

# 航空 $\gamma$ 能谱测量地形校正方法研究

刘秋实<sup>1</sup> 张庆贤<sup>1</sup> 杨海<sup>2</sup> 熊盛青<sup>2</sup> 葛良全<sup>1</sup> 肖鸿飞<sup>1</sup> 熊茂淋<sup>1</sup>  
米耀辉<sup>2</sup> 张建<sup>1</sup> 陈瑞<sup>1</sup>

1(成都理工大学 成都 610059)

2(中国自然资源航空物探遥感中心 北京 100083)

**摘要** 航空 $\gamma$ 能谱测量是一种通过在飞行器上安装 $\gamma$ 能谱仪测量地表 $\gamma$ 核素活度(比活度)的方法,测量结果准确度受飞行高度、地形起伏等因素的影响。目前,在航空 $\gamma$ 能谱定量分析中常用高度校正来减小飞行高度的影响,但在地形起伏较大的测区,高度校正的效果并不理想。根据数字高程模型和辐射场分布的基本特性,提出了一种基于离散积分的三维地形校正方法。在地形校正过程中将航空 $\gamma$ 能谱仪对地有效探测区域划分为微小网格地表单元,并计算微小单元对航空 $\gamma$ 能谱全能峰计数率贡献,通过离散积分计算地形校正系数,实现对测量结果的地形校正。将该方法应用于实际航空 $\gamma$ 能谱数据处理的结果表明:基于离散积分的三维地形校正方法能够提高航空 $\gamma$ 能谱测量结果的准确性,并与地面测量结果一致,方法具有快速划分网格、同时实现高度校正和地形校正等优点。

**关键词** 航空 $\gamma$ 能谱测量, 地形校正, 高度校正, 反演

**中图分类号** P631.6

**DOI:** 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.090503

## Research on terrain correction method of airborne $\gamma$ spectrometry

LIU Qiushi<sup>1</sup> ZHANG Qingxian<sup>1</sup> YANG Hai<sup>2</sup> XIONG Shengqing<sup>2</sup> GE Liangquan<sup>1</sup> XIAO Hongfei<sup>1</sup>  
XIONG Maolin<sup>1</sup> MI Yaohui<sup>2</sup> ZHANG Jian<sup>1</sup> CHEN Rui<sup>1</sup>

1(Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

2(China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China)

**Abstract** [Background] Airborne gamma spectrometer is a method to measure ground gamma nuclide activity (specific activity) by installing gamma spectrometer on aircraft. The accuracy of results is affected by flight altitude and terrain fluctuation. At present, altitude correction has been applied to the quantitative analysis of airborne gamma spectrometer, but the correction effect of altitude correction on areas with large terrain fluctuation is not desirable. [Purpose] This study aims to propose a 3D terrain correction method based on discrete integral. [Methods] First of all, the basic characteristics of digital elevation model (DEM) and radiation field distribution were analyzed. Then, the effective detection area of airborne gamma spectrometer was divided into micro grid surface elements, and the contribution of micro elements to the counting rate of full energy peak of the airborne gamma spectrum was calculated. The terrain correction coefficient by discrete integral was realized by the terrain correction of airborne

国家重点研发计划(No.2017YFC0606100)、国家自然科学基金(No.41774190)资助

第一作者: 刘秋实, 男, 1997年出生, 2019年毕业于成都理工大学, 现为硕士研究生, 核科学与技术专业

通信作者: 张庆贤, E-mail: shinecore@163.com

收稿日期: 2021-05-20, 修回日期: 2021-06-11

Supported by the National Key Research and Development Program of China (No.2017YFC0602100), National Natural Science Foundation of China (No.41774190)

First author: LIU Qiushi, male, born in 1997, graduated from Chengdu University of Technology in 2019, master student, major in nuclear science and technology

Corresponding author: ZHANG Qingxian, E-mail: shinecore@163.com

Received date: 2021-05-20, revised date: 2021-06-11

gamma spectrum measurement results, and the accuracy of airborne gamma spectrum measurement results was simultaneously improved. Finally, verification of this method was performed on the measured airborne gamma-ray spectrum data processing. [Results] Verification results show that the influence of terrain on gamma spectrum data is corrected effectively by the proposed method. [Conclusions] The 3D terrain correction method based on discrete integral can improve the consistency between airborne gamma spectrum measurement results and ground measurement results, and has the advantages of fast mesh division, altitude and terrain correction simultaneous.

