2026 年第 41 卷 第 5 期
2026,41(5):2494-2508
地球物理学进展 Progress in Geophysics
http://www.progeophys.cn
ISSN 1004-2903
CN 11-2982/P

刘会毅,牛峥,李长寿,等.2026.小秦岭巡马道断裂带阶梯式成矿规律及综合地球物理深部金矿定位研究.地球物理学进展,41(5):2494-2508,doi:10.6038/pg2026KK0067.

LIU HuiYi, NIU Zheng1, LI ChangShou, *et al*. 2026. Study on stepwise metallogenic regularity and deep gold ore location by integrated geophysical methods of Xunmadao Fault Zone in Xiaoqinling. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41(5):2494-2508,doi:10.6038/pg2026KK0067.

小秦岭巡马道断裂带阶梯式成矿规律及综合地球物理深部金矿定位研究

Study on stepwise metallogenic regularity and deep gold ore location by integrated geophysical methods of Xunmadao Fault Zone in Xiaoqinling

刘会毅[1],牛峥[1*],李长寿[2],常钰斌[1],刘晓龙[2],徐坤[1],程斌[1],王鹏[1],王飞[3]

LIU HuiYi[1], NIU Zheng[1*], LI ChangShou[2], CHANG YuBin[1], LIU XiaoLong[2], XU Kun[1], CHENG Bin[1], WANG Peng[1], WANG Fei[3]

1. 陕西地矿第二综合物探大队有限公司,西安 710016
2. 陕西地矿第六地质队有限公司,西安 710611
3. 陕西地矿创新研究院有限公司,西安 710054

1. *Shaanxi Geology and Mining Second Comprehensive Geophysical Prospecting Team Co., Ltd., Xi'an* 710016, *China*
2. *Shaanxi Geology and Mining Sixth Geological Team Co., Ltd., Xi'an* 710611, *China*
3. *Shaanxi Geology and Mining Innovation Research Institute Co., Ltd., Xi'an* 710054, *China*

摘 要 胶东地区依托理论创新建立“阶梯式成矿模型”,并成功应用于招平断裂带等深部勘查工作,取得重大找矿突破,为我国深部金矿勘查树立了典范.小秦岭是我国重要的黄金生产基地,但区内深部找矿工作长期进展缓慢.综合基础地质资料对比分析表明,小秦岭与胶东同处于华北克拉通边缘,二者宏观构造背景相似、多期次岩浆活动强烈,具备良好的深部找矿潜力.近年来,在陕西省地质勘查基金资助下,项目组开展了以综合物探技术为支撑的新一轮深部找矿工作,并取得重要进展.本文通过对重磁异常、广域电磁数据开展精细解译,查明小秦岭巡马道断裂深部构造与胶东地区具有高度相似性,整体呈现陡缓相间的阶梯式空间格局.依据“三位一体”找矿预测理论,判定断裂深部陡缓转换带为最优成矿部位,并圈定 4 处深部找矿靶区.后续深部钻探工程在预测靶区内成功揭露厚度 10 m、最高金品位 13.4 g/t 的蚀变岩型金矿体.本次研究证实巡马道断裂带存在阶梯式成矿规律,不仅实现

Abstract The stepwise metallogenic model established through theoretical innovation in the Jiaodong area has been successfully applied to deep exploration of the Zhaoping Fault Zone and other relevant areas. This work has achieved major prospecting breakthroughs and set a benchmark for deep gold exploration across China. As an important gold production base of the country, the Xiaoqinling area has long seen slow progress in deep prospecting activities. Comparative analysis of basic geological data indicates that both the Xiaoqinling and Jiaodong areas are located on the margin of the North China Craton. They share similar macroscopic tectonic settings and have undergone intense multi-stage magmatism, possessing great potential for deep gold mineralization. In recent years, funded by the Shaanxi Provincial Geological Exploration Fund, our project team has carried out a new round of deep prospecting supported by integrated geophysical techniques and made important progress. Through detailed interpretation of gravity-magnetic anomalies and wide-field electromagnetic data, this paper clarifies that the deep structure of the Xunmadao Fault in the Xiaoqinling area is highly similar to that in the Jiaodong area, showing an overall stepwise spatial pattern with alternating steep and gentle fault segments. Guided by the Trinity prospecting prediction theory, the deep steep-gentle transition zones of the fault are identified as the

收稿日期 2026-02-13; **修回日期** 2026-07-17. **投稿网址** http://www.progeophys.cn

基金项目 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项(2025ZD1009200)、陕西省地质勘查基金项目(61201707319)、陕西地矿集团有限公司科研专项资金项目(KY202501)和陕西省省级国有资本经营预算科技创新专项资金项目(2023-035)联合资助.

第一作者简介 刘会毅,男,1985 年生,硕士,高级工程师,主要从事综合地球物理找矿研究.E-mail:306617219@qq.com

***通讯作者** 牛峥,男,1982 年生,硕士,正高级工程师,主要从事综合地球物理方法研究.E-mail:22596952@qq.com

了区域深部找矿突破,也为同类构造区的地质研究与矿产勘查提供参考.

关键词 阶梯式成矿;蚀变岩型金矿;深部找矿;综合地球物理;小秦岭

中图分类号 P631

文献标识码 A

doi:10.6038/pg2026KK0067

CSTR:32085.14.pg2026KK0067

optimal metallogenic positions, and four deep prospecting targets are delineated accordingly. Subsequent deep drilling has successfully revealed altered rock-type gold orebodies within the predicted targets, with a true thickness of 10 meters and a maximum gold grade of 13.4 g/t. This study verifies the existence of the stepwise metallogenic regularity in the Xunmadao Fault Zone. The findings not only realize a major breakthrough in regional deep gold prospecting, but also provide a valuable reference for geological research and mineral exploration in areas with similar tectonic features.

Keywords Stepwise metallogenesis; Altered rock type gold deposit; Deep prospecting; Integrated geophysics; Xiaoqinling

0 引 言

胶东地区通过理论创新构建“阶梯式成矿模型”(宋明春等,2012),在招平断裂带等区块深部勘查中取得重大找矿突破,为我国深部金矿勘查树立了典范.因此,借鉴胶东成熟的深部找矿经验,针对性开展小秦岭地区深部金矿找矿研究,既能为小秦岭资源突破提供科学支撑,也对缓解国内黄金资源供给压力、筑牢资源安全屏障有重要意义.

小秦岭金矿勘查与研究起步较早,早期聚焦浅部石英脉型矿体,围绕矿体特征、成矿条件等开展系统研究,积累了多维度地质资料(张启等,2010;汪道东等,2012;张欢欢等,2013;刘云华等,2015;陈虹等,2021),为该区深部勘查研究奠定了良好基础.但近年来,区内深部找矿仅取得零星进展(冯建之等,2009;谭兴华等,2012;卢耀东等,2013;苏全民,2016),受全域系统性综合物探工作缺失制约,找矿仍局限于传统石英脉型金矿,未能摆脱“就脉找脉”的固有模式,在找矿空间拓展与找矿类型创新上均未实现实质性突破,难以满足当前深部资源勘查的规模化、精准化需求.

2019 年以来,在陕西省地质勘查基金的支持下,项目团队开展了以综合物探技术为核心的深部地质结构及隐伏矿体探测工作.本次研究整合重力、磁法、广域电磁等多种技术手段,不仅有效拓宽了深部找矿空间,还在非传统石英脉型金矿勘查领域实现重要突破,为小秦岭金矿深部资源勘探开辟了新方向.

本次研究以解析小秦岭深部地质结构和开展深部找矿预测为核心,主要研究内容分为三部分:一是以胶东、小秦岭两大金矿集区为重点研究对象,系统对比两者在大地构造背景、构造-岩浆活动、矿化类型等关键地质条件的异同,厘清小秦岭深部成矿的共性与独特属性,为后续深部找矿研奠定区域地质基础.二是在完成小秦岭地区面积性重磁勘查成果上,对重、磁、广域电磁综合剖面资料开展精细解译.研究查明小秦岭巡马道断裂深部结构,并发现其与胶东地区构造格局存在相似性,据此判断阶梯式成矿模型在小秦岭地区具备应用条件;进一步结合区域地质特征与已有矿化线索,运用“三位一体”找矿预测理论(叶天竺等,2014;严光生等,2023)和胶东“阶梯式成矿模型”,圈定深部成矿有利靶区.三是布设钻探工程对预测靶区进行工程验证,检验找矿预测成果的科学性与有效性.最终形成“理论指导—数据支撑—预测圈定—工程验证”的完整研究体系,为小秦岭深部金矿资源勘探提供可靠的技术路径与实践方案.

1 胶东地区深部金矿成矿模式与找矿经验

胶东地区深部金矿找矿研究成果丰硕.“阶梯式成矿模型”揭示了构造形态和矿化分布的阶梯式特点(宋明春等,2012;宋明春,2015);“第二富矿空间”理论则指出在深部存在新的富矿区域.这些理论在实践中成功指导了胶东深部超大型金矿床的发现,为其他地区深部找矿提供了宝贵经验(宋明春等,2020;张水金,2016).

1.1 胶东地区地质背景与成矿条件

胶东地区处于华北克拉通与扬子克拉通的碰撞造山带北侧及欧亚板块边缘的岩浆活动带上(见图 1),位于郯庐岩石圈断裂的东侧,是太平洋金环的组成部分.这样一种特殊的大地构造背景为金矿的形成提供了有利条件(伊丕厚和宋明春,2008).

