

胶西北金矿集区深部成矿构造三维建模与找矿意义

毛先成^{1,2)}, 王 琪^{1,2)}, 陈 进^{1,2)*}, 邓 浩^{1,2)}, 刘占坤^{1,2)},
王金利^{1,2)}, 陈建平^{3,4)}, 肖克炎⁵⁾

- 1)中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083;
2)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 410083;
3)中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;
4)北京市国土资源信息研究开发重点实验室, 北京 100083;
5)中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037

摘 要: 胶西北地区是我国最大的金矿集区, 近年来深部资源勘探在胶西北地区取得重大成果。深部勘探显示, 胶西北深部金矿体的产出规律与浅部一致, 严格受区域走滑断裂控制, 因此深部资源的增储极大程度上依赖于对深部成矿构造形态、分布与结构等的认识程度。本文提出深部成矿构造三维建模方法, 综合利用地质、地球物理、地球化学勘查等数据, 建立浅部建模与深部推断相结合的初始模型, 进而, 采用多源数据耦合处理的方法, 构建胶西北金矿集区三山岛断裂、焦家断裂和招平断裂三条断裂带地下 3000 m 以浅的深部成矿构造三维模型。基于深部成矿构造三维模型, 圈定了研究区深部金矿的 12 个找矿靶区, 对深部找矿具有重要意义。

关键词: 胶西北金矿集区; 深部成矿构造; 多源地学数据; 三维地质模型

中图分类号: P62 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2020.020702

Three-dimensional Modeling of Deep Metallogenic Structure in Northwestern Jiaodong Peninsula and Its Gold Prospecting Significance

MAO Xian-cheng^{1,2)}, WANG Qi^{1,2)}, CHEN Jin^{1,2)*}, DENG Hao^{1,2)}, LIU Zhan-kun^{1,2)},
WANG Jin-li^{1,2)}, CHEN Jian-ping^{3,4)}, XIAO Ke-yan⁵⁾

- 1) School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha, Hunan 410083;
2) Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring (Ministry of Education), Central South University, Changsha, Hunan 410083;
3) School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083;
4) Beijing Key Laboratory of Land and Resources Information Research and Development, Beijing 100083;
5) MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037

Abstract: The northwest area of Jiaodong (east Shandong) is the biggest gold ore concentration area in China. In recent years, great achievements have been made in the exploration of deep resources. Deep exploration shows that the production regularity of deep gold orebodies in northwestern Jiaodong is consistent with that in the shallow part, i.e., they are strictly controlled by regional strike-slip faults. Therefore, the reserve increase of deep resources largely depends on the understanding of the form, distribution and structure of deep metallogenic structure. This paper proposes a three-dimensional modeling method for deep metallogenic structures. Rudimentary models of Sanshandao, Jiaojia, and Zhaoping faults, as a basic deep structural frame, were firstly constructed by combining shallow modeling with deep inference through utilizing geological, geophysical and

本文由国家重点研发计划“深地资源勘查开采”重点专项课题(编号: 2017YFC0601503)和国家自然科学基金面上项目(编号: 41772349; 41972309)联合资助。

收稿日期: 2019-12-10; 改回日期: 2020-01-09; 网络首发日期: 2020-02-11。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 毛先成, 男, 1963 年生。教授, 博士生导师。主要从事矿产资源三维预测研究。通讯地址: 410083, 湖南省长沙市岳麓区麓山南路 932 号。E-mail: mxc@csu.edu.cn。

*通讯作者: 陈进, 男, 1980 年生。博士, 讲师。主要从事矿产资源定量预测方面的研究与教学。E-mail: 6116756@qq.com。

geochemical exploration data. Based on the models, deep models for these faults (with depth up to 3000 m) were further refined via the multi-source data coupling processing approach to decrease uncertainty and bias sourced from individual structure inferring. Based on the three-dimensional models of deep metallogenic structure, the 12 prospecting targets of deep gold deposits in the study area were delineated, which is of great significance in guiding deep prospecting.

Key words: gold ore concentration area in northwestern Jiaodong Peninsula; metallogenic structure; multi-source geological data; three-dimensional geological model

随着地表矿、浅部矿、易识别矿的日益减少,地质找矿工作逐步向第二深度空间发展(滕吉文, 2006; 赵鹏大, 2007)。深部矿产资源预测已成为当前成矿预测研究的重点领域。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(陈国达, 1978; 裴荣富, 1998; 翟裕生, 2002; Lebrun et al., 2017)。因此,深部矿产预测依赖于对研究区深部成矿构造推断和矿化分布规律认识,深部成矿构造及深部成矿作用已成为当前深部找矿工作中的研究热点(翟裕生, 1999; 赵文津, 2003; 肖克炎等, 2014; 向杰等, 2020)。

胶西北地区是世界第三大金矿集区,该地区的找矿工作随着浅部资源量的减少,从浅部逐渐转向深部,并且取得重大突破。胶西北深部金矿床赋存主要由招平、焦家和三山岛三条断裂带控制,已有的勘查结果表明,胶西北主要成矿带金矿深部垂向延伸1000 m,深部找矿潜力巨大。但目前,由于缺乏对成矿构造的深部形态、分布与结构的认识,仅在三条断裂带的局部地段开展了深部找矿工作。针对该问题,

本文提出浅部数据驱动—深部知识驱动—浅部深部结合的耦合建模思路与方法,综合利用地质、地球物理、地球化学勘查多源数据,建立初始模型,进而,采用多源数据耦合处理的方法,建立胶西北金矿集区三山岛断裂、焦家断裂和招平断裂三条断裂带地下3000 m以浅的深部成矿构造三维模型,为深部资源三维预测(Mao et al., 2019; 陈进等, 2020; 邓浩等, 2020)和深部找矿提供模型依据。

1 研究区地质特征

胶东半岛位于华北克拉通东部,是我国最大的金成矿省,金资源量超过4500 t(宋明春等, 2015)。区内的主要矿化类型为破碎蚀变型和石英脉型(Li et al., 2015; Song et al., 2015; 宋明春等, 2015; Guo et al., 2016),前者代表性矿床为焦家金矿、三山岛金矿和大尹格庄金矿,后者为玲珑金矿(图1)。胶东金矿中超过90%的金资源集中产于胶西北的伸展构造内,主要的控矿断裂带是三山岛断裂带、焦家断裂带和招平断裂带。胶东地区近年来的重要找矿进展主要是在这三条成矿带深部取得的,虽然沿这三

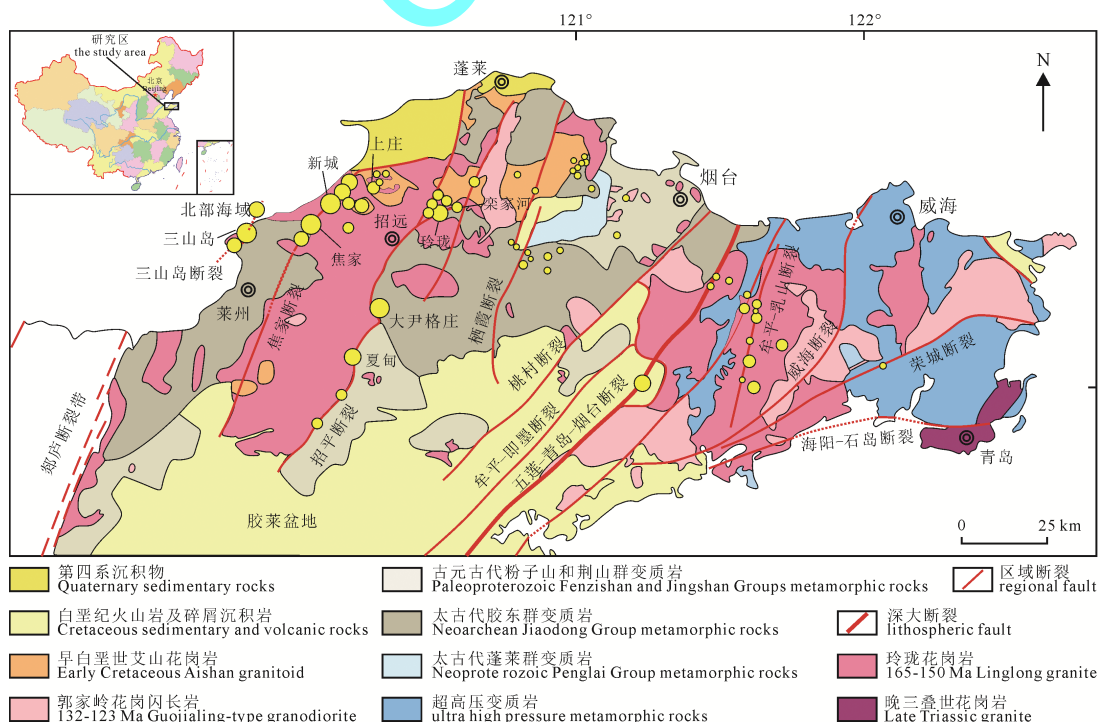


图1 胶东半岛地质简图(修改自文献 Song et al., 2015; Yang et al., 2016)

