

基于 GOCAD 软件的沙子江铀矿床三维定量预测*

耿瑞瑞¹, 范洪海^{1**}, 孙远强¹, 夏宗强¹, 孙雨鑫¹, 俞嘉嘉², 陈东欢¹

(1 核工业北京地质研究院, 北京 100029; 2 东华理工大学, 江西 南昌 344001)

摘要 文章采用 GOCAD 软件构建了沙子江铀矿床的三维地质模型, 包括岩体模型、构造模型以及矿体模型等, 利用其强大的空间分析模块进行地质体、构造、不同岩性接触界面、地球物理场等三维空间属性的统计分析及成矿信息提取, 并通过序贯高斯模拟的插值方法建立了沙子江铀矿床矿体品位的三维属性模型, 进而揭示铀矿化的空间分布规律。通过对成矿地质条件、控矿要素以及地球物理异常特征识别标志等铀成矿有利信息的提取, 建立了沙子江铀矿床的定量预测模型。基于三维信息量法成矿预测方法, 计算各预测要素的成矿有利区间, 圈定 7 片找矿有利靶区, 为将来的钻探工程部署及深部铀矿找矿突破提供依据。

关键词 地质学; GOCAD 软件地质学; 多元铀成矿信息提取; 三维地质建模; 铀成矿定量预测; 沙子江铀矿床
中图分类号: P619.14 **文献标志码**: A

3D quantitative prediction of Shazijiang uranium deposit based on GOCAD software

GENG RuiRui¹, FAN HongHai¹, SUN YuanQiang¹, XIA ZongQiang¹, SUN YuXin¹,
YU JiaJia² and CHEN DongHuan¹

(1 Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China; 2 East China University of Technology, Nanchang 344001, Jiangxi, China)

Abstract

GOCAD software was used to construct a three-dimensional geological model of the Shazijiang uranium deposit in this paper, including rock mass model, tectonic model and orebody model. Based on spatial statistical analysis of geological bodies, structures, contact interfaces and geophysical fields, the authors obtained significant mineralization information for the uranium deposit, and then further established a three-dimensional property model of uranium grade by the interpolation method of sequential Gaussian simulation so as to reveal their spatial distribution regularity. Combined with various kinds of information related to uranium mineralization, such as metallogenic geological conditions, ore-controlling factors and geophysical anomaly identification, the authors established a quantitative prediction model for the Shazijiang uranium deposit. In addition, seven potential targets were predicted in this study by assessment of each ore-forming condition using the three-dimensional prospecting information method, which would provide a guideline for future drilling project and prospecting breakthrough of deep uranium orebodies in this region.

Key words: geology, GOCAD software, mineralization information extraction, 3D geological modeling, quantitative prediction, Shazijiang uranium deposit

* 本文得到中核集团集中研发项目“南方重点花岗岩型铀矿基地资源预测与扩大”(编号:LTD1602)和中核集团产研结合研究项目“华南富大铀矿空间定位条件与远景预测研究”(编号:202035-6)联合资助

第一作者简介 耿瑞瑞,女,1987生,博士研究生,矿产普查与勘探专业。Email:grsunshine1987@163.com

** 通讯作者 范洪海,男,1963生,高级工程师(研究员级),博士生导师,岩石地球化学专业。Email:fhh270@263.net

收稿日期 2020-03-20;改回日期 2020-11-16。赵海杰编辑。

随着地表矿产已消耗殆尽,寻找隐伏矿产的任务越来越迫切,由于传统二维找矿技术的局限性,给找矿勘查带来难度,因此,地质勘查领域迎来了新的挑战,需要引入新方法、新技术。近几年随着“数字地球”理念的提出以及实践的深化(Gore, 1998),对地球深部探索更加深入,传统的二维图件受维数限制,对地质体、断层以及矿体之间的空间耦合关系不易表达清晰,三维地质建模(Houlding, 1994)则弥补其弊端,其以计算机为平台实现三维可视化(Smirnoff et al., 2008; Kostic et al., 2007; Sprague et al., 2006),由此三维地质建模技术得到广泛应用。三维可视化技术获得突飞猛进的发展,并在数学地质领域中得到越来越广泛地应用。在地质勘查领域,传统的数字定量评价体系是基于二维的地质资料信息,在信息提取和融合等方面存在缺陷。

在寻找深部盲矿体方面,基于三维可视化-定量预测技术的三维地质建模技术是基础(陈建平等, 2007),更是核心,关系到预测结果的可靠性。三维地质模型是多种信息数据的集合体,是地质体数字化的表达过程,主要包括地质、地球化学、地球物理、钻孔等,其目的是构建数字化的矿床模型(Wang et al., 2011a; Yang et al., 2017),实现三维可视化,并为地质变量的多参数叠加分析提供基础模型,为深部矿产定量预测提供基础。

本文以苗儿山矿田豆乍山地区的沙子江铀矿床为研究对象,利用GOCAD软件,建立该矿区三维地质模型,结合前人总结的成矿地质条件和控矿要素(李妩巍, 2016),通过三维空间属性场的信息分析提取,建立定量预测模型(向杰等, 2020),基于三维信息量法计算成矿有利区间(史蕊等, 2014),并圈定找矿有利靶区,以期对下一步铀矿勘查工作部署提供依据。

1 研究区地质概况

沙子江铀矿床属华南地区典型的花岗岩型铀矿田-苗儿山铀矿田(石少华等, 2010),其大地构造位置处于华南扬子板块江南被动陆缘隆起带南缘,属于苗儿山-越城岭花岗岩穹窿构造西翼中段(图1)。苗儿山-越城岭花岗岩穹窿构造经历了复杂的地质构造运动和成矿作用,先后经历了加里东期、印支期和燕山期3个重要的发展阶段(冯国玉等, 2009),形成不同期次的花岗岩,成为中国南岭铀多金属成矿

带中的重要矿区。矿田范围内围绕豆乍山岩体和张家岩体分布着较多的铀矿床(郭春影等, 2020),如豆乍山地区发育向阳坪、沙子江、双滑江及孟公界等铀矿床,张家地区发育张家、乍古田等铀矿床。

沙子江铀矿床位于豆乍山岩体西南部,其地质构造位置位于加里东期花岗岩为主体的苗儿山复式岩体中段,印支期香草坪花岗岩体(γ_3^1)与豆乍山花岗岩体(γ_3^{1-2})的内外接触带附近。矿床范围内主要发育岩浆岩,无地层出露,岩浆岩均为酸性侵入岩,岩性分别为印支期的灰色中粒似斑状黑云母花岗岩、灰白色中粒二云母花岗岩,呈侵入接触关系(图2),豆乍山岩体 $w(U)$ 较高,白云母蚀变和碱交代作用强烈,可提供丰富铀源。

区内构造发育,按展布方向分为北北东向和北东向构造断裂带组,其中已发现3组直接含矿的构造断裂带,主要为8号带(F800~F810),其次为7号带(F700~F710)和6号带(F600~F610),构造带长数千米,一般宽0.5~15 m,构造带内发育硅化碎裂花岗岩。矿体主要赋存在豆乍山岩体内部及与香草坪岩体的接触带附近,多呈脉状、扁豆状及透镜状,其产状与所赋存的断裂构造带的产状基本一致,明显沿构造带展布,分布在硅化断裂带产状变异、分支复合次级断裂发育部位。矿体往往在相近的高程,同时出现在不同的含矿带上,并略向下盘带侧伏,矿体均为隐伏矿体。

2 三维成矿预测

2.1 成矿模式

沙子江矿床所处的大地构造位置以及多期次的岩浆活动,为其铀成矿提供了有利的成矿条件。矿体的赋矿岩石是印支期的香草坪岩体和豆乍山岩体,以豆乍山岩体为主,其中香草坪岩体的平均 $w(U)$ 为 $7 \times 10^{-6} \sim 13 \times 10^{-6}$,豆乍山岩体平均 $w(U)$ 为 $17 \times 10^{-6} \sim 23 \times 10^{-6}$ (王正庆, 2018),豆乍山岩体相对于香草坪岩体而言,其铀成矿潜力更大。

矿床内的NNE-NE向的3组含矿断裂带为控矿断裂——天金断裂的次级断裂构造,含矿断裂带内发育花岗碎裂岩,蚀变发育,严格控制矿体的产状和规模。控矿断裂和含矿断裂为铀成矿提供了物质运移通道以及沉淀、保存的场所。由大气降水和深部热源组成的成矿流体使富铀花岗岩中的铀源在氧化的条件下发生活化迁移,上升的过

