



华北重点矿集区大数据三维/四维建模与深层次集成的资源预测评价

王功文^{1*}, 张智强¹, 李瑞喜¹, 李俊建², 沙德铭³, 曾庆栋^{4,5,6}, 庞振山⁷, 李大鹏⁸, 黄蕾蕾¹

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;
2. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170;
3. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 沈阳 110000;
4. 中国科学院矿产资源研究重点实验室, 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;
5. 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029;
6. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049;
7. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037;
8. 山东省地质科学研究所, 济南 250013

* 通讯作者, E-mail: gwwang@cugb.edu.cn

收稿日期: 2020-10-19; 收修改稿日期: 2021-04-29; 接受日期: 2021-05-12; 网络版发表日期: 2021-07-23

国家重点研发计划项目(编号: 2016YFC0600107、2016YFC0600108)资助

摘要 华北矿集区是中国金属矿床成矿地质背景、过程与定量预测评价较高的地区之一, 其黄金储量与年产量都位居国内首位。文章依托国家重点研发计划项目“华北克拉通成矿系统的深部过程与成矿机理”顶层设计的地质理论与方法, 以华北重点金矿集区(山东焦家-三山岛、招平南段和辽宁五龙、青城子)为研究区, 较系统地收集和构建了地学大数据(矿集区-矿田-矿床尺度的地质、地球化学、地球物理、遥感、地质工程与地理高程等), 量化分析了华北克拉通破坏地质背景与金成矿事件及其典型金矿床的成因模式与找矿模型, 开展了矿集区地学大数据的三维/四维建模, 挖掘了矿集区尺度的多元地学三维勘探变量以构建定量勘查模型。其中, 运用Flac3D软件与自主研发GeoCube3.0软件实现了焦家断裂三维模型与流体饱和度参数约束的动态建模, 从而重建了焦家断裂构造动态演化的四维模型。利用GeoCube3.0深层次集成模块(普通证据权、增强证据权、模糊证据权、逻辑斯蒂回归、信息量和随机森林六种方法), 开展了研究区四个矿集区的勘探变量集成及其C-V分形的A、B、C三类靶区优选, 获得如下主要成果和认知: (1) 研究区的四个矿集区1000~3000m深部靶区都在3处以上, A、B、C等级靶区与1000m以浅工程控制的金矿体空间关联性较好。(2) 利用三维空间的证据权法集成实现了山东焦家-三山岛矿集区、招平南段矿集区和辽宁五龙矿集区3000~5000m的靶区优选。(3) 基于贝叶斯理论的三维空间的证据权法是稳健的集成与靶区优选方法, 适宜于在成因模式和找矿模型定量化程度高的山东焦家-三山岛矿集区、招平南段矿集区和辽宁五龙矿集区; 三维空间的随机森林是机器学习中多目标集成与靶区优选方法, 适宜于成矿地质体复杂的辽宁青城子矿集区, 后者的成因模式和找矿模型关联的勘探变量不仅具有华北矿集区金矿断裂构造与

中文引用格式: 王功文, 张智强, 李瑞喜, 李俊建, 沙德铭, 曾庆栋, 庞振山, 李大鹏, 黄蕾蕾. 2021. 华北重点矿集区大数据三维/四维建模与深层次集成的资源预测评价. 中国科学: 地球科学, 51(9): 1594–1610, doi: 10.1360/SSTe-2020-0289

英文引用格式: Wang G, Zhang Z, Li R, Li J, Sha D, Zeng Q, Pang Z, Li D, Huang L. 2021. Resource prediction and assessment based on 3D/4D big data modeling and deep integration in key ore districts of North China. Science China Earth Sciences, 64(9): 1590–1606, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9791-4>

岩浆岩侵位共性特征约束, 还受围岩地层褶皱和层间滑脱构造制约. (4) 利用山东焦家-三山岛矿集区三山岛大型-超大型金矿床的金储量数值及其三维块体模型, 估算了该矿集区A、B级靶区三维块体单元的含金量率分别为65.5%、25.1%, 其深部金找矿有利靶区3000m以浅的金资源总量为3908t(含已探明金储量1700t), 3000~5000m深部靶区金资源总量为936t. 研究表明, 华北重要金矿集区深部金矿床形成的“运-储”空间关联性强, 具有较好的找矿潜力; 这些“运-储”空间模型表征了华北克拉通破坏事件关联成矿系统的构造-岩浆-热液活动, 并间接指示了金矿化富集地段.

关键词 地学大数据, 三维/四维建模, 证据权法, 随机森林法, 靶区优选与资源评价, 华北重点矿集区

1 引言

21世纪以来, “第四代工业革命”和大数据智能化时代引领了地球科学技术发展, 促进了学科交叉与融合及创新. Gray和Szalay(2007)提出了科学研究四类范式: 实验归纳、模型推演、仿真模拟和密集型大数据发现. 地球科学正在经历着从相对独立的学科分支向信息科学、计算机科学多学科交叉融合的重大转变(Jordan和Mitchell, 2015; 郭华东, 2018; Reichstein等, 2019; Cheng等, 2020). 大数据时代为数字找矿与定量评价提供了新的契机和机遇(赵鹏大, 2015; 肖克炎, 2015; 周永章等, 2018; 赵鹏大等, 2020; 左仁广等, 2020; 王功文等, 2021). 近年来, 欧美等西方国家建立地球科学“产学研”联盟构建地球科学多学科交叉的三维/四维(3D/4D)地学建模, 明确提出了3D/4D建模作为矿产勘查与提取地学信息的基础. 例如, Roller等(2015)在三维地质模型基础上, 增加时间维度, 运用四维模型描述地质构造的动态演化, 旨在重建地质体过去的变形历史; Mejia等(2015)描述了3D/4D建模的定义、建模方法, 研发了四维建模软件实现了地层构造的复原-分解的不同历史阶段模型, 并应用于矿床尺度地质建模与资源评价. 上述四维建模的顶层设计, 不仅能够开展矿体的演化历史复原或重建(即通道与储存空间的几何形态), 还可以进一步深层挖掘矿体的保存与剥蚀的趋势模型, 从而实现趋向于矿体形成后乃至未来一定时期的地质体分析与资源动态评价(即趋向于五维的地质体或矿体预测评价(Caumon, 2010). 在成矿过程关联的3D/4D动态模拟方面, Liu等(2011)应用三维地质动力学模型对安庆月山侵入岩体及其对安庆砂卡岩型矿床成矿关系进行了模拟研究; Poulet等(2012)开展了FLAC3D热能-流体-力场-化学的耦合模

拟; Huang等(2020)开展了焦家矿集区三维环境下的构造应力与流体饱和度关联动态模拟等. Kreuzer等(2020)探讨了成矿系统中的成矿过程与资源预测评价, 其关键参数的表达(定性、定量)转化为可制图(mapping)/建模(modeling)的空间变量. 3D/4D建模研究旨在实现矿产资源深部探测技术体系, 以服务于人类社会在资源与环境可持续发展需求(Bristol等, 2012; Russell等, 2019; 王功文等, 2021). 澳大利亚联邦科工委(RFG, 2018)基于Uncover(2006)计划提出了BigEarth计划: 利用矿产系统(Mineral system)理论方法, 将壳幔相互作用关联的地球科学同位素年代学数据库与成矿过程资料以及深反射地震、垂向深度>50km的壳幔尺度的MT等地学数据库人工智能(机器学习与深度学习)挖掘, 基于印痕(Footprint)概念模式探讨壳幔成矿过程几何与属性模型, 其中包含了资源的剥蚀与保存状况, 旨在减少资源预测评价的不确定性, 为地壳浅部(5~10km)矿产资源透明化研究和矿业可持续发展与规划提供科学依据. 欧盟地科联联合世界共计79个国家在RFG(2018)会议上总结了第一阶段(2008~2018)OneGeology计划标准化制图成果, 并启动了第二阶段(2018~2030)的OneGeology geo3D+人工智能(机器学习与深度学习)的深部地质体建模与地球科学(资源-环境-灾害-气候-疾病)空间智能决策研究计划. 地球动力学系统、成矿系统、勘探系统和预测评价(专家)系统是地学大数据分析 with 定量化资源预测评价及智慧决策的核心内容(莫宣学等, 2020; 翟裕生等, 2020; 赵鹏大等, 2020).

本文依托国家重点研发计划“华北克拉通成矿系统的深部过程与成矿机理”项目顶层设计, 以华北重点金矿集区(山东焦家-三山岛、招平南部, 辽宁五龙、青城子)为研究区(图1), 根据华北克拉通破坏地质与