Fig. 1 Geological map of the Jiaodong peninsula (modified after Song et al., 2015; Yang et al., 2016)

条成矿带局部地段的探矿深度已超过 2000 m, 但三条成矿带上深部和浅部矿体的变化规律指示, 矿带深部仍具有很好的找矿前景(宋英昕等, 2017)。

胶西北金矿的焦家断裂、招平断裂以及三山岛断裂, 它们共同组建成一条伸展构造带, 其中不同的金矿类型、矿体侧伏倾伏规律受到这一伸展构造带的控制(吕古贤等, 2006)。在这些控矿断裂中出现了带有变化性的台阶, 这些台阶由陡变缓, 呈坡坪式或者台阶式特点, 在台阶的平缓位置是矿体厚大部位的赋存之地, 同样呈阶梯式分布, 这一形式被称作“金矿阶梯式成矿模式”(宋明春等, 2012)。另外, 胶西北主要金矿区由浅部至深部矿体分布面积显著扩大、厚度增厚且资源量增多, 深、浅部矿体的分布特点表明, 浅部矿体是矿头, 沿胶西北主要成矿带的金矿床剥蚀程度低, 深部资源潜力大。

2 深部成矿构造三维建模方法

深部成矿构造三维建模是将地质勘探、地震、重力、大地电磁等方法获得的各类数据作为研究深部成矿构造的基本资料, 在使用地质勘探数据构建好浅部成矿构造三维模型的基础上, 利用地震、重力、大地电磁等方法获得的数据, 对深部成矿构造进行推断, 并综合多种推断结果进行耦合处理, 最终得到深部成矿构造三维模型。充分发挥各类数据的优势, 在多层次、多精度和多耦合性的条件下, 能最大程度上避免在构建深部成矿构造过程中的“不确定性”。

2.1 多源数据

用于深部成矿构造建模的数据主要是地质勘探数据和各种类型的物探数据, 本次研究主要收集到了包括地质勘探数据(地质勘探剖面图、钻孔数据)、地震勘探数据(地震剖面图或构造图)、重力勘探数据(重力等值线图)、大地电磁测深法数据(视电阻率剖面图等)。本研究共收集到地质勘探剖面图 167 幅、地质勘探单项工程数据(孔深大于 2000 m 的深部钻孔)41 条、地震勘探地震剖面图 4 幅、大地电磁及重力等值线图 1 幅、大地电磁和磁法勘探数据图件共 76 幅, 如表 1 所示。

地震剖面图是通过加工处理地震勘探野外观

测所得的地震原始资料, 将地震数据变成地质语言的地震勘探数据。可以查明区域构造地质特征, 推断地下地质构造的特点, 详细了解地层的构造与分布。

重力异常图是通过处理重力勘探野外观测数据, 进行绘制的重力勘探数据图件。结合工作区的地质资料, 对重力异常进行定性或定量解释, 可推断复盖层以下密度不同的矿体与岩层埋藏情况, 研究区域地质构造, 查明与成矿有关的构造和岩体, 从而找出岩矿体存在的位置和地质构造情况。

视电阻率剖面图是通过原始野外观测资料和各种等值线断面进行处理和定性分析, 经过反演和地质推断得到的大地电磁勘探数据。根据视电阻率剖面图可以从不同侧面分析测区内地电断面沿水平和垂直方向的地层、构造变化情况, 判断岩石结构和物质组成, 与地下资源(矿等)密切相关。

地震勘探、重力勘探和大地电磁测深都可获取深部成矿构造信息, 如推测断裂面。利用地震、重力、大地电磁等多源信息进行深部地质构造重建, 可以充分利用各种数据的优势, 提高模型构建的精度和成果数据的可靠性。

2.2 建模方法

深部成矿构造三维模型的构建, 需从基本的地质认识和已有的钻探数据出发, 通过浅部数据驱动和深部知识驱动方式构建三维深部成矿构造三维结构初始模型。在初始模型的基础上, 再结合已有的地震、重力、大地电磁、构造地球化学等资料, 推断从区域到矿床(体)的多尺度深部地质构造的三维结构模型。利用地震、重力和大地电磁法, 获取深部地质构造格架、三维形态和分布样式。从多种方式获取的深部成矿构造三维信息进行多层次、多精度耦合, 最终实现深部成矿构造的三维模型的最优重建。

根据深部物探反演剖面及深部地质推断数据构建深部成矿构造模型。为了适应缺乏深部可靠性数据的现状, 本文研究在初始模型的基础上, 结合已有的地震、重力和大地电磁等多源信息, 推断深部的成矿构造, 提出了深部成矿构造三维建模工作流程, 流程图如图 2 所示。

3 深部成矿构造三维模型与找矿意义

3.1 初始模型构建

由于缺少深部勘探工程及可靠地质剖面, 深部成矿构造三维模型的构建主要依靠深部物探解释剖面等深部二/三维地质调查、相关研究成果及已有地质知识。根据不同数据来源, 主断裂线串可分为 3 类: 地质勘探剖面推断线串、物探解译剖面推断

表 1 深部成矿构造的多源数据

Table 1 Multi-source data of deep metallogenic structure

研究区	数据类型	数量
胶西北 矿集区	地质勘探剖面图及钻孔资料	167 幅
	深部勘探钻孔数据	41 条
	地震勘探地震剖面图	4 幅
	大地电磁及重力等值线图	1 幅
	大地电磁和磁法勘探	76 幅

线串、虚拟勘探剖面推断线串。对于深部成矿构造三维重建, 关键是确定各剖面上成矿构造在深部的产状与形态, 只要能够确定它们, 三维建模工作与其它地质体是类似的。

胶西北矿集区深部成矿构造三维建模是指通过人机交互的方式将根据地质勘探数据建立的初始模型延伸至深度 3000 m, 构建招平主断裂、焦家主断裂和三山岛主断裂三条成矿带的主断裂面模型。

(1) 基于地质勘探剖面的推断

现有勘探工程的勘探深度尚浅, 不能满足深部地质构造三维模型构建要求, 因此需将已有勘探剖面数据结合地震、重力、大地电磁等数据根据先验地质经验进行深部地质推断, 主要方法有:

① 根据临近勘探线剖面 and 物探解释剖面进行推断;

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。

对于深部地质剖面的推断, 在有可利用数据的情况下, 首先将如地震剖面图、重力等值线图和视电阻率剖面图处理得到所需的推测构造, 对此数据进行定量分析, 进行已知数据推断。临近勘探剖面间地质构造一般具有相似性, 在没有其他物探数据

控制的深部构造, 可依据临近勘探剖面或该剖面的构造趋势, 结合地质经验进行深部地质推断, 也可以在一定程度上避免在构建深部成矿构造过程中的“不确定性”。

以夏甸矿区 469 线为例, 在构建勘探剖面推断线串过程中, 由于现有勘探剖面招平主断裂勘探深度尚浅, 不能满足深部地质构造招平主断裂面构建要求, 因此需将已有勘探剖面数据进行深部推断, 如图 3 所示。结合自身及临近剖面断裂线趋势得到橘黄色推断断裂线; 物探解释剖面 21_xd_L460、21_xd_L470 与夏甸矿区 469 线是平行关系, 断裂走向应大致相同, 结合物探解释剖面推断的断裂趋势综合推断最终得到绿色推断断裂线。

(2) 基于物探解释剖面的推断

物探剖面线串因勘探深度有差别, 对于需要参与深部构造建模而深度未达到要求的必要勘探线剖面, 应进行地质推断, 主要方法有:

① 根据临近物探解释剖面 and 勘探剖面进行推断延伸;

② 根据重力勘探等值线图进行推断延伸;

