

doi: 10.12029/gc20180311

王思力, 聂逢君, 严兆彬, 何乃烁, 张媛媛, 张鹏飞. 2018. 鄂尔多斯盆地纳岭沟铀矿床目的层岩石学及铀存在形式[J]. 中国地质, 45(3): 573-590.
Wang Sili, Nie Fengjun, Yan Zhaobin, He Naishuo, Zhang Yuanyuan, Zhang Pengfei. 2018. Lithologic characteristics and modes of occurrence of uranium of the target strata in the Nalinggou uranium deposit of Ordos Basin[J]. Geology in China, 45(3): 573-590(in Chinese with English abstract).

鄂尔多斯盆地纳岭沟铀矿床目的层岩石学 及铀存在形式

王思力^{1,2,3} 聂逢君^{1,4} 严兆彬^{1,4} 何乃烁^{1,4} 张媛媛^{1,4} 张鹏飞^{1,4}

(1. 东华理工大学放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室, 江西南昌 330013; 2. 东华理工大学核工程与地球物理学院, 江西南昌 330013; 3. 中国华西工程设计建设有限公司, 四川成都 610031; 4. 东华理工大学地球科学学院, 江西南昌 330013)

摘要:中侏罗统直罗组下段下亚段是纳岭沟铀矿床的主要含矿层位, 该层段发育辫状河沉积体系, 砂体连通性、渗透性好, 富炭屑、黄铁矿等还原质, 具有良好的铀成矿条件。本文通过显微镜下观察、X 射线衍射分析、扫描电镜等分析测试手段, 对纳岭沟铀矿床直罗组下段下亚段砂岩岩石学特征进行研究, 观察含铀矿目的层砂岩中的蚀变现象及蚀变矿物特征, 探究黏土矿物、黑云母等矿物的蚀变转化关系。通过 α 蚀刻径迹、电子探针实验等分析测试手段, 对纳岭沟铀矿床铀矿物的成分类型和存在形式进行探究。探讨含铀矿层砂岩岩石学特征与铀矿物存在形式之间的关系, 发现纳岭沟铀矿床铀的富集、赋存形式、成分类型与含矿砂岩中的矿物蚀变转化中的物质交换密切相关, 纳岭沟铀矿床铀成矿是受古层间氧化带控制, 叠加了后期热液流体改造作用的结果。

关键词:纳岭沟铀矿床; 岩石学特征; 蚀变矿物特征; 铀矿物存在形式

中图分类号: P619.14 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2018)03-0573-18

Lithologic characteristics and modes of occurrence of uranium of the target strata in the Nalinggou uranium deposit of Ordos Basin

WANG Sili^{1,2,3}, NIE Fengjun^{1,4}, YAN Zhaobin^{1,4}, HE Naishuo^{1,4},
ZHANG Yuanyuan^{1,4}, ZHANG Pengfei^{1,4}

(1. State Key Laboratory of Radioactive Geology and Exploration Technology, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 2. School of Geophysics and Measurement and Control Technology, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 3. China Huaxi Engineering Design & Construction Co Ltd., Chengdu 610031, Sichuan, China; 4. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China)

Abstract: The lower part of the first member of Zhiluo Formation of Middle Jurassic is the main uranium ore-bearing layer of the

收稿日期: 2016-10-31; 改回日期: 2017-02-15

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 973 计划“中国北方砂岩型铀矿流体成矿过程研究”(2015CB453002)和国家自然科学基金项目(41562006)联合资助。

作者简介: 王思力, 男, 1991 年生, 硕士生, 地质资源与地质工程专业; E-mail: wangsili0620@qq.com。

通讯作者: 聂逢君, 男, 1962 年生, 博士, 教授, 从事铀矿地质与沉积地质学研究; E-mail: niefj@263.net。

Nalinggou uranium deposit. Because of the formation has braided river sedimentary system features such as good sand body connectivity and permeability, rich reducing substances (charcoal and pyrite), it has good conditions for uranium mineralization. Using multiple testing means such as microscope microscopy, X-ray diffraction analysis, scanning electron microscopy analysis, the authors studied sandstone rock characteristics. Alteration phenomena and altered mineral characteristics of the uranium target strata was observed. the conversion relationship in clay minerals, biotite and other minerals was explored. Component analysis was conducted, and existing forms of uranium mineral in the Nalinggou uranium deposit were investigated using α track etching, electron microprobe analysis and tensile test. By discussing the relationship between petrologic features and existing form of uranium minerals in the ore-hosting horizon, it is found that the enrichment of U, occurrence of U and component type of U were closely related to the exchange of material in the mineral alteration transformation, and uranium mineralization in Nalinggou area was controlled by paleo-interlamination oxidized zone and was affected by the later hydrothermal fluid.

Key words: Nalinggou uranium deposit; petrological characteristics; altered mineral characteristics; existence form of uranium mineral

About the first author: WANG Sili, male, born in 1991, master candidate, majors in geological resources and geological engineering, engages in research on sandstone type uranium deposit; E-mail: 454434413@qq.com.

About the corresponding author: NIE Fengjun, male, born in 1962, doctor, professor, majors in uranium geology and sedimentary geology; E-mail: niefj@263.net.

Fund support: Supported by the National Basic Research Program of China-973 Program (No. 2015CB453002) and the Natural Science Foundation of China (No. 41562006).

1 引 言

鄂尔多斯盆地地处中国中北部(图1),是华北克拉通的一部分,自中新元古代接受沉积以来,受到古亚洲、特提斯和环太平洋三大构造域的作用,盆地构造面貌及演化历史复杂(田在艺,1996;何自新,2003;林玉祥等,2015)。鄂尔多斯盆地周缘均被造山带围限,其南北缘分别为近东西向展布的秦岭构造带及阴山构造带,东西缘分别为近南北向展布的太行—吕梁构造带及贺兰山构造带(刘池洋等,2006),造山带与鄂尔多斯盆地之间以断陷相隔,构成南北向展布的矩形盆地,具有盆地周缘活动性强、褶皱和断裂形迹密集、岩浆活动发育,盆内稳定多隆起、拗陷、宽缓褶皱的特点(任战利等,2006;丁超等,2016)。

鄂尔多斯盆地内石油、天然气以及各类金属、非金属矿产资源十分丰富。20世纪90年代以来,鄂尔多斯盆地北部发现了东胜、罕台庙、纳岭沟、大营、杭锦旗等诸多大型、超大型可地浸砂岩型铀矿床(刘汉彬等,2012;Cai Y et al., 2015)。纳岭沟铀矿床位于东胜砂岩型铀矿床和大营砂岩型铀矿床的中间过渡地带,研究该区有利于探明鄂尔多斯盆地北部砂岩型铀矿的区域成矿规律,有利于为进一步的铀资源勘探开发工作指明方向。

前人对于纳岭沟铀矿床的研究主要为矿体特征、控矿因素(刘文平,2011;李西得,2014;易超等,2015)、沉积体系、纳岭沟铀矿床的成矿机理和成矿模式(李子颖等,2006;向伟东等,2006)、含矿砂岩地球化学(朱西养等,2003;薛伟等,2010;吴兆剑等,2013;王贵等,2015)、砂岩的后生蚀变作用(丁万烈,2003;李子颖等,2006;向伟东等,2006;赵俊峰等,2008;焦养泉等,2015)等,然而对于含矿砂岩成岩作用、热流体改造后的岩石学特征方面的系统研究以及与铀成矿之间的关系梳理较少。本文通过显微镜镜下观察、X射线衍射分析、扫描电镜和电子探针等一系列分析测试方法,对纳岭沟铀矿床直罗组砂岩进行岩石学特征和铀矿物赋存形态进行系统研究,并探讨了该地区铀成矿作用规律,为下一步的找矿提供指导依据。

2 区域地质概况

2.1 区域构造背景

纳岭沟铀矿床位于鄂尔多斯盆地北东部(图1),隶属于次级构造单元伊盟隆起。伊盟隆起地处河套断陷以南,桌子山东麓断裂以东,呼和浩特—清水河断裂以西,南面经正谊关—偏关断裂与天环向斜、伊陕斜坡和晋西褶曲带呈过渡关系,具有近物源、构造环境相对稳定的特征(王宏强,2001;杨俊

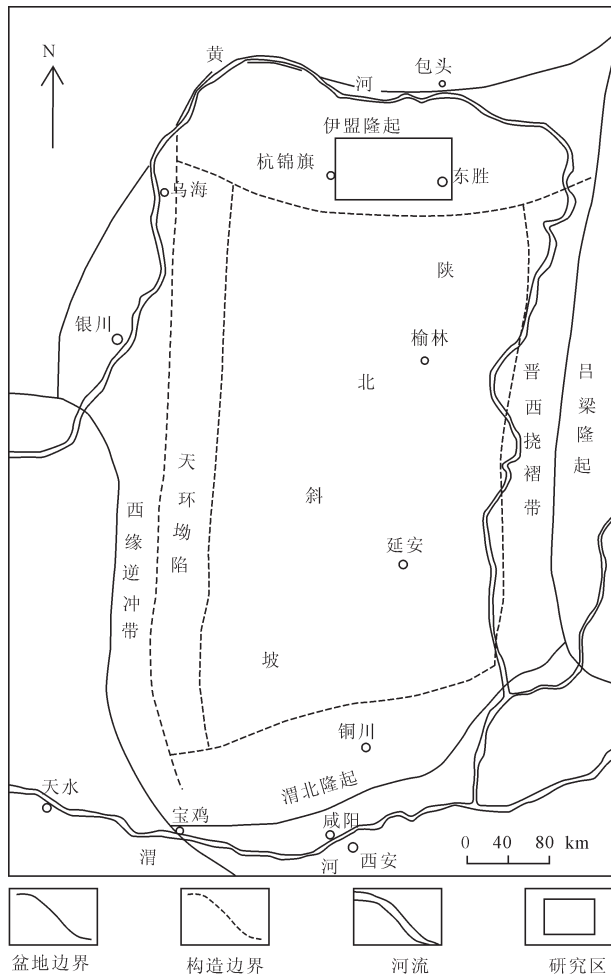


图1 鄂尔多斯盆地位置及区域构造简图

Fig.1 The location and regional tectonic sketch of Ordos basin

杰,2002),为延安组和直罗组砂体的发育和稳定展布提供了极为有利的构造条件。纳岭沟地段沉积盖层厚度一般小于1000 m,以中生界沉积地层为主,包括三叠系、中侏罗统、下白垩统、上新统、第四系。

2.2 区域地层概况

纳岭沟地区以下白垩统、中侏罗统为主。直罗组岩性组合特征明显,其上部为下白垩统冲积相砂砾岩及砾岩,下部为延安组湖泊沼泽相泥岩、粉砂岩和煤层,均呈不整合接触。

(1) 延安组 (J_3)

延安组由北东向西南倾伏于直罗组之下,是一套以河湖三角洲相为主的沉积地层,主要由灰色至灰白色中粒至细粒砂岩、深灰色粉砂岩、泥岩、凝灰岩、油页岩及煤层等组成。根据沉积旋回和聚煤规律,将盆地北东部的延安组自下而上可分为五个岩

段。延安组第 I 岩段岩性以灰色中粗砂岩或含砾粗砂岩为主,夹灰色或深灰色粉砂岩和泥岩,垂向上可见下粗上细的正韵律。第 II、III、IV 岩段岩性为深灰色、黑色泥岩、粉砂岩及煤层,其次为灰色砂岩,夹泥灰岩及黑色油页岩,为三角洲-湖泊沉积,砂体相对不发育。第 V 岩段主要为灰白色、灰色中细砂岩夹泥岩,灰色砂岩中富含炭屑、黄铁矿等还原介质,泥质胶结,固结程度较疏松-疏松;灰白色砂岩高岭土化严重,泥质胶结,固结程度较高(胡元现等,1989;王东东,2012;李智学,2014)。

(2) 直罗组 (J_2)

直罗组地层是多期次河流相沉积物纵向叠加、侧向相连的复合体。根据沉积期古气候特点,可将直罗组分为上、下两段,上、下亚段物源条件一致,沉积体系具有差异(张康等,2015),其中直罗组下段以原生灰色碎屑岩建造为主,河流相砂体发育。直罗组上段为一套原生红色碎屑岩建造,以洪泛沉积为主,砂体相对不发育。根据沉积体系特征,直罗组下段进一步划分为上亚段和下亚段,其中上亚段发育辫状河-曲流河沉积体系,下亚段发育辫状河沉积体系。直罗组下段下亚段辫状河砂体中富含有机质和黄铁矿等还原介质,砂体连通性、渗透性好,具有良好的成矿条件(刘文平,2011),是纳岭沟铀矿床的主要成矿层位(图2)。

