

# Deep Metallogenic Structure Inference and Uncertainty Study Based on Bayesian Framework

Penghao Wang<sup>1,2</sup>, Jinli Wang<sup>1,2</sup>, Hao Deng<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education, Central South University, Changsha Hunan

<sup>2</sup>School of Geosciences and Info-Pysics, Central South University, Changsha Hunan  
Email: wphfenghuays@163.com

Received: Mar. 5<sup>th</sup>, 2020; accepted: Mar. 19<sup>th</sup>, 2020; published: Mar. 26<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

Mineral resources evaluation is now gradually moving towards 3D quantitative prediction. However, with the increase of the predicted depth, the uncertainty of the metallogenic structure located in the deep due to its scarce data has always existed. Therefore, how to reduce the uncertainty and how to measure uncertainty is a hot issue to study the 3D quantitative prediction. This paper mainly uses the Bayesian theory to construct the Bayesian model, and based on this model, the Bayesian inference is made for the deep metallogenic structure of the Dayingezhuang mining area, and finally obtains a visual model based on the deep metallogenic structure. Research shows that the uncertainty visualization model obtained through this example is consistent with geological research, and can provide guidance for subsequent iterative inference of 3D models of deep metallogenic structures.

## Keywords

Deep Metallogenic Structure, Bayesian Inference, Uncertainty Analysis

---

# 基于贝叶斯框架的深部成矿构造推断及不确定性研究

王鹏浩<sup>1,2</sup>, 王金利<sup>1,2</sup>, 邓浩<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中南大学有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 湖南 长沙

<sup>2</sup>中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙

Email: wphfenghuays@163.com

收稿日期: 2020年3月5日; 录用日期: 2020年3月19日; 发布日期: 2020年3月26日

文章引用: 王鹏浩, 王金利, 邓浩. 基于贝叶斯框架的深部成矿构造推断及不确定性研究[J]. 地球科学前沿, 2020, 10(3): 215-225. DOI: 10.12677/ag.2020.103019

## 摘要

矿产资源评价目前正逐步向三维定量预测方向发展,然而,随着预测深度的增加,由于深部探测数据减少,深部三维模型的不确定性也逐渐增长,因此如何减少不确定性以及如何对不确定性进行很好的度量是目前三维定量预测所研究的重要问题。本文提出一种基于贝叶斯框架的深部成矿构造推断及不确定性度量方法,利用该方法对大尹格庄金矿床成矿构造招平断裂面深部结构进行贝叶斯推断及不确定性度量,最终基于推断得到的断裂面形态后验概率,得出深部成矿构造不确定性可视化结果。研究表明,通过该方法得到的不确定性可视化模型与地质认识相符,可为后续的深部成矿构造三维模型修正提供引导。

## 关键词

深部成矿构造, 贝叶斯推断, 不确定性分析

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

从上世纪 50 年代起,矿产资源评价经历了从定量化,数字化的发展阶段,目前正在朝深部三维定量预测方向快速地发展。然而,随着预测所涉及的深度不断加深,深部矿产预测已经更加依赖于研究区深部成矿构造推断和矿化分布规律的认识。矿床的形成明显地受地质构造的控制,成矿构造是与矿床形成、改造及保存有关的构造,其不仅表现在空间上对矿床产状的控制,也存在着对矿床形成的约束。因此,针对深部成矿构造及深部成矿作用的研究逐渐成为了当前深部找矿工作中的热点[1]-[9]。

通过实现对深部区域三维模型的重建可以有助于开展针对深部成矿构造的空间位置、空间形态、空间样式、岩性分布、物质组分和时间序列的研究与分析。因此在深部成矿构造研究中,如何重建深部区域三维模型成为了深部构造研究的热点问题之一。而在三维模型重建过程中时常会伴有不确定性因素的影响,尤其是深部区域,由于数据的相对稀少且地质深部区域复杂,导致探测相对困难。以往的研究工作中结合了大深度物探、深穿透化探和深部钻探等探测技术来探测深部精细结构、深部物性分布和地下物质成分,并运用高分辨率反震法和重力场、地磁场和导电性等深部物性结构特征揭示深部三维精细结构以及深部成矿构造的几何形态和动力机制[10][11][12]。这些研究工作基于地球物理、地球化学探测的深部成矿构造推断已取得一系列成果,但是地球物理反演的多解性和地球化学深穿透推断的不确定性仍然存在,这对深部成矿预测结果的真实性和有效性有着很大的影响。

本文在以往研究模型和数据的基础上,结合了地球物理相关探测数据,将其纳入到贝叶斯模型中进行后续的贝叶斯推断,并根据推断得到的后验概率进行信息熵计算来对研究区域深部成矿构造模型的不确定性进行一定的分析,为后续三维模型的修正提供引导。