③ 依据该剖面上的趋势进行推断延伸。

物探解释剖面的推断与地质勘探剖面推断方法一致, 在深部构造有可以利用数据, 如有临近

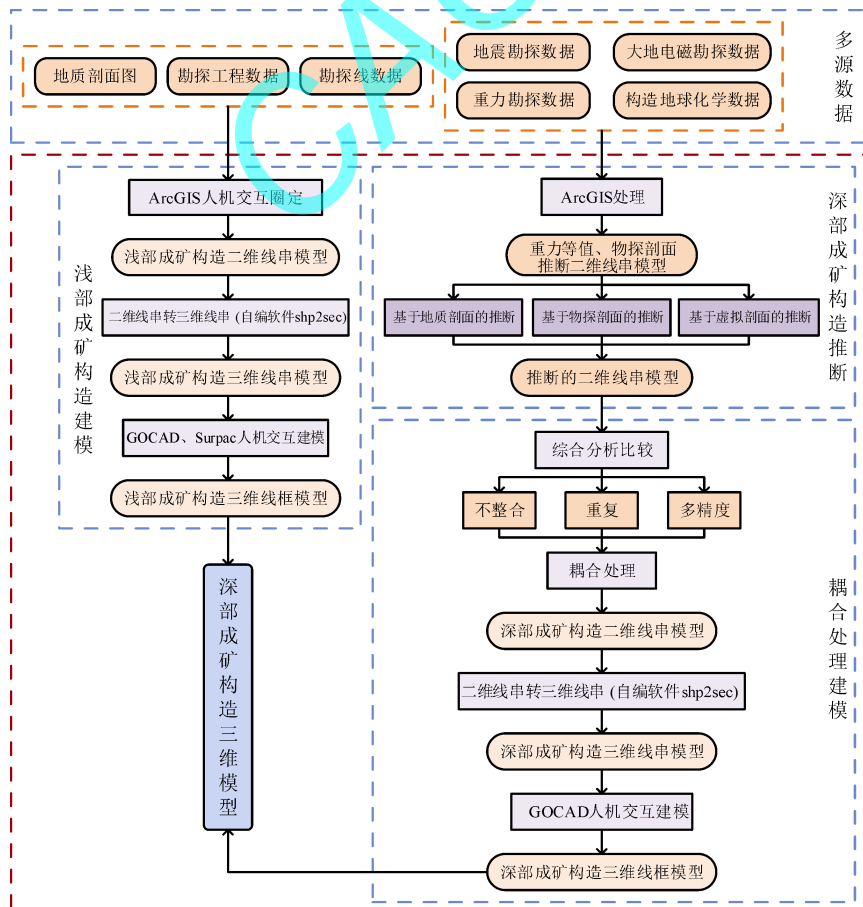


图 2 深部成矿构造三维建模流程图

Fig. 2 Flow chart of 3D modeling of deep metallogenic structure

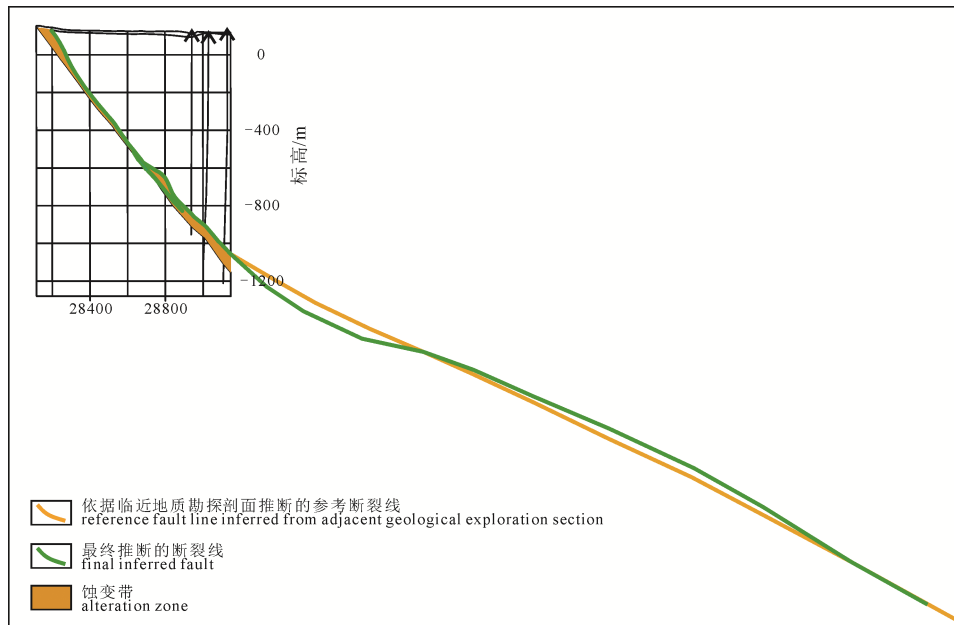


图3 夏甸金矿469线勘探剖面招平断裂线推断示意图

Fig. 3 Map of Zhaoping fault inferred along No. 469 exploration section in the Xiadian gold deposit

物探剖面、临近勘探剖面的情况下,首选依据已有数据结合地质经验进行物探剖面的地质推断。若无可供参考的物探剖面,可根据该原有趋势,结合重力等值线进行推断。等值线稀疏,产状较缓,等值线密集,产状较陡。

物探剖面勘探深度存在差异,因此,对于需参与主断裂建模但深度未达到要求的剖面,则需进行推断。物探解译剖面推断线串的构建,以夏甸矿区以南区域的物探解译剖面为例,由于该区域的物探解译剖面没有符合深度的剖面,因此需选择1~2条数据质量较好、且位置适宜的物探解译剖面作为控制线,选择03_KP01、03_KP04解译剖面进行推断,作为控制线。以物探解译剖面03_KP01为例,如图4所示,该剖面上解译断裂线深度为-800 m,结合其自身趋势及周围的解译剖面KP02、KP03,加上该线上的重力等值线分布较均匀可见其趋势没有太大变化,按其趋势局部应该有变缓,但根据其以北的山后矿区解译剖面05_S18、夏甸矿区469线总体区域,鉴于断裂变化的整体性因此趋势整体仍应有所变陡,推断示意图和最终推断结果如图4、图5所示。

(3) 基于虚拟勘探剖面的推断

对于无工程控制或数据不符合建模要求的区域深部成矿构造模型构建,需进行形态控制或调整工程布置剖面,在对应区域布置虚拟勘探线并构建相应的虚拟勘探剖面断裂线。布置原则应满足:

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测线、勘探线,将中间涉及到的剖面依据计算结

果进行延伸,以便最大程度地利用已知数据。

虚拟勘探线剖面线串构建的主要流程为:

①依据建模需求在ArcGIS中以矢量化地质图为基础图确定虚拟勘探线位置、与主断裂上线交点坐标及控制线;

②使用自编软件“ExploreLineInterpolate”(断裂线串插值程序)通过两条控制线shapfile文件、勘探线数据库及虚拟勘探线位置、与主断裂上线交点坐标及控制线等数据,采用距离平方反比法对虚拟勘探线所在剖面的断裂线串进行插值;

③对于被虚拟勘探线覆盖的地质勘探剖面、物探剖面,需根据已知数据对推断结果进行对比修正,再依据重力等值线图进行微调,并将该剖面结果重新作为控制线进行下一个剖面的计算;对于无工程控制的虚拟勘探线剖面计算结果,应根据其临近剖面及重力等值线图进行调整。

虚拟勘探线按照一定的原则和流程布置,虚拟勘探线布置如图6所示。

(4) 构建深部成矿构造的剖面选择

由于用于获取建模信息的数据量较大,会存在一定的数据冗余,综合研究的具体目标,对数据进行筛选,提取最有利于建模的数据。

对于大尹格庄—曹家洼矿田、夏甸—姜家窑矿田的地质勘探剖面,经过多源数据耦合推断处理后,则都选择保留,参与深部成矿构造的构建;对于获取的80幅物探剖面数据,最终选取了5条(表2),直接用于深部成矿构造三维模型的构建,其他仅作为断裂推断的参考;而基于多源数据插值得到的虚拟勘探线,综合选取了21条参与建模(表3)。

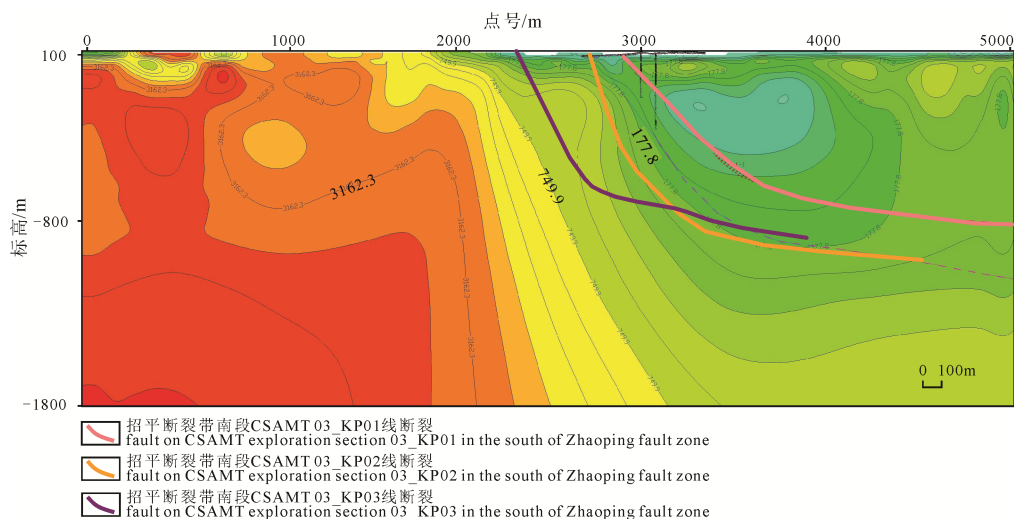


图 4 物探解译剖面 03_KP01 招平断裂推断示意图

Fig. 4 Map of Zhaoping fault inferred along 03_KP01 geophysical prospecting interpretation section

