

滕吉文,薛国强,宋明春. 2026. 第二深度空间金矿勘查的探索、实践与展望. 岩石学报,42(07): 2305-2318, doi: 10.18654/1000-0569/2026.07.01; CSTR: 32089.14. APS-ysxb. 2026.07.01

第二深度空间金矿勘查的探索、实践与展望^{*}

滕吉文^{1,2,3} 薛国强^{1,2} 宋明春⁴

TENG JiWen^{1,2,3}, XUE GuoQiang^{1,2} and SONG MingChun⁴

1. 中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029

2. 中国科学院大学地球与行星科学学院,北京 100049

3. 吉林大学地球探测与科学技术学院,长春 130026

4. 河北地质大学地球科学学院,石家庄 050031

1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. College of Geo-exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China

4. College of Earth Sciences, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China

2025-12-11 收稿, 2026-05-18 改回.

Teng JW, Xue GQ and Song MC. 2026. Exploration, practice, and prospects of gold prospecting in the second depth space. *Acta Petrologica Sinica*, 42(7): 2305-2318, doi: 10.18654/1000-0569/2026.07.01; CSTR: 32089.14. APS-ysxb. 2026.07.01

Abstract Gold is an important strategic resource. With the extensive discovery and exploitation of gold deposits in the first depth space (depth < 500m), the exploration and development of the second depth space (500 ~ 2000m) have become the key to safeguarding resource security. Since the 21st century, China has continuously strengthened gold exploration in the second depth space and achieved remarkable achievements. To further deepen prospecting in the second depth space and more depth prospecting, this paper briefly sorts out the exploration process and major prospecting achievements of gold exploration in China's second depth space, analyzes typical cases of large and super-large gold deposits and polymetallic deposits, and discusses the theoretical basis and key technical methods for deep prospecting. Studies show that China has made important progress in deep prospecting in metallogenic belts such as the northern margin of the North China Craton, eastern Liaoning-southern Jilin, and Qinling Mountains region. In particular, during the ten-year period of the Strategic Action for Prospecting Breakthroughs, the Jiaodong ore concentration area has accumulated an additional gold resource of 2958t at depths ranging from 500m to 2000m, forming three 1000-ton-scale gold ore fields/deposits, namely Sanshandao, Jiaojia, and Linglong. From a geochemical perspective, more than 99% of the gold in the Earth is hosted in the core. Through the dynamic movement of the Earth's spheres and crust-mantle interaction, gold elements migrate upward in an "anti-gravity" manner via permeation migration, channels of fracture zones or fault zones, and constrained flow in sub-horizontal layers. Eventually, these elements accumulate to form ore deposits in favorable metallogenic spaces of the crust, resulting in a stepped gold mineralization distribution in the thermal uplift-extension metallogenic system in eastern China. At present, China has formed a key technical system in the field of deep prospecting, including ore-guided prospecting and model-based prospecting, multi-depth geophysical exploration technologies, 3D geological modeling, and intelligent prediction. Given China's diverse types of geological structures, many regions have a sound material basis for deep metallogenesis, and the exploration depth of most metallogenic belts/ore concentration areas is less than 500m, meaning the second depth space holds enormous prospecting potential. In the future, with the innovative development of deep metallogenic theories and breakthroughs in interdisciplinary AI-based prospecting technologies, it will surely promote the realization of intelligent exploration and precise prospecting of deep gold deposits.

Key words Gold; The second depth space; Large and super-large deposits; Metallogenic Theory; Deep exploration technology

* 本文受深地国家科技重大专项项目(2024ZD1002800)和河北省全职引进国家高层次创新型人才科研项目(2023HBQZYCY010)联合资助.