①直罗组下段下亚段(J_2^{1-1})

该层段主要为潮湿古气候条件下的砂质辫状河沉积物,以绿色、灰绿色、灰色的粗砂岩、中粗砂岩为主,多含砾,垂向上由多个不完整的正韵律组成。砂岩以碎屑物为主,碎屑成分主要为石英、长石和岩屑,含少量黑云母,岩屑以变质岩岩屑和花岗岩岩屑为主,碎屑颗粒多为次棱角状,分选中等,多为泥质胶结,固结程度低。灰色砂岩中多见炭屑和黄铁矿,黄铁矿大多呈团块状、细晶状。砂体疏松,连通性好,还原质丰富,具备良好的后生成矿条件。

②直罗组下段上亚段(J_2^{1-2})

该层段主要为潮湿气候条件下的辫状河-曲流河沉积物,以绿色、灰绿色、灰色中细砂岩、中粗砂岩为主,夹浅绿色、褐红色泥岩、粉砂岩。砂岩以碎屑物为主,碎屑成分主要为石英、长石和岩屑,碎屑颗粒分选中等,次棱角状,多为泥质胶结。砂岩厚度较薄,夹厚度不等的泥岩,稳定性、连通性差。

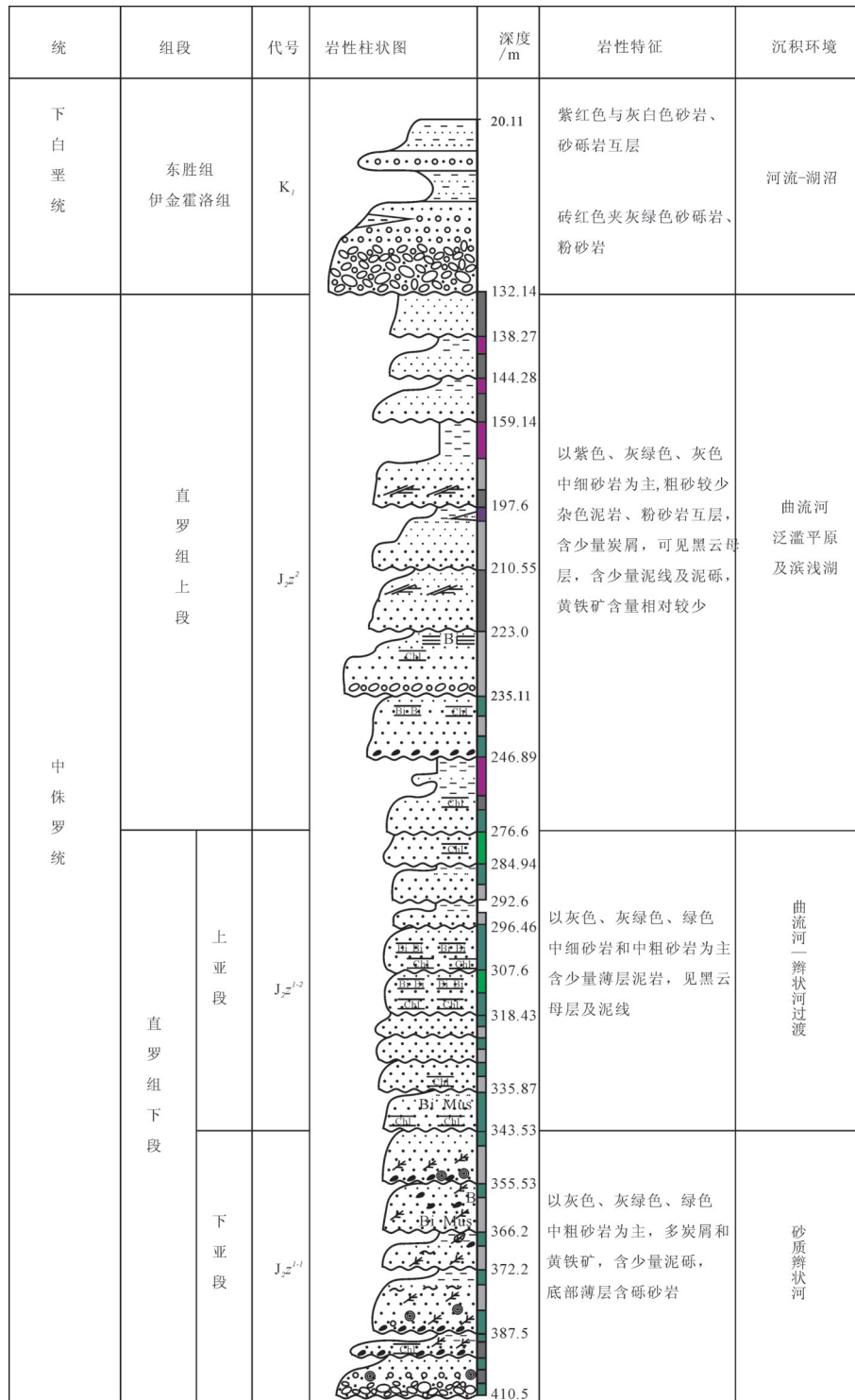


图2 纳岭沟铀矿床中侏罗统直罗组柱状图

Fig.2 The stratigraphic column of Zhiluo Formation in the Middle Jurassic Nalinggou uranium deposit

③直罗组上段(J₂²)

该层段主要为干旱古气候条件下的高弯度曲流河沉积物,以中细砂岩、粉砂岩、泥岩互层为主,其中泥岩、粉砂岩厚度较大,多呈粉红、紫红、灰紫

色,部分含蓝色、蓝绿色砂质团块或巢状砂,砂岩呈紫色、灰绿色、灰白色,普遍发育褐铁矿化,并呈斑状或带状沿裂隙分布。砂岩以碎屑物为主,碎屑成分主要为石英,次为长石,少量云母,砂岩粒度普遍

较细,以细粒、中细粒为主,分选中等、次棱角状,砂岩疏松,成岩度相对较低,以泥质胶结为主。砂体厚度较薄、稳定性差、连通性差,岩性条件及岩石地球化学条件不利于砂岩型铀矿化的形成。

3 样品采集与分析方法

样品主要采自纳岭沟地区9个工业孔(ZKN44-131、WTN-7、WTN-8、ZKN28-36、ZKN36-121、ZKN12-62、ZKN8-54、ZKN4-62、ZKN6-113)的直罗组砂岩,每个孔均采取3种颜色、不同成因的砂岩,包括绿色砂岩、灰绿色砂岩和灰色砂岩。42件岩石样品进行了镜下显微观察,5件矿石样进行了 α 蚀刻径迹实验和电子探针分析,其中19件样品进行了扫描电镜、能谱分析和X射线衍射定量分析分析结果见表1,表2和表3。

3.1 α 蚀刻径迹方法

α 蚀刻径迹是间接观察铀矿物赋存状态的有效手段。将感光胶片的片基薄膜覆盖在由矿石样品制作的光薄片表面,标记好光薄片轮廓位置,捆紧固定,置于常温、干燥、无尘处,放置45d后可取出拆开,将片基置于蚀刻溶液中进行蚀刻。蚀刻溶液配方采用:30 g KOH + 5 g NaOH + 5 g KMnO_4 + 100 mL H_2O ,蚀刻溶液温度控制在60 $^{\circ}\text{C}$,蚀刻时间为35 min,再用1:1的盐酸溶液溶去表面沉淀物,最后用清水洗净,晾干(徐喆等,2010;张鑫等,2015)。蚀刻完成后,在显微镜下观察片基上的蚀刻径迹,并对光薄片进行同视域镜下观察,分析蚀刻径迹分布形态和规模。

3.2 电子探针分析测试

首先在实验室进行 α 蚀刻径迹实验,数天后在胶片上找到径迹并结合探针片在电子显微镜下观察并标注,将探针片经镀碳处理后,经电子探针分析,在电子探针背散射图像下分析铀矿物赋存位置、形态及定量分析铀矿物成分。分析测试单位为东华理工大学核资源与环境国家重点实验室,电子探针型号为JXA-8100,测试条件为加速电压15.0 kV,探针电流100 mA,电子束斑为1 μm ,测试结果见表3。

3.3 扫描电镜和能谱分析

扫描电镜及能谱分析是在东华理工大学放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室进行分析

测试。在上机分析测试之前,对样品进行随机粉碎,选择破裂面新鲜、平坦的碎块,大小在0.5 cm \times 0.5 cm \times 0.5 cm左右,将选取好的样品用绝缘胶带包裹使待测面尽量等高并编号,随后放入干燥器皿中等待镀金和上机测试。分析测试过程中采用的仪器:捷克FEI公司生产的Nova NanoSEM 450扫描电镜和英国牛津仪器公司生产的X-Max电制冷X射线能谱仪。室内温度控制在(20 \pm 2) $^{\circ}\text{C}$ 和湿度<80%,仪器主机部分一直保持在高真空状态。

3.4 X射线衍射定量分析

X射线衍射定量分析工作在中国石油勘探研究院进行,使用仪器型号为D/max-2500与TTR,执行标准与测试条件按照《沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物X射线衍射分析方法》SY/T5163-2010规定执行。测试结果见表2。

4 含矿目的层岩石学及蚀变矿物学特征

砂岩中的物质组分提供了成岩反应所必需的物质基础,由此决定了在碎屑沉积物的沉积期后变化过程中形成自生矿物的成岩特征(樊爱萍,2007)。通过对大量常规薄片的观察,结合扫描电镜、XRD等研究,了解纳岭沟铀矿床含铀矿目的层中侏罗统直罗组下段下亚段砂岩的岩石学特征和蚀变矿物特征,推测古流体类型及演化规律,对铀成矿作用的研究具有重要的意义。

4.1 岩石学特征

直罗组下段下亚段是纳岭沟铀矿床主要的含矿层位,以灰色、灰绿色、绿色中粗粒、中粒砂岩为主,为研究该层段砂岩岩石学特征、矿物蚀变组合特征等,对9个钻孔的对应层段进行岩心取样,制作普通薄片(50 mm \times 25 mm,厚1 mm),通过显微镜鉴定薄片42个。显微镜镜下鉴定定名及砂岩岩石碎屑成分统计情况见表1。

(1)砂岩的碎屑成分特征

经薄片岩石学分析发现,纳岭沟铀矿床直罗组下段下亚段砂岩碎屑含量占砂岩的76%~92%,碎屑成分主要为石英、长石、岩屑,其中石英颗粒表面干净,含量在33%~76%,主要集中在50%左右;长石含量为10%~50%,主要集中在30%左右,以斜长石、钾长石为主,含部分微斜长石、条纹长石,由于长石抗

表1 鄂尔多斯纳岭沟地区砂岩碎屑颗粒含量及成熟度指数统计

Table 1 Clastic components and maturity index of sandstone in the Nalinggou mMining area of Ordos Basin