胶东金矿床主要受区域性深大断裂及其次级断裂控制,控矿构造型式或位置主要有:断裂的拐弯部位、断裂倾角变化部位、断裂交汇部位、入字型构造、帚状构造、菱形结环和雁列构造等.赋矿地质体主要为侏罗纪玲珑型花岗岩、白垩纪郭家岭型花岗岩和新太古代—古元古代变质岩系.主要金矿化类型为

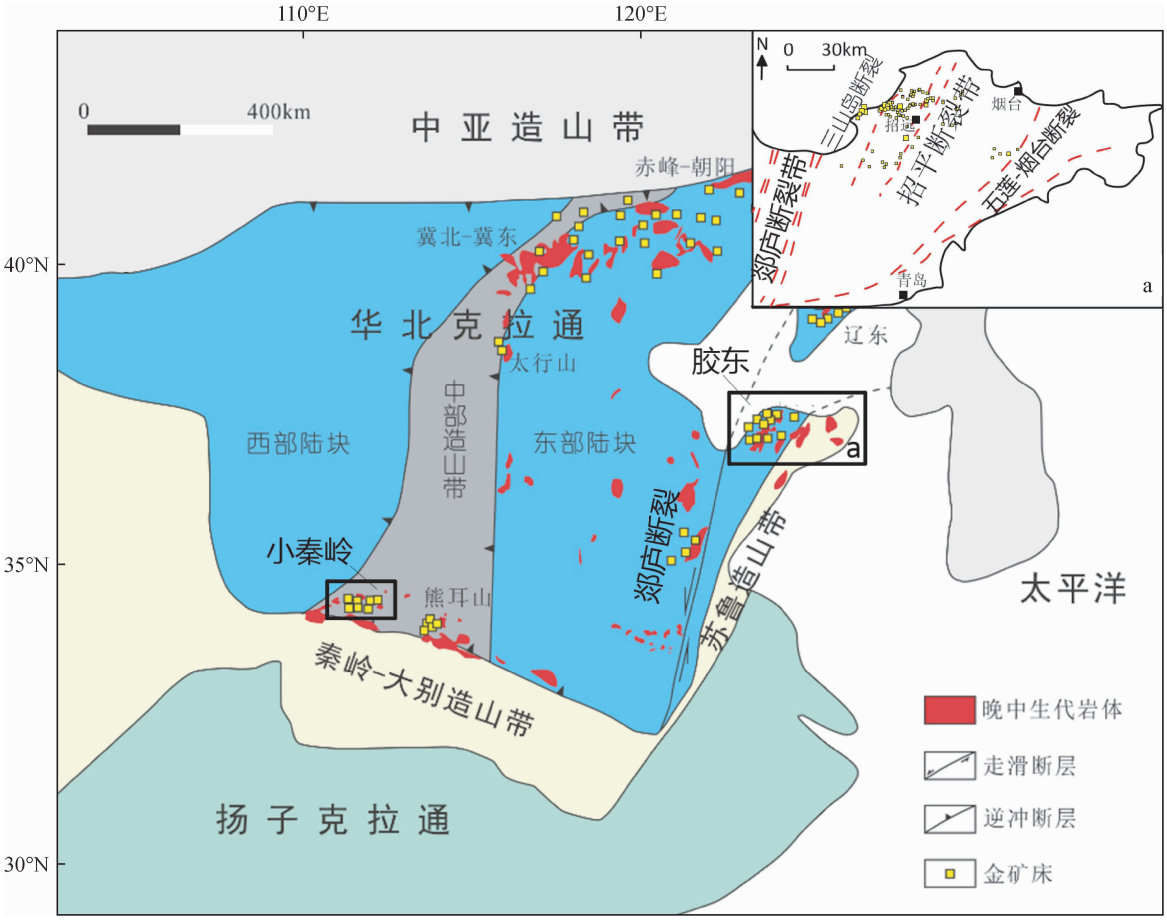


图 1 华北克拉通及周边构造简图(据朱日祥等,2015;韦星等,2025 修改)

Fig. 1 Schematic map of the North China Craton and its surrounding structures (after Zhu *et al*., 2015; Wei *et al*., 2025)

破碎带蚀变岩型,其次为石英脉型和硫化物石英脉型(宋明春等,2018). 胶东地区经历了多期构造-岩浆活动,岩浆岩分布广泛. 岩浆活动为成矿提供了充足的热源和物质来源,岩浆岩与金矿成矿在时间和空间上存在密切关联,多期构造-岩浆活动的叠加作用,进一步促进了矿质的富集(于晓卫等,2023;王来明等,2024).

1.2 “阶梯式成矿模式”理论

“阶梯式成矿模式”的核心内涵在于,矿体的分布和构造形态呈现出阶梯式的特点. 随着深度的增加,构造形态发生有规律的变化,矿化分布也相应地呈现出阶梯状分布特征. 这种模型打破了传统认为矿化仅在浅部集中分布的认知(宋明春等,2012;宋明春,2015). 认为金矿在倾斜方向上主要沿控矿断裂倾角变化的平缓部位和陡、缓转折部位富集,构成“阶梯式”分布型式,在胶东地区已探明和开采的浅部金矿(第一台阶)之下还会有第二、第三个成矿台阶(宋明春等,2013).

阶梯式成矿模式产生的主要机理是:断裂陡倾段为开放空间,顶部压力小,成矿流体沿断裂运移时向上逸散速度快,不宜沉淀成矿;断裂缓倾段,为相对封闭空间,顶部围岩压力大,流体横向逸散速度慢,宜沉淀成矿(周新华等,2003). 因此,矿体主要赋存于断裂缓倾段和陡、缓转折部位,构成了金矿的阶梯式分段富集(宋明春等,2013)(图 2).

小秦岭地区石英脉型金矿也表现出相似成矿规律. 以 S60 矿化蚀变带为例,其含矿性与断裂倾角密切相关:在垂向呈“S”形展布的韧脆性剪切带内,矿体多赋存于倾角变缓部位(图 3)(孙卫志等,2013).

1.3 小秦岭与胶东地质特征对比研究

小秦岭与胶东是产出在不同构造环境中的两大造山型金矿省:胶东金矿归属于增生型造山作用产物,小秦岭金矿则形成于碰撞型造山环境(蒋少涌等,2009). 构造格局上,胶东以近东西向、北西向伸展构造为主,受古太平洋板块向欧亚大陆下的西俯冲控制(侯爵等,2022);小秦岭构造演化表现为早期近南北向挤压、晚期张扭伸展的转变过程,构造与

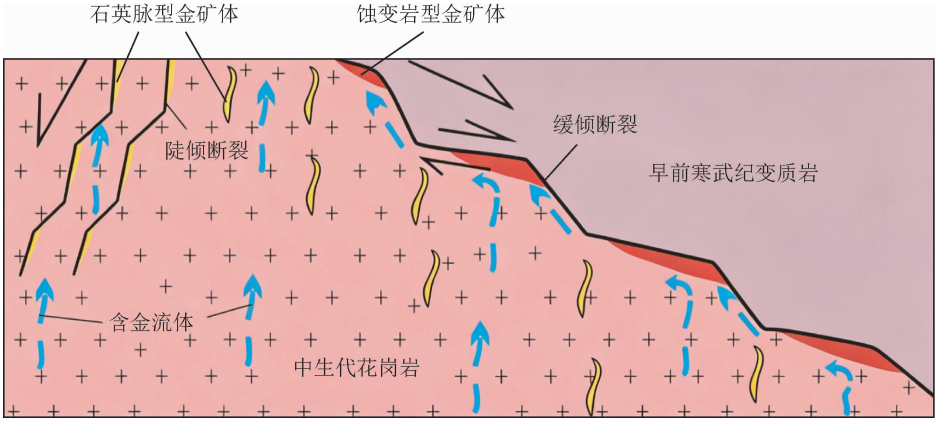


图 2 深部金矿的阶梯成矿模式(宋明春等,2020)

Fig. 2 A step metallogenetic model of deep-seated gold deposit (Song *et al*., 2020)

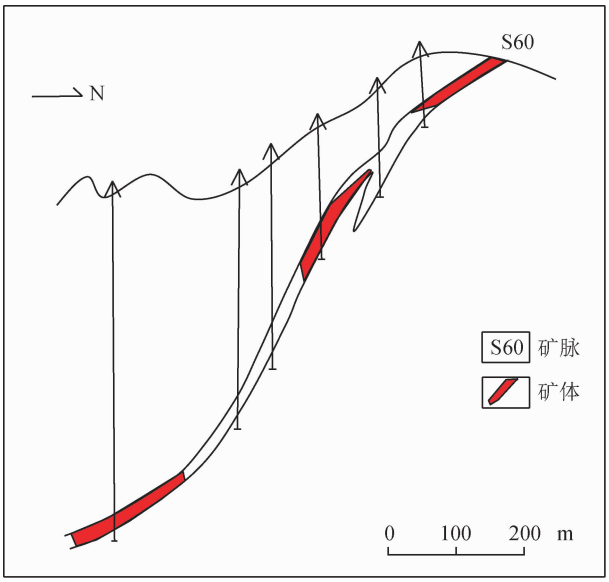


图 3 小秦岭地区 S60 矿脉倾角变化与矿化强度对比示意图(孙卫志等,2013)

Fig. 3 Schematic comparison of dip angle variation and mineralization intensity of vein S60 in the Xiaoqinling area (Sun *et al*., 2013)

成矿受板块俯冲远程效应及秦岭造山带陆内演化叠加影响(王义天等,2002;程顺有等,2003;张国伟等,1997). 两地燕山期岩浆岩类型、活动期次与形成年代均存在差异(毛景文等,2005;张进江等,2003),但综合区域成矿背景(图 1)可知,二者在构造演化历程和成矿地质条件上表现出高度相似性.

(1)具有统一的板块构造演化背景

两者同位于华北克拉通周缘,其成矿过程均受控于华北克拉通的多阶段构造演化. 研究区先后经历了华北克拉通基底形成、扬子克拉通与华北克拉通碰撞拼合等重大构造事件,晚中生代古太平洋板块俯冲又引发大规模克拉通活化. 一系列深部构造运动重塑了区域地壳结构,驱动成矿物质活化、迁移,为两大矿集区金矿的形成奠定了统一的板块构造基础(翟明国,2010, 2019;陈衍景等,2009).

(2)控矿断裂系统的主导作用

两地均发育规模宏大的断裂构造,也是制约金矿空间分布的核心要素. 胶东金矿床主要受 NNE—近 SN 走向的断裂控制(图 1a),大断裂控制了金矿床的带状分布. 三山岛、焦家、招平、陡崖—台前、金牛山 5 条断裂控制了胶东的主要金成矿带和大中型金矿床,断裂经历了挤压-拉张-剪切多期构造活动,断裂沿走向的拐弯部位、沿倾向的倾角变化部位、次级断裂发育部位等是成矿的有利部位(宋明春等,2022a, b).