第一作者简介: 滕吉文,男,1934年生,研究员,博士生导师,中国科学院院士,主要研究方向为地球物理学与大陆动力学, E-mail: jw Teng@mail.iggcas.ac.cn

摘要 黄金是重要的战略资源。随着第一深度空间(地表~500m)黄金矿产的大量发现和开发,第二深度空间(500~2000m)的勘查与开发成为保障资源安全的关键。21世纪以来,我国持续加强第二深度空间金矿勘查工作,已经取得了显著的成效。为进一步深化第二深度空间及更大深度空间金矿勘探,本文简要梳理了我国金矿勘查的探索过程与主要找矿成果,剖析了大型、超大型金矿床与多元金属矿的典型实例,探讨了深部找矿的理论基础与关键技术方法。研究表明,我国在华北陆块北缘、辽东-吉南、秦岭等成矿带均取得了深部找矿重要进展。特别是在找矿突破战略行动十年间,胶东矿集区在500~2000m的深度范围内累计新增金资源量达2958t,形成了三山岛、焦家、玲珑3个千吨级金矿田/床。从地球化学角度看,地球中超过99%的金元素赋存于地核中。通过地球圈层的动态运动及壳-幔相互作用,金元素以渗透迁移、借助破碎带或断裂带通道及亚水平层约束流动等方式,呈“反重力”势态向上运移,最终在地壳的有利成矿空间聚集成矿,在中国东部的热隆-伸展成矿系统中形成阶梯式的金矿化分布。目前,我国在深部找矿领域已形成了包括就矿找矿和模式找矿、多深度层次地球物理勘查技术、三维地质建模和智能预测等在内的关键技术体系。鉴于我国地质构造类型丰富多样,众多区域具备良好的深部成矿物质基础,且多数成矿带/矿集区勘查深度不足500m,第二深度空间找矿潜力巨大。随着深部成矿理论的创新发展及多学科交叉的AI技术突破,未来将加快实现深部金矿智能勘查与精准找矿。

关键词 黄金;第二深度空间;大型-超大型矿床;成矿理论;深部勘查技术

中图法分类号 P618.51; P62

随着矿产资源的高强度开发,第一深度空间(地表~500m深度)的矿产资源不断减少,供需矛盾凸显,矿产资源短缺已成为我国经济可持续发展的制约因素,我国有17种矿产对外依存度达50%以上(王安建和王高尚, 2021^①;王安建等, 2024^②)。然而,受勘查技术和装备的限制,我们以往对第二深度空间(>500m深度;滕吉文, 2006;滕吉文等, 2022)的矿产资源探测尚甚少。理论和实践已经证明,深部地下空间蕴藏巨大的资源潜力,如果我国固体矿产勘查深度达到2000m,探明的资源储量可在现有基础上翻一番。开展深部资源勘查有助于为国家资源安全提供重要保障。

黄金是重要的战略资源之一,近几十年来全球投入金矿勘查的资金占固体矿产勘查总投资的40%以上。中国是全球最大的黄金生产和消费国(王安建等, 2024),具有全球增长最快并具有巨大发展潜力的黄金市场。我国金矿赋存的主要特点是分布范围广、矿床类型多,大型-超大型矿床少、中小型和开采条件复杂的矿床多。可喜的是,我国深部金矿勘查近十多年来取得显著进展,发现和探明了一批超大型金矿床,累计查明的金资源储量由2010年前的6327t猛增到约2.1万t(王登红等, 2025)。重大找矿成果的取得,得益于以胶东等重要矿集区500~2000m深度的第二深度空间找矿突破(宋明春, 2015;宋明春等, 2022)。这些成果不仅明显改善了我国金矿床资源特点,还预示着深部金矿潜力巨大。

深部矿产资源成储的环境和条件与浅表部矿产资源成储存在显著差异,深部矿床具有很强的独特性和高度的不确定性(Di *et al.*, 2020)。这使得深部金矿勘查具有探索性强、投入大、风险高等特点。面对复杂而艰巨的地质条件,我国地质工作者勇于探索、勤于实践,在深部成矿理论和找矿技术方面取得了一系列创新成果,为深部找矿突破提供了有力支撑。

