

doi:10.3799/dqkx.2016.021

鄂尔多斯盆地罕台庙地区铀储层非均质性 定量评价指标体系

谢惠丽¹, 吴立群^{1*}, 焦养泉¹, 荣辉¹, 汪洪强²

1. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中海油研究总院, 北京 100027

摘要: 铀储层非均质性在铀成矿作用过程中发挥着重要作用, 但人们对鄂尔多斯盆地罕台庙地区铀储层非均质性研究未见深入。该地区铀储层通过平面编图和统计分析, 结果表明铀储层的砂体厚度、含砂率、砂岩粒度、泥质隔挡层数量、累积厚度、原始有机碳含量等参数能定量表征铀储层砂体的非均质性, 沿辫状分流河道砂体中心轴线地区, 铀储层非均质性较弱; 而位于砂体中心轴线两侧边缘和下游地区, 铀储层非均质性增强。系统的定量非均质性参数与铀矿化信息的比较结果表明, 可以将铀储层非均质性分为Ⅰ类(弱)、Ⅱ类(中等)和Ⅲ类(强), 其中Ⅱ类铀储层的铀矿化最为活跃, 以此为基础建立了由多参数综合评判的铀储层非均质性分级定量评价指标体系。以往定性的研究表明, 铀储层非均质性既制约铀成矿过程也影响地浸采铀过程, 如今定量分级评价指标体系的建立, 将能够更准确地预测铀成矿靶区和优化地浸采铀工程部署, 提高勘查和采铀效率。

关键词: 砂岩型铀矿; 铀储层非均质性; 指标体系; 直罗组; 鄂尔多斯盆地; 矿床地质。

中图分类号: P619.14

文章编号: 1000-2383(2016)02-0279-14

收稿日期: 2015-08-24

The Quantitative Evaluation Index System for Uranium Reservoir Heterogeneity in Hantaimiao Region, Ordos Basin

Xie Huili¹, Wu Liquan^{1*}, Jiao Yangquan¹, Rong Hui¹, Wang Hongqiang²

1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of the Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China

Abstract: Uranium reservoir heterogeneity plays an important role in the process of uranium mineralization. However, people have not been recognized and need further study on the uranium reservoir heterogeneity of Hantaimiao region in Ordos Basin. By plane mapping and statistical analysis of quantitative heterogeneity parameters in study area, it shows that the heterogeneity of uranium reservoir sand body can be quantitatively characterized by sandstone thickness, sandstone percentage, sandstone grain size, number and cumulative thickness of clay isolated barrier beds, and original organic carbon content. It is found that uranium reservoir heterogeneity is weak at the central axis area of braided distributary channel sand body; and becomes strong at the both edges of the central axis area of sand body and the downstream area. Through the comprehensive analysis of the relationship between quantitative heterogeneity parameters and uranium mineralization information, uranium reservoir heterogeneity is divided into class I (weak), class II (medium) and class III (strong). The uranium mineralization in class II reservoirs is the most active. And the quantitative evaluation index system for uranium reservoir heterogeneity, which is comprehensively evaluated by multi parameters, is established ultimately. It is generally held in previous qualitative research that uranium reservoir heterogeneity controls uranium mineralization process and also affects the in-situ leaching uranium process. This quantitative evaluation index system will be able to predict more accurately the uranium target area and to optimize the project deployment.

基金项目: 中国核工业地质局高校科技攻关项目(Nos.201150, 201409); 国土资源部铀矿整装勘查综合研究项目(No.12120114076501); “构造与油气资源”教育部重点实验室开放课题(No.TPR-2013-11)。

作者简介: 谢惠丽(1988—), 女, 博士研究生, 主要从事沉积学和铀矿地质学方面研究。E-mail: xiehuili999@163.com

*** 通讯作者:** 吴立群, E-mail: 176781317@qq.com

引用格式: 谢惠丽, 吴立群, 焦养泉, 等, 2016. 鄂尔多斯盆地罕台庙地区铀储层非均质性定量评价指标体系. 地球科学, 41(2): 279-292.

ment of in-situ leaching uranium, improving the efficiency of the exploration and mining of uranium.

Key words: sandstone-type uranium; uranium reservoir heterogeneity; index system; Zhiluo Formation; Ordos basin; ore deposit geology.

0 引言

储层非均质性的研究最早应用于油气储层,其研究对于揭示油气藏分布规律和提高剩余油采收率具有重要意义(Pettijohn *et al.*, 1973; Miall, 1985, 1996; Weber, 1986; 裴亦楠, 1987; Lucia and Fogg, 1990; 杨少春, 2000; 毛志强, 2003; 汪立君和陈新军, 2003; 于兴河, 2008; 罗静兰等, 2014). 焦养泉等(2006)将此概念借鉴于砂岩型铀矿的研究,并提出了砂岩型铀矿储层(简称铀储层)的概念. 铀储层是砂岩型铀矿形成过程中能提供铀成矿流体运移和铀矿储存的空间(骨架砂体),其非均质性表现为砂体空间上的形态变化和内部各种沉积特性的不均一性. 铀储层非均质性研究对于深刻理解铀成矿作用过程具有重要意义,因为它作为多孔介质通过控制铀成矿流场的基本格局,进而制约铀储层内部层间氧化带的形成发育,最终实现对铀成矿的制约. 同样,铀储层非均质性研究对于提高地浸采铀效率也至关重要,因为地浸采铀是铀成矿的逆反应. 以往,关于铀储层非均质性的研究总体处于定性描述分析

阶段,研究方法和表征指标较为单一(焦养泉等, 2005b, 2012; 鲁超, 2011; 易超等, 2013). 本文旨在前期研究基础上,系统采集能表征铀储层非均质性的各种参数并进行定量评价,通过与铀矿化信息比较,建立由多参数综合评判的非均质性分级定量评价指标体系. 主要目的在于深入揭示铀储层非均质性的控矿机理,准确预测铀成矿靶区和指导优化地浸采铀工程部署,提高勘查和采铀效率.

鄂尔多斯盆地是我国中部重要的铀矿产地,特别是近十余年在盆地北部的直罗组中,先后发现了皂火壕铀矿床、罕台庙铀矿床、柴登铀矿产地、纳岭沟铀矿床和大营铀矿床(图 1),引起了众人的瞩目. 由于这些矿床比较集中地分布于一个大型的沉积朵体中,而且其成因具有相似性(古层间氧化带砂岩型铀矿床; Jiao *et al.*, 2005a; 彭云彪等, 2006; 苗爱生等, 2009, 2010; 李子颖等, 2009),所以可以将这些铀矿床称为东胜铀矿田(焦养泉等, 2015). 比较而言,铀储层非均质性对东胜铀矿田的成矿过程具有重要影响(焦养泉等, 2005a),但是由于罕台庙铀矿床位于大型辫状分流河道砂体与分流间湾的过渡

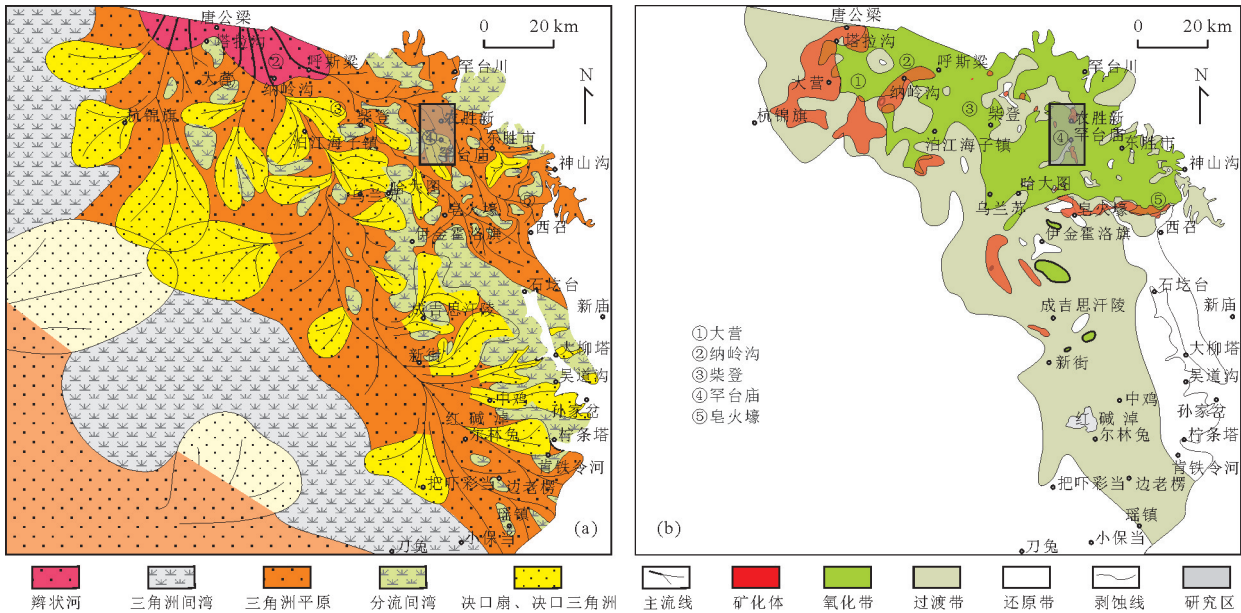


图 1 鄂尔多斯盆地北部直罗组下段下亚段沉积体系与区域铀成矿关系及研究区位置

Fig.1 Geographical location and the relationship between depositional system and uranium mineralization of J_2z^{1-1} in the eastern Ordos basin

a. 沉积体系域图; b. 古层间氧化带与铀矿化叠合图

区域(图 1),非均质性强,研究程度低,因此成为本文剖析的研究对象。

1 铀储层非均质性定量评价指标

评价铀储层非均质性的参数依研究目标的不同而不同,在露头上人们比较注重于追踪沉积界面的变化及其岩性岩相的变异(Miall,1988;Jiao *et al.*, 2005b),而对于井下铀储层评价则可以从外部形态和内部结构两个方面加以定量表述.应用钻孔信息,在平面上展示铀储层的非均质性.系统性的比较分析结果表明,表征铀储层外部形态不均一性的最佳定量参数是铀储层砂体厚度和含砂率,表征铀储层内部结构非均质性的定量参数可以包括铀储层砂岩粒度、泥质隔挡层(焦养泉和李祯,1995)数量、累积厚度、原始有机碳含量(Landais,1996)等。