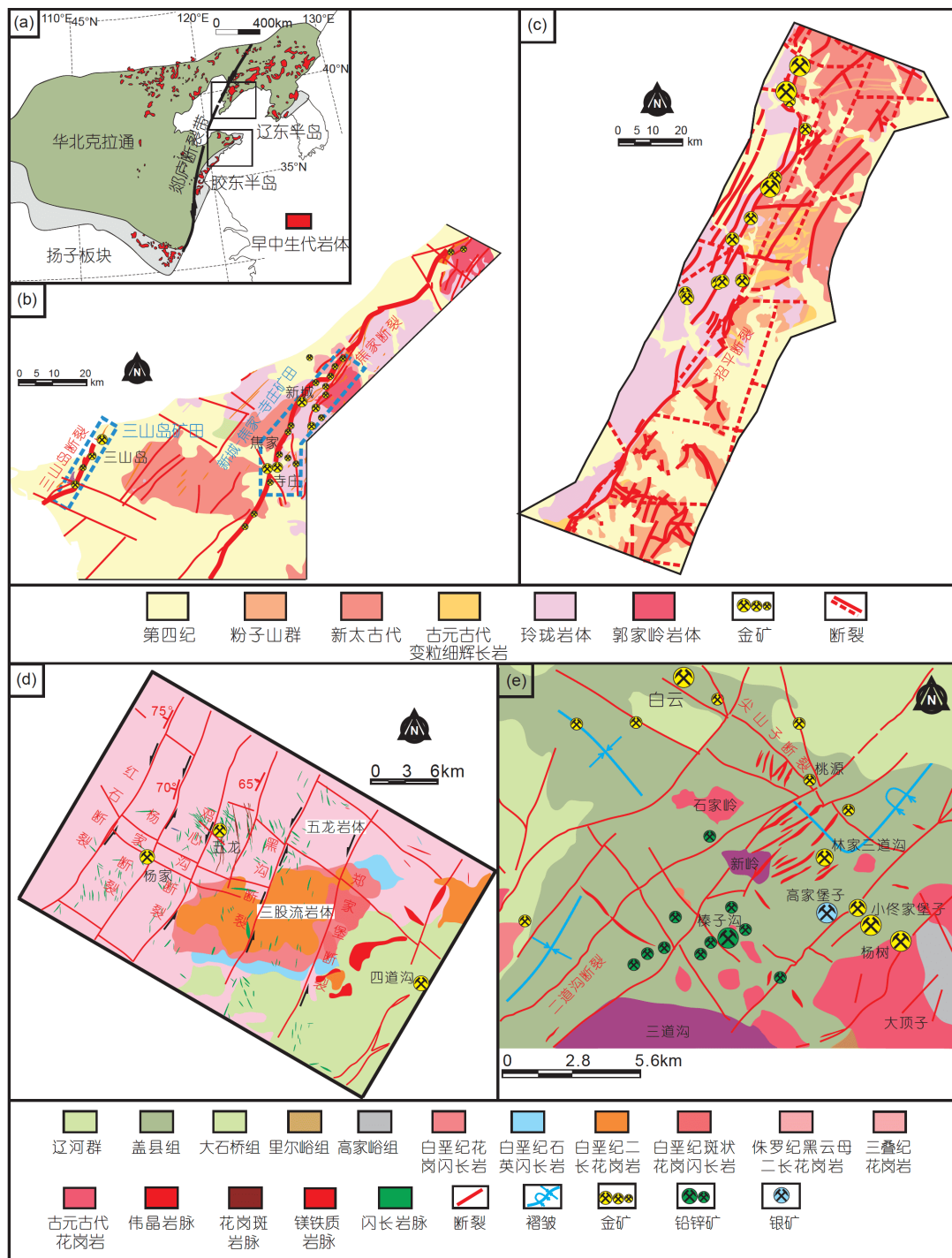


图 1 华北重点Au矿集区地质矿产简图

(a) 华北克拉通地质简图; (b) 焦家-三山岛矿集区地质矿产简图; (c) 招平南段矿集区地质矿产简图; (d) 五龙矿集区地质矿产简图; (e) 青城子矿集区地质矿产简图

成矿事件(Zhu等, 2012; 朱日祥等, 2015)及其典型金矿床的成因模式(曾庆栋等, 2019), 以成矿系统理论和地

质异常理论为指导, 利用3D/4D建模(Wang等, 2015; 王功文等, 2019; Hronsky和Kreuzer, 2019; Kreuzer等,

2020; Huang等, 2020), 运用自主研发软件GeoCube3.0, 开展三维勘探变量挖掘、构建、深层次集成与靶区优选以及资源定量预测评价. 本文旨在构建和实现矿集区尺度深部3000m乃至5000m以浅“透明化”资源定量预测评价的“空间决策”技术方法, 为中国深部资源定量勘查与评价提供科学依据与技术平台.

2 地质背景与矿床特征

2.1 地质背景

华北克拉通是中国面积最大、时代最古老的具有早前寒武纪结晶基底的陆块. 最初的地壳物质记录在3.80Ga(吴福元等, 2005), 巨量陆壳生长发生于新太古代(2.80~2.70Ga), 绿岩带广泛发育. 古元古代经历了俯冲碰撞和伸展裂解, 东、西陆块在~1.85Ga最终碰撞拼合成中间造山带, 并完成最终的克拉通化(Zhao等, 2001, 2005). 中-新元古代华北克拉通经历多期抬升运动. 古-早中生代, 其南、北缘又遭受了多期造山运动(陈衍景等, 2009). 晚三叠世可能为华北克拉通破坏的起始时间(杨进辉和吴福元, 2009). 中生代以后, 由于古西太平洋板块的持续俯冲, 华北克拉通发生了大规模的岩石圈减薄和构造体制的转换, 并伴随着大规模的岩浆活动和巨量金成矿作用(Zhu等, 2012; 朱日祥等, 2015; Li等, 2012; Wu等, 2019). 华北克拉通是目前中国最重要的金成矿省, 也是世界上重要的黄金产地之一. 华北克拉通的边缘和内部普遍含有金矿, 主要分布在胶东、辽东及华北北缘、南缘等, 其成矿年龄、成矿规律与矿床特征趋于一致(翟明国等, 2004; 张连昌等, 2018).

2.1.1 胶东矿集区地质背景

胶东金矿集区是中国第一大金矿集区, 2017年统计黄金储量超过4500t(宋英昕等, 2017), 截止2020年11月其黄金储量达到5200t, 垂向深度约束在2700m以浅. 胶东金矿集区位于华北克拉通的东侧、苏鲁超高压变质带北段和郯庐深大断裂以东区域. 其大地构造单元可进一步划分为胶北地块和苏鲁地块(Tang等, 2007; 刘平等, 2013). 胶东金矿集区中生代岩浆岩发育, 以花岗质岩浆作用为主, 主要有4期: 晚三叠世(215~205Ma)、晚侏罗世(160~141Ma)、早白垩世中期(132~123Ma)和早白垩世晚期(125~90Ma). 其中金

矿床主要赋存在晚侏罗世-早白垩世中期花岗岩中(杨立强等, 2014). 晚三叠世花岗岩包括石岛正长岩-花岗质杂岩体, 为幔源岩浆岩(Chen等, 2003; 郭敬辉等, 2005). 晚侏罗世玲珑花岗岩呈北东向广泛分布在胶西北地区, 多呈大的岩基形式产出, 主要侵入到前寒武纪基底岩石(Hou等, 2007). 早白垩世中期郭家岭似斑状花岗闪长岩由超过12个EW向分布的岩体组成, 在成分上自西向东具有由花岗岩-花岗闪长岩-碱性岩渐变的特征(Wang等, 2014; 刘跃等, 2014). 早白垩世晚期发育碱性花岗岩和高钾中性-铁镁质岩脉(煌斑岩脉)(Yang等, 2003; 郭敬辉等, 2005; 张田和张岳桥, 2007).

胶东金矿集区内以断裂构造发育为特征, 主要有早期EW向、NE-NNE向和晚期NW向断裂构造. 其中, 以形成于中生代期间的一系列NE-NNE向断裂构造为主, 同时该组断裂构造也是主要的控矿和容矿构造(Deng等, 2020). 焦家、三山岛、招平等NE-NNE向断裂构造为郯庐断裂带的一系列次级断裂带(Goldfarb等, 2001; 杨立强等, 2014). 断裂带具有多期活动的特点, 成矿前表现为压剪性变形特征, 而成矿期表现为张剪性变形特征(邓军等, 1996, 2000). 这些断裂带关联了郭家岭期花岗岩, 共同约束和控制了胶东地区破碎蚀变岩型金矿及其石英脉型金矿的产出与分布, 不仅是重要的成矿地质体, 也是成矿作用关联的成矿结构面(叶天竺等, 2014; 于学峰等, 2019; Deng等, 2020).

2.1.2 辽东矿集区地质背景

辽东金矿集区是目前中国重要金矿集区之一, 也是当前找矿探矿的热点地区, 累计黄金储量超过500t(曾庆栋等, 2019). 辽东金矿集区位于华北克拉通东北部, 郯庐深大断裂以东和鸭绿江断裂带以西区域. 其大地构造单元可进一步划分为辽北地块(鞍山-抚顺太古宙杂岩)、辽南地块(金州太古宙杂岩)和中间的古元古代造山带(辽河群与辽吉花岗岩). 区内出露地层主要由太古代鞍山群和古元古代辽河群组成(Zhai等, 1990; 李厚民等, 2014; 张连昌等, 2014). 辽河群主要分布于辽东金矿集区中部, 以青龙山-枣儿岭断裂为界又可细分为北辽河群和南辽河群(卢良兆等, 1996; Li等, 2005; Zhao等, 2005; Li和Zhao, 2007; Meng等, 2013; Li和Chen, 2014).

辽东金矿集区中生代岩浆岩发育, 以花岗质岩浆

作用为主, 主要有3期(Wu等, 2005a, 2005b; Yang等, 2007a, 2007b; 杨进辉等, 2007; Duan等, 2014; Wang等, 2019): 三叠纪(233~212Ma)岩浆活动主要包括碱性杂岩、辉绿岩、辉长岩、基性岩墙、花岗岩等; 侏罗纪(180~156Ma)岩浆活动主要以二长花岗岩为主, 其次为花岗闪长岩; 早白垩世(131~117Ma), 其中以早白垩世岩浆活动最为发育, 岩浆活动包括镁铁质-超镁铁质、花岗质以及少量的闪长质岩石。这种大规模发育的白垩纪岩浆活动是以华北克拉通破坏为地质事件背景的(孙金凤和杨进辉, 2009; 刘永俊等, 2020)。

辽东金矿集区经历了复杂的构造演化历史, 形成了以褶皱和断裂为主的总体构造格架。华北矿集区成矿关联的NE向断裂主要有NE向的鸭绿江、庄河-凤城和长岭子-苏子沟断裂。区内金矿成群分布, 形成了五龙、青城子等重要金矿集区。金矿类型主要为蚀变岩型和石英脉型, 两种类型分别受缓倾斜层间断裂构造和陡倾斜断裂构造控制。辽东金矿主要形成于脆性或脆性剪切变形条件下, 其关联主要断裂系统的脆性或脆性剪切破坏又与早白垩世的岩浆热液活动有关(Liu等, 2020)。

2.2 矿床时空特征

华北克拉通金矿床主要形成于早白垩世, 具有爆发性成矿的特点, 成矿时代与克拉通破坏峰期一致(翟明国等, 2004; Zhu等, 2012; 朱日祥等, 2015; 张连昌等, 2018; 朱日祥和徐义刚, 2019)。

