

地热场与深部铀矿的关系研究及应用

李庆阳¹ 蔡惠蓉² 陈彦²

(1.成都理工大学信息工程学院,四川成都610059;2.四川省核工业地质调查院,四川成都610061)

摘要:根据地热学原理,本文从放射性元素富集程度、铀矿石产热数值模拟和地热资料铀矿信息识别等方面较深入地研究了地热与深部铀矿的关系,采用热红外遥感资料在若尔盖地区进行试验。结果表明,深部铀矿与地热场的分布有密切关系,可利用地热资料指导深部铀矿勘查。

关键词:地热;深部铀矿;模型

中图分类号: P314.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2010)01-0198-06

人们注意到,大凡盛产铀矿的地方,特别是与热液活动有关的铀矿床,一般伴随大量的热泉、温泉或高温围岩蚀变等地热异常分布。地热异常与深部铀矿有何联系?能否利用地热资料指导深部铀矿勘查?为此,在开展四川省若尔盖深部铀矿勘查工作中,笔者开展了地热场与深部铀矿关系的专题研究,本文介绍这一研究成果。

1 放射性元素富集程度与地层产热的关系

根据地热学经典理论,地表热的显示主要由三部分构成:来自地球内部地幔热量、地壳岩石中放射性元素衰变产热和太阳的地表辐照增温,一般用热流 q (W/m^2)来表征。来自地幔和地壳岩石的热流称为大地热流(q_s),大地热流是指单位时间内地热从壳幔深部垂直向上,通过地表单位面积向大气散发的热量,反映地质体所经受的热历史和壳幔深部热活动的强度。 q_s 一般由地幔热流 q_m 和地壳岩石放射性元素产生的热量 q_c 组成,即

$$q_s = q_m + q_c \quad (1)$$

据文献研究^[1],地幔热流 q_m 占60%~70%以上,地

壳岩石放射性岩石产热 q_c 占30%~40%,岩石产热与岩石中的放射性元素含量有如下关系:

$$A = \rho \times (3.6 \times K + 9.7 \times U + 2.65 \times Th) \times 10^{-8} \quad (2)$$

其中 ρ 为岩石的密度(t/m^3), K, U, Th 分别为岩石中放射性钾、铀、钍的含量(K 的单位为%, U 和 Th 的单位为 10^{-6}), A 为岩石的产热源率(有的文献称为热辐射率),单位是 W/m^3 。从(2)式中可看出,岩石中钾、铀、钍越富集,岩石的产热率越大,其中尤以岩石的铀元素贡献最大,约占50%。放射性元素的富集程度,特别是铀元素的富集程度决定着地层产热率的大小。

在地壳中,岩石产热率 A 是一个随深度增加而变化的函数,目前有3种模型(图1)。地区研究表明,垂向放射性元素的指数递减分布模式与实际情况最为接近,并与地壳中放射性元素分布的地球化学资料统计结果相一致。即:

$$A(Z) = A(0) \exp(-z/D) \quad (3)$$

式中, z 为地下距离地表的深度(km), $A(0)$ 为地表($z=0$)岩矿石的产热率; D 是一个表征地壳产热元素变化的特征物理量。对于指数分布的热源, D

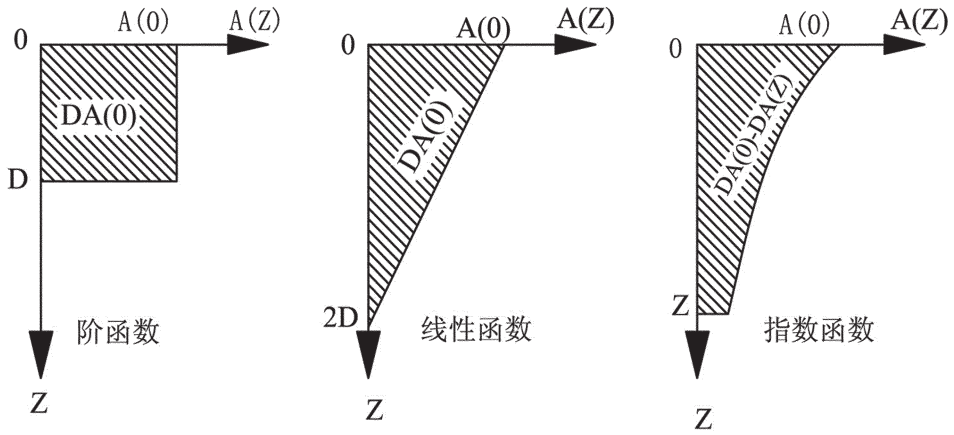


图 1 3 种热源分布模型(据 A.H.Lachenbruch 1970)

