

基于克里格法刻画砂岩型铀矿U、Ra和U-Ra平衡系数垂向分布规律——以二连盆地芒来铀矿床为例

王伟¹,武正乾¹,熊攀²,刘坤鹏¹,黄镗俯²,王晓鹏¹

(1.核工业二〇三研究所,陕西西安 710086;2.核工业二〇八大队,内蒙古包头 014010)

[摘要] 砂岩型铀矿是绿色经济可采的重要能源矿种,目前是世界上重要的铀矿勘探类型之一。二连盆地芒来铀矿床、鄂尔多斯盆地纳岭沟铀矿床铀矿体多呈板状产出,板状铀矿体成因备受关注。为研究砂岩型铀矿内部U、Ra和铀镭平衡系数(K_p)分布的垂向分布规律,本文以二连盆地芒来铀矿床为例,采用具有网格精度高优点的克里格插值法研究U、Ra和 K_p 垂向分布规律,分别利用放射性样品分析数据和定量伽马测井五点式反褶积法反演U含量数据,通过克里格法精细刻画砂岩型矿体中U、Ra和 K_p 分布的垂向分布规律。研究发现,该矿床板状矿体内部具有卷状的特征, K_p 分布形态可以用来判断含氧含铀水的运移方向以及氧化强弱。该方法对研究铀矿体形态、铀矿成矿规律和后续地浸开采具有重要意义。

[关键词] 克里格法 砂岩型铀矿 U、Ra和U-Ra平衡系数 K_p 五点式反褶积法 垂向分布规律 芒来铀矿床 二连盆地

[中图分类号] P612 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2024)02-0236-08

Wang Wei, Wu Zhengqian, Xiong Pan, Liu Kunpeng, Huang Qiangfu, Wang Xiaopeng. Vertical distribution patterns of the U, Ra and U-Ra equilibrium coefficient for sandstone uranium ores based on the Kriging method: An example from the Manglai uranium deposit in Erlian Basin[J].Geology and Exploration, 2024, 60(2): 0236-0243.

0 引言

砂岩型铀矿是我国铀矿目前最重要的勘查类型。随着铀矿勘查工作推进,砂岩型铀板状矿体的成因越来越受到重视(丁波等,2020;封志兵等,2021;谭雨蕾等,2021;荆国强等,2021),其内部铀、镭以及铀镭平衡系数垂向分布规律研究工作相关报道较少。克里格法是一项实用空间估计技术,是地质统计学的重要组成部分,广泛应用在地球物理、地球化学异常的圈定和矿床储量估算等工作中(刘兆平等,2010;

刘海英等,2010;王伟等,2019;窦备等,2021;于兵等,2022)。二连盆地芒来铀矿床以往研究工作主要是含矿砂体的非均质性和地球化学方面(齐天骄等,2020;刘国安等,2020;杨崇根等,2021),没有对其铀、镭以及铀镭平衡布规律进行研究,利用克里格法可以较准确刻画砂岩型铀板状矿体中U、Ra和 K_p 分布的垂向分布规律,明确铀矿体不同部位U、Ra富集情况和 K_p 分布规律,以期为精细研究砂岩型铀矿板状矿体的形成机理和地浸开采施工提供重要依据(赵希刚等,2002;夏毓亮等,2013;姜涛等,2016)。

[收稿日期] 2023-04-21;**[改回日期]** 2023-09-11;**[责任编辑]** 郝情情。

[基金项目] 中国核工业地勘基金项目“鄂尔多斯盆地南部旬邑-盐池地区铀矿资源评价与勘查”(编号:2022-17)、“鄂尔多斯盆地镇原-盐池地区铀矿资源调查评价”(编号:202115-2)和“内蒙古苏尼特左旗巴彦图古日格-阿巴嘎旗那仁地区铀矿普查”(编号:202302-2-2)联合资助。

[第一作者] 王伟(1991年-),男,2022年毕业于吉林大学,地球物理专业,获硕士学位,工程师,主要从事砂岩型铀矿勘查工作。E-mail: 953260994@qq.com。

[通讯作者] 武正乾(1983年-),男,2018年毕业于西北大学,地质学专业,获硕士学位,高级工程师,主要从事沉积学与铀矿预测研究。E-mail: 151281015@qq.com。

1 克里格法与五点式反褶积法原理

1.1 克里格法

克里格法是以变异函数理论为基础,对特定区域的变量差值进行无偏最优估计的一种算法。克里格插值法原理是估计理论和概率统计中无偏、最小方差条件,这个方法本质是距离加权的改进,其属于线性插值法的一种(安永凯等,2014;石淑芹等,2014;烟贯发等,2015)。

设 x_1, \dots, x_n 为区域上的一系列观测点, $z(x_1), \dots, z(x_n)$ 为相应的观测值。区域化变量在 x_0 处的值 $z^*(x_0)$ 可采用一个线性组合来估计,见公式(1)。无偏性和估计方差最小被作为 λ_i 选取的标准,无偏和最优计算公式见(2)和(3)。从本征假设出发,可知 $E[z(x)]$ 为常数,有公式(4);由此可得公式(5)。以无偏为前提,克里格方差为最小可得求解定系数 λ_i 的方程为公式(6),可由公式(6)解出 λ_i ,代入(1)即可解得估计值。

