

鄂尔多斯盆地纳岭沟铀矿床板状矿体形成机制: 来自含矿层黏土矿物研究的制约*

丁波¹, 刘红旭^{1*}, 张宾¹, 易超¹, 王贵², 李平¹

(1 中核集团铀资源勘查与评价重点实验室, 核工业北京地质研究院, 北京 100029; 2 核工业二〇八大队, 内蒙古 包头 014010)

摘要 纳岭沟铀矿床是近年来在鄂尔多斯盆地北部发现的一个大型铀矿床。与典型层间氧化带砂岩型铀矿不同, 纳岭沟铀矿床具有矿体呈板状、似层状产出与铀矿物以铀石为主等特点。文章通过扫描电镜与X衍射等方法对含矿层不同地球化学分带砂岩黏土矿物组合类型、相对含量的变化开展了系统的研究, 为该区铀成矿模式与板状矿体的形成机制提供依据。研究表明, 含矿层砂岩中黏土矿物以呈蜂窝状、片絮状产出的蒙脱石为主, 其次为呈片状、书页状及蠕虫状产出的高岭石与呈叶片状、花朵状集合体产出的绿泥石, 局部可见伊利石与蒙脱石向绿泥石转化而成的绿蒙混层; 从二次还原绿色带—矿带与原生带, 呈现蒙脱石、绿泥石明显减少, 高岭石含量与 $w(\text{TOC})$ 、 CH_4 明显增加的趋势, 说明二次还原绿色带与矿带之间存在 E_h -pH突变界面; 含矿层经历了弱碱性大气降水(含铀含氧)、酸性流体(有机酸与煤成气)、中-低温碱性热液油气与富 Na^+ 、 Ca^{2+} 的弱碱性流体(盆地卤水)的共同作用, 其中弱碱性大气降水与中-低温碱性热液混合而成的碱性-氧化成矿热液与下伏延安组煤系地层演化产生的酸性-还原流体(有机酸与煤成气)在相互接触面上因 E_h -pH突变而造成铀石的沉淀, 并在 E_h -pH突变界面上形成板状矿体。

关键词 地球化学; 板状矿体; 黏土矿物; E_h -pH界面; 纳岭沟铀矿床; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: P619.14

文献标志码: A

Formation mechanism of tabular orebody in Nalinggou uranium deposit, Ordos Basin: Constraints on study of clay minerals from ore-bearing sandstone

DING Bo¹, LIU HongXu¹, ZHANG Bin¹, YI Chao¹, WANG Gui² and LI Ping¹

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

Abstract

The Nalinggou uranium deposit is another large uranium deposit found in recent years in northern of Ordos Basin. It has the characteristics of tabular orebody and coffinite, which is different from features of the typical interlayer oxidation zone sandstone type uranium deposit. The authors carried out a systematic study of the variation of the composition type and relative content of the clay mineral assemblage in different geochemical zones of the ore-bearing layer by scanning electron microscopy and X-diffraction method, and studied the components and sources of fluid in the ore-bearing layer in recent years. Then, the authors investigated the formation mechanism

* 本文得到国家科技部 973 计划项目(编号: 2015CB453004)、鄂尔多斯盆地西北部砂岩型铀矿成矿作用与新区突破研究(编号: 地 D1911)和国家预先研究项目(编号: 3210402)联合资助

第一作者简介 丁波, 男, 1991 年生, 工程师, 主要从事砂岩型铀矿成矿机理、成矿作用与成矿模式等方面的研究。Email: 18773485100@163.com

** 通讯作者 刘红旭, 男, 1977 年生, 正高级工程师, 主要从事砂岩型铀矿成矿作用、成矿规律及成矿预测等方面的研究。Email: lhx100029@163.com

收稿日期 2018-06-10; 改回日期 2019-01-04。赵海杰编辑。

of tabular orebody in the Nalinggou uranium deposit. The results show that the clay minerals in ore-bearing sandstone are composed mainly of montmorillonite with honeycomb and flocculation forms, subordinately of kaolinite with flake, book-page, vermicular forms and chlorite exhibiting blade and flower-shaped aggregates. It can be seen that illite and montmorillonite have been transformed into chlorite-montmorillonite. From the secondary reduction green zone to the ore zone and primary zone, montmorillonite and chlorite decrease significantly and kaolinite and TOC, CH_4 obviously increase, suggesting that the E_h -pH interface exists between the ore zone and secondary reduction green zone. The results of the comparison of the relative values of clay minerals in different geochemical zones show that ore-bearing sandstone was affected by multiple fluids which contained weakly alkaline meteoric waters (water with oxygen and uranium), organic acidic fluid (organic acids and coal-derived gas), oil gas, medium and low temperature alkaline hydrothermal solution, and the basin brine was weakly alkaline and rich in Na^+ 、 Ca^{2+} . Coffinite and tabular orebody were formed in the E_h -pH interface which was composed of alkaline-oxidized metallogenic hydrothermal fluid mixed with weakly alkaline meteoric waters and medium and low temperature alkaline hydrothermal solution as well as acid-reduction fluid (organic acid and coal gas) produced by the evolution of Yanan formation.

Key words: geochemistry, clay minerals, tabular orebody, E_h -pH interface, Nalinggou uranium deposit, Ordos basin

中国自20世纪80年代引入层间氧化带砂岩型铀矿成矿理论和找矿勘查技术以来,先后在伊犁、吐哈、鄂尔多斯、二连、松辽及巴音戈壁等多个盆地发现了一大批大、中型乃至特大型砂岩型铀矿床,其中西部盆地含矿层表生流体层间氧化带改造作用明显,矿体以卷状为主,而中-东部盆地砂岩型铀矿则表现出明显的热流体改造特征,矿体以板状、透镜体为主,向传统的层间氧化带砂岩型铀矿理论提出了新的挑战(张金带,2016)。其实早在1950年,学者就在美国西部科罗拉多高原铀成矿区第一次发现了板状铀矿床,系统研究板状矿体的形成是流体混合作用导致成矿,具体为浅部局部含氧低矿化度地下水下降与深部(热)卤水上升流体形成的重力稳定界面及其不断向盆地方向迁移(Richard, 1992; 1994)。

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,鄂尔多斯盆地又探明了纳岭沟和大营铀矿床,并且其已成为中国北方重要的砂岩型铀矿成矿带之一。大量学者对鄂尔多斯盆地东北部砂岩型铀矿含矿砂岩岩石学特征(肖新建,2004;刘汉彬等,2012;易超等,2014)、铀矿物赋存状态及形成机制(肖新建,2004;杨晓勇等,2009;王贵等,2017)、成矿流体特征及演化(肖新建,2004;李荣西等,2006;杨晓勇等,2009;李子颖等,2009;薛春纪等,2010;吴柏林等,2014;2015;张龙等,2015)、成矿年龄(肖新建,

2004;刘汉彬等,2012;易超等,2018)、成矿机理与成矿模式(肖新建,2004;王贵等,2017;李子颖等,2009;杨晓勇等,2009)等方面开展了系统的研究,并取得了一系列成果,但是对该区板状矿体成因及形成机制等方面的研究依然较为薄弱。薛春纪等(2010)通过数值模拟研究认为在侏罗纪—白垩纪发育的还原-渗出流体与含氧-渗入流体的混合界面对于鄂尔多斯盆地北缘砂岩型铀矿成矿至关重要;李西得等(2017)研究认为含氧含铀水和较弱的深部还原性流体作用是形成板状矿体的主要因素。此外,以往的研究侧重研究氧化-还原(E_h)对板状矿体的影响,而忽视了酸碱性(pH)与 SiO_2 活度的重要性,尤其是对研究区铀矿物以铀石为主的砂岩型铀矿床。