2006年我国科学家提出了第二深度空间找矿理念,指出:要实现第二深度空间找矿突破,地球物理的勘查深度要

达到5000m,在3000m以内要采集到高分辨率的信息,以保证能够发现、找到深部大型、超大型矿床(滕吉文, 2006)。本文在简要梳理国际上和我国第二深度空间金矿勘查探索与实践过程中取得的主要找矿成果和典型找矿案例的基础上,剖析了深部找矿的理论基础和关键技术方法,并对未来深部找矿的发展前景进行了展望,旨在我国的第二深度空间金矿勘查及新一轮找矿突破战略行动提供有益的导向。

1 第二深度空间找矿的理论基础

黄金矿产资源类型繁多,成矿深度变化较大,由于地球内部圈层动态运动和壳-幔相互作用,导致物质与能量的交换,为第二深度空间成储提供了重要的物质基础。

1.1 金矿的分类及分布

Robert *et al.* (2007)将金矿主要分为以下几种类型:造山型金矿、与还原型侵入岩有关的金矿、与氧化型侵入岩有关的金矿、浅成热液金矿、卡林型金矿、块状硫化物中的金矿、Witwatersrand型金矿、非典型绿岩带金矿和古砂金矿等。其中造山型金矿划分为三个亚类:浊积岩型金矿、绿岩带金矿和赋存于条带状铁矿(BIF)中的金矿。不同类型金矿的垂向分布受不同的构造环境与物质运移的制约,从地表到深部依次分布古砂金矿、高硫化物和低硫化物的浅成热液金矿、块状硫化物中的金矿、卡林型金矿、与氧化型侵入岩有关的金矿、与还原型侵入岩有关的金矿和造山型金矿等(图1)。