1.1 铀储层外部形态非均质性定量评价指标

在研究区,通过对 117 口钻孔的统计,笔者发现研究区铀储层砂体厚度分布在 0~80 m 范围内,其中 20~60 m 厚度的铀储层占钻孔总数的 93.16%,而厚度为 30~50 m 的铀储层占统计钻孔的 65.81%

(图 2a);从含砂率的角度看,低于 60%的含砂率仅占统计钻孔的 2.56%,而 97.44%的钻孔含砂率为 60%~100%(图 2b);两个参数之间具有良好的线性正相关性($y=0.6025x+58.567$)(图 2c)。

从表征铀储层外部几何形态参数的平面图中可以看到,直罗组下段下亚段铀储层砂体厚度和含砂率的平面非均质性较为突出(图 2d 和 2e).铀储层砂体总体沿 NW-SE-SSE 方向延伸,并向 NE、SW 方向频繁分岔.其与古水流线大致平行、沿铀储层砂体中心轴线地区的砂体分布稳定、厚度大(50~70 m)、宽度大(7.5~13.0 km)、含砂率高(90%~100%),而位于铀储层砂体中心轴线的两侧地区,砂体厚度和含砂率迅速降低,砂体厚度<30 m,含砂率<60%.而这种现象同样体现于沉积剖面图中(图 3a 和 3b),沿铀储层砂体中心轴线方向的 A-A'剖面较之于近于垂直的 B-B'剖面而言,其砂体厚度和含砂率普遍较高(图 3c),A-A'剖面铀储层砂体平均厚度及含砂率分别为 45.31 m 和 87.95%,而 B-B'剖面分别为 38.98 m 和 77.94%。

笔者进一步计算了 A-A'和 B-B'剖面砂体厚度和含砂率的劳伦兹变异系数(V_k)(严科等,2008;朱

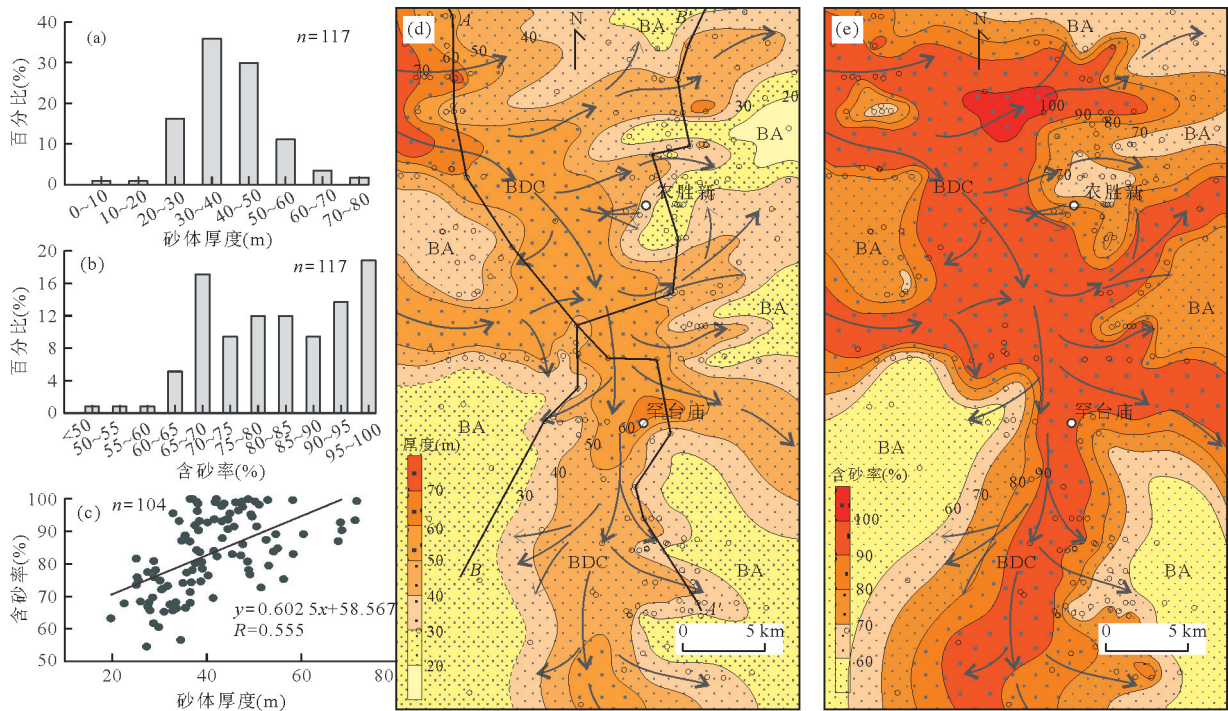


图 2 罕台庙地区直罗组下段下亚段铀储层外部几何形态非均质性定量评价指标参数分布特征

Fig.2 The distribution characteristics of quantitative evaluation index parameters for geometrical morphology heterogeneity of uranium reservoir of J₂ z¹⁻¹ in Hantaimiao region

a.铀储层砂体厚度频率统计;b.含砂率频率统计;c.铀储层砂体厚度与含砂率相关性;d.铀储层砂体厚度平面分布;e.含砂率平面分布;BDC.主干辫状分流河道砂体;BA.分流间湾沉积;箭头方向代表主流线方向

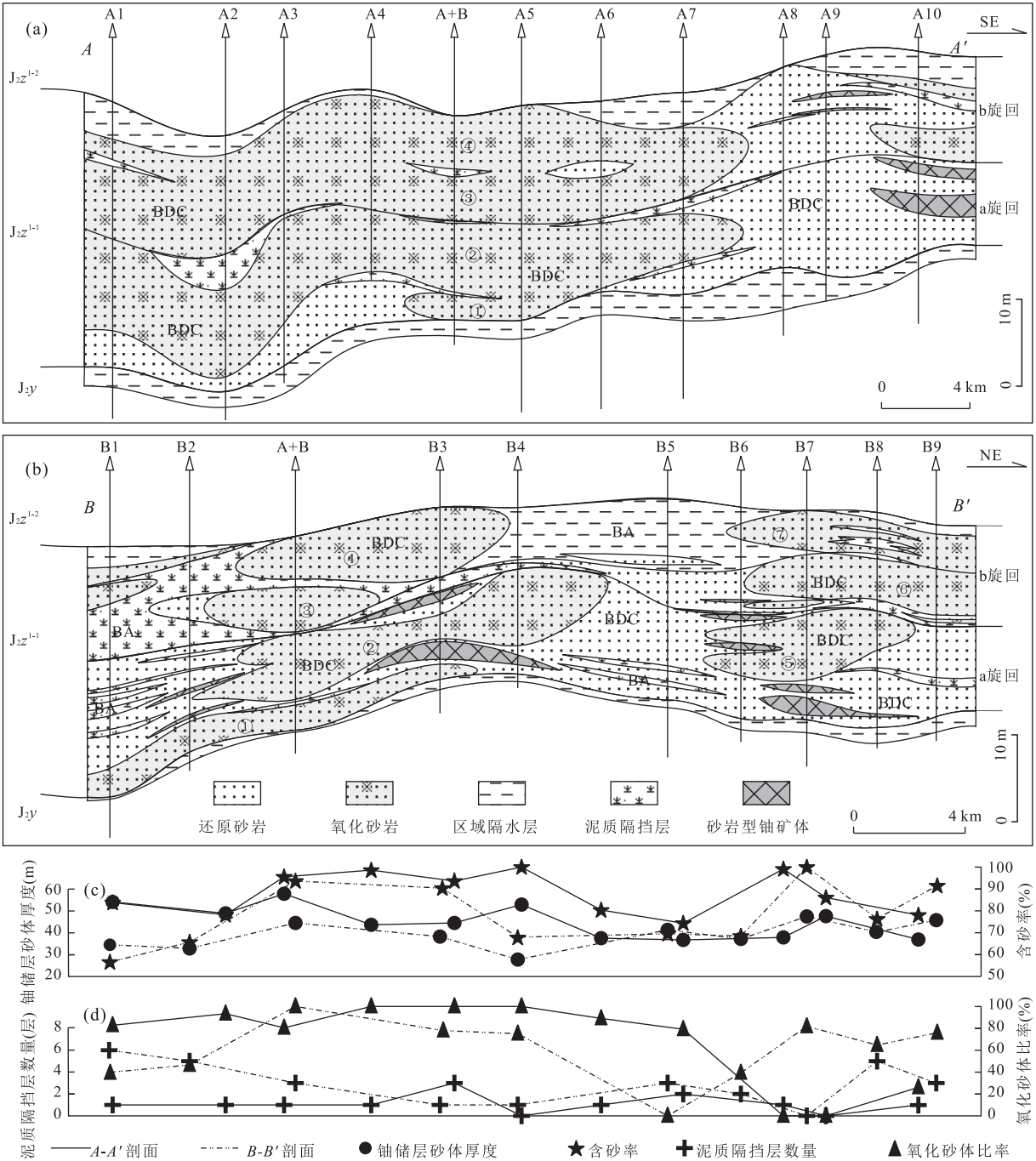


图 3 罕台庙地区直罗组下段下亚段铀储层沉积剖面图及其非均质性参数的变化特征

Fig.3 Sediment profile and the changes on heterogeneity parameters of uranium reservoir of J_2z^{1-1} in Hantaimiao region