小秦岭主要构造格架由轴向近东西的复式褶皱和区域性太要—故县断裂及巡马道—小河断裂组成(图 4),且广泛发育受边界深大断裂控制的脆—韧性断裂构造,它们控制了小秦岭地区金矿床的产出与分布(栾世伟等,1985;冯建之等,2009). 蚀变碎裂岩型金矿主要产于巡马道-小河拆离断层带内(王义天和毛景文,2002).

(3)晚中生代岩浆活动的成矿贡献

晚中生代岩浆岩体在两区广泛出露,为成矿提供了物质来源与热动力条件. 胶东中生代岩浆岩分成三期:①燕山早期的玲珑型和滦家河型花岗岩(晚侏罗世,160 ~ 135 Ma),以深成侵位的、大的花岗岩岩基为主;②燕山中期早白垩世(135 ~ 95 Ma),不仅包括了郭家岭型和艾山型花岗闪长岩,而且还包括了早白垩世的青山群火山岩-次火山

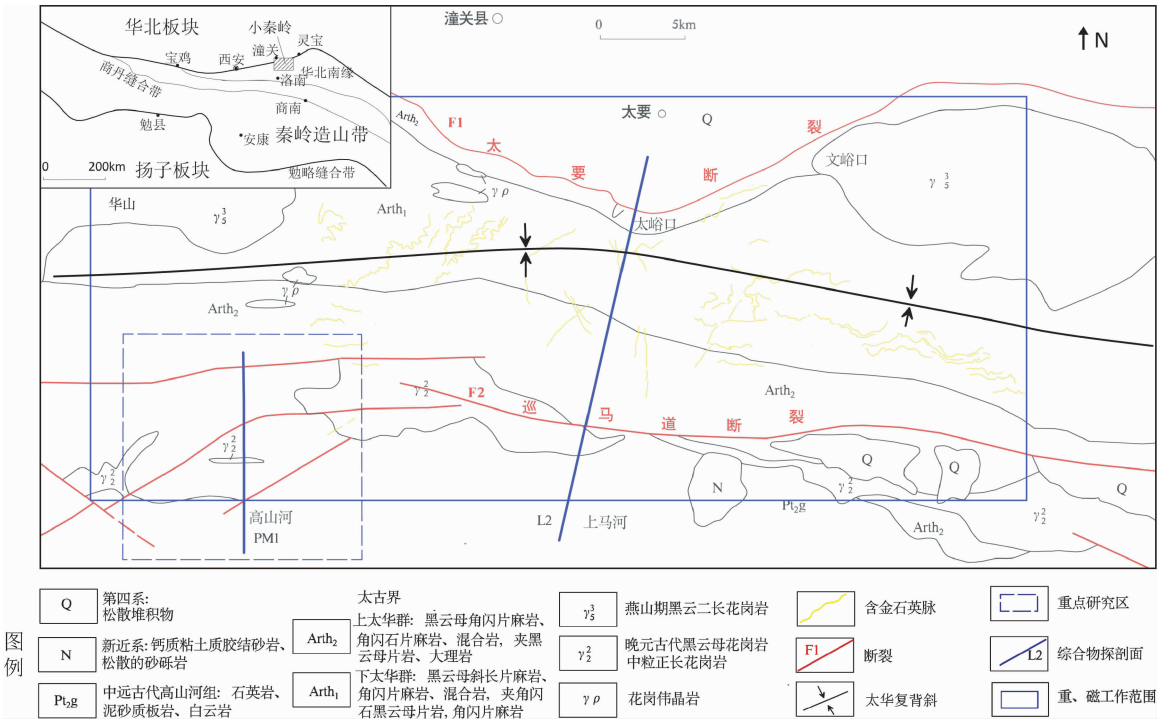


图 4 小秦岭地区地质构造略图

Fig. 4 Sketch geological map of the Xiaoqinling area

岩,以及大量的高钾基性-中性脉岩,本期的中性岩-基性岩较多;③燕山晚期(晚白垩世,95 ~ 65 Ma)主要指崂山型碱性花岗岩和一些高钾基性-中性脉岩(刘建明等,2001).

小秦岭地区同期岩浆活动以中酸性黑云母二长花岗岩为主,活动期次相对简单,主要形成于晚侏罗世至早白垩世早期(160 ~ 140 Ma). 其中,老牛山岩体的^{40}Ar-^{39}Ar 年龄为 143 Ma(卢欣祥等,1999);华山岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 146 ± 15 Ma;文峪岩体和娘娘山岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果分别为 138.4 ± 2.5 Ma 和 141.7 ± 2.5 Ma(毛景文等,2005). 尽管不同岩体的岩浆演化细节存在差异,但小秦岭与胶东地区的成矿机理具有一致性,受控于统一的地球动力学背景(蒋少涌等,2009;毛景文等,2005).

综上所述,依托胶东地区成熟的成矿理论与深部探测技术,能够对地质背景相似的小秦岭地区深部找矿工作形成有效指导.

2 小秦岭深部金矿找矿地质基础与成矿条件分析

2.1 小秦岭区域地质背景

小秦岭位于华北陆块南缘、秦岭造山带北缘,中生代以前隶属于华北克拉通,具备典型的克拉通边缘地质特征(赵振华和涂光炽,2003). 区内断裂构造十分发育,对金矿的形成与空间分布具有显著控制作用(白和,2003).

小秦岭地区多期构造-岩浆活动特征显著,不同期次构造运动与岩浆侵入作用相互叠加. 岩浆活动为成矿提供物质与能量来源,构造活动则为成矿流体运移、矿质沉淀创造了有利条件;多期活动叠加进一步促进矿质富集(冯建之等,2009).

潼关小秦岭地区出露的最主要古老地层为太华群. 区域上北侧以太要断裂带与汾渭盆地分界,南侧以巡马道断裂带毗邻小河岩体带,东、西两侧分别以断层分隔华山岩体与文峪岩体. 太华群整体被区域性断裂带围限,这些断裂界定了潼关小秦岭金矿集区的范围. 区内金矿床空间展布与背斜构造形态相吻合,背斜整体控制金矿床(矿点)的产出位置;含金石英脉及金矿体多沿背斜派生断层系充填就位,这类次级断层作为主要容矿构造,控制着单个矿体的形态与产状. 综上,区域深大断裂、褶皱及褶皱派生断层系,分别在不同层级上控制着金矿集区、矿床(矿点)、矿体(含金石英脉),三者控矿关系对应明确(图 4)(张欢欢等,2018;文月贵等,2019;倪云鹏

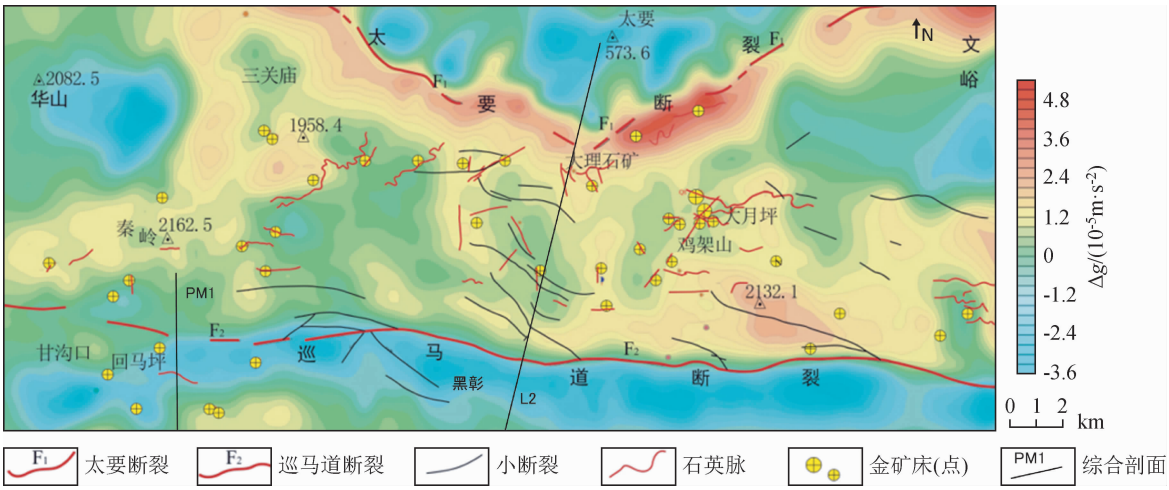


图 5 小秦岭地区 1∶5 万剩余布格重力异常图(郑向光等,2020)

Fig. 5 1∶50000 Residual bouguer gravity anomaly map of the Xiaoqinling area (Zheng *et al.*,2020)

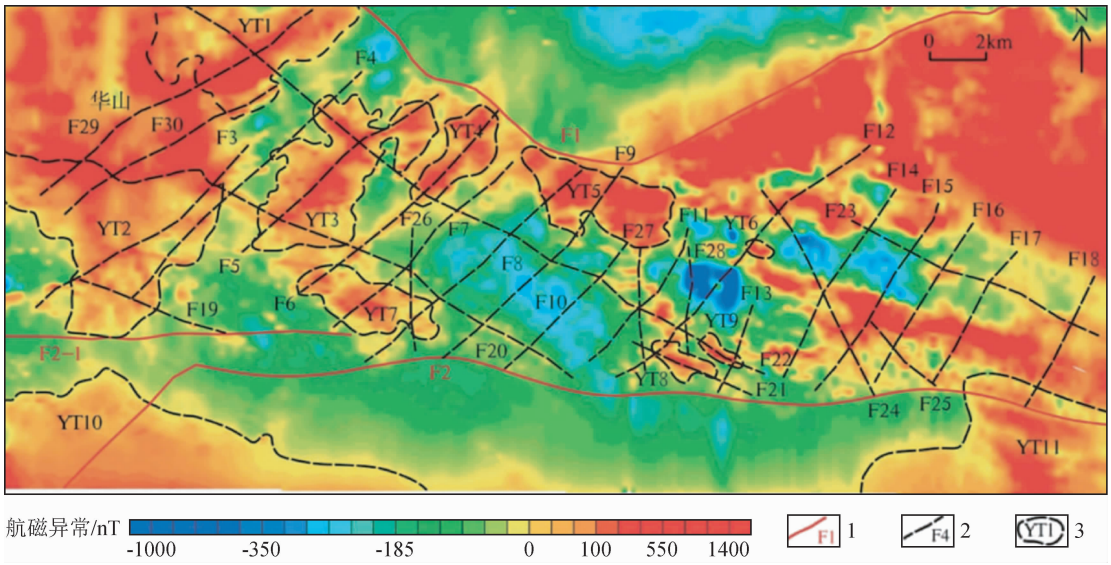


图 6 小秦岭地区推断隐伏岩体和隐伏断裂位置图(刘晓龙等,2020)

1. 已知区域断裂位置及编号;2. 推测隐伏断裂位置及编号;3. 推测隐伏岩体位置及编号.

