doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.12.015

江西桃山罗布里南部地区三维地质建模与成矿预测

周邓^{1,2},曾广亮²,王洪荣²,赵陟君²,王乐²

ZHOU Deng^{1,2}, ZENG Guangliang², WANG Hongrong², ZHAO Zhijun², WANG Le²

1.东华理工大学江西省数字国土重点实验室,江西 南昌 330013;

2.江西省核工业地质调查院,江西 南昌 330038

1.Key Laboratory for Digital Land and Resources of Jiangxi Province, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 2.Jiangxi Institute of Nuclear Industry Geology, Nanchang 330038, Jiangxi, China

2. Jiangxi Institute of Nuclear Industry Geology, Nanchang 550058, Jiangxi, China

摘要:三维地质建模技术是中国"玻璃地球"战略的支撑技术之一,对推动国家资源的可持续发展具有重要的现实意义。基于 3Dmine 建模平台和前人研究成果,以钻孔、勘探线剖面等资料为依据,初步建立了桃山罗布里南部地区的地质数据库和三维 地质模型。基于 Visualstat 地质统计模块,分析样品点文件,确定长轴、次轴与短轴参数,寻求实验半变异函数,再通过验证与 模拟确定变异函数。最后,利用克里格法对空块模型赋值,建立了基于三维建模的罗布里南部地区三维预测体系,探讨了"立 方体预测模型"找矿方法的可行性,初步把建模区变量类型划分为矿体赋存岩体变量、碎裂蚀变带变量和铀克里格品位估值 变量,并且分别对这3类主要变量进行立方体单元的划分与提取。最终用数理统计的方法计算,圈定了找矿靶区位置,预测成 矿概率为 65.60%。

关键词:三维地质建模;3Dmine 建模平台;Visualstat 地质统计;成矿预测;找矿靶区;江西 中图分类号:P612;P628 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2022)12-2256-09

Zhou D, Zeng G L, Wang H R, Zhao Z J, Wang L. Three dimensional geological modeling and metallogenic prediction in the south of Luobuli, Taoshan, Jiangxi Province. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(12):2256–2264

Abstract: The 3D geological modeling technology is one of the supporting technologies of the Glass Earth in Chinese strategy, which has important practical significance to promote the sustainable development of national resources. Based on the 3Dmine modeling platform and previous research results, the geological database and three-dimensional geological model of the south of Luobuli in Taoshan are preliminarily established based on the data of drilling and exploration line profile. Based on the geostatistics module of visualstat, the parameters of major axis, minor axis and short axis are determined by analyzing the sample point file, and the semi variogram of experiment is sought, and then the variation function is determined through verification and simulation. Finally, the Kriging method is used to evaluate the empty block model, and the three-dimensional prediction system based on three-dimensional modeling is established in the south of Luobuli. The feasibility of the "cube prediction model" prospecting method is discussed. The variable types in the modeling area are preliminarily divided into three types: ore body occurrence variable, fracture alteration zone variable and uranium Kriging grade estimation variable. The variables are used to partition and extract the cube elements. Finally, the location of prospecting target area is delineated by mathematical statistics method, and the predicted metallogenic probability is 65.60%.

Key words: the 3D geological modeling; 3Dmine modeling platform; the geological statistics of Visualsta; metallogenic prediction; prospecting target area; Jiangxi Province

收稿日期:2020-08-28;修订日期:2020-09-28

资助项目:江西省数字国土重点实验室开放基金项目《江西省桃山矿田罗布里南部三维地质建模研究》(编号:DLLJ201912)和江西省财政 出资地质勘查项目《江西省宁都县温水岭铀矿普查项目》(编号:20210044)