a.沿辫状分流河道砂体中心轴线方向展布的 A-A'剖面,辫状分流河道砂体连续,稳定性好,相对缺乏分流间湾沉积,可识别出 a 旋回和 b 旋回,由①~④个相互连通的成矿流体单元构成了大规模的古层间氧化带;b.垂直于辫状分流河道砂体中心轴线方向展布的 B-B'剖面,辫状分流河道砂体旋回性增强,两侧相变为分流间湾,显示辫状分流河道砂体稳定性变差,非均质性增强,其内部似乎由①~⑦个成矿流体单元构成了多个古层间氧化带(但从 A-A'剖面看,①~④实为一个成矿流体单元);c.A-A'和 B-B'剖面铀储层砂体厚度和含砂率变化特征;d.A-A'和 B-B'剖面铀储层内部泥质隔挡层数量和古氧化砂体比率变化特征;剖面线位置见图 2

小影等,2009)(图 4),以期通过定量系数来说明两方向上非均质性程度.计算得出,A-A'剖面砂体厚度和含砂率的 V_k 分别为 0.09 和 0.06(图 4a 和 4c),B-B'剖面砂体厚度和含砂率的 V_k 分别为 0.16 和

0.12(图 4b 和 4d),显然 A-A'剖面的 V_k 小于 B-B'剖面,这同样印证了沿辫状分流河道砂体中心轴线地区铀储层非均质性较弱,而位于砂体中心轴线两侧边缘和下游地区,铀储层非均质性增强.

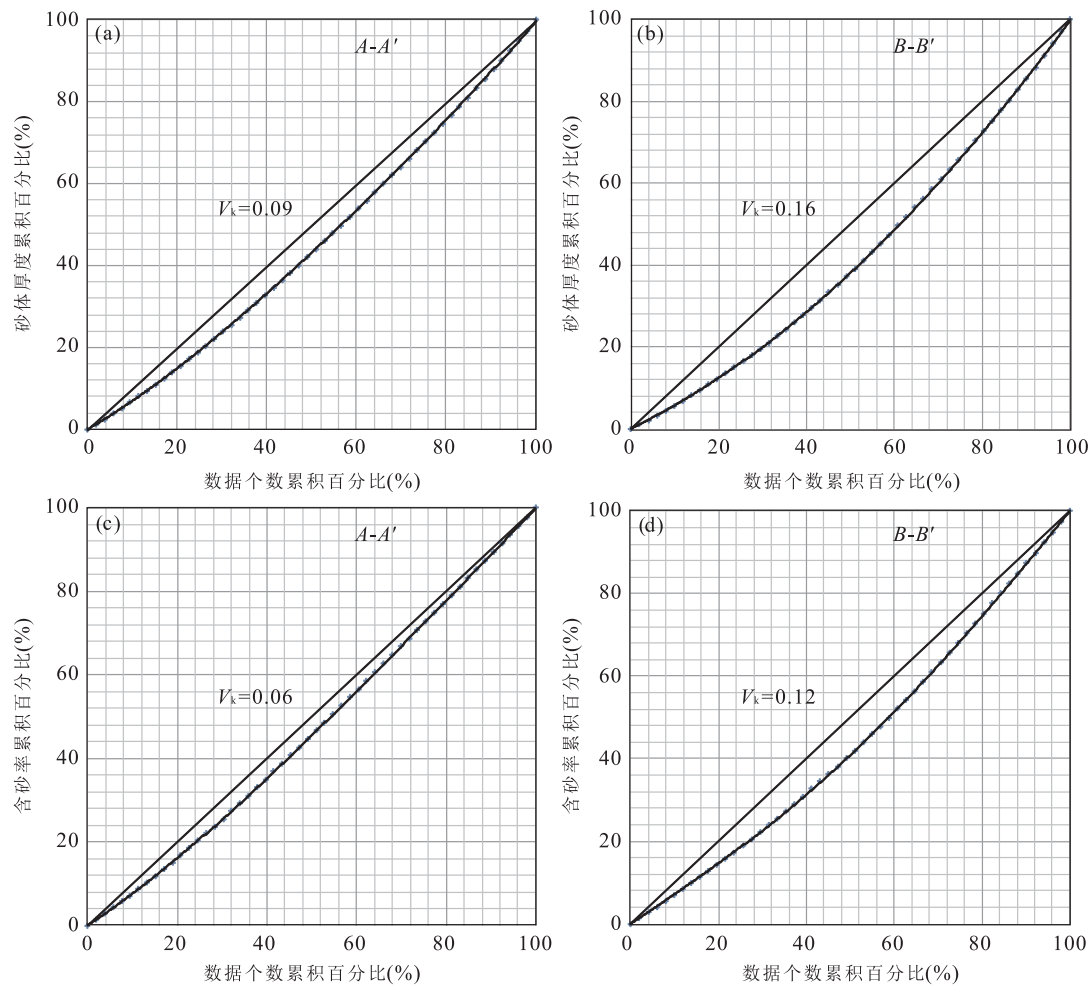


图 4 罕台庙地区直罗组下段下亚段砂体厚度和含砂率的劳伦兹曲线

Fig.4 The Lorenz curve of sandstone thickness and sandstone percentage of $J_2 z^{1-1}$ in Hantaimiao region

a.与古水流线方向大致平行的 A-A'剖面砂体厚度劳伦兹曲线;b.与古水流线方向近于垂直的 B-B'剖面砂体厚度劳伦兹曲线;c.与古水流线方向大致平行的 A-A'剖面含砂率劳伦兹曲线;d.与古水流线方向近于垂直的 B-B'剖面含砂率劳伦兹曲线

综上所述,研究区铀储层外部几何形态参数的主要特征在于砂体厚度和宽度大、含砂率高,反映了一种具有较大宽/厚比的河道及其旁侧洼地充填沉积,焦养泉等(2005a, 2006)将其解释为辫状分流河道及其分流间湾沉积,并认为辫状分流河道砂体是鄂尔多斯盆地北部较为有利的铀储层。

1.2 铀储层内部结构非均质性定量评价指标

由于沉积期古水流能量的周期性变化,导致辫状分流河道铀储层砂体内部砂岩粒度的变化、泥质隔挡层的出现以及原始有机碳含量的不均一性,因此本文应用铀储层的砂岩粒度、泥质隔挡层数量、累积厚度、原始有机碳含量等参数定量评价铀储层内部结构的非均质性。

1.2.1 铀储层砂岩粒度 从铀储层砂岩的平均粒度统计编图可知,研究区铀储层主要由中砂岩和粗

砂岩构成,其中中砂岩所占比例最大(67.52%),其次为粗砂岩(25.64%)(图 5a)。粗砂岩沿 NW-SE 方向延伸至罕台庙(图 5b),对比图 2d 和 2e 笔者发现该区域也是铀储层砂体厚度最大、含砂率较高的分布区,应该为辫状分流河道铀储层砂体上游的中心轴线地区。从该区向两侧及其向南部下游地区,铀储层砂岩粒度总体演变为中砂岩,主要发育于 30~50 m 厚的铀储层砂体中(图 5c)。详细比较砂岩粒度与砂体厚度和含砂率,笔者发现在铀储层砂体厚度减小、含砂率降低的部位,砂岩粒度发生了突变——由粗变细,非均质性增强,显示了一种古水流分岔和能量降低的相变演化过程。

1.2.2 泥质隔挡层数量和累积厚度 铀储层内部的泥质隔挡层对于解释层间氧化带的成因至关重要,这是因为它们和顶底板隔水层共同构成了成矿

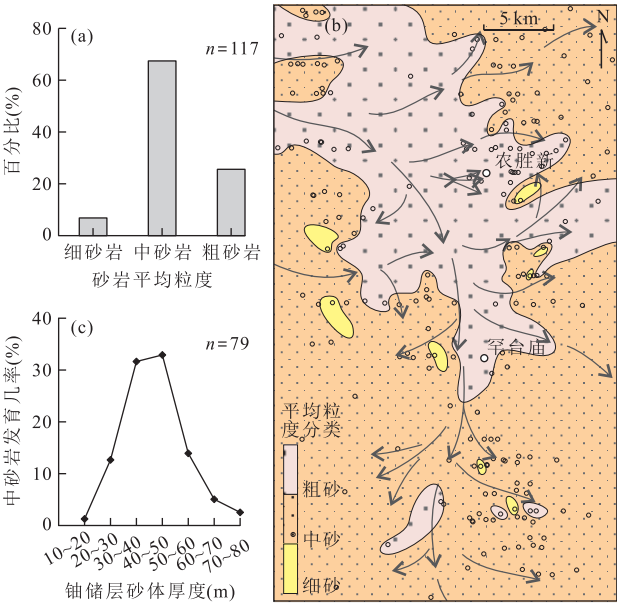


图 5 罕台庙地区直罗组下段下亚段铀储层砂岩平均粒度分布特征

Fig.5 The distribution characteristics of average grain size of uranium reservoir sandstone of J_2z^{-1} in Hantaimiao region
a.砂岩平均粒度统计;b.砂岩平均粒度平面分布;c.铀储层砂体厚度与中砂岩发育几率统计

流体流动单元的自然边界(图 3a 和 3b).焦养泉和李桢(1995)曾经针对河流和三角洲储层砂体开展过系统研究,发现储层内部泥质隔挡层的渗透率极低($0.016\times10^3\sim0.129\times10^3\mu\text{m}^2$),不及正常储层砂体的 $1/480\sim1/1\,500$,因而可以构成流体流动单元的边界.利用钻孔信息可以统计出铀储层内部泥质隔挡层的发育层数和累积厚度,以此评判铀储层内部结构的非均质性.