**Key words** Airborne gamma-ray spectrometry survey, Terrain correction, Height correction, Inversion

航空 $\gamma$ 能谱探测技术是将 $\gamma$ 能谱仪搭载于飞行器上,在飞行过程中 $\gamma$ 能谱仪记录地表介质和大气中放射性核素释放的 $\gamma$ 射线,通过能量解析和定量反演地表介质和大气中放射性核素活度(比活度)<sup>[1-4]</sup>。因此,可根据航空 $\gamma$ 能谱测量结果分析地表的铀、钍、钾的分布异常,为寻找放射性矿床提供依据<sup>[5]</sup>。同时,航空 $\gamma$ 探测技术也广泛应用于辐射环境监测、油气普查以及核应急监测等<sup>[6-10]</sup>。

航空 $\gamma$ 能谱定量反演过程中,需要开展一系列的校正,包括飞机本底和宇宙射线扣除、大气氡校正、散射本底剥离和高度校正<sup>[11-12]</sup>。其中高度校正为了消除飞行高度对测量结果的影响,其前提条件是测区地形较为平坦且无限大的辐射体,测量立体角近似为 $2\pi$ ,所以高度校正方法只能适用于平原或戈壁等地形较为平坦的地区。对于地形起伏较大的山区,在山顶处探测立体角小于 $2\pi$ ,校正结果偏低;在凹谷处立体角大于 $2\pi$ ,校正结果偏高。因此需要进行地形校正以减小地形变化带来的影响<sup>[13-14]</sup>。随着航空 $\gamma$ 探测技术的不断发展与完善,前人开展针对地形校正的研究。万骏等<sup>[13]</sup>结合数字地形模型(Digital Terrain Model, DTM)并应用矩形辐射体航空 $\gamma$ 辐射场理论提出了一种按响应角度进行地形校正的方法,通过实例验证表明该方法能够基本消除航空 $\gamma$ 能谱测量中的地形起伏产生的影响。范正国等<sup>[15]</sup>提出了一种基于二维地形影响系数的航空 $\gamma$ 能谱测量地形逐点改正方法进行地形校正。万建华等<sup>[16]</sup>提出了一种针对二维条件下任意地形且在任意飞行方式下的地形逐点校正方法。但是二维地形校正只考虑了沿测线方向的地形影响,没有考虑垂直测线方向上的地形变化,因此针对复杂地形时,二维地形校正依然存在许多局限性。刘艳阳等<sup>[6]</sup>提出了一种三维扇形校正方法,通过将探测范围的地形辐射体按角度划分为若干环形,计算对应的地形改正系数,从而实现地形校正。白云峰<sup>[17]</sup>提出了一种基于Google Earth的航空 $\gamma$ 三维地形校正技术,其仍然采用逐点校正,一次只能对一个探测点进行校正。随着DEM技术的发展和DEM数据精度提高,为实现精细化航空 $\gamma$ 能谱地形校正奠定了基础。目

前DEM的精度高于0.5 m,能够完全满足航空 $\gamma$ 能谱地形需求。本文提出了一种基于离散积分的三维地形校正方法,该方法结合DEM模型计算微小单元对航空 $\gamma$ 能谱全能峰计数率贡献,通过离散积分计算地形校正系数,根据地形校正系数实现对复杂地形的高度校正与面积校正。

## 2 地形校正理论基础

$\gamma$ 射线在地质岩层中的穿透厚度有限,约为1 m<sup>[2]</sup>,因此可近似将航空 $\gamma$ 测量的能谱看作地表放射性核素对探测器的贡献。如图1所示,若点O为探测点,则图中 $ds$ 微小地质单元中放射性核素对航空 $\gamma$ 能谱测量全能峰计数的贡献为:

$$dN(h,d) = \frac{A \cdot \eta}{4\pi L^2} e^{-\mu L} \cdot \varepsilon$$

$$dN(h,d) = \frac{\dot{A} \cdot ds \cdot \eta}{4\pi \cdot (h^2 + d^2)} e^{-\mu\sqrt{(h^2 + d^2)}} \cdot \varepsilon \quad (1)$$

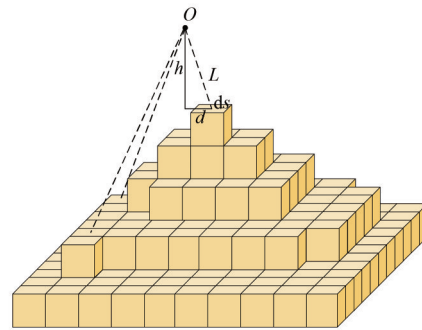


图1 航空 $\gamma$ 能谱积分示意图  
Fig.1 Schematic diagram of airborne gamma spectrum integration

式中: $A$ 为地面放射性核素的活度, $Bq$ ;  $\dot{A}$ 为地面单位面积放射性核素活度, $Bq \cdot m^{-2}$ ;  $ds$ 为微元面积, $m^2$ ;  $\eta$ 为放射性核素特征 $\gamma$ 射线发射几率; $h$ 为探测点到地面的垂直距离, $m$ ;  $d$ 为微元到探测点投影到地面点的距离, $m$ ;  $\mu$ 为 $\gamma$ 射线在物质中的衰减系数, $m^{-1}$ ;  $\varepsilon$ 为探测器本征效率。在航空 $\gamma$ 能谱测量中,探测器与微小地质单元之间的距离为100 m以上,此时探测器可以视为点探测器,故本征效率受射线入射角