样号	室内定名	钻孔及深度/m	Q/%	Qm/%	Qp/%	F/%	L/%	Li/%	Q/(F+L)
15OR001	灰绿色细粒黑云母化长石砂岩	ZKN44-131,394.0	50	45	5	45	5	10	1
15OR002	灰绿色细粒黑云母化岩屑长石砂岩	ZKN44-131,393.4	51	45	6	40	9	15	1.04
15OR003	灰色不等粒绿泥石化岩屑长石砂岩	ZKN44-131,386.3	55	45	10	35	10	20	1.22
15OR006	灰绿色不等粒绿泥石化岩屑长石砂岩	ZKN44-131,365.6	48	40	8	40	12	20	0.92
15OR007	灰黄绿色不等粒长石岩屑砂岩	ZKN44-131,363.6	44	35	9	30	26	35	0.79
15OR009	灰绿色中细粒岩屑长石砂岩	ZKN44-131,334.5	55	40	15	30	15	30	1.22
15OR016	绿色中粗粒岩屑长石砂岩	WTN-7,344.5	57	35	12	35	18	30	1.08
15OR017	灰白色中粗粒长石岩屑砂岩	WTN-7,332.5	40	25	15	28	21	46	0.82
15OR026	灰绿色中细粒岩屑长石砂岩	WTN-7,385.5	76	60	16	20	4	20	3.17
15OR028	灰色中粗粒长石岩屑砂岩	WTN-7,355.1	52	50	6	23	21	27	1.18
15OR033	灰白色粗粒碳酸盐化长石岩屑砂岩	ZKN28-36,390.5	70	55	15	20	10	25	2.33
15OR035	灰色微红色中细粒长石岩屑砂岩	ZKN28-36,382.2	69	63	6	15	16	22	2.23
15OR036	绿色中细粒长石岩屑砂岩	ZKN283-374.3	51	45	6	25	24	30	1.04
15OR039	灰白色中粒岩屑长石砂岩	ZKN28-36,337.6	48	36	12	33	19	31	0.92
15OR051	灰白色中粗粒岩屑长石砂岩	ZKN36-121,372.1	45	35	10	20	35	45	0.82
15OR052	灰绿色中细粒黑云母化岩屑长石砂岩	ZKN36-121,369.4	45	30	15	40	15	30	0.82
15OR056	灰白色中粗粒碳酸盐化长石岩屑砂岩	ZKN36-121,346.5	40	34	6	20	34	40	0.74
15OR058	灰色不等粒岩屑长石砂岩	ZKN36-121,334.2	38	30	8	40	22	30	0.61
15OR060	灰白色中粗粒碳酸盐化长石岩屑砂岩	ZKN36-121,317.0	55	45	10	25	20	30	1.22
15OR061	绿色不等粒碳酸盐化长石岩屑砂岩	ZKN36-121,313.1	61	55	6	10	29	35	1.56
15OR073	灰色中粗粒岩屑长石砂岩	ZKN12-62,447.4	38	30	8	45	17	25	0.61
15OR076	绿色中细粒黑云母化长石岩屑砂岩	ZKN12-62,436.1	53	45	8	10	37	45	1.13
样号	室内定名	钻孔及深度/m	Q/%	Qm/%	Qp/%	F/%	L/%	Li/%	Q/(F+L)
15OR077	灰色中粒岩屑砂岩	ZKN12-62,425.7	43	30	13	20	37	50	0.75
15OR079	绿色中粗粒岩屑长石砂岩	ZKN8-54,429.4	63	50	13	25	12	25	1.70
15OR081	灰绿色粗粒长石岩屑砂岩	ZKN8-54,416.4	56	45	11	25	19	30	1.27
15OR082	灰绿色不等粒岩屑长石砂岩	ZKN8-54,430.7	60	45	15	30	10	25	1.50
15OR086	灰绿色中细粒岩屑长石砂岩	ZKN4-62,458.6	53	45	8	30	17	25	1.13
15OR087	灰绿色粗粒绿泥石化长石岩屑砂岩	ZKN4-62,451.6	42	30	12	18	13	25	1.35
15OR088	绿色不等粒绿泥石化长石岩屑砂岩	ZKN4-62,447.5	33	15	18	35	32	50	0.49
15OR092	绿色不等粒岩屑砂岩	ZKN6-113,360.6	65	55	10	10	25	35	1.86
15OR093	灰色中粗粒岩屑长石砂岩	ZKN6-113,358.6	47	38	9	35	18	27	0.89
15OR095	灰色中粒绿泥石化长石岩屑砂岩	ZKN6-113,352.8	56	45	11	25	19	30	1.27
15OR097	灰色不等粒碳酸盐化长石岩屑砂岩	ZKN6-113,347.8	57	50	7	20	23	30	1.33
15OR098	灰绿色粗粒黄铁矿化长石岩屑砂岩	ZKN6-113,346.7	40	35	5	25	35	40	0.67
15OR102	灰色中粗粒岩屑长石砂岩	WTN-8,378.5	29	20	9	46	25	34	0.41
15OR103	灰色中细粒岩屑长石砂岩	WTN-8,375.2	36	20	16	50	14	30	0.56
15OR104	灰色粗粒岩屑长石砂岩	WTN-8,371.9	36	28	8	48	16	24	0.56
15OR106	灰绿色中细粒绿泥石化岩屑长石砂岩	WTN-8,357.8	38	30	8	40	24	30	0.59
15OR107	绿色中细粒绿泥石化岩屑长石砂岩	WTN-8,352.1	31	25	6	50	19	25	0.45
15OR108	灰色中细粒岩屑长石砂岩	WTN-8,349.7	48	40	8	35	17	25	0.92
15OR113	灰色中粗粒岩屑长石砂岩	WTN-8,322.4	45	40	5	35	20	25	0.82
15OR114	浅灰绿色粗粒岩屑长石砂岩	WTN-8,309.5	55	40	15	35	10	25	1.22

注:Q=石英,Qm=单晶石英,Qp=多晶石英,F=长石,L=岩屑,Lt=L+Qp。

表2 纳岭沟铀矿床直罗组下段下亚段砂岩中粘土矿物X-射线衍射分析数据

Table 2 XRD data of sandstones of the below part of the lower member of Zhiluo Formation in the Nalinggou uranium deposit

分析号	原编号	井段及深度/m	黏土矿物相对含量/%					混层比/%S			分析号	原编号	井段(M)	黏土矿物相对含量/%					混层比/%S		
			S	I/S	I	K	C	C/S	I/S	C/S				S	I/S	I	K	C	C/S	I/S	C/S
1	15OR013	WTN-7,388.7	61	/	3	28	8	/	/	/	20	15OR079	ZKN8-54,429.4	41	/	7	34	18	/	/	/
2	15OR015	WTN-7,351.0	56	/	5	33	6	/	/	/	21	15OR080	ZKN8-54,422.0	44	/	2	19	35	/	/	/
3	15OR016	WTN-7,344.5	59	/	2	21	18	/	/	/	22	15OR086	ZKN4-62,458.6	55	/	2	18	25	/	/	/
4	15OR017	WTN-7,332.5	60	/	5	27	8	/	/	/	23	15OR087	ZKN4-62,451.6	67	/	5	16	12	/	/	/
5	15OR018	WTN-7,325.4	50	/	3	22	25	/	/	/	24	15OR088	ZKN4-62,447.5	32	/	12	35	21	/	/	/
6	15OR041	ZKBW2015-4,499.2	28	/	4	44	24	/	/	/	25	15OR089	ZKN4-62,438.31	55	/	5	27	13	/	/	/
7	15OR043	ZKBW2015-4,491.0	71	/	3	18	8	/	/	/	26	15OR090	ZKN4-62,441.31	35	/	4	17	44	/	/	/
8	15OR044	ZKBW2015-4,481.1	51	/	8	29	12	/	/	/	27	15OR096	N36-113,351.0	44	/	7	34	15	/	/	/
9	15OR046	ZKBW2015-4,476.1	34	/	2	42	22	/	/	/	28	15OR097	N36-113,347.8	47	/	9	27	17	/	/	/
10	15OR049	ZKBW2015-4,448.1	55	/	5	27	13	/	/	/	29	15OR098	N36-113,346.7	59	/	8	21	12	/	/	/
11	15OR052	ZKN36-121,369.4	56	/	3	25	16	/	/	/	30	15OR105	WTN-8,365.0	59	/	3	23	15	/	/	/
12	15OR056	ZKN36-121,346.5	51	/	7	25	17	/	/	/	31	15OR106	WTN-8,357.8	55	/	6	27	12	/	/	/
13	15OR057	ZKN36-121,345.5	53	/	6	30	11	/	/	/	32	15OR107	WTN-8,352.1	12	/	6	34	48	/	/	/
14	15OR063	ZKBW2015-1,364.9	50	/	6	32	12	/	/	/	33	15OR108	WTN-8,349.7	76	/	2	15	7	/	/	/
15	15OR065	ZKBW2015-1,357.3	45	/	7	33	15	/	/	/	34	15OR109	WTN-8,347.0	64	/	3	14	19	/	/	/
16	15OR068	ZKBW2015-1,297.6	54	/	1	17	28	/	/	/	35	15OR110	WTN-8,341.8	60	/	3	24	13	/	/	/
17	15OR071	ZKBW2015-1,281.7	34	/	5	20	41	/	/	/	36	15OR111	WTN-8,335.7	70	/	3	19	8	/	/	/
18	15OR072	ZKBW2015-1,260.4	71	/	3	17	9	/	/	/	37	15OR112	WTN-8,329.5	46	/	1	20	33	/	/	/
19	15OR076	ZKN12-62,436.06	62	/	2	23	13	/	/	/											

S: 蒙皂石类 I/S: 伊蒙混层 I: 伊利石 K: 高岭石 C: 绿泥石 C/S: 绿蒙混层

风化能力较弱,颗粒表面多见黏土化、帘石化(主要为绿帘石和黝帘石),部分砂岩中可见被碳酸盐交代穿插的现象;岩屑含量为5%~50%,多集中在30%左右,以变质岩岩屑为主,多见石英岩岩屑和硅质岩岩屑,多晶石英含量一般在8%左右。

将统计的42个样品的碎屑颗粒成分含量,在Folk(1968)的分类图上进行投点,得到图3,从图中可以看出样品投点大都落在砂岩分类图的V区,部分落在IV区和VI区,即主要为岩屑长石砂岩,含部分的长石砂岩和长石岩屑砂岩,岩屑砂岩含量相对较少,反映出纳岭沟铀矿床直罗组下段下亚段砂岩成分成熟度较低,具有近物源沉积的特点。

(2)砂岩的结构特征

纳岭沟铀矿床直罗组下段下亚段砂岩碎屑颗粒磨圆度较差,以次棱角一次圆状为主,可见少量碎屑颗粒呈棱角状;碎屑颗粒粒径多在0.3~1.5 mm,多呈中粒砂状结构和粗粒砂状结构,可见少量砾级碎屑颗粒;颗粒间多呈点接触,少见缝合线接触,胶结类型以孔隙式胶结为主;碎屑颗粒分选中

等,反映了砂岩总体结构成熟度较低的特点。

(3)砂岩的填隙物特征

纳岭沟铀矿床直罗组下段下亚段砂岩中的填隙物主要为自生黏土矿物,部分碳酸盐胶结物,少量细粉砂质填隙物和碎屑颗粒黏土化产物,部分砂岩可见少量暗色黄铁矿。填隙物含量多为10%~25%,自生黏土矿物主要为蒙脱石,部分高岭石、绿泥石,少量伊利石。细粉砂质填隙物主要由石英长石微晶组成。

4.2 成岩作用

(1)压实作用

据手标本观察发现,纳岭沟地区直罗组下段下亚段砂岩总体上疏松,部分砂岩发育钙质胶结。通过显微镜镜下观察发现,该地区直罗组下段下亚段砂岩砂岩经历了一定的机械压实作用,主要表现为:①部分砂岩可见黑云母等塑性岩屑沿长轴方向弯曲变形,甚至部分呈定向排列,形成了一定的压实定向组构(图4a);②可观察到少量的石英、长石等刚性碎屑颗粒破裂或破碎(图4e),少量石英产生裂

表3 鄂尔多斯盆地纳岭沟地区铀矿物电子探针分析结果(%)

Table 3 EPMA results of uranium ore from the Nalinggou mining area of Ordos Basin

点号	UO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	P ₂ O ₅	TiO ₂	Na ₂ O	FeO	MnO	ThO ₂	PbO	Total	铀矿类型
15OR094(1).1.1	70.6	7.08	1.29	4.78	0.29	1.24	0.43	0.18	-	-	-	87.93	铀石
15OR095(2).1.1	67.201	14.328	0.873	1.968	0.496	0.455	0.331	0.139	0.037	-	0.047	90.891	铀石
15OR095(2).1.3	64.894	13.869	1.202	3.05	0.687	0.851	0.039	0.143	0.029	0.007	-	90.889	铀石
15OR097(1).1.1	70.695	7.656	1.369	3.306	0.117	0.188	0.56	0.022	0.314	0.025	-	87.518	铀石
15OR097(1).2.3	61.503	18.33	1.628	2.234	0.414	-	0.026	0.084	0.011	-	0.041	89.914	铀石
15OR097(1).6.2	66.203	15.161	1.342	1.658	0.371	0.027	0.128	0.081	0.04	0.026	0.047	89.871	铀石
15OR107(2).1.2	62.388	15.112	1.627	2.9	0.608	0.22	0.373	0.608	0.044	-	-	91.354	铀石
15OR107(2).6.3	57.687	17.592	1.35	2.406	0.615	0.089	0.015	0.199	0.024	-	-	87.035	铀石
15OR107(2).12.1	57.939	16.863	1.36	2.478	0.437	3.181	0.295	0.728	0.03	-	0.06	90.349	铀石
15OR082(2).1.2	85.58	1.24	0.09	4.99	1.87	0.29	0.46	0.12	0.21	-	-	95.99	沥青铀矿
15OR082(2).1.3	83.62	1.22	0.09	4.42	1.78	0.15	0.69	0.17	0.25	-	-	93.39	沥青铀矿
15OR082(3).1.1	80.38	1.071	0.04	4.573	1.815	0.121	0.305	0.126	0.195	0.036	-	89.692	沥青铀矿
15OR082(3).1.2	81.685	1.169	0.045	4.714	1.88	0.118	0.296	0.28	0.162	-	-	91.942	沥青铀矿
15OR095(2).1.2	44.961	6.352	1.207	1.467	0.29	14.467	0.524	4.482	0.024	-	0.076	78.013	钛铀矿
15OR097(1).4.2	51.063	13.607	1.044	1.42	0.179	13.272	0.367	3.328	0.125	-	0.053	87.202	钛铀矿
15OR107(2).10.1	52.873	16.271	1.281	2.242	0.462	8.788	0.238	1.68	0.062	0.002	-	89.755	含钛铀矿