作者简介:周邓(1988-),男,工程师,从事三维地质建模与资源勘查工作。E-mail:554900758@qq.com

近年来,随着矿产勘查工作的有序推进,当前 国内的主要找矿方向由地表矿和浅部矿转为隐伏 矿和深部矿,三维成矿预测逐渐成为矿产资源预测 研究的热点[1-3]。目前,国内外多个地区已相继开 展了三维成矿预测工作,该项工作显现出较好的发 展势头,并成功圈定多个深部找矿靶区,相关成果 为深部找矿勘探提供了新方向[4-9],如王素芬等[4]在 西藏甲玛矿区进行三维地质建模,预测了区内的层 状砂卡岩靶区,为下一步的深部资源潜力评价与矿 集区的增储提供了可靠的依据:黄超等5 对西藏雄 村 I 号矿体进行建模,展示了矿体深部三维空间成 矿元素分布特征及相互关系,有效减少了雄村 [号 矿体深部成矿单一信息多解性问题,为深部定量找 矿奠定了基础; Jin 等^[9] 在华北砂岩型铀矿调查中, 通过大数据分析和三维地质模型,进一步验证了 "红黑岩系耦合沉积"控矿理论等。

本次建模基于 3Dmine 建模平台,以桃山罗布 里南部地区为研究区域,对研究区钻孔数据、勘探 线剖面等原始数据进行归纳、总结与分析,建立建 模区域地质数据库;以建模区最新成矿理论为指 导,以地质体三维建模技术为研究手段,通过对地 质体三维找矿信息的定量化统计,确定找矿预测所 需的找矿指标;利用找矿信息量和数学统计方法, 将预测模型应用于地质找矿信息的筛分、提取及综 合研究,对矿体进行定位和定概率预测。

1 区域地质概况

桃山铀矿田位于江西省宁都县境内,集成矿地 质条件、控矿因素、含矿岩石建造、组成成矿物质场 等多种成矿有利因素于一体,是中国目前探明的大 型花岗岩型铀矿田之一^[10-11]。该矿田位于大王山-于山花岗岩铀成矿带中段,产于桃山大型陆壳重熔 型花岗岩体中^[12-13]。大府上(6214)铀矿床(图1) 位于桃山矿田的中东部,该矿床包含Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ等3 个矿带,矿带的变化幅度较大,铀矿体多短小分 散^[14-15]。桃山断裂是区内最主要的控岩控矿构造, 为多期活动具有多种充填物的大断裂带^[16-17],总体 走向为 NNE(40°~60°),倾向 SE、倾角 60°~70°, 沿走向长 45 km,一般宽 10~15 m,最宽可达 70 m。 赋矿围岩主要为燕山早期第二阶段中粒、中细粒二 云母花岗岩。矿床中热液蚀变发育,主要包括红化 (赤铁矿化)、绿泥石化、伊利石化、萤石化、钠长石 化、碳酸盐化及硅化等[18]。

2 找矿信息量法概述

找矿信息量法是基于地、物、化、遥等找矿标 志,以成矿理论为指导,通过分析建模区各标志的 分布情况,定量评价它们与矿体的密切关系,进而 进行找矿预测。由于总体概率估计困难,具体运算 时以频率值来估计概率值:

$$I_{A(B)} = \lg \frac{\left(\frac{N_j}{N}\right)}{\left(\frac{S_j}{S}\right)}$$
(1)

此时公式中, N_j 表示该建模区内含矿单元体含 有 A 标志的数量; N 表示区内的总含矿单元数; S_j表 示建模区含有标志 A 的单元数; S 表示建模区所有 块体单元总数量^[19-20]。

用下列公式可以确定建模区找矿有利标志临 界值:

$$\Delta I^{+} = \mathbf{K} \sum_{j=1}^{n} I_{j} \tag{2}$$

此时公式中,K(有用信息水平)一般取值0.75; L为建模区所有信息量的和值;

 $△ I^+$ 为有利找矿标志的临界值^[21]。

根据地质标志与含矿性,可将研究区划分为 fo、 fx、fy 和 fxy 四个单元(表 1)。fxy 表示有地质标志、 含矿的单元数^[22-23]。

任意选取1个含有某些地质标志的单元,该单 元可能含矿的概率 Px,计算公式如下:

$$P_{x} = f_{x} / (f_{x} + f_{xy})$$
(3)

)