涉及的克里格法估算公式见(1)、(2)、(3)、(4)、(5)和(6):

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (1)$$

$$E[z(x_0) - z^*(x_0)] = 0 \quad (2)$$

$$\text{Var}[z(x_0) - z^*(x_0)] = \min \quad (3)$$

$$E[z(x_0) - z^*(x_0)] = E\left[\sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) - z^*(x_0)\right] = \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i\right) E[z(x_i)] - E[z(x_0)] = 0 \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n C(x_i - x_j) \lambda_i - \mu = C(x_0 - x_j) \quad (j = 1, \dots, n) \quad (6)$$

式中: λ_i 为特定权重系数; $E[z(x)]$ 为数学期望; $\text{Var}[z(x)]$ 为方差; $E[z(x)]$ 为常数; $C(x_i - x_j)$ 为 $Z(x_i)$ 和 $Z(x_j)$ 的协方差函数。

以二连盆地芒来铀矿床B11线为例,克里格法对伽马测井数据反演的铀含量进行插值测量值和估算值的均方差1.66%,铀、镭样品的均方差为28.34%,说明利用伽马测井数据反演的铀含量刻画矿体更为精确。

1.2 五点式反褶积法

五点式反褶积法是 γ 测井分层解释方法的一种(汤彬等,2008;马战军和王小冬,2011;吴永鹏等,

2012;王小冬等,2020;王冬阳等,2022)。利用反褶积算法将 γ 测井数据反演成10 cm矿层的铀含量,广泛应用在铀矿测井解释工作中,对于资源量估算工作至关重要(章晔,1990;王殿学等,2022)。反演前输入铀镭平衡系数、镭氢平衡系数、死时间等修正参数,计算出每个单元层铀含量。

单元层铀含量计算公式如下:

$$q_i = \frac{I_i}{k_u} - \frac{1}{12k_u(\alpha \cdot h)^2} \cdot (-I_{i-2} + 16I_{i-1} - 30I_i + 16I_{i+1} - I_{i+2}) \quad (7)$$

式中: q_i 为第*i*个单元层当量铀含量,单位为百分数(%); I_i 为测点*i*的 γ 照射量率,单位为纳库每千克小时(nC/(kg·h)); k_u 为铀含量灵敏度系数的数值,单位为纳库每万分之一当量铀含量每千克小时((nC·0.01%eU)/(kg·h)); α 为特征参数,与探头结构、钻孔条件和地层环境等参数有关,表示单位吸收层厚度对 γ 照射量率衰减的百分数,单位为负一次方米(m⁻¹); h 为单元层厚度,单位为米(m)。

2 二连盆地芒来铀矿地质与矿体特征

芒来铀矿床在巴彦乌拉铀矿床古河谷砂岩铀矿床最西段,位于马尼特拗陷西部的塔北次级。下白垩统赛汉组上段为河流相沉积,辫状河道砂体发育,岩性主要为成熟度低、富含有机碳和黄铁矿等还原性介质的灰色碎屑岩(图1),是芒来铀矿床的主要赋存层位(刘波等,2016;秦彦伟,2022)。伽马测井曲线可以指示铀矿存在的位置、厚度和品位;三侧向电阻率曲线随着粒级增大而升高。

矿体主要产于赛汉组上段的河道砂体中,受潜水-层间氧化带控制,位于氧化界面以下河道底板相对低洼的灰色砂体中,以单层为主,近水平板状产出。芒来铀矿床矿体埋深浅、厚达大、品位中等。北部矿体厚1.00~8.20 m,平均4.03 m;品位为0.0114%~0.0647%,平均0.0244%;平米铀量为1.10~5.90 kg/m²,平均2.08 kg/m²。南部矿体厚2.50~14.00 m,平均7.85 m;品位为0.0110%~0.1118%,平均0.0297%;平米铀量为1.60~32.78 kg/m²,平均5.22 kg/m²。

