. 北京:中国地质大学. 13-15页.
- 韩效忠, 张宇龙, 姚春玲, 李西得, 李胜祥, 苗爱生, 杨建新. 2008. 鄂尔多斯盆地东北部砂岩型铀矿成矿模式研究[J]. *矿床地质*, 27(3): 415-422.
- 韩效忠, 张宇龙, 姚春玲, 李胜祥, 苗爱生, 杨建新. 2009. 鄂尔多斯盆地东北部构造特征及其对铀矿化的控制作用[J]. *铀矿地质*. 25(5): 277-283.
- 韩吟文, 马振东, 张宏飞, 张本仁, 李方林, 高山, 鲍征宇. 2003. 地球化学[M]. 北京:地质出版社. 254-255.
- 姜磊, 蔡春芳, 张永东, 茅晟懿, 孙永革, 李开开, 向雷, 张春明. 2012. 东胜铀矿床中发现硫酸盐还原菌和硫氧化菌类脂[J]. *科学通报*, 57(12): 1028-1036.
- 李宏涛, 蔡春芳, 罗晓容, 李开开. 2007. 内蒙古东胜地区中侏罗统砂岩沉积物源的地球化学证据[J]. *地质科学*, 42(2): 353-361.
- 李金宝, 车明, 李鑫, 李继宏, 李荣西. 2006. 鄂尔多斯盆地东胜铀矿成矿作用研究[J]. *地球科学与环境学报*, 28(2): 37-40.
- 李荣西, 赫英, 李金保, 李继宏, 李鑫. 2006. 东胜铀矿流体包裹体同

- 位素组成与成矿流体来源研究[J]. 地质学报, 80(5):141-148.
- 李子颖, 陈安平, 方锡珩, 欧光习, 张珂, 焦养泉, 夏毓亮, 陈法正, 周文斌, 刘忠厚, 吴仁贵, 肖新建, 孙晔. 2006. 鄂尔多斯盆地东北部砂岩型铀矿成矿机理和叠合成矿模式[J]. 矿床地质, 25(增刊):245-248.
- 李子颖, 方锡珩, 陈安平, 欧光习, 肖新建, 孙晔, 刘池洋, 王毅. 2007. 鄂尔多斯盆地北部砂岩型铀矿目标层灰绿色砂岩成因[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 37(S1):139-146.
- 李子颖, 方锡珩, 陈安平, 欧光习, 孙晔, 张珂, 夏毓亮, 周文斌, 陈法正, 李满根, 刘忠厚, 焦养泉. 2009. 鄂尔多斯盆地东北部砂岩型铀矿叠合成矿模式[J]. 铀矿地质, 25(2):65-70.
- 林潼, 罗静兰, 刘小洪, 张三. 2007. 东胜地区直罗组砂岩型铀矿包裹体特征与铀矿成因研究[J]. 石油学报, 28(5):76-82, 88.
- 刘汉彬, 夏毓亮, 田时丰. 2007. 东胜地区砂岩型铀矿成矿年代学及成矿铀源研究[J]. 铀矿地质, 23(1):23-29.
- 刘汉彬, 李子颖, 秦明宽, 孙晔, 韩娟, 金贵善, 李军杰. 2012. 鄂尔多斯盆地北部砂岩型铀矿地球化学研究进展[J]. 地学前缘, 19(3):143-150.
- 苗爱生, 陆琦, 刘惠芳, 肖平. 2010. 鄂尔多斯盆地东胜砂岩型铀矿中铀矿物的电子显微镜研究[J]. 现代地质, 24(4):145-152.
- 潘爱芳, 黎荣剑, 赫英. 2007. 鄂尔多斯盆地东胜铀矿元素地球化学特征[J]. 西北大学学报(自然科学版), 37(2):291-296.
- 妥进才, 张明峰, 王先彬. 2006. 鄂尔多斯盆地北部东胜铀矿区沉积有机质中脂肪酸甲酯的检出及意义[J]. 沉积学报, 24(3):432-439.
- 王盟, 罗静兰, 李杪, 白雪晶, 程辰, 闫辽伟. 2013. 鄂尔多斯盆地东胜地区砂岩型铀矿源区及其构造背景分析——来自碎屑锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素的证据[J]. 岩石学报, 29(8):2746-2758.
- 吴柏林, 刘池阳, 张复新, 方锡衍, 刘雄. 2006. 东胜砂岩型铀矿后生蚀变地球化学性质及其成矿意义[J]. 地质学报, 80(5):740-747.
- 夏毓亮, 林锦荣, 刘汉彬, 范光, 侯艳先. 2003. 中国北方主要产铀盆地砂岩型铀矿成矿年代学研究[J]. 铀矿地质, 19(3):129-136.
- 薛伟, 薛春纪, 涂其军, 康明, 高亚龙. 2009. 鄂尔多斯盆地东北缘侏罗系铀矿化与有机质的某些关联[J]. 地质论评, 55(33):59-67.
- 薛伟, 薛春纪, 池国祥, 彭云彪, 王凯. 2010. 鄂尔多斯盆地东胜砂岩型铀矿微量和稀土元素地球化学特征[J]. 现代地质, 24(4):776-784.
- 杨俊杰. 2003. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律[M]. 北京:石油工业出版社. 1-228.
- 杨晓勇, 凌明星, 孙卫, 苗建宇, 刘池洋. 2006. 鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿流体包裹体特征[J]. 石油学报, 27(6):32-37.
- 杨晓勇, 罗贤冬, 凌明星, 赖小东. 2008. 鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿床地球化学特征及其地质意义[J]. 地质论评, 54(4):539-549.
- 易超, 郑云龙, 王明太. 2013. 东胜地区直罗组铀储层非均质性特征及其与铀成矿关系[J]. 铀矿地质, 29(3):139-145.
- 易超, 韩效忠, 李西得, 张康, 陈心路. 2014. 鄂尔多斯盆地东北部直罗组砂岩岩石学特征与铀矿化关系研究[J]. 高校地质学报, 20(2):1-15.
- 易超, 陈心路, 李西得, 张康, 王明太, 李静贤. 2015a. 鄂尔多斯盆地东北部古层间氧化带砂岩型铀矿成矿特征[J]. 铀矿地质, 31(S1):247-257.
- 易超, 高贺伟, 李西得, 张康, 陈心路, 李静贤. 2015b. 鄂尔多斯盆地东北部直罗组砂岩型铀矿床常量元素指示意义探讨[J]. 矿床地质, 34(4):801-813.
- 赵凤民, 陈璋如, 张静宜, 王文广. 1988. 铀矿物鉴定手册[M]. 北京:原子能出版社. 118-121.
- 张金带. 2016. 我国砂岩型铀矿成矿理论的创新和发展[J]. 铀矿地质, 32(6):321-332.
- 张龙, 刘池洋, 赵中平, 王飞飞, 宋子升. 2015. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区砂岩型铀矿流体作用与成矿[J]. 地学前缘, 22(3):372-385.
- 张宇龙, 韩效忠, 李胜祥, 姚春玲, 赵永安. 2010. 鄂尔多斯盆地东北部直罗组下段下亚段沉积相及其对铀成矿的控制作用[J]. 古地理学报, 12(6):749-758.
- 赵俊峰, 刘池洋, 赵建设, 王晓梅. 2008. 鄂尔多斯盆地侏罗系直罗组沉积相及其演化[J]. 西北大学学报(自然科学版), 38(3):480-486.
- 朱西养, 汪云亮, 王志畅, 张成江, 刘建华. 2003. 东胜砂岩型铀矿微量元素地球化学特征初探[J]. 地质地球学报, 31(2):39-45.