度影响可以忽略,不同角度的本征效率为常数。则探测器的计数率为:

$$N = \int_s \frac{A \cdot \eta}{4\pi \cdot (h^2 + d^2)} e^{-\mu\sqrt{h^2 + d^2}} \cdot \varepsilon ds \quad (2)$$

但在对复杂地形进行测量时,根据式(2)直接求解时存在某些区域不可积分的情况,根据辐射场叠加原理,任何形状的辐射源都可视为若干有限元的叠加,因此将式(2)离散化,根据实际地形图,对有效测量范围根据面积进行有限元的划分,在有限元内将地形视为平面,有限元中的放射性物质的含量相同,则式(2)可表示为:

$$N = \sum N_i(h_i, d_i) = \sum_{i=0}^a \sum_{j=0}^b \frac{A \cdot \eta}{4\pi \cdot (h_{ij}^2 + d_{ij}^2)} \cdot e^{-\mu \cdot \sqrt{h_{ij}^2 + d_{ij}^2}} \cdot \varepsilon \quad (3)$$

式中: $h_{ij}$ 为探测点相对于有限元中心点的高度, $m$ ; $d_{ij}$ 为探测点相对于有限元中心点的水平距离, $m$ ; $\eta$ 为特征能量 $\gamma$ 射线的发射几率; $\mu$ 为K、U、Th特征 $\gamma$ 射线对应的空气线衰减系数, $m^{-1}$ ; $A$ 为有限元内放射性物质的活度, $Bq$ ; $a$ 为划分有限元行数; $b$ 为划分有限元的列数。

将 $N$ 与平坦地面有限元在探测点的粒子注量 $N_p$ 进行比较,得到探测点的高度校正系数 $\lambda$ ,如下式所示:

$$\lambda = \frac{N}{N_p} = \frac{\sum_{i=0}^a \sum_{j=0}^b \frac{1}{4\pi \cdot (h_{ij}^2 + d_{ij}^2)} \cdot e^{-\mu\sqrt{h_{ij}^2 + d_{ij}^2}}}{\sum_{i=0}^a \sum_{j=0}^b \frac{1}{4\pi \cdot (h_{p_{ij}}^2 + d_{p_{ij}}^2)} \cdot e^{-\mu\sqrt{h_{p_{ij}}^2 + d_{p_{ij}}^2}}} \quad (4)$$

式中: $h_{p_{ij}}$ 为探测点相对于平面的高度,根据航空 $\gamma$ 能谱规范, $h_p$ 应取120 m; $d_{p_{ij}}$ 为探测点相对于平面中心点的水平距离。

在实际航空 $\gamma$ 能谱测量中,地形的变化直接导致的是探测面积与高度的变化,如果只是将平面面积进行有限元离散化,则离散化后的探测面积同实际的有效测量面积不相符,所以需要进行面积校正,面积校正示意图2(a)所示,将有限元近似面面积修正为有效探测面积,即根据有效探测面积与平面面积的比值进行面积校正,其面积校正系数 $v$ 为:

$$v = \frac{S_x}{S_p} = \frac{1}{\cos\theta} \quad (5)$$

式中: $S_x$ 为实际作用面面积; $S_p$ 为有限元近似面积; $\theta$ 为有效探测面与平面的夹角。

同时,在航空 $\gamma$ 实际测量的区域的地形往往都是比较复杂的,地表放射性核素发射的 $\gamma$ 射线会存在被岩体遮挡的情况,而 $\gamma$ 射线在土壤、岩石等物质中的射程有限,所以在进行地形校正时需要考虑岩

体遮挡因素。图2(b)中 $O$ 点为能谱仪, $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 分别为4个有限元,比较能谱仪与有限元之间的各个有限元的高程,若某有限元( $B$ 、 $C$ )的高程小于该连线上其他有限元高程,则令该有限元对能谱仪的贡献为0。

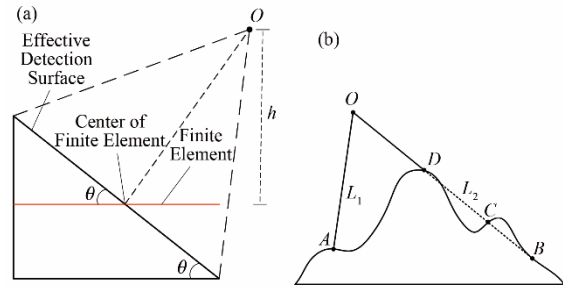


图2 面积校正(a)与地形遮挡(b)示意图

Fig.2 Schematic diagram of area correction (a) and terrain occlusion (b)