近年来, 研究人员对华北克拉通内的包括胶东、辽东等数个金矿集区内的金矿床的蚀变矿物(绢云母)、载金黄铁矿以及与金矿密切共生的辉钼矿、独居石等副矿物进行了大量的原位测试分析, 对华北克拉通金矿床的金成矿时代和成矿过程进行了约束。研究区金矿床的时间序列共性特征为早白垩世金成矿, 其中胶东金成矿主要集中在(120±5)Ma(杨进辉等, 2000; Yang等, 2003; 翟明国等, 2004; 范宏瑞等, 2005; Zhang等, 2020), 辽东金成矿年龄近年来相对较少, 五龙金矿最新的辉钼矿Re-Os和独居石U-Th-Pb年代学显示五龙金成矿年龄为127Ma(Yu等, 2020), Sun等(2019)对成矿前后脉岩锆石U-Pb年龄将白云金矿限定在~126Ma。研究区金矿床的空间序列共性特征为研究区金成矿具有侵入岩体及其脉岩发育关联, 侵入岩体且具有脆性或脆性剪切构造断裂多重约束Au矿床的

空间分布规律, 而围岩地层通常具有砂页岩型的构造滑脱赋矿及其张性构造裂隙容矿。在胶东金矿集区相关的早白垩世侵入岩体时代与成矿时代分别为130~124Ma、(120±5)Ma(Wang等, 2019; Zhang等, 2020)。已有的数据表明在辽东金矿集区相关的早白垩世侵入岩体时代与成矿时代分别为135~115Ma、127~126Ma(Sun等, 2019; Yu等, 2020)。另外, 研究区成矿关联的侵入岩体与矿床的剥蚀与保存条件趋于一致。例如, 磷灰石裂变径迹、流体包裹体、锆石分析及其反演估算等区内包括胶东、辽东等数个金矿集区内的金矿床进行了有效的研究(郭春影等, 2011)。Liu等(2017)以胶东三山岛金矿为例, 认为当前的剥蚀深度为~5.1km, Wang等(2018)认为辽东当前的剥蚀深度为4.3~4.7km。因此, 相对于研究区Au矿床成矿深度4~7km, 认为该区矿床保护较好, 具有较好的深部找矿潜力(郭春影等, 2011; 杨立强等, 2014; Deng等, 2020)。

3 地学大数据与三维/四维建模

矿产资源预测与评价所需求的地学大数据, 是地学多元(地质、地球物理、地球化学、遥感与勘探及采矿工程)、多维(一维钻孔柱状图、二维剖面图/中段图与三维地质体模型)、多尺度(矿集区-矿田-矿床-矿体)数据库的集合。本文三维/四维建模是基于上述地学大数据, 根据成矿系统理论与地质异常理论, 利用GOCAD-SKUA三维地质建模平台、Modelvision与UBC-GIF三维地质-地球物理建模平台、Flac3D动态模拟平台以及自主研发GeoCube3.0软件平台, 构建关键成矿地质体的三维空间几何模型和三维属性模型(垂向深度为5000m)(图2a)。地学大数据与三维/四维模型可以依据更新的资料而进一步优化, 也可以开展循环模式(Loop3D)的三维多参数(包括岩性、物性、光谱、矿体与靶区等)建模(<https://loop3d.org/>)。

3.1 矿集区的地学大数据

本文矿集区地学大数据包括1:5万、1:1万地质地形图与地质矿产图以及1:2000、1:500的钻孔柱状图、勘探剖面图与采矿中段图; 1:5万的土壤地球化学数据、若干钻孔采矿巷道与钻孔样品及其主微量、原生晕与高光谱短波和长波等测量分析资料; 1:2.5万的地面重力、地面磁法与1:1万的航磁以及1:5000的

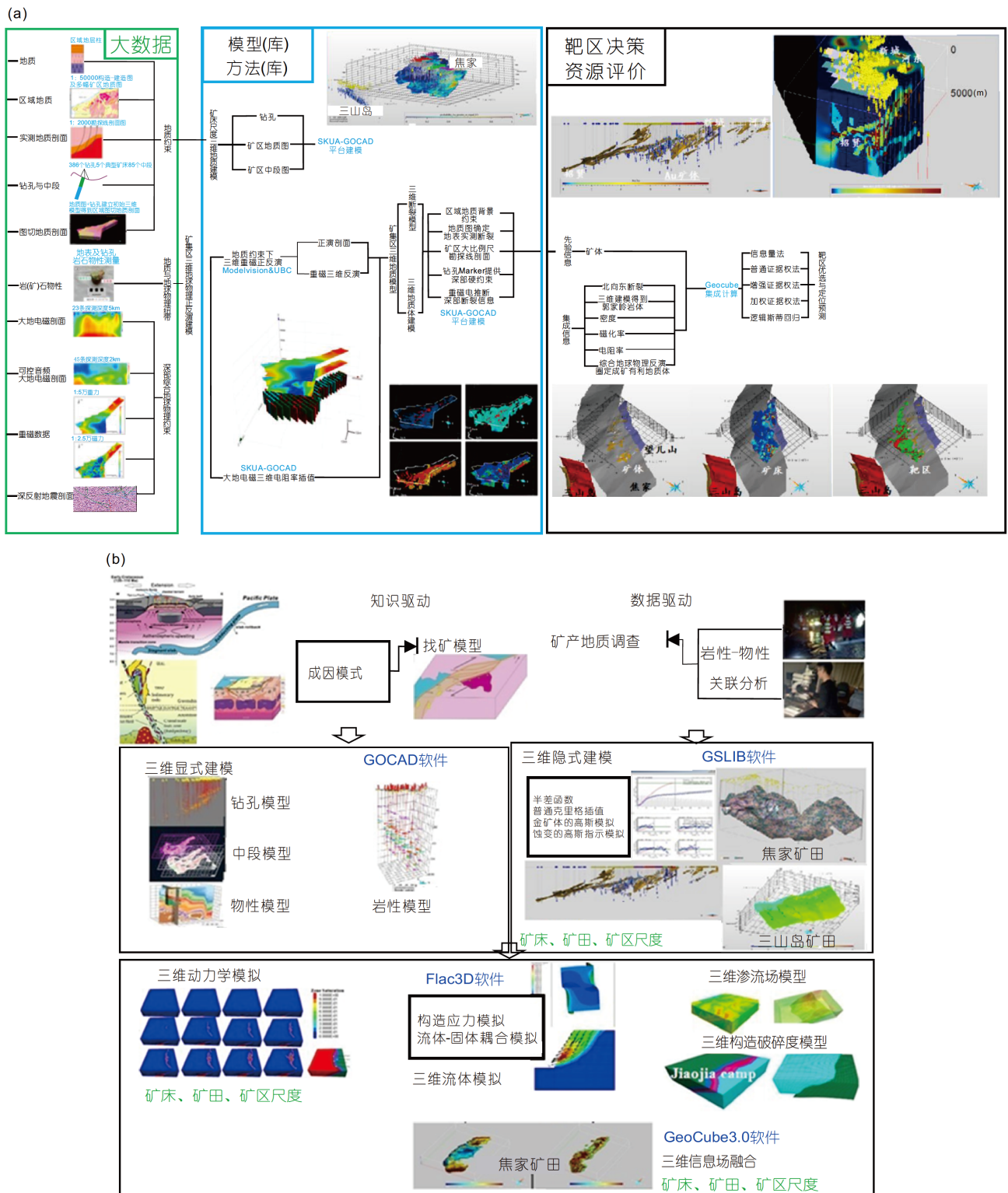


图 2 山东焦家-三山岛Au矿集区5000m以浅的GeoCube3.0靶区优选与资源评价的空间决策(a)及山东焦家Au矿集区三维/四维构造-渗流场动态建模过程(b)的技术方法流程

隶属于模型库的三维建模不确定性分析, 见图2(a)

AMT与CSAMT影像, 辅助少量的浅源地震剖面(图2a)。根据中国现行通用的1:2000坐标系统进行坐标修正, 基于AutoCAD格式开展国内、国外地学二维、三维GIS软件的文件转换, 最终形成GOCAD-SKUA软件与自主研发软件GeoCube3.0两种格式的多源数据库集合的地质大数据。

在矿集区的地质大数据中, 勘探钻孔与采矿巷道工程关联的地质与岩矿石样品观测、地球物理物性多参数测量、地球化学多元素组合分析和遥感高光谱测量, 是三维成矿地质体建模的关键数据源, 也是定量地质数学建模不确定性分析的不可或缺数据源。载金矿物微区原位微量成分分析与制图以及绢云母的短波红外高光谱高精度(nm级)分类制图与建模, 一方面提高了矿床“源-运-储”等“成矿过程”要素的认知, 另一方面拓展了三维高斯指示模拟的参数(岩性、蚀变); 流体包裹体的温度-压力-成分多参数模拟减少了“三维/四维”地质体建模的不确定性。地质观测分析包括岩矿石矿物的痕量、微量、主量分析与制图(LA-mapping)及其实验模拟(曾庆栋等, 2019; Hu等, 2020)。本研究中典型矿床-矿体尺度的高精度建模可拓展至微观与微区尺度, 旨在定量化分析成矿物源与成矿流体通道(运-储)关联的成因模式与找矿模型。

3.2 矿集区的三维/四维建模

本文矿集区尺度的地质体3D/4D建模分为地质工程数据的三维显示建模、三维隐式建模以及重磁与电磁数据的正反演(物性)建模(图2b)三种: (1) 三维显示建模。“标准化、流程化”的地质钻孔与巷道工程关联的地质数据挖掘及其建模, 其国内外相关的技术方法流程趋于一致(Mallet, 1997, 2002; Houlding, 1994; Caumon和Collon-Drouaillet, 2014; Wang等, 2015; Weihed, 2015), 三维显示建模主要运用于矿床/矿体尺度的蚀变岩体、断裂构造、矿体与钻孔、巷道工程的高精度几何建模。(2) 三维隐式建模。依据数学地质方法建模, 主要应用于矿床尺度的三维Au品位建模(例如三维克里格插值建模、三维高斯克里格多重实现模拟)以及复杂地质体(蚀变矿物组合)的高斯指示模拟; 基于三维矿床模型多参数(温度、压力、成分、饱和度等)的四维时间序列的Flac3D/ANSYS动态模拟/建模(Huang等, 2020)。(3) 正反演建模。采用先验地质信息约束下的重磁联合综合地质地球物理信息解译, 三