Fig.1 Three kinds of heat source distribution models (after A.H.Lachenbruch, 1970)

值的大小可用下列公式求得。

$$q_e = \int_0^D A(z) dz \tag{4}$$

将上式代入(1)式,则有:

$$q_s = qm + \int_0^D A(0) \exp(-z/D) dz = (e-1) \times D \times A(0) / e$$

$$\text{所以, } D = e \times (q_s - qm) / [(e-1) \times A(0)] \tag{5}$$

式中, $e \approx 2.71828$, 为自然常数, D 的量纲是 m 。

在地热理论中, D 值的大小与地壳分异程度的高低有关。 D 值越小, 地壳分异程度越高, U 、 Th 等放射性元素趋于集中在地壳上部; 反之, D 值越大, 地壳分异程度越低, 放射性元素愈分散。由于 D 值的这一特点, 被称之为地壳放射性元素集散度。

由式(5)可见, D 与地壳热流成正比, 与放射性元素产热率成反比。由此说明, D 值越小, 放射性元素越富集, 产生的热量越大。所产热量将直接叠加在区域地热场, 从而引起地热的重新分布, 说明放射性元素的富集程度与地热场分布有密切的关系。

2 铀矿体产热数值模拟分析

放射性元素富集到一定程度 (按当前工业指标 1×10^{-4} 以上) 即为矿体, 一般指放射性铀矿 (下称“铀矿体”)。铀矿体产热的对地热场分布影响有何特征? 这是应用之前必须解决的问题, 在地球物理勘探学上称之为正演问题。可采用边界单元数值模拟法求解。一般情况下, 温度函数 $T(x, y, z)$ 的热传递定解

问题:

$$\nabla^2 T(x, y, z) = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -A(x, y, z) / K \tag{6}$$

$$T(x, y, z) | \Gamma_1 = T_0 \tag{7}$$

$$\frac{\partial T(x, y, z)}{\partial n} | \Gamma_2 = q / K \tag{8}$$

其中 $A(x, y, z)$ 是生热率分布函数, K 为热导率, q 为大地热流。设计如图 2 所示的放射性元素产热模型, 采用边界单元法数值模拟^[2], 计算时取 $K_2/K_1=2$, $h/H=0.5$; 底部热流取为 35 mW/m^2 , A 取常数 1, 计算结果如图 3:

从计算结果可以看出, 因热源的存在对地热空间分布产生了明显的影响, 在热源处引起热场畸变,

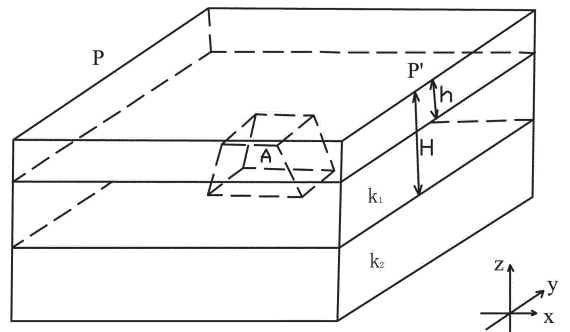


图 2 铀矿体产热计算模型

Fig.2 The computation model for heat production of the uranium ore body

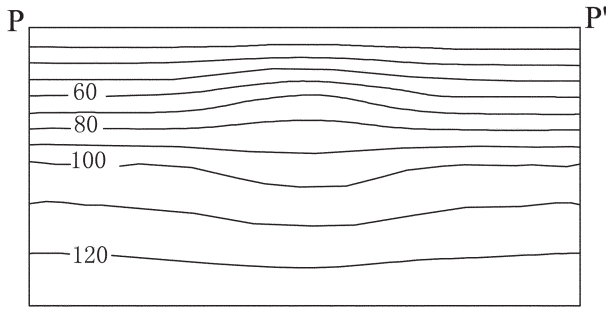


图3 图2所示模型及计算结果

Fig.3 Computation result of the model in Fig.2

这是铀矿体产热的一个本质特征，即在热源所在空间附近地温梯度产生陡变。铀矿体可等同于一个热源。由此可以得出结论，在地面得到的视大地热流图上，深部铀矿在地表的投影位置与等值线图上梯度变化带相对应。从而，从理论上证明，可利用地热资料寻找深部铀矿。现今最为便利的地热资料是热红外遥感数据，为此，本文研究了热红外遥感资料中铀矿信息的识别问题。