针对泥质隔挡层的数理统计,笔者发现研究区泥质隔挡层发育数量为 0~8 层,累积厚度为 0~20.83 m.其中,数量为 1 层,累积厚度为 0~2 m 的钻孔出现的比率最高,分别占钻孔总数的 26.50%和 24.49%.研究区 83.76%的钻孔中发育有泥质隔挡层,76.92%的钻孔中隔挡层数量为 1~4 层,60.20%钻孔隔挡层累积厚度为 0~6 m,说明该区铀储层非均质性较强.统计结果还表明,钻孔中随着泥质隔挡层数量和累积厚度的增加其所占的比率均减小,说明单个钻孔中同时出现多个泥质隔挡层的比率较小(图 6a 和 6b).泥质隔挡层数量和累积厚度之间具有较强的线性正相关性($y=0.234\,6x+0.948\,8$),相关性系数达 0.7(图 6c).进一步统计,笔者发现泥质隔挡层主要发育于 25~50 m 厚的铀储层砂体中,发育几率达 80.41%,其中 35~40 m 厚的

铀储层砂体中发育几率最高(21.65%;图 6d).

对泥质隔挡层参数的平面编图,笔者发现大致沿辫状分流河道古流线方向,铀储层内部泥质隔挡层相对不发育(数量为 0~1 层,累积厚度为 0~2 m),所导致的非均质性相对较弱,在较粗的铀储层砂岩粒度配合下可以构成较大规模的成矿流体流动单元(流体运移的高速公路),可以想象该区是古层间氧化带发育的主要空间(图 3a,图 7a 和 7b).与古流线大致垂直,在辫状分流河道中心轴线两侧边缘,铀储层内部泥质隔挡层层数迅速增多、累积厚度加大,从图 3d 可见,B-B'剖面泥质隔挡层数量(平均值为 3.5 层)明显高于 A-A'剖面(平均值为 1 层).泥质隔挡层的出现,极大地增加了铀储层的非均质性,从而导致成矿流体单元分解和规模减小,这里便成为古层间氧化带的边缘地带而有利于铀成矿(图 3b,图 7a 和 7b).

1.2.3 原始有机碳含量 原始有机碳含量是指铀储层砂体中未经成岩改造的与有机质有关的碳元素所占的比例,常用质量百分比来表示(%).铀储层砂体中原始有机碳的含量主要受含煤岩系沉积环境和沉积物组分的影响,由于有机质丰度直接制约古层间氧化带的发育,同时也是铀还原和吸附的载体(Leventhal *et al.*, 1987; Spirakis, 1996; Tuo *et al.*, 2007),所以对其空间分布规律的定量研究,既有助于认识铀储层砂体内部的非均质性,也有助于了解铀成矿机理.因此,原始有机碳含量可以作为表征铀储层内部结构非均质性的重要参数之一.

笔者有选择性地对铀储层中原生灰色砂岩的有机碳含量进行了统计分析,从而排除了古层间氧化作用所导致的有机碳消耗.平面编图(图 7c)和统计(表 1)结果表明,研究区原始有机碳含量主要分布于 0~0.4%.其中,沿辫状分流河道铀储层砂体的中心轴线地区,原始沉积的有机质少,有机碳含量低(0~0.1%),占统计钻孔数量的 25%;而位于辫状分流河道铀储层砂体两侧的边缘地区,原始沉积的有机质增多,有机碳含量增高,其中含量为 0.2%~0.4%的钻孔占统计钻孔数量的 62.5%.

与铀储层砂体厚度、含砂率、砂岩粒度、隔挡层分布规律比较来看,原始有机碳含量高值区与薄砂体、粒度较细、隔挡层较多的趋向于辫状分流河道边缘一分流间湾的沉积环境关系密切,所以有机质的非均质分布将对古层间氧化作用和铀成矿作用产生重要影响.

通过以上各种定量参数的研究,笔者发现沿辫

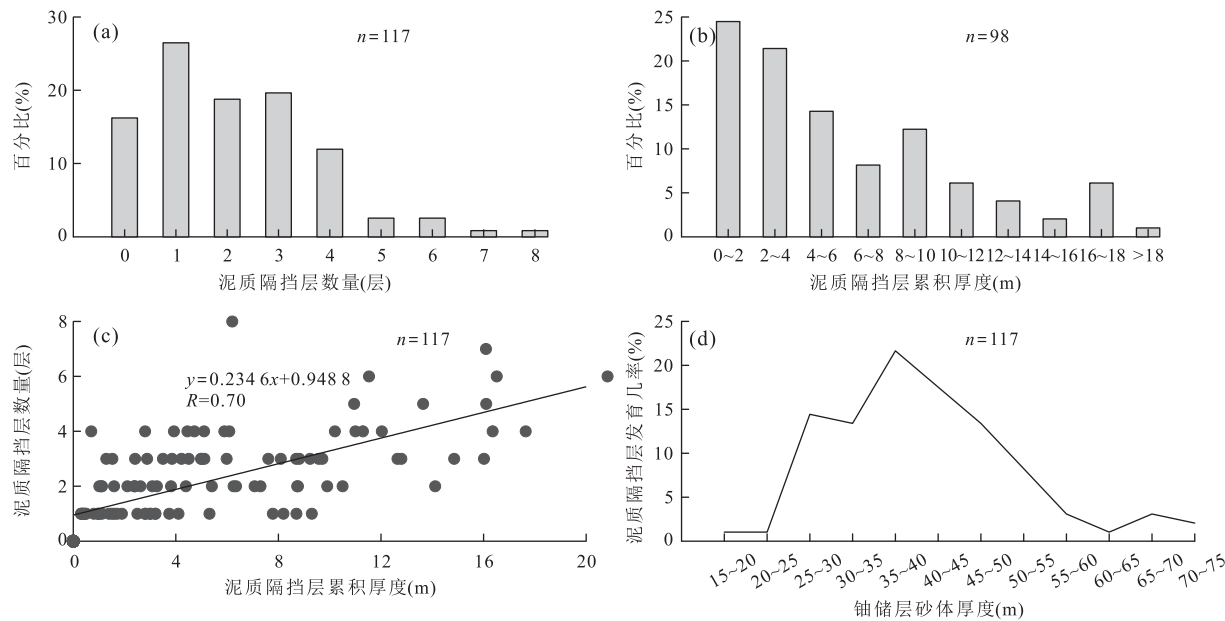


图 6 罕台庙地区直罗组下段下亚段铀储层内部泥质隔挡层发育特征统计

Fig.6 The development characteristics of clay isolated barrier beds in uranium reservoir of J₂z¹⁻¹ in Hantaimiao region
a.泥质隔挡层数量统计;b.泥质隔挡层累积厚度统计;c.泥质隔挡层数量和累积厚度相关性;d.铀储层砂体厚度与泥质隔挡层发育几率统计

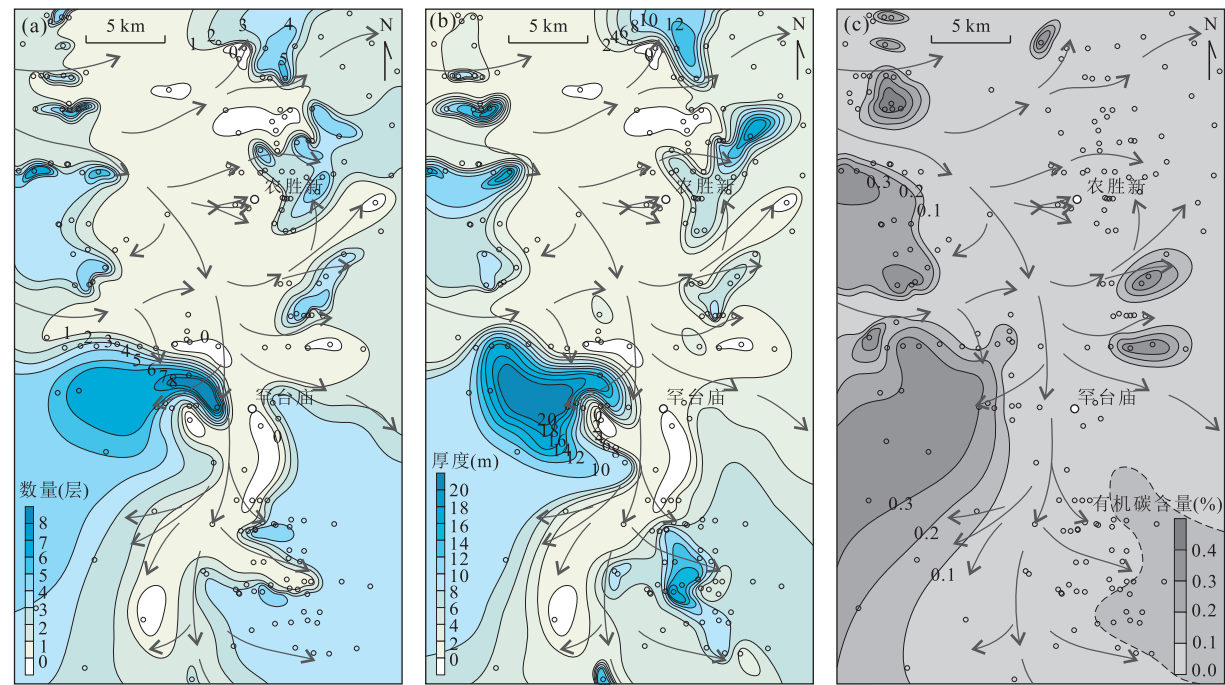


图 7 罕台庙地区直罗组下段下亚段铀储层内部结构非均质性定量评价指标参数平面分布特征

Fig.7 The plane distribution characteristics of quantitative evaluation index parameters for internal architecture heterogeneity of uranium reservoir of J₂z¹⁻¹ in Hantaimiao region