因此,本文以铀石形成的条件(pH、 E_h 、 SiO_2)为突破口,对纳岭沟铀矿床含矿层不同分带砂岩中黏土矿物微观形貌特征、组合类型、相对含量变化等开展系统研究,反演含矿层经历的改造流体组分与来源,并结合前人对研究区埋藏热演化史与构造热事件的研究来探讨该区铀成矿过程与板状矿体形成机制,建立纳岭沟铀成床 E_h -pH界面控矿模式。上述研究不仅对深化砂岩型铀矿成矿机理及模式、补充完善砂岩型铀矿成矿理论具有重大的理论意义,而且对深部铀矿定位与铀资源扩大具有实际指导意义,同时,也为中国北方各盆地的深部砂岩型铀矿研究和勘查工作起到借鉴作用。

1 成矿地质背景

鄂尔多斯盆地位于华北克拉通西部,是产在不稳定克拉通内部的多重叠合盆地。盆地主要发育煤、天然气、石油、铀矿等多种能源矿产。其中,石油、天然气和煤在平面上具有“北气南油、满盆煤”的分布特征;而铀矿主要分布在盆地边缘,空间上具有下部油气、中部煤、上部铀的分布特点(刘池洋等,2006)。鄂尔多斯盆地北缘砂岩型铀矿主要集中发育于伊盟隆起上,从东往西依次发育皂火壕、纳岭沟、大营等大型、特大型铀矿床,出露地层包括三叠系、中侏罗统、下白垩统、上新统、第四系(图1)。

纳岭沟铀矿床位于鄂尔多斯盆地东北部伊盟隆起南缘,北邻河套地堑,总体表现为北东高,南西低的单斜特征,发育多条断裂(F1)(图1),为下伏油气与热液的运移提供了通道(张更信等,2016)。铀矿化主要赋存于中侏罗统直罗组下段砂岩中,可分为

古氧化带、二次还原绿色带、矿带、还原灰色带,发育黏土蚀变、碳酸盐化及金属矿化(易超等,2014)。铀矿物主要发育于灰色中-粗砂岩中,以铀石为主,见少量的沥青铀,常与钛铁矿、黄铁矿或有机质相伴生(王贵等,2017)。铀矿体主要呈板状产出,少量卷状矿体,垂向上明显受绿色砂岩与灰色砂岩分界控制,主要产于分界附近的灰色砂岩中(图2),平面上受古层间氧化带(即二次还原绿色带)控制(王贵等,2017;易超等,2018)。已获得铀成矿年龄数据为 (94.5 ± 2.7) Ma、 (92.9 ± 5.6) Ma、 (84 ± 1) Ma、 (83.1 ± 2.4) Ma、 (75.2 ± 2.1) Ma、 (67.8 ± 2.4) Ma、 (61.7 ± 1.8) Ma、 (38.1 ± 3.9) Ma,对应地质年代分别为晚白垩世早期、古新世及始新世中期(易超等,2018)。此外,纳岭沟地段以北的黑石头沟地区下白垩统中见黑色玄武岩出露(邹和平等,2008)。

2 样品采集与分析方法

本文所用样品均采自纳岭沟铀矿床钻孔中不同

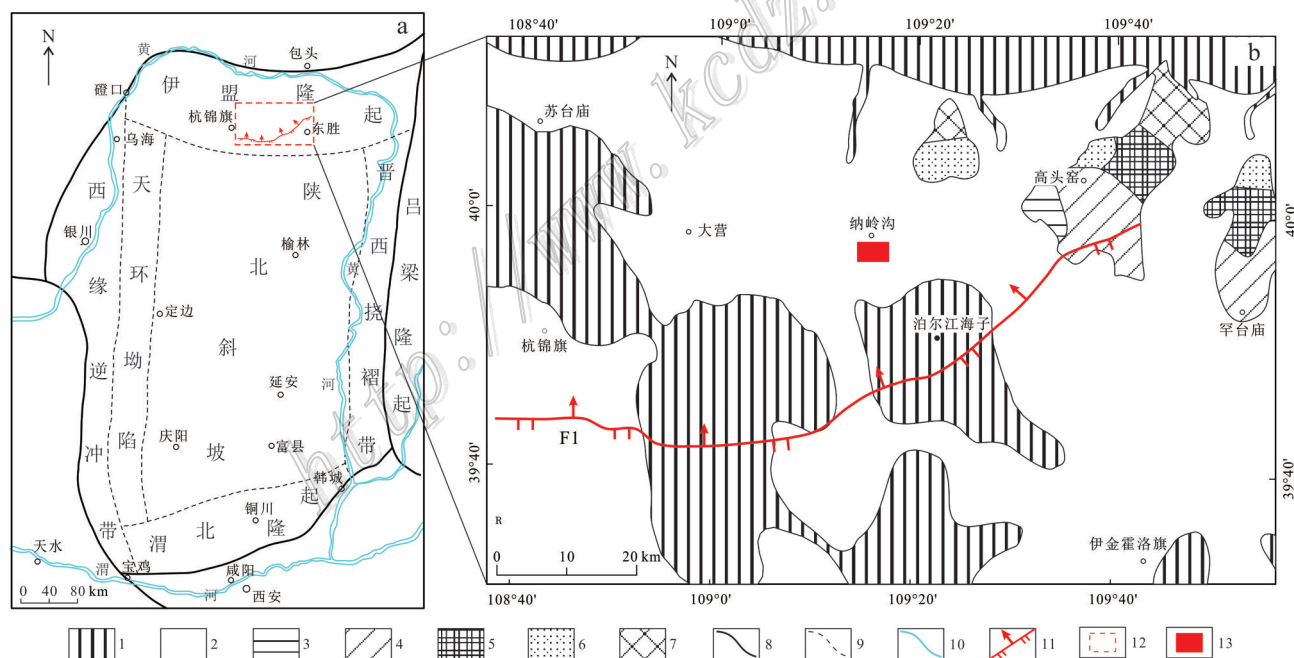


图1 鄂尔多斯盆地构造分区图(a)和鄂尔多斯盆地东北部纳岭沟地区地质简图(b)(易超等,2018)

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—河流;11—逆断层;12—研究区;13—铀矿床

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

(after Yi et al., 2018)

1—Quaternary; 2—Lower Cretaceous; 3—Middle Jurassic Anding Formation; 4—Middle Jurassic Zhiluo Formation; 5—Middle Jurassic Yanan Formation; 6—Upper Triassic Yanchang Formation; 7—Middle Triassic Ermaying Formation; 8—Boundary of basin; 9—Boundary of structure;
10—River; 11—Thrust fault; 12—Research area; 13—Uranium deposit

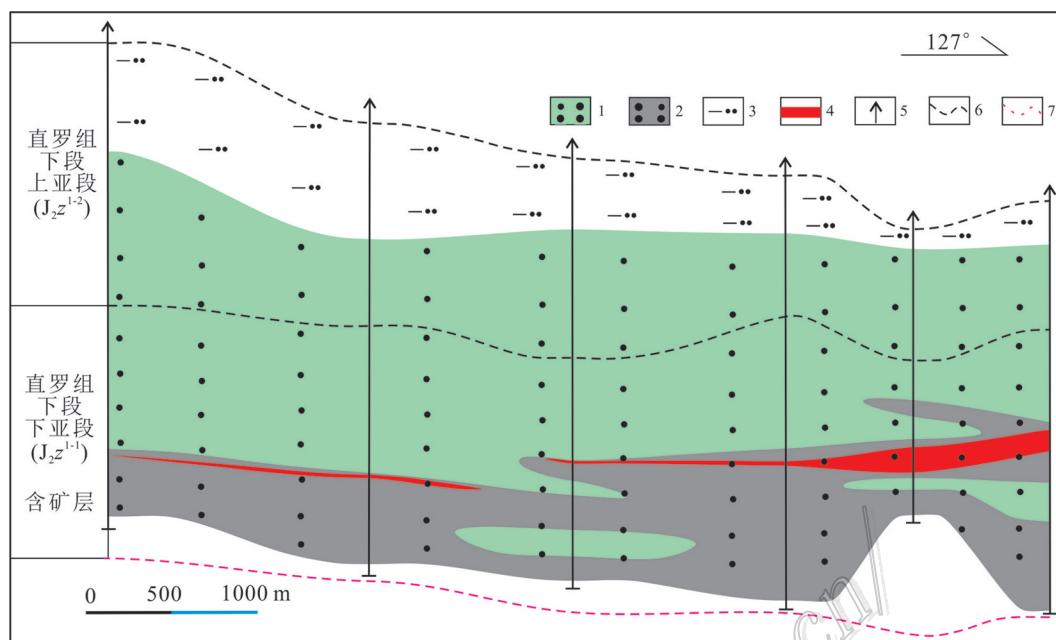


图2 纳岭沟铀矿床矿钻孔剖面图及矿体特征

1—绿色砂岩;2—灰色砂岩;3—泥岩与粉砂岩;4—工业铀矿体;5—钻孔;6—地层界限;7—推测地层界限

Fig. 2 Borehole profile and orebody characteristics of Nalinggou uranium deposit

1—Green sandstone; 2—Gray sandstone; 3—Mudstone and siltstone; 4—Uranium ore; 5—Drill hole; 6—Stratigraphic boundary; 7—Inferred stratigraphic boundary