此时公式中,fx 表示有地质标志、不含矿的单 元数。

3 数据库的构建

在地质勘查过程中,地质数据资料主要来源于

表1 矿体单元划分表

Table 1 Classification table of orebody units

序号	地质标志	矿	符号
0	无	无	fo
1	有	无	fx
2	无	有	fy
3	有	有	fxy





7—印支期花岗岩;8—加里东期花岗岩;9—不整合界线;10—断裂;11—矿床及编号;12—建模范围

钻探、坑探、槽探、物探、化探等手段。本文主要是 在钻探工作的基础上获取钻孔数据,然后基于钻孔 和勘探线剖面及其他辅助数据资料进行三维地质 体的建模工作。本次的建模区域为桃山罗布里南 部地区,位于大府上铀矿床的北部,建模范围参数 为东西长约 1300 m,南北长约 1200 m,垂向高度 $500 \, m_{\odot}$

本次数据库主要包括钻孔数据和勘探线剖面 库。勘探线剖面库是借助 MapGIS 软件校正矿区内 勘探线剖面坐标(X、Y),并将其矢量化,然后将图 件导入 3Dmine 软件平台,进行坐标调换(YZ 调 换),在剖面图上找到2个参考点,与平面图上的某 2个点相对应,记下坐标,然后进行2点坐标转换即 可。转换后的勘探线如图 2。钻孔的空间数据一般 由定位表、岩性表、测斜表、矿化表等一系列表文件 组成,三维显示(图 3)。可更直观地展示钻孔的空 间展布特征。

4 数据分析与变异函数

4.1 组合样品

组合样是根据地质统计学原理录入数据库中的样品品位,为块体估值时要确保得到参数的无偏估计量。确定原始样品数据中多数样品的长度,需要对样品的长度进行统计。根据样长统计结果



图 2 勘探线剖面入库展示 Fig. 2 Display of reservoir in exploration line profile



图 3 钻孔数据库展示 Fig. 3 Borehole database display

(图4),可以确定该样品分析数据的组合样长约 为1m,最小组合样长一般为组合样长的1/2,因 此,这里确定最小组合样长为0.5m,按指定的长 度对其进行样长加权平均,将其组合成等长的信 息样。

4.2 特高值处理

本次特高值处理主要是通过区域内铀矿品位 频率统计,对数据的统计分布特征初步考察,发现 特异值并对其进行处理。据样品基本统计(图5)可 知,铀矿品位(‱)的均方差为1.806,算数平均值为



图 4 样长统计柱状图

(平均值为 0.98,中值为 0.60,方差为 1.29,标准差 1.13,变异系数为 1.16, 样长统计样品点数 1487 个,最小值为 0.20,最大值为 21.80, R 转换)

Fig. 4 Sample length statistical histogram



力差为1.800,你能差为1.344,支并示数为0./11)

Fig. 5 Frequency distribution of uranium grade in the region

1.621。品位变化系数的计算公式为:

$$V_{\rm X} = \frac{\delta_{\rm X}}{\overline{X}} \times 100\% \tag{4}$$

4.3 寻求实验变异函数

基于组合样品点文件与 Visualstat 地质统计模 块,进行实验变异函数(主轴、次轴和短轴)的计 算。寻求变异函数是反复试验和调整的过程,若 曲线形态不合适,可通过修改步长或修改最佳方 位角和倾角,重复建立变异函数模型,直到曲线形 态最佳为止(图 6-a~c)。最终通过建立变异函数 来确定块金值、基台值、变程和搜索椭球体的参数 (表 2)。

4.4 实验变异函数模拟与验证

模型交叉验证是对插值后的品位数据进行合理性检验,以确保合理估算储量^[24]。交叉验证是反复验证的过程,依次调节各轴的变程,该步骤相当于改变搜索椭球体的轴比;修改块金常数 C₀的值,可改大改小,该步骤相当于修改局部先验方差 C 的值,C+C₀为基台值,是一个常数,要保持固定不变。几何异向性要求每个轴的 C 和 C₀必须一样,但是变程可以不一样,同时每个轴必须采用同一个模型,比如 球状模型。本次建模的平均误差为-0.0091,趋于 0,标准偏差为 1.0748,趋于 1,证明所建立变异函数的各项参数较合理。

表 2 变异函数及搜索椭球体参数 Table 2 Variogram and search ellipsoid parameters

参数	取值	参数	取值
块金值	0.45	短轴倾角	33.75°
基台值	4.01	主轴/短轴	1.37
变程	404.2 m	主轴/次轴	2.19
主轴方位角	342.5°	搜索半径	50/100/200
次轴倾角	0.0°	矿块离散化	3×3×3