最终地形校正时需要对每个有限元的贡献乘以该有限元面积校正系数得到地形校正系数:

$$\delta = \frac{\sum_{i=0}^a \sum_{j=0}^b \frac{1}{4\pi \cdot (h_{ij}^2 + d_{ij}^2)} \cdot \cos\theta_{ij} \cdot e^{-\mu\sqrt{h_{ij}^2 + d_{ij}^2}}}{\sum_{i=0}^a \sum_{j=0}^b \frac{1}{4\pi \cdot (h_{p_{ij}}^2 + d_{p_{ij}}^2)} \cdot e^{-\mu\sqrt{h_{p_{ij}}^2 + d_{p_{ij}}^2}}} \quad (6)$$

得到基于离散积分的三维地形校正公式:

$$N_0 = \frac{N}{\delta} \quad (7)$$

最终含量计算公式为:

$$Q_K = \frac{R_{KS}}{\varepsilon_K} \cdot \frac{1}{S_K} \quad (8)$$

$$Q_U = \frac{R_{US}}{\varepsilon_U} \cdot \frac{1}{S_U} \quad (9)$$

$$Q_{Th} = \frac{R_{ThS}}{\varepsilon_{Th}} \cdot \frac{1}{S_{Th}} \quad (10)$$

式中: $Q_K$ 、 $Q_U$ 、 $Q_{Th}$ 分别为钾、铀、钍的含量,分别用%、 $10^{-6}$  eU、 $10^{-6}$  eTh表示; $R_{KS}$ 、 $R_{US}$ 、 $R_{ThS}$ 分别为经飞机本底扣除、宇宙射线本底扣除、剥离修正和大气氦校正后K道、U道、Th道的计数率; $\frac{1}{S_K}$ 、 $\frac{1}{S_U}$ 、 $\frac{1}{S_{Th}}$ 分别为钾、铀、钍在空中120 m的灵敏度系数;式中选用 $h_{p_{ij}}=120$  m。

### 3 地形校正方法实现

#### 3.1 网格化数字高程

获取测区DEM数据是进行地形校正的关键,DEM数据精度直接决定有限元划分的大小。本文

使用 BIGEMAP 地图下载器获取测区高程数据,将得到的高程数据导入 Global Mapper 即可提取高程并生成特定格式的文本文件。在地形校正处理过程中,以每个测点为中心进行有限元划分,每个测点对应 $9 \times 9$ 个有限元,每个有限元面积为 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ ,总有限元面积为 $450 \text{ m} \times 450 \text{ m}$ ,有限元划分如图3所示,其中E5为测量点正下方的对应点。获取每个有限元高度,利用飞机飞行海拔减去该高度即可作为式(6)中 $h_{i,j}$ 值。

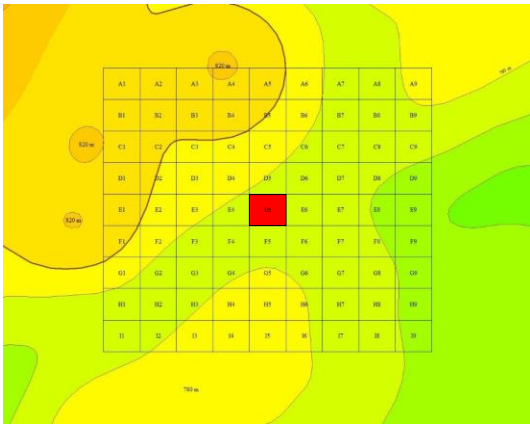


图3 单个测点有限元划分

Fig.3 Finite element partition of single measuring point

### 3.2 并行数据处理方法

为了更快捷计算地形校正系数以及核素含量,本文利用微软开发工具包 Visual Studio 使用 C# 与 C++ 编程语言编写了地形校正软件。软件基本流程如图4所示。

但在一次航空 $\gamma$ 能谱测量中会得到大量的能谱

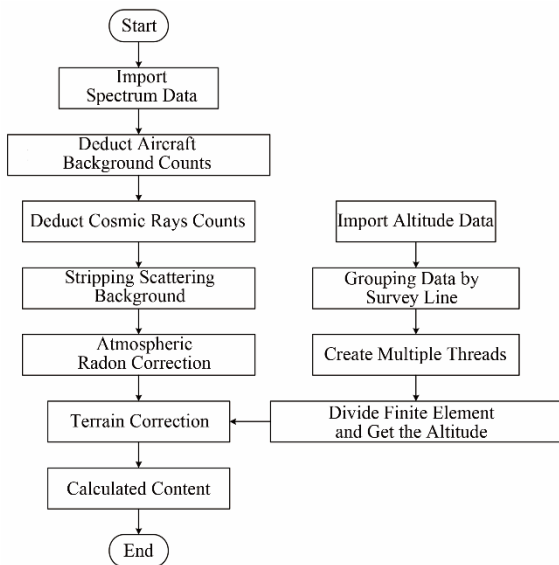


图4 软件计算流程

Fig.4 Calculation flow of the software

数据,若程序采用默认的单线程处理数据,在进行测点有限元划分以及计算地形校正系数时会花费大量的时间,所以在编写程序时需要引入多线程处理数据的方法。其基本原理是将能谱数据按照每条测线一组进行划分,为每组数据计算分别创建一个线程,从而实现对能谱数据多线程并行处理,大幅减少数据计算时间。

