

Three-Dimensional Structure Modeling of Jiaojia Fault Metallogenic Structure in Northwestern Jiaodong Peninsula, Shandong Province

Jinli Wang^{1,2}, Xiancheng Mao^{1,2}

¹Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring, Ministry of Education, Changsha Hunan

²School of Geosciences and Info-Pysics, Central South University, Changsha Hunan
Email: wjlcsu@126.com

Received: Mar. 4th, 2020; accepted: Mar. 17th, 2020; published: Mar. 24th, 2020

Abstract

The northwest area of Jiaodong is the biggest gold ore-concentration area in China, and the Jiaojia fault is one of the main ore-controlling faults in the gold ore cluster. It has huge prospecting potential. With the increase of predicted depth, the exploration of deep mineral resources largely depends on the knowledge of morphology and structure of metallogenic structure. Based on the previous research accumulation and exploration data, this paper uses the method of three-dimensional structure modeling to establish a complete three-dimensional structure model of Jiaojia fault metallogenic structure in the gold ore cluster of northwestern Jiaodong Peninsula. The three-dimensional structure model covers the range from the surface to -3000 meters. It can provide reliable model support for the deep metallogenic prediction and is of great significance for deep ore prospecting.

Keywords

Gold Ore Concentration Area in Northwestern Jiaodong Peninsula, Jiaojia Fault, Metallogenic Structure, Three-Dimensional Structure Modeling

胶西北金矿集区焦家断裂成矿构造三维结构建模

王金利^{1,2}, 毛先成^{1,2}

¹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

²中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙

Email: wjlcsu@126.com

收稿日期: 2020年3月4日; 录用日期: 2020年3月17日; 发布日期: 2020年3月24日

摘要

胶西北地区是中国最大的金矿集区, 焦家断裂带是矿集区内主要控矿断裂带之一, 具有巨大的找矿潜力。随着预测深度的增加, 深部矿产资源勘探工作很大程度上依赖于对成矿构造形态和结构的认识。本文基于以往研究积累和勘查资料, 利用成矿构造三维结构建模的方法建立胶西北金矿集区焦家断裂成矿构造完整的三维结构模型, 涵盖地表至地下3000米范围, 为深部成矿预测提供可靠的模型支撑, 对深部找矿具有重要意义。

关键词

胶西北金矿集区, 焦家断裂, 成矿构造, 三维结构建模

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

随着露头矿、地表矿、浅部矿和易识别矿的日益减少, 矿产资源勘探工作逐步向第二深度空间发展 [1] [2]。随着预测深度的增加, 矿产资源勘探与预测更加依赖于对研究区成矿构造的推断和认知。研究表明, 矿床的形成明显地受到地质构造的控制, 在空间上既表现为构造对矿床产状的控制, 又表现为对矿床形成的约束 [3] [4] [5] [6]。因此, 正确认识和把握成矿构造的深部三维结构对于深部矿产资源预测与勘探工作十分重要 [7] [8] [9]。三维结构建模方法是基于各类勘探资料, 借助计算机软件再现地质对象的几何结构形态, 在更好地帮助理解地质构造的同时又能应用于矿产勘查工作。虽然当前对于矿床尺度的三维建模方法趋于成熟, 但对于区域级别的三维建模仍存在巨大的挑战 [10] [11] [12]。

胶西北地区是世界第三、中国第一大金矿集区, 其中焦家断裂带是矿集区内主要控矿断裂带之一, 已探明资源储量 1260 t [13]。2005 年以来, 在胶西北金矿集区焦家断裂带相继发现和探明了寺庄深部、马塘深部、焦家深部等大型 - 超大型金矿床 [14], 表明焦家断裂带区域尤其是深部空间仍具备巨大的找矿潜力。因此, 本文以焦家断裂带为研究区, 在前人已有研究成果的基础上, 系统收集和整理了相关的各类地质资料, 将地质体三维建模理论与方法应用于胶西北金矿集区焦家断裂成矿构造建模中, 建立完整且准确的焦家断裂成矿构造三维结构模型, 为深部成矿预测与深部找矿提供实用可靠的模型支撑。