Fig. 6 Map of inferred buried rock masses and buried faults in the Xiaoqinling area (Liu *et al.*,2020)

1. Location and number of known regional faults;2. Location and number of inferred buried faults;
3. Location and number of inferred buried rock masses.

等,2019).

2.2 小秦岭深部成矿潜力地球物理证据

(1)小秦岭地区重力异常特征与控矿关系

夹持于太要断裂与巡马道断裂之间的太华地体,是小秦岭石英脉型金矿的核心产区,已发现多处大型金矿. 从重力场特征来看(图 5),该区域存在相对重力低异常,且已知矿体多集中在重力低向重力高的过渡带;结合 1∶25000 航磁测量成果(图 6),依据物性资料(表 1),测区内共解译出 11 个隐伏岩体. 这些隐伏岩体上部及邻近地区大多赋存金矿床,属于强的成矿区,这些隐伏岩体是提供金等成矿物质的母岩体(刘晓龙等,2020).

巡马道断裂南侧发育一条狭长展布的重力低异常带,这一重力场响应特征与典型拆离系统的异常表现存在显著差异. 常规拆离系统对应的重力异常多以宽缓梯级带为主要特征,据此可初步判断,该断

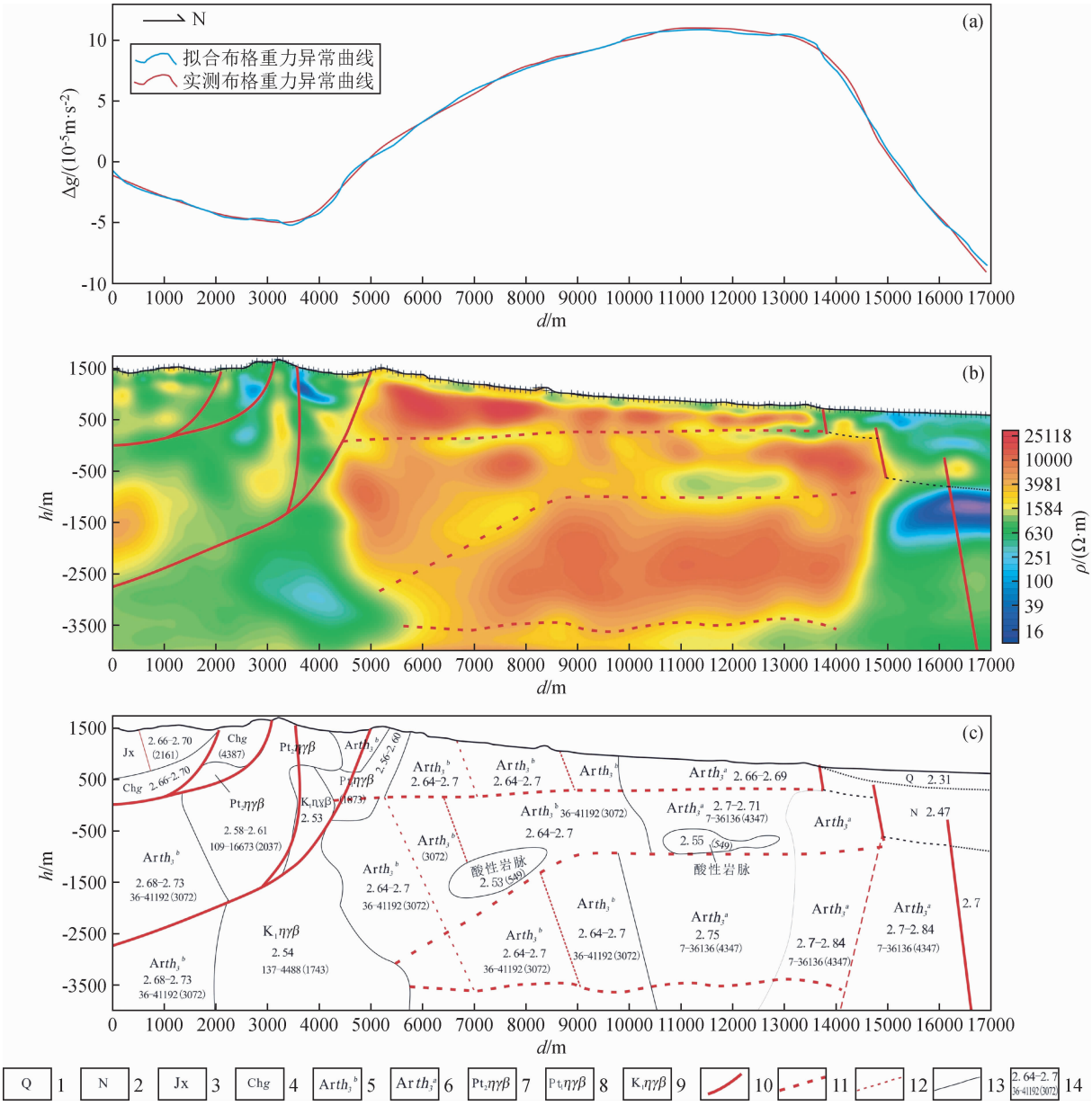


图 7 黑彰—太要 L1 剖面重磁电综合地质解释图(郑向光等,2020)

1-第四系;2-新近系;3-蓟县系巡检司组;4-长城系高山河组;5-太华群上亚群二段;6-太华群上亚群一段;7-晋宁期二长花岗岩;8-熊耳期二长花岗岩;9-推测的燕山期侵入岩;10-区域性断裂;11-推测隐伏构造;12-推测断裂;13-地层界限;14-地质体密度(g/cm³)及电阻率(Ω·m).

Fig. 7 Comprehensive geophysical interpretation map of gravity, magnetic and electrical methods for section L1 of Heizhang—Taiyao (Zheng *et al*., 2020)

1-Quaternary; 2-Tertiary; 3-Xunjiansi formation of Jixian system; 4-Gaoshanhe formation of Changcheng system; 5-the second upper subgroup of the Taihua group; 6-the first upper subgroup of the Taihua group; 7-Jinning adamellite; 8-Xiongerian adamellite; 9-inferred Yanshan ianintrusive rocks; 10-regional faults; 11-speculated concealed structure; 12-presumed fracture; 13-stratigraphic boundary; 14-geological bulk density (g/cm³) and resistivity (Ω·m).

裂并非由简单的拆离构造系统构成.综合重力异常特征与广域电磁剖面揭示的地下电性结构分析(图 7),巡马道断裂本质上是一组由多条断裂相互叠加复合形成的复杂断裂构造体系.

对照已有地质资料进一步梳理,这套构造体系对区内多期次岩浆岩带的发育具有控制作用,研究区段内岩浆岩的空间展布与该构造体系成因关联紧密,岩浆岩带的整体分布规律明显受其制约.

祁进平等对小秦岭金矿田的研究表明,其矿床、岩体和断裂构造的空间分布及成矿流体的运移方向等,均清晰指向沿巡马道断裂的向北陆内俯冲作用,这一作用过程导致了小秦岭地区复杂断裂系统的形成,并控制着岩浆岩带的空间分布,成为矿床形成的关键驱动因素,进而提出了"小秦岭主要金矿属于典型造山型金矿"的观点(祁进平等,2002). 这些研究成果进一步印证了巡马道断裂的复杂性及其对成矿作用过程控制的重要性. 表 1 为地质单元密度、电阻率、磁化率参数.

表 1 地质单元密度、电阻率、磁化率参数汇总表

Table 1 Summary of density, resistivity and magnetic susceptibility parameters of geological units

地质单元	样本数	密度(g/cm^3)		电阻率(Ω·m)		磁化率($10^{-6}4\pi$ · SI)	
		范围	常见值	范围	常见值	范围	常见值
全区	1687	2.45 ~ 3.16	2.63	7 ~ 59729	4476	0.2 ~ 34994	11.5
长城系高山河组	108	2.52 ~ 2.82	2.63	237 ~ 57012	4387	0.2 ~ 2493	6
太华群上亚群二段	317	2.55 ~ 3.13	2.69	36 ~ 41192	1885	6.3 ~ 34980	104
太华群上亚群一段	484	2.49 ~ 3.12	2.73	7 ~ 36136	4347	4.1 ~ 28417	338
太华群中亚群	101	2.52 ~ 3.08	2.63	250 ~ 46950	12652	5.9 ~ 32493	3172
太华群下亚群	134	2.57 ~ 3.16	2.63	101 ~ 19274	3059	3.5 ~ 34994	12.9
华山岩体	59	2.49 ~ 2.73	2.6	33 ~ 9486	3820	17.5 ~ 4666	1136
文峪岩体	36	2.51 ~ 2.65	2.61	137 ~ 4488	2068	928.7 ~ 4084	1456
晋宁期二长花岗岩	120	2.45 ~ 2.74	2.59	109 ~ 16673	2037	2 ~ 5516	13.5
熊耳期二长花岗岩	45	2.51 ~ 2.7	2.58	181 ~ 6425	2474	6 ~ 5466	8.4
酸性岩脉	126	2.51 ~ 2.7	2.59	139 ~ 23047	549	1 ~ 10123	7.5
基性岩脉	69	2.67 ~ 3.09	2.88	164 ~ 59729	4477	44.2 ~ 11959	118

(2)巡马道断裂特征与蚀变岩型金矿关系

从洛南县黑彰村至潼关县太要镇的重磁电综合剖面来看(图 7),南部的巡马道断裂结构复杂,其波及范围可达 2 ~ 3 km. 在深部标高 -2500 ~ -3500 m 处,存在一定规模低阻体;根据重力剖面拟合,该低阻体对应的密度为 2.54 g/cm^3,比地表晋宁期岩体 2.56 ~ 2.61 g/cm^3 的密度更低,推测该低密度体可能与燕山期侵入岩体有关. 图中还可看出,巡马道断裂带具有较大规模,由 2 组 4 支组成,浅部较陡深部变缓,呈"铲式"的结构特征,具有逆冲推覆的特点,为前述祁进平等关于巡马道断裂认识提供了地球物理依据.