分带的砂岩,包括红褐色砂岩、绿色砂岩、灰绿色砂岩、含矿砂岩、灰色砂岩。样品采集后立即用密封袋封装,尽量保证采集样品的代表性和新鲜性。

样品X-射线衍射定量分析在核工业北京地质研究院分析测试研究所完成,测试仪器型号为Panalytical X'Pert PRO MPD。扫描电镜在华北油田勘探开发研究院沉积实验室完成,实验仪器为TESCAN VEGA II型扫描电子显微镜。U含量采用ICP-MS分析,在核工业北京地质研究院分析测试研究所完成,使用仪器为Finnigan-MAT公司生产的ELEMENT型号的高分辨电感耦合等离子质谱仪,精度优于10%。

3 测试结果

3.1 黏土矿物微观特征

通过扫描电镜对纳岭沟铀矿床含矿层不同分带砂岩黏土矿物系统观察发现(图3a~d),含矿层砂岩中黏土矿物主要有蒙脱石(S)、高岭石(K)、绿泥石(C)及少量伊利石(I)与绿蒙混层(S/C)。其中,蒙脱石在各分带砂岩中均大量发育,呈蜂窝状、片絮状分

布在颗粒间或颗粒表面,常与高岭石(图3i~k)、绿泥石(图3f、g)、方解石(图3e)及铀矿物(图3h)相伴生,并可见高岭石向蒙脱石转化(图3i)与蒙脱石向绿泥石转化而成的绿蒙混层(图3g);高岭石(K)常见于还原带灰色砂岩与矿带灰色砂岩中(图3i~l),少见二次还原绿色砂岩中,呈片状、书页状及蠕虫状分布于颗粒表面或孔隙中,与蒙脱石相伴生(图3i~k),常可见高岭石向蒙脱石转化(图3i);绿泥石(C)常见于二次还原绿色与灰绿色砂岩中,呈叶片状、花朵状集合体附着在颗粒表面或充填在孔隙当中,与蒙脱石相伴生(图3f、g),局部可见蒙脱石向绿泥石转化而成的绿蒙混层(图3g);伊利石(I)在各分带砂岩中均少见。

3.2 黏土矿物含量

岭沟铀矿床ZK89-19钻孔中含矿层不同分带的钻孔砂岩X衍射分析结果表明(表1),该区黏土矿物主要为蒙脱石(55.0%~87.0%),平均值为75.8%,其次为高岭石(7.0%~28.0%),平均值为15.6%;而后为绿泥石(2.0%~23.0%),平均值6.7%,伊利石(1.0%~5.0%),平均值为1.9%。古氧化带红色砂岩中($n=1$)黏土总量占砂岩的12%,其中蒙脱石含量为86.0%,

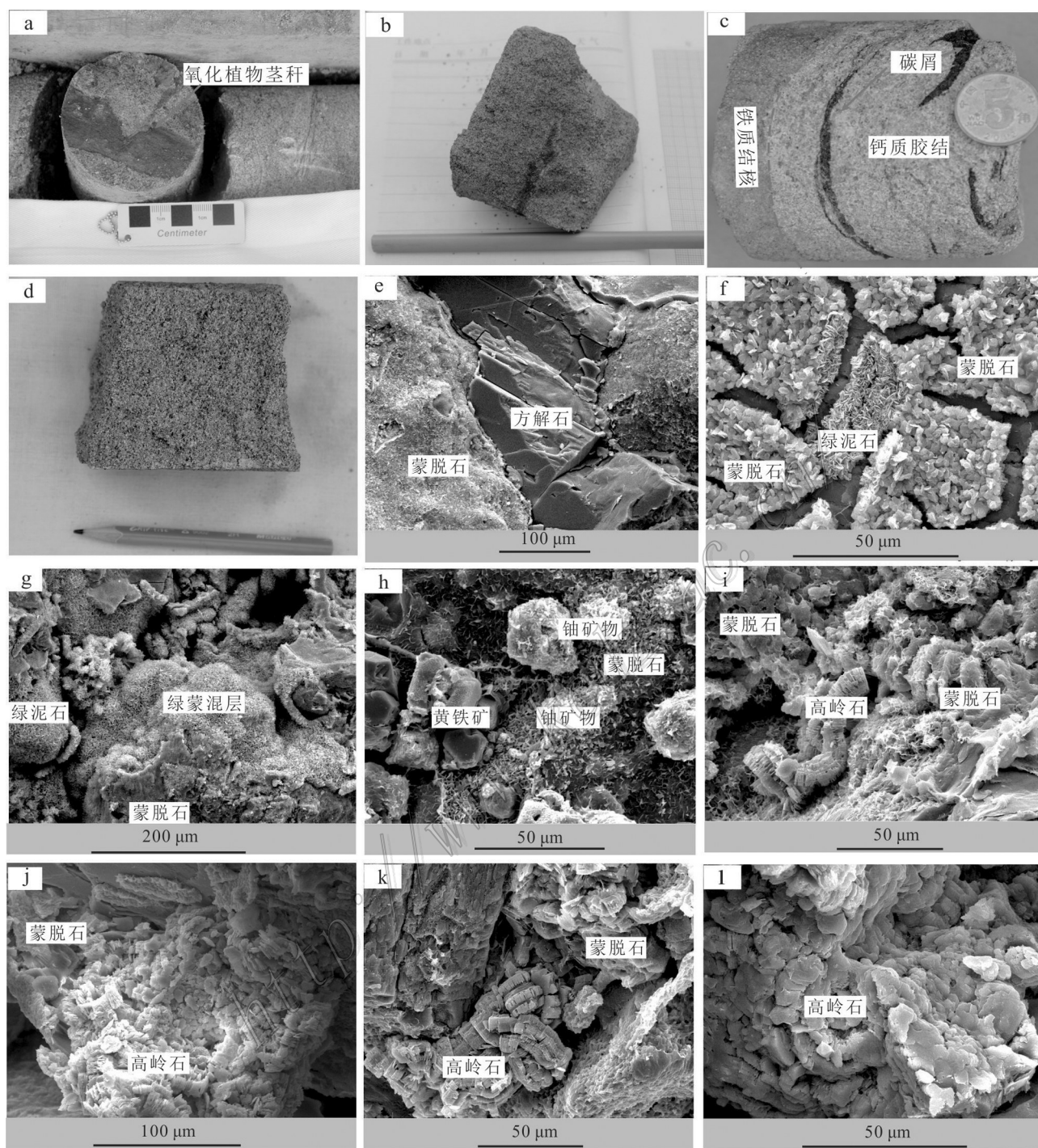


图3 纳岭沟铀矿床含矿层中不同分带砂岩黏土矿物微观特征

- a. 古氧化带褐红色钙质粗砂岩,含氧化植物茎秆;b. 二次还原带绿色粗砂岩;c. 矿带灰色钙质粗砂岩,含碳屑与黄铁矿;
d. 还原带灰色粗砂岩;e. 古氧化带,紫红色细砂岩中粒间方解石与粒表弯曲片状蒙脱石;f. 二次还原带,绿色粗砂岩中
粒表团块状蒙脱石与叶片状绿泥石;g. 二次还原带,绿色细砂岩中粒表粒间片网状绿蒙混层;h. 矿带 灰色粗砂岩中
粒间黄铁矿、铀矿物与蜂窝网状蒙脱石;i. 矿带 灰色中细砂岩中粒间粒表片絮状蒙脱石、粒间蠕虫状与书页片状
高岭石;j. 矿带,灰色中细砂岩中粒间书页片状高岭石;k. 还原带,灰色粗砂岩中粒间书页板状、
蠕虫状高岭石与片絮状蒙脱石;l. 还原带,灰色中细砂岩中粒间片状高岭石