2. 研究区地质概况

胶东半岛位于华北克拉通东部, 金矿储量超过 4500 t [15], 其中超过 90% 的金矿资源产于胶西北的伸展构造内, 焦家断裂带是其主要的控矿断裂带之一。焦家断裂北起黄山馆, 向南经新城、焦家至平里店, 总长 27 km, 宽 80~500 m。断裂的主要走向为 NNE~NE, 10°~40°。焦家断裂平面上呈 S 型, 形态不规则, 膨缩现象明显, 其下盘发育较多与走向平行或呈入字型相交的分枝构造。断裂沿走向呈舒缓波状,

发育于早前寒武纪变质岩系与玲珑花岗岩、早白垩世郭家岭花岗岩的接触部位或内接触带, 断裂发育部位往往形成较厚的灰黑色断层泥和规模不等的破碎蚀变岩带[16]-[20]。

焦家断裂带内已发现评价的金矿床(点)共计十余处, 其中包括新城、焦家、河西、河东、望儿山、东季、马塘、上庄等特大 - 大型金矿床。这些金矿床均受控于北东向的焦家主于断裂及下盘伴生、派生的次级断裂及裂隙群。矿床类型主要为岩浆热液成因的破碎带蚀变岩型和少量含金石英脉型。区域地质图如图 1 所示。

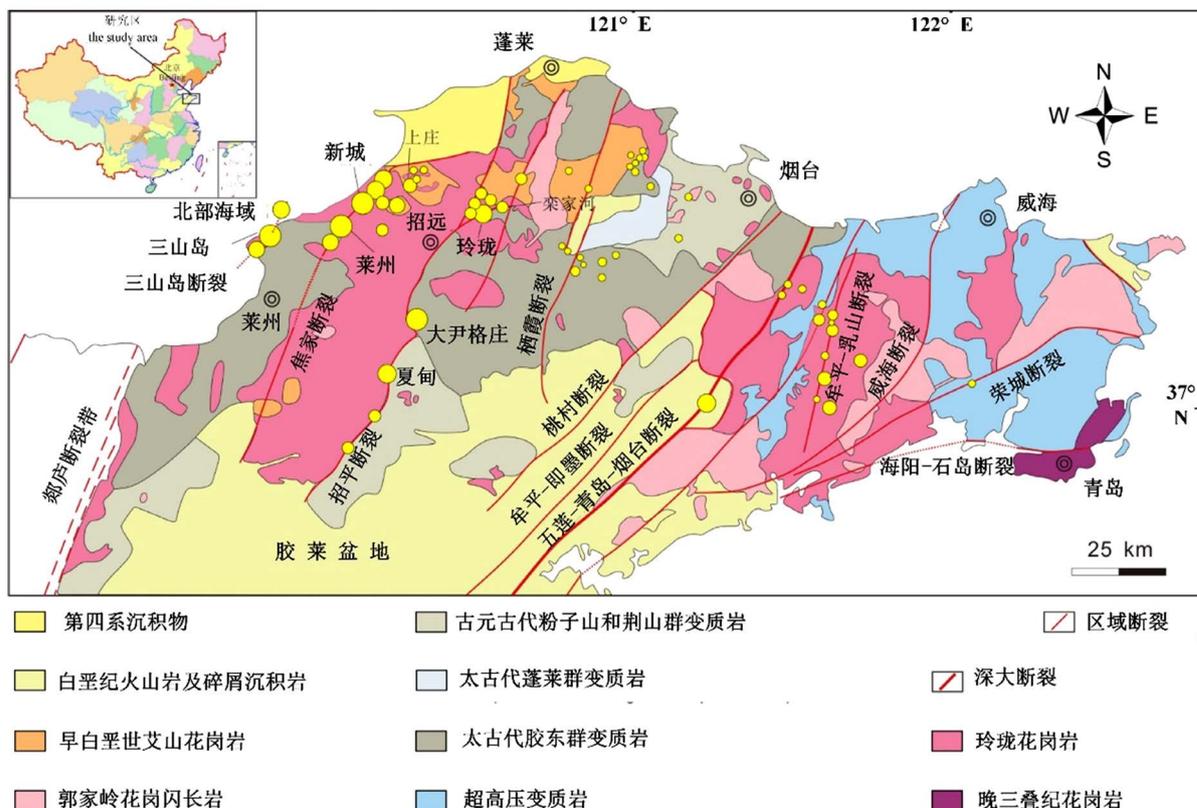


Figure 1. Geological map of the Jiaodong peninsula (Modified after Song *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2016) [16] [17]
 图 1. 胶东半岛地质简图(改自 Song *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2016) [16] [17]