图 6 主轴(a)、次轴(b)、短轴(c)变异曲线 Fig. 6 The variation curve of spindle(a), subaxial(b) and short axis(c)

5 找矿信息量计算

5.1 岩体三维块体模型

综合分析已有建模区地质资料,根据勘探线分布、矿体形态、产状等因素,确定建模范围和基本参数:模型东西长 1300 m,南北长 1200 m,垂向高约 500 m,单元块体行×列×层为5 m×5 m×2.5 m,次分 块为 2.5 m×2.5 m×1.25 m,模型总共 5520 个单元块。

利用建模区地层实体模型对三维块体进行约 束显示并进行保存,即可得到不同地层分段所包含 的块体单元,并将其作为矿床预测研究的地层变 量。根据桃山矿田罗布里南部地区的岩体数据,主 要包括燕山早期第三阶段 a 岩体(γ_5^{2-3a})、燕山早期 第三阶段 b 岩体(γ_5^{2-3b})、燕山早期第二阶段岩体 (γ_5^{2-2})等,岩体模型如图 7-a、c、e。利用 3DMine 软件,参照变异函数基本参数,对建模区地层块体 单元进行克里格赋值,赋值后的块体模型如图 7-b、 d、f。

5.2 预测变量提取

根据本区地质资料和前人工作研究成果^[25-28], 结合前文三维实体、块体模型,从三维立体的角度 确定建模区变量类型有铀品位变量、矿体赋存岩体 变量和碎裂蚀变带变量,并且分别对这3类主要变 量进行立方体单元的划分与提取。 (1)铀品位变量

块体模型仅对赋值范围及离散单元块的尺寸 进行定义,其本身并不具有任何属性,因此又称为 空块模型。品位模型是基于块体模型,对每个单元 块赋予相应的属性,用以表征矿体内部某一位置上 样品点的内在特性,所有单元块组合后的属性变化规 律就是矿体总体的内部特征(品位)变化规律^[29-31]。

结合本次样品的组合分析结果和变异函数情况,对区域中的块体进行了赋值,使每个块体单元 得到相应的克里格估值。本次研究将 U 含量作为 预测变量之一,对成矿预测具有指示性作用,频率



d—燕山早期第三阶段 b 岩体块体模型;e—燕山早期第三阶段 a 岩体;f—燕山早期第三阶段 a 岩体块体模型

分布直方图如图 8-a。据图 8-a 可知, U 品位在 2.5‰附近块体数量大幅减少。因此, 由主观概率 法确定找矿信息量的临界值为 2.5‰。

(2)矿体赋存岩体变量

将建模区燕山早期第三阶段 a 岩体 γ_5^{2-3a} 、燕山 早期第三阶段 b 岩体 γ_5^{2-3b} 与燕山早期第二阶段岩体 γ_5^{2-2} 作为 3 个岩体变量,各岩体的频率分布直方图分 别见图 8-b~d。

(3)碎裂蚀变带变量

大府上矿床的类型为碎裂蚀变岩型铀矿,因此,将碎裂蚀变带作为一项预测变量参与成矿预测,频率分布直方图如图 8-e 所示。

5.3 找矿标志统计

本区找矿标志主要包括岩体类型、碎裂蚀变带

和钻孔取样品位数据,通过每个找矿标志所对应的 信息量值进一步进行找矿预测研究。

在分析建模区大府上铀矿的主要控矿因素,确 定有利找矿标志后,选取碎裂蚀变带、岩体与品位 信息 3 个标志,若找矿有利标志在单元块体中存在 时取值为 1,不存在时记值为 0,然后进行变量统计 分析。统计结果(表 3)显示,燕山早期第三阶段 a 岩体 γ_5^{2-3a} 与燕山早期第三阶段 b 岩体 γ_5^{2-3b} 变量的 含矿百分比明显高于其他变量,其中燕山早期第三 阶段 b 岩体 γ_5^{2-3b} 变量的含矿百分比最高,可达 20.34%。