Fig. 3 Microcosmic characteristics of clay minerals in ore-bearing sandstones from different zones of the Nalinggou uranium deposit

a. Paleooxidation zone, maroon calcareous coarse sandstone, oxidizing plant; b. Secondary reduction zone, green coarse sandstone; c. Ore zone, gray calcareous coarse sandstone, carbon chips and pyrites; d. Reduction zone, gray coarse sandstone; e. Paleooxidation zone, the intergranular calcite and epigranular curved sheet montmorillonite in the purple-red fine sandstone; f. Secondary reduction zone, the granule scale lump montmorillonite and the leaf shaped chlorite of epigranular in the green coarse sandstone; g. Secondary reduction zone, flake-net chlorite-montmorillonite of intergranular and epigranular in the green fine sandstone; h. Ore zone, pyrite, uranium mineral and honeycomb network montmorillonite of intergranular in the gray coarse sandstone; i. Ore zone, flocculent montmorillonite of intergranular and epigranular, vermicular and foliate kaolinite of intergranular in the gray middle-fine sandstone; j. Ore zone, book-page sheet intergranular kaolinite in the gray middle-fine sandstone; k. Reduction zone, book-page sheet and vermicular kaolinite, flocculent montmorillonite in the gray coarse sandstone; l. Reduction zone, book-page sheet intergranular kaolinite in the gray middle-fine sandstone

表 1 纳岭沟铀矿床 ZK89-19 钻孔砂岩样品黏土矿物 X-衍射结果

Table 1 X-ray diffraction results of clay minerals in sandstone from ZK89-19 in Nalinggou uranium deposit

样品号及平均值	岩性	分带	深度/m	w(B)/%				黏土总量
				K	C	I	S	
EN14-704	红色粗砂岩	古氧化带	582.4	7.0	5.0	2.0	86.0	12.0
EN14-701	绿色中砂岩	二次还原绿色带	566.3	7.0	6.0	1.0	86.0	24.0
EN14-702	绿色中砂岩		574.2	9.0	6.0	1.0	84.0	23.0
EN14-705	绿色粗砂岩		584.5	21.0	23.0	1.0	55.0	20.0
EN14-706	绿色粗砂岩		593.0	8.0	4.0	1.0	87.0	19.0
平均值				11.3	9.8		78.0	21.5
EN14-710	绿色细砂岩	矿带	597.5	16.0	9.0	2.0	73.0	20.0
EN14-714	绿色含砾中砂岩		598.8	28.0	4.0	1.0	67.0	11.0
平均值				22.0	6.5		70.0	15.5
EN14-717	灰色粗砂岩	还原带	608.6	19.0	2.0	2.0	77.0	20.0
EN14-718	灰色中粗砂岩		617.6	20.0	4.0	3.0	73.0	20.0
EN14-720	灰色粗砂岩		622.6	21.0	4.0	5.0	70.0	19.0
平均值				20.0	3.3		73.3	19.7

注:K 为高岭石,C 为绿泥石,I 为伊利石,S 为蒙脱石。

高岭石含量为 7.0%,绿泥石平均含量为 5.0%,伊利石平均含量为 2.0%;二次还原绿色带绿色砂岩($n=4$)黏土平均总量占砂岩的 21.5%,其中蒙脱石(55%~87%),平均值为 78.0%,其次为高岭石(7.0%~21.0%),平均值为 11.3%;而后为绿泥石(4.0%~23.0%),平均值 9.8%,伊利石(1.0%~2.0%),平均值为 1.2%;矿带绿色砂岩($n=2$)黏土平均总量占砂岩的 15.5%,其中蒙脱石(67.0%~73.0%),平均值为 70.0%,其次为高岭石(16.0%~28.0%),平均值为 22.0%;而后为绿泥石(4.0%~9.0%),平均值 6.5%,伊利石(1.0%~2.0%),平均值为 1.5%;还原带灰色砂岩($n=3$)黏土平均总量占砂岩的 19.7%,其中蒙脱石(70.0%~77.0%),平均值为 73.3%,其次为高岭石(19.0%~21.0%),平均值为 20.0%;而后为绿泥石(2.0%~4.0%),平均值 3.3%,伊利石(2.0%~5.0%),平均值为 3.3%。

纳岭沟铀矿床含矿层不同分带砂岩 X 衍射分析结果表明(表 2),该区黏土矿物主要为蒙脱石,其次为高岭石与绿泥石;古氧化带红色砂岩($n=3$)黏土总量占砂岩的 11%,其中蒙脱石平均含量为 66.0%,高岭石平均含量为 19%,绿泥石平均含量为 11.7%,伊

表 2 纳岭沟铀矿床钻孔砂岩样品黏土矿物 X-衍射统计结果

Table 2 X-ray diffraction results of clay minerals in sandstone in Nalinggou uranium deposit

分带	样品数/个	w(B)/%				黏土总量
		K	C	I	S	
古氧化带	3	19.0	11.7	3.3	66.0	11.0
二次还原绿色带	119	19.3	15.5	1.7	64.5	17.6
绿色矿带	22	33	15.5	2.4	55.5	17.3
灰色矿带	21	39.2	8.3	3.9	48.6	16.7
还原带	68	27.0	6.8	2.7	63.8	17.0

注:K 为高岭石,C 为绿泥石,I 为伊利石,S 为蒙脱石。

利石平均含量为3.3%;二次还原绿色带绿色-灰绿色砂岩($n=119$)黏土总量占砂岩的17.6%,其中蒙脱石平均含量为64.5%,高岭石平均含量为19.3%,绿泥石平均含量为15.5%,伊利石平均含量为1.7%;矿带绿色砂岩($n=22$)黏土总量占砂岩的17.3%,其中蒙脱石平均含量为55.5%,高岭石平均含量为33.0%,绿泥石平均含量为15.5%,伊利石平均含量为2.4%;矿带灰色砂岩($n=21$),黏土总量占砂岩的16.7%,其中蒙脱石平均含量为48.6%,高岭石平均含量为39.2%,绿泥石平均含量为8.3%,伊利石平均含量为3.9%;原生灰色砂岩($n=21$)黏土总量占砂岩的16.7%,其中蒙脱石平均含量为48.6%,高岭石平均含量为39.2%,绿泥石平均含量为8.3%,伊利石平均含量为3.9%。

4 讨 论

4.1 E_h -pH突变界面

盆地砂岩中自生黏土矿物的形成与孔隙流体的pH值、离子成分类型以及含量等密切相关,高岭石

形成于 Na^+ 与 K^+ 等碱性离子含量低的酸性流体环境($pH=5\sim6$);蒙脱石易在贫 K^+ 而富 Na^+ 和 Ca^{2+} 的弱碱性介质($pH=7\sim8.5$)中形成;伊利石多是在 K^+/H^+ 比值高的弱碱性($pH=8$)环境中由钾长石、云母等铝硅酸盐矿物弱淋滤作用下风化而成的;绿泥石形成需要相对较高的温度、较强碱性的环境($pH=9\sim10$),尤其是在富 Mg^{2+} 的孔隙水中容易沉淀出来(汤艳杰等,2002;隆浩等,2007)。因此,排除含矿层沉积时古气候和沉积物源等共有因素外,可以利用盆地砂岩中黏土矿物相对含量的变化来反演砂岩整体地球化学环境与经历改造流体性质(谢渊等,2010)。