a.泥质隔挡层数量平面分布;b.泥质隔挡层累积厚度平面分布;c.原始有机碳含量平面分布;箭头方向代表主流线方向

状分流河道古流线方向铀储层砂体厚度大、含砂率高、砂岩粒度粗、泥质隔挡层不发育、原始有机碳含量低,显示铀储层砂体非均质性较弱;而垂直于辫状分流河道古流线方向铀储层砂体厚度减薄、含砂率降低、砂岩粒度变细、泥质隔挡层发育、原始有机碳含量较高,显示铀储层砂体非均质性增强.这一切说明,辫状河三角洲沉积期的沉积环境和沉积作用(包括古水流方向)导致了铀储层砂体非均质性的形成.

表 1 罕台庙地区直罗组下段下亚段铀储层内部原始有机碳含量与钻孔数量统计

Table 1 The statistical results of the original organic carbon content in uranium reservoir of $J_2 z^{1-1}$ and well number in Hantaimiao region

原始有机碳含量(%)	0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4
钻孔数(个)	8	4	8	12
百分比(%)	25.0	12.5	25.0	37.5

2 铀储层定量非均质性参数对铀成矿作用的制约

铀储层非均质性通过影响成矿流体制约层间氧化带的发育,进而控制铀成矿作用(焦养泉等,2007,2012).

2.1 定量非均质性参数与层间氧化作用的相关性

在铀储层内部,古氧化砂体的厚度和比率统计参数能够表征古层间氧化带的发育程度.在研究区,铀储层内部古氧化砂体比率及由此标定的古层间氧化带展布方向与铀储层砂体厚度和含砂率展布方向基本一致(图 2 和图 8).从图 3d 中也可以看出,沿铀储层砂体中心轴线方向的 A-A'剖面古氧化砂体比率高于与之近于垂直的 B-B'剖面,两者平均值分别为 68.27%和 60.12%.统计结果表明,古氧化砂体比率与铀储层砂体厚度和含砂率呈线性正相关,即随着铀储层砂体厚度和含砂率的增加,古层间氧化作用增强(图 9a 和 9b).

无论是平面编图信息还是统计信息均显示,古氧化砂体比率与泥质隔挡层数量和累积厚度参数呈

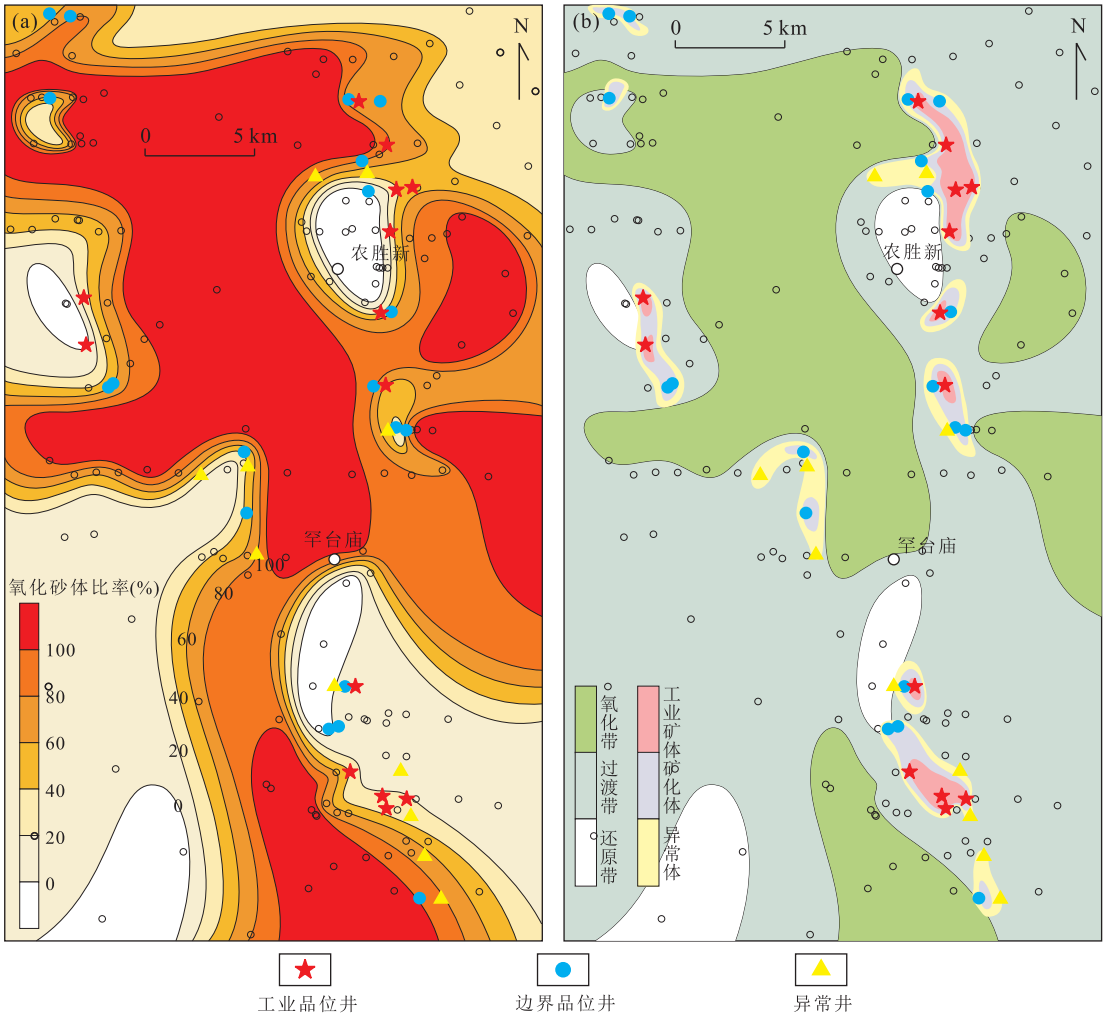


图 8 罕台庙地区直罗组下段下亚段铀储层内部古氧化砂体比率、古层间氧化带展布与铀矿化叠合图
Fig.8 The relationship between the paleo oxidized sandstone percentage, paleo interlayer oxidation zone and uranium minerali-
zation of $J_2 z^{1-1}$ in Hantaimiao region
a.古氧化砂体比率与铀矿化叠合;b.古层间氧化带与铀矿化叠合

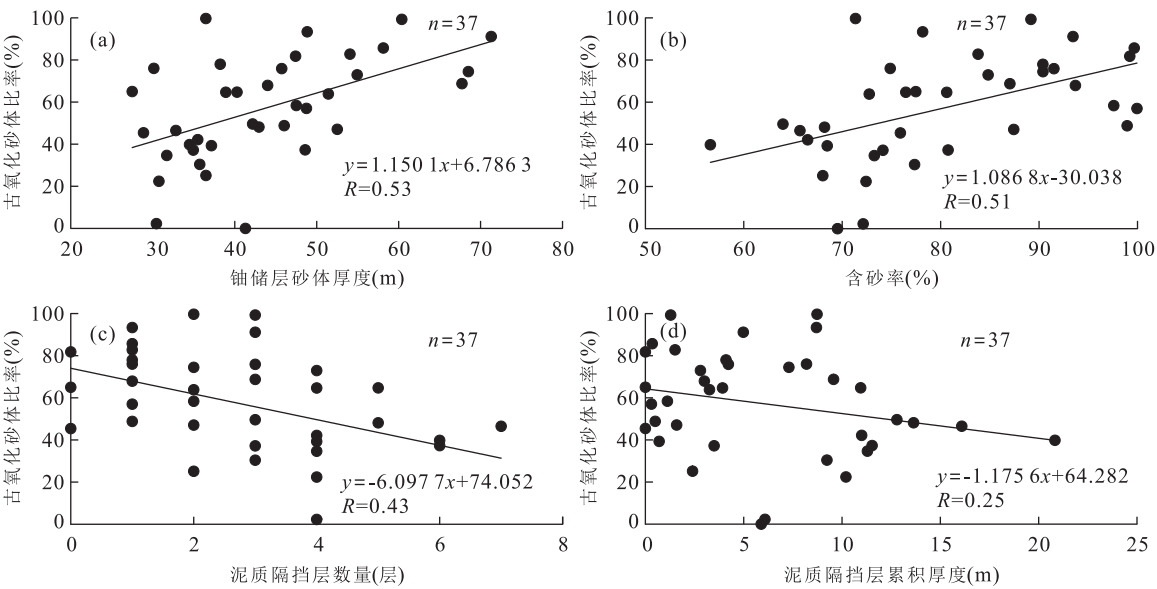


图 9 罕台庙地区直罗组下段下亚段古氧化砂体比率与铀储层定量非均质性参数之间的相关性

Fig.9 The relativity between the paleo oxidized sandstone percentage and quantitative evaluation index parameters for uranium reservoir heterogeneity of $J_2 z^{1-1}$ in Hantaimiao region