3. 三维结构模型的建立

三维结构建模是以野外地质调查和地质勘探资料为数据基础, 利用计算机对研究对象的地质结构形态进行定量描述, 采取三维建模方法得到真实可靠的三维结构模型[11] [21] [22]。

3.1. 地质资料收集与数字化

3.1.1. 地质资料收集

本文所涉及的地质资料收集是指对焦家断裂带地区的地质工作历史与相应地质资料成果进行搜集、整理、存档的过程, 是开展焦家断裂带成矿构造三维结构建模的工作基础, 在三维结构建模工作中起着重要的数据支撑作用。

本文收集的地质资料成果主要分为地质勘查资料、矿山生产资料和物化探资料。其中地质勘查资料从内容形式上主要分为普查报告、详查报告、储量核实报告以及其他重要的地质资料。矿山生产资料一

般是指矿山在实际生产实践中各类地质图件、地质数据等, 直接为矿山生产服务(如表 1 所示)。物化探资料一般指针对钻探数据稀少的区域开展地球物理和地球化学勘探, 获得各种的原始勘探数据、图件和研究报告等资料。

Table 1. Summary of mine production data

表 1. 矿山生产资料汇总

矿区	地形地质图	勘探线剖面图	中段平面图	钻孔柱状图	其他资料
焦家金矿	1	10	0	395	12
新城矿区	1	9	2	36	7
上庄矿区	0	2	0	0	0
河西矿区	1	10	0	15	2
下庄矿区	2	5	0	10	10
台上矿区	0	11	0	22	30
焦家金矿	1	10	0	395	12

3.1.2. 地质资料数字化

本文的地质资料数字化主要是利用计算机软件将地质资料中的成矿构造进行描绘得到其三维矢量结构以便直接应用于三维建模过程中。主要包括两部分工作: 成矿构造二维结构的圈定、成矿构造二维结构到三维结构的转换。

成矿构造二维结构圈定是将收集的地质资料图件中的成矿构造准确地描绘出来得到其二维矢量结构, 一般流程是首先对地质图件进行矢量化, 然后对成矿构造进行圈定, 圈定过程主要以所在地质剖面为基础, 参考所在剖面和中断面的勘探工程数据, 确保圈定过程的准确性。如图 2 所示。