① 王安建,王高尚. 2021. 2035年中国35种矿产资源需求预测报告. 中国地质调查局

② 王安建,李建武,闫强. 2024. 全球矿产资源形势报告. 中国地质调查局

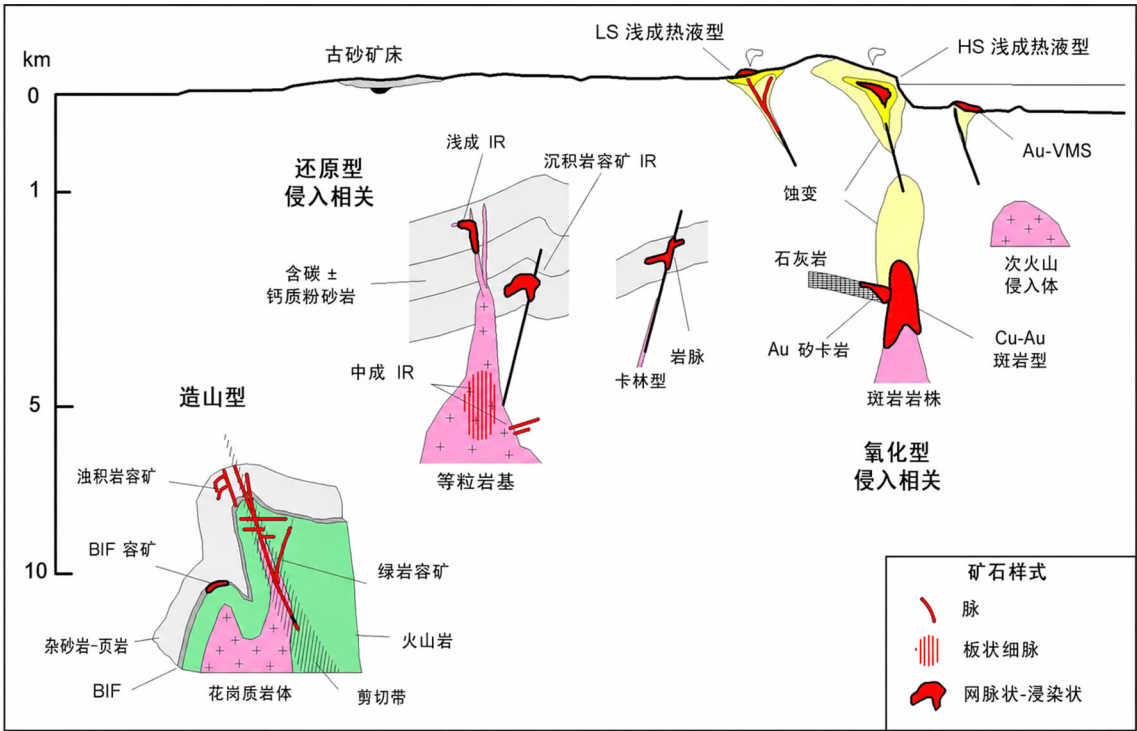


图1 全球主要金矿类型和形成深度 (据 Robert *et al.* , 2007)

Fig.1 The major gold deposit types and their crustal depths of emplacement (after Robert *et al.* , 2007)

表1 世界超大型金矿类型和储量(据 Robert *et al.* , 2007)

Table 1 Types and reserves of world class gold deposits (after Robert *et al.* , 2007)

金矿类型	大于 10×10^6 oz 金的矿床数量	资源量 ($\times 10^6$ oz)
造山型金矿	20	425
绿岩带金矿	14	285
油积岩型和铁建造中的金矿	6	140
与还原型侵入岩有关的金矿(RIR)	12	434
赋存于侵入岩中的金矿	4	75
赋存于沉积岩中的金矿	8	359
与氧化型侵入岩有关的金矿(OIR)	39	1104
斑岩和砂卡岩型金矿	27	739
HS- IS 浅成热液金矿	9	253
LS 碱性岩金矿	3	112
其他类型金矿	32	1729
LS 浅成热液金矿	7	91
卡林型金矿	10	245
块状硫化物金矿	2	20
Witwatersrand 型金矿	8	1260
非典型的绿岩带金矿	5	113
合计	103	3692

注:LS-低硫化作用;HS-高硫化作用;IS-中硫化作用;1 oz = 31. 103g

在全球 103 个超大型金矿床中,造山型金矿有 20 个,与还原型侵入岩有关的金矿 12 个,与氧化型侵入岩有关的金矿 39 个,低硫化(LS)浅成热液金矿 7 个,卡林型金矿 10 个,

块状硫化物金矿 2 个,兰德型金矿 8 个,非典型绿岩带金矿 5 个等(表 1)。

1.2 金矿床的形成深度

不同金矿类型受控于构造、岩浆、热液和变质作用,成矿深度反映了其形成时的地壳层次和物理化学条件。造山型金矿,形成于区域变质-变形环境中,与造山带相关的金矿产通常赋存于剪切带中,成矿深度 5 ~ 20km;与还原型侵入岩有关的金矿,与还原性(低氧逸度)的花岗质侵入岩相关,常形成于地壳层次中,成矿深度 3 ~ 10km;与氧化型侵入岩有关的金矿,与高氧逸度花岗质或斑岩侵入体相关,如某些斑岩型金矿床,成矿深度 1 ~ 6km;浅成热液金矿,形成于近地表火山-热液环境,与岩浆热液流体相关,高硫化型成矿深度 0.5 ~ 2km,低硫化型成矿深度 1 ~ 3km;卡林型金矿,形成于沉积岩中的微细浸染型金矿,受构造和热液活动控制;成矿深度 1 ~ 6km;块状硫化物中的金矿,与海底火山热液系统相关,金通常作为伴生元素存在,成矿深度 < 1 ~ 5km(海底热液喷口附近);Witwatersrand 型金矿,古河流-湖泊沉积环境,受变质和热液叠加影响,为近地表沉积,后期改造埋深至 5 ~ 10km;非典型绿岩带金矿,可能与变质-岩浆混合作用有关,成矿深度 3 ~ 15km。