## 2. 研究区地质概况

胶西北金矿集区是世界第三大金矿富集区,发育有三条控矿断裂带,分别为三山岛断裂带,焦家断裂带和招平断裂带,其中,招平断裂带是胶西北区域断裂规模中最大的一条断裂带[13]。其平面和剖面示意图分别如图 1 和图 2 所示。断裂南起平度城北,走向近东西向,至宋格庄逐渐转弯,向北东延伸,经招远城又转为北东东向,经黄城集、蓬莱城以西进入渤海,走向变化南段为 $5^{\circ}\sim 30^{\circ}$ ,中断为 $20^{\circ}\sim 45^{\circ}$ ,北段变为

50°~70°，全长 120 km，宽度一般 50~200 m，断面向南或南东倾斜，倾角 30°~55°左右。其中，大尹格庄断裂是招平断裂带上的次级断裂，该断裂附近区域富集大量金矿，是整个胶东半岛西北部-胶西北金矿的集中区[14]，其地理位置处于华北克拉通东南缘。

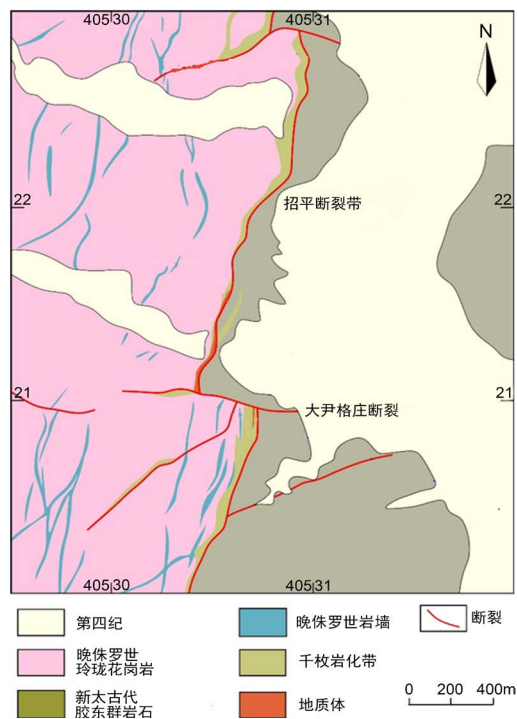


Figure 1. Plan of Zhaoping fault (revised from Mao, X. *et al.*, 2019 [15])

图 1. 招平断裂带平面示意图(改自 Mao, X. *et al.*, 2019 [15])

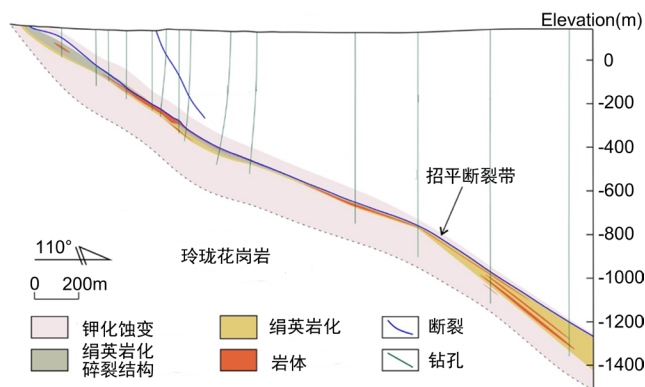


Figure 2. Section of Zhaoping fault (revised from Mao, X. *et al.*, 2019 [15])

图 2. 招平断裂带剖面示意图(改自 Mao, X. *et al.*, 2019 [15])

该次级断裂长 2200 m，宽度一般为 2~35 米，深度达 500 m，水平断距为 260 至 300 m。地表产状表现为波状弯曲、分支复合。走向为 100°，断面向北东方向倾斜，倾角 43°~60°。横向穿越整个招平断裂带，并导致招平断裂带北部向西方位移。由于该断裂属于后期断裂，黄铁绢英岩角砾、碎块有少量分布。

而在大尹格庄矿区的东部，出露有老地层的变质岩，在断裂的上盘部分，主要分布有黑云变粒岩，斜长角闪岩，浅粒岩，黑云斜长片麻岩夹磁铁石英岩，石榴透辉磁铁石英岩等胶东群。而下盘主要类型则是玲珑岩体。

### 3. 方法

#### 3.1. 数据介绍

本文结合地物探测数据来对弱地质信息的深部成矿空间进行研究，因此，我们收集到了地物相关的原始数据，通过这些数据可以尽可能的减少整个三维地质模型推断与重建中的不确定性。

##### 3.1.1. 初始三维地质线串模型

我们通过收集研究区域地质剖面图，对其进行矢量化，得到该区域深部成矿构造的线串模型，如图 3 所示。利用得到的线串模型构造初始的三维模型，以此来为后续的三维模型迭代推断提供基础。