5.4 找矿信息量计算

取有用信息水平 K 为 0.75, 根据公式(3) 计算 出累计临界值为 0.44。由找矿信息量的计算结果



(表4)和预测结果图(图9)分析可知,大于临界值的找矿有利标志只有一个,即燕山早期第三阶段 b 岩体 γ₅^{2-3b}变量,亦即燕山早期第三阶段 b 岩体。其 中需要说明的是,U 品位信息量为负值的原因是 3‰以上的块体数远小于0~3‰的块体数,因此, 含矿块体的权重较低,导致信息量为负。

6 成矿预测

根据地质背景、立方体预测统计,确定建模区 主要的控矿因素为燕山早期第三阶段 b 岩体,因此 将燕山早期第三阶段 b 岩体作为靶区预测的重要指 标,以此约束的单元体总数为 33552 个,其中以信息 量临界值大于或等于 2.5‰圈定找矿靶区,有找矿 标志无矿的单元数 f_x为 26727 个,含矿远景块体 N 为 8288 个,已知铀矿单元块体 fxy(M)为 6825 个。 则校正因子 k′为 0.82。

由公式(3)可得, Px 为 0.80, 成矿概率 Px 为校 正因子 k 与 Px 的乘积,因此,该找矿靶区的成矿概 率 Px 为 65.60%。本次根据计算机模拟,圈出 3 个 找矿靶区(图 10)。

-			
信息量指标	含矿块 体数/个	总块体数 /个	含矿率 /%
γ_5^{2-3a}	35641	367023	9.71
γ_5^{2-3b}	6825	33552	20.34
γ_5^{2-2}	162738	2573469	6.32
碎裂蚀变带	39760	646005	6.15
U 品位	190823	2902026	6.58

表 3 变量统计结果 Table 3 Variable statistic results

表 4 找矿信息量计算结果

Table 4 The calculation results of prospecting information

信息量指标	Sj	Nj	(Nj/N)/ (Sj/S)	IJ
γ_5^{2-3a}	367023	35641	1.455627	0.16305
γ_5^{2-3b}	33552	6825	3.049143	0.484178
γ_5^{2-2}	2573469	162738	0.948271	-0.02307
碎裂蚀变带	646005	39760	0.92258	-0.035
U 品位	2902026	190823	0.985651	-0.00628





图 10 预测靶区 Fig. 10 Prediction target area

7 结 论

(1)收集整理了桃山矿田罗布里南部地区的钻 孔、勘探线数据等资料,建立了该区域的地质数据 库,实现了研究区数据资料的动态管理和综合运 用,为"互联网+地质"提供基础资料。

(2)基于空块模型,引入样品点,进行数据分 析,剔除特异值并组合样品,寻求半变异函数,并进 行半变异函数的交叉验证;利用克里格法对空块单 元进行估值处理。

(3)建立了基于三维建模的罗布里南部地区三 维定量预测体系,探讨了"立方体预测模型"找矿方 法的可行性,并实现了该方法在罗布里南部地区的 应用。

(4)初步划分了建模区变量类型为矿体赋存岩 体变量、破碎蚀变带变量和铀克里格品位估值变 量,并且分别对这3类主要变量进行立方体单元的 划分与提取。最终用数理统计的方法计算,圈定了 找矿靶区位置,预测成矿概率为65.60%。