3 热红外遥感资料中铀矿信息识别

地面的任何热显示可被太空探测器观测到。热红外遥感(以下简称热红外 R_s)是飞行一定高度的太空探测器观测到的地表热辐射,包括3部分:一是大地热流的辐射能 q_s ,其中 $q_s=q_m+q_c$;二是太阳照射引起的穿过云层辐射的上行辐射能 q_a^+ ;三是云层反射各种辐射并下到地面后反射辐射能 q_a^- ,如图4和式(9)所示。

$$q=q_m+q_c+q_a^++q_a^- \tag{9}$$

由于同一个成矿区(或构造区称为热流省),其中 q_m 是一个常数,引起地面热流值 q_s 变化的主要是 q_c ,即地壳岩石放射性产热的变化。从正演研究可知,铀矿化与大地热流的局部变化有密切关系,地壳中放射性元素产热,特别是铀矿化元素产热是大地热流的主要构成成分。如果能从热红外 R_s 数据中识别并提取 q_c 或 q_s ,就可获取深部铀矿化的信息。从热红外 R_s 数据识别并提取深部铀矿化的信息就是基于这一原理。

现今可获取的热红外数据主要有两类,一是 Landsat 的 ETM6,二是 NOAA-AVHRR 遥感数据。其中 Landsat ETM6 探测波长 $10.4\sim 12.5\ \mu\text{m}$,其地面

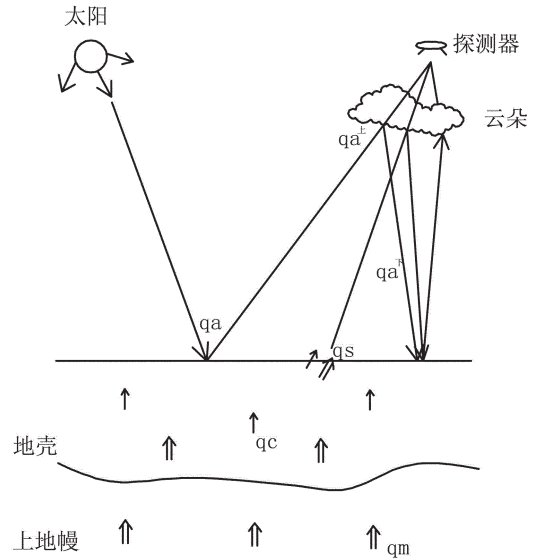


图4 热红外 R_s 辐射能构成示意图

Fig.4 Sketch diagram of the composition of geothermal infrared data

分辨率为 $60\text{ m}\times 60\text{ m}$,比 NOAA-AVHRR 的地面分辨率 $1.1\text{ km}\times 1.1\text{ km}$ 高得多,所以本文采用 Landsat ETM6 热红外遥感数据研究本区铀矿化信息。

ETM6 数据以灰度值 Dn (Digital number)表示,数值为 $0\sim 255$,数值越大,表示地表热辐射强度越大,反之亦然。由 Dn 计算辐射强度的公式为:

$$q=q_{\min}+(q_{\max}-q_{\min})\times \frac{Dn}{255} \tag{10}$$

式中 q 为 ETM6 遥感器所接收到的辐射强度,辐射强度为 q_{\min} 、 q_{\max} 为其最小、最大值,分别是 $q_{\min}=32\text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $q_{\max}=126.5\text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$,因此(10)式可简化为:

$$q=32+0.370588Dn(i=0,1,2,\dots,n) \tag{11}$$

q 的单位是 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$,与大地热流的量纲一致,显然这个 q 并不能等同于真正意义的大地热流数据,为便于区分和使用,本文沿用地球物理勘探习惯定义方法,将 q 定义为“视大地热流”。