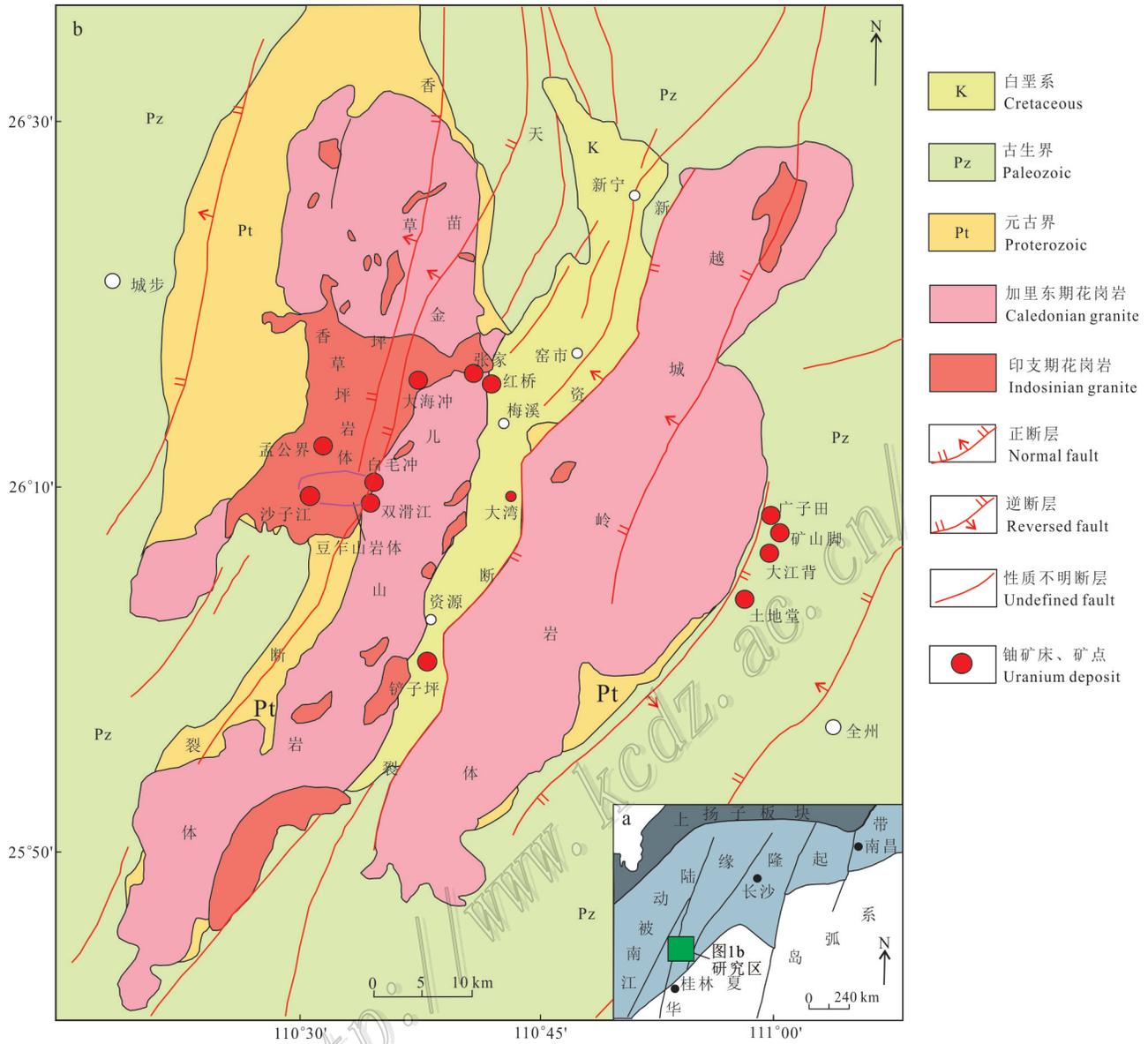


图1 苗儿山地区大地构造位置(a)及铀成矿区地质简图(b, 据石少华等, 2010)

Fig.1 Geotectonic location (a) and simplified geological map of Miaoershan (b, after Shi et al., 2010)

程中降压去气(CO₂)最终沉淀于构造断裂带内(王正庆, 2018)。

2.2 找矿模型

根据沙子江铀矿床的成矿地质背景、成矿模式以及找矿标志,建立其找矿模型(表1),主要有岩体、构造以及地球物理异常3个方面。沙子江矿区范围内仅出露印支早期、印支晚期花岗岩体,因此岩体是该矿床的赋矿岩石,通过分析对比各岩体与矿体的空间耦合性,其特征主要表现在较强的空间含矿性以及岩体影响范围,最终确定成矿有利岩体。构造是控矿最重要的因素,与成矿关系最为密切(图3),

通过确定其最佳缓冲距离,建立缓冲区模型。地球物理异常主要是由伽马偏高场等值线和²¹⁰Po 偏高场等值线图确定的,与矿化在地表的耦合性较好。

2.3 三维地质建模

2.3.1 建模方法

本文建模使用的SKUA-GOCAD软件,其前身是GOCAD(Geological Object Computer Aided Design),由法国的Nancy大学开发,是受国际认可的三维建模软件,其分析及解译功能十分强大,可应用于采矿、石油勘查、地球物理勘查、地质工程等领域(杨志华等, 2012),利用离散光滑插值方法(Discrete

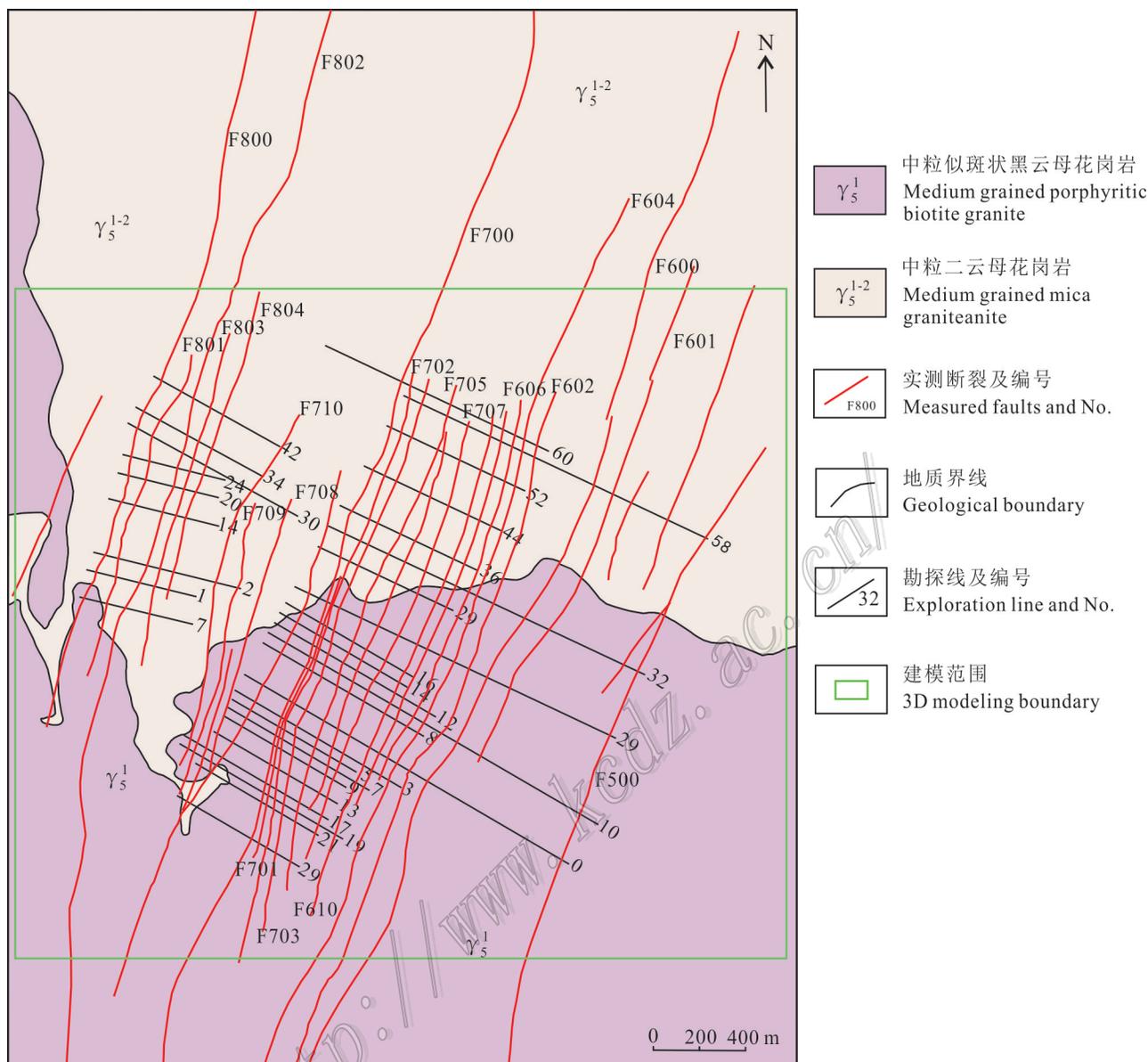


图 2 沙子江铀矿床地质简图(据李妩巍等,2011)