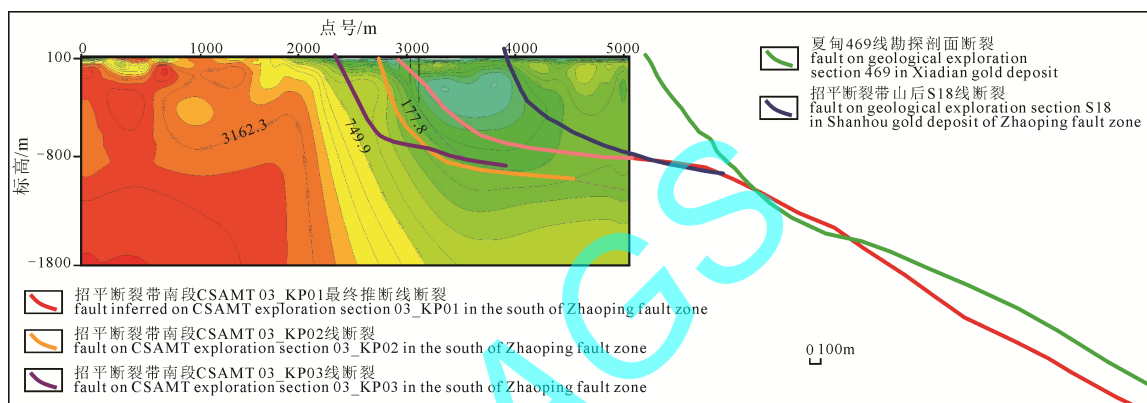


图 5 物探解译剖面 03_KP01 最终推断示意图

Fig. 5 Map of Zhaoping fault inferred along 03_KP01 geophysical prospecting interpretation section

3.2 多源数据耦合处理

地球物理勘探数据为深部成矿构造三维建模提供了深部信息,但因不同勘探工作的勘探范围和深度存在差异,为保证数据的正确有效利用和建模精度,需要对多源数据进行分析处理和筛选耦合,为深部成矿构造三维模型的构建提供有效信息。

基于深部成矿构造三维模型构建的方法,本研究提出了多源数据耦合的流程(图 7)。

①对地震、重力、大地电磁等勘探数据进行定性分析,判断数据是否相互矛盾;

②对地质勘探剖面推断结果、物探解译剖面推断结果、虚拟勘探线剖面断裂线插值等初始结果

进行两两或综合分析比较;

③对分析比较结果进行判断,通过多种数据的耦合,对初始结果进一步处理,得到最终基础的模型构建信息。

(1)多源数据的不整合处理

若地球物理勘探剖面与地质勘探剖面有矛盾冲突,这样的数据虽不能直接为研究区域的深部地质构造构建提供依据,但可根据丰富的地质经验和建模经验,选择适当舍弃或者与其他数据进行耦合分析处理,为深部成矿构造的研究提供参考信息。

①物探数据与研究区已知数据不一致

招平断裂带走向大致为南北方向,招平带大地电磁及重力勘探线 01_CL1(图 8 中蓝色勘探线)的方向与地质勘探剖面方向不一致(图 8),无法参与基于勘探线剖面的主断裂面线串模型圈定。但从其勘探深度较深方面考虑,它对断裂的深部推断具有较大参考价值,所以,它作为勘探剖面上断裂深部推断的依据。

首先计算平面位置上物探测线 01_CL1 与勘探

表 2 参与模型构建的地球物理勘探数据

Table 2 Geophysical exploration data for model building

物探测线号	延伸后主断裂 shp 名称	是否参与深部成矿构造构建
03_KP01_KTX	03_KP01_EXTEND	是
03_KP04_KTX	03_KP04_EXTEND	是
05_X1_KTX	05_X1_ZDL_EXTEND	是
05_X2_KTX	05_X2_ZDL_EXTEND	是
05_X3_KTX	05_X3_ZDL_EXTEND	是

线的交点 X 坐标和 Y 坐标, 然后在对应的地质勘探剖面上根据交点坐标, 求出相应的 Z 坐标。在进行地质勘探剖面的主断裂推断时, 以此交点坐标作为延伸参考, 推断的断裂线串应过此交点。如表 4 所示, 计算得到与物探测线 01_CL1 相交的地质勘探剖面上主断裂的交点坐标和深度, 可作为地质勘探剖面上断裂面的推断参考。

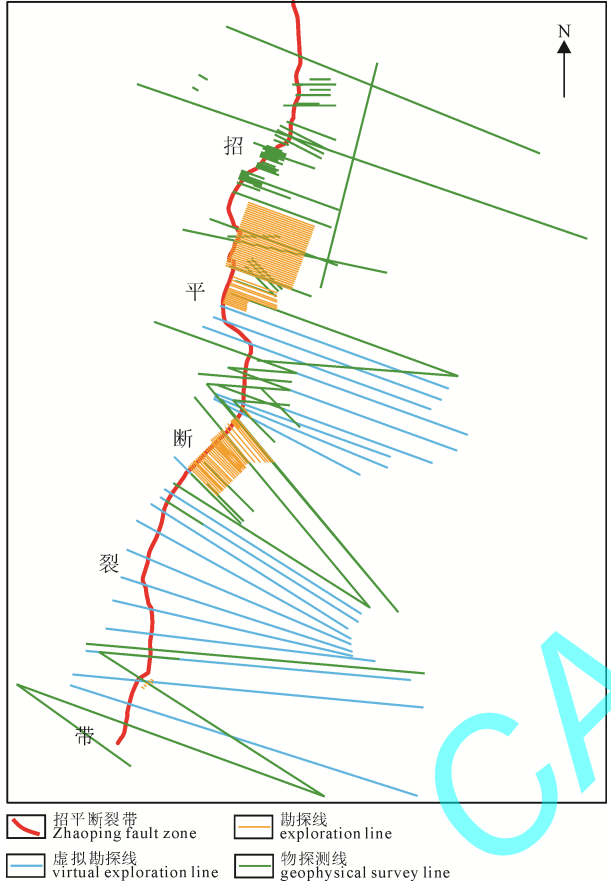


图 6 虚拟勘探线布置示意图

Fig. 6 Map of virtual exploration line layout

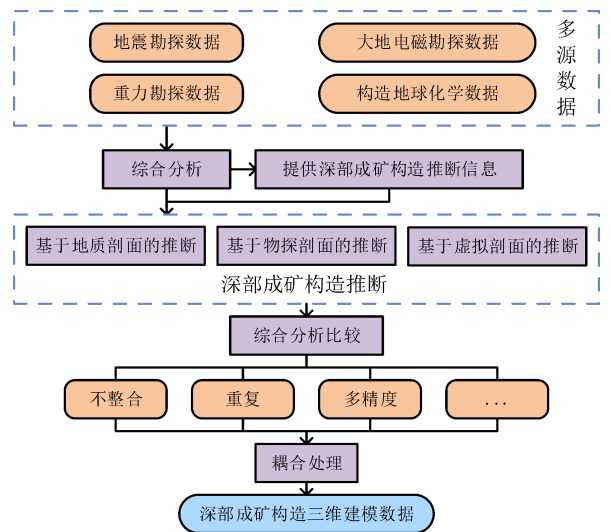


图 7 深部成矿构造多源数据耦合三维建模流程

Fig. 7 Flow chart of 3D modeling of multi-source data coupling of deep metallogenic structure

②物探数据与无工程控制区插值数据不一致
深部成矿构造构建的数据处理过程中, 同一范围的数据, 用不同的方法分析处理得到的结果, 会由于方法不同而不可避免出现不一致的情况。

在深部成矿构造构建招平断裂带的研究中, 为满足建模需求布置的虚拟勘探剖面 V_31 和物探剖面 21_L460 处于同一平面位置, 如图 9 所示。物探剖面 21_L460 的断裂和虚拟勘探线 V_31 用插值方法计算的断裂, 在同一位置的深度不同, 如图 10 所示。绿色线串是虚拟勘探线 V_31 断裂插值结果, 黄色线串是物探剖面得到的推断断裂线串, 我们可以清晰地看出插值结果和物探剖面推断的结果在同一位置深度相差较大, 因此我们需要结合临近的勘探剖面对插值结果进行局部微调。根据临近勘探线夏甸 469 线的断裂 XD_469_ZDL 可以推断出, 此处的

表 3 参与模型构建的虚拟勘探线数据

Table 3 Virtual exploration line data for model building

虚拟勘探线号	参考勘探线号 1	参考勘探线号 2	是否参与深部成矿构造构建
v_1	ygZ_120	01_ML2	是
v_2	ygZ_120	01_ML2	是
v_3	ygZ_120	01_ML2	是
v_4	ygZ_120	01_ML2	是
v_5	ygZ_120	01_ML2	是
v_6	01_ML1	01_ML2	是
v_7	01_ML1	01_ML2	是
v_8	01_ML1	01_ML2	否
v_21	cjw_36	05_X3/V_24	否
v_22	cjw_36	05_X3/V_24	否
v_23	cjw_36	05_X3/V_24	是
v_24	cjw_36	JJY_29	否
v_25	cjw_36	JJY_29	否
v_26	cjw_36	JJY_29	否
v_27	JJY_29	05_X1/V_26	是
v_28	JJY_29	05_X1/V_26	是
v_29	JJY_29	05_X1/V_26	是
v_31	XD_469	03_KP01	是
v_32	21_L460/V_31	05_S18/V_33	是
v_33	XD_469	03_KP01	是
v_34	03_KP01	05_S18/V_33	是
v_35	03_KP01	05_S18/V_33	是
v_36	03_KP01	05_S18/V_33	是
v_37	03_KP01	05_S18/V_33	是
v_38	03_KP01	05_S18/V_33	否
v_39	03_KP01	05_S18/V_33	否
v_40	03_KP01	03_KP04	否
v_41	03_KP01	03_KP04	否
v_42	03_KP01	03_KP04	否
v_43	01_ML1	V_48	是
v_44	01_ML1	V_48	是
v_45	01_ML1	V_48	是