在巡马道断裂西段高山河一带,已发现多处蚀变岩型金矿,黎世美等曾将其定义为"葫芦沟式构造破碎带蚀变岩型金矿",并认为本区构造破碎蚀变岩型金矿沿巡马道断裂分布的特征,与太古宙花岗岩-绿岩带的形成、演化历史及后期多次构造热事件有着密切的关系(黎世美等,1996).

长期以来,小秦岭地区的石英脉型金矿以品位高、规模大而备受关注,相比之下,蚀变岩型金矿因品位低、规模小,未引起足够重视. 随着胶东地区在蚀变岩型金矿找矿方面取得的突破,为小秦岭地区的找矿工作提供了新的思路. 前期已发现的葫芦沟金矿,正是小秦岭地区存在胶东模式蚀变岩型金矿的有力证据和重要线索.

如今,巡马道断裂带不断发现蚀变岩型矿化线索(倪荣辉等,2025),且蚀变岩型矿化与深部成矿有着密切的联系. 这一发现直接指示深部可能存在胶东式成矿结构,进一步表明沿巡马道断裂深部仍具有较大的找矿潜力(高永宝等,2026),为该地区的矿产勘探开辟了新的方向.

3 小秦岭巡马道断裂带深部找矿技术应用与突破

3.1 精细化地球物理探测

在高山河预测靶区,通过重、磁、广域电磁测量及钻探工程等手段对该地段的巡马道断裂进行了精细化解剖(剖面位置见图 8). 完成了长度 8 km,点

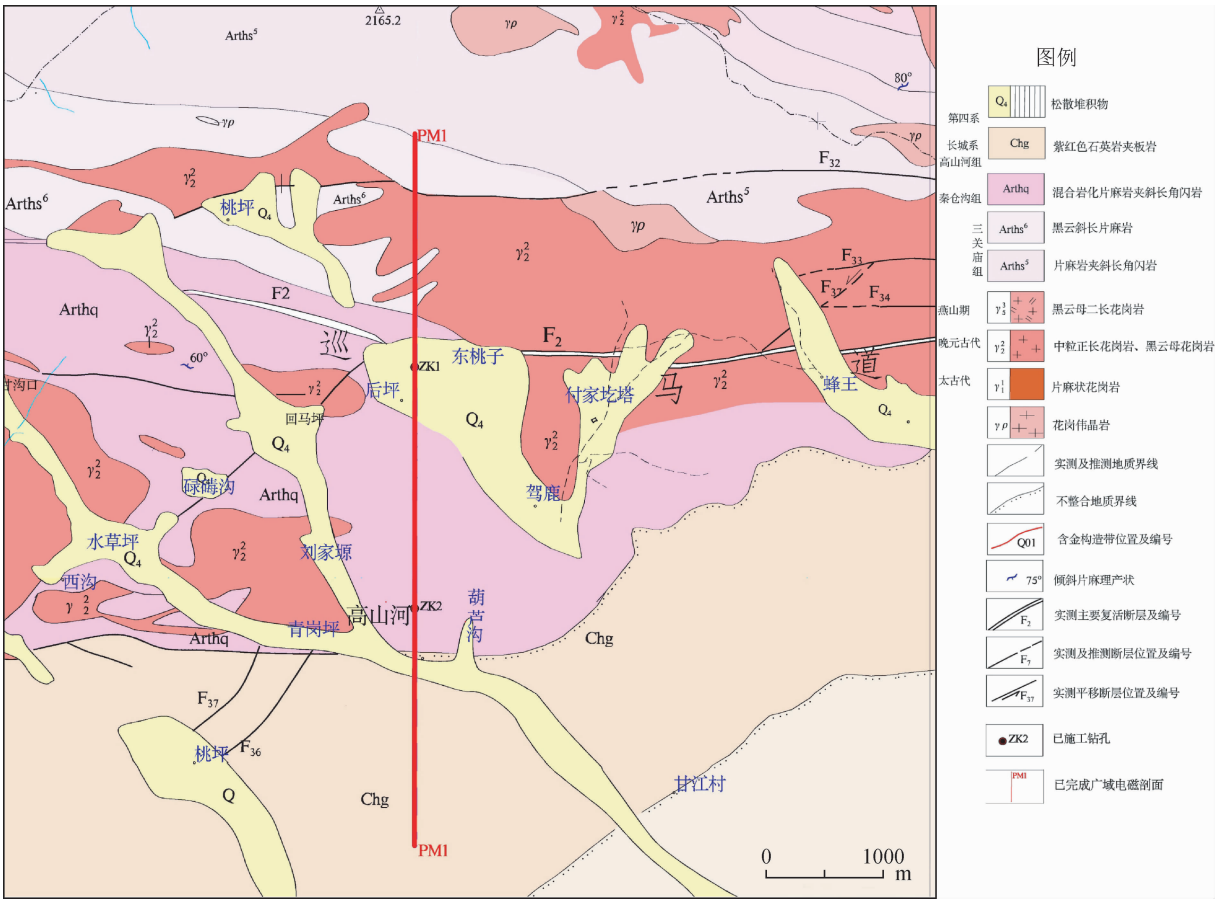


图 8 高山河重点找矿靶区地质图

Fig. 8 Geological map of Gaoshanhe key prospecting target area

距 40 m,重点地段加密到 20 m 的综合剖面. 探测成果直观呈现了巡马道断裂在该地段的深部地质结构特征(见图 9).

(1)地球物理特征

从布格重力异常来看,重力场呈现出鲜明的"南北高、中间低"的特征,中部低重力异常区与南、北两端的差值可达 8×10^{-5} m/s^2. 其中,南部异常带形态宽缓,梯度变化平缓,推测与沉积盖层(高山河组)和结晶基底(太华群)的平缓展布有关;而北部异常带梯度陡峭,重力值由南向北快速抬升,这种强烈的重力梯度带是巡马道断裂的直接地球物理响应. 中部低重力异常的核心区,岩石密度显著低于周边围岩,推断与隐伏岩体有关,与 L2 剖面推测结果基本一致(图 5).

从磁异常特征来看,剖面全域磁场背景稳定,以弱磁场为主;局部异常梯度陡变,正负异常相伴产出,异常波动区间为 -150 ~ 200 nT. 磁场的分异特征与构造活动息息相关. SB3、KS8 矿化蚀变带对应的磁异常尤为显著,说明局部磁扰动是构造与流体蚀变的综合响应. 据此判断,巡马道断裂曾遭受强烈的后期热液活动改造,进一步印证研究区具备有利的成矿条件与找矿潜力.

广域电磁测深结果显示,区域地层呈现整体高电阻率背景,视电阻率值普遍大于 3000 Ω·m,这与太古代太华群深变质岩(片麻岩、混合岩)和新元古代—古生代盖层浅变质岩(长城系白云岩、大理岩)的高阻特性一致. 在剖面中部,浅层(埋深 0 ~ 1000 m)发育带状低阻异常,视电阻率值在 $n\times10^1 \sim n\times10^2$ Ω·m 之间,且沿走向连续性强,呈条带状展布,推测为断裂带内的破碎蚀变带——破碎带内的裂隙水充填和矿物蚀变降低了岩石电阻率;低阻异常向南侧深部(1000 ~ 3500 m)延伸并逐渐收敛汇聚,反映断裂带向深部延伸. 根据重力异常拟合结果,剖面中部深层(埋深 2500 ~ 3500 m)团块状低阻体密度为 2.58 g/cm^3,推测该深部低阻-低密度体为燕山期岩浆侵入形成的隐伏岩体.