3 基于样品数据刻画铀矿体中U、Ra和Kp分布

3.1 U、Ra样品数据特征

芒来铀矿床基本勘查间距200 m×100 m,孔距100~200 m。铀镭样品取样长度0.10~1.10 m,平均

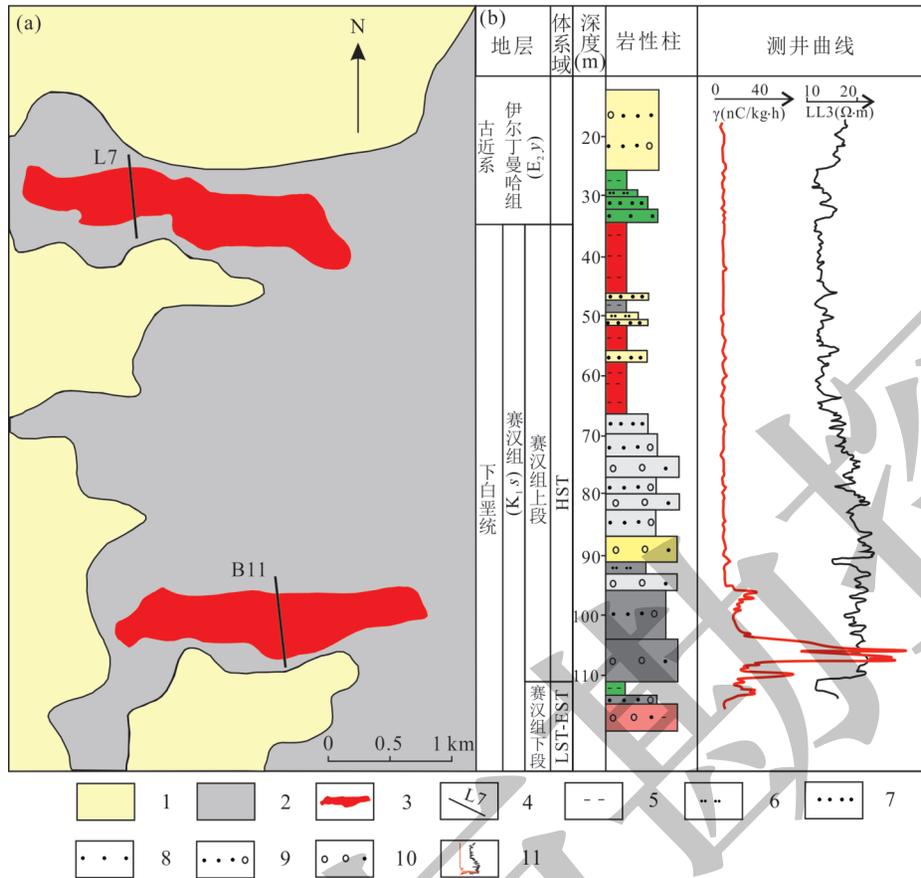


图1 二连盆地芒来铀矿床矿体平面分布及赛汉组上段辫状河沉积图

Fig. 1 Map showing ore body distribution (a) and braided river deposition of the upper member of the Saihan Formation in the Manglai uranium deposit of Eriian Basin

1-氧化带;2-氧化还原过渡带;3-铀矿体;4-勘探线;5-泥岩;6-粉砂岩;7-细砂岩;8-中砂岩;9-含砾中砂岩;10-含砾粗砂岩;11-测井曲线
 1-oxidation zone;2-transitional oxidation-reduction zone; 3-uranium ore body; 4-exploration line; 5-mudstone; 6-siltstone; 7-fine sandstone; 8-medium sandstone; 9-sandstone with gravel; 10-coarse sandstone with gravel; 11-logging curves

取样长度0.20 m,取样连续、采取率高,选取的南部矿体B11勘探线和北部矿体L7勘探线具有代表性(图1)。芒来铀矿北部矿体L7勘探线,有5个钻孔31.35 m长的样品,采取率86.19%~100%;芒来铀矿南部矿体B11勘探线,有5个钻孔42.75 m长的样品,采取率84.51%~99.66%(表1)。L7勘探线铀镭平衡系数0.54~1.53,平均0.95,B11勘探线铀镭平衡系数0.63~1.35,平均0.95。

3.2 基于样品数据U、Ra和Kp垂向分布规律

芒来铀矿床南部主矿体沿倾向B11勘探线5个钻孔115个样品按照同样的方法成图,可以看出南东部存在铀的超级富集现象,个别样品铀品位达到3.57%;铀镭平衡系数呈层状分布,上下平衡、中间偏铀,底部和上部存在偏镭现象(图2),可能是中间存在还原性介质吸附还原上下含氧含铀水,导致的铀超级富集现象。

表1 L7线和B11线U、Ra样品分布情况

Table 1 Distribution of U and Ra samples on lines L7 and B11

孔号	起始深度(m)	终止深度(m)	样品数(个)	样品长度(m)	采取率(%)
L7-0	117.70	121.80	15	3.90	95.12
L7-1	119.06	125.98	17	6.10	88.15
CS7-3-1	118.50	131.90	14	11.55	86.19
L7-5	119.20	126.30	19	6.50	91.55
L11-7	121.55	124.85	8	3.30	100.00
B11-231	104.90	112.20	16	6.80	93.15
CS11-233	101.65	112.30	31	9.00	84.51
B11-235	102.14	110.29	20	5.85	88.83
WT11-237-1	99.25	113.75	28	14.45	99.66
B11-239	104.05	111.10	20	6.65	94.33

将芒来铀矿床北部主矿体沿倾向L7勘探线5个钻孔47个样品按深度和距离整理在个数据文件中。利用克里格法分别对其进行网格化,然后进行

绘制等值线,最后充填不同的U、Ra品位和Kp偏蚀、平衡以及偏蚀颜色,U、Ra和Kp的垂向分布研究。可以看出矿体中间厚两边薄,且有北西厚、南东薄的规律,其中矿体南侧底部有铀和镭的富集现象,板状矿体内有高品位矿体的“卷头”的出现,卷头方向是由北向南;从铀镭平衡系数垂向等值线图可以看出,沿倾向矿体南侧和北侧底部均有偏蚀现象,有南北两侧双向氧化作用,北侧氧化决定了铀矿体的形成,南侧氧化对形成的铀矿化进行改造,从而导致板状矿体内高品位“卷头”的出现(图3)。