注: 测试单位东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 所用仪器为日本电子公司的JXA-8100型电子探针, 所用电压为15.0 kV, 探针束流100 nA, 束斑直径为1 μm, “-”表示未测出。

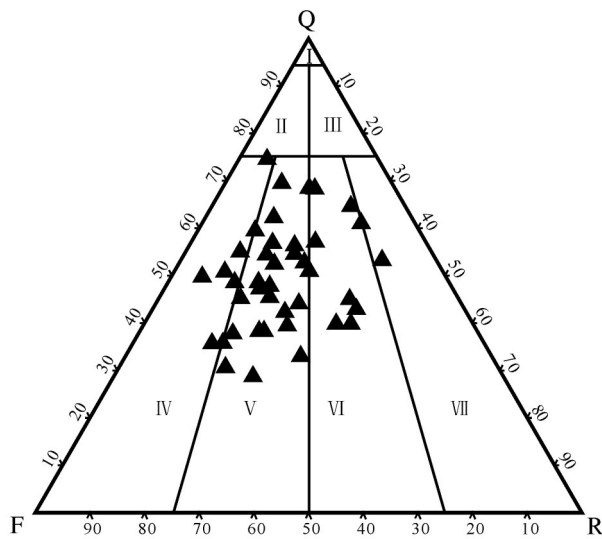


图3 纳岭沟铀矿床直罗组下段下亚段砂岩分类图解
I—石英砂岩; II—长石石英砂岩; III—岩屑石英砂岩; IV—长石砂岩; V—岩屑长石砂岩; VI—长石岩屑砂岩; VII—岩屑砂岩
Fig.3 Sandstone classification of the lower part of the lower member of Zhiluo Formation in the Nalinggou uranium deposit
I—Quartz sandstone; II—Feldspathic quartz sandstone;
III—Lithic quartz sandstone; IV—Arkose; V—Lithic feldspar sandstone; VI—Feldspar lithic sandstone; VII—Litharenite

隙,部分黑云母和长石沿着解理面产生破裂。

(2) 胶结作用

纳岭沟地区直罗组下段下亚段砂岩主要以泥质胶结为主,部分砂岩发育钙质胶结,少量砂岩中可见黄铁矿等铁质矿物浸染并胶结(图4d、e、f)。XRD测试分析结果显示,该地区自生黏土矿物主要为蒙脱石,其次是高岭石和绿泥石,少量伊利石,未见伊/蒙混层和绿/蒙混层;钙质胶结主要以方解石为主(表2)。

(3) 溶蚀作用

显微镜下观察发现,纳岭沟地区直罗组下段下亚段砂岩中部分长石溶蚀严重,产生的次生孔隙被次生黏土矿物和其他次生矿物充填;部分碳酸盐胶结物也发生了不同程度的溶蚀作用(图4c、d,图5a)。

4.3 蚀变矿物学特征

由镜下鉴定结果可以知道,纳岭沟铀矿床直罗组下段下亚段砂岩中存在大量蚀变现象,反映具有多期次、多类型、长期性的低温热液流体作用(肖新建,2004;薛春纪等,2010;李荣西等,2011)。对蚀变矿物组合特征的研究,有利于了解热流体对铀成矿

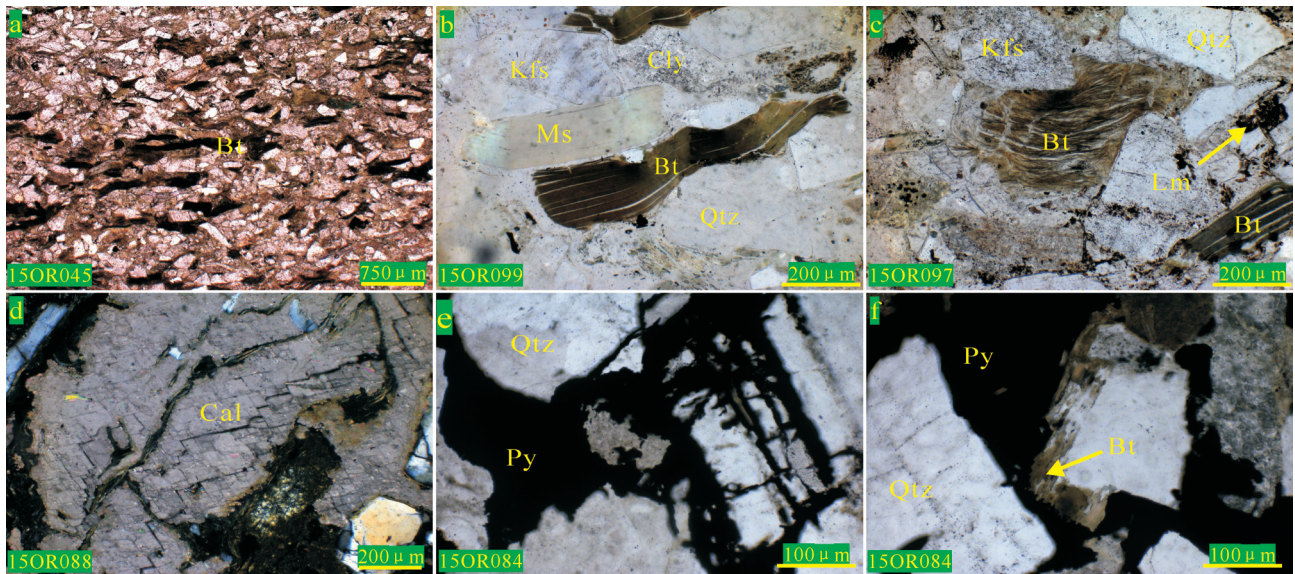


图4 纳岭沟铀矿床直罗组下段下亚段砂岩显微镜下特征图

a—由于压实作用而呈一定定向性排列的黑云母;b—由于应力作用,具波状消光的碎屑黑云母和白云母;c—黑云母吸水膨胀而沿解理面裂开,长石表面溶蚀孔被铁质矿物和黏土矿物充填;d—方解石胶结;e—铁质胶结,黄铁矿充填孔隙,穿插石英裂隙;f—黑云母交代石英边缘
Bt—黑云母;Ms—白云母;Kfs—钾长石;Cly—黏土矿物;Chl—绿泥石;Qtz—石英;Py—黄铁矿;Lm—褐铁矿;Cal—方解石

Fig.4 Microphotographs of sandstone of the lower part of the lower member of Zhiluo Formation in the Nalinggou uranium deposit
a—The directional arrangement of biotites due to compaction; b—The clastic biotite and muscovite with wavy extinction due to compaction; c—Biotite swelling and splitting along the cleavage plane, The dissolution pore surface of feldspar filled with iron mineral and clay mineral; d—Calcite cementation; e—Iron cementation, Pyrite filling pore, interspersed with quartz crack; f—Biotite replacing quartz edge

Bt—Biotite; Ms—Muscovite; Kfs—K-feldspar; Cly—Clay mineral; Chl—Chlorite; Qtz—Quartz; Py—Pyrite; Lm—Limonite; Cal—Calcite

的作用。

(1)黑云母与绿泥石特征及转化关系

纳岭沟铀矿床直罗组下段下亚段砂岩中发育大量的黑云母,而黑云母产状不一,并且黑云母绿泥石化现象严重。原生沉积的碎屑黑云母通常具有良好的晶型,在成岩过程中由于应力作用,易受到其他碎屑颗粒的挤压作用,发生变形,正交偏光下产生波状消光的现象(北京大学地质学系岩矿教研室,1979;冯增昭,1993;伍英,2009)(图4b)。而当应力作用超过了黑云母的抗压极限之后,黑云母会沿着其解理面破裂,加之在流体作用下黑云母吸水膨胀,会导致部分黑云母呈破裂的放射状、扫帚状(图4c)。

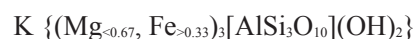
显微镜下观察显示,黑云母与绿泥石伴生关系密切,可见部分绿泥石交代黑云母(图5b),部分绿泥石呈黑云母假象,部分绿泥石呈异常干涉色(图5g、h);此外,可见绿泥石被锐钛矿(或金红石)交代(图5f、g),并且与铁质暗色矿物、绿帘石等矿物伴生密切(图5c、h、i)。因此可推断黑云母与绿泥石之间存在着一定的转化关系。

绿泥石族是化学成分相当复杂的铁、镁、铝的层状铝硅酸盐矿物,其种类多样,化学成分通式可以表示为:



式中 $R^{2+}=Mg, Fe, Mn, Ni$; $R^{3+}=Al, Fe, Cr, Mn$ 。

黑云母的化学通式可表示为:



黑云母在 $pH > 5$ 的情况下可以蚀变为绿泥石,析出铁质和钛质矿物。薄片绿泥石和未变化的黑云母逐渐过渡,可导致全部转变为绿泥石后呈黑云母假象,含钛的黑云母常分解形成针状金红石、细粒的钛铁矿、磁铁矿和榍石等矿物,若细针状的金红石排列成等边三角形,则可构成网状的金红石(图5f),有时还会有不规则的榍石分布其中(图5c)。

黑云母 \rightarrow 蒙脱石 + 黄铁矿, $pH > 5$

绿泥石是黑云母的常见蚀变矿物,其反应条件要求较低,而绿泥石向黑云母的转化则要求 300°C 左右高温热液作用,纳岭沟地区直罗组下段下亚段砂岩中常见黑云母层,而纳岭沟地区直罗组砂岩具有近物源沉积的特点,且颗粒磨圆度很差,颗粒粒