Micklethwaite *et al.* (2010)通过对部分金矿床类型成矿深度的研究指出,与区域走滑剪切相关的绿岩容矿的中温热液脉型金矿床,其形成深度可达 8 ~ 15km(图 2a);赋存于褶

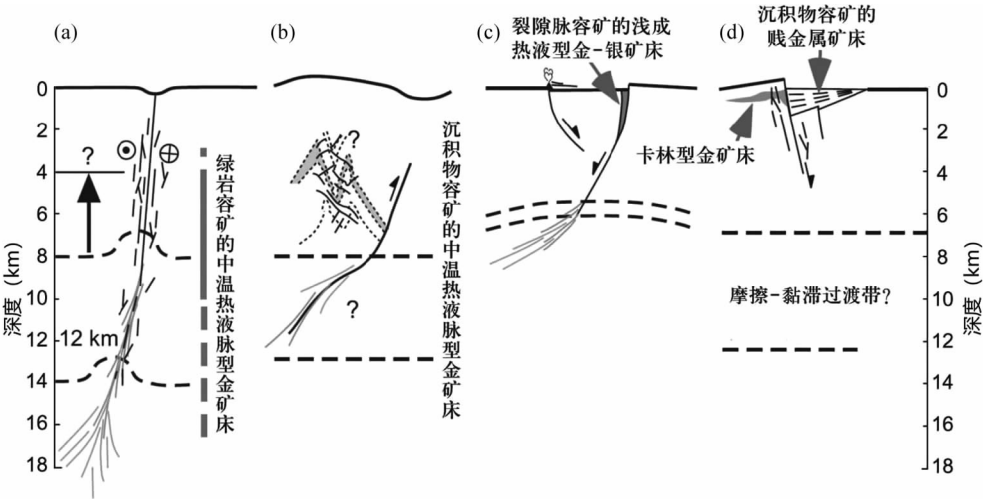


图 2 热液矿床形成深度和构造环境 (据 Micklethwaite *et al.*, 2010)

(a) 与区域走滑剪切带有关的脉状中温热液金矿; (b) 赋存于褶皱浊积岩中与走滑陡倾逆向滑移断层有关的脉状中温热液金矿; (c) 断层或裂隙容矿的浅成热液-卡林型金-银矿床; (d) 与大型正倾斜-滑移 (dip-slip) 断层有关的近地表贱金属矿床

Fig. 2 Formation depth and structural environments of some hydrothermal deposits (after Micklethwaite *et al.*, 2010)