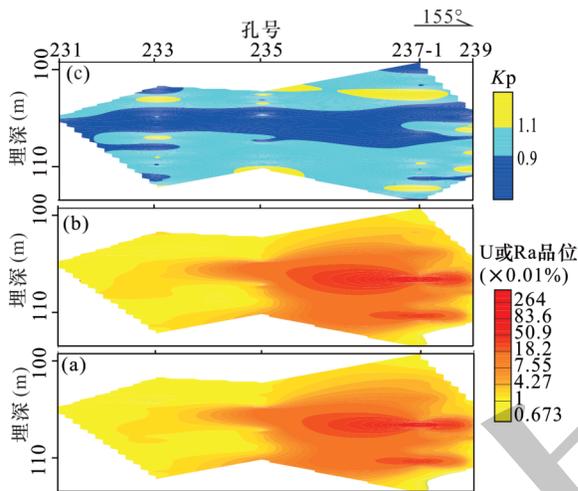


图2 B11线矿体沿倾向Ra(a)、U(b)和Kp(c)分布规律
Fig. 2 Distribution patterns of Ra(a)、U(b) and Kp(c) along the orebody dip of profile No. B11

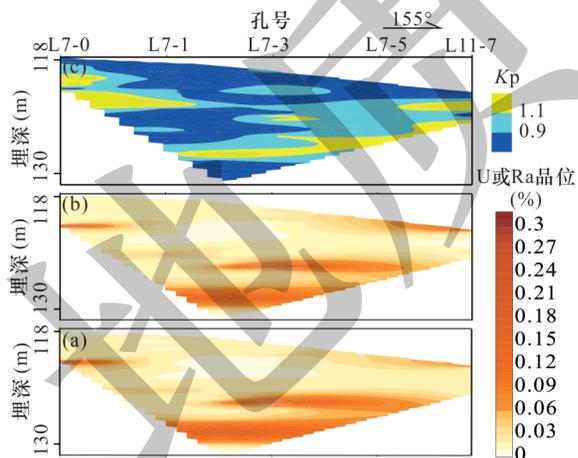


图3 L7线矿体沿倾向Ra(a)、U(b)和Kp(c)分布规律
Fig. 3 Distribution patterns of Ra(a)、U(b) and Kp(c) along the orebody dip of profile No. L7

4 基于定量 γ 测井数据刻画铀矿体形态

定量 γ 测井作为铀矿地质勘查工作中一种核心的地球物理测井方法,20世纪60年代以来我国提交

的铀矿床均为钻孔 γ 测井确定的铀矿层厚度、位置、品位和平米铀量。本文涉及的定量 γ 测井探管型号为FD-3019,测量仪器均经过核工业航测遥感中心国家放射性系列模型标定,测井方式为连续测井。定量 γ 测井异常曲线解释采取分层解释法的五点式反褶积法,解释软件为铀矿测井资料处理解释系统。

南部矿体B11勘探线有12个钻孔,利用测井资料处理解释系统的 γ 测井解释模块对12个钻孔的定量伽马测井数据进行五点式反褶积计算,计算出每个钻孔的单元层含量。然后用Surfer选择克里格法对12个钻孔的单元层含量进行插值。基于 γ 测井数据可以反映矿体完整的形态,不同品位在剖面上分布规律明显(图4),B11勘探线反映芒来铀矿床南部主矿体具有卷状矿体的形态。以工业品位0.01%圈定矿体卷状形态明显;而以低品位0.005%圈定矿化体卷状形态较清晰。卷头在东南一侧,C-233到B11-239钻孔存在铀超级富集的现象,富集中心在物探参数孔237-1,品位最高达到4.27%,打破了二连盆地巴彦乌拉古河谷低品位的认识。

同上对北部矿体L7勘探线有9个钻孔的定量伽马测井数据进行处理,基于 γ 测井数据可以反映矿体完整的形态,不同品位在剖面上分布规律明显(图5),L7勘探线反映芒来铀矿床北部主矿体具有板状矿体的形态。北部矿体北西浅南东深,由北西向南东倾斜,厚度大体呈中间厚两侧薄特征,埋深浅中部深,高品位铀矿富集在北部;低品位0.005%圈定矿化体主要分布在矿体上部和中心的底部,上部范围大,底部分布范围小。

5 讨论

砂岩型铀矿的形成经历铀元素的活化-迁移-富集过程,矿体的形态是铀富集后的自然集合状态。U和Ra的地球化学特征不同,U更容易被氧化随地下水迁移,精细刻画矿体以及铀镭平衡的形态可以判断铀迁移的方向和铀矿的形成过程。B11-237和L7-1钻孔作为验证孔,将其测井反演的铀含量曲线投影到相应剖面。可以看出克里格法对原始数据保真度较高,插值结果的可靠性强,清晰刻画了芒来砂岩型铀矿床的U、Ra和Kp垂向分布规律。

(1)基于样品数据U和Ra的分布规律基本一致。南部矿体B11勘探线的U和Ra主要富集在B11-235和B11-239钻孔的中部,U有从北西向南东迁移的趋势;北部矿体L7勘探线的U和Ra主要