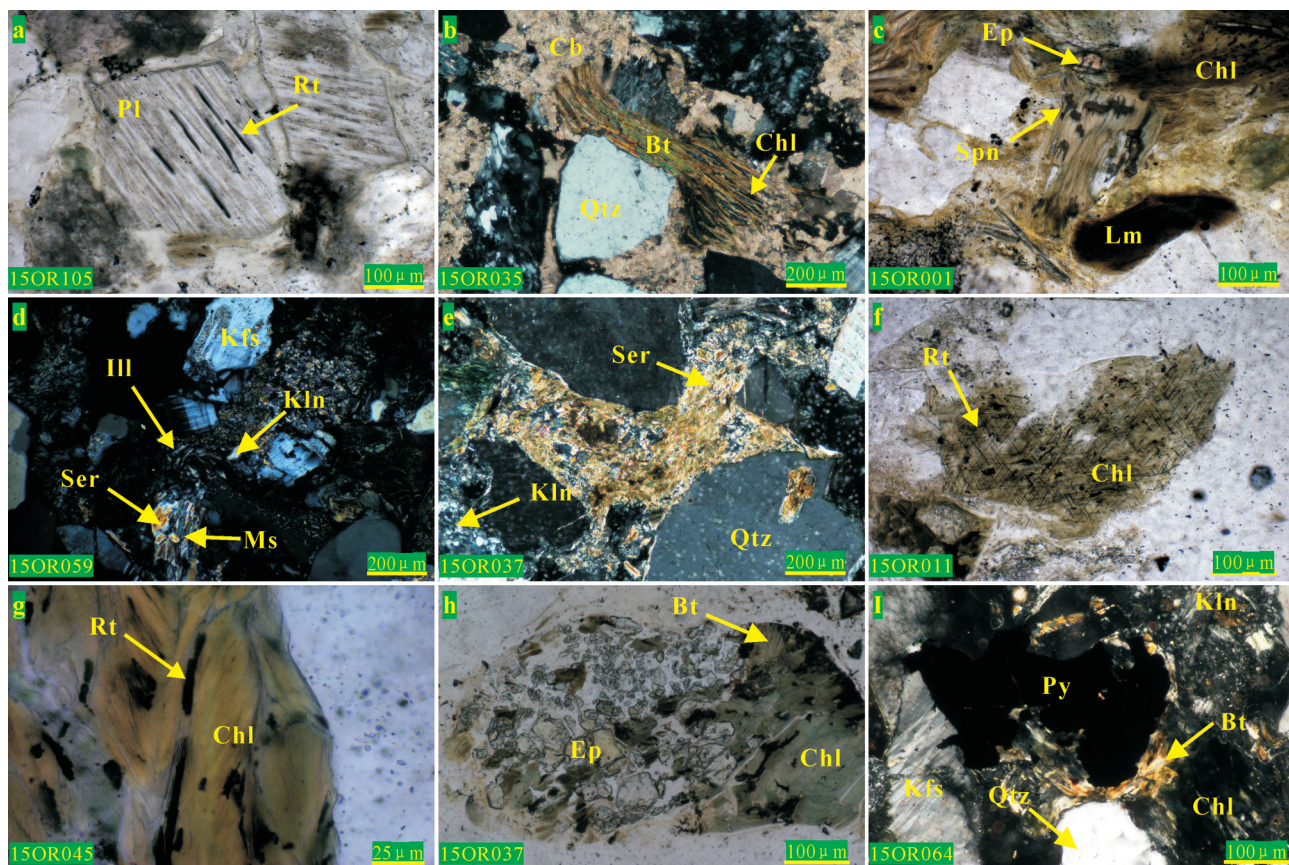


图5 纳岭沟铀矿床直罗组下段下亚段砂显微镜下蚀变特征图

a—针状金红石充填在斜长石表面的溶蚀孔中；b—绿泥石交代黑云母，又被后期碳酸盐岩穿插；c—榍石交代绿泥石，伴生绿帘石，见褐铁矿残留；d—同视域中的高岭石-伊利石-绢云母-白云母的矿物组合；e—充填物中的大量细粒绢云母和少量高岭石；f—绿泥石中的网状金红石；g—绿泥石中的针状金红石；h—呈黑云母假象的绿泥石和残留的黑云母，伴生绿帘石；i—充填物中大量的黄铁矿与部分黑云母、绿泥石、高岭石；Bt—黑云母；Kln—高岭石；Ser—绢云母；Kfs—钾长石；Pl—斜长石；Chl—绿泥石；Qtz—石英；Rt—金红石；Lm—褐铁矿；Spn—榍石；Ep—绿帘石；Ill—伊利石；Cb—碳酸盐矿物；Ms—白云母

Fig.5 Microphotographs of alteration phenomena in sandstone of the lower part of the lower member of Zhiluo Formation in the Nalinggou uranium deposit

a—Needle rutile filling in a hole on the surface of the plagioclase dissolution; b—Biotite replaced by chlorite, and penetrated by later carbonate; c—Sphene replacing chlorite, associated epidote, residual limonite; d—Kaolinite-illite-sericite-muscovite mineral assemblage; e—A large number of fine particles in the interstitial material comprising sericite and small amounts of kaolinite; f—The mesh rutile in chlorite; g—The needle rutile in chlorite; h—The chlorite with biotite illusion and residual biotite, associated epidote; i—A large quantity of pyrite and some biotite, chlorite and kaolinite in interstitial material; Bt—Biotite; Kln—Kaolinite; Ser—Sericite; Kfs—K-feldspar; Pl—Plagioclase; Chl—Chlorite; Qtz—Quartz; Rt—Rutile; Lm—Limonite; Spn—Sphene; Ep—Epidote; Ill—Illite; Cb—Carbonate mineral; Ms—Muscovite

径较大，证明古水动力较强，不利于黑云母沉积。并且由后文可知，在纳岭沟铀矿床存在钛铀矿、金红石等高温热液作用产物。因此，是否存在绿泥石向黑云母的转化，是否存在次生黑云母，有待寻求其他多方面的科学证据。

(2) 黏土矿物特征

镜下鉴定显示，纳岭沟地区直罗组下段下亚段砂岩中存在高岭石、蒙脱石、伊利石、绿泥石、绢云母、白云母，从X射线衍射分析数据中可以看出(表2)，纳岭沟铀矿床直罗组下段下亚段砂岩中黏土矿

物类型主要为蒙脱石、绿泥石、高岭石和少量的伊利石，几乎不含绿/蒙混层和伊/蒙混层。

依据X射线衍射分析数据中黏土矿物含量，对纳岭沟地区直罗组下段下亚段砂岩黏土含量作折线图(图6)，从图中可以看出，蒙脱石与绿泥石含量间存在明显的负相关，即蒙脱石含量相对多的砂岩中绿泥石含量相对少；且高岭石与蒙脱石含量也存在负相关，即高岭石相对多的砂岩中蒙脱石相对少。因此结合黏土矿物转化关系图(图7)可推断黏土矿物之间存在物质交换及一定的相互转化关系。

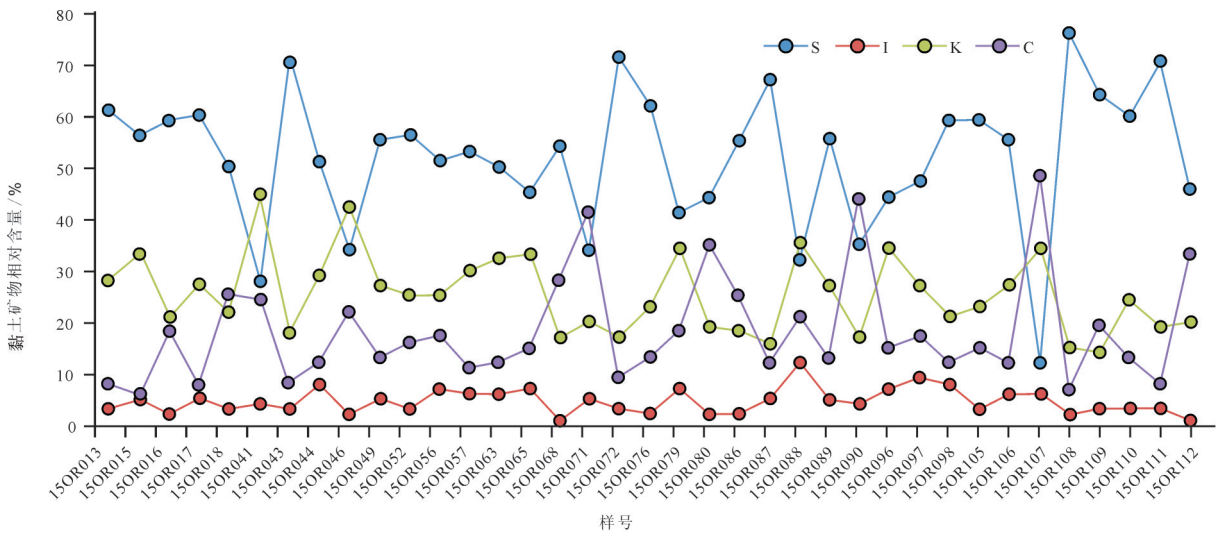


图6 不同颜色砂岩黏土矿物含量变化特征
S—蒙脱石;I—伊利石;K—高岭石;C—绿泥石

Fig.6 Variation characteristics of clay minerals content in different color sandstones
S—Smectite; I—Illite; K—Kaolinite; C—Chlorite

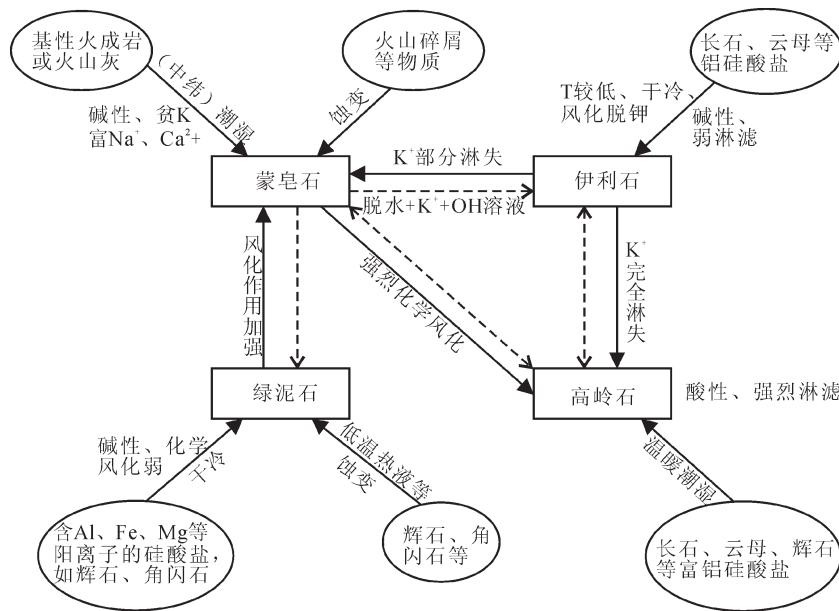


图7 黏土矿物转化关系图 (据周晓静,2010)

Fig. 7 Transformation diagram of clay minerals (after Zhou Xiaojing, 2010)

高岭石化学式 $Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$, 是长石、似长石等经热液蚀变或风化作用分解的产物, 原生云母或长石风化形成的次生云母也可转变成高岭石, 高岭石常与蒙脱石、水白云母、绿泥石、石英、褐铁矿、长石等伴生(图8)。蒙脱石化学式 $Na_x(H_2O)_4\{(Al_{2-x}Mg_x)[Si_4O_{10}](OH)_2\}$; 伊利石化学式 $K_{0.75}(Al_{1.75}R^{2+})[Si_{3.5}Al_{0.5}O_{10}](OH)_2$, 式中 R^{2+} 一般为 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 。蒙脱石、伊利石、高岭石三者之间在不同条件

下可以相互转化。白云母化学式 $K\{Al_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2\}$, 绢云母在成分上与白云母相同, 但可能含K略少, 是一种细小鳞片状的白云母, 常组成隐晶质和显晶质的鳞片状集合体。而伊利石在 K^+ 离子增加、 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 离子流失的情况下可以转变为绢云母, 进而转变为白云母。从镜下鉴定和扫描电镜的观察结果中不难观察到高岭石、蒙脱石、伊利石、绢云母、白云母的矿物组合(图5d、e), 因此可以判断存

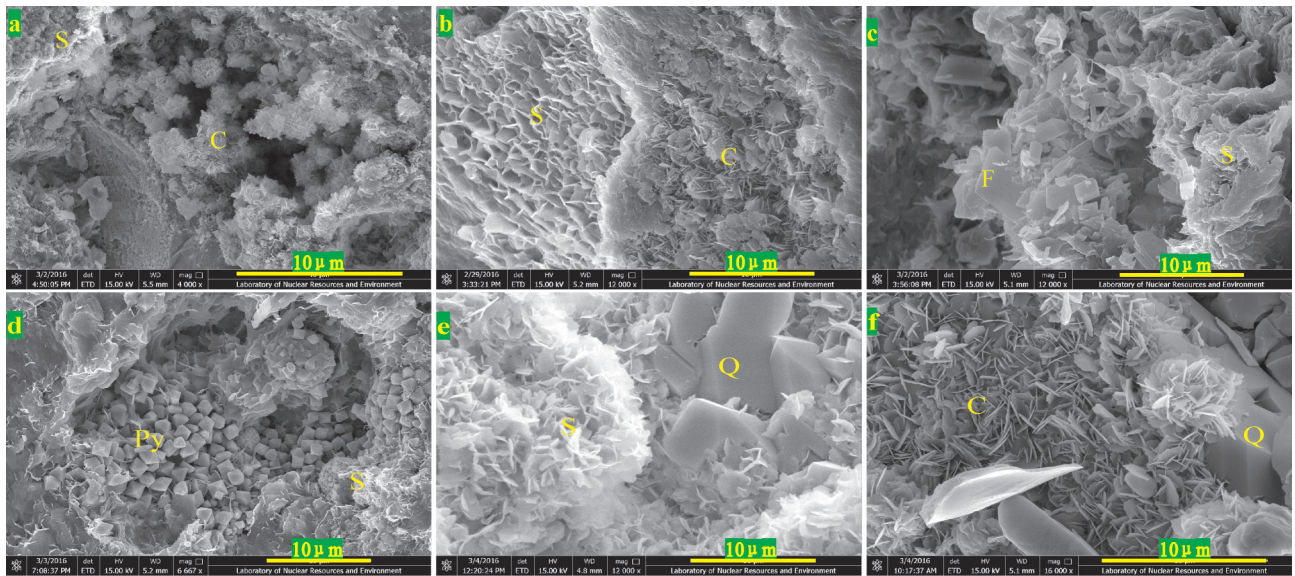


图8 纳岭沟铀矿床直罗组下段下亚段砂岩扫描电镜图

a—与蒙脱石伴生的针状绿泥石团簇;b—同时产生的蒙脱石(左)与绿泥石(右);c—钾交代形成的新生长石;d—蒙脱石周围的细粒黄铁矿集合体,粒度小于 $1\mu\text{m}$;e—与蒙脱石伴生的细粒疑似新生的石英;f—与针状和叶片状绿泥石伴生的细粒疑似新生的石英;
C—绿泥石;S—蒙脱石;K—高岭石;Py—黄铁矿;F—长石;Q—石英