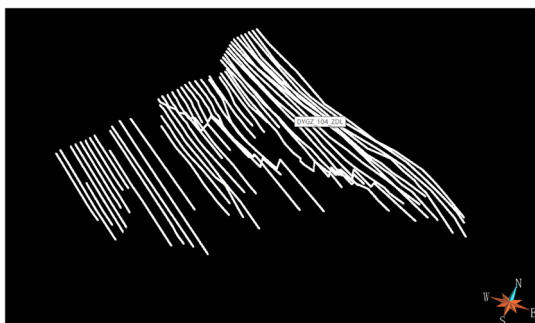


Figure 3. Dayingezhuang fault string model  
图 3. 大尹格庄断裂线串模型

##### 3.1.2. 重力异常数据

我们收集到了研究区域地面 63 个采样点的布格重力异常数据，以便为后续贝叶斯推断做准备，这些数据是通过仪器进行重力勘探，再经过一系列布格改正得到的数据。这些数据位于整个大尹格庄矿区范围内，且按一定距离有规则排布，如图 4 所示。

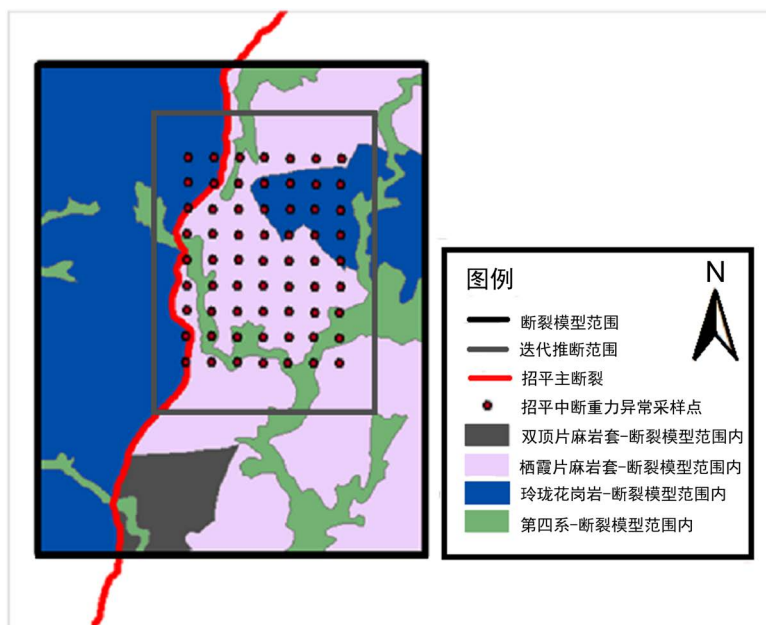


Figure 4. Distribution of sampling points for ground gravity anomalies in Dayingezhuang  
图 4. 大尹格庄地面重力异常值采样点分布

### 3.1.3. 岩性密度数据

我们收集到了研究区域上下盘的岩性以及密度参考范围，如表 1 所示。同时收集到了研究区钻孔数据以及上下盘密度样本，从中选取了上下盘各 9 个样本，为后续的贝叶斯推断工作做准备。如表 2 所示。

**Table 1.** System resulting data of standard experiment (unit: g/cm<sup>3</sup>)

**表 1.** 上下盘物性参数参考范围(单位: g/cm<sup>3</sup>)

类型	岩性	密度参考范围
上盘	黑云变粒岩、斜长角闪岩、黑云斜长片麻岩等	2.41~3.28
下盘	玲珑岩体	2.43~2.7

**Table 2.** Samples of physical parameters of hanging wall and foot wall (unit: g/cm<sup>3</sup>)

**表 2.** 上下盘物性参数采样样本(单位: g/cm<sup>3</sup>)

类型	样本1	样本2	样本3	样本4	样本5	样本6	样本7	样本8	样本9
上盘	2.708	2.759	2.675	2.690	2.701	2.724	2.706	2.727	2.763
下盘	2.589	2.615	2.684	2.663	2.577	2.609	2.614	2.636	2.622

## 3.2. 贝叶斯模型

贝叶斯理论发展至今已愈发成熟，这种方法也被越来越多地运用到不确定性表达和推理的研究当中。如 Pearl 于 1986 年提出一种简单而有效的贝叶斯网络用来研究不确定性相关问题[16]。肖张波依据贝叶斯理论实现反演过程中地震数据的有效利用[17]。李东将贝叶斯理论应用到了对边坡工程模型不确定性分析当中[18]。本文根据以往研究经验，本文利用贝叶斯原理构造出贝叶斯模型，贝叶斯形式如式(1)所示[19]：