表 4 物探测线与地质勘探剖面交点表

Table 4 Table of intersection point of geophysical survey line and geological exploration section

物探测线号	勘探线号	交点二维坐标(X, Y)	交点的断裂深度/m
01_CL1	DYGZ_72	(35 700.732 3, 19 816.879 4)	-4 549.579
	DYGZ_78	(35 790.182 6, 20 172.573 9)	-4 557.360
	DYGZ_84	(35 877.091 3, 20 518.161 9)	-4 568.826
	DYGZ_90	(35 965.190 9, 20 868.486 2)	-4 556.812
	DYGZ_96	(36 055.831 8, 21 228.916 3)	-4 523.280
	DYGZ_102	(36 147.267 6, 21 592.508 1)	-4 484.369
	DYGZ_108	(36 232.060 1, 21 929.683 2)	-4 417.665
	DYGZ_114	(36 322.801 2, 22 290.512 9)	-4 300.214
	DYGZ_120	(36 405.292 1, 22 618.536 8)	-4 192.626

深度应与此的相差不大,但趋势应与物探剖面 03_KP01 推断的断裂相符合,对物探信息和地质勘探信息耦合得到最终的推断结果如图 11 所示。

(2)多源数据的重复处理

地球物理勘探因在不同时期有不同的布置,当测区大致在同一范围时,就会出现物探测线在同一测区相互覆盖与重复的情况,此时我们应该根据勘探方法获取的数据精度和测区的范围来选择所需进行深部地质构造构建的数据。如在地震、重力和

大地电磁方法中,大地电磁测深精度最高,分辨率也最高,考虑优先保留。

在深部成矿构造招平主断裂面的构建研究中,在范围大致一样的测区,有不同的测线布置,获取了不同精度的数据。如图 12 所示,陡崖曹家 7 条测线 09_01、09_02、09_03、09_04、09_06、09_07、09_08(图中红色虚线中蓝色的物探测线)与地质勘探剖面方向夹角较大,不参与基于勘探线剖面的主断裂面线串模型圈定,所以,综合考虑选择夏甸 3 条测线 05_X1、05_X2 和 05_X3(图 12 中红色虚线范围绿色的物探测线)参与基于勘探线剖面的主断裂面线串模型圈定。

(3)多源数据的多精度处理

在结合多源数据进行深部成矿构造三维模型构建的研究过程中,参考不同来源的数据处理得到的结果会有所差异,为提高建模的精度,应与其他数据耦合,叠加分析,进行结果取舍或再处理,尽量选择保留更具参考价值的结果。

如在招平断裂带构建对已有勘探剖面数据进行深部推断时,依据自身和依据临近勘探线剖面进行推断的结果与根据临近物探解释剖面进行推断

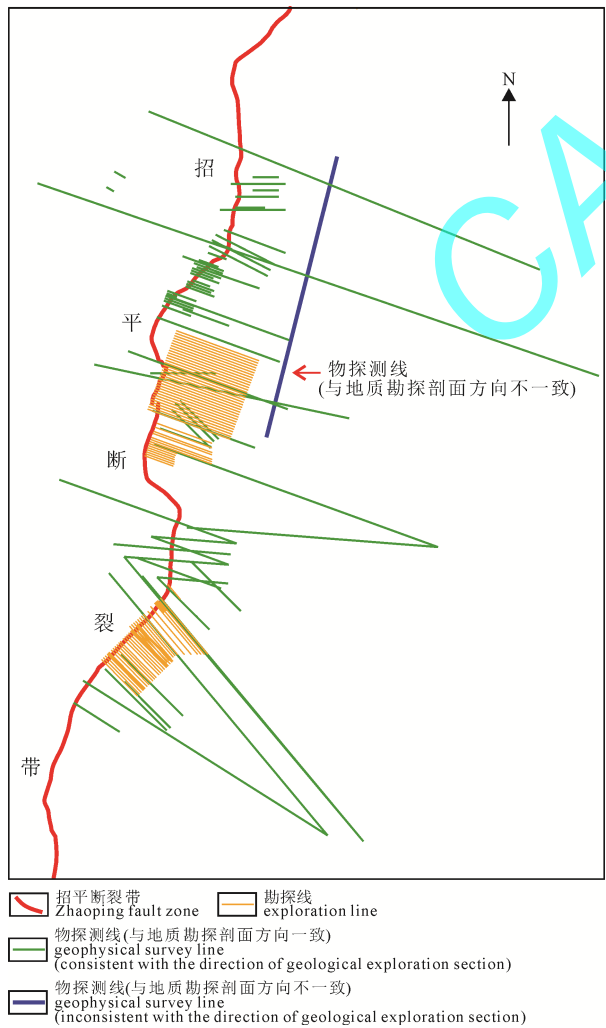


图 8 数据不整合处理示意图

Fig. 8 Map of data unconformity processing

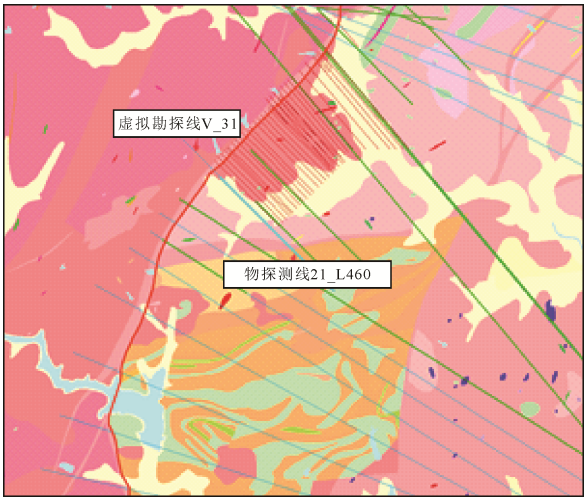


图 9 物探剖面 and 虚拟勘探线剖面的平面位置图

Fig. 9 Location plan view of geophysical exploration sections and virtual exploration sections

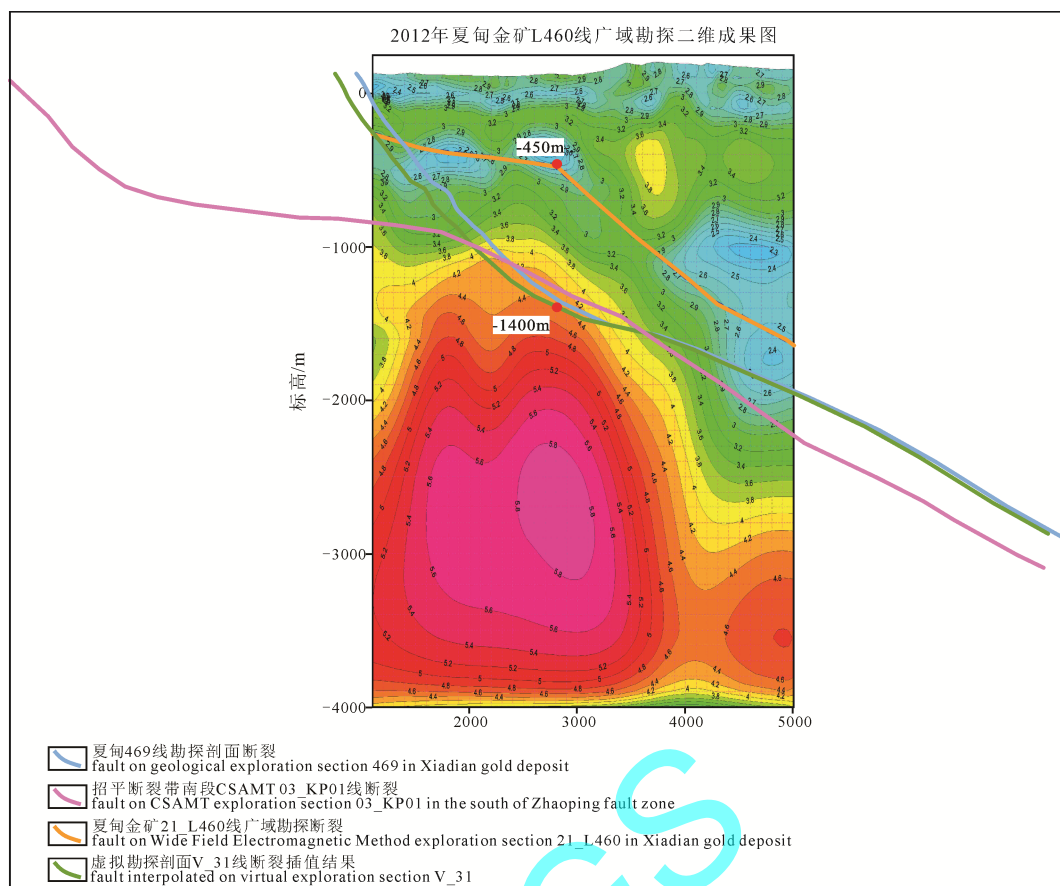


图 10 虚拟勘探剖面 V_31 招平断裂线的插值图

Fig. 10 Map of Zhaoping fault interpolated along V_31 virtual exploration section