维重磁模型构建采用的软件是ModelVision与UBC-GIF(Spicer等, 2011; Zhang等, 2019): 利用1:50000地质图约束, 深部推测以钻孔、正演1:25000重磁联合剖面和大地球磁(MT)剖面(垂向深度5000m)为主, 在正演剖面和大地球磁剖面之间, 必要时依据三维重磁反演和可控音频大地电磁(CSAMT)加密剖面(垂向深度2000m), 以便于修改模型和加入先验信息, 反演速度快且拟合误差相对较小, 能准确地界定关键地质体边界; 在矿集区尺度的焦家断裂地球物理重磁正演解译时, 优选选取三维C-V分形估算的缓冲距离数值作为正演初始值解译。在此基础上, 利用上述隐式建模中的四维动态建模最大扩容空间, 即四维模拟各阶段的断裂最大真厚度的数值为上限, 这种多方法数学建模约束方式不仅能够最大程度地减少三维断裂模型的不确定性, 也能提高三维断裂建模的效率。在此基础上, 矿集区地质-地球物理三维建模工作以SKUA-GOCAD软件为核心平台, 运用特有的UVT(地质时间域坐标系)技术与离散光滑插值(DSI)算法, 以地质概念驱动建模, 选取数据和地质体模型各部分都具有地质与成矿意义以及空间拓扑关系, 能够更好地吻合控制点的三维栅格单元几何与属性多重特征, 有效减少地质体的几何畸变和属性类别。

本文以华北克拉通破坏事件为成矿地质背景, 以胶东金成矿系统理论方法为依据, 参考地质-地球物理三维地质循环建模(Loop3D)技术方法, 利用GOCAD、GeoCube与FLAC3D软件, 开展3D/4D建模与勘探变量优化与提取(图2b), 重点模拟分析成矿系统“运-储”矿体赋存空间关键变量, 即深层次挖掘研究区内主要金矿体关联的矿集区-矿田-矿床多尺度复合叠加构造应力场与成矿热液流体的饱和渗流场。

下面以焦家-三山岛Au矿集区为实例, 概述矿集区的3D/4D建模实验内容及其步骤(图2a、图2b), 包括地质大数据的挖掘与关联分析以及模型库、方法库的深层次挖掘以及找矿勘探变量模型构建, 旨在为靶区优选决策和资源定量评价奠定基础。具体内容与步骤概述如下: (1) 知识驱动: 华北克拉通破坏与金矿床成因模式的地质知识模型及其定性、半定量分析(邓军等, 2000; 朱日祥等, 2015; Yang等, 2016); 焦家Au矿集区典型矿床的岩矿石地质年代学、热力学等成矿系统关联的成矿物源、剥蚀与保存数据的收集(范宏瑞等, 2005; Liu等, 2017; Zhang等, 2020), 岩矿石的年代学资

料梳理及其“时空因”关联“源-运-储”成矿系统相关要素分析. (2) 数据驱动: 新城、焦家金矿床的钻孔模型的三维几何模型构建(1100余个, 钻孔深度>2000m覆盖所有大中型矿床, 且最深钻孔4006.17m); 钻孔岩芯样品的累积数据属性, 包括高光谱(短波、长波)、物性(密度、磁化率、电阻率)、XRF快速测量扫描主微量成分(28种)、主微量地球化学测试主微量成分(63种)以及原生晕地球化学成矿元素与指示元素(>6000个, 1200m以浅, 14种); 其中, 矿床地球化学中的定量化与半定量化成矿信息融入成矿地质体解译, 例如温度(成岩成矿的流体包裹体、载金黄铁矿热电性双重关联约束)、蚀变岩石孔隙压力与断裂构造应力(岩矿石与围岩的蚀变矿物(类别、组合)表征流体成矿强度), 是成矿过程中主要物理影响因素. (3) 焦家与新城大型金矿床矿体与赋矿的成岩成矿地质体(玲珑岩体、郭家岭岩体)以及围岩(胶东群)在不同矿床、矿田与矿集区的时空(剥蚀与保存)关联分析, 研究区的数学建模包括断裂构造的缓冲分析、蚀变带的拓扑分析和流体的模拟分析(Huang等, 2020). (4) Flac3D动态模拟: 新城-河西-河东矿床-矿田尺度(长、宽、高三维块体单元: 200m×100m×50m, 累计1,000,000块体单元总数, 垂向深度5000m)的构造破碎带模拟关联焦家矿集区尺度(长、宽、高三维块体单元: 300m×200m×50m, 累计4,500,000三维块体单元总数, 垂向深度5000m)的主断裂的上下盘缓冲分析及其构造应力场分析(邓军等, 2000; 杨立强等, 2014; Wang等, 2014; Zhang等, 2020); 新城-河西-河东矿床-矿田尺度的饱和渗流场模拟关联焦家矿集区赋矿岩体蚀变分带的拓扑分析以及地球物理多参数物性(密度、磁化率、电阻率)场分析(Yang等, 2016; Huang等, 2020). (5) 矿集区尺度的构造应力场与矿床-矿田尺度的构造破碎带关联分析; 矿集区尺度的蚀变分带与矿床-矿田尺度的饱和渗流场模型关联分析. (6) 利用GeoCube模块的C-V分形三维块体单元(100m×100m×100m)阈值分割划分边界条件, 该块体单元大小与本文第四节深层次勘探变量集成与靶区优选单元及第五节资源预测评价一致, 以便于实现多尺度构造与流体参数的三维融合集成, 由此判别矿集区的成矿地质体几何模型并优选三维勘探变量及其关联参数(例如 断裂构造影响域, 及成矿有利的断裂构造地段). 上述3D/4D建模也是本文三维勘探变量不确定性分析与优选的重要技术方法.

此外, 山东招平南段金矿集区与辽东五龙金矿集区地学综合研究程度与勘探深度及其地学大数据可以满足3D/4D建模需求(图3、4). 辽东青城子金矿集区的地学综合研究程度与勘探深度及其地学大数据能够满足3D/4D建模需求(图5), 但是其成因模式与找矿规律观点多样, 在勘探变量分析与集成方面, 需要多目标的深层次集成分析. 因此, 本文选取三维随机森林法和证据权法对比开展深部找矿有利靶区优选, 以减少找矿有利靶区的不确定性.

4 深层次勘探变量集成与靶区优选

国际矿产勘查的资源预测评价发展趋向于多元勘探变量的综合制图、建模与集成(Wang等, 2015; Nielsen等, 2015; Li等, 2016; Zhang等, 2019). 目前国内外集成建模通常基于三维商业软件与计算机语言编程自主研发结合, 商业软件包括Geosoft、Geomodeler、GOCAD-SKUA、Flac3D等. 深层次勘探变量优选通常与三维可视化、量化与动态建模及其三维模拟关联. 例如, 辽东五龙金矿集区的三维建模(Zhang等, 2019)与焦家金矿集区的三维构造与温度多参数模拟(Huang等, 2020)等; 典型矿床成矿过程的动态模型(El-dursi等, 2020).

华北重点金矿集区的地学大数据3D/4D地学建模注重深层次的三维多元勘探变量的挖掘与构建. 在此基础上, 基于稳健的贝叶斯概率理论的证据权法、多目标的随机森林法, 以较系统地开展矿集区-矿田-矿床-矿体三维集成建模与元素-体积(C-V)分形靶区优选. 本研究基于GeoCube1.0软件(Wang等, 2015; Li等, 2016)研发至GeoCube3.0, 本文优化和创新的功能模块概况如下: (1) 针对华北四个矿集区的范围不规则几何体(垂向深度约束5000m), 突破了在不规则地段的块体单元三维插值计算和显示功能, 包括普通证据权法、模糊证据权法、增强证据权法、逻辑斯蒂回归法、信息量法五种集成方法以及C-V分形靶区优选模块(图3i、图5h). 其中, GeoCube1.0模块中的C-V分形内涵由最初的元素-体积分形拓展至块体单元的成矿概率数值与体积分形(Wang等, 2015; Li等, 2016). 例如三山岛海域边界的非线性特征, 招平南段、五龙与青城子矿集区均为斜交XYZ坐标轴的非规则几何体. (2) 研发了三维环境的随机森林法集成模块(图5h), 其更