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)} \quad (1)$$

其中， $P(A|B)$  为后验概率， $P(B|A)$  为似然项， $P(A)$  为先验概率。

本文将贝叶斯模型纳入到三维地质模型不确定性研究中来。利用上述公式，我们在给定了地物观测数据集合  $\mathcal{E} = \{E_1, \dots, E_n\}$ ，可以用来对地质界面  $F$  进行推断。后验概率  $P(F|\mathcal{E})$  示如式(2)所示：

$$P(F|\mathcal{E}) = \frac{p(F)P(\mathcal{E}|F)}{P(\mathcal{E})} \quad (2)$$

其中， $p(F)$  为先验项， $P(\mathcal{E}|F)$  为似然项。我们设定了研究区域深部构造空间为一个由若干个小立体单元构成的大立体空间，给定其中的  $F$  为  $F_{1 \times 5M}$  向量，表示空间中所有立体单元中心点隐函数的集合， $\mathcal{E}$  为  $\mathcal{E}_{63 \times 1}$  向量，表示由地面 63 个重力异常值测点构成的集合。这里我们舍弃分母，只考虑分子项：

$$P(F|\mathcal{E}) \propto p(F)P(\mathcal{E}|F)。 \quad (3)$$

### 3.2.1. 似然项

我们为上述贝叶斯公式中的似然项  $P(\mathcal{E}|F)$  引入物性参数  $\theta$ ，以便于更好的求解该项中所表示的概率。因此，似然项可进一步表示为：

$$P(\mathcal{E}|F) = \int_{\theta} P(\mathcal{E}|F, \theta)P(\theta)d\theta \quad (4)$$

其中， $\theta$  为  $\theta_{2 \times 1}$  向量，分别表示深部构造空间中上下盘岩石密度。 $P(\theta)$  表示参数  $\theta$  的先验分布，通过利用核密度估计来得到其概率， $P(\mathcal{E}|F, \theta)$  则通过计算地面测点的重力异常值来表示。由于该积分的难解

性, 本文后续利用了 MCMC 采样方法, 将积分离散化为简单求和的形式, 在进行均一化处理, 最终得到似然函数值。

1) 核密度估计: 核密度估计属于一种非参数估计方法, 该方法不需要给定数据的先验分布, 它是通过数据样本本身出发来估计数据的分布特征[20]。我们通过收集到上下盘岩性的密度样本, 利用核密度估计得到岩性密度的概率分布。

给定物性参数  $\theta$ , 参数  $\theta$  的先验分布  $P(\theta)$  利用核密度估计表示如式(5)所示[21]:

$$P(\theta) = f_h(\theta) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{\theta - \theta_i}{h}\right) \quad (5)$$

其中,  $K$  为核函数,  $h$  为带宽。我们这里选取了高斯函数作为核函数, 带宽设置为 0.25。

2) 重力异常正演: 我们选取了位于大尹格庄地表 63 个观测点的布格重力异常值, 假设地面每个观测点  $G_i$  服从独立同分布, 因此  $P(\mathcal{E} | F, \theta)$  可写成如  $\prod_{i=1}^n P(\mathcal{E}_i | F, \theta)$  的连乘形式。每项  $P(\mathcal{E}_i | F, \theta)$  可表示为:

$$P(\mathcal{E}_i | F, \theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(\mathcal{E}_i - fwd_{F,\theta})^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

$fwd_{F,\theta}$  表示地表观测点的正演计算值。计算公式[22]为:

$$fwd_{F,\theta} = -G\rho \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 \mu_{ijk} \times \left[ x_i \ln(y_j + r_{ijk}) + y_j \ln(x_i + r_{ijk}) z_k \arctan \frac{z_k r_{ijk}}{x_i y_i} \right] \quad (7)$$

$$x_i = x - \xi_i, \quad y_j = y - \eta_j, \quad z_k = z - \zeta_k \quad (8)$$

$$r_{ijk} = \sqrt{x_i^2 + y_j^2 + z_k^2} \quad (9)$$

$$\mu_{ijk} = (-1)^i (-1)^j (-1)^k \quad (10)$$

其中,  $G$  为重力常量,  $\rho$  为剩余密度, 地表目标观测点坐标为  $(x, y, z)$ , 每个立体单元的角点坐标为  $(\xi_i, \eta_j, \zeta_k)$ 。重力异常是由于实际地球内部的物质密度分布不均匀产生的, 因此我们使用剩余密度作为公式中立体单元的密度来计算重力异常。这里我们考虑使用大尹格庄上下盘密度与地壳密度差值作为剩余密度。采用的大陆地壳地表岩石的密度为 2.67 g/cm<sup>3</sup>。