纳岭沟铀矿床ZK89-19钻孔含矿层砂岩从二次还原绿色带→矿带,蒙脱石相对平均含量从78.0%→70.0%,高岭石相对平均含量从11.3%→22.0%,绿泥石相对平均含量从9.8%→6.5%,伊利石相对平均含量从1.2%→1.5%(图4)。上述黏土矿物含量特征表明:含矿层砂岩中整体以蒙脱石为主,其次为高岭石与绿泥石,伊利石含量较少,表明含矿层晚期整体经历富 Na^+ 和 Ca^{2+} 的弱碱性流体的改造。此外,从二

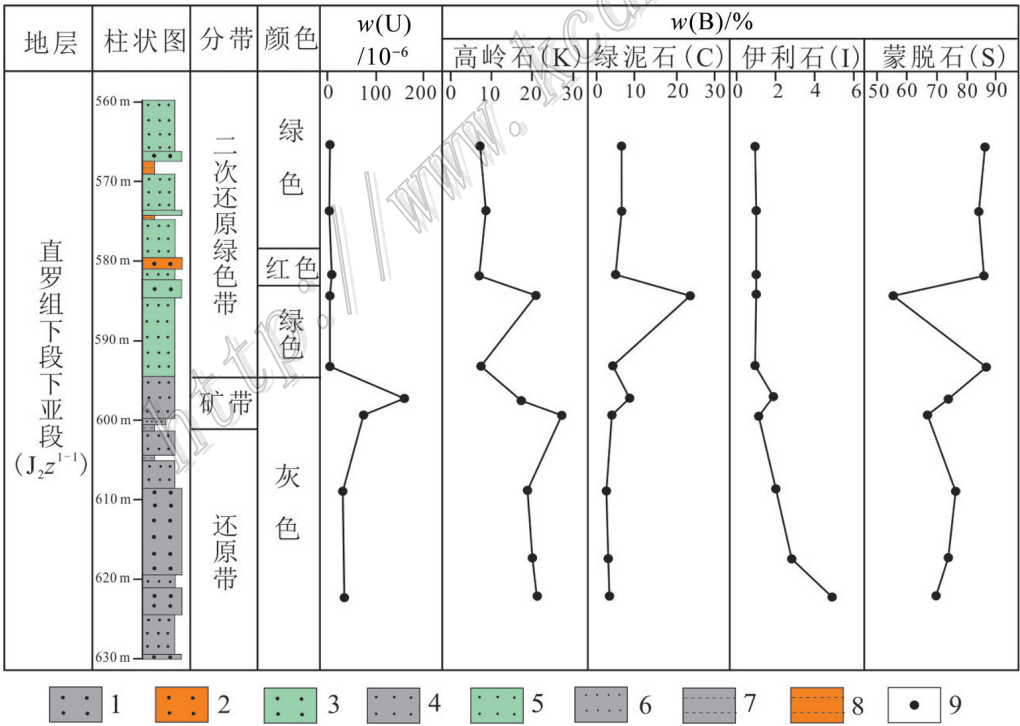


图4 纳岭沟铀矿床ZK-89-19钻孔含矿层砂岩X-衍射分析图

1—灰色粗砂岩;2—红色粗砂岩;3—绿色粗砂岩;4—灰色中砂岩;5—绿色中砂岩;6—灰色细砂岩;7—灰色泥岩;8—红色泥岩;9—样品点

Fig. 4 X-ray diffraction analysis diagram of clay minerals in sandstone from ZK89-19 in Nalinggou uranium deposit

1—Gray coarse sandstone; 2—Red coarse sandstone; 3—Green coarse sandstone; 4—Gray middle sandstone; 5—Green middle sandstone;

6—Gray fine sandstone; 7—Gray mudstone; 8—Red mudstone; 9—Sample

次还原绿色带→矿带与原生带,呈现蒙脱石、绿泥石明显减少,高岭石含量明显增加的趋势,说明从二次还原绿色带→矿带砂岩,砂岩环境发生相对酸化(pH值相对降低),即二次还原绿色带与矿带之间存在pH突变界面。

为了排除单个钻孔得出结论的偶然性,统计了纳岭沟铀矿床不同分带砂岩上百个样品的黏土矿物测试数据(表2)。结果表明纳岭沟铀矿床含矿层砂岩从二次还原绿色带→矿带绿色→矿带灰色,蒙脱石相对平均含量从64.5%→55.5%→48.6%,高岭石相对平均含量从19.3%→33.0%→39.2,绿泥石相对平均含量从15.5%→15.5%→8.3%,伊利石相对平均含量变化不大(图5)。上述黏土矿物特征同样可得出含矿层晚期整体经历富 Na^+ 和 Ca^{2+} 的弱碱性流体的改造与古氧化带与矿带之间存在pH突变界面这一结论。此外,结合前人统计的纳岭沟铀矿床含矿层不同分带砂岩 $w(\text{TOC})$ 、 $w(\text{全岩S})$ 、 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 比值及 $w(\text{CH}_4)$ (易超等,2015),认为从古氧化带→矿带不仅存在pH突变界面,也存 E_h 突变界面,因此认为二次还原绿色带与矿带之间存在 E_h -pH突变界面。

4.2 流体组分与来源

多数学者从流体包裹体、后生蚀变、有机地化的角度对该区铀矿床含矿层经历的改造流体组分与来源进行了大量的研究,认为流体主要来自蚀源区的含铀含氧大气降水、有机还原流体、盆地卤水与低

温热液流体组成(肖新建,2004;吴柏林等,2014;2015;彭云彪等,2007;李子颖等,2009;张龙等,2015;赵兴齐等,2016)。

纳岭沟铀矿床含矿层砂岩中黏土矿物以蒙脱石为主,说明含矿层晚期整体经历富 Na^+ 、 Ca^{2+} 的弱碱性流体的改造,考虑到鄂尔多斯盆地新近系以来的喜马拉雅期的强烈抬升改造,造成盆地卤水与油气大规模逸散至含矿层砂岩中(刘池洋等,2006),故认为富 Na^+ 、 Ca^{2+} 的弱碱性流体为盆地卤水与逸散油气;二次还原绿色砂岩中存在红色-黄色钙质胶结氧化砂岩,说明含矿层早期经历了氧化流体的改造作用,氧化残留砂岩黏土矿物以蒙脱石为主,相对平均含量为66.0%,其次为高岭石,相对平均含量为19%,说明氧化流体为弱碱性流体,与前人研究的含铀含氧大气降水相符合(肖新建,2004;李子颖等,2009;张龙等,2015)。氧化残留砂岩→二次还原绿色砂岩,蒙脱石、高岭石、绿泥石以及伊利石相对平均含量分别从66.0%→64.5%、19.0%→19.3%、11.7%→15.5%、3.3%→1.7%,呈现绿泥石含量相对增加,蒙脱石与伊利石相对降低的趋势。李子颖等(2007)研究表明二次还原带绿色砂岩的形成与碱性低温热液(盆地卤水)及油气流体作用有关;夏菲等(2016)研究认为含矿层砂岩中绿泥石形成具有多期次性,是中-低温热液流体作用的结果,考虑到纳岭沟铀矿床以北石头沟地区发育的玄武岩中发育大量的石英与