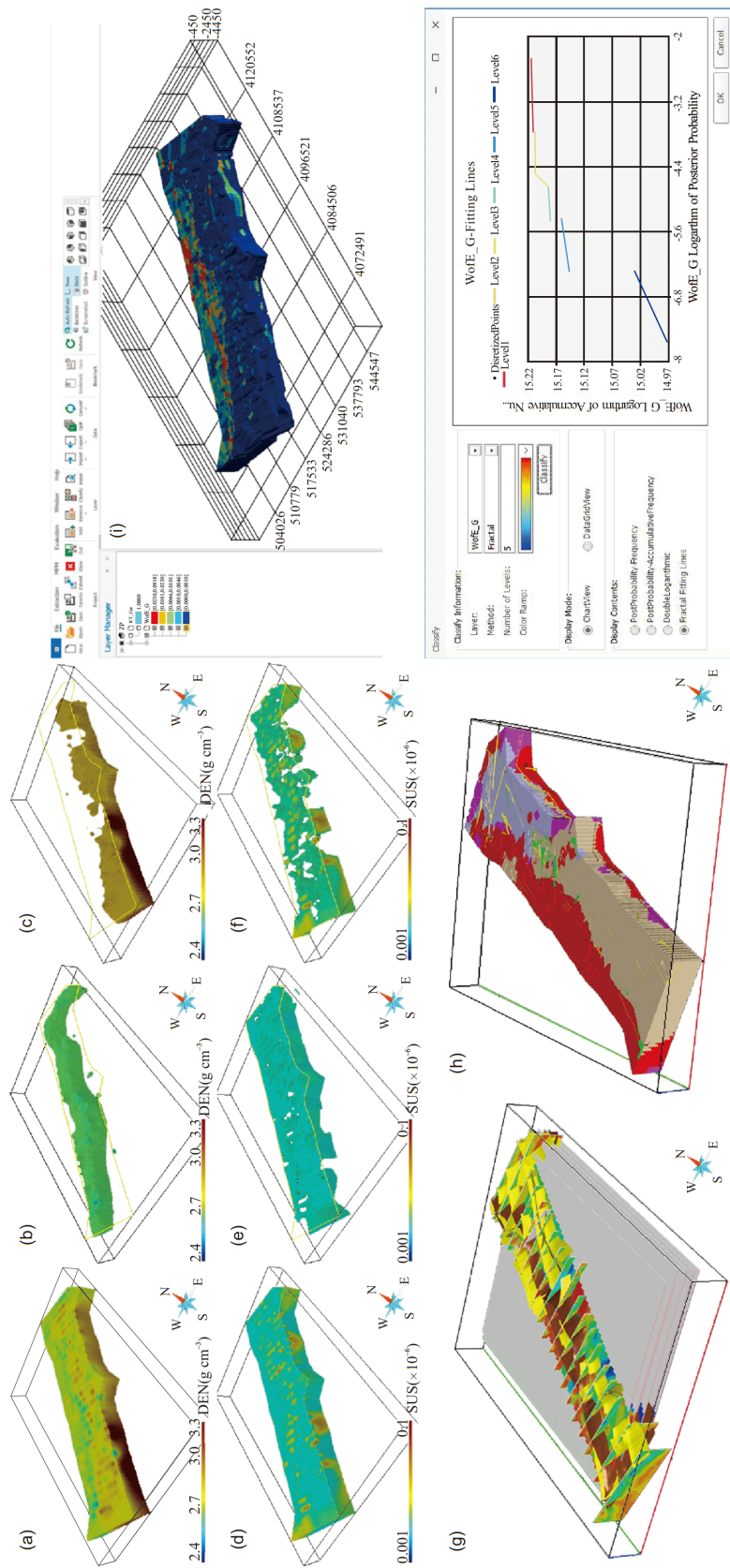


图 3 山东招平南段 Au 矿集区 5000m 以浅的勘探变量构建与集成的 Geocube3.0 靶区优选

(a) 重力三维反演; (b) 低密度地质体; (c) 高密度地质体; (d) 磁力三维反演; (e) 低密度地质体; (f) 高密度地质体; (g) 成矿-控矿断裂构造的地质-MT 联合剖面综合解释模型; (h) 地层-郭家岭岩体-玢岩-断裂构造地质模型; (i) 普通证据权法集成 C-V 形靶区优选四个等级

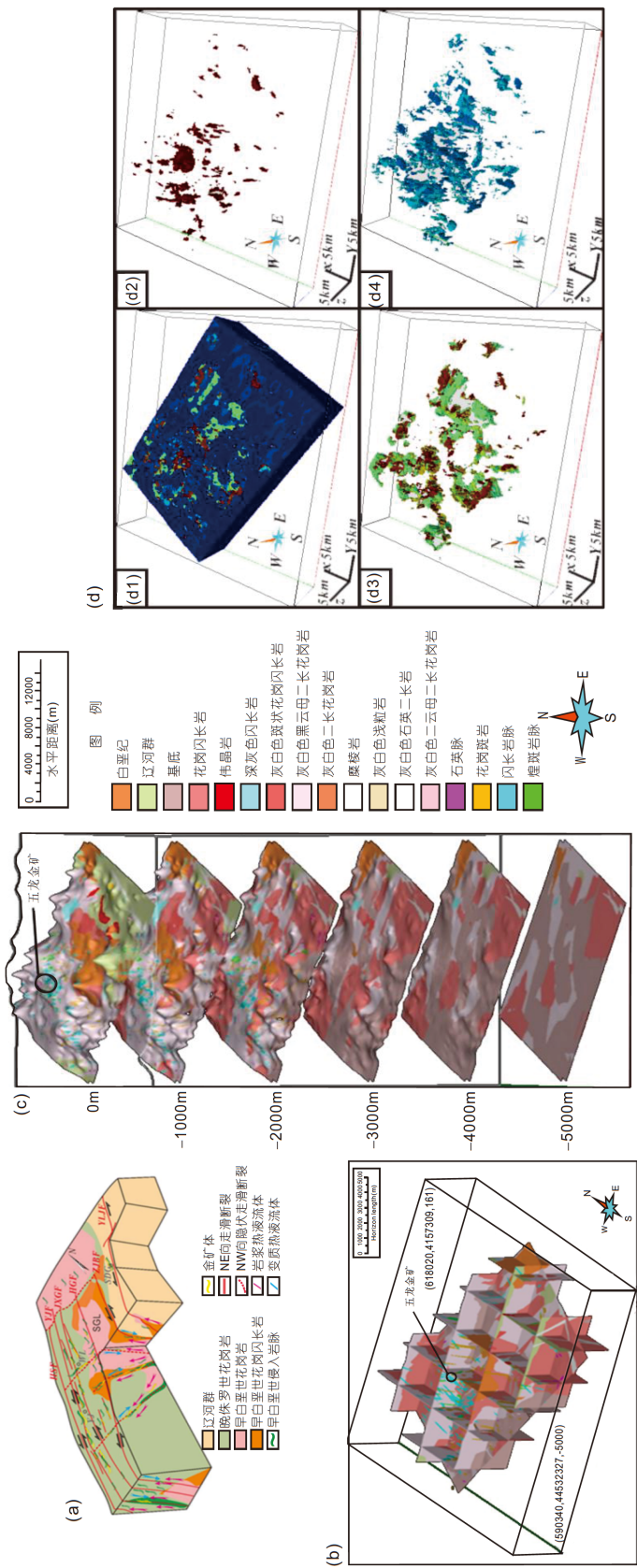


图 4 辽宁五龙Au矿集区的成因模式(a)、三维勘探变量模型(b)、(c)与GeoCube3.0的靶区优选(d)

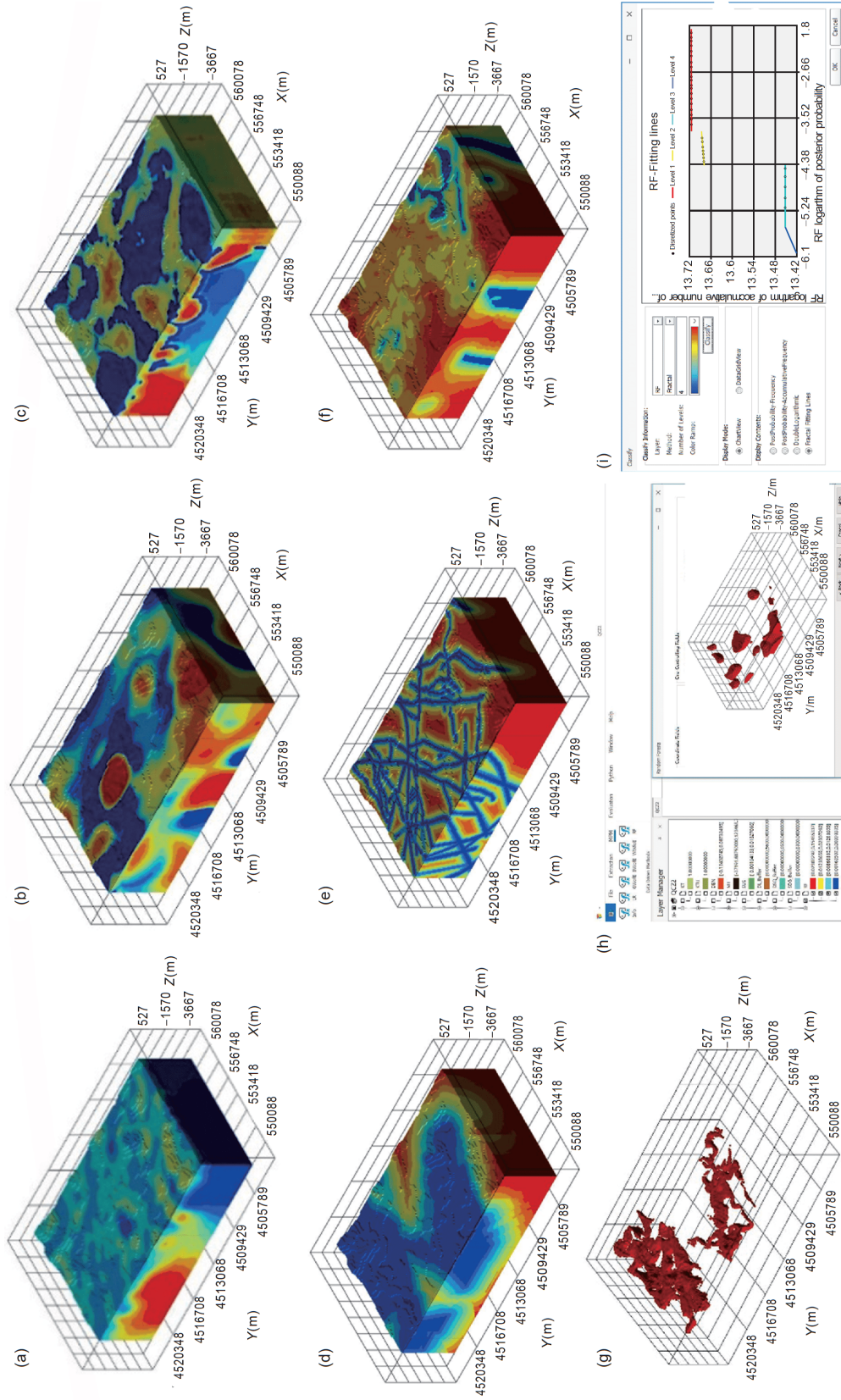


图5 辽宁青城子Au矿集区的三维勘探变量与GeoCube3.0三维证据权法集成靶区以及C-V靶区优选

(a) 剩余重力; (b) 1:25000磁法; (c) 航空1:100000磁法; (d) 赋矿地质模型; (e) 构造模型; (f) 岩体模型; (g) 三维证据权法集成靶区; (h) GeoCube3.0界面三维随机森林法集成靶区优选; (i) C-V分形靶区优选图

有利于具有复杂多期性特征的成矿地质体,即三维勘探变量多元多目标集成。例如,青城子矿集区白云、桃源、林家三道沟、小佟家堡子大型金矿床的金矿体的赋矿地段不仅是盖县组褶皱层间滑脱带,还有中生代岩浆多期侵位及其热液活动关联的NE向断裂构造带(如尖山子断裂)。