### 3.2.2. 先验项

我们利用基于线串模型的隐函数来对深部成矿构造几何边界进行表达。在整个深部成矿构造三维地质空间  $\mathbb{R}^3$  中, 存在隐函数  $F: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$  使得当且仅当  $\mathbb{R}^3$  中的一点  $x = \{x, y, z\}$  处于无自相交的几何边界上时, 满足  $F(x) = 0$ , 当  $x$  处于边界上部时,  $F(x) > 0$ ;  $x$  处于边界下部时,  $F(x) < 0$ 。将深部成矿构造空间中的上下盘

看作是几何边界的上下部, 通过求得每个立方体单元中心点的隐函数值的集合来表示  $F$  的先验。其中隐函数是通过计算空间中的点对深部成矿构造的线串模型的距离函数得到的, 此处不做过多解释。先验的表示形式如式(11)所示:

$$P(F) = \frac{1}{Z} \exp(-E(F)) \quad (11)$$

其中,  $Z$  为分母项,  $E(F)$  为每一项先验信息的累加。目前我们考虑了与初始模型一致性的度量作为其先验, 如式(12)所示:

$$E(F) = \lambda(z) \|F - F_0\|^2 \quad (12)$$

其中,  $F_0$  为初始模型,  $F$  为当前迭代得到的模型, 其表示包含若干立方体的隐函数的向量,  $\lambda(z)$  为与深度相关的系数, 深度越深, 不确定性越大,  $\lambda(z)$  越小, 这里考虑倒数作为其系数。

### 3.3. 贝叶斯推断

构建好贝叶斯模型后, 由于其涉及到的高维问题存在一定的难处理性, 需要采用一种替代方法来实现对后验分布的近似评估。目前已经开发了多种方法, 其中运用最广泛的方法是马尔科夫链蒙特卡洛方法(Markov Chain Monte Carlo), 即 MCMC 方法。该方法本质上使用了马尔科夫的思想, 最后得到蒙特卡洛积分, 蒙特卡洛积分可以从指定分布中进行抽样, 然后通过这些样本构造均值来逼近期望值。其特性在于后一状态只依赖于前一状态, 而与以往所经历的状态无关, 我们利用这一特性来迭代地绘制参数集的样本[23]。

MCMC 采样方法会根据给定的一个初始值或者一个初始向量, 可以采样出下一符合要求的样本, 且当前样本只与前一次样本有关。通过每次采出的样本, 设置接受率, 再根据给定的接受率来判断当前样本是否被接受, 如果是, 则作为下一次采样的起始样本。MCMC 接受率[24]表示如式(13)所示:

$$\min \left( 1, \frac{\pi(z^*)q(z|z^*)}{\pi(z)q(z^*|z)} \right) \quad (13)$$

其中,  $z$  表示前一个样本,  $z^*$  表示当前样本,  $\pi(z)$  为后验概率,  $q(z^*|z) \sim (z, \sigma)$ 。

本文利用 MCMC 方法与贝叶斯模型结合起来进行贝叶斯推断。我们对涉及到的参数密度进行 MCMC 采样, 并得到所需样本, 这样可以将贝叶斯推断中的似然函数的积分问题转化为简单的离散求和形式处理, 最后进行均一化处理, 如式(14)所示:

$$P(\mathcal{E}|F) = \int_{\theta} P(\mathcal{E}|F, \theta) P(\theta) d\theta = \frac{1}{n} \sum P(\mathcal{E}|F, \theta_i) P(\theta_i) \quad (14)$$

之后, 我们针对研究区域深部成矿构造线串模型进行扰动, 即对线串上的每个点设定一个扰动阈值, 新的线串上的点是在这个阈值中生成的。最终得到新的线串模型。由于扰动过程中, 每个数据点存在不相关性, 因此扰动线串呈现锯齿状。对此, 我们为新扰动的线串数据点设置一定的约束条件, 使其扰动合理。我们用一开始的数据点构建图, 使其扰动后的数据点按照设定的图结构来约束, 从而达到平滑线串的目的。得到新线串之后, 再针对每一个线串计算整个成矿构造空间中对应的隐函数集合, 通过这些得到的隐函数作为先验条件得出其所对应的后验概率, 再同样利用 MCMC 方法对后验概率进行采样, 最终得到符合要求的线串模型样本为后续不确定性的可视化提供基础。

### 3.4. 信息熵

本文使用信息熵的表示方法来对三维地质模型的不确定性进行度量, 这种方法被广泛应用于结构地质背景下的不确定性研究中。信息熵公式[25]如下:

$$H(x) = -\sum_{i=1}^n p(x_i) \log(p(x_i)) \quad (15)$$

其中,  $p(x_i)$  表示随机事件  $x_i$  的概率。如果事件发生的概率越大, 不确定性就越小, 信息熵也越小。反之, 则越大。

前文中提到, 我们通过 MCMC 方法对扰动的线串进行采样, 得到了  $n$  种不同的线串数据集, 最终产

生  $n$  种不同的模型展示。我们设定  $x$  为深部成矿构造空间中的每一个立方体单元,  $F$  为地层地质单元, 表示不同的岩性类型, 本文中只考虑两种地层单元, 即上下盘。则整个构造空间中每一个立体单元  $x$  的指示函数  $I_F$  为:

$$I_F(x) = \begin{cases} 1 & x \in F \\ 0 & x \notin F \end{cases} \quad (16)$$

对于  $n$  个线串模型, 我们使用以下函数来估算每个立体单元的信息概率:

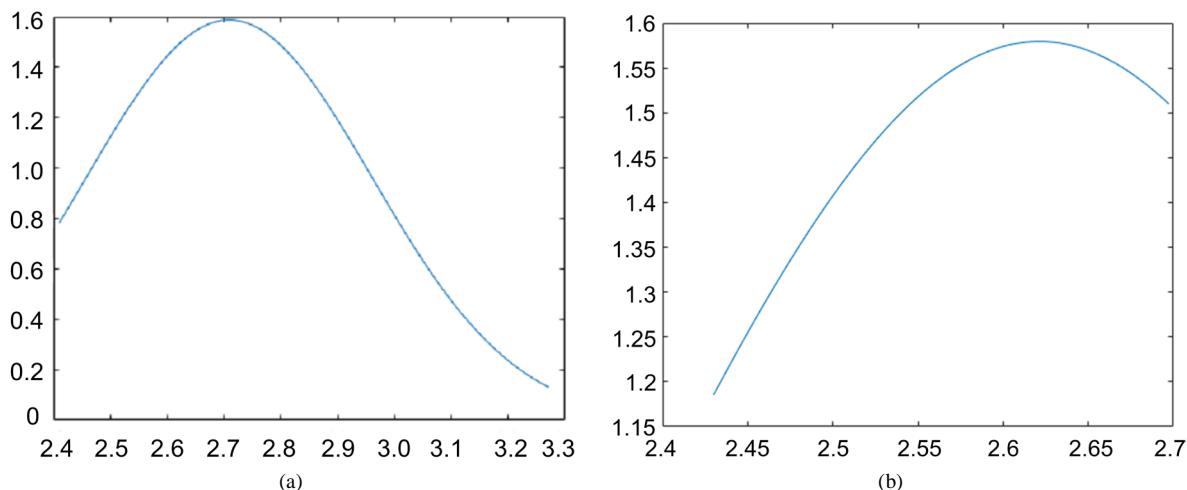
$$P_F(x) = \sum \frac{I_F(x)}{n} \quad (17)$$

将得到的每个立体单元的信息概率  $p(x)$  带入到式(15)中, 可以求得其信息熵值, 最终将整个深部成矿构造空间中的所有立体单元的信息熵展示出来, 从而实现对不确定性的可视化。

## 4. 结果

### 4.1. 物性参数分布

我们通过表 2 的上下盘岩性密度数据其作为用于概率估计的数据样本, 利用核密度估计方法对采样数据进行概率估计。最终得到上下盘的概率密度分布, 如图 5 所示。



**Figure 5.** (a) Physical Property Probability Density Distribution of hanging wall; (b) Physical Property Probability Density Distribution of foot wall

**图 5.** (a) 上盘物性参数概率密度分布; (b) 下盘物性参数概率密度分布

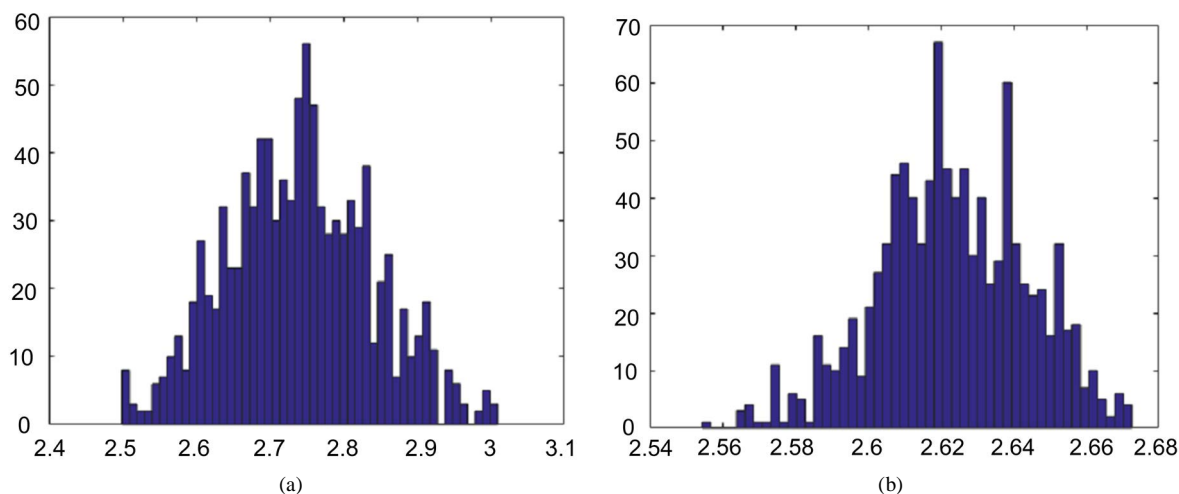
图 5 表明, 上盘的物性参数采样样本主要集中于  $2.74 \text{ g/cm}^3$  左右, 下盘主要集中在  $2.62 \text{ g/cm}^3$  左右, 且概率密度呈现一定的高斯分布。