Fig. 2 Simplified geological map of the Shazijiang uranium deposit(after Li et al., 2011)

Smooth Interpolation)(Mallet 1992; 1997)模拟地下复杂的地质现象,意在离散的数据点间建立网络连接,按已知点满足的约束条件求解未知点的值,不受限于空间维数的限制,最终形成光滑曲面。

三维地质建模可融合多元数据(何紫兰等, 2018;高乐等,2017;孙岳等,2013),如地质、地球物理、地球化学、工程钻探等,其准确性依赖于数据的精度。建模流程主要包括以下 4 个步骤:① 数据准备:地质数据库,钻孔、岩性、样品分析数据;二维剖面图、地质图等;② 数据预处理:先在 MapGis 中进

行影像校正,图像矢量化,三维转换;③ 数据提取:提取钻孔信息,包括定位、测斜、岩性及样品分析数据信息;解译并提取勘探线剖面中的岩体及断裂等地质信息;④ 结构模型:构造-岩体模型:分析岩体之间的接触关系,厘定断层之间的主次及接触关系,通过离散光滑插值 DSI 方法,构建三维地质模型。

2.3.2 三维地质模型

根据沙子江铀矿床的基础地质资料以及勘探成果资料等建立铀矿床的地形地貌、岩体、断层、矿体

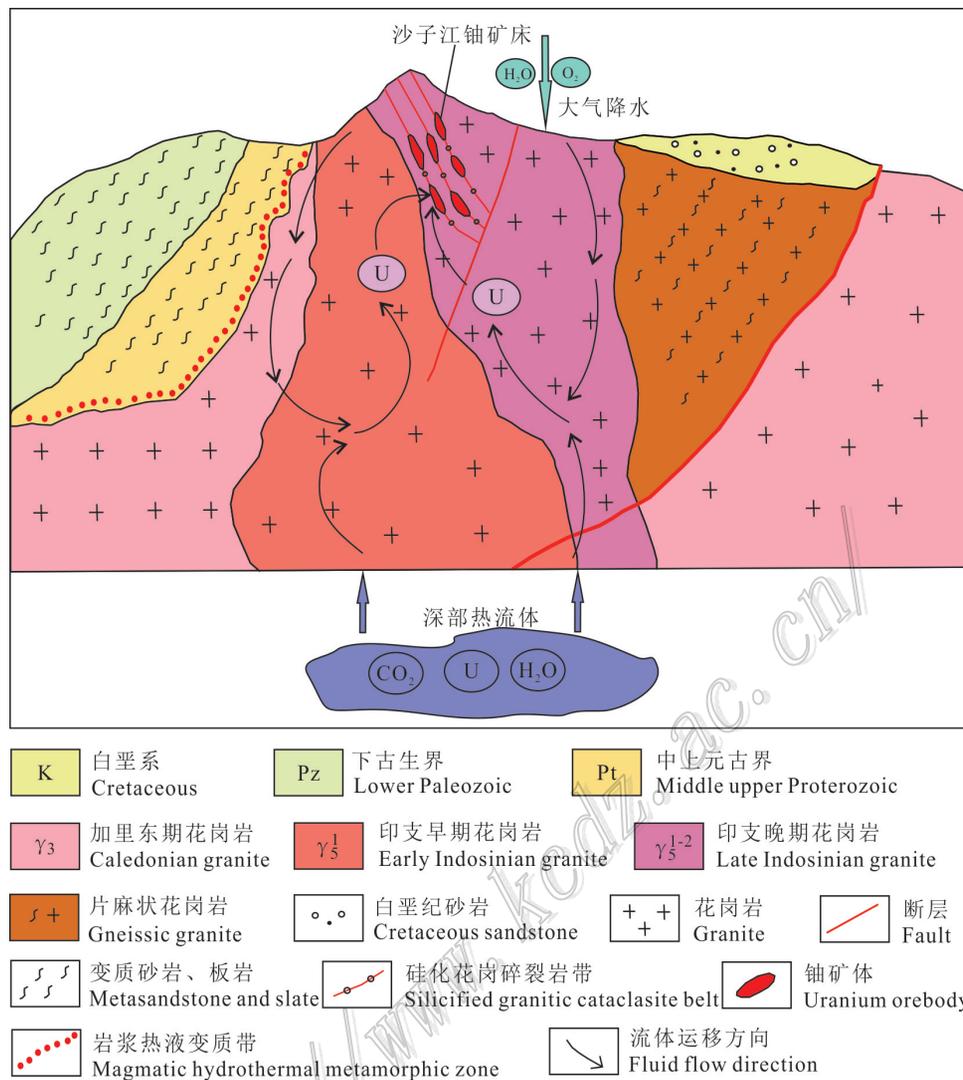


图3 沙子江铀矿床成矿模式示意图(据核工业北京地质研究院,2020)

Fig.3 Metallogenic model of the Shazijiang uranium deposit(modified after Beijing Research Institution of Uranium Geology, 2020)

表1 沙子江铀矿床找矿模型

Table1 Prospecting model of the Shazijiang uranium deposit

控矿要素	特征描述	变量类型	定量描述
岩体	赋矿岩体	成矿有利岩体	含矿性较好
		岩体影响范围	岩性接触带缓冲
构造	断裂构造带特征	构造影响区域	断裂带缓冲
物探	地面地球物理异常	伽马异常	伽玛异常值分析
		²¹⁰ Po异常	²¹⁰ Po异常异常值分析

等三维模型。建模资料主要包括:① 沙子江矿床 1:5000的地质图;② 34幅 1:1000的勘探线剖面图;③ 188个钻孔(定位表、测斜表、岩性表、品位化验数据),总钻探工作量 76303.017 m,化验样品数据 373 个,其中 257个大于边界品位 0.03%。

(1) 数据库模型

钻孔数据库模型(图3)是构建三维模型的重要数据,主要来源于勘探阶段。主要内容包括: Wellname(钻孔名称)、X(东坐标)、Y(北坐标)、Z(高程)、最大孔深(Max_depth)、Amizuth(倾向)、Dip(倾角)、depth(孔深)、maker(岩性)、化验数据(grade)等。

(2) 地形地貌模型

地形地貌模型的建立直观清晰的表达地表的高低起伏的状态,利用地形等高线建立 DEM,相较于二维等高线图,三维地形图在表达地质信息方面更直观丰富,从图 4a 可以看出,地表的沟谷、山峰一目了然。

(3) 岩体模型

研究区范围内出露的岩浆岩均为酸性侵入岩,主要是印支期的早期香草坪岩体(γ_5^1)和晚期的豆乍山岩体(γ_5^{1-2})。香草坪岩体分布在研究区南部(图 2),岩性为中粒似斑状黑云母花岗岩。豆乍山岩体分布在中北部,岩性为中粒二云母花岗岩,岩石致密坚硬,2 种岩体呈侵入接触关系(图 4b)。

(4) 断裂模型

区内构造发育,含矿构造主要为北北东-北东向构造带组,从南至北分别为 8 号带、7 号带、6 号带(图 4c),带内以碎裂花岗岩为主,局部有构造角砾岩,蚀变发育,带内的断裂在深部出现分支复合现象。据

钻探工程资料显示,断裂在深部比较稳定,且在钻孔控制的范围内,均有向深部延伸的趋势,所以此次建模时根据断裂的倾向方向向下延伸近 400 m,达到标高 0 m 以浅的位置,目的是扩大建模深度,寻找隐伏矿体的有利赋存空间。

(5) 已知矿体模型

研究区内发现的已知矿体多赋存在北北东向的断裂带内,共有已知矿体 41 个(图 4d),矿体赋存的最高标高为 1491 m,最低标高为 704 m,矿化垂幅 787 m,矿体的平均厚度为 0.78 m,均为隐伏矿体。