在山东焦家-三山岛、招平南段、辽宁五龙、青城子矿集区,利用上述自主研发软件GeoCube3.0深层次集成模块(普通证据权、增强证据权、模糊证据权、逻辑斯蒂回归、信息量和随机森林六种方法),开展了研究区四个矿集区的勘探变量集成及其C-V分形的A、B、C三类靶区优选(图2a,图3i,图4a、图5i)。研究结果表明:(1)焦家-三山岛3000m以浅具有较好的A级、B级找矿有利靶区,其核心地段位于焦家NW向招贤地段,比邻三山岛海域的西岭-海域深部矿床地段,二者分别受焦家、三山岛深部断裂控矿,且分别向SW、NE向测伏,3000~5000m具有一定数量的B、C级块体单元,显示其具有较好的找矿有利地段。(2)招平南段矿集区3000m以浅具有两条NE向平行的A级、B级找矿有利靶区,3000~5000m具有一定数量的B、C级块体单元,显示其具有较好的找矿有利地段。(3)五龙矿集区3000m以浅具有四个找矿有利靶区,主要分部在五龙深部、杨家金矿SW地段以及三股流岩体的NW、SW两个地段,3000~5000m具有较好的找矿有利地段。(4)青城子矿集区3000m以浅具有四个找矿有利靶区,NW地段、SW地段、SE小佟家堡子深部地段和林家三道沟-桃源矿区深部地段。此外,该矿集区深部3000~5000m地段的成矿地质体的地球物理综合解译存在较高的不确定性,也缺乏必要的深部钻孔资料支撑,从而影响了其深部靶区圈定和资源预测评价。

5 资源预测评价

根据四个矿集区的深层次集成与优选靶区,利用GeoCube3.0软件的C-V分形模块,结合各矿床的工业矿体三维模型及其储量分类地段,将三维集成的找矿有利靶区划分为三个等级(A/I级、B/II级、C/III级),剩余地段为找矿远景地段(IV级)或无矿化的背景。根据山东焦家-三山岛矿集区典型矿床矿体的品位与靶区优选等级关联分析,实现三维块体单元含矿率计算,从而估算金资源量。以山东焦家-三山岛矿集区为例

(图6a、图6b),具体资源定量预测评价的步骤概述如下:(1)统计分析三山岛、仓上、新立、西岭、海域矿床金资源储量(图6c),由钻孔、巷道联合构建的三维矿体建模计算;(2)统计分析上述各矿床的三维找矿靶区块体单元(100m×100m×100m)数量(A级、B级、C级);(3)根据上述各矿床的储量数值与其对应的三维靶区块体数量比值估算Au含矿率,即通过A、B级靶区块段的含矿率计算(3000m以浅),实现剔除夹石同等作用后的估算Au资源量的目的,其中Au边界品位为 0.5g t^{-1} (图6c)。研究结果表明,三山岛矿田的A级靶区块体单元含Au率为65.5%,B级靶区块体单元含Au率为25.1%。研究区总矿块数量为44930个(5000m以浅),其中,3000m以浅的A级靶区矿块为6476个,其金资源量为2121t,B级靶区矿块为14241个,其金资源量为1787t,累计金资源量为3908t;3000~5000m深部靶区A级矿块为1240个,其金资源量为406t,B级4224个,其金资源量为530t,累计金资源量为936t。

6 结论

根据山东焦家-三山岛矿集区的三维地质与地球物理模型综合分析,三山岛断裂带仓上Au矿床深部2000m以下Au矿的优选靶区为深部隐伏郭家岭期花岗闪长岩体与早期玲珑岩体接触地段。其上部覆盖胶东群地层,这区别于浅表仓上Au矿床的郭家岭期花岗闪长岩体与胶东群围岩接触的成矿环境,但类似于该矿集区北部的西岭Au矿床与新城Au矿床深部2200m见矿地段的成矿环境。

Flac3D软件与自主研发GeoCube3.0软件实现了焦家-三山岛矿集区3D/4D建模关联分析,即三维环境的数值模拟与统计分析对比实验。结果表明,三维断裂构造勘探变量的缓冲距离为173m,其与研究区各矿集区的地球物理重磁融合与电磁法综合解译的梯度区间值为同等数量级(100m),因而能够满足数据集成与靶区优选的精度需求。

根据矿集区典型矿床三维矿体模型及其Au储量信息,可以估算A级、B级靶区块体单元的含金量,从而外推优选靶区的Au预测资源量。这种方法不仅避免了传统方式去除夹石率估算体积的复杂环节,还解决了研究区不规则边界效应带来的数学计算误差,从而提高了智能化的空间决策水平。

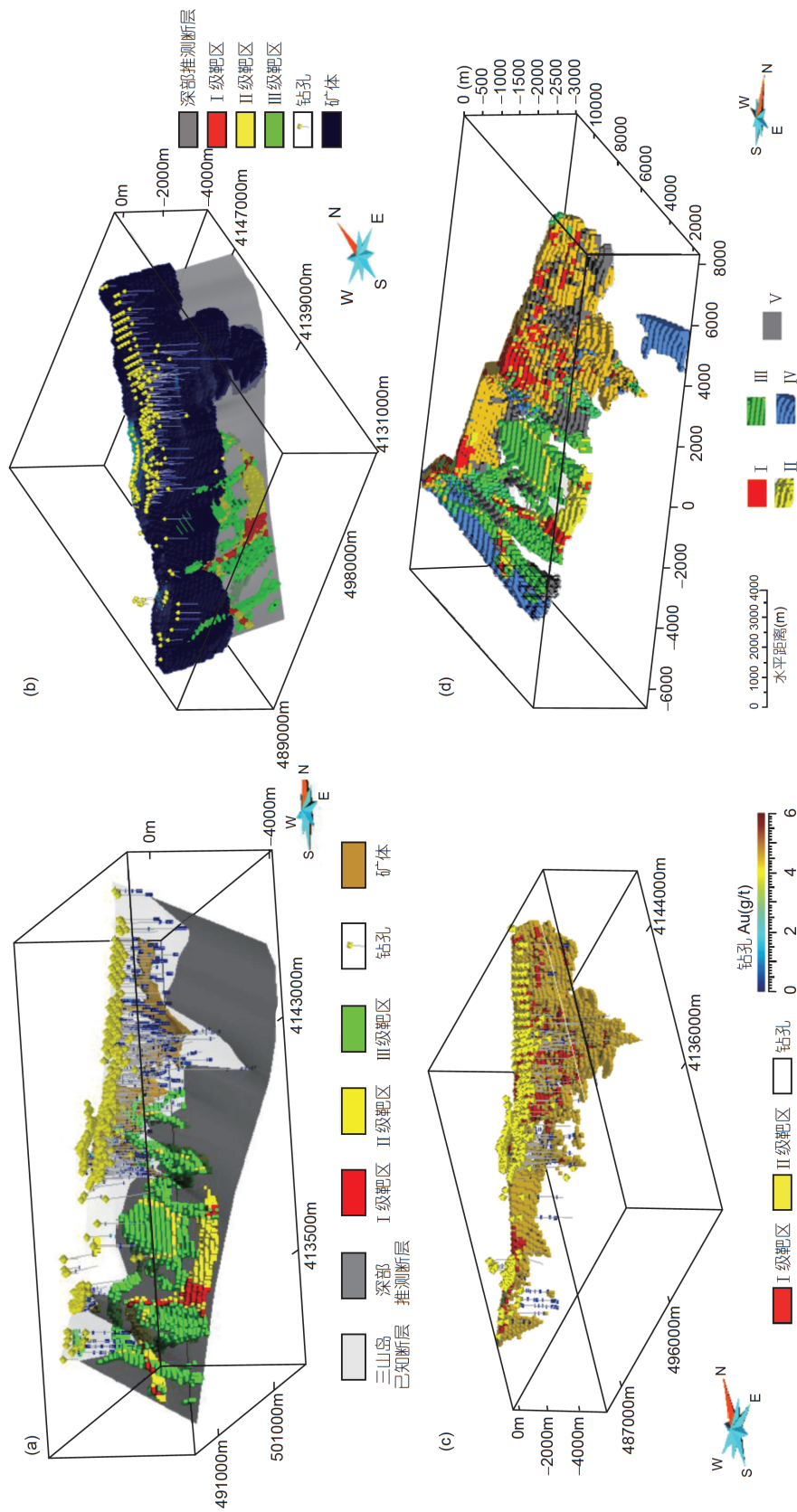


图 6 山东三山岛-新立-仓上-西岭-海域矿床的 Au 资源量估算

(a) 三维钻孔、矿体显示建模及深部找矿靶区模型(A级(I级), 红色块体; B级(II级), 黄色块体; C级(III级), 绿色块体); (b) 三维钻孔品位普通克里格法插值模型(隐式建模: 蓝色块体地); (c) 三维钻孔Au品位C-V分形模型(红色、橙色块体模型为Au工业储量地段); (d) 靶区优选(划分四级)三维块体单元模型

华北重点Au矿集区的靶区优选结果表明, 各矿集区的优选靶区关联NE向断裂构造地段, 该地段赋含石英脉群和中基性岩脉群. 这些特征表明, 华北Au矿集区的“运-储”空间连续性、关联性强, 指示岩浆热液与构造剪切多因耦合的成矿动力学环境以及华北克拉通破坏事件对于矿集区Au矿化富集地段.

致谢 在科学计算方面, 加拿大阿尔伯塔大学Deutsch Clayton教授/院士和曲家楠博士、魁北克大学程立真教授、南非大学Emmanuel John M. Carranza教授、美国休斯敦大学Shuhad D. Khan教授和孙磊博士后给予了支持与帮助; 在研究成果交流方面, 中国科学院地质与地球物理研究所的杨进辉研究员和秦克章研究员、中国地质科学院陈仁义研究员、肖克炎研究员、陈正乐研究员和严加勇研究员、中国地质调查局薛迎喜主任、王宗起研究员、程志中教授级高工、薛建玲高工等给予高度肯定和完善建议; 在资料收集和野外调研方面, 得到了山东黄金集团肖凤利副总地质师、山东黄金地质矿产勘查有限公司刘日富总工和许延波经理、山东黄金新城矿业公司的宋召法副矿长和彭永明运营部副经理、赤峰黄金集团邱海成常务副总经理、辽宁有色地质103队刘福兴队长和李生辉副总工, 以及山东地质调查院李秀章总工和张文主任等的帮助. 三位匿名评审专家和期刊编委陈华勇研究员提出了宝贵的修改意见与建议. 在此对于上述人员表示衷心的感谢.