a.与铀储层砂体厚度相关性;b.与含砂率相关性;c.与泥质隔挡层数量相关性;d.与泥质隔挡层累积厚度相关性

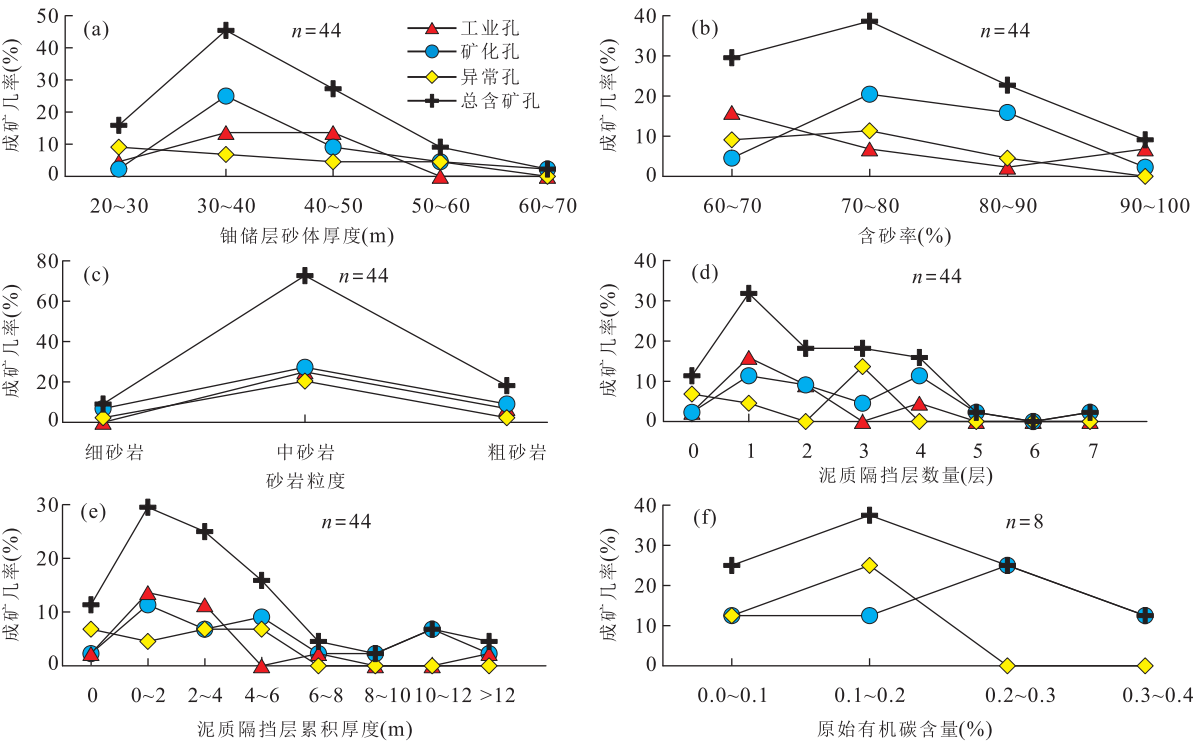


图 10 罕台庙地区直罗组下段下亚段铀储层定量非均质性参数与铀成矿关系统计

Fig.10 The relationship between the quantitative evaluation index parameters for uranium reservoir heterogeneity and uranium mineralization of $J_2 z^{1-1}$ in Hantaimiao region

a.与铀储层砂体厚度关系;b.与含砂率关系;c.与砂岩平均粒度关系;d.与泥质隔挡层数量关系;e.与泥质隔挡层累积厚度关系;f.与原始有机碳含量关系

负相关,即泥质隔挡层越发育越不利于古层间氧化带的发育.实际上,隔挡层对古层间氧化不仅具有抑制作用,而且可以导致其结构的复杂化(图 7a,7b,图 9c 和 9d).

比较图 8 与铀储层砂岩平均粒度、原始有机碳含量平面分布规律,笔者发现古氧化带主要发育于砂岩粒度粗、原始有机碳含量低的区域.由此可以推理,表征铀储层外部形态非均质性的铀储层砂体厚度和含砂率参数,会同表征铀储层内部结构非均质性的泥质隔挡层发育数量和累积厚度参数,共同制约着古层间氧化带的发育轨迹,而铀储层内部结构非均质性的所有参数——砂岩粒度、隔挡层和原始有机碳含量,则可能控制着古层间氧化带推进的里程.

2.2 定量非均质性参数与铀矿化的相关性

在铀储层中,铀矿化体主要形成于古氧化砂体与还原砂体之间的过渡部位,且通常靠近还原砂体一侧(图 3a,3b 和图 8).通过统计各定量非均质性参数与铀矿化之间的关系,笔者发现铀储层砂体厚度为 30~50 m 时铀成矿几率高,当砂体厚度 <30 m 或 >50 m 时铀成矿几率均迅速降低(图 10a);含砂率为 60%~90% 时铀成矿几率高,当含砂率在 90%~100% 时铀成矿几率降低(图 10b);砂岩平均粒度为中砂岩时铀成矿几率最高,当砂岩平均粒度为细砂岩或粗砂岩时铀成矿几率均降低(图 10c);泥质隔挡层数量为 1~4 层时铀成矿几率高,当泥质隔挡层数量为 0 层或 >4 层时铀成矿几率均降低(图 10d);泥质隔挡层累积厚度为 0~6 m 时铀成矿几率高,当无泥质隔挡层或累积厚度 >6 m 时铀成矿几率均降低(图 10e);原始有机碳含量为 0.1%~

0.3% 时铀成矿几率较高,当原始有机碳含量 <0.1% 或 >0.3% 时铀成矿几率均较低(图 10f).且随着砂岩粒度变细,泥质隔挡层数量增加和累积厚度加大,工业孔所占的比例减小,铀成矿品质降低(图 10c~10e).综上所述,铀储层定量非均质性参数确实对铀矿化具有制约作用.

3 铀储层非均质性定量评价指标体系划分

既然铀储层定量非均质性参数与古层间氧化作用和铀成矿作用具有密切联系,那么从服务于铀矿勘查的角度,可以利用这些定量参数进行铀储层非均质性的定量分级尝试,以加强钻前预测的准确性.

通过定量非均质性参数与铀成矿关系的系统统计分析,可以将研究区铀储层定量非均质性参数归为 3 大类——Ⅰ类、Ⅱ类和Ⅲ类,分别代表了由简单到复杂的 3 种级别的铀储层非均质性.其中,铀储层砂体厚度、含砂率、泥质隔挡层数量和累积厚度 4 个参数,对表征铀储层的非均质性最为敏感.当砂体厚度越小、含砂率越低、泥质隔挡层数量越多以及累积厚度越大时,指示铀储层的非均质性越强,反之越弱.而且,当铀储层非均质性定量评价指标为Ⅱ类(中等)时铀矿化最为活跃.所以,该指标体系的建立具有预测价值.其相应的划分级别、定量参数变化区间及其铀成矿几率等信息详见表 2.

铀储层非均质性定量评价指标体系的构建,为进一步深化沉积非均质性制约下的铀成矿模式奠定

表 2 罕台庙地区直罗组下段下亚段铀储层非均质性定量评价指标体系划分标准
Table 2 The classification criteria of the quantitative evaluation index system for uranium reservoir heterogeneity of J₂z¹⁻¹ in Hantaimiao region

非均质性参数				类别(非均质性级别)		
				Ⅰ类(弱)	Ⅱ类(中等)	Ⅲ类(强)
外部形态参数	铀储层砂体厚度	变化区间(m)		>50	30~50	<30
	铀储层砂体厚度	成矿几率(%)		11.36	72.73	15.91
	含砂率	变化区间(%)		90~100	60~90	<60
	含砂率	成矿几率(%)		24.49	75.51	0
内部结构参数	砂岩平均粒度	变化区间		粗砂岩	中砂岩	细砂岩
	砂岩平均粒度	成矿几率(%)		18.18	72.73	9.09
	泥质隔挡层数量	变化区间(层)		0	0~4	>4
	泥质隔挡层数量	成矿几率(%)		11.36	84.09	4.55
	泥质隔挡层累积厚度	变化区间(m)		0	0~6	>6
	泥质隔挡层累积厚度	成矿几率(%)		11.36	70.46	18.18
	原始有机碳含量	变化区间(%)		0~0.1	0.1~0.3	>0.3
	原始有机碳含量	成矿几率(%)		25.00	62.50	12.50