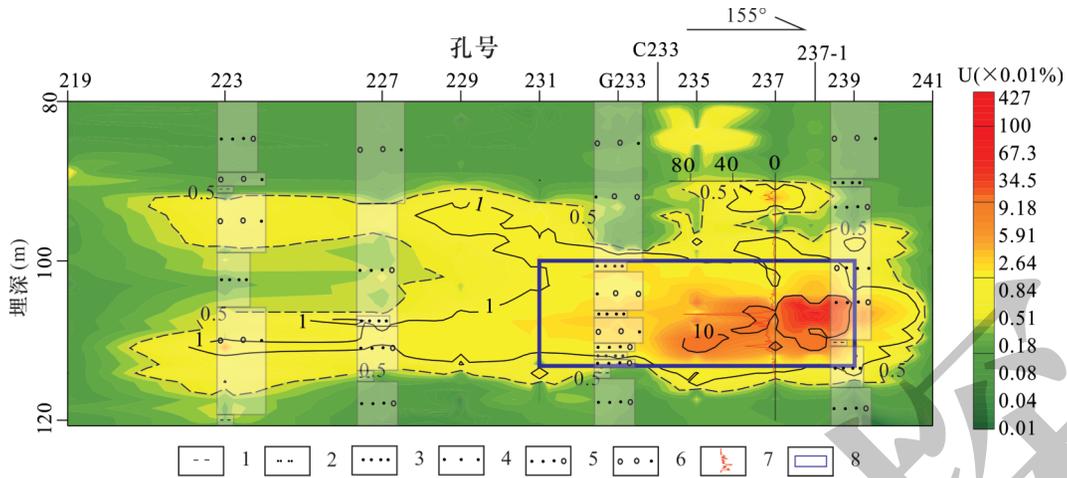


图4 芒来铀矿床B11勘探线测井反演铀含量分布图

Fig. 4 Distribution of uranium elements along the exploration line B11 of the Manglai uranium deposit

1-泥岩;2-粉砂岩;3-细砂岩;4-中砂岩;5-含砾中砂岩;6-含砾粗砂岩;7-测井反演铀含量曲线;8-B11线样品U、Ra和Kp分布规律图的范围
 1-mudstone; 2-siltstone; 3-fine sandstone; 4-medium sandstone; 5-sandstone with gravel; 6-coarse sandstone with gravel; 7-log inversion uranium content curve; 8-range of distribution patterns of U, Ra, and Kp along exploration line No. B11

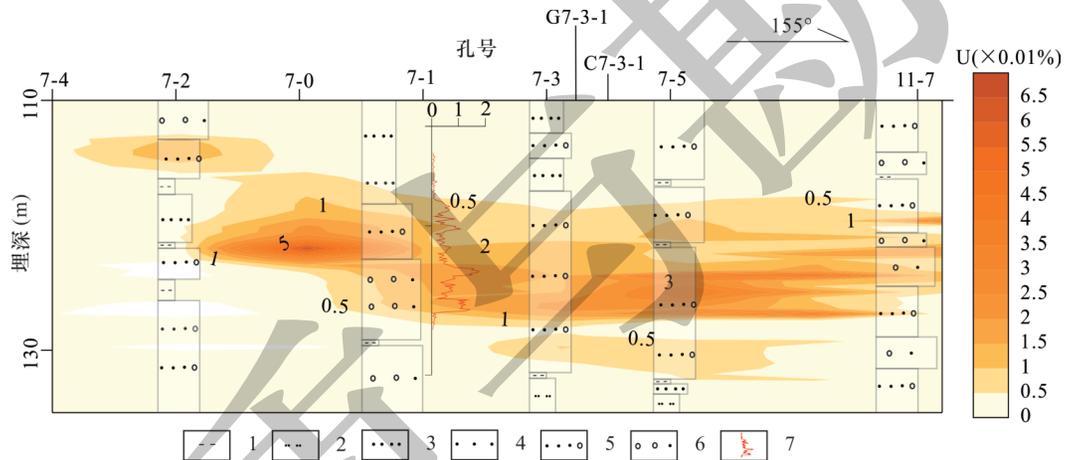


图5 芒来铀矿床L7勘探线测井反演铀含量分布图

Fig. 5 Distribution of uranium elements along the exploration line No. L7 of the Manglai uranium deposit

1-泥岩;2-粉砂岩;3-细砂岩;4-中砂岩;5-含砾中砂岩;6-含砾粗砂岩;7-测井反演铀含量曲线
 1-mudstone; 2-siltstone; 3-fine sandstone; 4-medium sandstone; 5-sandstone with gravel; 6-coarse sandstone with gravel; 7-uranium content curve for logging inversion

富集在L7-1和L7-5钻孔的底部,U有从南东向北西迁移的趋势。

(2)南部和北部矿体K_p(铀镭平衡系数)分布的垂向分布规律差异性比较大。南部矿体B11勘探线的K_p呈层状分布,和层状分布的炭化植物碎屑关系密切;北部矿体L7勘探线的K_p呈双卷状分布,说明存在南东和北西的双向氧化。