参考文献

- 陈衍景, 翟明国, 蒋少涌. 2009. 华北大陆边缘造山过程与成矿研究的重要进展和问题. 岩石学报, 25: 2695–2726
- 邓军, 方云, 杨立强, 丁式江, 肖荣阁, 彭润民, 王建平. 2000. 剪切蚀变与物质迁移及金的富集——以胶东矿集区为例. 地球科学, 25: 428–432
- 邓军, 徐守礼, 方云, 周显强, 万丽. 1996. 胶东西北部构造体系及金成矿动力学. 北京: 地质出版社. 1–98
- 范宏瑞, 胡芳芳, 杨进辉, 沈昆, 翟明国. 2005. 胶东中生代构造体制转折过程中流体演化和金的大规模成矿. 岩石学报, 21: 1317–1328
- 郭春影, 张文钊, 葛良胜, 卿敏, 高帮飞, 夏锐. 2011. 胶东西北部金矿形成深度与剥蚀程度概略评价. 金属矿山, 422: 112–115
- 郭华东. 2018. 地球大数据科学工程. 中国科学院院刊, 33: 818–824
- 郭敬辉, 陈福坤, 张晓曼, Siebel W, 翟明国. 2005. 苏鲁超高压带北部中生代岩浆侵入活动与同碰撞——碰撞后构造过程: 锆石U-Pb年代学. 岩石学报, 21: 1281–1301

- 李厚民, 刘明军, 李立兴, 杨秀清, 姚良德. 2014. 弓长岭铁矿二矿区蚀变岩中锆石SHRIMP U-Pb年龄及地质意义. 岩石学报, 30: 1205–1217
- 刘平华, 刘福来, 王舫, 刘建辉, 蔡佳. 2013. 胶北西留古元古代~2.1Ga变辉长岩岩石学与年代学初步研究. 岩石学报, 29: 2371–2390
- 刘永俊, 韩晓涛, 刘正宏, 吴文彬, 王玉平, 李海洋, 王晓亮. 2020. 辽东风城地区早白垩世花岗岩的锆石U-Pb年龄、地球化学特征及地质意义. 地球科学, 45: 145–155
- 刘跃, 邓军, 王中亮, 张良, 张潮, 刘向东, 郑小礼, 王旭东. 2014. 胶西北新城金矿床二长花岗岩岩石地球化学、锆石U-Pb年龄及Lu-Hf同位素组成. 岩石学报, 30: 2559–2573
- 卢良兆, 徐学纯, 刘福来. 1996. 中国北方早前寒武纪孔兹岩系. 长春: 长春出版社. 195–234
- 莫宣学, 董国臣, 邓晋福. 2020. 大型-超大型矿床的成矿动力学背景. 北京: 地质出版社
- 宋英昕, 宋明春, 丁正江. 2017. 胶东金矿集区深部找矿重要进展及成矿特征. 黄金科学技术, 25: 4–18
- 孙金凤, 杨进辉. 2009. 华北东部早白垩世A型花岗岩与克拉通破坏. 地球科学, 34: 137–147
- 王功文, 张寿庭, 陈建平. 2019. 大型-超大型矿床定量评价技术手册. 北京: 地质出版社
- 王功文, 张寿庭, 燕长海, 庞振山, 王宏伟, 冯占奎, 董宏, 程红涛, 何亚清, 李瑞喜, 张智强, 黄蕾蕾, 郭娜娜. 2021. 柴川矿集区地学大数据挖掘与三维/四维建模的资源-环境联合预测与定量评价. 地学前缘, 28: 139–155
- 吴福元, 杨进辉, 柳小明. 2005. 冀东3.8Ga锆石Hf同位素特征与华北克拉通早期地壳时代. 科学通报, 50: 1996–2003
- 肖克炎. 2015. 大数据思维下的矿产资源评价. 地学前缘, 34: 1266–1272
- 杨进辉, 吴福元, 谢烈文, 柳小明. 2007. 辽东矿洞沟正长岩成因及其构造意义: 锆石原位微区U-Pb年龄和Hf同位素制约. 岩石学报, 23: 263–276
- 杨进辉, 吴福元. 2009. 华北东部三叠纪岩浆作用与克拉通破坏. 中国科学D辑: 地球科学, 39: 910–921
- 杨进辉, 周新华, 陈立辉. 2000. 胶东地区破碎带蚀变岩型金矿时代的测定及其地质意义. 岩石学报, 16: 454–458
- 杨立强, 邓军, 王中亮, 张良, 郭林楠, 宋明春, 郑小礼. 2014. 胶东中生代金成矿系统. 岩石学报, 30: 2447–2467
- 叶天竺, 吕志成, 庞振山. 2014. 勘查区找矿预测理论与方法. 北京: 地质出版社
- 于学峰, 杨德平, 李大鹏, 单伟, 熊玉新, 迟乃杰, 刘鹏瑞, 于雷亨. 2019. 胶东焦家金矿带3000m深部成矿特征及其地质意义. 岩石学报, 35: 2893–2910
- 曾庆栋, 陈仁义, 杨进辉, 孙国涛, 俞炳, 王永彬, 陈沛文. 2019. 辽东地区金矿床类型、成矿特征及找矿潜力. 岩石学报, 35: 1939–

- 1963
- 翟明国, 范宏瑞, 杨进辉, 苗来成. 2004. 非造山带型金矿——胶东型金矿的陆内成矿作用. *地学前缘*, 11: 85–98
- 翟裕生, 刘家军, 薛春纪, 等. 2020. 大型-超大型矿床成矿过程与机理. 北京: 地质出版社
- 张连昌, 白阳, 朱明田, 黄柯. 2018. 华北克拉通金矿区域成矿差异分析. *地球科学与环境学报*, 40: 363–380
- 张连昌, 代堰铭, 王长乐, 刘利, 朱明田. 2014. 鞍山-本溪地区前寒武纪条带状铁建造铁矿时代、物质来源与形成环境. *地球科学与环境学报*, 36: 1–15
- 张田, 张岳桥. 2007. 胶东半岛中生代侵入岩浆活动序列及其构造制约. *高校地质学报*, 13: 323–336
- 赵鹏大, 陈永清, 张寿庭, 等. 2020. 大型-超大型矿床定量评价. 北京: 地质出版社
- 赵鹏大. 2015. 大数据时代数字找矿与定量评价. *地质通报*, 34: 1255–1259
- 周永章, 陈烁, 张旗. 2018. 大数据与数学地球科学研究进展. *岩石学报*, 34: 255–263
- 朱日祥, 范宏瑞, 李建威, 孟庆任, 李胜荣, 曾庆栋. 2015. 克拉通破坏型金矿床. 45: 1153–1168
- 朱日祥, 徐义刚. 2019. 西太平洋板块俯冲与华北克拉通破坏. *中国科学: 地球科学*, 49: 1246–1256
- 左仁广, 彭勇, 李童, 熊义辉. 2020. 基于深度学习的地质找矿大数据挖掘与集成的挑战. *地球科学*, 46: 350–358
- Bristol R S, Euliss N H, Booth N L, Burkardt N, Diffendorfer J E, Gesch D B, McCallum B E, Miller D M, Morman S A, Poore B S, Signell R P, Viger R J. 2012. Science strategy for core science systems in the U.S. geological survey, 2013–2023. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey
- Caumon G. 2010. Towards stochastic time-varying geological modeling. *Math Geosci*, 42: 555–569
- Caumon G, Collon-Drouaillet P. 2014. Special issue on three-dimensional structural modeling. *Math Geosci*, 46: 905–908
- Chen J F, Xie Z, Li H M, Zhang X D, Zhou T X, Park Y S, Ahn K S, Chen D G, Zhang X. 2003. U-Pb zircon ages for a collision-related K-rich complex at Shidao in the Sulu ultrahigh pressure terrane, China. *Geochem J*, 37: 35–46
- Cheng Q M, Oberhansli R, Zhao M L. 2020. A new international initiative for facilitating data-driven Earth science transformation. *Geol Soc London Spec Publ*, 499: 225–240
- Deng J, Yang L Q, Groves D I, Zhang L, Qiu K F, Wang Q F. 2020. An integrated mineral system model for the gold deposits of the giant Jiaodong province, eastern China. *Earth-Sci Rev*, 208: 103274
- Duan X, Zeng Q, Yang J, Liu J, Wang Y, Zhou L. 2014. Geochronology, geochemistry and Hf isotope of Late Triassic magmatic rocks of Qingchengzi district in Liaodong peninsula, Northeast China. *J Asian Earth Sci*, 91: 107–124
- Eldursi K, Chi G, Bethune K, Li Z, Ledru P, Quirt D. 2020. New insights from 2- and 3-D numerical modelling on fluid flow mechanisms and geological factors responsible for the formation of the world-class Cigar Lake uranium deposit, eastern Athabasca Basin, Canada. *Miner Depos*, doi: 10.1007/s00126-020-00979-5
- Goldfarb R J, Groves D I, Gardoll S. 2001. Orogenic gold and geologic time: A global synthesis. *Ore Geol Rev*, 18: 1–75
- Gray J, Szalay A. 2007. A transformed scientific method. Technical report. National Research Council-Computer Science and Telecommunications Board. Mountain view, California
- Hou M L, Jiang Y H, Jiang S Y, Ling H F, Zhao K D. 2007. Contrasting origins of late Mesozoic adakitic granitoids from the northwestern Jiaodong Peninsula, east China: Implications for crustal thickening to delamination. *Geol Mag*, 144: 619–631
- Houlding S W. 1994. 3D Geoscience Modeling-computer Techniques for Geological Characterization. Berlin: Springer-Verlag. 299–301
- Hronsky J M A, Kreuzer O P. 2019. Applying spatial prospectivity mapping to exploration targeting: Fundamental practical issues and suggested solutions for the future. *Ore Geol Rev*, 107: 647–653
- Hu H L, Fan H R, Liu X, Cai Y C, Yang K F, Ma W D. 2020. Two-stage gold deposition in response to H₂S loss from a single fluid in the Sizhuang deposit (Jiaodong, China). *Ore Geol Rev*, 120: 103450
- Huang L, Wang G, Carranza E J M, Du J, Li J, Zhou Z, Zhang Z, Wang H, Liu X, Peng Y, Gao F, Zhao X. 2020. Multi-scale numerical simulation and 3D modeling for deep mineral exploration in the Jiaojia gold district, China. *Nat Resour Res*, 29: 415–438
- Jordan M I, Mitchell T M. 2015. Machine learning: Trends, perspectives, and prospects. *Science*, 349: 255–260
- Kreuzer O P, Yousefi M, Nykänen V. 2020. Introduction to the special issue on spatial modelling and analysis of ore-forming processes in mineral exploration targeting. *Ore Geol Rev*, 119: 103391
- Li J W, Bi S J, Selby D, Chen L, Vasconcelos P, Thiede D, Zhou M F, Zhao X F, Li Z K, Qiu H N. 2012. Giant Mesozoic gold provinces related to the destruction of the North China craton. *Earth Planet Sci Lett*, 349–350: 26–37
- Li R, Wang G, Carranza E J M. 2016. GeoCube: A 3D mineral resources quantitative prediction and assessment system. *Comput Geosci*, 89: 161–173
- Li S, Zhao G. 2007. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Liaoji granitoids: Constraints on the evolution of the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji belt in the Eastern Block of the North China Craton. *Precambrian Res*, 158: 1–16
- Li S, Zhao G, Sun M, Han Z, Luo Y, Hao D, Xia X. 2005. Deformation