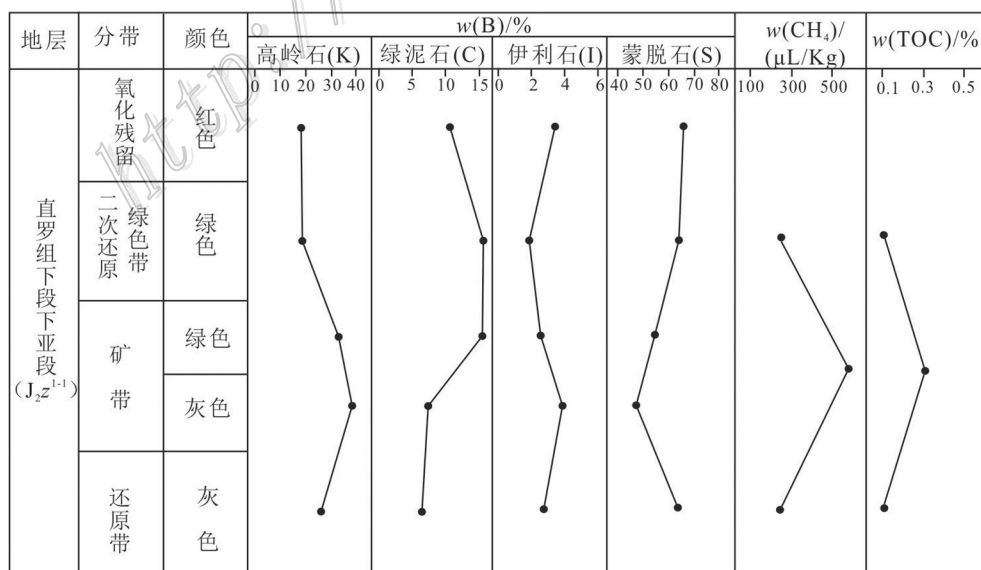


图5 纳岭沟铀矿床含矿层砂岩X-衍射综合分析图

Fig. 5 X-ray diffraction analysis diagram of clay minerals in sandstone of Nalinggou uranium deposit

方解石脉与杏仁体(易超等,2018),认为玄武岩形成后期伴随的中-低温碱性热液参与绿泥石形成。因此,二次还原带砂岩中绿泥石的形成是盆地卤水与油气及与玄武岩有关中-低碱性热液共同作用的结果。

二次还原绿色带→绿色矿带→灰色矿带→还原灰色带,蒙脱石、高岭石及绿泥石相对平均含量分别从64.5%→55.5%→48.6%→63.8%、19.3%→33.0%→39.2%→27.0%、15.5%→15.5%→8.3%→6.8%,整体呈现蒙脱石、绿泥石明显减少,高岭石含量明显增加的趋势(图8),认为矿带与还原带可能经历了早期酸性流体与晚期弱碱性流体(盆地卤水)共同作用,并考虑到含矿层与下伏延安组煤层直接接触,煤层在演化过程中能产生大量的有机酸与煤成气,当其运移至含矿层砂岩中时能造成高岭石含量的偏高,说明早期酸性流体为煤层在演化过程中产生大量的有机酸与煤成气。

上述分析可知:含矿层经历了弱碱性大气降水(含铀含氧)、有机酸性流体(有机酸与煤成气)、中-低温碱性热液、富 Na^+ 、 Ca^{2+} 的弱碱性流体(盆地卤水)与油气的共同作用。

4.3 板状矿体形成机制

结合前人对该区含矿层埋藏演化史(张龙等,2015)、热构造事件(任战利等,2006;丁超,2013)及盆地构造演化过程(刘池洋等,2006)的研究,以铀石形成条件(pH 、 E_h 、 SiO_2)为突破口,以含矿层经历的改造流体组分与来源的研究为线索,查明纳岭沟铀矿床成矿过程,并探讨板状矿体的形成机制(图6)。

晚侏罗世—早白垩世,受晚燕山运动的影响,造成盆地的整体抬升,导致盆地北部中侏罗统直罗组地层局部出露地表,接受来自蚀源区含氧含铀大气降水的氧化改造,开始早期层间氧化带发育阶段。来自蚀源区弱碱性的含铀、含氧大气降水层间渗入含矿层中,大量氧气能使砂岩中的铀矿物、有机质、

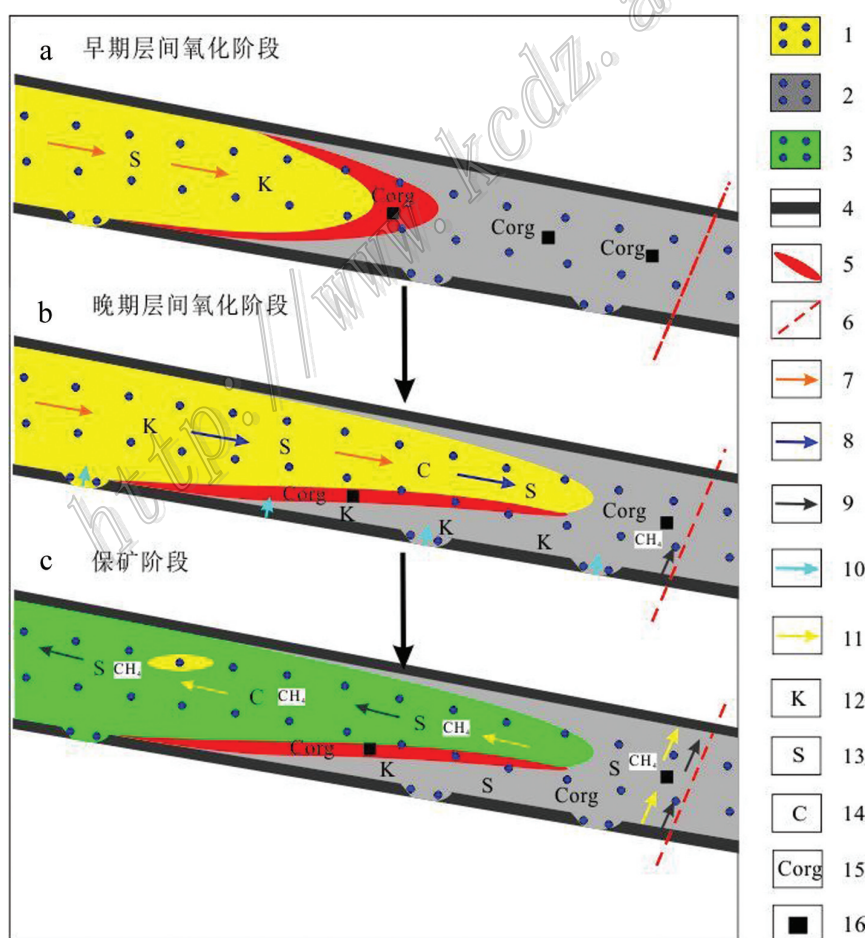


图6 纳岭沟铀矿床板状矿体形成机制与 E_h - pH 界面控矿模式

1—古氧化带;2—还原带;3—二次还原带;4—煤层;5—铀矿体;6—断裂;7—含铀含氧大气降水;8—中-低温碱性热液;9—油气;10—有机酸

性流体;11—富 Na^+ 、 Ca^{2+} 弱碱性流体(盆地卤水);12—高岭石;13—蒙脱石;14—绿泥石;15—有机碳;16—黄铁矿

Fig. 6 The mechanism of tabular orebody formation and Eh-pH interface ore-controlling model in the Narlingou uranium deposit

1—Paleooxidation zone; 2—Reduction zone; 3—Secondary reduction zone; 4—Coal bed; 5—Uranium ore; 6—Fault; 7—Meteoric water with oxygen and uranium; 8—Medium and low temperature alkaline hydrothermal solution; 9—Oil gas; 10—Organic acidic fluid; 11—Basin brine with weakly alkaline and rich in Na^+ , Ca^{2+} ; 12—Kaolinite; 13—Montmorillonite; 14—Chlorite; 15—Organic carbon; 16—Pyrite

低价铁矿物(黄铁矿、菱铁矿)、黑云母遭受氧化,使得砂岩中的铀金属元素活化,并以碳酸铀酰($[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$)的形式发生迁移,为后期铀矿形成提供铀源。此外,上述的氧化过程产生少量的 H_2SO_4 ,能造成砂岩环境逐渐变成弱酸性,使得砂体中岩屑、杂基、长石等不稳定成分遭受溶蚀,形成分散状与蠕虫状高岭石,导致氧化带中高岭石的含量相对较高(表2),同时释放出 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 与 SiO_2 结合,使得沉积环境的酸性逐渐降低,呈酸性-碱性、有利于铀的沉淀。当含铀的层间水遇到固体有机质、黄铁矿等还原剂,在微生物作用下,高价、活化的铀离子会被还原成低价、稳定的铀矿物(沥青铀矿),在氧化-还原过渡带形成早期的卷状铀矿体(图6a)。虽然纳岭沟铀矿床中少见卷状铀矿体,但是其相邻皂火壕铀矿床中可见卷状铀矿体,可为早期卷状铀矿体的形成提供依据。