(3)基于伽马测井数据五点式反褶积U含量分布规律,南部矿体B11勘探线的U分布体具有卷状矿体的特征,而北部矿体L7勘探线的U分布体具有板状矿体的特征。

6 结论

(1)由于松散砂岩的钻探水平和放射性样品采取的局限性,样品数据克里格法网格可以判断铀矿体中铀镭平衡的垂向分布趋势,由此判断氧化流体的运移方向以及氧化强弱,B11勘探线铀镭平衡特征分具有五层分布的规律,L7勘探线铀镭平衡特征分具有两侧偏镭的规律,对砂岩铀矿预测勘探部署提供依据。

(2) γ 测井数据通过五点式反褶积法反演铀含量,系统计算每个深度上的铀含量,通过克里格法

插值,全面系统刻画剖面铀含量和深度的变化规律,B11勘探线和L7勘探线U、Ra分布具有卷状的特点,可推测铀矿体形态和内部铀富集规律。

(3)提出新的刻画铀镭平衡垂向分布规律和铀矿化体形态的方法,以及样品数据和测井数据的克里格法插值在芒来铀矿床中的应用,对于研究砂岩型铀矿的形成机制和地浸开采工程部署均具有重要意义。

[References]

- An Yongkai, Lu Wenxi, Dong Haibiao. 2014. Surrogate model of numerical simulation model of groundwater based on Kriging[J]. *China Environmental Science*, 34(4): 1073-1079 (in Chinese with English abstract).
- Ding Bo, Liu Hongxu, Zhang Bin, Yi Chao, Liu Hongjun, Wang Gui, Ren Zhiyong. 2020. The formation mechanism of tabular orebody of sandstone type uranium in the northern Ordos Basin: Constraints on the study of kaolinite content from different zones of ore-bearing sandstone [J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(10): 2874-2882 (in Chinese with English abstract).
- Dou Bei, Zhang Bimin, Wang Xueqiu. 2021. Experiment of prospecting sandstone-type uranium deposits by deep-penetrating geochemistry in the Erlian Basin, Inner Mongolia [J]. *Geology and Exploration*, 57(2): 380-391 (in Chinese with English abstract).
- Feng Zhibing, Nie Fengjun, Xia Fei, Li Mangen, Jiang Li, Zhang Hujun, Yan Zhaobin, Zhang Chengyong, Zhang Xin. 2021. Discussion on the shapes and their genesis of ore body in sandstone-type uranium deposits [J]. *Uranium Geology*, 37(6): 981-990 (in Chinese with English abstract).
- Jing Guoqiang, Wu Qun, Wang Teng. 2021. Sedimentary system of the second lithologic member of Xishanyao Formation and its control on uranium mineralization in the north Shihongtan uranium deposit, Turpan-Hami Basin [J]. *Uranium Geology*, 37(6): 1001-1012 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Tiao, Wu Lielei, Wu Jianong, Liu Guoan. 2016. Character of uranium-radium equilibrium coefficient in Zhutongjian uranium deposits of Xiazhuang ore field in northern Guangdong [J]. *Uranium Geology*, 32(5): 309-314 (in Chinese with English abstract).
- Liu Bo, Yang Jianxin, Qin Yanwei, Qiao Peng, Zheng Feng. 2016. Research on the ore-controlling genetic facies of the sandstone type uranium deposits in the paleovalley of Saihan Formation of the Erlian Basin [J]. *Geology and Exploration*, 52(6): 1037-1038 (in Chinese with English abstract).
- Liu Guoan, Qiao Peng, Kang Shihu, Peng Ruiqiang, Ren Xiaoping, Huang Qiangfu. 2020. Study on the relationship of sand-body heterogeneity to uranium mineralization in Manglai deposit, Erlian Basin [J]. *Uranium Geology*, 36(5): 373-381 (in Chinese with English abstract).
- Liu Haiying. 2010. A study on application of multiple kriging methods in solid mineral reserve estimation [D]. Beijing: China University of Geosciences: 1-58 (in Chinese with English abstract).
- Liu Zhaoping, Yang Jin, Wu Wei. 2010. The choice of gridding methods for geophysical data [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 34(1): 93-97 (in Chinese with English abstract).
- Ma Zhanjun, Wang Xiaodong. 2011. A tentative discussion on the application of deconvolution method to the interpretation of γ logging data in the granite-type uranium deposit [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 35(5): 630-633 (in Chinese with English abstract).
- Qi Tianjiao, Li Xide, Liu Xu, Lv Yonghua, Xu Bixia. 2020. Geochemical characteristics of the hosting rocks in Manglai sandstone-type uranium deposit, Erlian Basin [J]. *Uranium Geology*, 36(5): 362-372 (in Chinese with English abstract).
- Qin Yanwei. 2022. Characteristics of paleo-valley oxidation zone and uranium mineralization of Lower Cretaceous Saihan Formation in Basaiqi area, Erlian Basin [D]. Changchun: Jilin University: 1-207 (in Chinese with English abstract).
- Shi Shuqin, Cao Qiwen, Li Guozheng, Li Jianliang, Xu Hengzhou, Yang Peng, Wu Wenbin. 2014. Cokriging and kriging estimations on soil nutrients at regional scale [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 28(5): 109-114 (in Chinese with English abstract).
- Tan Yulei. 2021. Research on the vertical spatial zoning and ore-bearing layers recognition of sandstone uranium deposit—A case study of the Daying uranium deposit in northern Ordos Basin [D]. Changchun: Jilin University: 1-138 (in Chinese with English abstract).
- Tang Bin. 2008. Study and application on field theory of borehole and methods of sibivisin interpretation for nuclear logging [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology: 1-69 (in Chinese with English abstract).
- Wang Dianxue, Yu Shuiquan, Huang Xiao. 2023. Review and prospect of gamma logging technology in China [J]. *Uranium Geology*, 39(1): 124-132 (in Chinese with English abstract).
- Wang Dongyang. 2022. Study on radioactive separation of uranium ore based on deconvolution method [D]. Nanchang: East China University of Technology: 1-89 (in Chinese with English abstract).
- Wang Wei, Huang Yulong, Liu Bo, Qin Yanwei, Yan Xiaobo, Dong Xushu, Hao Peng. 2019. Application of CSAMT method and soil radon measurement in survey for sandstone-type uranium deposits: An example of the Bayinhanggai area, Inner Mongolia [J]. *Geology and Exploration*, 55(2): 1241-1249 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaodong, Chen Qing, Wang Xingming, Hu Peng. 2020. Methodology on γ logging interpretation of granite-type uranium ores in South China [J]. *Geology and Exploration*, 56(4): 759-765 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yongpeng, Chen Jianping, Tang Bin. 2012. Subdivision interpretation to measure the contents of uranium and other radiorelements based on a gamma spectra log during uranium exploration [J]. *Tsinghua University (Natural Science Edition)*, 52(4): 527-531 (in Chinese with English abstract).
- Xia Yuliang, Xiu Qunye, Han Jun, Li Linqiang, Zheng Jiwei. 2013.