## 4 数据分析

### 4.1 地形对航空 $\gamma$ 能谱影响

为了简单直观地评价基于离散积分的三维地形校正方法的效果,本文建立了一个具有凹、凸地形的特殊模型,如图5(a)所示,该模型上均匀分布着活度为 $2\,000 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ 的放射性核素 $^{238}\text{U}$ (假设达到放射性衰变平衡)。根据航空 $\gamma$ 能谱测量规范<sup>[11]</sup>,假设航空 $\gamma$ 能谱仪的本征探测效率为5%,以 $100 \text{ m}$ 的飞行高度沿地形起伏飞行,正演得到探测器空中计数率分布如图5(b)所示。根据正演模型,分别使用常规高度校正与基于离散积分的三维地形校正方法,反演得到地面核素活度分布图,如图5(c)、(d)所示。

从图5(b)可以看出,在核素分布均匀的情况下,空中测量值随着地形的起伏而变化。图5(c)是利用常规高度校正方法反演得到的地面核素含量结果,其最大值为 $2\,176 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ ,最小值为 $1\,838 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ ,标准差为 $35 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ ,反演结果与地面含量模型有较大的差异,即在凹地形处出现相对高值异常,在凸地形处出现相对低值异常,说明地形对航空 $\gamma$ 能谱测量的异常值有较大的影响,若不进行地形校正,将出现放射性核素含量的假异常现象。按照基于离散积分的三维地形校正方法得到的结果如图5(d)所示,其最大值为 $2\,027 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ ,最小值为 $1\,999 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ ,标准差为 $6 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ ,该地形校正方法能有效消除地形对数据的影响,校正后得到的反演结果更接近预设的放射性核素含量。

### 4.2 实测地形校正

本文实测使用的航空 $\gamma$ 能谱仪共有8条尺寸为 $40 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 的NaI(Tl)下测晶体。直升机垂直于山脉走向、沿东南向西北方向进行航测,如图6所示,飞行高度为 $80 \sim 120 \text{ m}$ ,飞行速度约为 $72 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,采样速率为每秒1次。测区高程如图6所示。

在测量过程中,同时采用便携式 $\gamma$ 能谱仪进行地面查证,得到地表能谱测量结果。文中将航空 $\gamma$ 能谱测量高度校正数据、地形校正数据和地面能谱测量数据进行对比,以验证校正方法的效果。图7

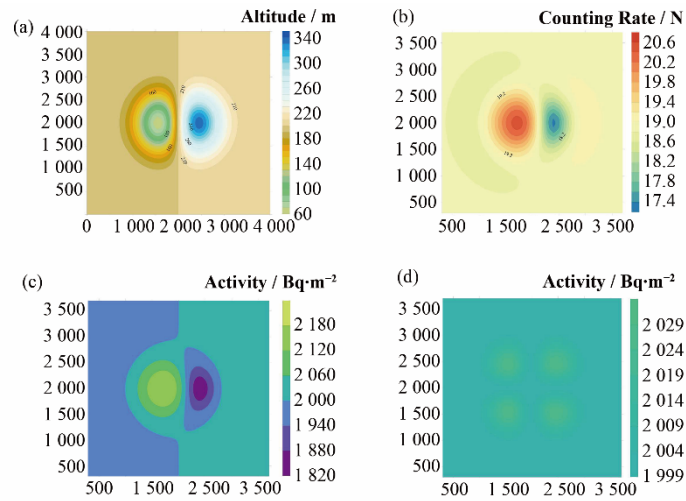


图5 正演与反演结果图 (a) 地形, (b) 探测器计数率分布图, (c) 高度校正反演结果, (d) 地形校正反演结果  
Fig.5 Forward and inversion results (a) Terrain, (b) Count rate, (c) Result by height correction, (d) Result by terrain correction

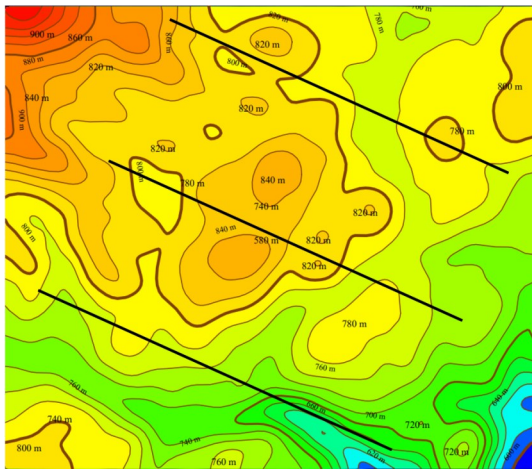


图6 航空γ能谱测量测区示意图  
Fig.6 Schematic diagram of airborne gamma spectrometry survey area