此后,纳岭沟以北黑石头沟地区玄武岩(126.2 Ma)的侵入造成该区发育一次构造热事件(邹和平等,2008),不仅导致下伏古生界与延长组烃源岩大量生烃成藏(任战利等,2006),且促使延安组煤系地层演化过程中产生大量对铀的运移有重要意义的有机酸、 CO_2 及对铀沉淀、富集、成矿有利的 CH_4 、 H_2S 等气体(闵茂中等,2003),垂向运移至含矿层中,为含矿层中靠近煤层的灰色砂岩中高岭石的大量生成提供了依据。此外,与玄武岩有关的中-低温碱性热液在玄武岩中运移时能萃取玄武岩中Fe、Mg元素,为含矿层中绿泥石的形成提供Fe、Mg元素来源。当中-低温碱性热液层间渗入含矿层中与含铀含氧的大气降水混合,形成氧化-碱性低温混合成矿热液,pH与温度的升高不仅能萃取分散吸附的六价铀,还可以加大沥青铀矿的溶解度,造成早期形成的铀矿体重新活化,并以碳酸铀酰($[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$)的形式发生迁移或以 $\text{Ca-U(VI)-CO}_3^{2-}$ 稳定的络合物进行迁移(张龙等,2015)。当氧化-碱性成矿热液与垂向运移的酸性-还原性流体(有机酸与煤成气)相接触时, E_h 的改变使得碳酸铀酰离子解体,促使六价铀还原为四价铀,伴随碳酸钙的形成,与该区含矿砂岩碳酸钙含量高相对应(易超等,2014);pH突然降低容易造成 SiO_2 活动降低,当介质中 SiO_2 活度范围降

低为 $\alpha(\text{H}_4\text{SiO}_4) \geq 10^{-3.5} \sim 10^{-2.7} \text{ mol/L H}_2\text{O}$, $\text{U}^{6+} : \text{SiO}_4^{4-} = 1 : (0.5 \sim 0.9)$ (闵茂中等,1992),在 E_h -pH界面上能形成大量与自生石英共生的铀石。随着氧化、碱性中-低混合成矿热液与酸性-还原性流体不断向盆地中排泄区运移时,造成早期形成的卷状矿体被破坏与板状形成产于 E_h -pH突变界面上,此过程为晚期层间氧化阶段(图6b)。

始新世晚期,受喜山中晚期构造运动的影响,盆地进入最为显著的快速抬升阶段,造成河套断陷盆地的形成,切断了来自蚀源区的含铀水的补给,导致研究区铀成矿作用的终止(刘池洋等,2006)。盆地的快速抬升容易造成下伏的油气藏调整改造,发生大规模烃类逸散,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,形成绿色砂岩(李子颖等,2007;夏菲等,2016),这一过程将形成微观条件下绿泥石与绿泥石-蒙脱石混层(图3f、g),局部地段由于还原的不彻底,仍可见到紫红色、褐红色古氧化残留砂岩(图3a),使早期形成的铀石一直处于还原环境中,避免后期改造,此过程为保矿阶段(图6c)。此外,盆地的快速抬升容易造成下伏的富 Na^+ 、 Ca^{2+} 碱性盆地卤水向上运移至含矿层中,造成盆地整体发育以蒙脱石为主的黏土矿物蚀变,与微观条件下所见高岭石向蒙脱石转变相对应(图3i),并容易掩盖含矿层早期接受酸性流体改造的事实。

5 结 论

(1) 纳岭沟铀矿床含矿层砂岩中黏土矿物主要有呈蜂窝状、片絮状产出的蒙脱石、呈片状、书页状及蠕虫状产出高岭石、呈叶片状、花朵状集合体产出的绿泥石,整体以蒙脱石为主,其次为高岭石与绿泥石,伊利石含量较少,从古氧化带→矿带与原生带,呈现蒙脱石、绿泥石明显减少,高岭石含量与 $w(\text{TOC})$ 、 $w(\text{全岩S})$ 、 CH_4 明显增加的趋势,说明古氧化带与矿带之间存在 E_h -pH突变界面。

(2) 纳岭沟铀矿床含矿层经历了弱碱性大气降水(含铀含氧)、有机酸性流体(有机酸与煤成气)、油

气流体、中-低温碱性热液与富 Na^+ 和 Ca^{2+} 弱碱性流体(盆地卤水)的共同作用,结合前人关于该区埋藏演化史与构造热事件的研究,认为弱碱性大气降水与中-低温、碱性热液混合而成的碱性、氧化低温成矿热液与下伏延安组煤系地层演化产生的酸性、还原流体(有机酸与煤成气)在相互接触面上因 E_h -pH 突变而造成铀石与其共生矿物沉淀,并在 E_h -pH 突变界面上形成板状矿体。

致 谢 感谢核工业二〇八大队在野外样品采集过程中所提供的帮助,感谢审稿专家提出了宝贵的建设性意见。

References

- Ding C. 2013. The Meso-Cenozoic tectonic events and hydrocarbon accumulation effects on dynamothermal transition in northeastern Ordos Basin (dissertation for doctor degree)[D]. Supervisor: Chen G. Xi'an: Northwest University. 1-125(in Chinese with English abstract).
- Liu C Y, Zhao H G, Gui X J, Yue L P, Zhao J F and Wang J Q. 2006. Space-time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(5): 617-638(in Chinese with English abstract).
- Li Z Y, Fang X H and Chen A P. 2007. The factor of grayish-green sandstone in ore-bearing sandstone of sandstone-type uranium deposit of the northern area of Ordos Basin[J]. *Science China*, 37(Suppl.): 139-146(in Chinese with English abstract).
- Long H, Wang C H and Liu Y P. 2007. Application of clay minerals in paleoenvironment research[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 15(2): 21-25(in Chinese with English abstract).
- Li Z Y, Fang X H and Chen A P. 2009. Superposition metallogenic model of sandstone-type uranium deposit in the northeastern Ordos Basin[J]. *Uranium Geology*, 25(2): 65-70(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): 753-760(in Chinese with English abstract).
- Liu H B, Li Z Y and Qin M K. 2012. Progress in geochemistry of sandstone-type uranium deposit in North Ordos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 19(3): 139-146(in Chinese with English abstract).
- Li X D, Liu J G and Yi C. 2017. The genesis of uranium ore with red alterations in the Nalinggou deposit, northeastern Ordos Basin, and its geological implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 36(4): 511-519(in Chinese with English abstract).
- Min M Z and Zhang F S. 1992. Introduction to genesis of Uranium Mineralogy[M]. Beijing: Atomic Energy Press. 54-74(in Chinese).
- Min M Z, Peng X J and Wang J P. 2003. Progress in study on microbe-metallogenesis of uranium[J]. *Uranium Geology*, 19(5): 257-263(in Chinese with English abstract).
- Peng Y B, Chen A P, Fang X H, Ou G X and Xie Q L. 2007. Relationship between hydrocarbon-containing fluid and metallogenesis in Dongsheng sandstone-type uranium deposit[J]. *Geochimica*, 36(3): 267-274(in Chinese with English abstract).
- Ren Z L, Zhang S, Gao S L, Cui J P and Liu X S. 2006. Relationship between thermal history and various energy mineral deposits in Dongsheng area, Yimeng uplift[J]. *Oil & Gas Geology*, 27(2): 187-193(in Chinese with English abstract).
- Tang Y J, Jia J Y and Xie X D. 2002. Environment significance of clay minerals[J]. *Earth Science Frontiers*, 2(9): 337-344(in Chinese with English abstract).
- Wu B L, Wei A J and Hu L. 2014. The hydrocarbon dissipation and its effect of diagenetic and mineralization: Progress, understanding and outlook[J]. *Geological Review*, 60(6): 1199-1211(in Chinese with English abstract).
- Wu B L, Wei A J, Liu C Y and Song Z S. 2015. Stable isotope tracing on the formation of white sandstone in Yanan Group, northern Ordos Basin, and its geological significance[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(3): 205-214(in Chinese with English abstract).
- Wang G, Wang Q, Miao A S, Jiao Y Q, Yi C and Zhang K. 2017. Characteristic of uranium minerals in Nalinggou uranium deposit of Ordos Basin and their formation mechanism[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 37(4): 461-469(in Chinese with English abstract).
- Xiao X J. 2004. The mineralization geochemistry of the low temperature fluid on the Dongsheng sandstone type uranium deposit (dissertation for doctor degree) [D]. Supervisor: Li Z Y. Beijing: Beijing Research Institute of Uranium Geology. 1-143(in Chinese with English abstract).
- Xue C J, Chi G X and Xue W. 2010. Interaction of two fluid systems in formation of sandstone-type uranium deposits in Ordos Basin: Geochemical evidence and hydrodynamic modeling[J]. *Mineral Deposits*, 29(10): 134-141(in Chinese with English abstract).
- Xie Y, Wang J and Li L X. 2010. Distribution of the Cretaceous clay minerals in Ordos basin, China and its implication to sedimentary and diagenetic environment[J]. *Geological Bulletin of China*, 29(1): 93-104(in Chinese with English abstract).
- Xia F, Meng H, Nie F J, Yan Z B, Zhang C Y and Li M G. 2016. Characteristics of chlorite from the Nalinggou Uranium deposit in the Ordos Basin and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(12): 3473-3482(in Chinese with English abstract).
- Yang X Y, Ling M X and Lai X D. 2009. Metallogenic model of the Dongsheng in-situ leaching sandstone-type uranium deposit in the Ordos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 16(2): 239-249(in Chinese with English abstract).
- Yi C, Han X Z, Li X D and Zhang K. 2014. Study on sand-stone petrologic feature in the Zhiluo Formation and its controls on uranium mineralization in northeastern Ordos Basin[J]. *Geological Journal of China Universities*, 20(2): 185-197(in Chinese with English abstract).