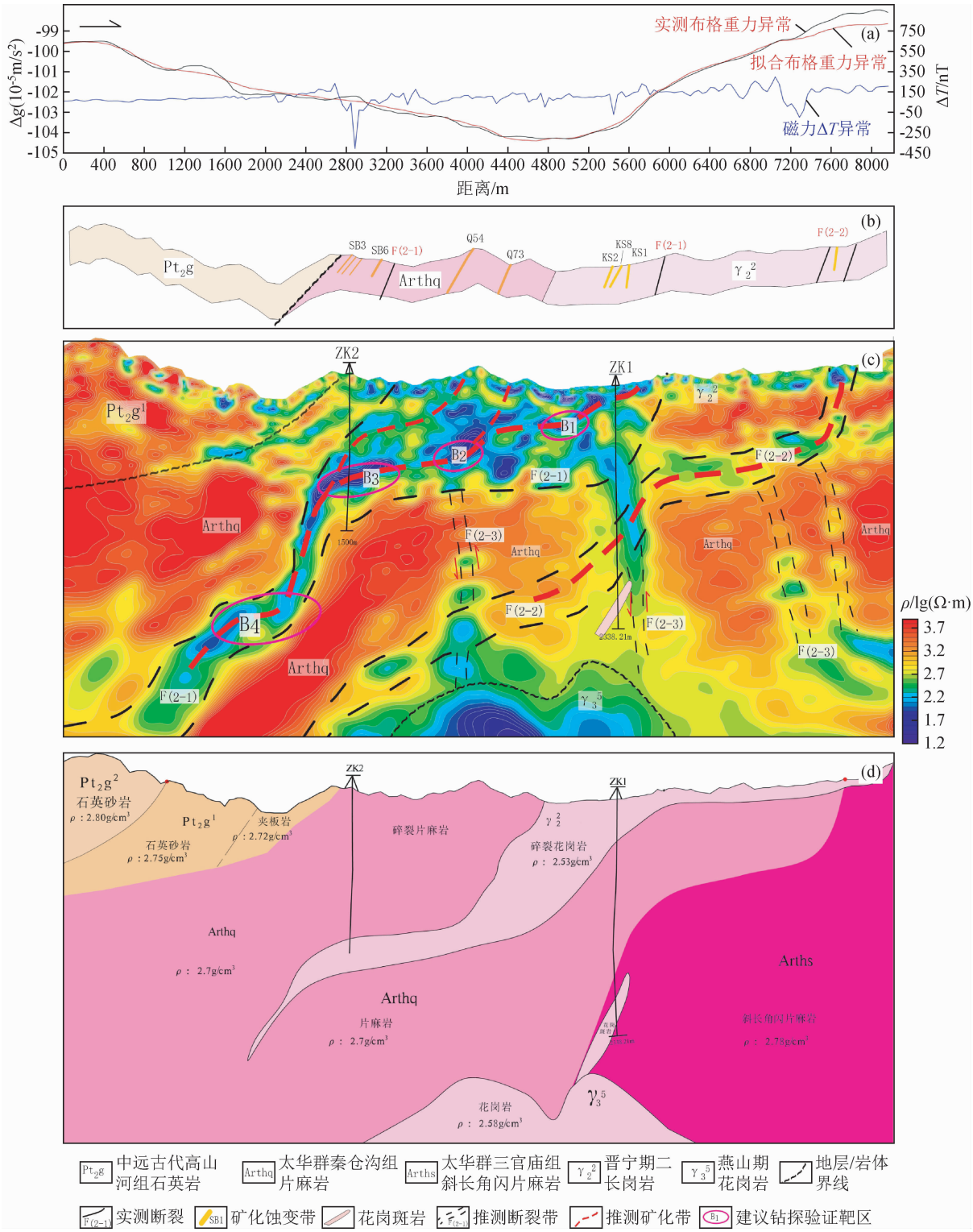


图 9 洛南县高山河一带 PM1 线综合地球物理地质解释图

(a)重磁异常剖面;(b)地质剖面;(c)广域电磁视电阻率反演及综合解释断面;(d)重力 2.5D 反演模型.

Fig. 9 Comprehensive geophysical and geological interpretation profile of line PM1 in Gaoshanhe area, Luonan county

(a) Gravity and magnetic anomaly profile; (b) Geological profile; (c) Apparent resistivity inversion and comprehensive interpretation section of wide-field electromagnetic method; (d) 2.5D gravity inversion model.

(2)构造系统识别

基于广域电磁视电阻率二维反演断面图,可清晰识别出巡马道断裂带的三级构造系统,分别为主断裂 F2-1、北枝断裂 F2-2 及早期基底断裂 F2-3. 其中,主断裂 F2-1 贯穿整条剖面,是控制区域构造格局的核心断裂;北枝断裂 F2-2 为主断裂派生构造,与 F2-1 近平行展布;早期断裂 F2-3 被后期断裂切割改造,在 2000 m 以深的中深部地层电阻率特征明显,表明该区域经历了多期构造叠加改造过程.

剖面中部 1000 m 以浅范围发育显著低阻异常区,整体呈现出独特的"帚状"分叉构造特征:浅部 0~500 m 范围内,低阻带沿走向发散为 3~4 条近平行的次级断裂,断裂间距 500~800 m,反映浅部断裂的多期活动、羽状裂隙的发育;向深部 500~1000 m 延伸,次级低阻带逐渐归并,最终收敛为单一的主断裂带 F2-1,构成"上部发散、下部收敛"的帚状结构. 同时,断裂产状沿倾向呈现陡-缓交替的台阶状变化,该构造形态与胶东招平断裂带"阶梯式成矿模式"特征高度吻合,断裂产状由陡变缓的转折部位成为金矿的优势富集部位.

3.2 "三位一体"找矿预测理论应用

(1)构造要素:断裂产状变化控制容矿空间分布

巡马道断裂的深部探测显示,构造带内存在多组由陡变缓的构造转换带,成为成矿流体聚集的核心区位:在垂向分布上,主控矿断裂构造 F2-1 在 -800 m、500 m、800 m、1100 m 标高附近,均发育断裂产状由陡峻(倾角 60°~70°)向平缓(倾角 30°~40°)或由缓向陡过渡的转折部位. 这类转换带因应力集中易引发岩石破碎,形成规模不等的扩容空间,既为成矿流体提供了停滞卸载的物理条件,又通过增强岩石渗透性促进矿质沉淀,与"阶梯式成矿模型"中"缓倾角段为矿质富集优势区"的特征吻合.

(2)岩浆要素:深部隐伏岩体提供成矿物质与能量

依据重磁电联合反演结果推断,巡马道断裂深部 3000 m 处发育燕山期隐伏岩体. 该岩体不仅是区域内的重要成矿地质体,更是"三位一体"成矿系统中岩浆热源与物质来源的核心.

(3)矿化要素:地表与浅部矿化显示成矿系统的连续性

地表探测到的 KS1、KS2 矿化蚀变带及 Q54、Q69 矿化石英方解石脉,均与巡马道断裂的第二期主断裂 F2-1(控矿断裂)存在直接关联. 蚀变带内发育的黄铁矿、碳酸盐化等热液蚀变特征,指示成矿流体曾沿主断裂 F2-1 向上运移并与浅部围岩发生反应. 地表矿化线索与深部构造转换带、隐伏岩体的空间对应关系,充分证实了成矿系统从深部岩浆源到浅部矿化带的连续性,为"三位一体"要素的耦合提供了直接观测依据.

综上可知,巡马道断裂构造体系满足"三位一体"成矿预测理论的基本要件:即燕山期隐伏岩体提供的物质与热动力来源,流体沿断裂运移至构造转换扩容空间发生矿质沉淀富集,最终在浅部形成特征性矿化蚀变带. 主断裂 F2-1 在 -800 m、500 m、800 m、1100 m 标高附近构造转换部位,满足"断裂产状变缓(构造条件)+紧邻深部岩体(岩浆条件)+浅部矿化显示(矿化响应)"的三重条件,是区内最优成矿部位,建议 B1、B2、B3、B4 为深部找矿验证靶区.

3.3 钻探验证与深部金矿发现

为验证前期地球物理勘探与构造分析的成矿预测是否准确,实施钻孔 ZK2 对 B3 靶区进行验证. 钻探结果表明,在预测部位揭露到厚大隐伏矿体,取得了突破性的找矿成果.

(1)深部金矿体的发现

钻探过程中,在预测深度揭露一条强烈破碎带,经系统取样与测试分析,证实该破碎带内赋存金矿体:矿体厚度达 10 m,最大品位为 13.4 g/t. 该成果直接证实了小秦岭巡马道断裂深部的成矿潜力,为小秦岭地区深部金矿勘探提供了关键实证.

(2)预测与实际的高精度吻合

钻探验证结果表明,钻探揭露矿(化)体的实际赋存深度与前期预测深度的误差在 10% 以内,匹配精度较高. 充分说明基于重、磁、广域电磁数据反演构建的构造-地质模型,针对深部找矿靶区的判定具有较高的可靠性,凸显了综合物探方法在深部找矿中的有效性和精准的指导价值.

(3)多维度数据的规律性对应

钻探获取的岩心特征与物探数据呈现高度吻合的规律,进一步验证了前期综合解释的可靠性:

岩心破碎特征与电阻率分区对应:广域电磁反演显示在 1500 m 以浅存在 3 层低阻层,第二层低阻区(电阻率 500~1000 Ω·m),对应岩心呈中等破碎状态,以块状形态为主;第三层低阻区(电阻率 100~400 Ω·m),对应岩心强烈破碎,多呈碎末状;而第三层高阻区(电阻率 1000~4000 Ω·m),岩心保持完整,呈规则柱状(见图 10).

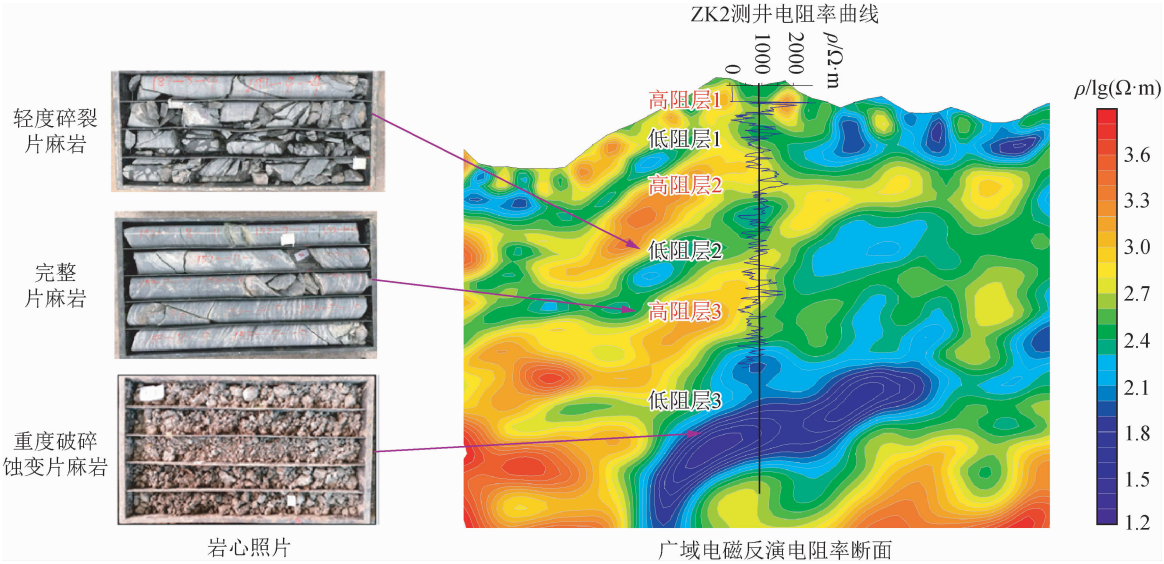


图 10 ZK2 钻孔岩心、测井电阻率曲线与广域电阻率反演视电阻率对比图

Fig. 10 Comparison of core photos, logging resistivity curves and apparent resistivity from wide-field electromagnetic inversion of borehole ZK2

电阻率测井曲线与电性分层的一致性:电阻率测井曲线的电性波动特征与广域电磁反演的电性分层完全吻合,形成"地球物理属性-宏观岩性特征"的精准对应关系,共同印证了重磁-广域电磁联合反演结果的准确性,为深部地质结构与成矿环境的解析提供了多维度支撑.