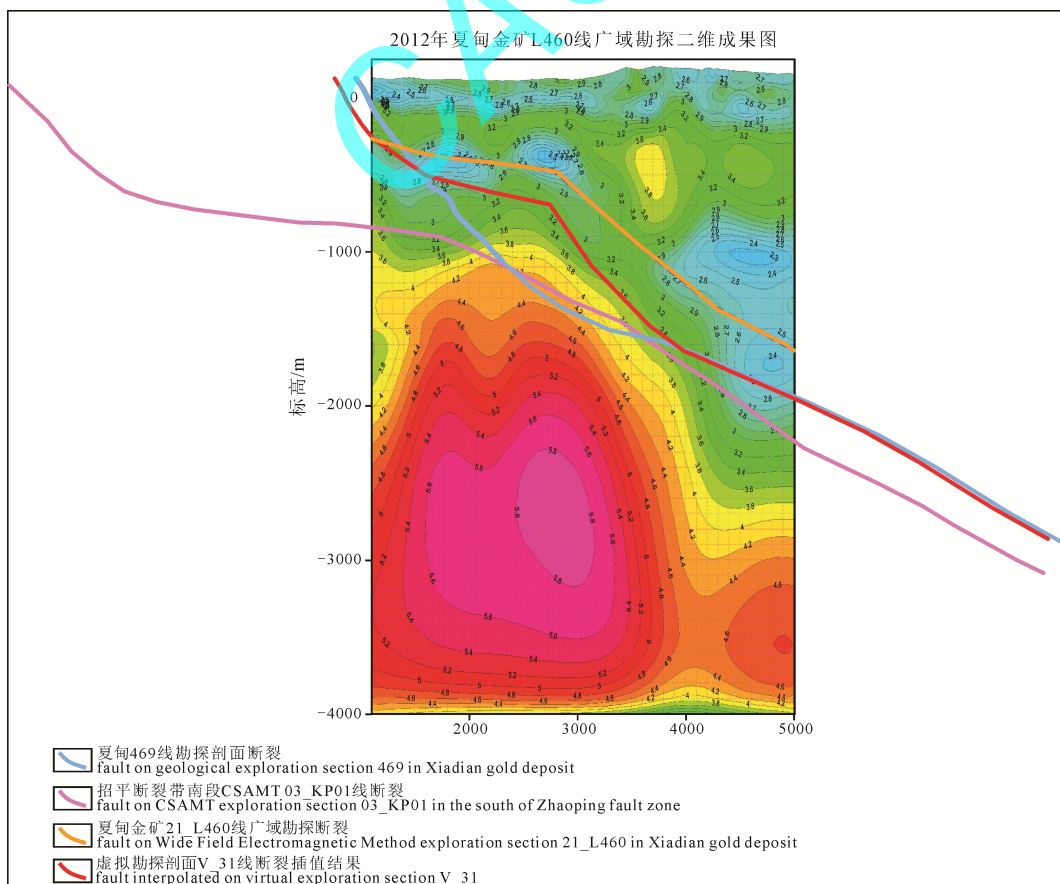


图 11 虚拟勘探剖面 V_31 招平断裂的最终推断结果

Fig. 11 Map of Zhaoping fault final inferred along V_31 virtual exploration section

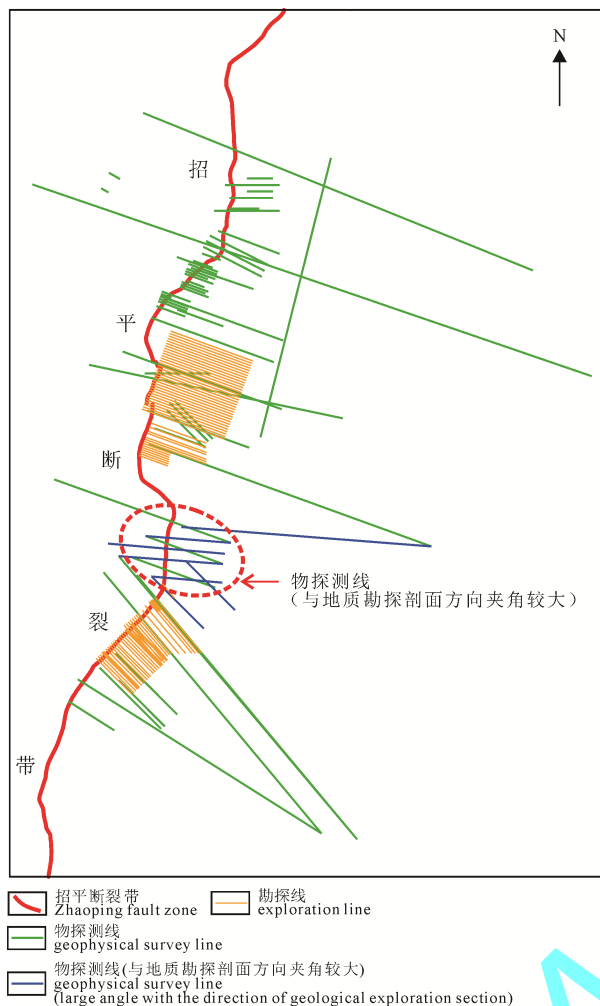


图 12 数据重复处理

Fig. 12 Map of data duplication processing

得到的结果会有细微的差别, 因此结果的取舍需要综合重力等值线提供的信息进行, 重力等值线如图 13a 所示。以夏甸矿区 469 线为例, 如图 13b 所示, 结合自身及临近剖面断裂线趋势得到橘黄色推断断裂线, 结合物探解译剖面 21_xd_L460、21_xd_L470 推断的断裂趋势绿色推断断裂线。在地质平面图上其重力等值线分布较均匀, 说明该线上整体产状没有较大变化, 但局部有变化, 综合推断最终得到选择保留绿色推断线, 如图 13 所示。

3.3 三维模型

本文用上述构建深部成矿构造三维模型的方法, 依据地质勘探剖面图 167 幅、地震勘探剖面图 4 幅、大地电磁及重力等值线图 1 幅、大地电磁和磁法勘探数据图件 76 幅, 通过多源数据耦合处理推断得到的深部成矿构造构建基础数据, 构建了胶西北招平主断裂带、焦家断裂带、三山岛断裂带三条断裂带的深部成矿构造三维模型。三维模型精度取决于多源数据的精度, 浅部(1500 m 以浅)建模以地质勘探数据为主, 钻孔工程间距为约 60~100 m × 200 m; 深部模型(3000 m 以浅)是深部初始模型(地质勘探剖面 and 地球物理反演联合推断)与浅部模型迭代耦合建立的。

招平主断裂带线串共 111 条, 其中勘探剖面推断线串 85 条, 包括大尹格庄矿区 33 条, 曹家洼矿区 16 条, 夏甸矿区 22 条, 姜家窑矿区 14 条; 物探剖面推断线串 5 条; 虚拟勘探剖面推断线串