2.4 成矿信息提取

本文进行的三维控矿信息的提取在 GOCAD 软件中完成,借助其强大的统计分析功能,结合已建立

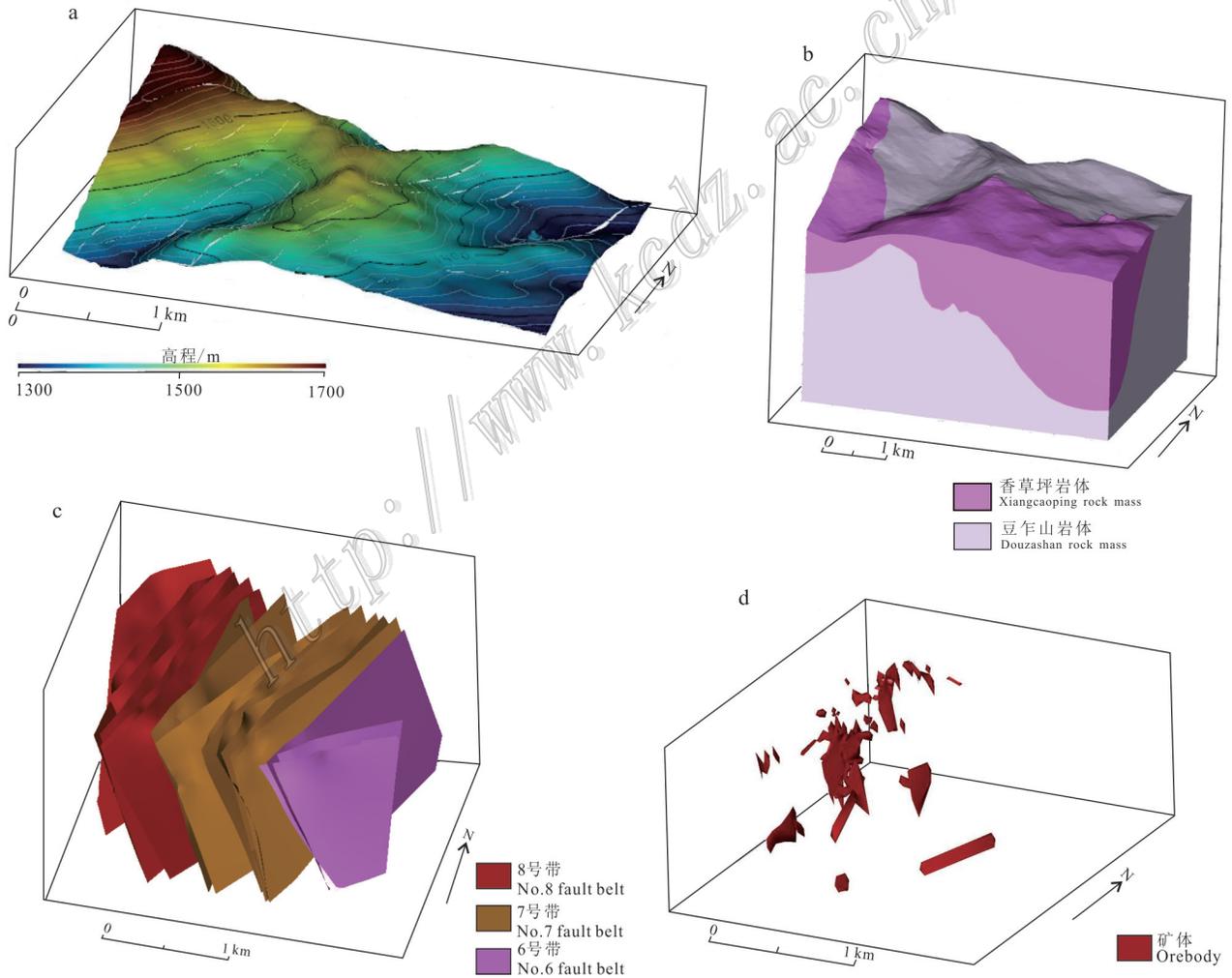


图 4 沙子江铀矿床的三维地质模型

a. 地表 DEM 模型; b. 岩体模型; c. 断裂模型; d. 矿体模型

Fig.4 3D model of the Shazijiang uranium deposit

a. Topography model; b. Rock mass model; c. Structures model; d. Orebody model

的三维地质模型,完成研究区各三维控矿要素控矿信息的提取。研究区的建模范围为从南到北为 2 893 334 m~2 895 023 m、从西到东 37 450 650 m~37 453 054 m,高程 0~1 847 m 的区域,将其划分成 10 m×10 m×2 m 单元块,共有 35 631 547 个单元块。在建立的三维地质网格之后,将建好的数字矿床模型中的各参数作为属性赋给每一个网格结点,即将有利的地质变量与控矿变量(包括有利岩体、构造有利信息、放射性物理场异常信息等)提取出来,形成该区域的预测模型(王世称等,1989)。

(1) 有利岩体提取

研究区内岩浆岩主要是印支早期的香草坪岩体(γ_5^1)和晚期的豆乍山岩体(γ_5^{1-2})。苗儿山地区铀矿床属花岗岩型铀矿床,但铀矿化对岩性无明显选择性,可能不存在成矿专属性(王正庆等,2017),在香草坪岩体和豆乍山岩体内都有铀矿床产出,但在沙子江铀矿床内,矿体几乎都赋存在豆乍山岩体内部及其2种岩体的接触带附近(图5a、b),极为少量的矿体赋存在香草坪岩体内部,与矿化的空间耦合性较差,并且豆乍山岩体的平均 $w(U)$ 远高于香草坪岩体,故将豆乍山岩体作为地质变量,用于预测,经统计分析认为研究区内豆乍山岩体含矿性较好,地质变量选取合适。

(2) 不同岩体接触界面

不同岩体的接触界面被认为是成矿有利部位,是物性薄弱区域。岩体接触带两侧岩性一般具有一定的地球物理和地球化学反差,是良好的铀成矿地球化学障,其反差越大,对成矿越有利,是研究区铀矿化重要的控矿要素之一。经统计分析,当接触面的缓冲距离达到 300 m(为最佳缓冲距离)时(图5c),与已知矿体叠加分析,缓冲区内含已知矿块数达 80%(图5d),且随着缓冲距离的增加,含已知矿体的增加幅度逐渐变小。

(3) 断层有利信息提取

研究区内经历多期次的构造活动,成矿与构造活动密切相关,为铀矿化提供成矿空间。区内的矿体明显受北北东-北东向的断裂构造控制,是重要的控矿和含矿断裂构造。断裂构造带内的矿体与构造带近平行(图6a),矿化严格受断裂控制,是最重要的控矿因素。通过对构造带缓冲叠加已知矿体的条件分析(图6b),当缓冲距离 25 m 时(图6c),含 90% 的已知矿体,且随着缓冲距离的增加,已知矿体的增加幅度减小,将 25 m 的构造缓冲区作为成矿预测的预

测要素之一。

(4) 放射性物理场信息提取

根据研究区内的伽玛总量偏高场以及异常伽玛点的分布特征,建立了伽玛异常模型(图7a),因伽玛异常点基本分布在断裂带上,故将地表伽玛异常沿断裂倾向延伸至深部,伽玛异常值区间[79~103]Ur,通过统计已知矿体与地球物理模型的网格数,发现地球物理数据基本覆盖已知矿体的 67%,可作为已知成矿信息层参与到成矿预测中。同理,地面 ^{210}Po 地球物理模型也采用与伽玛相同的信息提取方法(图7b),作为预测的一个地质变量,异常值范围 56~111 Bg/kg。

(5) 矿化信息提取

矿产是由地球中的元素富集而成的,是一个元素运移富集的复杂过程(朱峰等,2015),元素的富集是随机的但又具有一定的空间相关性的,故利用地质统计学分析元素地球化学分布特征来推测深部的成矿规律,达到定位预测的目的(高乐等,2015)。地质统计学以研究区域化变量为基础,以变异函数为工具,对既有随机性又有结构性的变量进行统计学研究(侯景儒,1997)。

本次铀品位的三维空间插值方法选用序贯高斯模拟方法,其属于随机模拟范畴,是一种应用高斯概率理论以及序贯模拟算法产生连续变量空间分布的模拟方法(胡先莉等,2007)。序贯高斯模拟是从一个网格单元到另一个网格单元序贯进行的,其用于计算参数的条件累积概率分布的数据,除原始数据以外,还必须考虑已经模拟过的数据(刘占宁等,2018),从条件累积概率分布中随机地提取分位数实现参数数值模拟。

根据钻孔铀品位数据建立的三维属性模型(图8),直观的反应矿产资源的特征,是找矿预测中重要的预测因素(庞绪成等,1999;庞绪成,2005;文波涛等,2014)。通过观察矿化的插值延伸趋势,结合地质剖面图来确定已知矿体是否未闭合,以此实现就矿找矿。