4 结 论

本研究是"阶梯式成矿模型"等成矿理论与地球物理探测技术深度结合的成功案例.通过借鉴胶东"阶梯式成矿"理论,依托重力、磁法、广域电磁探测查明巡马道断裂阶梯式构造,锁定矿化靶区;最终以"三位一体"找矿预测理论指导钻探工程部署,形成"理论指导—技术定位—工程验证"的技术流程,为同类地区深部金矿勘查提供了理论和方法依据.

(1)小秦岭巡马道断裂历经多期构造活动,物探资料清晰揭示其阶梯式构造形态,整体特征与胶东地区阶梯式成矿模型高度吻合.

(2)结合"三位一体"找矿预测理论与阶梯式成矿模型,本次研究共圈定 4 处找矿靶区.钻探结果证实,构造陡缓转折部位赋存厚大蚀变岩型金矿体,为区域深部金矿勘查开辟了新的理论思路与找矿方向.

(3)实践表明,重—磁—广域电磁综合探测技术攻克了小秦岭复杂矿区的勘查难题,实现对深部隐伏构造、矿化体的精细化探测,反演解释成果也得到钻探工程的充分验证.

致 谢 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

References

Bai H. 2003. Geology of the gold deposit Q8 and the deep-seated potential mineral resources in Xiaoqinling. Geology of Shaanxi (in Chinese), 21(1): 19-27.

Chen H, Mu P J, Zhang H H, *et al*. 2021. Structural deformation and mineralization of NNE-striking gold-bearing veins in Xiaoqinling Area, Central China. Journal of Earth Sciences and Environment (in Chinese), 43(2): 291-314.

Chen Y J, Zhai M G, Jiang S Y. 2009. Significant achievements and open issues in study of orogenesis and metallogenesis surrounding the North China continent. Acta Petrologica Sinica (in Chinese), 25(11): 2695-2726.

Cheng S Y, Zhang G W, Li L. 2003. Lithospheric electrical structure of the Qinling orogen and its geodynamic implication. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 46(3): 390-397.

Feng J Z, Yue Z S, Xiao R G, *et al*. 2009. Metallogenic Regularities and Metallogenic Prediction of Deep Gold Deposits in the Xiaoqinling Mountains (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House.

Gao Y B, Li H, Yang K, *et al*. 2026. Gold metallogenic regularity and resource potential in the Qinling Metallogenic Belt. Northwestern Geology (in Chinese), 59(1): 23-43.

Hou J, Wu C L, Yu G P, *et al*. 2022. Research progress on the deep structure of Jiaodong gold deposit concentration area. Progress in Geophysics (in Chinese), 37(3): 952-963, doi: 10.6038/pg2022GG0084.

Jiang S Y, Dai B Z, Jiang Y H, *et al*. 2009. Jiaodong and Xiaoqinling: Two orogenic gold provinces formed in different tectonic settings. Acta Petrologica Sinica (in Chinese), 25(11): 2727-2738.

Li S M, Qu L Q, Su Z B, *et al*. 1996. The Geology and Metallogenic Prediction of the Gold Deposit in Xiaoqinling (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 148-161.

Liu J M, Ye J, Xu J H, *et al*. 2001. Preliminary discussion on geodynamic background of Mesozoic gold metallogeny in eastern North China — With examples from eastern Shandong Province. Progress in Geophysics (in Chinese), 16(1): 39-46.

Liu X L, Li C S, Xiao Z H, *et al*. 2020. Deep geological structure characteristics and the demarcating of prospecting target in Xiaoqinling gold field. Mineral Exploration (in Chinese), 11(10): 2087-2094.

Liu Y H, Qi X S, Li Z H, *et al*. 2015. Geological characteristics and genesis of Chener gold deposit in Shaanxi Province. Northwestern Geology (in Chinese), 48(2): 186-195.

Lu X X, Wei X D, Dong Y, *et al*. 1999. The metallogenetic epoch of gold deposits in Xiaoqinling-Xiong Ershan region. Gold Geology (in Chinese), 5(1): 11-16.

Lu Y D, Yang D C, Shao P A, *et al*. 2013. A brief talk on deep gold mineralization in the Xiaoqinling Au ore field--By the example of the Dahu Au deposit. Acta Geologica Sichuan (in Chinese), 33(4): 412-416.

Luan S W, Cao D C, Fang Y K, *et al*. 1985. Geochemistry of Xiaoqinling gold deposits. Minerals and Rocks (in Chinese), 5(2): 2-7, 1-127.

Mao J W, Xie G Q, Zhang Z H, *et al*. 2005. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings. Acta Petrologica Sinica (in Chinese), 21(1): 169-188.

Ni R H, Xiao Z H, Han F, *et al*. 2025. Fracture characteristics of the Xiaoqinling mountain patrol horse road in Shaanxi province brief analysis of its relationship with mineralization. World Nonferrous Metals (in Chinese), (5): 61-63.

Ni Y P, Jin L, Yang C S, *et al*. 2019. Geological characteristics and prospecting model in the northern slope of the northern metallogenic belt, Xiaoqinling mountains. Geology and Exploration (in Chinese), 55(5): 1143-1152.

Qi J P, Chen Y J, Li Q Z. 2002. Synthesis of hydrothermal metallogenesis in Xiaoqinling orogenic gold field. Mineral Deposits (in Chinese), 21(Suppl.): 1009-1012.

Song M C, Yi P H, Xu J X, *et al*. 2012. A step metallogenetic model for gold deposits in the northwestern Shandong Peninsula, China. Science China Earth Sciences, 55(6): 940-948.

Song M C, Yi P H, Cui S X, *et al*. 2013. Thermal uplifting-extension ore-forming theory and its prospecting significance in Jiaodong gold deposit. Shandong Land and Resources (in Chinese), 29(7): 1-12.

Song M C. 2015. The main achievements and key theory and methods of deep-seated prospecting in the Jiaodong gold concentration area, Shandong Province. Geological Bulletin of China (in Chinese), 34(9): 1758-1771.

Song M C, Song Y X, Ding Z J, *et al*. 2018. Jiaodong gold deposits: Essential characteristics and major controversy. Gold Science and Technology (in Chinese), 26(4): 406-422.

Song M C, Lin S Y, Yang L Q, *et al*. 2020. Metallogenic model of Jiaodong peninsula gold deposits. Mineral Deposits (in Chinese), 39(2): 215-236.

Song M C, Yang L Q, Fan H R, *et al*. 2022a. Current progress of metallogenic research and deep prospecting of gold deposits in the Jiaodong Peniusula during 10 years for Exploration Breakthrough Strategic Action. Geological Bulletin of China (in Chinese), 41(6): 903-935.

Song M C, Song Y X, Li J, *et al*. 2022b. Stepwise prospecting method for deep-seated deposits: Take deep prospecting of ore concentration area of gold in Jiaodong Peninsula, China as an example. Geology in China (in Chinese), 49(1): 1-15.

Su Q M. 2016. Metallogenic regularity and prediction of deep gold deposit in Qinling Mountains. World Nonferrous Metals (in Chinese), (15): 33-34.

Sun W Z, Feng J Z, Yan J S, *et al*. 2013. Mantle Branch Structure and Deep Prospecting in Xiaoqinling (in Chinese). Beijing: Science Press.

Tan X H, Wang L, Wang R T. 2012. Study on mineral exploration in depth of Xiaoqinling gold deposit region—a case of Chen'er gold ore deposit. Northwestern Geology (in Chinese), 45(3): 72-80.

Wang D D, Wang R T, Han J M, *et al*. 2012. Metallogenic regularity and exploration prospecting for gold deposit of Tongyu ore cluster region in Xiaoqinling gold deposit belt, Shaanxi Province. Northwestern Geology (in Chinese), 45(2): 43-50.

Wang L M, Wang J H, Ren T L, *et al*. 2024. Relationship between Jiaodong gold deposit and Mesozoic regional granite metallogenic predication and prospecting direction. Shandong Land and Resources (in Chinese), 40(3): 6-22.

Wang Y T, Mao J W. 2002. Mineralization in the post-collisional orogenic extensional regime: A case study of the Xiaoqinling gold deposit clustering area. Geological Bulletin of China (in Chinese), 21(8-9): 562-566.

Wang Y T, Mao J W, Zhang Z H, *et al*. 2002. Tectonic constraints on mineralization in Xiaoqinling gold-rich area. Mineral Deposits (in Chinese), 21(S1): 704-706.

Wei X, Ji W H, Wang J T, *et al*. 2025. Research on the relationship between fault and gold mineralization in the middle-south section of Zhaoping fault zone in Jiaodong Peninsula. Northwestern Geology (in Chinese), 58(2): 225-239.

Wen Y G, Wang H P, Huang Y Y. 2019. Geology and deep ore prospecting for gold-bearing veins Q9325, Q141 AND Q127 in Xiaoqinling, Shaanxi province. Geology of Shaanxi (in Chinese), 37(1): 16-22.

Yan G S, Ye T Z, Pang Z S, *et al*. 2023. Introduction of the theory and method of prospecting prediction of metallogenic geological body. Geological Bulletin of China (in Chinese), 42(6): 857-882.

Yang J H, Xu L, Sun J F, *et al*. 2021. Geodynamics of decratonization and related magmatism and mineralization in the North China Craton. Science China Earth Sciences, 64(9): 1409-1427.

Ye T Z, Lü Z C, Pang Z S, *et al*. 2014. Theory and Methods of Prospecting Prediction in Exploration Areas (General Volume) (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House.

Yi P H, Song M C. 2008. Ore-probing work in deep part of the crust should be strengthened to create second ore-probing space of Jiaodong gold deposit. Shandong Land and Resources (in Chinese), 24(1): 36-39.

Yu X W, Wang L M, Liu H D, *et al*. 2023. The relationship between Mesozoic granite, gold deposits and the division of metallogenic period in eastern Sandong. Acta Geologica Sinica (in Chinese), 97(6): 1848-1873.

Zhai M G. 2010. Tectonic evolution and metallogenesis of North China Craton. Mineral Deposits (in Chinese), 29(1): 24-36.

Zhai M G. 2019. Tectonic evolution of the North China Craton. Journal of Geomechanics (in Chinese), 25(5): 722-745.