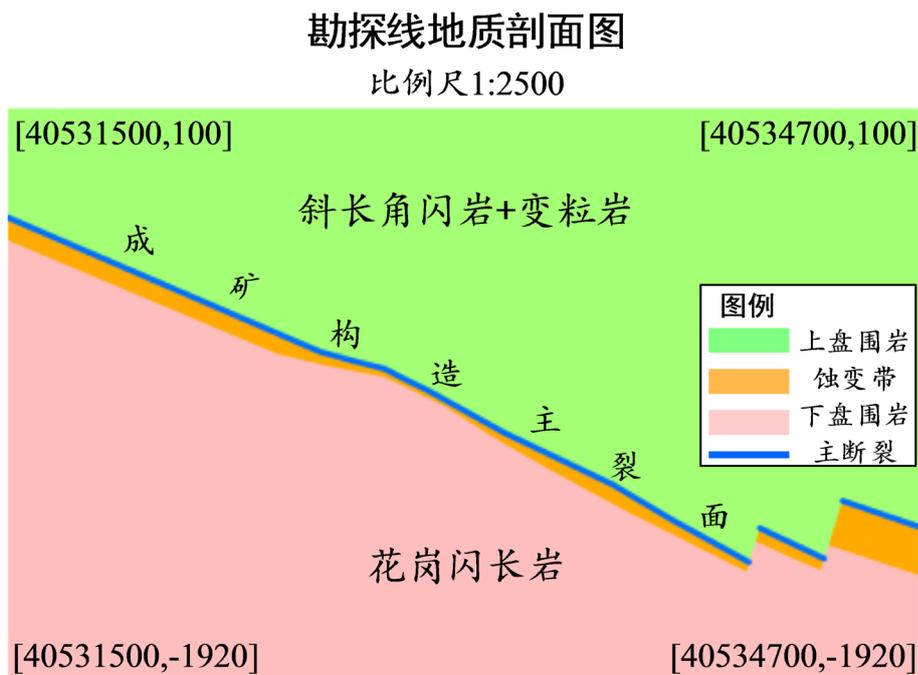


Figure 2. Schematic diagram of metallogenic structure delineation

图 2. 成矿构造圈定示意图

成矿构造二维结构到三维结构的转换是借助勘探工程信息将圈定的二维矢量结构通过空间坐标变换方法将其转换为三维矢量结构。原理如图 3 所示。AB 为该剖面图的勘探线, 其起止点坐标已知为 (x_A, y_A, z_A) 、 (x_B, y_B, z_B) , P 为剖面图上的一点, 假设其坐标为 (x_P, y_P, z_P) , 并从图上可读出其南北方向的坐标值 y_P 和高程值 z_P , 故只需求出东西方向的未知坐标值 x_P , 就可以实现对剖面图进行配准了。显然, P 点在水平面上的投影点 C 位于 AB 线上, 也就是说 P 点与其在水平面的投影点 C 具有相同的水平坐标, 即 $x_P = x_C$, $y_P = y_C$, 问题即转变为求 AB 线上 C 点东西方向上的坐标 x_C , 根据直线方程式, 可得:

$$x_C = \frac{x_B - x_A}{y_B - y_A} (y_C - y_A) + x_A$$

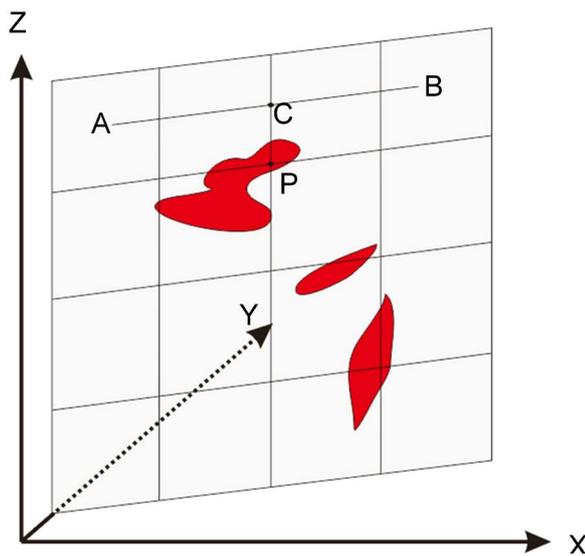


Figure 3. Coordinate calculation of control points in geologic section
图 3. 剖面图控制点坐标计算

获得了控制点的三维坐标关系后, 便可以将二维矢量结构转换为三维矢量结构, 即可以直接用于三维建模工作。

3.2. 三维结构建模方法

一般来讲, 现有的三维建模多是依据详尽的地质资料实施的, 而对于地质资料稀缺的深部, 则缺少相对有效的建模方案。本文在已有三维地质建模方法的基础上, 综合多类地球物理勘探资料, 对深部结构进行了推断建模, 弥补了深部成矿构造因数据稀疏而难以建模的缺点。本文采取的三维结构建模方法主要是利用三维建模软件 GOCAD 采用人机交互方式对成矿构造进行三维定量表达。针对成矿构造的深浅部分以及地质资料的详尽程度, 三维结构建模可以分为两部分工作进行, 即针对地质资料相对详尽的浅部三维结构的显式建模部分和针对地质资料相对稀缺的深部三维结构的推断建模部分。

3.2.1. 浅部三维结构显式建模

对于成矿构造的浅部, 地质资料数字化得到的三维结构数据较为齐全, 将其按照成矿构造的形态正确组合得到浅部成矿构造的三维线串模型, 在此基础上, 充分依据已有的实测剖面、图切剖面、勘探剖面, 按照线串对应连接原则与方法, 构建成矿构造的浅部三维线框模型。一般流程如图 4 所示。