给出了Line2060号测线能谱数据通过基于离散积分的三维地形校正方法与高度校正方法处理后反演得到的放射性核素K、U、Th含量剖面平面图。从图7中可以看出,经地形校正后的航空γ能谱数据求得含量与地面能谱结果大致对应,且变化趋势基本一致。计算地形校正后K、U、Th含量与地面测量数据之间的Pearson相关系数分别为0.68、0.65、0.48。而只经高度校正的航空γ能谱剖面数据变化平稳,没有明显的相对高、低值点,与地面测量数据之间的Pearson相关系数分别为0.60、0.24、0.41,不能准确反映出核素含量的变化趋势。但由于航空γ能谱测量的探测等效半径约为飞行高度的4倍,一般在300~400 m,而地面γ能谱的探测范围为1~2 m,故利用两种探测方法所测得的结果代表性会有所不同,得到的结果会存在一定差异。

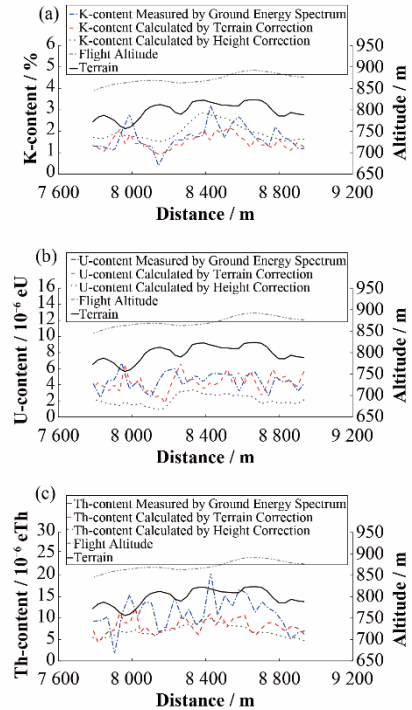


图7 Line2060测线放射性核素含量剖面对比图  
(a) K含量对比, (b) U含量对比, (c) Th含量对比  
Fig.7 Comparison of radionuclide content profiles of Line2060  
(a) K content comparison, (b) U content comparison, (c) Th content comparison

绘制测区核素含量等值线平面图,如图8所示。地面测量K、U、Th含量平均值分别为1.76%、 $5.01 \times 10^{-6}$  eU、 $11.26 \times 10^{-6}$  eTh,经地形校正K、U、Th含量分别为1.57%、 $4.46 \times 10^{-6}$  eU、 $8.44 \times 10^{-6}$  eTh,经高度校正K、U、Th含量分别为2.01%、 $2.16 \times 10^{-6}$  eU、 $7.07 \times 10^{-6}$  eTh,地形校正结果相对于高度校正结果更接近地面测量值。分析地面测量K含量等值线图,测区

西南至西北方向以及东北、东南角均存在相对高值区域(图8(a)中1、2、3区域),测区中部则为相对低值区域(图8(a)中4区域),经地形校正K含量等值线图(图8(b))中反映出的相对高、低值区域基本与地面测量结果对应。同样可以看出地面U含量相对高值区域分布在测区西北与东北角(图8(d)中1、2区域),相对低值区域分布在测区中部(图8(d)中3、4区域),Th含量相对高值区域分布在西南至西北方向(图8(g)中1区域),经地形校正后U、Th含量数据也基本与地面结果对应。图8(c)是仅进行常规高度校正得到各核素含量等值线图,可以看出,高度校正后核素含量分布是相对均匀的,而这种均匀化分布会将一些异常信息掩盖,不能真实反映出核素分布

情况。上述地形校正含量与地面测量含量数据同样存在一定差异,造成这种差异的原因主要有以下几点:

1)航空 $\gamma$ 能谱测量与地面能谱测量所测区域代表性不同;

2)本文所给出的地形校正方法是假设 $\gamma$ 能谱仪相对测量点静止的情况下提出,而得到的能谱是飞机运动时测得的,未考虑探测器在x方向和y方向上速度带来的影响;

3)为了减少计算时间,本文地形校正时划分有限元尺寸为50 m $\times$ 50 m,划分精度较低,导致地形校正结果与地面含量存在一定差异,若要提高计算精度,则需要划分更密的有限元。