2.5 三维信息量法

在三维地质模型的构建基础之上,需要选用合适的数学模型对深部隐伏矿体进行定位定量预测,本文选用的三维信息量法是一种矿产预测过程中基于非参数性单变量的统计分析理论方法,最早由维索科奥斯特罗夫斯卡娅于 1969 年提出,其理论方法是统计分析研究区内各预测要素与矿

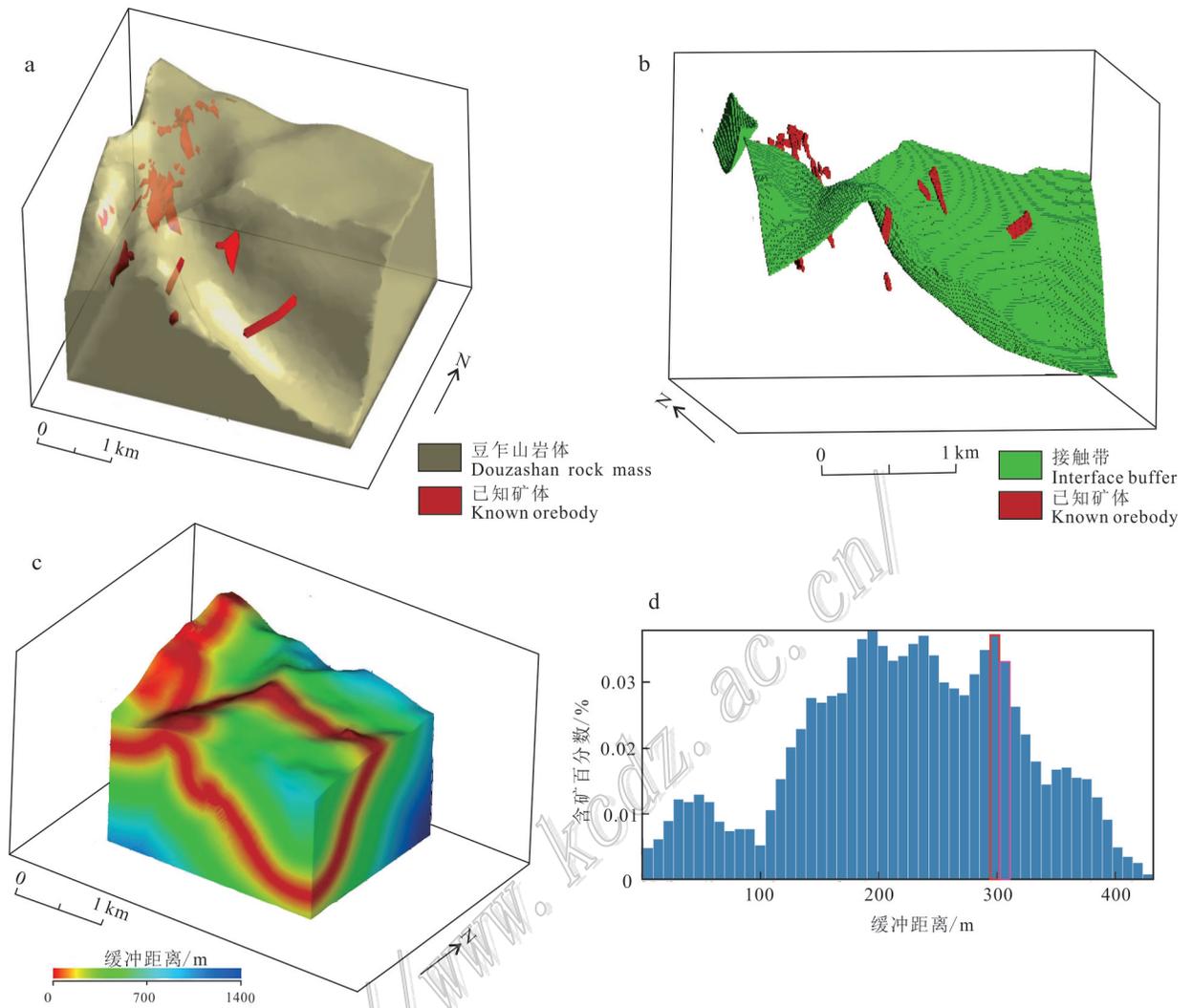


图 5 沙子江铀矿床岩体含矿性及接触界面缓冲距分析

a. 岩体与矿体空间分布; b. 岩体接触界面与矿体空间分布; c. 接触带缓冲模型; d. 接触带缓冲距离分析

Fig.5 Spatial distribution between rock mass and orebody and 3D interface buffer distance analysis in the Shazijiang uranium deposit

a. Spatial distribution between rock mass and known orebody; b. Spatial distribution between interface and known orebody;

c. Interface buffer model; d. Interface buffer distance analysis

化体之间的的空间叠合情况,进而研究各地质要素的成矿有利度。

三维信息量法公式如下:

含有某找矿标志 B 的找矿信息量条件概率计算为:

$$I_{B(D)} = \lg \frac{P(B|D)}{P(B)}$$

其中 $I_{A(B)}$ 为 B 标志含有 D 矿体的信息量值; $P(B|D)$ 为已知 D 矿体存在情况下出现标志 B 的概率; $P(B)$ 为出现标志 B 的概率。

由频率值代替概率值公式如下:

$$I_{B(D)} = \lg \left(\frac{\frac{N_i}{N}}{\frac{S_i}{S}} \right)$$

上述公式中 N_i 为研究区内具有标志 B 的含矿单元数; N 为研究区内的含矿单元数; S_i 为研究区内具有标志 B 的单元数; S 为研究区的单元总数。

通过对沙子江研究区成矿要素的量化分析和统计,计算成矿要素的信息量值。

2.6 预测模型的建立

通过前人对该矿床地质特征和控矿要素的综合

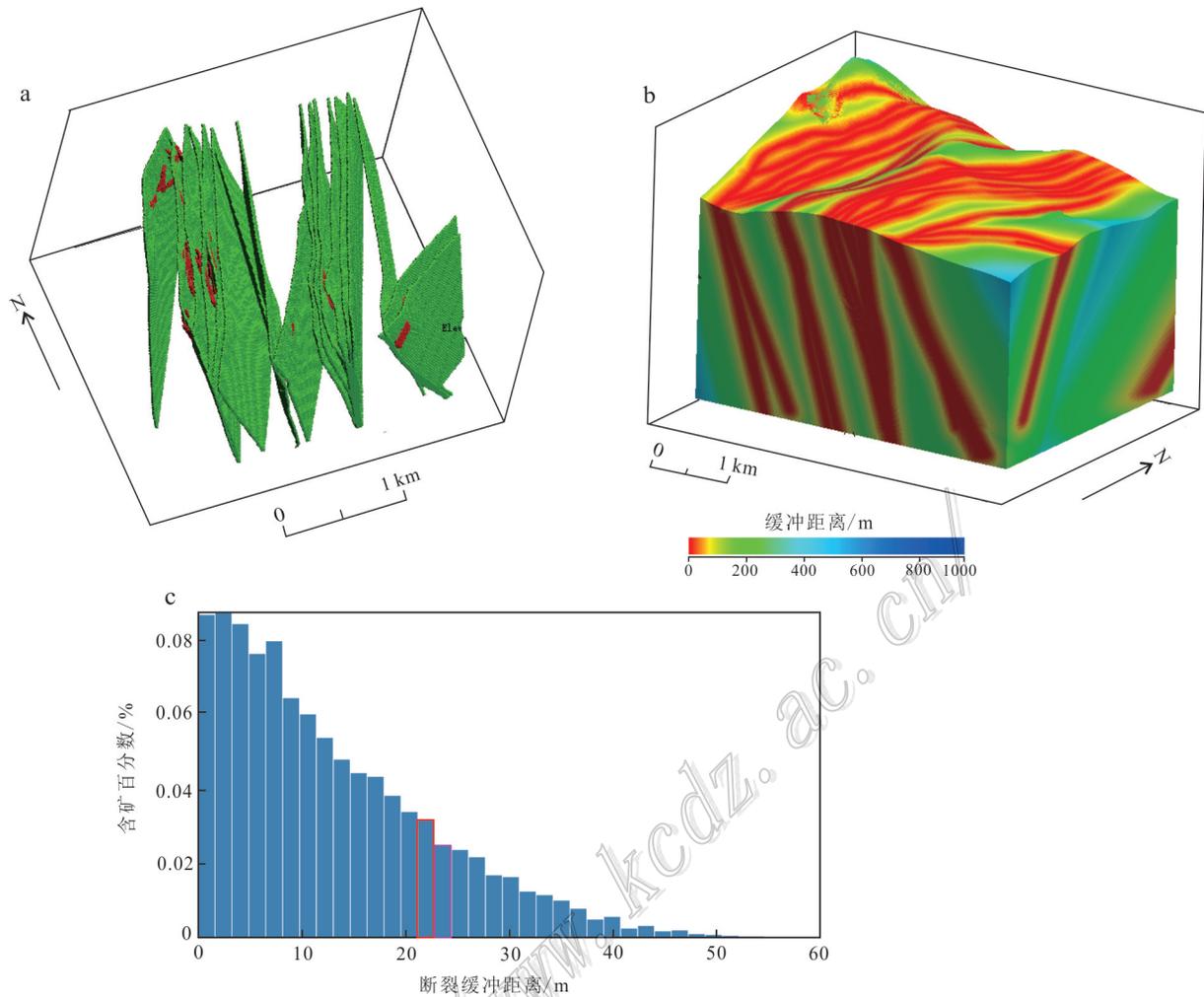


图6 沙子江铀矿床断裂构造的三维空间缓冲分析

a. 断裂与矿体空间分布; b. 断裂带缓冲模型; c. 缓冲距离分析

Fig. 6 3D structure buffer distance analysis of the Shazijiang uranium deposit

a. Spatial distribution between structure and known orebody; b. Structure buffer model; c. Buffer distance analysis