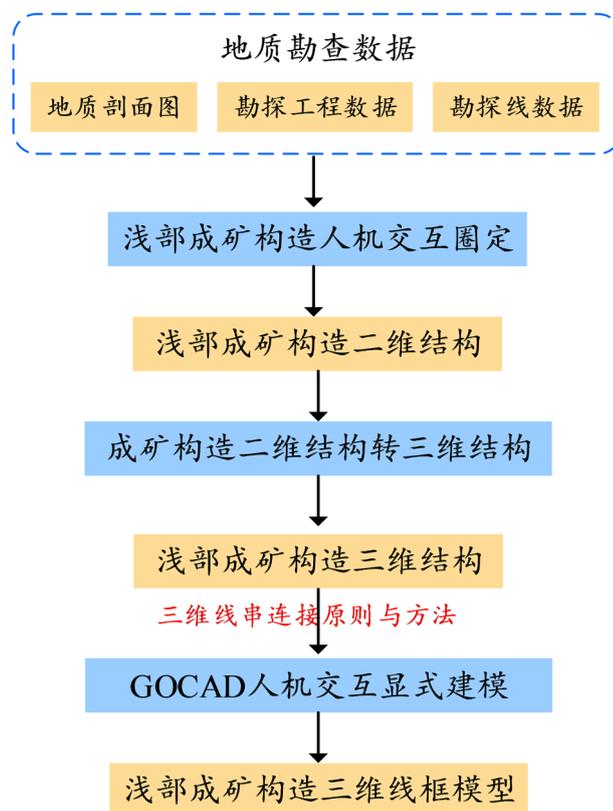


Figure 4. Three-dimensional modeling process of shallow metallogenic structure
图 4. 浅部成矿构造三维建模流程

3.2.2. 深部三维结构推断建模

本文深部三维结构推断建模可以将浅部三维结构模型延伸至-3000米,对于成矿构造的深部,地质勘探资料相对稀缺,只依靠地质资料中勘探剖面数据得到的成矿构造三维结构不能建立深部完整的三维模型,为此,需要借助深部物化探解释剖面等资料,在相关地质调查、已有研究成果及地质知识的指导下进行推断建模[23]。根据数据来源的不同,深部成矿构造推断线串可分为3类:勘探工程剖面推断线串、物化探解释剖面推断线串、虚拟勘探剖面推断线串。勘探工程剖面推断线串的构建的主要方法有:①依据临近工程勘探线剖面进行推断;②根据重力等值线图进行推断;③依据该剖面上的趋势进行推断;④根据临近物化探解释剖面进行推断。物化探解释剖面推断线串的构建的主要方法有:①依据该剖面上的趋势进行延伸;②根据临近物化探解释剖面进行延伸;③根据重力勘探等值线图进行延伸;④依据临近勘探工程剖面进行延伸。虚拟勘探线剖面线串的构建的主要原则有:①尽量选取推断部分少、且准确的已知勘探线作为控制线;②虚拟勘探线应尽量覆盖控制线间已有的物探、勘探工程勘探线,将中间涉及到的剖面依据计算结果进行延伸,以便最大限度的利用已知数据。这样,在最大程度上确保模型准确性的前提下建立起完备的成矿构造的深部三维结构模型。一般流程如图5所示。

虽然物化探数据为深部成矿构造三维结构建模提供了参考信息,但是,因不同勘探工程的具体情况(如勘探深度、勘探范围、勘探精度等)存在差异,由此得到的各类推断线串也存在些许差异,为此,需要对推断的深部成矿构造的二维结构进行综合比较分析,以判断其是否符合地质规律。综合比较分析的方法主要是:①结合勘探数据对各类推断线串进行定性分析,看是否相互矛盾;②以研究区已有的成矿

构造的产状信息和形态结构信息为参考,判断各类线串是否违背已有信息。对于不符合地质规律的线串,重新进行推断。这样做的目的,是在充分利用数据的情况下保证模型的精度和可靠性,以便建立的深部成矿构造模型更好地为深部找矿服务。