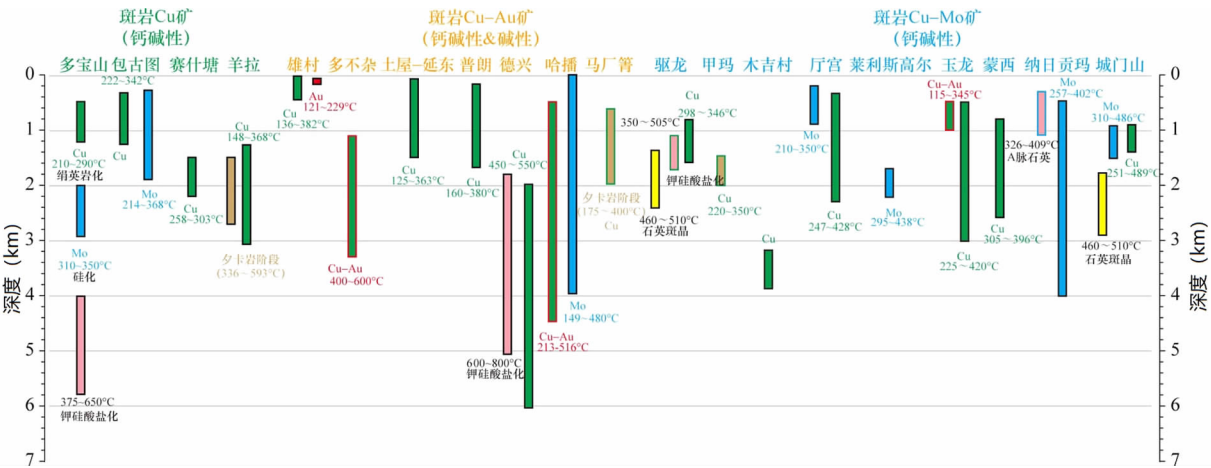


图 3 我国主要斑岩 Cu-Au-Mo 矿床的成矿深度 (据秦克章等, 2021)

Fig. 3 Ore-forming depth of major porphyry Cu-Au-Mo deposits in China (after Qin *et al.*, 2021)

褶皱积岩 (沉积物容矿) 中与走滑陡倾断层相关的脉状中温热液金矿, 其形成深度为 8 ~ 12 km (图 2b); 断层或裂隙容矿的浅层热液-卡林型金-银矿床, 最深可为 2 ~ 4 km (图 2c); 与大型正倾斜-滑移断层有关的近地表沉积物容矿的贱金属矿床一般深度小于 2 km (图 2d)。

我国学者主要通过成矿阶段矿流体包裹体测试, 估算了矿床的成矿深度。如我国斑岩型铜、金、钼矿床的成矿估算深度为 (图 3): Cu 矿化深度 0.3 ~ 3 km, 部分可达 6 km, 与斑岩有关的矽卡岩型铜矿床深度 0.5 ~ 4 km; Cu-Au 矿化深度 0.1 ~ 4.5 km, 钼矿化深度 0.5 ~ 4 km (秦克章等, 2021); 估算多宝山多金属矿集区的成矿深度分别为 2.4 ~ 4.2 km、4.1 ~ 6.2 km 和 0.2 ~ 0.5 km (蔡文艳, 2020; 宋国学等, 2015; 晁

温馨, 2018; 赵忠海等, 2012); 估算胶东金成矿带蚀变岩型和石英脉型金矿床的成矿深度为 5.4 ~ 14 km (宋明春等, 2022); 估算河北冀东金矿集区潜火山岩性、隐爆角砾岩型和似层状碳酸盐型金矿床的成矿深度为 0.35 ~ 2.04 km, 蚀变岩型和石英脉型金矿床的成矿深度为 1.0 ~ 10 km (宋明春等, 2025)。通过对系列成矿带的综合研究表明, 一个大型热液成矿系统的垂直延深可达 4 ~ 5 km, 乃至更深 (裴荣富等, 1999)。

1.3 金成矿的深部过程

由于金元素的比重高达 19.3 g/cm³, 在地球漫长的演化过程中, 绝大多数都沉浸到地核中, 在地幔和地壳中赋存的

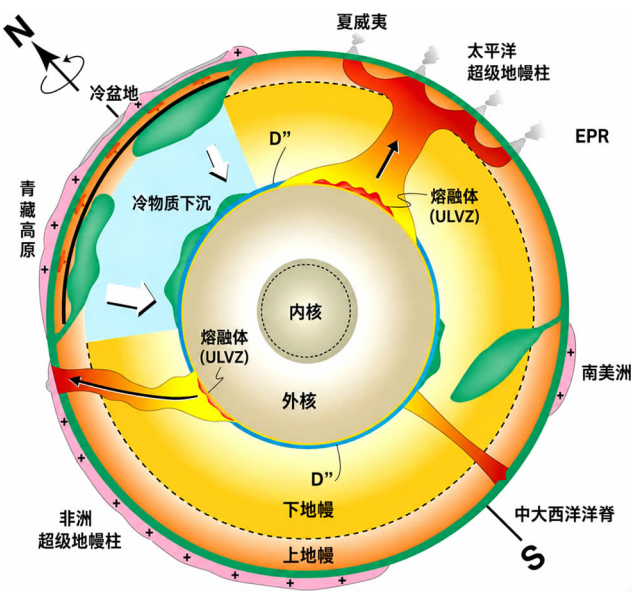


图4 板下构造及全地幔运动的动力学模式图 (据 Maruyama *et al.* , 2007)