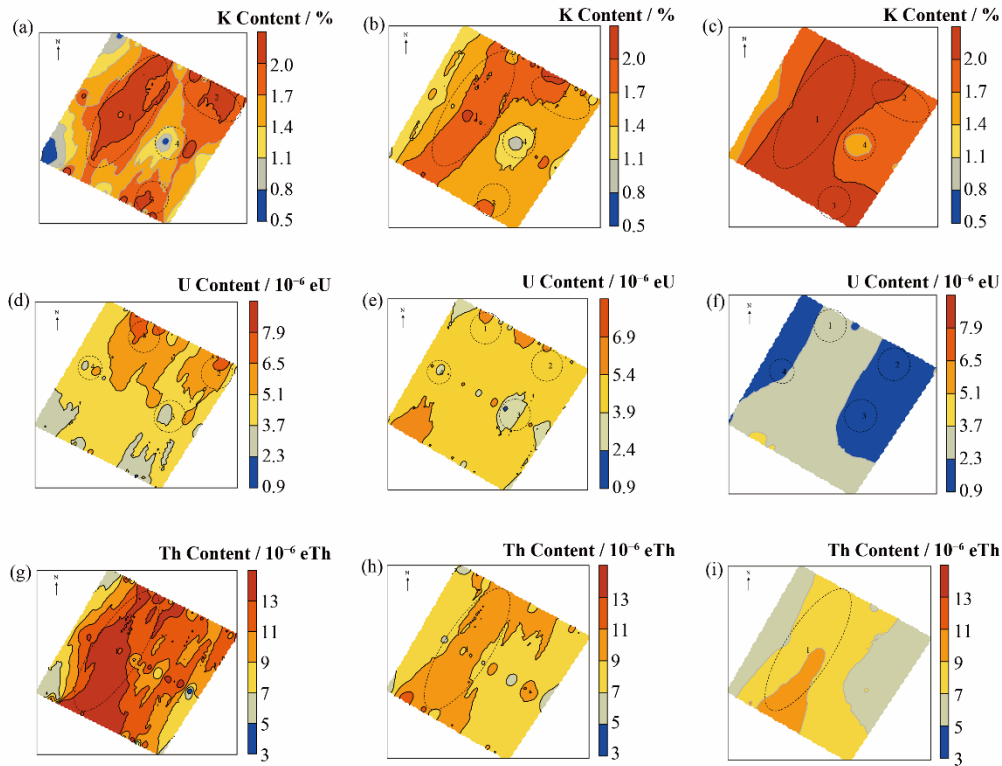


图8 K/U/Th含量等值线图

(a~c) 地面能谱测量、经地形校正和经高度校正K含量,(d~f) 地面能谱测量、经地形校正和经高度校正U含量,(g~i) 地面能谱测量、经地形校正和经高度校正Th含量

Fig.8 K/U/Th content contour map

(a~c) K-content measured by surface energy spectrum, calculated by terrain correction and by height correction, (d~f) U-content measured by surface energy spectrum, calculated by terrain correction and by height correction, (g~i) Th-content measured by surface energy spectrum, calculated by terrain correction and by height correction

## 5 结语

本文提出了一种基于离散积分的三维地形校正方法,该方法结合DEM,将航空 $\gamma$ 能谱仪对地有效探测区域划分为微小网格地表单元,计算微小单元对航空 $\gamma$ 能谱全能峰计数率贡献,通过离散积分计算地形校正系数,根据地形校正系数实现在复杂地形

下的航空 $\gamma$ 能谱测量结果的地形校正,提高航空 $\gamma$ 能谱测量结果的准确性,具有网格划分速度快、可同时实现高度和地形校正等优点。结果表明:基于离散积分的三维地形校正方法能够很大程度地校正地形对能谱数据的影响,提高航空 $\gamma$ 能谱测量结果同地面测量结果的一致性。

本文地形校正数据与地面数据仍然存在一定差异,在以后的研究中需要增大有限元划分密度,寻找一个提高校正效果且节约计算时间的平衡点。同时,由于该地形校正方法是在假设航空 $\gamma$ 能谱仪相对与测点静止的情况下进行的,但实际测量过程中能谱仪是运动的,所以还需要考虑能谱仪相对于测点的变化,对地形校正结果造成的影响以提高校正效果。