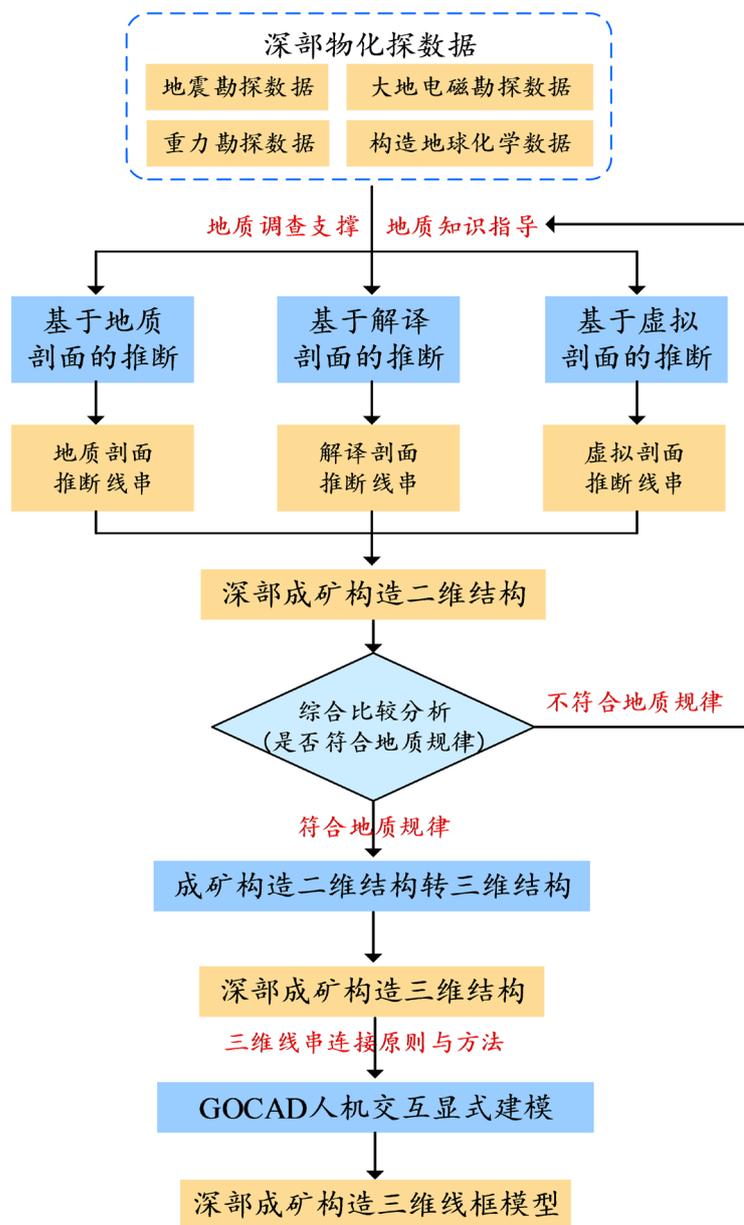


Figure 5. Three-dimensional modeling process of deep metallogenic structure
图 5. 深部成矿构造三维建模流程

3.3. 三维结构建模成果

在焦家断裂带已有的地质资料的基础上,利用成矿构造三维结构建模方法分别建立起了焦家主断裂成矿构造浅部和深部的三维结构线串及线框模型,同时建立了焦家次级断裂成矿构造三维结构线串及线框模型。最终三维结构建模成果如图 6~10 所示。

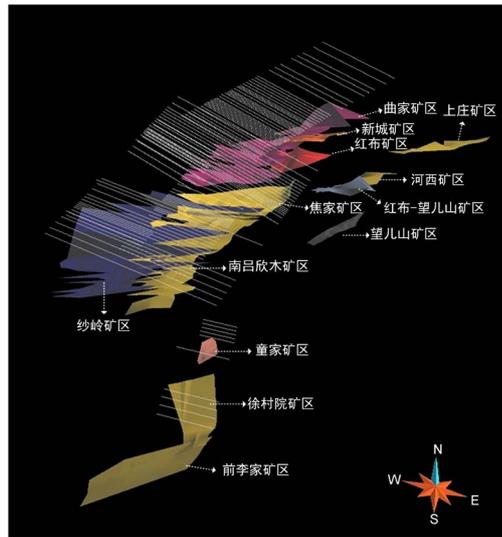


Figure 6. Wireframe models of shallow metallogenic structure of Jiaojia main fault
图 6. 焦家主断裂浅部成矿构造线框模型