我们已经知道, q_s 和 q_m 的频谱具有较长波长或低频率的特性,而 q_a^+ 或 q_a^- 具有高频短波特性,利用这一特性就有可能识别和提取热红外 R_s 数据中大地热流信息,利用大地热流评判深部铀矿信息。按频谱理论,可采用数值处理方法分离 q_s 与 q_a^+ 和 q_a^- ,进而分离局部异常,提取与深部铀矿信息有关的大地

热流 q_s 和 q_c 信息。

4 应用效果

若尔盖铀矿田西段位于秦—祁—昆活动带南部南秦岭华力西—印支褶皱带西段南缘,地处四川、甘肃毗邻地区,行政区划隶属于四川省阿坝州若尔盖县北部,位于 $102^{\circ}43'00''\sim 102^{\circ}53'39''E, 34^{\circ}12'00''\sim 34^{\circ}15'00''N$,长 16 km,宽 5.6 km,面积约 86 km^2 ,前人工作已发现 4 个中小型铀矿床和一批铀矿化点。本文选用若尔盖地区的 ETM6 热红外遥感数据,成像时间 2000 年 8 月 12 日,正值中夏、当日少云,对其进行处理分析,研究其中的深部铀矿弱信息,归纳总结其特征。

从一维热红外 R_s 数据图可见,曲线跳跃,是难以做出地质解释的。采用小波变换 Mallat 算法逐步将剖面的热红外 R_s 分解成不同尺度的异常成分 $A1-A_n, D1-D_n$,图 5 为 bior3.7 小波的分解图。其中 A_n 表示波长大于 $2n$ 个采样点距的低频趋势部分,反映的是视大地热流的变化规律, D_n 代表波长介于 $2(n-1)$ 个采样点距的细节成分,反映的是热噪声。从 $A1-A3$ 逐渐表现出大的趋势,而逐渐抑制或剔除了细节成分,可以明显地看出与铀矿有关的信息的提取过程。在已知铀矿点的对应位置,如埡口和

罗军沟 II-3 地段,均与梯度变化大而且陡部位相对应,说明铀矿化引起了地热分布的变化,在 $A3$ 和 $D3$ 上有一个显著的异常峰与之对应,这是原始曲线上难以显示的。

从二维热红外 R_s 数据分析,本文分别选用了多重小波参数对原始地热数据进行了小波分解,图 6 为 DB10 函数的 4 阶分解图:

D 图表示对角线方向的细节成分,反映的是两个方向的高频特征, V 图表示竖直方向的细节成分,反映高频水平方向低频的特征, H 图表示水平方向的细节成分, A 图则反映了研究区地热变化的总体趋势。从 A 图看出,地热特征总体为西高东低,主要矿点则均分布在地热高值向低值过渡的梯度带上,构造带基本沿地热的等值线延伸, H 图则对研究区内的北东向及北西向的构造特征反映比较好,二维图比一维图更明显地突出了地热梯度变化与铀矿化的关系。

按照以上地热与铀矿化的关系特征,笔者在位于热场陡梯度带上的地段设计了钻探工程(图 7),探查埋深 500~1000 m 的深部铀矿体,发现了盲矿 2 层。在深达 810~880 m 处探视厚 8.9 m,铀平均品位 0.38% 的富厚矿体。此举破除了以往钻探工程仅在 500 m 以浅见矿的局面,使该地段的铀资源量累计