- Study on U-Ra equilibrium coefficient of the in-situ leaching sandstone-type uranium deposits—A case study of Qianjiadian uranium deposit[J]. Uranium Geology, 29(2):93-97 (in Chinese with English abstract).
- Yan Guanfa, Du Baili, Zhang Dongyou, Zhang Yuwei, Ye Huaxiang, Jing Weiwei. 2015. Comparison of prediction accuracies of contents of suspended solids by remote sensing inversion and kriging spatial interpolation at Harbin section of Songhua River [J]. Wetland Science, 13(2): 184-189 (in Chinese with English abstract).
- Yang Chonggen. 2021. Petrogeochemical characteristics and genesis of Manglai uranium deposit in Erlian Basin [D]. Nanchang: East China University of Technology: 1-122 (in Chinese with English abstract).
- Yu Bing, Wang Changdong, Yu Honglong. 2022. Application of complex detection quantity in uranium prospecting in Chaomifang area in the southern section of Daxing'an Mountains [J]. Geology and Exploration, 58(5): 1070-1081 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Ye. 1990. Radioactive method exploration [M]. Beijing: Atomic Press: 224-258 (in Chinese).
- Zhao Xigang, Tian Fawang, Li Jian. 2002. Study on geophysical parameters in reserves calculation of in-situ leachable sandstone-type uranium deposits [J]. Uranium Geology, 18(3): 93-97 (in Chinese with English abstract).
- [附中文参考文献]
- 安永凯, 卢文喜, 董海彪, 罗建男. 2014. 基于克里格法的地下水流数值模拟模型的替代模型研究[J]. 中国环境科学, 34(4): 1073-1079.
- 窦备, 张必敏, 王学求. 2021. 内蒙古二连盆地砂岩型铀矿深穿透地球化学扫面技术的应用[J]. 地质与勘探, 57(2): 380-391.
- 丁波, 刘红旭, 张宾, 易超, 刘洪军, 王贵, 任志勇. 2020. 鄂尔多斯盆地北缘砂岩型铀矿板状矿体形成机制: 来自含矿层不同分带砂岩中高岭石含量研究的约束[J]. 地质学报, 94(10): 2874-2882.
- 封志兵, 聂逢君, 夏菲, 李满根, 江丽, 张虎军, 严兆彬, 张成勇, 张鑫. 2021. 砂岩型铀矿的矿体形态特征及其成因探讨[J]. 铀矿地质, 37(6): 981-990.
- 姜涛, 吴烈勤, 吴建勇, 刘国安. 2016. 粤北下庄矿田竹筒尖铀矿床铀镭平衡系数特征探讨[J]. 铀矿地质, 32(5): 309-314.
- 荆国强, 伍群, 王腾. 2021. 吐哈盆地十红滩铀矿床北带西山窑组第二岩性段沉积体系对铀成矿的控制作用[J]. 铀矿地质, 37(6): 1001-1012.
- 刘兆平, 杨进, 武伟. 2010. 地球物理数据网格化方法的选取[J]. 物探与化探, 34(1): 93-97.
- 刘波, 杨建新, 秦彦伟, 乔鹏, 张锋. 2016. 二连盆地中东部赛汉组古河谷砂岩型铀矿床控矿成因相研究[J]. 地质与勘探, 52(6): 1037-1047.
- 刘国安, 乔鹏, 康世虎, 彭瑞强, 任晓平, 黄镗俯. 2020. 二连盆地芒来矿床砂体的非均质性与铀成矿关系研究[J]. 铀矿地质, 36(5): 373-381.
- 刘海英. 2010. 多种克里格方法在固矿储量估算中的应用研究[D]. 北京: 中国地质大学: 1-58.
- 马战军, 王小冬. 2011. 反褶积法在花岗岩型铀矿床伽马测井资料解释中的几点认识[J]. 物探与化探, 35(5): 630-633.
- 齐天骄, 李西得, 刘旭, 吕永华, 许碧霞. 2020. 二连盆地芒来铀矿赋矿砂岩地球化学特征[J]. 铀矿地质, 36(5): 362-372.
- 秦彦伟. 2022. 二连盆地巴赛齐地区下白垩统赛汉组古河谷氧化带特征与铀成矿[D]. 长春: 吉林大学: 1-207.
- 石淑芹, 曹祺文, 李正国, 许恒, 周杨鹏, 吴文斌. 2014. 区域尺度土壤养分的协同克里格与普通克里格估值研究[J]. 干旱区资源与环境, 28(5): 109-114.
- 汤彬. 2008. 钻孔 γ 场理论与核测井分层解释方法研究与应用[D]. 成都: 成都理工大学: 1-69.
- 谭雨蕾. 2021. 砂岩型铀矿空间垂向分带方法与含铀层识别研究[D]. 长春: 吉林大学: 1-138.
- 吴永鹏, 程建平, 汤彬. 2012. 铀矿 γ 能谱测井铀等多元素含量分层解释法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 52(4): 527-531.
- 王伟, 黄玉龙, 刘波, 秦彦伟, 颜小波, 董续舒, 郝朋. 2019. CSAMT与土壤氡气测量在砂岩型铀矿勘查中的应用: 以内蒙古巴音杭盖地区为例[J]. 地质与勘探, 55(5): 1241-1249.
- 王小冬, 陈婧, 王兴明, 胡鹏. 2020. 华南花岗岩型铀矿 γ 测井解释方法的应用研究[J]. 地质与勘探, 56(4): 759-765.
- 王冬阳. 2022. 基于反褶积法的铀矿石放射性分选方法研究[D]. 南昌: 东华理工大学: 1-89.
- 王殿学, 余水泉, 黄笑. 2023. 我国 γ 测井技术发展的回顾与展望[J]. 铀矿地质, 39(1): 124-132.
- 夏毓亮, 修群业, 韩军, 李林强, 郑纪伟. 2013. 地浸砂岩型铀矿床铀-镭平衡系数研究及其地质意义[J]. 铀矿地质, 29(2): 93-97.
- 烟贯发, 杜百利, 张冬有, 张羽威, 叶华香, 景伟伟. 2015. 松花江哈尔滨段悬浮物含量遥感反演与克里格插值预测精度对比[J]. 湿地科学, 13(2): 184-189.
- 杨崇根. 2021. 二连盆地芒来铀矿床岩石地球化学特征及矿床成因探讨[D]. 南昌: 东华理工大学: 1-122.
- 于兵, 王常东, 余弘龙. 2022. 综合物探测量在大兴安岭南段炒米房地区铀矿勘查中的应用[J]. 地质与勘探, 58(5): 1070-1081.
- 章晔. 1990. 放射性方法勘查[M]. 北京: 原子能出版社: 224-258.
- 赵希刚, 田发旺, 李继安. 2002. 可地浸砂岩型铀矿储量计算中的物探参数研究[J]. 铀矿地质, 18(3): 93-97.