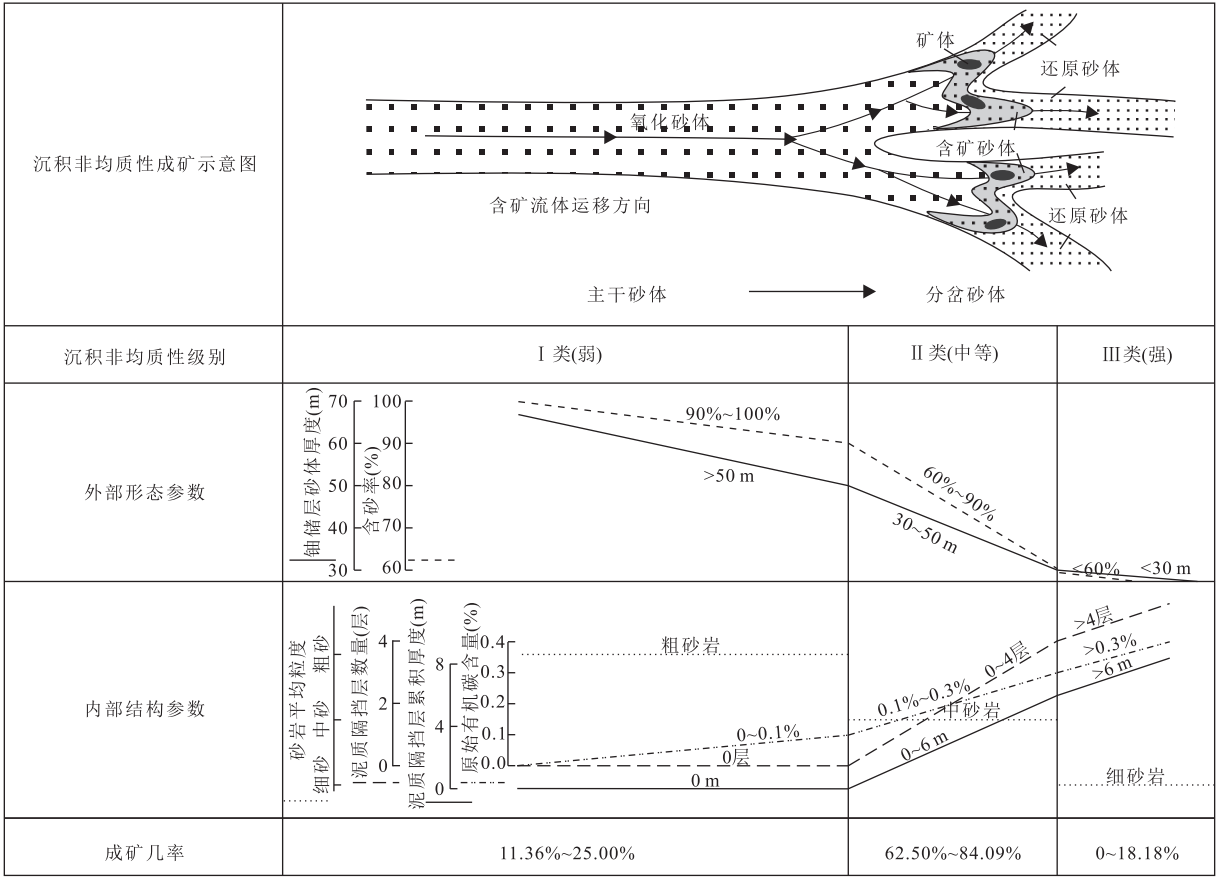


图 11 罕台庙地区铀储层非均质性控制下的铀成矿定量评价模型

Fig.11 The quantitative evaluation model of uranium mineralization controlled by uranium reservoir heterogeneity in Hantaimiao region

了基础,给以往定性的铀储层非均质性模型以定量的表征.如图 11 所示,当铀储层砂体厚度开始变薄而且频繁分岔、砂岩粒度由粗变细、泥质隔挡层从无到有、原始有机碳含量由低增高的部位(即由古氧化环境向还原环境变化的过渡部位)为铀成矿的有利区域,该区域即为本文划分的Ⅱ类(中等)铀储层非均质性分布区,也是最为有利的铀成矿区。

诚然,每一个标准和模式的提出往往带有地域特色,所以值得指出的是该指标体系是基于罕台庙直罗组铀储层通过多个定量参数综合分级评判的结果,实际应用时还要结合研究目标区的特点增减评价参数、调整参数变化区间,但是多参数的综合权衡考虑是必要的。

4 结论

(1)将研究区用以定量评判铀储层非均质性的参数分为两部分,一部分表征铀储层的外部形态非均质性,包括了铀储层砂体的厚度参数和含砂率参数.另

外一部分表征铀储层的内部结构非均质性,主要包括了铀储层砂岩的粒度参数、隔挡层发育数量参数、累积厚度参数以及砂岩原始有机碳含量参数。

(2)通过对各种参数的平面编图和统计分析,笔者发现沿辫状分流河道砂体轴线方向,砂体厚、含砂率高、砂岩粒度粗、泥质隔挡层不发育以及原始有机碳含量低,铀储层非均质性较弱.而沿辫状分流河道两侧以及下游地区,砂体厚度变薄、含砂率降低、砂岩粒度变细、泥质隔挡层迅速发育以及原始有机碳含量增加,铀储层非均质性明显增强.这些参数的空间变化明显受控于同沉积期的沉积环境和沉积作用。

(3)铀储层定量非均质性参数与古层间氧化作用和铀成矿作用具有密切关系.铀储层非均质性较弱区域古氧化作用发育,非均质性较强区域不利于古氧化作用的发生,非均质性中等程度发育区古氧化作用适当、铀矿化最为活跃。

(4)通过各种定量参数与铀成矿作用的综合分析,本文将研究区铀储层非均质性划分为 3 类,分别为Ⅰ类(弱)、Ⅱ类(中等)和Ⅲ类(强),建立了由多参数综合评判的铀储层非均质性分级定量评价指标体

系.研究表明,Ⅱ类铀储层非均质性区域是砂岩型铀矿的有利聚集区.

References

- Jiao, Y. Q., Chen, A. P., Wang, M. F., et al., 2005a. Genetic Analysis of the Bottom Sandstone of Zhiluo Formation, Northeastern Ordos Basin: Predictive Base of Spatial Orientation of Sandstone-Type Uranium Deposit. *Acta Sedimentologica Sinica*, 23(3): 371—379 (in Chinese with English abstract).
- Jiao, Y. Q., Chen, A. P., Yang, Q., et al., 2005b. Sand Body Heterogeneity: One of the Key Factors of Uranium Metallogenesis in Ordos Basin. *Uranium Geology*, 21(1): 8—15 (in Chinese with English abstract).
- Jiao, Y. Q., Li, Z., 1995. Genesis and Distribution Regularity of Isolate Barrier Beds in Channel Reservoir Sandbody. *Petroleum Exploration and Development*, 22(4): 78—81 (in Chinese with English abstract).
- Jiao, Y. Q., Wu, L. Q., Peng, Y. B., et al., 2015. Sedimentary-Tectonic Setting of the Deposition-Type Uranium Deposits Forming in the Paleo-Asian Tectonic Domain, North China. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 189—205 (in Chinese with English abstract).
- Jiao, Y. Q., Wu, L. Q., Rong, H., et al., 2012. Uranium Reservoir Architecture and Ore-Forming Flow Field Study: A Key of Revealing Dongsheng Sandstone-type Uranium Deposit Mineralization Mechanism. *Geological Science and Technology Information*, 31(5): 94—104 (in Chinese with English abstract).
- Jiao, Y. Q., Wu, L. Q., Wang, M. F., et al., 2005a. Forecasting the Occurrence of Sandstone-Type Uranium Deposits by Spatial Analysis: An Example from the Northeastern Ordos Basin, China. In: Mao, J. W., Bierlein, F. P., eds., Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge. 101: 273—275. doi: 10.1007/3-540-27946-6_71
- Jiao, Y. Q., Yan, J. X., Li, S. T., et al., 2005b. Architectural Units and Heterogeneity of Channel Reservoirs in the Karamay Formation, Outcrop Area of Karamay Oil Field, Junggar Basin, Northwest China. *AAPG Bulletin*, 89(4): 529—545. doi: 10.1306/10040400955
- Jiao, Y. Q., Wu, L. Q., Yang, Q., 2007. Uranium Reservoir: A New Concept of Sandstone-Type Uranium Deposits Geology. *Geological Science and Technology Information*, 26(4): 1—7 (in Chinese with English abstract).
- Jiao, Y. Q., Wu, L. Q., Yang, S. K., et al., 2006. Sedimentology of Uranium Reservoir: The Exploration and Production Base of Sandstone-Type Uranium Deposits. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Landais, P., 1996. Organic Geochemistry of Sedimentary Uranium Ore Deposits. *Ore Geology Reviews*, 11(1—3): 33—51. doi: 10.1016/0169-1368(95)00014-3
- Leventhal, J. S., Grauch, R. I., Threlkeld, C. N., et al., 1987. Unusual Organic Matter Associated with Uranium from the Claude Deposit, Cluff Lake, Canada. *Economic Geology*, 82(5): 1169—1176. doi: 10.2113/gsecongeo.82.5.1169
- Li, Z. Y., Fang, X. H., Chen, A. P., et al., 2009. Superposition Metallogenic Model of Sandstone-Type Uranium Deposit in the Northeastern Ordos Basin. *Uranium Geology*, 25(2): 65—70, 84 (in Chinese with English abstract).
- Lu, C., 2011. Uranium Mineralization Rules Controlled by Sedimentation in Bayanwula Region in Erlian Basin. Chinese Nuclear Society 2011 Annual Conference, Guiyang (in Chinese with English abstract).
- Lucia, F. J., Fogg, G. E., 1990. Geological/Stochastic Mapping of Heterogeneity in a Carbonate Reservoir. *Journal of Petroleum Technology*, 42(10): 1298—1303. doi: 10.2118/19597-pa
- Luo, J. L., Liu, X. S., Fu, X. Y., et al., 2014. Impact of Petrologic Components and Their Diagenetic Evolution on Tight Sandstone Reservoir Quality and Gas Yield: A Case Study from He 8 Gas-Bearing Reservoir of Upper Paleozoic in Northern Ordos Basin. *Earth Science*, 39(5): 537—545 (in Chinese with English abstract).
- Mao, Z. Q., 2003. Controlling Effects of Poor Permeable Layers upon Accumulation and Distribution of Hydrocarbon in Inhomogeneous Sandstone Reservoir. *Earth Science*, 28(2): 196—200 (in Chinese with English abstract).
- Miall, A. D., 1985. Architectural-Element Analysis: A New Method of Facies Analysis Applied to Fluvial Deposits. *Earth Science Reviews*, 22(4): 261—308. doi: 10.1016/0012-8252(85)90001-7
- Miall, A. D., 1988. Reservoir Heterogeneities in Fluvial Sandstones: Lessons from Outcrop Studies. *AAPG Bulletin*, 72(6): 682—697. doi: 10.1306/703c8f01-1707-11d7-8645000102c1865d
- Miall, A. D., 1996. The Geology of Fluvial Deposits. Berlin: Springer-Verlag, 75—178.
- Miao, A. S., Jiao, Y. Q., Chang, B. C., et al., 2010. Detailed Investigation of the Paleo-Interlayer-Oxidation Zone of Dongsheng Uranium Deposit in Northeastern Ordos Basin. *Geological Science and Technology Information*, 29(3): 55—61 (in Chinese with English abstract).