stract).

- Yi C, Gao H W, Li X D and Zhang K. 2015. Study on indicative significance of major elements for sandstone-type uranium deposit in Zhiluo Formation in northeastern Ordos Basin[J]. Mineral Deposit, 34(4):801-813(in Chinese with English abstract).
- Yi C, Wang G, Li X D, Zhang K and Wang Y J. 2018. A tentative discussion on uranium enrichment characteristics and metallogenic model in Zhiluo Formation, northeastern Ordos Basin[J]. Mineral Deposits, 37(4): 835-852(in Chinese with English abstract).
- Zhou H P, Zhang K and Li G. 2008. Cretaceous tectono-thermal event in the Ordos block: An Ar-Ar chronological evidence from basalt at Hangjinqi Banner, Inner Mongolia, North China Craton[J]. Geotectonica et Metallogenia, 32(3): 360-364(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 Hangjinqi sandstone-type uranium deposit, Ordos basin[J]. Earth Frontiers, 22(3): 369-381(in Chinese with English abstract).
- 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 G X, Miao A S and Li W H. 2016. The role of Boerjianghaizi faults in sandstone-type uranium mineralization[J]. Journal of East China University of Technology(Natural Science), 39(1): 15-22(in Chinese with English abstract).
- Zhao X Q, Li X D, Shi Q P, Liu W S, Zhang Z L, Yi C and Guo Q. 2017. Hydrocarbon fluid feature of the Zhiluo Formation sandstone in the Dongsheng area, Ordos Basin and its relationship to uranium mineralization[J]. Acta Geologica Sinica, 90(12): 3381-3392(in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献
- 丁超. 2013. 鄂尔多斯盆地东北部中生代构造事件及其动热转换的油气成藏效应(博士论文)[D]. 导师:陈刚. 西安:西北大学. 1-125.
- 李子颖,方锡珩,陈安平. 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, 37(专辑): 139-146.
- 李子颖,方锡珩,陈安平. 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.
- 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): 753-760.
- 李西得,刘军港,易超. 2017. 鄂尔多斯盆地东北部纳岭沟铀矿床红色蚀变矿石成因及其地质意义[J]. 地质通报, 36(4): 511-519.
- 刘池洋,赵红格,桂小军,岳乐平,赵俊峰,王建强. 2006. 鄂尔多斯盆地演-改造的时空坐标及其成藏(矿)响应[J]. 地质学报, 80(5): 617-638.
- 刘汉彬,李子颖,秦明宽. 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): 139-146.
- 隆浩,王晨华,刘勇平. 2007. 粘土矿物在过去环境变化研究中的应用[J]. 盐湖研究, 15(2): 21-25.
- 闵茂中,张富生. 1992. 成因铀矿物学概论[M]. 北京:原子能出版社. 54-74.
- 闵茂中,彭新建,王金平. 2003. 铀的微生物成矿作用研究进展[J]. 铀矿地质, 19(5): 257-263.
- 彭云彪,陈安平,方锡珩,欧光习,解启来. 2007. 东胜砂岩型铀矿床中烃类流体与成矿关系研究[J]. 地球化学, 36(3): 267-274.
- 任战利,张盛,高胜利,崔军平,刘新社. 2006. 伊盟隆起东胜地区热演化史与多种能源矿产的关系[J]. 石油与天然气地质, 27(2): 187-193.
- 汤艳杰,贾建业,谢先德. 2002. 粘土矿物的环境意义[J]. 地学前缘, 2(9): 337-344.
- 吴柏林,魏安军,胡亮. 2014. 油气耗散作用及其成岩成矿效应:进展,认识与展望[J]. 地质论评, 60(6): 1199-1211.
- 吴柏林,魏安军,刘池洋,宋子升. 2015. 鄂尔多斯盆地北部延安组白色砂岩形成的稳定同位素示踪及其地质意义[J]. 地学前缘, 22(3): 205-214.
- 王贵,王强,苗爱生,焦养泉,易超,张康. 2017. 鄂尔多斯盆地纳岭沟铀矿床铀矿物特征与形成机理[J]. 矿物学报, 37(4): 461-469.
- 肖新建. 2004. 东胜地区砂岩铀矿低温流体成矿作用地球化学研究(博士论文)[D]. 导师:李子颖. 北京:核工业北京地质研究院. 1-143.
- 薛春纪,池国祥,薛伟. 2010. 鄂尔多斯盆地砂岩型铀成矿中两种流体系统相互作用——地球化学证据和流体动力学模拟[J]. 矿床地质, 29(10): 134-141.
- 谢渊,王剑,李令喜. 2010. 鄂尔多斯盆地白垩系粘土矿物的分布特征及其沉积-成岩环境意义[J]. 地质通报, 29(1): 93-104.
- 夏菲,孟华,聂逢君,严兆彬,张成勇,李满根. 2016. 鄂尔多斯盆地纳岭沟铀矿床绿泥石特征及地质意义[J]. 地质学报, 90(12): 3473-3482.
- 杨晓勇,凌明星,赖小东. 2009. 鄂尔多斯盆地东胜地区地浸砂岩型铀矿成矿模型[J]. 地学前缘, 16(2): 239-249.
- 易超,韩效忠,李西得,张康. 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): 185-197.
- 易超,高贺伟,李西得,张康. 2015. 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.
- 易超,王贵,李西得,张康,王永军. 2018. 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[J]. 矿床地质, 37(4): 835-852.
- 邹和平,张珂,李刚. 2008. 鄂尔多斯地块早白垩世构造-热事件:杭锦旗玄武岩的Ar-Ar年代学证据[J]. 大地构造与成矿学, 32(3): 360-364.
- 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): 369-381.
- 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.
- 张更信,苗爱生,李文辉. 2016. 泊尔江海子断裂带在砂岩型铀矿成矿中的作用[J]. 东华理工大学学报:自然科学版, 39(1): 15-22.
- 赵兴齐,李西得,史清平,刘武生,张宇龙,易超,郭强. 2017. 鄂尔多斯盆地东胜地区直罗组砂岩中烃类流体特征与铀成矿关系[J]. 地质学报, 90(12): 3381-3392.