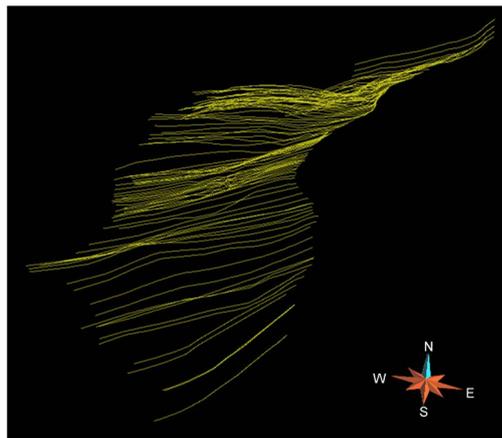


Figure 7. String models of deep metallogenic structure of Jiaojia main fault
图 7. 焦家主断裂深部成矿构造线串模型

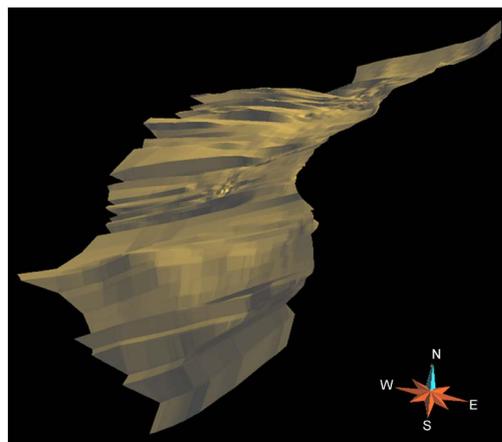


Figure 8. Wireframe models of deep metallogenic structure of Jiaojia main fault
图 8. 焦家主断裂深部成矿构造线框模型

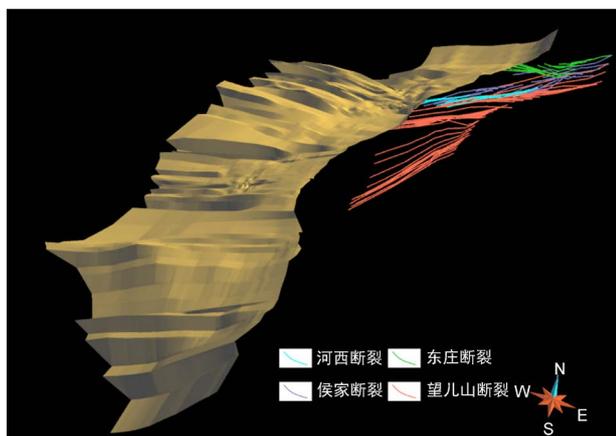


Figure 9. String models of metallogenic structure of Jiaojia secondary fault
图 9. 焦家次级断裂成矿构造线串模型

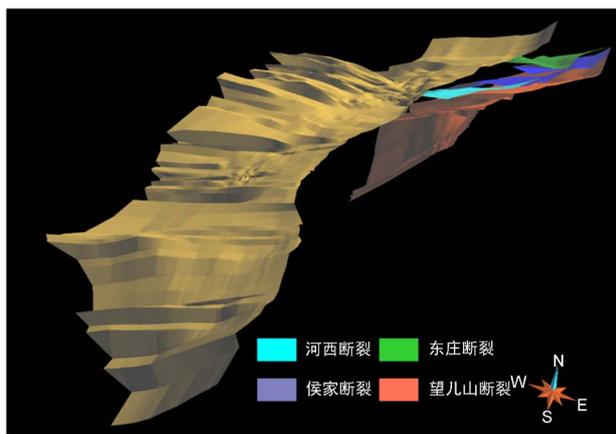


Figure 10. Wireframe models of metallogenic structure of Jiaojia secondary fault
图 10. 焦家次级断裂成矿构造线框模型

4. 结论

1) 本文建立了包含次级断裂在内的胶西北金矿集区焦家断裂带的完整的三维结构模型, 为该地区的相关地质研究提供了模型支撑。

2) 在确保模型准确性的前提下, 所建立的成矿构造的三维结构模型涵盖地表至地下 3000 米, 对深部成矿预测与找矿具有重要意义。

3) 本文采用的三维结构建模方法是实际建模工作与项目中总结和完善的, 具有较强的实用性和适用性, 能够推广应用于其他研究区和不同地质构造的三维结构建模工作。

参考文献

- [1] 赵鹏大. 成矿定量预测与深部找矿[J]. 地学前缘, 2007, 14(5): 1-10.
- [2] 滕吉文. 中国地球深部物理学和动力学研究 16 大重要论点、论据与科学导向[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(3): 801-829.
- [3] 陈国达. 成矿构造研究法[M]. 北京: 地质出版社, 1978.
- [4] 裴荣富. 中国特大型矿床成矿偏在性与异常成矿构造聚敛场[M]. 北京: 地质出版社, 1998.
- [5] 翟裕生. 成矿构造研究的回顾和展望[J]. 地质论评, 2002, 48(2): 140-146.