研究,沙子江铀矿床的控矿要素为:①豆乍山岩体作为产铀花岗岩,为成矿提供物质来源,与成矿关系密切;②叠加蚀变的断裂构造带是矿体集中分布的最佳地段;③豆乍山岩体和香草坪岩体的接触界面是矿体赋存的有利部位,也是含矿构造发育的良好空间;④地球物理场的伽玛异常,同时指示断裂构造是成矿有利部位,达到矿体定位的目的;⑤地球物理场的 ^{210}Po 异常也是指示矿化的。对于品位插值模型,不作为三维信息量法中的预测要素,可单独作为检验成矿有利度可靠性的指标,将信息量法与实际地质情况结合起来,提高预测准确性。基于以上的分析,选取了5种成矿有利信息图层并计算出其信息量值,见表2。

3 靶区圈定与资源量预测

将每个信息量值赋给相应的信息图层的单元块,将重复赋值的单元块的信息量值进行叠加,得到最终的各单元块的信息量值。通过统计分析不同信息量值所对应的已知矿块累积频率,当信息量值达2.45其含矿累积分布频率发生剧烈变化,表明该点为含矿分界点,当信息量值达4.25累积含矿频率再次发生突变,将其视富矿分界点(图9a),依此划分出一级有利区间(>4.25)和二级有利区间($2.45\sim 4.25$) (图9b)。经过统计发现80%的已知矿体出现在有利区间内,证明本次研究的有效性。根据信息量高

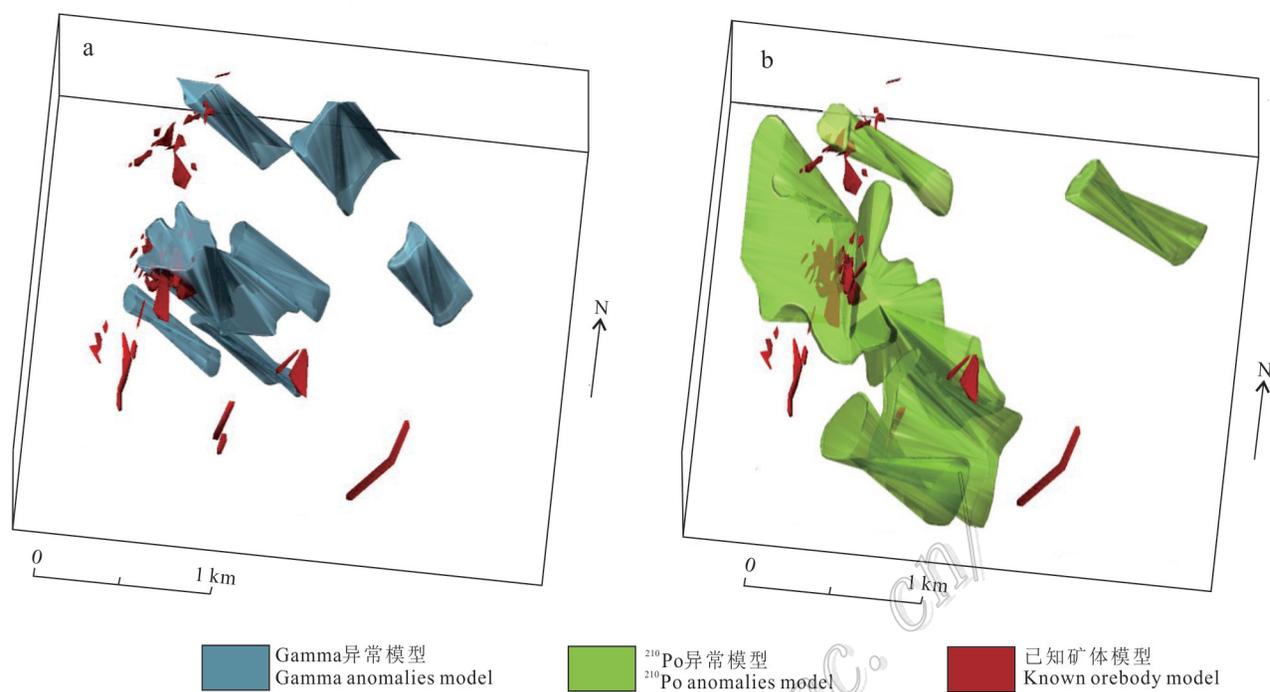


图7 沙子江铀矿床Gama异常和²¹⁰Po异常三维模型与矿体空间分布图

a. Gama异常三维模型与矿体空间分布图; b. ²¹⁰Po异常三维模型与矿体空间分布图

Fig.7 3D Gama anomalies model and ²¹⁰Po anomalies model of the Shazijiang uranium deposit

a. Spatial distribution between Gama anomalies and orebody; b. Spatial distribution between ²¹⁰Po anomalies and orebody

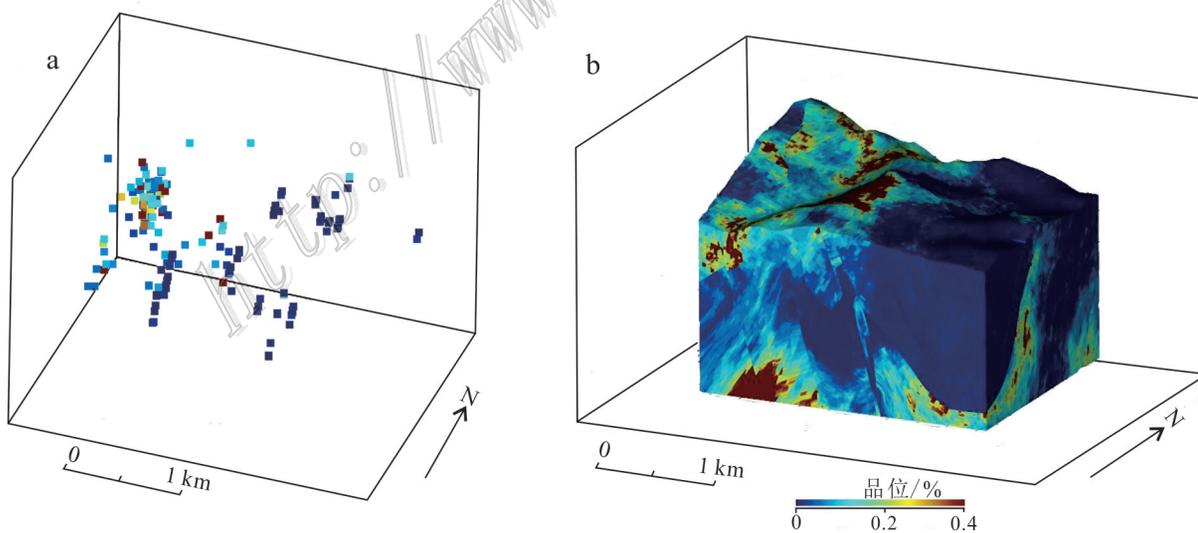


图8 沙子江铀矿床品位分布及三维属性模型

a. 品位分布图; b. 品位三维属性模型

Fig.8 Uranium grade distribution and property model of the Shazijiang uranium deposit

a. Grade distribution map; b. Grade property model

值圈定的有利区间和品位属性模型共圈定A、B 2个等级共7个靶区(图9c、d),圈定的靶区基本位于断

裂的在深部的汇合以及膨出部位,同时其品位属性模型的高值区域内。

表2 沙子江铀矿床预测要素信息量值统计表
Table 2 Statistics of the value of prospecting factor in Shazijiang deposit