- history of the Paleoproterozoic Liaohe assemblage in the eastern block of the North China Craton. *J Asian Earth Sci*, 24: 659–674
- Li Z, Chen B. 2014. Geochronology and geochemistry of the Paleoproterozoic meta-basalts from the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton: Implications for petrogenesis and tectonic setting. *Precambrian Res*, 255: 653–667
- Liu L M, Zhao Y L, Sun T. 2011. 3D Computational shape- and cooling exploration of intrusion-related ore deposits. *Tectonophysics*, 526–529: 110–123
- Liu X, Fan H R, Evans N J, Yang K F, Danišik M, McInnes B I A, Qin K Z, Yu X F. 2017. Exhumation history of the Sanshandao Au deposit, Jiaodong: Constraints from structural analysis and (U-Th)/He thermochronology. *Sci Rep*, 7: 7787
- Liu J, Zhao G, Xu G, Sha D, Xiao C, Fang X, Liu F, Guo Q, Yu H. 2020. Structural control and genesis of gold deposits in the Liaodong Peninsula, northeastern North China Craton. *Ore Geol Rev*, 125: 103672
- Mallet J L. 1997. Discrete modeling for natural objects. *Math Geol*, 29: 199–219
- Mallet J L. 2002. Geomodeling. In: Isaaks E H, Srivastava R M, eds. *Applied Geostatistics*. New York, NY: Oxford University Press. 624
- Mejia P, Royer J J, Fraboulet J G, Zielińska A. 2015. 4D geomodelling: A tool for exploration—The Kupferschiefer in the Lubin Region, Poland. In: Weihed P, ed. *3D, 4D and Predictive Modelling of Major Mineral Belts in Europe*. 2015. Cham: Springer
- Meng E, Liu F L, Cui Y, Cai J. 2013. Zircon U-Pb and Lu-Hf isotopic and whole-rock geochemical constraints on the protolith and tectonic history of the Changhai metamorphic supracrustal sequence in the Jiao-Liao-Ji Belt, southeast Liaoning Province, northeast China. *Precambrian Res*, 233: 297–315
- Nielsen S H H, Cunningham F, Hay R, Partington G, Stokes M. 2015. 3D prospectivity modelling of orogenic gold in the Marymia Inlier, Western Australia. *Ore Geol Rev*, 71: 578–591
- Poulet T, Karrech A, Regenauer-Lieb K, Fisher L, Schaub P. 2012. Thermal-hydraulic-mechanical-chemical coupling with damage mechanics using ESCRIPTRT and ABAQUS. *Tectonophysics*, 526–529: 124–132
- Reichstein M, Camps-Valls G, Stevens B, Jung M, Denzler J, Carvalhais N, Prabhat N. 2019. Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science. *Nature*, 566: 195–204
- Roller J J, Mejia P, Caumon G, Collon P. 2015. 3D and 4D Geomodelling applied to mineral resources Exploration—An introduction. In: Weihed P, ed. *3D, 4D and Predictive Modelling of Major Mineral Belts in Europe*. Cham: Springer
- Russell H A J, de Kemp E A, MacCormack K E. 2019. Overview of geological survey organizations contributions on modelling approaches. In: MacCormack K E, Berg R C, Kessler H, Russell H A J, Thorleifson L H, eds. Chapter 3 in 2019 Synopsis of Current Three-Dimensional Geological Mapping and Modelling in Geological Survey Organizations. Alberta Energy Regulator/Alberta Geological Survey, AER/AGS Special Report 112. 7–18
- Spicer B, Morris B, Ugalde H. 2011. Structure of the Rambler Rhyolite, Baie Verte Peninsula, Newfoundland: Inversions using UBC-GIF Grav3D and Mag3D. *J Appl Geophys*, 75: 9–18
- Sun G, Zeng Q, Li T, Li A, Wang E, Xiang C, Wang Y, Chen P, Yu B. 2019. Ore genesis of the Baiyun gold deposit in Liaoning province, NE China: Constraints from fluid inclusions and zircon U-Pb ages. *Arab J Geosci*, 12: 299
- Tang J, Zheng Y F, Wu Y B, Gong B, Liu X. 2007. Geochronology and geochemistry of metamorphic rocks in the Jiaobei terrane: Constraints on its tectonic affinity in the Sulu orogen. *Precambrian Res*, 152: 48–82
- Wang G, Li R, Carranza E J M, Zhang S, Yan C, Zhu Y, Qu J, Hong D, Song Y, Han J, Ma Z, Zhang H, Yang F. 2015. 3D geological modeling for prediction of subsurface Mo targets in the Luanchuan district, China. *Ore Geol Rev*, 71: 592–610
- Wang Y, Yu B, Zeng Q, Guo W, Yang J, Meng Q. 2019. Petrogenesis and tectonic setting of the Wulong two-mica monzogranite on Liaodong Peninsula, NE China: Constraints from zircon U-Pb and Hf-O isotopic data. *Geochem J*, 53: 261–279
- Wang Y, Fei W, Lin W, Shi W, Yang L. 2018. (U-Th)/He thermochronology of metallic ore deposits in the Liaodong peninsula: Implications for ore field evolution in Northeast China. *Ore Geol Rev*, 92: 348–365
- Wang Z L, Yang L Q, Deng J, Santosh M, Zhang H F, Liu Y, Li R H, Huang T, Zheng X L, Zhao H. 2014. Gold-hosting high Ba-Sr granitoids in the Xincheng gold deposit, Jiaodong Peninsula, East China: Petrogenesis and tectonic setting. *J Asian Earth Sci*, 95: 274–299
- Weihed P. 2015. *3D/4D Predictive Modeling of Major Mineral Belts in Europe*. Cham: Springer
- Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, Zhang X O, Yang J H. 2005a. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. *Earth Planet Sci Lett*, 233: 103–119
- Wu F Y, Yang J H, Wilde S A, Zhang X O. 2005b. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of Jurassic granites in the Liaodong Peninsula, NE China. *Chem Geol*, 221: 127–156
- Wu F Y, Yang J H, Xu Y G, Wilde S A, Walker R J. 2019. Destruction of the North China Craton in the Mesozoic. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 47: 173–195
- Yang J H, Sun J F, Chen F, Wilde S A, Wu F Y. 2007a. Sources and

- petrogenesis of Late Triassic dolerite dikes in the Liaodong Peninsula, Implications for post-collisional lithosphere thinning of the eastern North China Craton. *J Petrol*, 48: 1973–1997
- Yang J H, Wu F Y, Wilde S A. 2003. A review of the geodynamic setting of large-scale Late Mesozoic gold mineralization in the North China Craton: An association with lithospheric thinning. *Ore Geol Rev*, 23: 125–152
- Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, Liu X M. 2007b. Petrogenesis of Late Triassic granitoids and their enclaves with implications for post-collisional lithospheric thinning of the Liaodong Peninsula, North China Craton. *Chem Geol*, 242: 155–175
- Yang L Q, Deng J, Wang Z, Guo L. 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. *Econ Geol*, 111: 105–126
- Yu B, Zeng Q, Frimmel H E, Qiu H, Li Q, Yang J, Wang Y, Zhou L, Chen P, Li J. 2020. The 127 Ma gold mineralization in the Wulong deposit, Liaodong Peninsula, China: Constraints from molybdenite Re-Os, monazite U-Th-Pb, and zircon U-Pb geochronology. *Ore Geol Rev*, 121: 103542
- Zhai M, Windley B F, Sills J D. 1990. Archaean gneisses, amphibolites and banded iron-formations from the Anshan area of Liaoning Province, NE China: Their geochemistry, metamorphism and petrogenesis. *Precambrian Res*, 46: 195–216
- Zhang L, Weinberg R F, Yang L Q, Groves D I, Sai S X, Matchan E, Phillips D, Kohn B P, Miggins D P, Liu Y, Deng J. 2020. Mesozoic orogenic gold mineralization in the Jiaodong Peninsula, China: A focused event at 120 ± 2 Ma during cooling of pregold granite intrusions. *Econ Geol*, 115: 415–441
- Zhang Z, Wang G, Ma Z, Carranza E J M, Jia W., Du J, Tao G, Deng Z. 2019. Batholith-stock scale exploration targeting based on multi-source geological and geophysical datasets in the Luanchuan Mo polymetallic district, China. *Ore Geol Rev*, 118: 103225
- Zhao G, Sun M, Wilde S A, Sanzhong L. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited. *Precambrian Res*, 136: 177–202
- Zhao G, Wilde S A, Cawood P A, Sun M. 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: Lithological, geochemical, structural and *P-T* path constraints and tectonic evolution. *Precambrian Res*, 107: 45–73
- Zhu R X, Yang J H, Wu F Y. 2012. Timing of destruction of the North China Craton. *Lithos*, 149: 51–60

(责任编辑: 陈华勇)