Fig. 8 Scanning electron microscope images of sandstones of the lower part of the lower member of the Zhiluo Formation in the Nalingou uranium deposit

a—Montmorillonite associated acicular chlorite clusters; b—Simultaneous production of montmorillonite (left) and chlorite (right); c—Potassium metasomatism leading to the formation of new feldspar; d—A collection of fine grained pyrite around the montmorillonite, Particle size is less than $1\mu\text{m}$; e—Accompanying montmorillonite, fine grained suspected new quartz; f—Needle and lamellar chlorite associated fine grained suspected new quartz;
C—Chlorite; S—Smectite; K—Kaolinite; Py—Pyrite; F—Feldspar; Qtz—Quartz

在上述蚀变关系。

蒙脱石在富 Fe^{2+} , Mg^{2+} 的碱性条件下,可以通过绿蒙混层向绿泥石(王行信, 1998; 樊爱萍, 2007; 易超等, 2014)转化。此外,黑云母在 $\text{pH}<5$ 的情况下也可转化成高岭石,同样,镜下鉴定和扫描电镜观察结果中不难发现黑云母、钾长石、蒙脱石、绿帘石、黄铁矿的矿物组合(图5,图8)。另外,在扫描电镜观察中发现,纳岭沟地区直罗组下段下亚段砂岩中除蒙脱石、绿泥石伴生关系密切外,可能在黏土矿物成分交换过程中有细晶状黄铁矿、细晶状的长石、细晶状的石英的形成(图8c、d、e、f)。

黑云母 + 钙-长石 \rightarrow 蒙脱石 + 绿帘石 + 黄铁矿, $\text{pH}<5$

5 铀的存在形式

5.1 α 蚀刻径迹分析

通过对纳岭沟铀矿床直罗组下段下亚段铀矿石薄片蚀刻径迹的观察发现,蚀刻径迹主要有不规则环带状分布、散点状分布、团块状分布、条带状

分布等几个形态,其中不规则环带状和团块状分布形态较为普遍,散点状分布形态主要分布在胶结程度较低品位矿石样品中(图9)。

为了进一步查明铀矿物颗粒和其他岩石碎屑颗粒成分之间的关系,又进行了同视域下的径迹和薄片的观察对比(图10),结果显示,径迹与碎屑颗粒之间的分布关系主要可分为以下几类:①径迹呈不规则环带状和条带状分布在石英、长石等碎屑颗粒周围;②径迹呈散点状分布在填隙物中;③径迹呈团块状分布在填隙物中。

5.2 电子探针分析

电子探针定量数据分析结果显示,纳岭沟铀矿床铀矿物类型主要为铀石,见部分沥青铀矿和少量钽铀矿及含钽铀矿。其中,铀石的 UO_2 含量为53.19%~70.60%, SiO_2 含量为7.08%~21.00%;沥青铀矿的 UO_2 含量为80.38%~85.58%;含钽铀矿的 UO_2 含量为44.96%~52.87%, SiO_2 含量为6.35%~16.27%, TiO_2 含量为8.79%~14.47%(表3)。

综合分析电子探针数据和BSE图(图11),纳岭

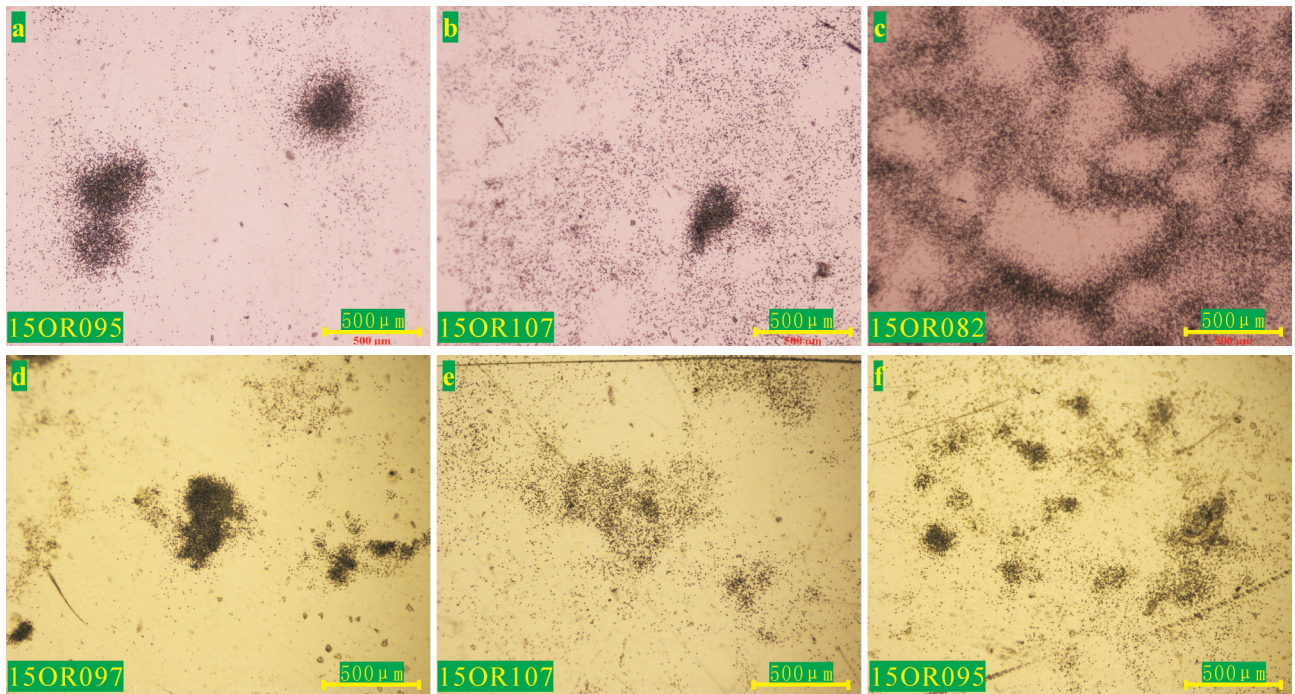


图9 α蚀刻径迹形态分布特征
Fig.9 The features of α track species distribution

样号	蚀刻径迹	单偏光	正交偏光	反射光	径迹形态
a 15OR095					单颗粒 呈团块状
b 15OR107					填隙物中 散点状分布
c 15OR082					沿颗粒边缘 不规则 环带状分布

图10 铀矿物α径迹与碎屑颗粒和填隙物对应关系
a—光薄片15OR095(2)径迹蚀刻后的胶片及同一视域单偏光、正交偏光和反射光照片,α径迹在胶片中呈团块状分布;b—光薄片15OR0107(2)径迹蚀刻后的胶片及同一视域单偏光、正交偏光和反射光照片,α径迹在胶片中呈散点状分布在填隙物中;c—光薄片15OR082(2)径迹蚀刻后的胶片及同一视域单偏光、正交偏光和反射光照片,α径迹在胶片中呈不规则环带状分布在颗粒边缘

Fig.10 Uranium ore α track relationship with clastic particles and filler content

a—Polished thin section 15OR095(2) track etched film, plainlight, crossed nicols and reflected light photo. Alpha track are distributed in the film, like briquette; b—Polished thin section 15OR0107(2). Track etched film, plainlight, crossed nicols and reflected light photo. Alpha track distributed in the film, like stars in the interstitial material; c—Polished thin section 15OR082(2). Track etched film, plainlight, crossed nicols and reflected light photo, alpha tracks distributed in the film, like irregular band distributed at the edge of the particles

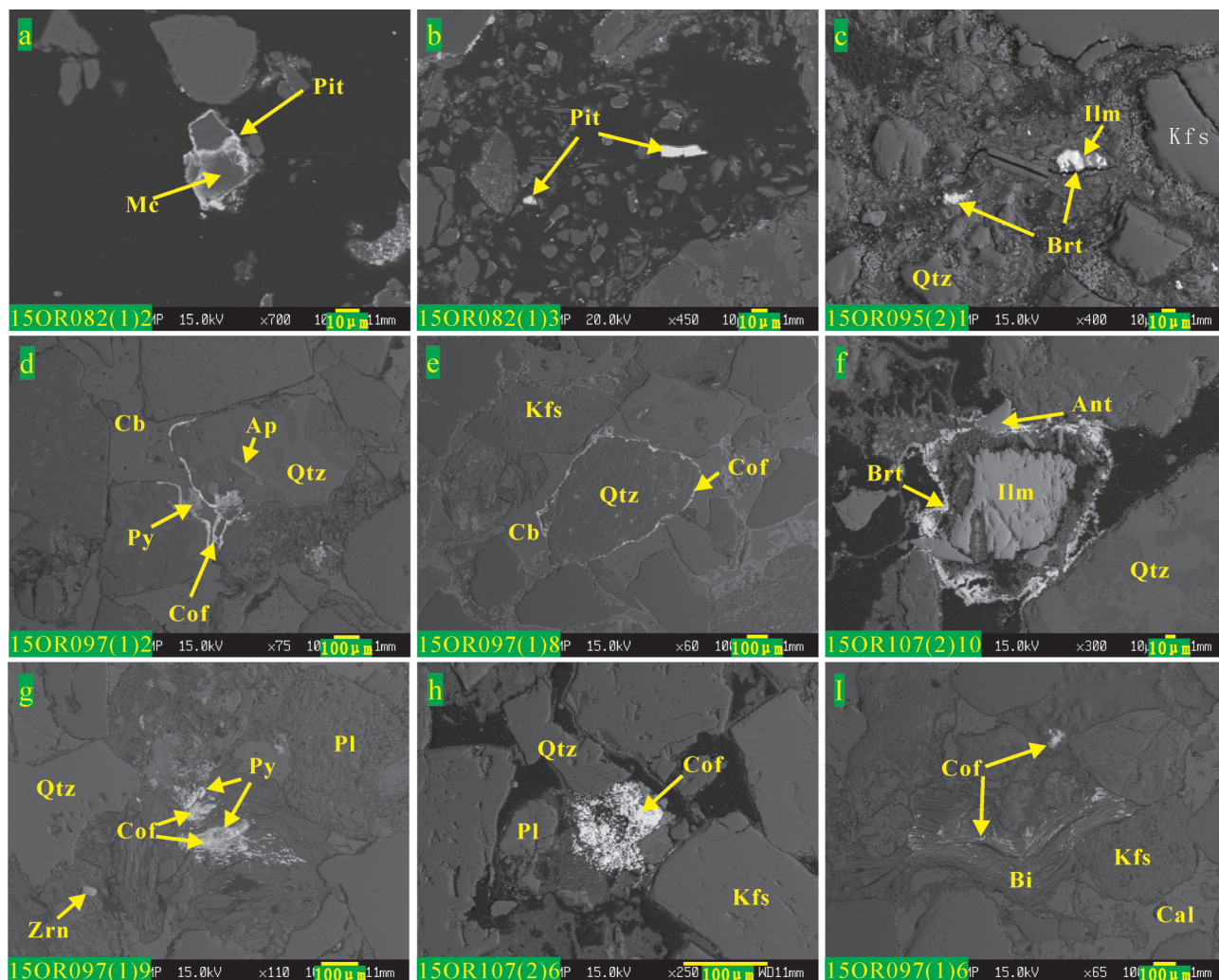


图 11 纳岭沟铀矿床铀赋存形式 BSE 图像

a—沿微斜长石边缘分布的沥青铀矿；b—填隙物中的沥青铀矿颗粒；c—填隙物中与钛铁矿伴生的钛铀矿；d—与黄铁矿伴生的沿颗粒条带状分布的铀石；e—沿石英颗粒环带状分布的铀石；f—与钛铁矿、锐钛矿伴生的环带状分布的铀石；g—泥质胶结物中与黄铁矿伴生的铀石；h—填隙物中不规则团块状分布的铀石；i—黑云母裂隙中散点状分布的铀石；Pit—沥青铀矿；Cof—铀石；Brt—钛铀矿；Qtz—石英；Kfs—钾长石；Pl—斜长石；Mc—微斜长石；Py—黄铁矿；Cb—碳酸盐胶结物；Ap—磷灰石；Zrn—锆石；Bi—黑云母