Vertical Distribution Patterns of the U, Ra and U-Ra Equilibrium Coefficient for Sandstone Uranium Ores Based on the Kriging Method: An Example from the Manglai Uranium Deposit in Erlian Basin

WANG Wei¹, WU Zhengqian¹, XIONG Pan², LIU Kunpeng¹, HUANG Qiangfu², WANG Xiaopeng¹

(1. Research Institute No. 203, CNNC, Xi'an, Shaanxi 710086; 2. Geological Party No. 208, CNNC, Baotou, Inner Mongolia 014010)

Abstract: Sandstone-type uranium ore is an important green and economically recoverable energy ore type, which is one of the important types of uranium exploration in the world. The ore bodies of the Manglai uranium deposit in the Erlian Basin and Nalingou deposit in Ordos Basin generally display a tabular shape, and the genesis of these tabular uranium orebodies has attracted much attention. This work aims to study the vertical distribution patterns of U, Ra and K_p (uranium-radium equilibrium coefficient) within the sandstone-type uranium ore bodies in the Manglai uranium deposit of Erlian Basin. The kriging interpolation method with high grid precision was adopted to study the vertical distribution law of U, Ra and K_p , and radioactive samples and the five-point inverse fold accumulation method of quantitative gamma log were utilized to inverse the U content. Then the U content in the sandstone ore body was finely delineated by the kriging method. Results show that the tabular ore bodies in the Manglai deposit display rolled characteristics, and the distribution patterns of K_p can indicate the transport direction of oxygenated uranium-containing water as well as the strength of oxidation. This study will aid to study the morphology of uranium ore bodies, and is of great significance for understanding the uranium ore formation law and subsequent in-situ leaching mining.

Key words: kriging, sandstone-type uranium ores, U, Ra and U-Ra equilibrium coefficient (K_p), five-point inverse fold method, vertical distribution pattern, Manglai uranium deposit, Erlian Basin