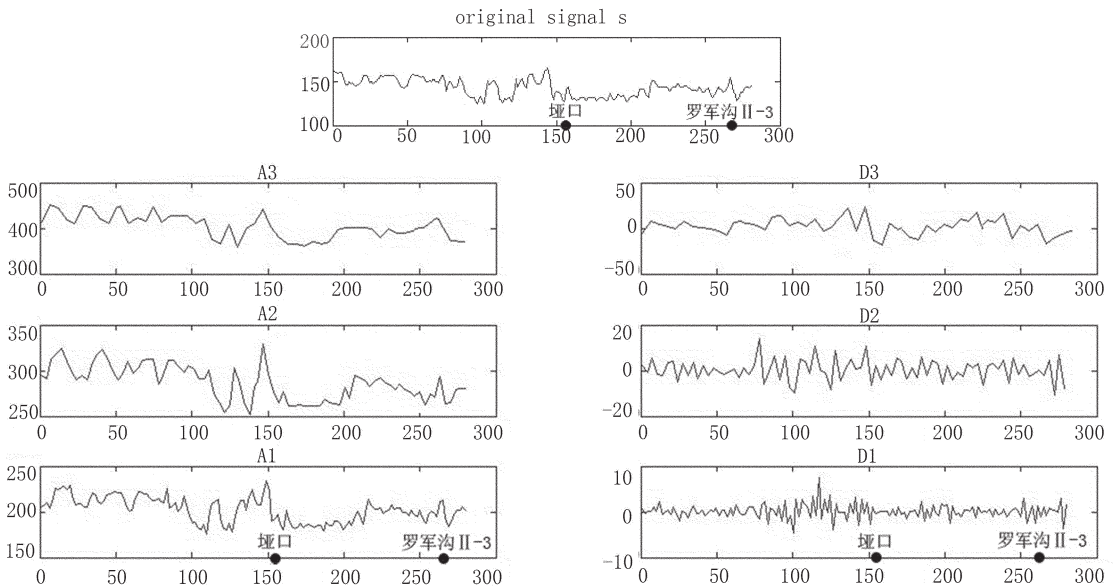


图 5 地热数据一维分解图
(D 为细节系数, A 为近似系数)

Fig.5 1-D wavelet decomposition of geothermal infrared data
(D for detail coefficients, A for approximation coefficient)

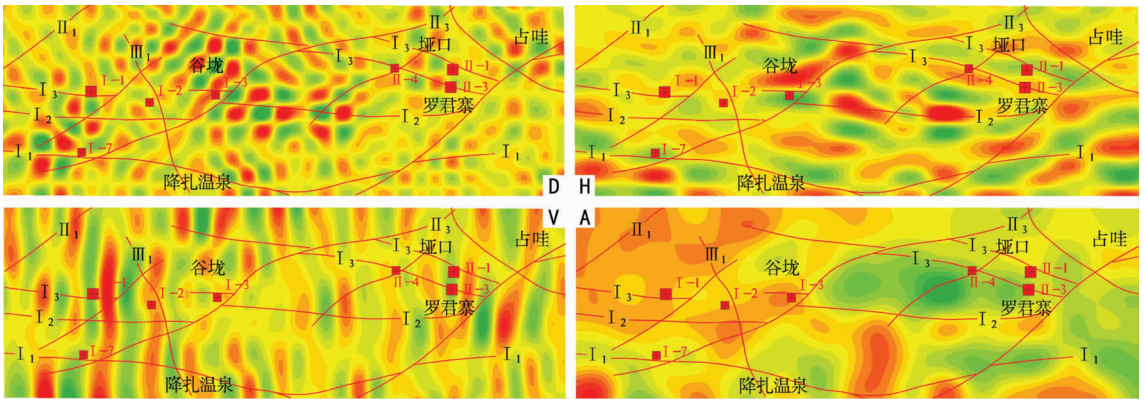


图 6 地热数据二维分解图
(D 为对角线方向细节, V 为垂直方向细节, H 为水平方向细节, A 为低频系数)

Fig.6 2-D wavelet decomposition of geothermal infrared data

(D for diagonal detail coefficients, V for vertical detail coefficients, H for horizontal detail coefficients, A for low-frequency coefficient)