Fig.11 Backscattered electron image of uranium occurrence form of the Nalinggou mining area

a—Pitchblende along the edge of microcline distribution of; b—The pitchblende particle in the interstitial material; c—Filler content in the accompanying ilmenite, brannerite; d—Pyrite accompanying the article along the grain of zonal distribution of coffinite; e—The quartz stone particle band distribution of coffinite; f—The circle style coffinite associated with ilmenite and anatase; g—The coffinite associated with pyrites in the argillaceous rock; h—The crumbly structure coffinite in interstitial material; i—The coffinite distributed in biotite cracks; Pit—Pitchblende; Cof—Coffinite; Brt—brannerite; Qtz—Quartz; Kfs—K-feldspar; Pl—Plagioclase; Mc—Microcline; Py—Pyrite; Cb—Carbonate mineral; Ap—Apatite; Zrn—Zircon; Bt—Biotite

沟铀矿床中铀矿物的分布规律大致可以分为以下几类：

(1) 分布在碎屑颗粒边缘

碎屑颗粒的主要类型为石英、长石、云母，背散射图显示，铀矿物多赋存于石英、微斜长石、斜长石等碎屑颗粒边缘和裂隙部位，呈环带状和条带状分布。尤为特殊的是，可见黑云母节理裂隙中生长铀矿物。

(2) 分布在填隙物中

从电子探针背散射图中可以看出，铀矿物常见于岩石泥质胶结物、碳酸盐岩胶结物、基质中呈不规则团块状和散点状的赋存，与黏土矿物对铀的吸附作用有关(樊爱萍, 2007; 周晓静等, 2010; 易超等, 2014)。此类铀矿物常见与黄铁矿、炭屑等还原质紧密伴生。

(3)分布在特殊矿物周围

由背散射图容易观察到,铀石、钍铀矿及含钍铀矿的分布与锐钛矿、钛铁矿、硒铅矿等特殊矿物有关,多见铀矿物在这些颗粒周边呈环带状分布,此间可能与该地区铀成矿后期热流体改造作用有关(张复新等,2006;林潼等,2007;钟军等,2016)。

从以上分析可以看出,鄂尔多斯盆地纳岭沟地区直罗组下段下亚段中的铀矿石主要类型为铀石、沥青铀矿,可见部分钍铀矿及含钍铀矿,铀赋存位置主要是呈环带状、条带状分布在石英、长石等碎屑颗粒边缘及裂隙中,同时也常见铀矿物呈不规则团块状和散点状分布在岩石填隙物中。同时发现,铀富集与多种形态的黄铁矿、炭屑、有机质等还原质关系密切。此外,可见铀矿物与锐钛矿、钛铁矿、硒铅矿等矿物相关,这可能与该地区铀成矿后期热流体改造和细菌作用有关(Bonnetti C et al., 2015)。通过结合野外观察、镜下观察及电子探针等实验分析,可以发现该地区富矿砂体多疏松多孔,连通性、渗透性好,有利于铀成矿及后期改造,与前人提出的该地区古层间氧化的成矿模式相符。同时,疏松的铀成矿地层具有良好的连通性和渗透性,为后期开采提供了良好的地浸条件。

6 岩石学特征与铀成矿作用的关系浅析

通过显微镜下鉴定及扫描电镜、XRD、电子探针等分析测试手段研究发现,纳岭沟铀矿床含矿目的层直罗组下段下亚段砂岩与该地区后期的铀成矿作用有着密切的联系。首先,目的层砂体多疏松多孔,连通性、渗透性好,为铀成矿及后期改造提供了非常优越的流体通道。砂岩中含有丰富的黄铁矿、炭屑等还原性物质,为富铀氧化流体卸载沉淀铀提供还原剂,有利于铀富集。现今发现的经二次还原的绿色砂岩中的炭屑、黄铁矿的含量很低,而还原带的原生灰色砂岩中残留较多炭屑和黄铁矿(李西得等,2015;王贵等2015),这也是现今绿色砂岩是曾经经历过较强氧化作用而使还原物质消耗殆尽的有力证据。

另一方面,延安组成煤早期产生的腐殖酸为大量高岭石形成提供了条件,并使介质呈氧化性、酸性为铀的迁移和预富集提供了条件。随着成岩和

成煤作用的推进, O_2 来源减少, NH_3 和 H_2S 的产生使得地层逐渐向碱性、还原性过渡(樊爱萍,2007),有利于铀的富集。其中主要的黏土矿物类型为蒙脱石,蒙脱石表面积远大于高岭石(樊爱萍,2007;易超2014),对铀的吸附作用较强,有利于铀的富集,这也是后期在填隙物中形成大量散点状和团块的铀矿物的原因之一。另外,蒙脱石、高岭石、伊利石三者之间还存在着互相转化的关系,富 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 流体使高岭石、伊利石向蒙皂石大量转化,而部分蒙脱石又向绿泥石转化;大量的黑云母发生绿泥石化;伊利石在 K^+ 离子增加、 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 离子流失的情况向绢云母转化,并有少量白云母生成,因此矿物之间的物质交换为铀矿化提供了物质基础及富集环境。成岩过程中,长石、石英岩岩屑、硅质岩岩屑的溶蚀,以及黏土矿物物质交换中释放出来的硅,为铀石的形成提供了物质基础,后期富铀氧化热流体使部分黑云母蚀变,析出的铁质和钛质,加之黑云母形成时残留的铁质和钛质为钍铀矿的形成提供了物质基础。所以在热流体改造成矿阶段形成了铀石、钍铀矿、钛铁矿、锐钛矿、硒铅矿等矿物。

综上,纳岭沟矿床铀成矿作用具有复杂多期成因的特征,很可能是在古层间氧化带成矿的基础上(李金宝等,2006;李西得,2012;易超等,2015),叠加了后期热流体的改造作用,使矿体进一步叠加富集形成了现今的富大矿床。

7 结论

通过显微镜下鉴定和扫描电镜、XRD、电子探针等分析测试手段研究纳岭沟铀矿床含矿目的层直罗组下段下亚段砂岩岩石学特征及铀矿物的存在形式,得出以下结论:

(1)纳岭沟铀矿床直罗组下段下亚段砂岩以长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩为主,成分成熟度和结构成熟度均较低,具有近物源沉积的特点。蚀变现象反映出多期次、多类型热流体作用的特点。

(2)纳岭沟铀矿床铀矿物主要类型为铀石,含部分沥青铀矿和少量钍铀矿,铀矿物分布状态主要为单颗粒状态分布在填隙物中、散点状或团块状分布在填隙物中、条带或环带状分布在碎屑颗粒边缘,受黏土矿物吸附作用影响。

(3)纳岭沟铀矿床铀成矿是受古层间氧化带控

制,叠加后期热流体改造成矿作用影响的结果。

致谢:审稿专家及责任编辑对论文提出了宝贵修改意见,在此一并致以诚挚的谢意!