## 参考文献

- Minty B, Brodie R. The 3D inversion of airborne gamma-ray spectrometric data[J]. Australian Society of Exploration Geophysicists (ASEG), 2015, 47(2): 150 - 157. DOI: 10.1071/EG14110.
- 葛良全,熊盛青,曾国强,等. 航空伽马能谱探测技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016. DOI: 10.11720/wtyht.2012.3.12.  
GE Liangquan, XIONG Shengqing, ZENG Guoqiang, *et al.* Airborne gamma energy spectrum detection technology and application[M]. Beijing: Science Press, 2016. DOI: 10.11720/wtyht.2012.3.12.
- 葛良全, 曾国强, 赖万昌, 等. 航空数字 $\gamma$ 能谱测量系统的研制[J]. 核技术, 2011, 34(2): 156-160.  
GE Liangquan, ZENG Guoqiang, LAI Wanchang, *et al.* The development of a digital airborne gamma-ray spectrometry[J]. Nuclear Techniques, 2011, 34(2): 156-160.
- 孙坤. 航空伽玛能谱异常信息增强与重建技术[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.  
SUN Kun. Airborne gamma ray spectrum anomaly information enhancement and reconstruction technology [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.
- 成都地质学院. 放射性勘探方法[M]. 北京: 原子能出版社, 1978.  
Chengdu Institute of Geology. Radioactive exploration methods[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1978.
- 刘艳阳, 刘庆成, 张志勇. 航空 $\gamma$ 能谱测量三维地形改正方法初探[J]. 铀矿冶, 2008, 27(4): 216 - 220. DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2008.04.013.  
LIU Yanyang, LIU Qingcheng, ZHANG Zhiyong. Research on 3-D terrain correction methods of airborne gamma-ray spectrometry survey[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2008, 27(4): 216 - 220. DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2008.04.013.
- 张庆贤. 航空 $\gamma$ 能谱特征和仪器谱解析方法研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2010.  
ZHANG Qingxian. The character of airborne gamma-ray spectrometry and the method for spectrum analysis[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010.
- 戴丽君, 王平. 任丘油田南部航空伽马能谱测量找油效果[C]. 1990年中国地球物理学会第六届学术年会论文集, 武汉, 1990: 381.  
DAI Lijun, WANG Ping. Effect of airborne gamma ray spectrometry on oil exploration in southern Renqiu Oilfield[C]. The sixth Annual Meeting of Chinese Geophysical Society in 1990, Wuhan, 1990: 381.
- Martin P, Tims S, McGill A, *et al.* Use of airborne gamma-ray spectrometry for environmental assessment of the rehabilitated narbarlek uranium mine, Australia[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2006, 115 (1 - 3): 531 - 554. DOI: 10.1007/s10661-006-7244-y.
- 倪卫冲, 蔡文军, 高国林. 航空 $\gamma$ 能谱探测人工放射性核素检测限研究[J]. 核技术, 2018, 41(10): 100202. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.100202.  
NI Weichong, CAI Wenjun, GAO Guolin. Study of the detection limit of manmade radionuclide detected by airborne gamma ray spectrometry[J]. Nuclear Techniques, 2018, 41(10): 100202. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.100202.
- 国防科学技术工业委员会. EJ/T 1032-2006: 航空伽玛能谱测量规范[S]. 2005.  
Commission of Science, Technology and Industry for National Defense. EJ/T 1032-2006: Specification for airborne gamma spectrometry measurement[S]. 2005.
- IAEA. Airborne gamma ray spectrometric surveying[R]. VIENNA, 1991.
- 万骏, 刘庆成, 于长春, 等. 复杂地形条件下航空伽玛能谱地形改正方法探讨[J]. 地球物理学报, 2004, 47(2): 344 - 348.  
WAN Jun, LIU Qingcheng, YU Changchun, *et al.* A study on the method of terrain correction for airborne gamma-ray spectrometry under complex conditions[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(2): 344 - 348.
- 万建华, 熊盛青, 范正国. 航空伽马能谱测量方法技术现状与展望[J]. 物探与化探, 2012, 36(3): 386 - 391. DOI: 10.11720/wtyht.2012.3.12.  
WAN Jianhua, XIONG Shengqing, FAN Zhengguo. The status and prospects of airborne gamma-ray spectrometry technology and its application[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2012, 36(3): 386 - 391. DOI: 10.11720/wtyht.2012.3.12.
- 范正国, 于长春. 航空伽马能谱地形改正新方法及应用

- [J]. 物探与化探, 2005, **29**(1): 28 - 30, 33.
- FAN Zhengguo, YU Changchun. A new terrain correction technique in air-borne gamma-ray spectrometer survey and its application[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2005, **29**(1): 28 - 30, 33.
- 16 万建华, 熊盛青, 范正国. 航空伽玛能谱数据地形改正方法对比研究及其应用[J]. 地球物理学进展, 2011, **26**(2): 641 - 646. DOI: 10.3969/j. issn. 1004-2903.2001.02.032.
- WAN Jianhua, XIONG Shengqing, FAN Zhengguo. The comparative study to terrain correction method of airborne gamma-ray spectrometry and its application[J]. Progress in Geophysics, 2011, **26**(2): 641 - 646. DOI: 10.3969/j.issn.1004-2903.2001.02.032.
- 17 白云峰. 基于 Google Earth 的航空伽玛三维地形校正技术研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- BAI Yunfeng. Three-dimensional terrain airborne gamma correction software based on Google Earth[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.