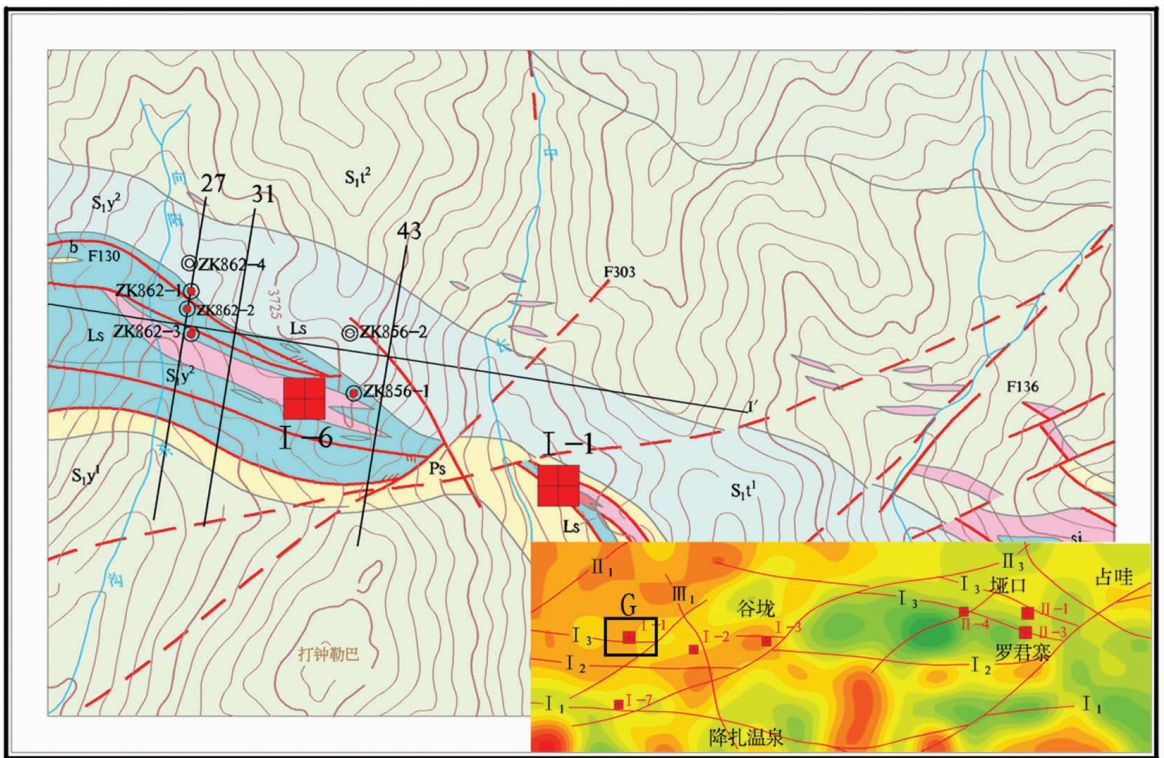


图 7 若尔盖 G 矿段工程布置图
Fig.7 Project layout plan for G ore block in Zoige

达到大型铀矿床,且矿体尚未封底,可延伸至千米以下。验证了地热梯度变化与铀矿对应的结论。

5 结论及建议

总之,根据对地热场分布与深部铀矿正反两方

面的分析证明,地表放射性元素的富集程度与地热场的分布有着密切的关系,深部铀矿与地表地热等值线图上的梯度变化带相对应,可以利用地热资料指导深部铀矿的勘查。

从一维小波变换与二维小波变换的结果对比可

以看出,地热场与深部铀矿的对应关系在平面图上反映效果比在剖面图上好,这主要和剖面上的数据相对比较稀疏有关。

参考文献 (References):

- [1] 中科院地热室编. 矿山地热概论[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1981.
Chinese Academy of Sciences Geothermal Room. Introduction to Mine Geothermal [M]. Beijing:China Coal Industry Publishing House, 1981(in Chinese).
- [2] 李庆阳. 四川盆地深部地热特征研究[D]. 成都地质学院硕士学位

论文, 1992.

- Li Qingyang. The Study of Deep Geothermal Features in Sichuan Basin [D]. Master Thesis of Chengdu Geology Institute, 1992 (in Chinese with English abstract).
- [3] 覃志豪, Zhang Minghua, Arnon Karnieli 等. 用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法[J]. 地理学报, 2001, 56(4):461-466.
Qing Zhihao, Zhang Minghua, Arnon Karnieli, et al. Mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM6 data [J]. Acta Geographica Sinica, 2001, 56 (4):461-466 (in Chinese with English abstract).

The study and application of the relationship between the geothermal field and the deep uranium ore deposit

LI Qing-yang¹, CAI Hui-rong², CHEN Yan²

(1. College of Information Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Sichuan Institute of Nuclear Geology, Chengdu 610061, China)

Abstract: Based on the principle of geothermy, this paper studied the relationship between the geothermal field and the deep uranium ore deposit in such aspects as the enrichment of radioactive elements, the numerical simulation of the heat production of uranium ore deposit and the uranium information identification from geothermal data. Some experiments were conducted in Zoige area by using the thermal infrared remote-sensing method. The results show that the message of deep uranium ore deposit is closely related to the geothermal distribution, and the geothermal data can be used in search for deep uranium ore deposits.

Key words: geothermal resource; deep uranium ore deposit; model

About the first author: LI Qing-yang, male, born in 1964, senior engineer, doctor candidate, specializes in the study of technology for earth exploration and information; E-mail: lqysun@vip.163.com.