Fig. 4 Geodynamic framework for sub-plate tectonics and whole-mantle circulation (after Maruyama *et al.* , 2007)

很少。地核中金的丰度值高达 $0.9 \times 10^{-6}/\text{cm}^3$,金总量占全球的 99.75615% ;地幔中金丰度值为 $0.001 \times 10^{-6}/\text{cm}^3$,总量占全球的 0.23962% ;地壳中金丰度值 $0.003 \times 10^{-6}/\text{cm}^3$,总量占全球金总量的 0.00423% (牛树银等, 2025)。由于地球各圈层不停的运动及壳-幔相互作用(图4),发生物质与能量的交换,致使物质重新分异、调整,驱动着成山、成盆、成岩、成矿、成灾的响应(滕吉文, 2001, 2002, 2003)。在这一过程中,金呈“反重力”势态向上迁移。

深部成矿物质在力系作用下重新分异、调整,以流体、气体等形式,通过渗透迁移、借助破碎带或断裂带通道、亚水平层约束下流动等方式运移到地壳浅部,在张性与压性力系作用下与上地壳物质进行交换,与围岩耦合,形成不同的蚀变带、变质带,最终在上地壳适宜介质中多元矿物元素聚集矿化形成矿床(图5)。理论上,地球内部最有利的成矿空间为 5~10km。因为这个空间恰为地球内部深部与浅部物质与能量交换和深层动力作用过渡地域,也是多种成矿要素发生变异和耦合部位(图6;滕吉文, 2003, 2005),适宜于大量岩浆矿床和热液矿床的产出。

中国东部自燕山期进入强烈活动时期,其深部机制主要受热作用的地幔上升流控制,随着地幔热柱多级演化,金不断从深部向浅部迁移(牛树银等, 2022)。在此过程中,壳-幔相互作用-地壳运动-岩浆活动对金银多金属大规模成矿具有重要控制作用,壳-幔相互作用(牛树银等, 2022)及强烈岩浆热隆起与断陷盆地、拆离断层等伸展构造,共同控制了金矿床及相应的矿床成矿系列以及矿床形成和保存的深部要素和成矿作用过程,构成了热隆-伸展成矿系统(宋明春等,

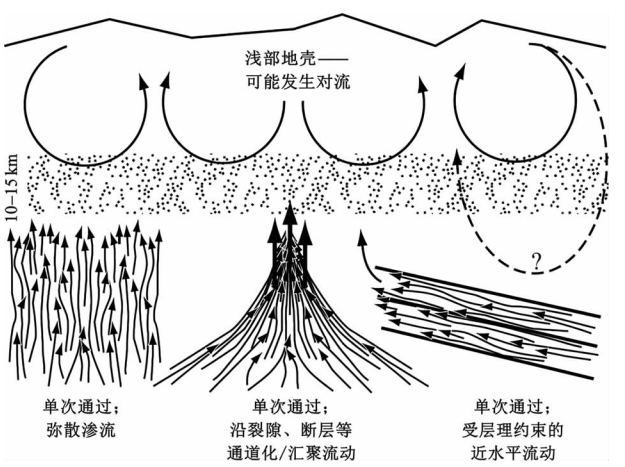


图5 穿过地壳的剖面显示了可能的区域流体流动模式 (据 Ague *et al.* , 2003)

Fig. 5 Schematic representation of fluid flow in the deep crust (after Ague *et al.* , 2003)

2023a)。金的厚大富矿体主要赋存于以下三种构造部位:断裂倾角由陡变缓的转换部位及缓倾段、陡倾主断裂旁发育的缓倾次级断裂,以及多组陡倾断裂夹持地层内的近水平层间构造,矿体由浅至深呈多层分布,构成阶梯成矿形态(宋明春等, 2012)。