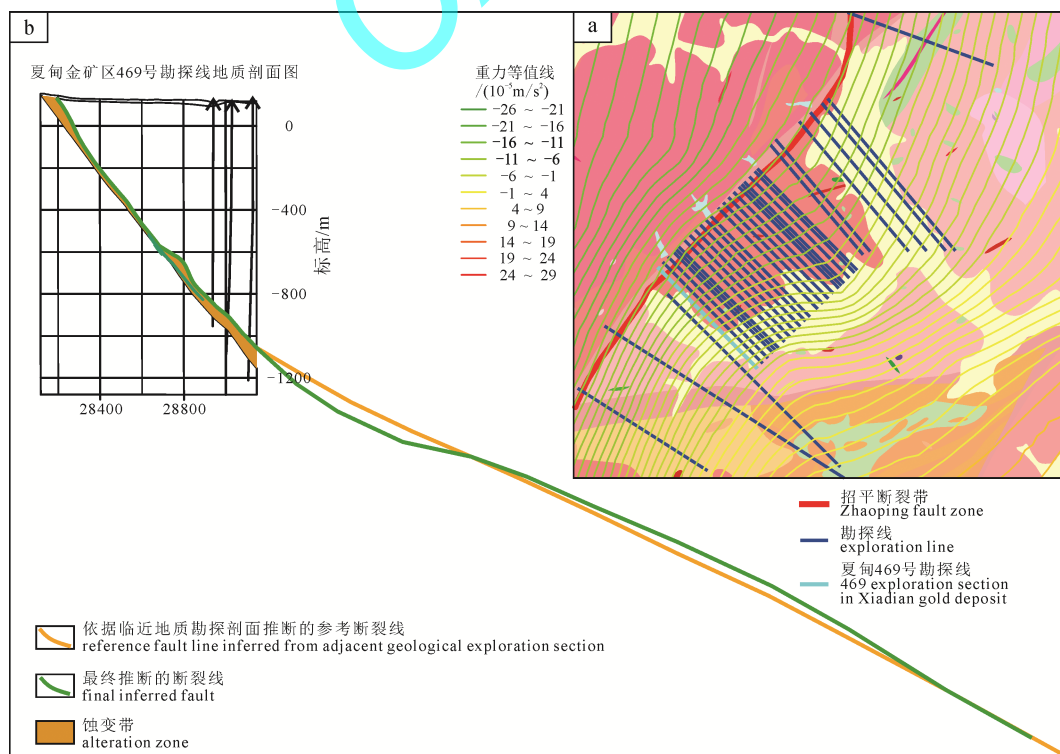
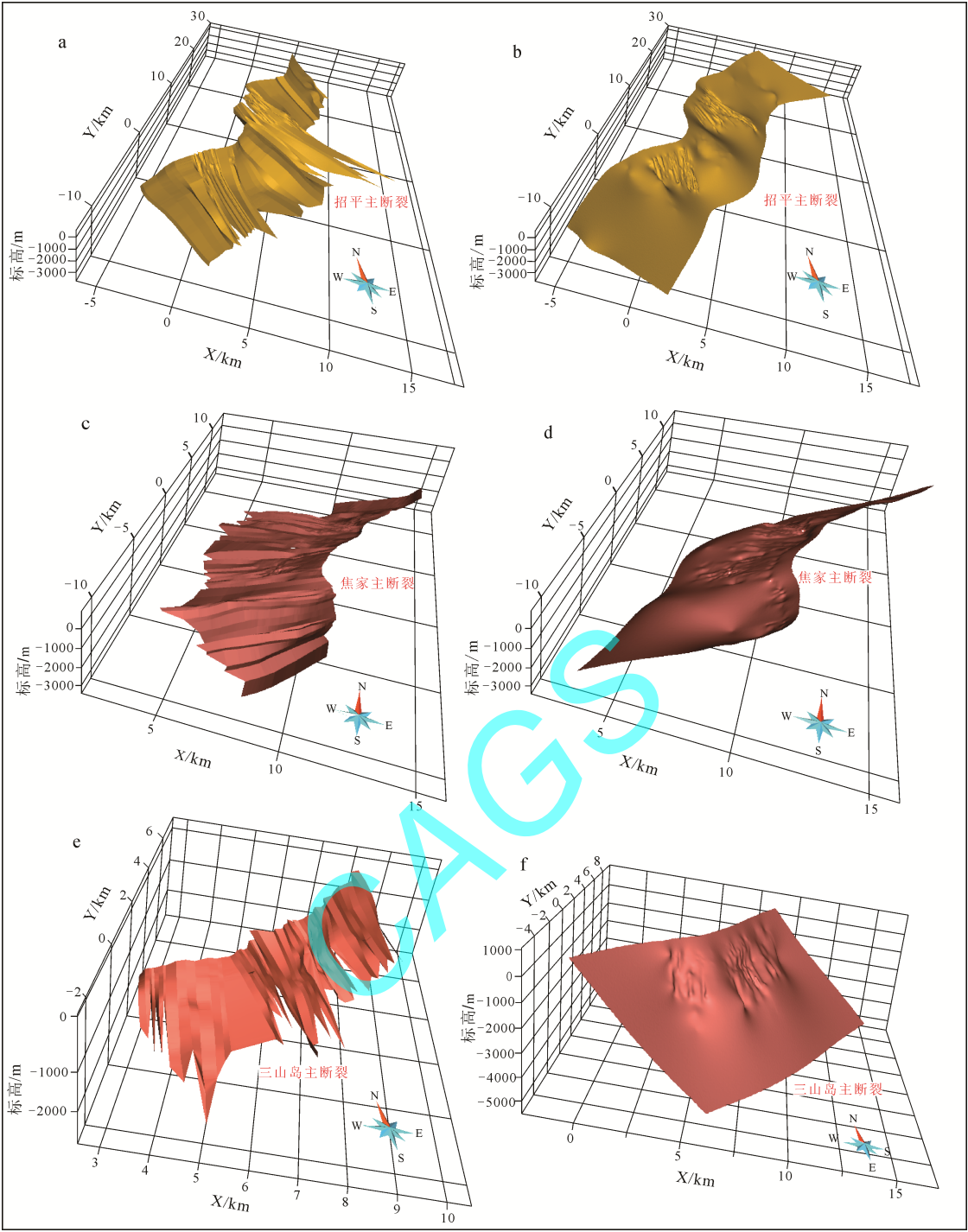


图 13 夏甸金矿 469 线勘探剖面招平断裂线最终推断结果图

Fig. 13 Map of Zhaoping fault inferred result along 469 exploration section in the Xiadian gold deposit



a—招平主断裂面三维模型效果图; b—招平主断裂面 DSI 光滑处理三维模型效果图; c—焦家主断裂面三维模型效果图;
d—焦家主断裂面 DSI 光滑处理三维模型效果图; e—三山岛主断裂面三维模型效果图;
f—三山岛主断裂面 DSI 光滑处理三维模型效果图。
a—3D model of Zhaoping fault; b—3D model of DSI smoothed Zhaoping fault; c—3D model of Jiaojia fault;
d—3D model of DSI smoothed Jiaojia fault; e—3D model of Sanshandao fault;
f—3D model of DSI smoothed Sanshandao fault.

图 14 深部成矿构造三维模型图

Fig. 14 3D model of deep metallogenic structure

21 条, 其中有勘探工程控制的线串 3 条, 有物探剖面控制的线串 18 条。生成的深部成矿构造招平主断裂面三维模型如图 14a 所示, 图 14b 是经过离散光滑插值(DSI)处理的断裂模型。

焦家主断裂线串共 105 条, 其中地质勘探剖面

推断线串 99 条, 包括纱岭矿区 21 条, 曲家矿区 39 条, 南吕—欣木矿区 15 条, 焦家矿区 10 条, 童家矿区 5 条, 徐村院矿区 5 条, 前李家矿区 2 条, 前陈矿区 2 条; 虚拟勘探线剖面推断线串 6 条, 生成的深部地质构造焦家主断裂面三维模型如图 14c 所

示, 图 14d 是经过离散光滑插值(DSI)处理的断裂模型。

三山岛主断裂线串共 50 条, 包括三山岛北部海域 19 条, 三山岛外围矿区 7 条, 西岭矿区 10 条, 三山岛矿区 14 条, 生成的深部地质构造三山岛主断裂面三维模型如图 14e 所示, 图 14f 是经过离散光滑插值(DSI)处理的断裂模型。

3.4 找矿意义

胶西北金矿床以 NNE 向断裂构造呈带状分布, 形成自西向东的三山岛、焦家和招平三条主要成矿带。深部找矿台阶式成矿模式的提出, 解决了深部赋矿位置、找矿方向问题。它在胶西北金矿集区的研究, 揭示了深部成矿构造的拐弯或交汇部位是适宜成矿物质富集的引张扩容空间、深部成矿构造倾角变化平缓部位有利于矿体赋存等的金矿成矿规律及特点。深部成矿构造三维模型的推断建模研究, 有助于掌握成矿构造形态、分布与结构, 从而得到构造有利成矿部位的位置, 进而指示深部找矿的方向。

基于构建的胶西北金矿集区三条断裂深部成矿构造模型和地质勘探数据, 对研究区进行矿化空间分析、矿化指标计算、成矿信息定量提取分析和找矿指标提取等处理, 圈定了招平断裂带 5 个找矿靶区, 分别为大尹格庄—曹家洼矿田的 I 号靶区, 面积 0.11 km², 标高范围为-1550 ~ -1775 m; 大尹格庄—曹家洼矿田的 II 号靶区, 面积 0.28 km², 标高范围为-1725 ~ -2550 m; 大尹格庄—曹家洼矿田的 III 号靶区, 面积 0.18 km², 标高范围为-1875 ~ -2850 m; 夏甸—姜家窑矿田的 I 号靶区, 面积 2.49 km², 标高范围为-3000 ~ -2850 m; 夏甸—姜家窑矿田的 II 号靶区, 面积 0.72 km², 标高范围为-3000 ~ -2825 m。圈定了焦家断裂带 4 个找矿靶区, 分别为 I 号靶区, 面积 3.115 km², 标高范围为-1450 ~ -2400 m; II 号靶区, 面积 2.084 km², 标高范围为-2650 ~ -3000 m; III 号靶区, 面积 1.74 km², 标高范围为-2100 ~ -2850 m; IV 号靶区, 面积 1.589 km², 标高范围为-1350 ~ -2400 m; 圈定了三山岛断裂带 2 个找矿靶区, 分别为 I 号靶区, 面积 0.542 km², 标高范围为-1300 ~ -2000 m; II 号靶区, 面积 0.799 km², 标高范围为-1200 ~ -2100 m。