References

- Bonnetti C, Cuney M, Michels R, Truche L, Malartre F, Xiaodong Liu, Jianxing Yang. 2015. The multiple roles of sulfate-reducing bacteria and Fe-Ti oxides in the genesis of the Bayinwula roll front-type uranium deposit, Erlan Basin, NE China[J]. *Economic Geology*, 110(4):1059-1081.
- Cai Y, Zhang Jindai, Li Ziyang, Guo Qingyin, Song Jiye, Fan Honghai, Liu Wusheng, Qi Fucheng, Zhang Minglin. 2015. Outline of uranium resources characteristics and metallogenetic regularity in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(3): 918-937.
- Chang Lihua. 2006. Manual for Identification of Transparent Mineral Sheet[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Dai Mingjian, Peng Yunbiao, Miao Aisheng. 2013. Main controlling factors and prospecting criteria of uranium mineralization in the niling gully uranium deposit[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 33 (Supp.): 201-202.
- Ding Chao, Chen Gang, Guo Lan, Zhan Wenlong, Shi Xiaolin, Xu Xiaogang, Liu teng. 2016. Differential uplift on the northeast margin of Ordos Basin: Evidence from apatite fission track analysis[J]. *Geology in China*, 43(4): 1238-1247 (in Chinese with English abstract).
- Ding Wanlie. 2003. Geochemical properties of the green alteration zone and its prospecting significance[J]. *Uranium Geology*, 19(5): 277-282.
- Fan Aiping. 2007. Metallogenic Constraints of the Jurassic Diagenesis in the Dongsheng Uranium Mining Area, Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University (in Chinese with English abstract).
- Feng Zengshao. 1993. *Sedimentary Petrology (Second Edition)* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese with English abstract).
- He Zixin. 2003. *Evolution of the Ordos Basin and Its Petroleum*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese with English abstract).
- He Xiaoyuan, Liu Chiyang, Wang Jianqiang, Zhao Hongge, Wang Feifei. 2011. The late Paleozoic paleogeographic[J]. *Paleogeography of the Ordos Basin*, 13(6): 677-686.
- Hu Yuanxian, Li Sitian, Yang Shigong. 1989. Sedimentation of shallow lacustrine deltas and coal accumulation of Jurassic Yan An formation, northeastern ordos basin, China[J]. *Earth Science*, 14 (4): 379-390 (in Chinese with English abstract).
- Jiao Yangquan, Wu Liqun, Peng Yunbiao, Rong Hui, Ji Dongmin, Miao Aisheng, Li Hongliang. 2015. Sedimentary structure background analysis of sedimentary uranium deposits in northern China's paleo Asian tectonic domain[J]. *Earth Science Frontiers*, 22 (1): 189-205.
- Li Jinbao, Che Ming, Li Xin, Li Jihong, Li Rongxi. 2006. Study on the mineralization of Dongsheng uranium deposit in the Ordos Basin[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 28(2): 38-40 (in Chinese with English abstract).
- Li Rongxi, Duan Lizhi, Chen Baoyun, Zhang Shaoni. 2011. Alteration and Metallogeny on the oxidic-acid/anoxic-alkali interface of the Dongsheng uranium deposit in Northern Ordos Basin[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 35(4): 525-532 (in Chinese with English abstract).
- Li Xide. 2014. Exploration of uranium ore prospecting in the North Eastern Ordos basin[J]. *Geology of Deposit*, 33(Supp.): 861-862.
- Li Xide, Gao Hewei, Yi Chao. 2015. Characteristic of green sandstone in different alteration zone in Nalinggou uranium deposit of northeastern Ordos Basin[J]. *Uranium Geology*, 31(Supp.): 267-272 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhixue. 2014. The Shale Gas Accumulation and Resource Potential Evaluation of Yan'an Formation in Central and Southern Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (in Chinese with English abstract).
- Li Ziyang, Chen Anping, Fang Xiheng, Ou Guangxi, Zhang Ke, Jiao Yangquan, Xia Yuliang, Chen Fazheng, Zhou Wenbin, Liu Zhonghou, Wu Rengui, Xiao Xinjian, SunYe. 2006. Metallogenic mechanism and model of sandstone type uranium deposit in northeastern Ordos Basin[J]. *Mineral Deposits*, 25(Supp.): 245-248.
- Lin Tong, Luo Jinglan, Liu Xiaohong, Zhang San. 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): 72-78.
- Liu Yuxiang, Meng Cai, Han Jilei, Zhu Chuanzhen, Wang Yuwei, Zhao Hui, Cao Gaoshe. 2015. Characteristic of lithofacies paleogeography during Paleogene-Neogene in the area of North China platform[J]. *Geology in China*, 42(4): 1058-1067 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chiyang, Zhao Hongge, GuiXiaojun, Yue Leping, Zhao Junfeng, Wang Jianqiang. 2006. Space-time oordinate of the volution and eformation and mineralization response in Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(5): 617-638 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hanbin, Li Ziyang, Qin Mingkuan, Sun Ye, Han Juan, Jin Guishan, Li Junjie. 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).
- Ren Zhanli, Zhang Sheng, Gao Shengli, Cui Xueping, Liu Xinshe. 2006. Research on region of maturation anomaly and formation time in Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(5): 674-684 (in Chinese with English abstract).
- Tian Zaiyi. 1996. *Petroliferous Sedimentary Basin in China and Basin Analysis*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- Wang Dongdong. 2012. Sequence- Palaeogeography and Coal- Accumulation of the Middle Jurassic Yan 'an Formation in Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (in Chinese with English abstract).
- Wang Gui. 2015. Petrogeochemical characteristics of Nalinggou uranium deposit, Ordos Basin[J]. Uranium Geology, 31(Supp.): 273-282.
- Wang Hongqiang. 2001. Tectonic Stress field Characteristics and Its Transition Laws and Tectonic- Sedimentary Framework in Mesozoic Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University (in Chinese with English abstract).
- Wang Xingxin. 1998. The effect of basin formation and evolution on clay mineral composition and distribution of mudstone[J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), (3): 154-158 (in Chinese with English abstract).
- Wu Ying. 2009. Optics and micro- shape characters in the process of biotite transforming to chlorite[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 35(10): 5-7 (in Chinese with English abstract).
- Wu Zhaojian, Han Xiaozhong, Yi Chao, Qi Caiji, Hui Xiaochao, Wang Mingtai. 2013. Analysis in Dongsheng Basin Erdos Zhiluo Formation sandstone geochemical characteristics and provenance[J]. Geoscience, 27(3): 557-567.
- Xiao Xinjian. 2004. The Mineralization Geochemistry of the Low Temperature Fluid on the Dongsheng Sandstone Type Uranium Deposit[D]. Beijing Research Institute of Nuclear Industry (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhe, Wu Rengui, Cai Jianfang, Yu Dajin, Gong Wenjie, Ning Jun. 2010. Application of alpha track etching in research of sandstone- type uranium ore——case of study in sandstone type uranium deposit of Tongliao area[J]. Journal of China Institute of Technology, 33(1): 9-14 (in Chinese with English abstract).
- Xiang Weidong, Chen Xiaolin, Pang Yaqing, Fang Xiyan, Li Tiangang. 2006. Geochemical characteristics and genesis of gray green altered sandstone in Dongsheng uranium deposit[J]. Mineral Deposits. 25(Supp.): 261-264.
- Xiang Weidong, Fang Xiheng, Chen Xiaolin, Chen Xiaolin, Pang Yangqing, Chen Huahan. 2006. Metallogenic characteristics and metallogenic model of the Dongsheng Uranium Deposit in the Ordos Basin[J]. Uranium Geology, 22(5): 257-266.
- Xue Chunji, Chi Guoxiang, Xue Wei. 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(1): 134-142 (in Chinese with English abstract).
- Xue Wei, Xue Chunji, Chi Guoxiang, Peng Yunbiao, Wang Kai. 2010. The geochemical characteristics of trace and rare earth elements in Dongsheng sandstone type uranium deposit[J]. Geoscience, 24(4): 776-784.
- Yang Junjie. 2002. Structural Evolution and Distribution of Oil and Gas of Ordos Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese with English abstract).
- Yi Chao, Han Xiaozhong, Li Xide, Zhang Kang, Chen Xinlu. 2014. Study on sandstone petrologic feature of 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).
- Yi Chao, Gao Hwei, Li Xide, Zhang Kang, Chen Xinlu, Li Jingxian. 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).
- Zhang Fuxin, Qiao Haiming, Jia Heng. 2006. The metallogenic condition and epigenetic alteration mineralization of Dongsheng Uranium Deposit in the Inner Mongolia[J]. Acta Geologica Sinica, 80(5): 733-739 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xin, Nie Fengjun, Zhang Chengyong, Zhang Hujun, Dong Fangsheng, Dong Yadong, Lu Yayun. 2015. Study on the occurrence state of Yili Basin from sandstone type uranium deposit in Gurgaon[J]. Science Technology and Engineering, 15(33): 18-23.
- Zhao Fengmin, Chen Zhangru, Zhang Jingyi. 1988. The Systematic Identification of Uranium Minerals[M]. Beijing: Atomic Press (in Chinese with English abstract).
- Zhao Junfeng, Liu Chiyang, Yu Lin, Wang Xiaomei. 2008. Mesozoic sedimentary and accumulative center migration and geological significance in the Ordos Basin and its geological significance[J]. Acta Geologica Sinica, 82(4): 540-552(in Chinese with English abstract).
- Zhong Jun, Fan Honghai, Gu Dazhao, Wang Shengyun, Chen Jinyong, Shi Changhao, Li Hengqiang. 2016. Major and trace element migration and metallogenic processes of the Xinshuijing U- Th deposit in the Longshoushan metallogenic belt, Gansu Province[J]. Geology in China, 43(4): 1393-1408 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xiaojing, Li Anchun, Wan Shiming, Meng Qingyong. 2010. Clay minerals in surficial sediments of the East China Sea Shelf: Distribution and provenance[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 41(5): 667-675 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xiyang, Wang Yunliang, Wang Zhichang, Zhang Chengjiang, Liu Jianhua. 2003. The geochemical characteristics of trace elements of sandstone type uranium deposits in Dongsheng[J]. Geology- Geochemistry, 31(2): 39-45.

附中文参考文献

- 常丽华. 2006. 透明矿物薄片鉴定手册[M]. 北京: 地质出版社.
- 北京大学地质学系岩矿教研室. 1979. 光性矿物学[M]. 北京: 地质出版社.
- 戴明建, 彭云彪, 苗爱生. 2013. 纳岭沟铀矿床铀成矿主要控制因素与找矿标志[J]. 矿物学报, 33(增刊): 201-202.
- 丁超, 陈刚, 郭兰, 师晓林, 徐小刚, 刘腾. 2016. 鄂尔多斯盆地东北部

- 差异隆升过程裂变径迹分析[J]. 中国地质, 43(4): 1238-1247.
- 丁万烈. 2003. 绿色蚀变带的地球化学性质及其找矿意义探讨[J]. 铀矿地质, 19(5): 277-282.
- 樊爱萍. 2007. 鄂尔多斯盆地东胜铀矿区侏罗系成岩作用的成矿约束[D]. 西安: 西北大学.
- 冯增昭. 1993. 沉积岩石学(第二版). 北京: 石油工业出版社.
- 何自新. 2003. 鄂尔多斯盆地演化与油气[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 贺小元, 刘池阳, 王建强, 赵红格, 王飞飞. 2011. 鄂尔多斯盆地晚古生代古构造[J]. 古地理学报, 13(6): 677-686.
- 胡元现, 李思田, 杨士恭. 1989. 鄂尔多斯盆地东北缘神木地区浅湖三角洲沉积作用及煤聚集[J]. 地球科学, 14(4): 379-390.
- 焦养泉, 吴立群, 彭云彪, 荣辉, 季东民, 苗爱生, 里宏亮. 2015. 中国北方古亚洲构造域中沉积型铀矿形成发育的沉积-构造背景综合分析[J]. 地学前缘, 22(1): 189-205.
- 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): 38-40.
- 李荣西, 段立志, 陈宝贤, 张少妮. 2011. 东胜砂岩型铀矿氧化酸性流体与还原碱性热液流体过渡界面蚀变带成矿作用研究[J]. 大地构造与成矿学, 35(4): 525-532.
- 李西得. 2014. 鄂尔多斯盆地东北部铀矿找矿方向探讨[J]. 矿床地质, 33(增刊): 861-862.
- 李西得, 高贺伟, 易超. 2015. 鄂尔多斯盆地东北部纳岭沟铀矿床不同蚀变带绿色砂岩特征[J]. 铀矿地质, 31(增刊): 267-272.
- 李智学. 2014. 鄂尔多斯盆地中南部延安组页岩气成藏规律与潜力评价[D]. 中国矿业大学(北京).
- 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.
- 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): 72-78.
- 林玉祥, 孟彩, 韩继雷, 朱传真, 王玉伟, 赵慧, 曹高社. 2015. 华北地台区古近纪一新近纪岩相古地理特征[J]. 中国地质, 42(4): 1058-1067.
- 刘池洋, 赵红格, 桂小军, 岳乐平, 赵俊峰, 王建强. 2006. 鄂尔多斯盆地演化-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, 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): 139-146.
- 任战利, 张盛, 高胜利, 崔军平, 刘新社. 2006. 鄂尔多斯盆地热演化程度异常分布区及形成时期探讨[J]. 地质学报, 80(5): 674-684.
- 田在艺. 1996. 中国含油气沉积盆地论[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 王东东. 2012. 鄂尔多斯盆地中侏罗世延安组层序——古地理与聚煤规律[D]. 中国矿业大学(北京).
- 王贵. 2015. 鄂尔多斯盆地纳岭沟铀矿床(化)体岩石地球化学特征[J]. 铀矿地质, 31(增刊): 273-282.
- 王宏强. 2001. 鄂尔多斯中生代盆地构造应力场特征及其转换与沉积-构造格局[D]. 西安: 西北大学.
- 王行信. 1998. 盆地形成演化对粘土矿物组成和分布的影响[J]. 中国海上油气:地质, (3): 154-158.
- 伍英. 2009. 黑云母向绿泥石化过程中微观形态及光性特征[J]. 内蒙古石油化工, 35(10): 5-7.
- 吴兆剑, 韩效忠, 易超, 祁才吉, 惠小朝, 王明太. 2013. 鄂尔多斯盆地东胜地区直罗组砂岩的地球化学特征与物源分析[J]. 现代地质, 27(3): 557-567.
- 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[D]. 核工业北京地质研究院.
- 徐喆, 吴仁贵, 蔡建芳, 余达淦, 宫文杰, 宁君. 2010. α 径迹蚀刻方法在砂岩型铀矿研究中的应用——以通辽地区砂岩铀矿为例[J]. 东华理工大学学报: 自然科学版, 33(1): 9-14.
- 向伟东, 陈晓林, 庞雅庆, 方锡珩, 李田港. 2006. 东胜铀矿床灰绿色蚀变砂岩矿物地球化学特征及其成因探讨[J]. 矿床地质, 25(增刊): 261-264.
- 向伟东, 方锡珩, 李田港, 陈晓林, 庞雅庆, 程华汉. 2006. 鄂尔多斯盆地东胜铀矿床成矿特征与成矿模式[J]. 铀矿地质, 22(5): 257-266.
- 薛春纪, 池国祥, 薛伟. 2010. 鄂尔多斯盆地砂岩型铀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(1): 134-142.
- 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. 2002. 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.
- 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): 185-197.
- 易超, 高贺伟, 李西得, 张康, 陈心路, 李静贤. 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.
- 张复新, 乔海明, 贾恒. 2006. 内蒙古东胜砂岩型铀矿床形成条件与成矿作用[J]. 地质学报, 80(5): 733-739.
- 张鑫, 聂逢君, 张成勇, 张虎军, 董方升, 董亚栋, 卢亚运. 2015. 伊犁盆地蒙古矿床砂岩型铀矿赋存状态研究[J]. 科学技术与工程, 15(33): 18-23.
- 赵凤民, 陈璋如, 张静宜. 1998. 铀矿物鉴定手册[M]. 北京: 原子能出版社.
- 钟军, 范洪海, 顾大钊, 王生云, 陈金勇, 史长昊, 李恒强. 2016. 甘肃龙首山成矿带新水井铀(钍)矿床元素迁移规律及成矿作用过程研究[J]. 中国地质, 43(4): 1393-1408.
- 赵俊峰, 刘池洋, 喻林, 王晓梅. 2008. 鄂尔多斯盆地中生代沉积和堆积中心迁移及其地质意义[J]. 地质学报, 82(4): 540-552.
- 周晓静, 李安春, 万世明, 孟庆勇. 2010. 东海陆架表层沉积物粘土矿物组成分布特征及来源[J]. 海洋与湖沼, 41(5): 667-675.
- 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]. 地质地球化学, 31(2): 39-45.