- Miao, A. S., Lu, Q., Liu, H. F., et al., 2009. Occurrence and Formation of Coffinite in Ancient Interlayer Oxidizing Zone of Sandstone Type U-Deposit in Ordos Basin. *Geological Science and Technology Information*, 28(4): 51—58 (in Chinese with English abstract).
- Peng, Y. B., Chen, A. P., Li, Z. Y., et al., 2006. A Discussion on Special Features of the Dongsheng Sandstone Type Uranium Deposit in Ordos Basin. *Mineral Deposits*, 25 (Suppl. 1): 249—252 (in Chinese with English abstract).
- Pettijohn, F. J., Potter, P. E., Siever, R., 1973. Sand and Sandstone. Springer-Verlag, New York.
- Qiu, Y. N., 1987. Clastic Reservoir Sedimentary Basis. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Spirakis, C. S., 1996. The Roles of Organic Matter in the Formation of Uranium Deposits in Sedimentary Rocks. *Ore Geology Reviews*, 11(1—3): 53—69. doi: 10.1016/0169-1368(95)00015-1
- Tuo, J. C., Ma, W. Y., Zhang, M. F., et al., 2007. Organic Geochemistry of the Dongsheng Sedimentary Uranium Ore Deposits, China. *Applied Geochemistry*, 22(9): 1949—1969. doi: 10.1016/j.apgeochem.2007.03.060
- Wang, L. J., Chen, X. J., 2003. Influence of Reservoir Heterogeneity on the Distribution of Remaining Oil. *Geological Science and Technology Information*, 22(2): 71—73 (in Chinese with English abstract).
- Weber, K. J., 1986. How Heterogeneity Affects Oil Recovery. Reservoir Characterization: Orlando. Academic Press, Florida, 665—672.
- Yan, K., Yang, S. C., Ren, H. Q., 2008. Research on Quantitative Characterization of Macroscopic Heterogeneity of Reservoir. *Acta Petrolei Sinica*, 29(6): 870—874, 879 (in Chinese with English abstract).
- Yang, S. C., 2000. A New Method for Quantitatively Studying Reservoir Heterogeneity. *Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)*, 24(1): 53—56 (in Chinese with English abstract).
- Yi, C., Zheng, Y. L., Wang, M. T., 2013. Heterogeneity of Uranium Host Rocks in Zhiluo Formation in Dongsheng Area and Its Relation to Uranium Mineralization. *Uranium Geology*, 29(3): 139—145, 178 (in Chinese with English abstract).
- Yu, X. H., 2008. Clastic Petroleum Reservoir Sedimentology (Second Edition). Petroleum Industry Press, Beijing, 220—238 (in Chinese).
- Zhu, X. Y., Zhou, H., Yu, X. B., 2009. The Calculation Methods of Permeability Variation Coefficient—Taking Ningdong Oilfield in Mahuangshan West Block as an Example. *Offshore Oil*, 29(2): 23—27 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 焦养泉, 陈安平, 王敏芳, 等, 2005a. 鄂尔多斯盆地东北部直罗组底部砂体成因分析: 砂岩型铀矿床预测的空间定位基础. 沉积学报, 23(3): 371—379.
- 焦养泉, 陈安平, 杨琴, 等, 2005b. 砂体非均质性是铀成矿的关键因素之一——鄂尔多斯盆地东北部铀成矿规律探讨. 铀矿地质, 21(1): 8—15.
- 焦养泉, 李祯, 1995. 河道储层砂体中隔挡层的成因与分布规律. 石油勘探与开发, 22(4): 78—81.
- 焦养泉, 吴立群, 彭云彪, 等, 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. 地质前缘, 22(1): 189—205.
- 焦养泉, 吴立群, 荣辉, 等, 2012. 铀储层结构与成矿场研究: 揭示东胜砂岩型铀矿床成矿机理的一把钥匙. 地质科技情报, 31(5): 94—104.
- 焦养泉, 吴立群, 杨琴, 2007. 铀储层——砂岩型铀矿地质学的新概念. 地质科技情报, 26(4): 1—7.
- 焦养泉, 吴立群, 杨生科, 等, 2006. 铀储层沉积学: 砂岩型铀矿勘查与开发的基础. 北京: 地质出版社.
- 李子颖, 方锡珩, 陈安平, 等, 2009. 鄂尔多斯盆地东北部砂岩型铀矿叠合成矿模式. 铀矿地质, 25(2): 65—70, 84.
- 鲁超, 2011. 二连盆地巴彦乌拉地区沉积作用控制下的铀成矿规律. 中国核学会 2011 年学术年会, 贵阳.
- 罗静兰, 刘新社, 付晓燕, 等, 2014. 岩石学组成及其成岩演化过程对致密砂岩储集质量与产能的影响: 以鄂尔多斯盆地上古生界盒 8 天然气储层为例. 地球科学, 39(5): 537—545.
- 毛志强, 2003. 非均质储层夹层控油作用初论——非均质储层油气分布规律及测井响应特征. 地球科学, 28(2): 196—200.
- 苗爱生, 焦养泉, 常宝成, 等, 2010. 鄂尔多斯盆地东北部东胜铀矿床古层间氧化带精细解剖. 地质科技情报, 29(3): 55—61.
- 苗爱生, 陆琦, 刘惠芳, 等, 2009. 鄂尔多斯砂岩型铀矿床古层间氧化带中铀石的产状和形成. 地质科技情报, 28(4): 51—58.
- 彭云彪, 陈安平, 李子颖, 等, 2006. 东胜砂岩型铀矿床特殊性讨论. 矿床地质, 25(增刊): 249—252.
- 裘亦楠, 1987. 碎屑岩储层沉积基础. 北京: 石油工业出版社.
- 汪立君, 陈新军, 2003. 储层非均质性对剩余油分布的影响. 地质科技情报, 22(2): 71—73.
- 严科, 杨少春, 任怀强, 2008. 储层宏观非均质性定量表征研究. 石油学报, 29(6): 870—875.
- 杨少春, 2000. 储层非均质性定量研究的新方法. 石油大学学报(自然科学版), 24(1): 53—56.

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的关系.铀矿地质,29(3):139—145,178.

于兴河,2008.碎屑岩系油气储层沉积学(第二版).北京:石油工业出版社,220—238.

朱小影,周红,余训兵,2009.渗透率变异系数的几种计算方法——以麻黄山西区块宁东油田 2、3 井区为例.海洋石油,29(2):23—27.

《地球科学》(中、英文版)获“中国最具国际影响力学术期刊”等多项奖励

据最新发布的《2015 中国学术期刊国际国内影响力研究报告》,《地球科学》(中文版)和《Journal of Earth Science》(英文版)分别荣获“2015 中国最具国际影响力学术期刊”和“2015 中国国际影响力优秀学术期刊”称号.

《2015 中国学术期刊国际国内影响力研究报告》由清华大学所属中国学术期刊电子杂志社和清华大学图书馆联合设立的中国学术文献国际评价研究中心研制,评选依据《中国学术期刊国际引证年报(2015 版)》给出的期刊国际影响力指数,对中國大陸正式出版的 6 306 种学术期刊进行排名.其中,科技期刊 4 052 种,排名 Top 5%的 175 种科技期刊入选“2015 中国最具国际影响力学术期刊”,排名 Top 5%~Top 10%的 175 种科技期刊入选“2015 中国国际影响力优秀学术期刊”.

据悉,《地球科学》官方网站获评“中国高校科技期刊研究会优秀网站”,《Journal of Earth Science》(英文版)获评“首届中国高校优秀英文期刊”,这两项评选活动均由中国高校科技期刊研究会举办.

《地球科学》编辑部