Zhang G W, Dong Y P, Yao A P. 1997. The crustal compositions, structures and tectonic evolution of the Qinling orogenic belt. Geology of Shaanxi (in Chinese), (2): 1-14.

Zhang H H, Bai H, Gao Q, *et al*. 2013. Relationship between metamorphosed rocks of the Archaeozoic Taihua group and gold mineralization in the Xiaoqinling gold field. Geology of Shaanxi (in Chinese), 31(2): 15-20.

Zhang H H, Chen H, Bai H, *et al*. 2018. Geological model for prospecting prediction in "trinity" prospecting area in the Xiaoqinling gold deposit in Shannxi and its prospecting significance.

Journal of Geomechanics (in Chinese), 24(3): 350-370.
Zhang J J, Zheng Y D, Liu S W. 2003. Mesozoic tectonic evolution and ore-deposits formation in the gold mine field of Xiaoqinling. Chinese Journal of Geology (in Chinese), 38(1): 74-84.
Zhang Q, Ma Y M, Han J M, *et al*. 2010. Analyzing on metallogenic machenism of gold deposits in Xiaoqingling region. Geology of Shaanxi (in Chinese), 28(2): 28-33.
Zhang S J. 2016. Study on the stepped metallogenic model of gold deposits in northwestern Jiaodong. Low Carbon World (in Chinese), (2): 99-100.
Zhao Z H, Tu G C. 2003. Super Large Deposits in China-II (in Chinese). Beijing: Science Press, 523-524.
Zheng X G, Lu L, Liu H Y, *et al*. 2020. The preliminary understanding of deep structure exploration in the orefield of Xiaoqinling area. Geophysical and Geochemical Exploration (in Chinese), 44(4): 894-904.
Zhou X H, Yang J H, Zhang L C. 2003. Metallogenesis of superlarge gold deposits in Jiaodong region and deep processes of subcontinental lithosphere beneath North China Craton in Mesozoic. Science China Earth Sciences (in Chinese), 46(Suppl.): 14-25.
Zhu R X, Fan H R, Li J W, *et al*. 2015. Decratonic gold deposits. Science China Earth Sciences, 58(9): 1523-1537.

附中文参考文献

白和. 2003. 小秦岭 Q8 号金矿床地质特征及深部资源潜力分析. 陕西地质, 21(1): 19-27.
陈虹, 牟培吉, 张欢欢, 等. 2021. 小秦岭 NNE 向金矿脉构造变形特征与成矿关系. 地球科学与环境学报, 43(2): 291-314.
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(11): 2695-2726.
程顺有, 张国伟, 李立. 2003. 秦岭造山带岩石圈电性结构及其地球动力学意义. 地球物理学报, 46(3): 390-397.
冯建之, 岳铮生, 肖荣阁, 等. 2009. 小秦岭深部金矿成矿规律与成矿预测. 北京: 地质出版社.
高永宝, 李航, 杨可, 等. 2026. 秦岭成矿带金成矿规律及资源潜力. 西北地质, 59(1): 23-43.
侯爵, 武澄泷, 俞贵平, 等. 2022. 胶东金矿集中区深部结构研究进展. 地球物理学进展, 37(3): 952-963, doi: 10.6038/pg2022GG0084.
蒋少涌, 戴宝章, 姜耀辉, 等. 2009. 胶东和小秦岭: 两类不同构造环境中的造山型金矿省. 岩石学报, 25(11): 2727-2738.
黎世美, 瞿伦全, 苏振邦, 等. 1996. 小秦岭金矿地质和成矿预测. 北京: 地质出版社, 148-161.
刘建明, 叶杰, 徐九华, 等. 2001. 初论华北东部中生代金成矿的地球动力学背景——以胶东金矿为例. 地球物理学进展, 16(1): 39-46.
刘晓龙, 李长寿, 肖志豪, 等. 2020. 小秦岭金矿田(陕西段)深部地质结构特征及找矿靶区圈定. 矿产勘查, 11(10): 2087-2094.
刘云华, 戚新世, 李宗会, 等. 2015. 陕西洛南陈耳金矿床地质特征及成因探讨. 西北地质, 48(2): 186-195.
卢欣祥, 尉向东, 董有, 等. 1999. 小秦岭—熊耳山地区金矿时代. 黄金地质, 5(1): 11-16.
卢耀东, 杨东潮, 邵平安, 等. 2013. 浅议小秦岭深部金矿成矿规律——以大湖金矿为例. 四川地质学报, 33(4): 412-416.
栾世伟, 曹殿春, 方耀奎, 等. 1985. 小秦岭金矿床地球化学. 矿物岩石, 5(2): 2-7, 1-127.
毛景文, 谢桂青, 张作衡, 等. 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景. 岩石学报, 21(1): 169-188.
倪荣辉, 肖志豪, 韩舫, 等. 2025. 陕西小秦岭巡马道断裂特征及其与成矿关系浅析. 世界有色金属, (5): 61-63.
倪云鹏, 金路, 杨春四, 等. 2019. 小秦岭北矿带北麓地质特征与找矿模型. 地质与勘探, 55(5): 1143-1152.
祁进平, 陈衍景, 李强之. 2002. 小秦岭造山型金矿的流体成矿作用分析. 矿床地质, 21(增刊): 1009-1012.
宋明春, 伊丕厚, 徐军祥, 等. 2012. 胶西北金矿阶梯式成矿模式. 中国科学: 地球科学, 42(7): 992-1000.
宋明春, 伊丕厚, 崔书学, 等. 2013. 胶东金矿"热隆-伸展"成矿理论及其找矿意义. 山东国土资源, 29(7): 1-12.
宋明春. 2015. 胶东金矿深部找矿主要成果和关键理论技术进展. 地质通报, 34(9): 1758-1771.
宋明春, 宋英昕, 丁正江, 等. 2018. 胶东金矿床: 基本特征和主要争议. 黄金科学技术, 26(4): 406-422.
宋明春, 林少一, 杨立强, 等. 2020. 胶东金矿成矿模式. 矿床地质, 39(2): 215-236.
宋明春, 杨立强, 范宏瑞, 等. 2022a. 找矿突破战略行动十年胶东金矿成矿理论与深部勘查进展. 地质通报, 41(6): 903-935.
宋明春, 宋英昕, 李杰, 等. 2022b. 深部矿阶梯找矿方法: 以胶东金矿集区深部找矿为例. 中国地质, 49(1): 1-15.
苏全民. 2016. 小秦岭深部金矿成矿规律与成矿预测. 世界有色金属, (15): 33-34.
孙卫志, 冯建之, 燕建设, 等. 2013. 小秦岭幔枝构造与深部找矿. 北京: 科学出版社.
谭兴华, 王磊, 王瑞廷. 2012. 小秦岭金矿区深部找矿研究——以陈耳金矿为例. 西北地质, 45(3): 72-80.
汪道东, 王瑞廷, 韩俊民, 等. 2012. 小秦岭金矿带潼峪矿集区金的成矿规律与找矿预测. 西北地质, 45(2): 43-50.
王来明, 王金辉, 任天龙, 等. 2024. 胶东金矿与中生代区域性花岗岩关系及成矿预测和找矿方向. 山东国土资源, 40(3): 6-22.
王义天, 毛景文. 2002. 碰撞造山作用期后伸展体制下的成矿作用——以小秦岭金矿集中区为例. 地质通报, 21(8-9): 562-566.
王义天, 毛景文, 张作衡, 等. 2002. 小秦岭金矿区成矿作用的构造制约. 矿床地质, 21(增刊): 704-706.
韦星, 计文化, 王建田, 等. 2025. 胶东地区招平断裂带中-南段断裂与金矿成矿关系研究. 西北地质, 58(2): 225-239.
文月贵, 王和平, 黄娅娅. 2019. 小秦岭 Q9325、Q141、Q127 号矿脉地质特征及深部找矿前景分析. 陕西地质, 37(1): 16-22.
严光生, 叶天竺, 庞振山, 等. 2023. 成矿地质体找矿预测理论与方法. 地质通报, 42(6): 857-882.
叶天竺, 吕志成, 庞振山, 等. 2014. 勘查区找矿预测理论与方法(总论). 北京: 地质出版社.
伊丕厚, 宋明春. 2008. 加强深部找矿开辟胶东金矿第二找矿空间. 山东国土资源, 24(1): 36-39.
于晓卫, 王来明, 刘汉栋, 等. 2023. 胶东中生代花岗岩与金矿关系及成矿期划分. 地质学报, 97(6): 1848-1873.
翟明国. 2010. 华北克拉通的形成演化与成矿作用. 矿床地质, 29(1): 24-36.

翟明国. 2019. 华北克拉通构造演化. 地质力学学报, 25(5): 722-745.

张国伟, 董云鹏, 姚安平. 1997. 秦岭造山带基本组成与结构及其构造演化. 陕西地质, (2): 1-14.

张欢欢, 白和, 高虔, 等. 2013. 小秦岭金矿田太古宙太华群变质岩与金矿关系的探讨. 陕西地质, 31(2): 15-20.

张欢欢, 陈虹, 白和, 等. 2018. 陕西小秦岭金矿床"三位一体"勘查区找矿预测地质模型及找矿意义. 地质力学学报, 24(3): 350-370.

张进江, 郑亚东, 刘树文. 2003. 小秦岭金矿田中生代构造演化与矿床形成. 地质科学, 38(1): 74-84.

张启, 马玉梅, 韩俊民, 等. 2010. 小秦岭地区金矿成矿机理分析. 陕西地质, 28(2): 28-33.

张水金. 2016. 胶西北金矿阶梯式成矿模式研究. 低碳世界, (2): 99-100.

赵振华, 涂光炽. 2003. 中国超大型矿床-II. 北京: 科学出版社, 523-524.

郑向光, 卢琳, 刘会毅, 等. 2020. 小秦岭地区矿田构造深部探测初步认识. 物探与化探, 44(4): 894-904.

周新华, 杨进辉, 张榴昌. 2003. 胶东超大型金矿床成矿作用与华北克拉通岩石圈深部过程. 中国科学: 地球科学, 46(增刊): 14-25.

朱日祥, 范宏瑞, 李建威, 等. 2015. 克拉通破坏型金矿床. 中国科学: 地球科学, 45(8): 1153-1168.