成矿预测因子	特征变量及特征值	信息量值
有利岩体信息	豆乍山岩体(γ_5^{1-2})	0.147046
	岩性接触带缓冲300 m	0.908397
断裂构造特征	断裂带缓冲25 m	1.404099
地球物理异常	伽玛异常[79,103] Ur	1.232794
	^{210}Po 异常[56,111] Bg/kg	1.765658

关于预测资源量本文选用地质统计学的方法(序贯高斯模拟方法)对品位进行随机模拟,将插值后品位估值的平均品位作为计算资源量的品位,通过对计算公式进行资源量计算。计算公式如下:

$$Q_m = \sum(V_i \cdot C_i \cdot \rho \cdot t)$$

其中 Q_m 代表矿石金属量, V_i 代表矿石体积, C_i 代表矿石的平均品位, ρ 代表矿石比重, t 代表含矿系数。矿石平均品位确定为 0.067%, 矿石比重为 2.56 t/m³。计算出研究区预测靶区资源量为 XXX 吨。

4 结论

(1) 基于 GOCAD 三维建模软件, 建立研究区的钻孔模型、地质体模型、构造模型和矿体模型, 实现研究区的三维可视化, 通过前人的研究成果, 认为构造和不同岩性接触界面是最重要的控矿因素和空间定位条件。

(2) 通过研究发现, GOCAD 三维软件不仅可以

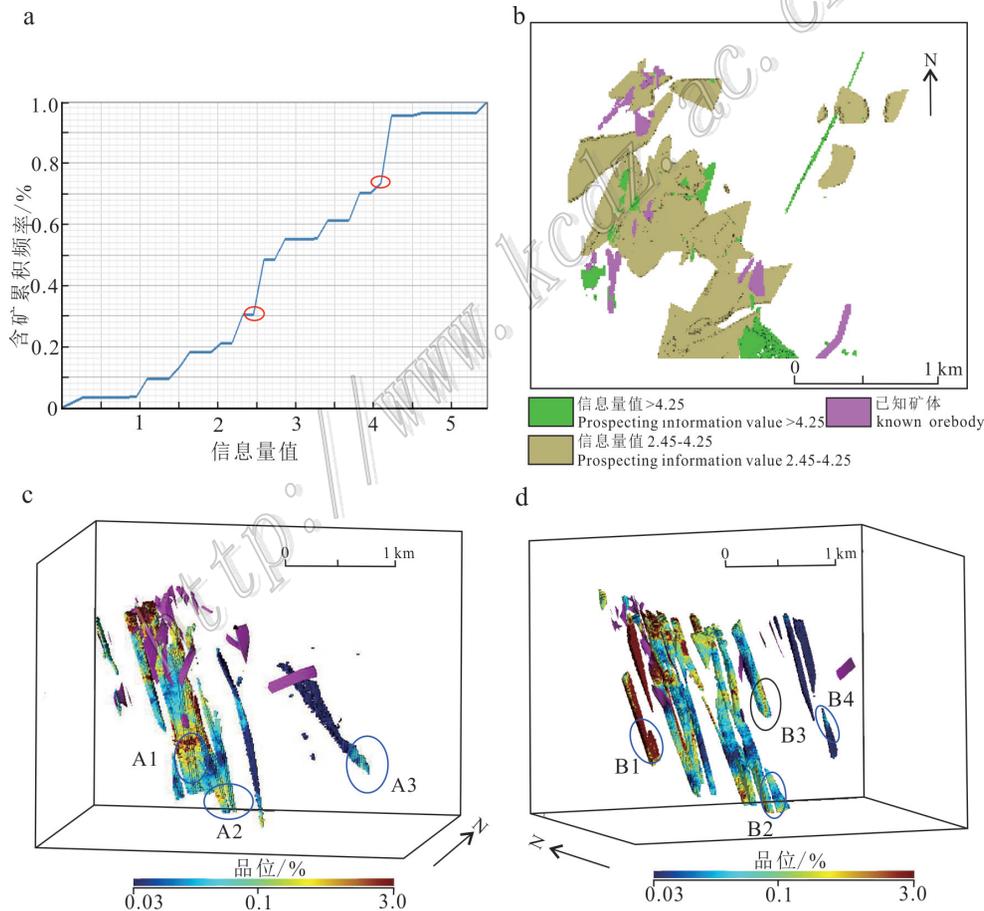


图9 信息量值的分级依据及靶区圈定

a. 不同信息量值的含矿累积频率图; b. 信息量高值俯视图; c. 一级有利区段(信息量>4.25)内圈定的靶区; d. 二级有利区段(信息量2.45~4.25)内圈定的靶区

Fig. 9 Prospecting information value classification based on cumulative frequency and prospecting targets in the Shazijiang deposit
a. Prospecting information value cumulative frequency curve; b. Top view for favorable place; c. Targets in first class interval value (>4.25);
d. Targets in second class interval value (2.45~4.25)

实现空间数据体的查询功能,还可以实现三维空间数据体的统计、分析等功能,挖掘地质要素与异常识别标志的三维空间属性信息,筛选信息图层的阈值,建立预测模型,为定量预测提供基础。

(3) 品位三维属性模型的建立与三维信息法联合圈定靶区,可提高其可靠性。本次研究圈定了7片找矿靶区,利用地质统计学求取平均品位,计算预测的资源量为XXX吨。

References

- Gore A. 1998. The digital earth understanding our planet in the 21st century[J]. *Australian Surveyor*, 43(2): 89-91.
- Beijing Research Institution of Uranium Geology. 2020. Prediction and expansion of major granite type uranium resources in South China[R]. Beijing Research Institution of Uranium Geology(in Chinese).
- Chen J P, Lu P, Wu W, Zhao J and Hu Q. 2007. A 3D method for predicting blind orebodies, based on a 3D visualization model and its application[J]. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 54-62(in Chinese with English abstract).
- Feng G U, Huang J and He F. 2009. The features and metallogenesis of the granites in the Yuechengling-Maoershan area[J]. *Mineral Resources and Geology*, 23(5):412-417(in Chinese with English abstract).
- Gao L and Zhou Y Z. 2015. Three-dimensional quantitative prediction and metallogenic prospect evaluation—A case study of Xianguangdong ore section in Pangxidong study area of Qinhang metallogenic belt[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 35(S1):1002.
- Gao L, Lu Y T, Yu P P and Xiao F. 2017. Three-dimensional visualization and quantitative prediction for mine: A case study in Xiayuangdong Pb-Zn ore deposits, Pangxidong region, southern part of Qinhang metallogenic belt, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(3): 767-778(in Chinese with English abstract).
- Guo C Y, Qin M K, Xu H, Ren Z B, Zou M L, Bai Y and Zhao Y T. 2020. Age of Zhangjia uranium deposit in the Miaoershan ore field, Guangxi Autonomous Region, China: In situ micro-determination on pitchblende[J]. *Earth Science*, 45(1):72-89(in Chinese with English abstract).
- He Z, L, Zhu P F, Ma H, Wang W J, Bai Y and Cao K. 2018. 3D Geological modeling of the Xiangshan Volcanic Basin based on multi-source data fusion[J]. *Geology and Exploration*, 54(2):404-414(in Chinese with English abstract).
- Hou J R. 1997. Geostatistics (spatial in formation statistics) and its application in geological prospecting and mining[J]. *Iron and Steel*, 32(4):162-164.
- Hu X L and Xue D J. 2007. An application of sequential simulation to reservoir modeling[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*[J]. *Science & Technology Edition*, 34(6):609-613(in Chinese with English abstract).
- Houlding S. 1994. 3D Geosciences modeling: Computer techniques for geological characterization[M]. Berlin: Springer-Verlag.131-147.
- Kostic B, Suss M P and Aigner T. 2007. Three-dimensional sedimentary architecture of Quaternary sand and gravel resources: A case study of economic sedimentology (SW Germany)[J]. *International Journal of Earth Science*, 96(4): 743-767.
- Li W W, Wang G, Xu L S and Xiao S. 2011. Ore-controlling pattern and mechanism of strike-slip fault in Shazijiang uranium deposit[J]. *Uranium Geology*, 27 (3): 146-151(in Chinese with English abstract).
- Li W W. 2016. Characteristics of ore-controlling fault in Miaoershan uranium ore field[J]. *World Nuclear Geoscience*, 33(2):78-83+95 (in Chinese with English abstract).
- Liu Z N, Song Y C, Meng H D and Yu X Y. 2018. Application of sequential Gaussian simulation in ore grade estimation[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 33(1):149-155 (in Chinese with English abstract).
- Mallet J L. 1992. Discrete smooth interpolation in geometric modeling[J]. *Computer Aided Design*, 24(4) :178-191.
- Mallet J L. 1997. Discrete modeling for natural objects[J]. *Mathematical Geology*, 19(2):199-218.
- Pang X C, Sun Z F, Zheng X L, Wang Y P, Hao X S and Liu Z G. 1999. The geophysical and geochemical characteristics and abnormal pattern of Jiaojia gold deposit[J]. *Golden*, 20(2): 1-6.
- Pang X C. 2005. Geochemistry and deep ore prediction of the Jiaojia gold deposit, Shandong(Dissertation for PhD)[D]. Director: Gu X X. Chengdu: Chengdu University of Technology. P1-133 .
- Sprague K, Kemp E, Wong W, Mc Gaughey J, Perronb G and Barrie T. 2006. Spatial targeting using queries in a 3-D GIS environment with application to mineral exploration[J]. *Computers & Geosciences*, 32(3): 396-418.
- Smirnoff A, Boisvert E and Paradis S J. 2008. Support vector machine for 3D modelling from sparse geological information of various origins[J]. *Computers & Geosciences*, 34(2):127-143.
- Shi R, Chen J P, Liu H D and Wang Q Y. 2014. The 3D prediction model and division of targets in Jiaojia gold ore belt, Shandong Province[J]. *Geoscience*, (4):743-750.
- Shi S H, Hu R Z, Wen H J, Sun R L, Wang J S and Chen H. 2010. Geochronology of the Shazijiang uranium ore deposit, northern Guangxi, China: U-Pb ages of pitchblende and their geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84 (8): 1175-1182(in Chinese with English abstract).
- Sun Y, Wang G W, Fang T H, Feng Y and Wang X Y. 2013. Three-dimensional geological modeling of the Honghai massive sulfide deposit in Xinjiang and its exploration application[J]. *Geology and Prospecting*, 49(1):179-184(in Chinese with English abstract).
- Wang G W, Zhang S, Yan C, Song Y, Sun Y, Li D and Xu F. 2011. Mineral potential targeting and resource assessment based on 3D geological modeling in Luanchuan region, China[J]. *Computer & Geoscience*, 37(12): 976-1988.