### 4.2. 不确定性可视化

#### 4.2.1. 物性参数样本

前文中提到, 在求解似然函数时遇到了积分问题, 积分求解相对困难, 因此, 本文在贝叶斯推断过程中, 利用了 MCMC 方法对参数  $\theta$  进行了采样。在采样过程中, 我们根据收集到的研究区域上下盘物性参数的参考范围, 为采样程序设定上下阈, 并为上下盘分别输入一个采样所需的初始物性密度值。利用图 5 中得到的上下盘概率密度函数, 最终采样得了上下盘各 1000 个密度样本。样本的频数分布如图 6 所示。



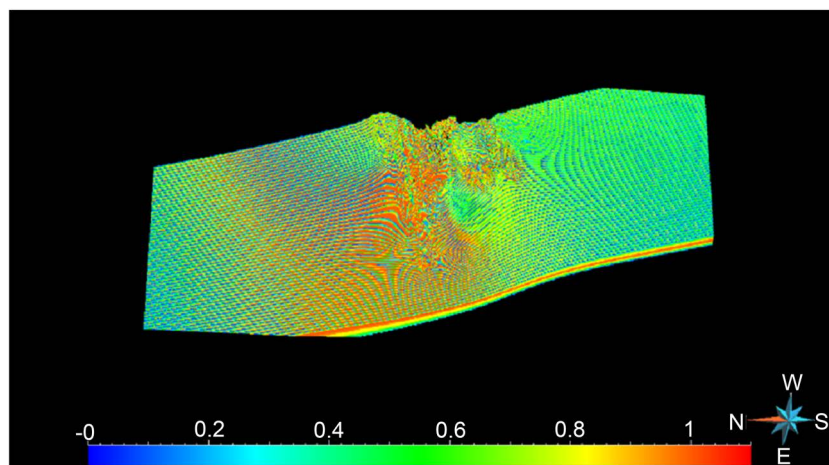


**Figure 6.** (a) Physical parameters Samples of hanging wall; (b) physical parameters Samples of foot wall  
**图 6.** (a) 上盘物性参数采样样本; (b) 下盘物性参数采样样本

图 6 表明, 利用 MCMC 方法采样得到的结果与图 5 概率密度分布趋势吻合, 呈现一定的高斯分布, 且采样结果处于合适的密度范围, 可以用于后续的贝叶斯推断。

#### 4.2.2. 信息熵

我们根据收集到的研究区域初始线串模型扰动出了 100 个线串并计算得到每个线串的隐函数模型, 再利用前文中物性参数采样结果进行贝叶斯推断, 得到每个线串的后验概率, 基于这些后验概率设置新的接受率, 从中接受了其中的 71 个样本, 最终计算得到了信息熵的模型, 结果如图 7 所示。



**Figure 7.** Three-dimensional model information entropy of deep metallogenic structure  
**图 7.** 深部成矿构造三位模型信息熵

信息熵越大, 则不确定性越大, 图 7 中所示红色区域表示的信息熵最大, 代表该区域不确定性最大, 而这部分区域很多集中在模型中部陡峭位置, 这是由于该区域地势复杂, 在对三维模型进行构造的过程中难免会有比较大的误差, 存在较大的不确定性; 而随着预测深度的加深, 模型也呈现出部分信息熵较大区域, 这是由于深部区域数据稀少, 不确定性随着深度的增加而增加, 通过这种方法可以很直观的展示出三维地质模型的不确定性。

## 5. 结论

1) 本文根据大尹格庄矿床钻孔的物性参数采样样本, 利用核密度估计方法得到了位于该研究区域断裂的上下盘密度概率分布, 为地质三维模型不确定性研究提供非常重要的基础。

2) 本文根据大尹格庄矿床重力异常数据, 建立贝叶斯框架中的似然函数, 并结合 MCMC 方法推断了招平断裂面形态的后验概率分布, 基于此后验概率, 采用信息熵方法对三维地质模型的不确定性进行了可视化。通过结果可发现出地下地质特征的复杂性和数据的有限性是造成模型不确定性的主要原因。通过计算得到的可视化模型是建立在当前输入的三维地质模型基础上, 这可以很直观的展现该模型的不确定性, 有助于引导三维地质模型修正工作沿着不确定性更小的部位开展深部三维结构重建。