4 结论

以胶西北金矿集区为研究对象, 开展了多尺度约束条件下的深部成矿构造三维模型构建的研究。得到如下结论:

(1)提出了多源数据综合、浅部地质构造建模、深部地质构造推断、耦合处理建模四个过程组合与

迭代的深部成矿构造三维建模方法。

(2)基于地质勘探、地震、重力、大地电磁和构造地球化学勘查数据, 构建了胶西北金矿集区招平、焦家和三山岛三条成矿带的深部成矿构造三维模型及其离散光滑插值(DSI)模型。

(3)综合利用胶西北金矿集区深部成矿构造三维模型, 通过三维可视化矿化空间分析和成矿信息提取, 圈定了招平断裂带找矿靶区 5 个, 焦家断裂带找矿靶区 4 个, 三山岛找矿靶区 3 个。

致谢: 在前期资料收集、野外地质等工作过程中, 得到了招金矿业股份有限公司和山东省地质调查院各级领导及员工的协调帮助, 在此深表谢意。

Acknowledgements:

This study was supported by National Key Research & Development Program of China (No. 2017YFC0601503), and National Natural Science Foundation of China (Nos. 41772349 and 41972309).

参考文献:

- 陈国达. 1978. 成矿构造研究法[M]. 北京: 地质出版社.
- 陈进, 毛先成, 邓浩. 2020. 山东大尹格庄金矿床深部三维定量成矿预测[J]. 地球学报, 41(2): 179-191.
- 邓浩, 郑扬, 陈进, 魏运凤, 毛先成. 2020. 基于深度学习的大尹格庄金矿床深部三维预测模型[J]. 地球学报, 41(2): 157-165.
- 吕古贤, 郭涛, 舒斌, 申玉科, 刘杜鹃, 周国发. 2006. 胶东金矿集区构造控岩控矿地质特征研究[J]. 地球学报, 37(5): 471-478.
- 裴荣富. 1998. 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.
- 宋明春, 伊丕厚, 徐军祥, 崔书学, 沈昆, 姜洪利, 袁文花, 王化江. 2012. 胶西北金矿阶梯式成矿模式[J]. 中国科学: 地球科学, 42(07): 992-1000.
- 宋明春, 张军进, 张丕建, 杨立强, 刘殿浩, 丁正江, 宋英昕. 2015. 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, 89(02): 365-383.
- 宋英昕, 宋明春, 丁正江, 魏绪峰, 徐韶辉, 李杰, 谭现峰, 李世勇, 张照录, 焦秀美, 胡弘, 曹佳. 2017. 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, 25(3): 4-18.
- 滕吉文. 2009. 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, 24(3): 801-829.
- 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.
- 肖克炎, 孙莉, 阴江宁, 丁建华, 牛翠伟, 陈建平, 杨毅恒. 2014. 全国重要矿产预测评价[J]. 地球学报, 35(05): 543-551.
- 翟裕生. 1999. 论成矿系统[J]. 地学前缘, 6(1): 13-27.
- 翟裕生. 2002. 成矿构造研究的回顾和展望[J]. 地质论评, 48(2):

140-146.

赵鹏大. 2007. 成矿定量预测与深部找矿[J]. 地学前缘, 14(5): 1-10.

赵文津. 2003. 岩石圈深部探测与青藏高原研究[J]. 中国工程科学, 5(2): 1-15.

References:

- CHEN Guo-da. 1978. Research on metallogenic structure[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- CHEN Jin, MAO Xian-cheng, DENG Hao. 2020. 3D Quantitative Mineral Prediction in the Depth of the Dayingezhuang Gold Deposit, Shandong Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(2): 179-191(in Chinese with English abstract).
- DENG Hao, ZHENG Yang, CHEN Jin, WEI Yun-feng, MAO Xian-cheng. 2020. Deep Learning-based 3D Prediction Model for the Dayingezhuang Gold Deposit, Shandong Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(2): 157-165(in Chinese with English abstract).
- GUO Lin-nan, MARH E, GOLDFARB R J, WANG Zhong-liang, LI Rui-hong, CHEN Bing-han, LI Jing-lian. 2016. A comparison of Jiaojia- and Linglong-type gold deposit ore-forming fluids: do they differ?[J]. Ore Geology Reviews, 88: 511-533.
- LEBRUN E, MILLER J, THEBAUD N, ULRICH S, MCCUAIG T C. 2017. Structural controls on an orogenic gold system: The world-class Siguiri gold district, Siguiri Basin, Guinea, West Africa[J]. Economic Geology, 112(1): 73-98.
- LI Lin, SANTOSH M, LI Sheng-rong. 2015. The 'Jiaodong type' gold deposits: Characteristics, origin and prospecting[J]. Ore Geology Reviews, 65: 589-611.
- LÜ Gu-xian, GUO Tao, SU Bin, SHEN Yu-ke, LIU Du-juan, ZHOU Guo-fa. 2006. Geological Characteristics of Rock-controlling and Ore-controlling Structures in the Jiaodong Gold Ore Concentration Area[J]. Acta Geoscientica Sinica, 37(5): 471-478(in Chinese with English abstract).
- MAO Xian-cheng, REN Jia, LIU Zhan-kun, CHEN Jin, TANG Lei, DENG Hao, BAYLESS R C, YANG Bin, WANG Mi-jun, LIU Chun-ming. 2019. Three-dimensional prospectivity modeling of the Jiaojia-type gold deposit, Jiaodong Peninsula, Eastern China: A case study of the Dayingezhuang deposit[J]. Journal of Geochemical Exploration, 203: 27-44.
- PEI Rong-fu. 1998. The ore-forming and anomalous metallogenic tectonic consolidation of China's extra-large deposits[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- SONG Ming-chun, LI San-zhong, SANTOSH M, ZHAO Shu-juan, YU Shan, YI Pei-hou, CUI Shu-xue, LÜ Gu-xian, XU Jun-xiang, SONG Ying-xin, ZHOU Ming-ling. 2015. Types, characteristics and metallogenesis of gold deposits in the Jiaodong Peninsula, Eastern North China Craton[J]. Ore Geology Reviews, 65: 612-625.
- SONG Ming-chun, YI Pi-hou, XU Jun-xiang, CUI Shu-xue, SHEN Kun, JIANG Hong-li, YUAN Wen-hua, WANG Hua-jiang. 2012. Step-type metallogenic model of Jiaoxibei gold deposits[J]. Scientia Sinica Terrae, 42(7): 992-1000(in Chinese).
- SONG Ming-chun, ZHANG Jun-jin, ZHANG Pi-jian, YANG Li-qiang, LIU Dian-hong, DING Zheng-jiang, SONG Ying-xin. 2015. Discovery of superlarge gold deposits in the northern part of Sanshan Island, Jiaodong, and its tectonic-magmatic background[J]. Acta Geologica Sinica, 89(02): 365-383(in Chinese with English abstract).
- SONG Ying-xin, SONG Ming-chun, DING Zheng-jiang, WEI Xu-feng, XU Shao-hui, LI Jie, TAN Xian-feng, LI Shi-yong, ZHANG Zhao-lu, JIAO Xiu-mei, HU Hong, CAO Jia, 2017. Important progress and metallogenic characteristics of deep prospecting in Jiaodong gold concentration area[J]. Gold Science and Technology, 25(3): 4-18(in Chinese).
- TENG Ji-wen. 2009. 16 major arguments, arguments and scientific orientations in the study of deep physics and dynamics in China[J]. Progress in Geophysics, 24(3): 801-829(in Chinese with English abstract).
- XIANG Jie, XIAO Ke-yan, CHEN Jian-ping, LI Shi. 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(in Chinese with English abstract).
- XIAO Ke-yan, SUN Li, YIN Jiang-ning, DING Jian-hua, Niu Cui-yi, CHEN Jian-ping, YANG Yi-hen, 2014 The Prediction and Assessment of Important Mineral Resources in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 35(05): 543-551(in Chinese with English abstract).
- YANG Li-qiang, DENG Jun, WANG Zhong-liang, GUO Lin-nan. 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[J]. Economic Geology, 111(1): 105-126.
- ZHAI Yu-sheng. 1999. On the metallogenic system[J]. Geoscience Frontiers, 6(1): 13-27(in Chinese with English abstract).
- ZHAI Yu-sheng. 2002. Review and prospect of ore-forming tectonic research[J]. Geological Review, 48(2): 140-146(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Peng-da. 2007. Quantitative prediction of mineralization and deep prospecting[J]. Geoscience Frontiers, 14(5): 1-10(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Wen-jin. 2003. Deep exploration of the lithosphere and the study of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Strategic Study of CAE, 5(2): 1-15(in Chinese with English abstract).