- Wang S C and Cheng Q M. 1989. Modeling of gold deposit prospecting[J]. Journal of Chang Chun University of Earth Science, 19 (3): 311-316.
- Wang Z Q, Fan H H, Chen D H, Xiao W, Luo Q H and Zheng K Z. 2017. Analysis of ore controlling conditions of granite type uranium deposit in Miaoershan, Guangxi[J]. Geological Review, 63 (S1):123-124(in Chinese).
- Wang Z Q. 2018. Metallogenic mechanism of Miaoershan granite type uranium deposit, Guangxi(Dissertation for PhD) [D]. Director: Fang H H. Beijing: Beijing Research Institute of Uranium Geology. P95-96(in Chinese).
- Wen B T, Wang G W, Han Q D and Huang Y F. 2014. Sequential gaussian simulation method is applied to the Nannihu molybdenum deposit in Sandaozhuang[J]. Mineral Deposits, 33(S1):829-830.
- Xiang J, Xiao K Y, Chen J P and Li S. 2020. 3D Metallogenic prediction based on metallogenic system analysis: A case study in the Lala copper mine of Sichuan Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(2): 135-143.
- Yang F, Wang G W, Santosh M, Li R X, Tang L, Cao H W, Guo N N and Liu C. 2017. Delineation of potential exploration targets based on 3D geological modeling: A case study from the Laoangou Pb-Zn-Ag polymetallic ore deposit, China[J]. Ore Geology Reviews, 89: 228-252.
- Yang Z H, Lan H X and Zhang Y S. 2012. 3-dimensional geological modeling based on coupled GIS-GOCAD[J]. Geography and Geo-information Science, 28 (5): 16-20(in Chinese with English abstract).
- Zhu F and Wang G W. 2015. Research on grade model of Zaozigou gold deposit based on geostatistics in Gansu Province[J]. Acta Mineralogica Sinica, 35(S1):1065-1066.
- 测——以钦-杭成矿带庞西垌地区下垌铅锌矿区为例[J]. 岩石学报, 33(3): 767-778.
- 郭春影,秦明宽,徐浩,任忠宝,邹明亮,白云,赵宇霆. 2020. 广西苗儿山铀矿田张家铀矿床成矿时代: 沥青铀矿微区原位测定[J]. 地球科学, 45(1):72-89.
- 何紫兰,朱鹏飞,马恒,王文杰,白云,曹珂. 2018. 基于多源数据融合的相山火山盆地三维地质建模[J]. 地质与勘探, 54(2): 404-414.
- 侯景儒. 1997. 地质统计学(空间信息统计学)及其在地质勘查及采矿中的应用[J]. 中国金属学会, 32(4):162-164.
- 胡先莉,薛东剑. 2007. 序贯模拟方法在储层建模中的应用研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 34 (6):609-613.
- 李妩巍,王敢,许来生,肖霖. 2011. 沙子江铀矿床走滑构造控矿规律及控矿机制[J]. 铀矿地质, 27(3):146-151.
- 李妩巍. 2016. 苗儿山铀矿田控矿断裂构造特征[J]. 世界核地质科学, 33(2): 78-83+95.
- 刘占宁,宋宇辰,孟海东,于晓燕. 2018. 序贯高斯模拟在矿石品位估计中的应用研究[J]. 地质找矿论丛, 33(1):149-155.
- 庞绪成,孙之夫,郑小礼,王玉平,郝献晟,刘宗国. 1999. 焦家金矿床地球物理、地球化学特征及异常模式[J]. 黄金, 20(2): 1-6.
- 庞绪成. 2005. 山东焦家金矿床地球化学特征及深部矿体预测研究(博士论文)[D]. 导师:顾雪祥. 成都: 成都理工大学. 1-133.
- 史蕊,陈建平,刘汉栋,王巧云. 2014. 山东焦家金成矿带三维预测模型及靶区优选[J]. 现代地质, (4):743-750.
- 石少华,胡瑞忠,温汉捷,孙如良,王加昇,陈恒. 2010. 桂北沙子江铀矿床成矿年代学研究: 沥青铀矿 U-Pb 同位素年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 84(8): 1175-1182.
- 孙岳,王功文,方同辉,冯源,王新宇. 2013. 新疆红海块状硫化物矿床三维地质建模及勘探应用[J]. 地质与勘探, 49(1):179-184.
- 王世称,成秋明. 1989. 金矿综合信息找矿模型[J]. 长春地质学院学报, 19(3): 311-316.
- 王正庆,范洪海,陈东欢,肖为,罗桥花,郑可志. 2017. 广西苗儿山花岗岩型铀矿控矿条件分析[J]. 地质论评, 63(S1):123-124.
- 王正庆. 2018. 广西苗儿山花岗岩型铀矿床成矿机制研究(博士论文)[D]. 导师:范洪海. 北京:核工业北京地质研究院. 95-96页.
- 文波涛,王功文,韩启迪,黄宇峰. 2014. 序贯高斯模拟方法在三道庄-南泥湖钼矿区的应用[J]. 矿床地质, 33(S1):829-830.
- 向杰,肖克炎,陈建平,李诗. 2020. 基于成矿系统的三维定量预测研究——以四川拉拉铜矿为例[J]. 地球学报, 41(2):135-143
- 杨志华,兰恒星,张永双. 2012. 基于 GIS-GOCAD 耦合技术的三维地质建模[J]. 地理与地理信息科学, 28(5): 16-20.
- 朱峰,王功文. 2015. 基于地质统计学的甘肃枣子沟金矿品位模型研究[J]. 矿物学报, 35(S1):1065-1066.

附中文参考文献

- 核工业北京地质研究院. 2020. 南方重点花岗岩型铀矿资源预测与扩大[R]. 北京:核工业北京地质研究院.
- 陈建平,吕鹏,吴文,赵洁,胡青. 2007. 基于三维可视化技术的隐伏矿体预测[J]. 地学前缘, 14(5): 54-62.
- 冯国玉,黄杰,何方. 2009. 越城岭-苗儿山地区花岗岩特征及成矿[J]. 矿产与地质, 23(5): 412-417.
- 高乐,周永章. 2015. 矿山三维立体定量预测及成矿远景评估——以钦杭成矿带(南段)庞西垌研究区下垌矿段为例[J]. 矿物学报, 35(S1):1002.
- 高乐,卢宇彤,虞鹏鹏,肖凡. 2017. 成矿区三维可视化与立体定量预