## 参考文献

- [1] Zhao, P. (1992) Theories, Principles, and Methods for the Statistical Prediction of Mineral Deposits. *Mathematical Geology*, **24**, 589-595. <https://doi.org/10.1007/BF00894226>
- [2] 肖克炎. 大比例尺综合信息成矿预测的研究问题及途径[J]. 黄金地质科技, 1993(4): 34-39.
- [3] Caumon, G., Ortiz, J.M. and Rabeau, O. (2006) A Comparative Study of Three Data-Driven Mineral Potential Mapping Techniques. In: *IAMG06*, Belgium.
- [4] 成秋明. 成矿过程奇异性与矿产预测量化的新理论与新方法[J]. 地学前缘, 2007, 14(5): 42-53.
- [5] Wang, G., 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. *Computers & Geosciences*, **37**, 1976-1988. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.05.007>
- [6] 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.
- [7] 毛先成. 三维数字矿床与隐伏矿体立体定量预测研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2006: 1-100.
- [8] 袁峰, 李晓晖, 张明明. 隐伏矿体三维综合信息成矿预测方法[J]. 地质学报, 2014, 88(4): 630-643.
- [9] Martin, L., Perron, G. and Masson, M. (2007) Discovery from 3D Visualization and Quantitative Modelling. In: *Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration*, Toronto.
- [10] 赵鹏大. 成矿定量预测与深部找矿[J]. 地学前缘, 2007, 14(5): 1-10.
- [11] 滕吉文, 张永谦, 阮小敏, 等. 地球内部壳幔介质地震各向异性与动力学响应[J]. 地球物理学报, 2012, 55(11): 3648-3670.
- [12] 吕庆田, 刘振东, 严加永, 等. 铜陵矿集区地壳结构格架: 反射地震证据[C]//2014年中国地球科学联合学术年会, 2014年10月20日~23日, 北京.
- [13] 曾广兵, 高星, 高凤. 招平断裂带大尹格庄-夏甸段控矿构造性质分析[C]//2016年第一届今日财富论坛论文集. 北京: 今日财富杂志社, 2016: P618.51.
- [14] 高星, 杨斌, 陈艳, 等. 山东大尹格庄金矿床控矿构造性质与演化[J]. 矿床地质, 2010, 29(S1): 45-46.
- [15] Mao, X., Ren, J., Liu, Z., et al. (2019) Three-Dimensional Prospectivity Modeling of the Jiaojia-Type Gold Deposit, Jiaodong Peninsula, Eastern China: A Case Study of the Dayingezhuang Deposit. *Journal of Geochemical Exploration*, **203**, 27-44. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.04.002>
- [16] Pearl, J. (1986) Fusion, Propagation, and Structuring in Belief Networks. *Artificial Intelligence*, **29**, 241- 288. [https://doi.org/10.1016/0004-3702\(86\)90072-X](https://doi.org/10.1016/0004-3702(86)90072-X)
- [17] 肖张波. 地震数据约束下的贝叶斯随机反演方法研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2013.
- [18] 李东利, 孟强, 赵明. 边坡稳定不确定性分析的贝叶斯方法[J]. 河南城建学院学报, 2013, 22(5): 9-13.
- [19] 胥新政, 强毅, 傅华栋. 基于贝叶斯方法的不确定性信息处理研究进展综述[J]. 机电产品开发与创新, 2018, 31(6): 1-2+9.
- [20] 曹哲铭, 尹立子. 浅析核密度估计方法[J]. 中国科技博览, 2014(37): 345.
- [21] 李存华, 孙志挥, 陈耿, 等. 核密度估计及其在聚类算法构造中的应用[J]. 计算机研究与发展, 2004, 41(10): 1712-1719.
- [22] Bhattacharyya, B.K. (1964) Magnetic Anomalies Due to Prism-Shaped Bodies with Arbitrary Polarization. *Geophysics*,

29, 517-531. <https://doi.org/10.1190/1.1439386>

[23] 王建平, 程声通, 贾海峰. 基于 MCMC 法的水质模型参数不确定性研究[J]. 环境科学, 2006, 27(1): 24-32.

[24] 房爱东, 谢士春. MCMC 采样技术及其在贝叶斯推断上的应用[J]. 长沙大学学报, 33(2): 6-10.

[25] Núñez, J.A., Cincotta, P.M. and Wachlin, F.C. (1996) Information Entropy. *Celestial Mechanics & Dynamical Astronomy*, **64**, 43-53. <https://doi.org/10.1007/BF00051604>