致谢:衷心感谢审稿专家对本文提出的意见和

建议,使本文质量得到提升。

参考文献

- [1] 贺春艳,王阳,王洪军,等.基于综合地球物理约束的胶东焦家—三 山岛断裂带三维地质建模:成矿特征与找矿启示[J].地质通报, 2022,41(6):936-945.
- [2] 李青元,张洛宜,曹代勇,等.三维地质建模的用途、现状、问题、趋势与建议[J].地质与勘探,2016,52(4):759-767.
- [3] 陈建平,于森,于萍萍,等.重点成矿带大中比例尺三维地质建模方法与实践[]].地质学报,2014,88(6):1187-1195.
- [4] 王素芬,屈挺,贺日政,等.西藏甲玛矿区三维地质建模与层状砂卡 岩靶区预测[1].地质通报,2021,40(12):2110-2122.
- [5] 黄超,郎兴海,娄渝明,等.西藏雄村 I 号矿体三维地质建模与深部 可视化应用[]].地质通报,2021,40(5):753-763.
- [6] 刘静,陈建平.我国三维成矿预测的研究现状及发展趋势[J].地质 学刊,2017,41(3):441-447.
- [7] 李伟,陈建平,贾玉乐,等.甘肃早子沟金矿三维建模与综合成矿预测[J].地球学报,2020,41(2):144-156.
- [8] 毛先成,王琪,陈进,等.胶西北金矿集区深部成矿构造三维建模与 找矿意义[J].地球学报,2020,41(2):166-178.
- [9] Jin R S, Miao P S, Sima X Z, et al. New prospecting progress using information and big data of coal and oil exploration holes on sandstonetype uranium deposit in North China[J]. China Geology, 2018, 1 (1): 167–168.
- [10] 郭湖生.桃山铀矿田铀资源勘查现状与资源潜力分析[C]//中国 核学会 2009 年学术年会,2009.
- [11] 张志和.桃山矿田低品位铀资源开发利用前景[J].铀矿冶,2022, 41(1):57-63.
- [12] 赵琼.桃山请广铀成矿带花岗岩型铀矿床地质特征与成矿规律[J].甘 肃科技,2020,36(23):24-25.
- [13] 李仁泽.桃山铀矿田大府上矿床铀的赋存状态及成矿机理探讨[D]. 东华理工大学硕士学位论文,2016.
- [14] 董文涛,王洪荣,梁建锋.桃山铀矿田高田地区铀成矿地质特征及 远景分析[J].世界核地质科学,2021,38(1):47-56.
- [15] 桃山铀矿田成矿规律与找矿方向[C] //加强地质工作促进可持

续发展——2006年华东六省一市地学科技论坛论文集,2006: 121-125.

- [16] 徐浩,蔡煜琦,汪远志,等.桃山铀矿田成矿地质条件及资源量扩 大方向[J].铀矿地质,2013,29(2):65-71.
- [17] 蔡煜琦,徐浩,郭庆银,等.江西省桃山地区花岗岩型铀矿预测及找矿 方向[J].吉林大学学报(地球科学版),2013,43(4):1283-1291.
- [18] 曾广亮.桃山铀矿田铀成矿作用的探讨[J].世界有色金属,2017, (20): 297-298.
- [19] 史蕊,张颖慧,卢民杰,等.基于地质与重磁数据集成的河北迁安 铁矿集区三维成矿预测[J].地球学报,2018,39(6):762-770.
- [20] 何海洲,杨志强.找矿信息量法在广西大厂矿田新一轮成矿预测 中的应用[J].矿产与地质,2007,(5):560-562.
- [21] 陈建平,吕鹏,吴文,等.基于三维可视化技术的隐伏矿体预测[J]. 地学前缘,2007,14(5):54-62.
- [22] 游远航,杨建中,胡明,等.找矿信息量法在成矿预测中的应用——以武当西缘铅锌铜矿预测为例[J].地质找矿论丛,2006,21(1):58-62.
- [23] 王勇,陈邦国.找矿信息量法在铜山铜矿成矿预测中的应用[J].地质与勘探,2002,38(3):49-51.
- [24] 刘天娇.陕西光石沟铀矿床三维地质建模及资源评价[D].中国 地质大学硕士学位论文,2015.
- [25] 王洪荣, 邵维江, 周邓, 等. 江西桃山铀矿田大布铀矿床成矿模式 研究[J]. 世界核地质科学, 2020, 37(4): 263-270.
- [26] 曾文乐,郭湖生.桃山铀矿田成矿系统及矿化网络[J].矿床地质, 2010,29(2):343-351.
- [27] 曾文乐,傅增耀,潘开明,等.桃山铀矿田成矿特征、开发前景及找 矿方向[J].东华理工学院学报,2006(S1):51-55.
- [28] 夏应冰.江西桃山铀矿成矿作用及找矿方向研究[J].绿色科技, 2020(24): 258-259.
- [29] 罗周全,张保,刘晓明,等.矿体品位和储量统计分析的三维可视 化方法[]].有色金属(矿山部分),2008,60(5):23-27.
- [30] 张焱,周永章,李文胜,等.基于矿体三维地质建模的云浮高根矿 区储量计算[J].金属矿山,2011,(1):93-97.
- [31] 陈王慧子.云南文山官房矽卡岩型白钨矿矿床三维地质建模及 找矿预测[D].昆明理工大学硕士学位论文,2016.