- [6] Lebrun, E., Miller, J., Thebaud, N., Ulrich, S. and Mccuaig, T.C. (2017) Structural Controls on an Orogenic Gold System: The World-Class Siguiri Gold District, Siguiri Basin, Guinea, West Africa. *Economic Geology*, **112**, 73-98. <https://doi.org/10.2113/econgeo.112.1.73>
- [7] 翟裕生. 论成矿系统[J]. 地学前缘, 1999, 6(1): 13-27.
- [8] 赵文津. 岩石圈深部探测与青藏高原研究[J]. 中国工程科学, 2003, 5(2): 1-15.
- [9] 肖克炎, 孙莉, 阴江宁, 等. 全国重要矿产预测评价[J]. 地球学报, 2014, 35(5): 543-551.
- [10] Houlding, S.W. (1994) 3D Geoscience Modeling-Computer Techniques for Geological Characterization. Springer-Verlag, Berlin. https://doi.org/10.1007/978-3-642-79012-6_2
- [11] 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>
- [12] Wang, G., Zhu, Y., Zhang, S., Yan, C., Song, Y., Ma, Z., Hong, D. and Chen, T. (2012) 3D Geological Modeling Based on Gravitational and Magnetic Data Inversion in the Luanchuan Ore Region, Henan Province, China. *Journal of Applied Geophysics*, **80**, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2012.01.006>
- [13] 李洪奎, 于学峰, 嵇传源, 等. 山东胶东金矿成矿理论体系[J]. 山东国土资源, 2017, 33(7): 1-6.
- [14] 宋明春, 伊丕厚, 徐军祥, 等. 胶西北金矿阶梯式成矿模式[J]. 中国科学(地球科学), 2012, 42(7): 992-1000.
- [15] 宋明春, 张军进, 张丕建, 等. 胶东三山岛北部海域超大型金矿床的发现及其构造-岩浆背景[J]. 地质学报, 2015, 89(2): 365-383.
- [16] Song, M.-C., Li, S.-Z., Santosh, M., *et al.* (2015) Types, Characteristics and Metallogensis of Gold Deposits in the Jiaodong Peninsula, Eastern North China Craton. *Ore Geology Reviews*, **65**, 612-625. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.06.019>
- [17] Yang, L.-Q., Deng, J., Wang, Z.-L. and Guo, L.-N. (2016) Relationships between Gold and Pyrite at the Xincheng Gold Deposit, Jiaodong Peninsula, China: Implications for Gold Source and Deposition in a Brittle Epizonal Environment. *Economic Geology*, **111**, 105-126. <https://doi.org/10.2113/econgeo.111.1.105>
- [18] Li, L., Santosh, M. and Li, S.-R. (2015) The "Jiaodong Type" Gold Deposits: Characteristics, Origin and Prospecting. *Ore Geology Reviews*, **65**, 589-611. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.06.021>
- [19] Guo, L.-N., Marh, E., Goldfarb, R.J., Wang, Z.-L., Li, R.-H., Chen, B.-H. and Li, J.-L. (2016) A Comparison of Jiaojia- and Linglong-Type Gold Deposit ore-Forming Fluids: Do They Differ. *Ore Geology Reviews*, **88**, 511-533. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.12.003>
- [20] 宋英昕, 宋明春, 丁正江, 等. 胶东金矿集区深部找矿重要进展及成矿特征[J]. 黄金科学技术, 2017, 25(3): 4-18.
- [21] 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.
- [22] 毛先成, 陈国琰. 香花岭锡矿床数学模型及立体定量预测初探[J]. 地质与勘探, 1988, 24(10): 25-31.
- [23] Mao, X.-C., Ren, J., Liu, Z.-K., *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>