2 国内外第二深度空间金矿开发及金矿找矿实践

当前,全球金属矿产资源的勘探与开发正在加速推进“上天、下海、入地”的三维战略布局。随着地表与浅层第一深度空间矿产资源的持续耗竭,多种关键矿产已出现结构性短缺。

2.1 国外深部金矿勘探与开发概况

20 世纪末以来,西方发达国家纷纷实施了在大陆深部探测和深部矿产资源勘查与开发,规划启动了一系列相应的战略性规划。如:美国的地球透镜计划和关键矿产安全和供应保障的联邦战略,欧盟的智慧勘探项目,加拿大的岩石圈探测计划和金属地球项目,澳大利亚的玻璃地球计划、为未来勘探计划和国家钻探计划等。国际上已有较多深部资源勘探与开采成功的案列,如:南非兰德(Rand)金铀矿、加拿大萨德伯里(Sudbury)铜镍矿、澳大利亚奥林匹克坝(Olympic Dam)铜金铀银矿、美国卡林(Carlin)金矿带等。21 世纪以来全球发现的 20 个世界级金属矿床和过去 10 年 25 个重大金矿发现中,隐伏和深部矿床占有重要位置,如蒙古奥尤陶勒盖(Oyu Tolgoi)铜金矿、厄瓜多尔的卡斯卡维(Cascabel)铜金矿。目前全球开采深度超过 1000m 的矿山有 100 多座,主要是金矿、铜矿和部分钻石矿等。部分国家矿山/床的勘探和

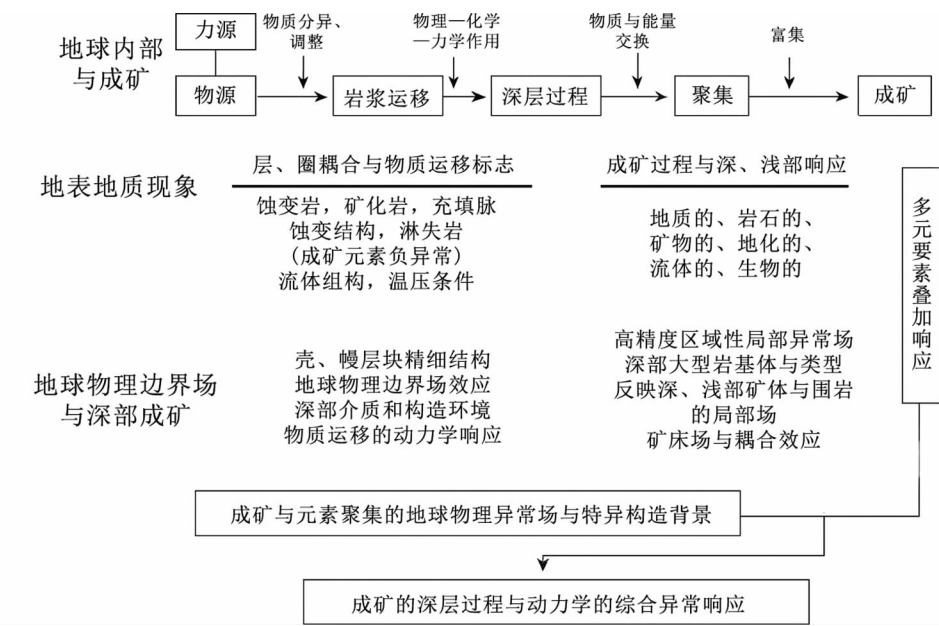


图6 地球深部物质与能量交换、深层动力学响应与成矿过程概念图
该图作为作者基于地球物理学理念,并参考了翟裕生等(2004)成矿系统及综合异常网络图解后重新组编
Fig. 6 Schematic representation of the deep-seated geodynamical and metallogenic processes

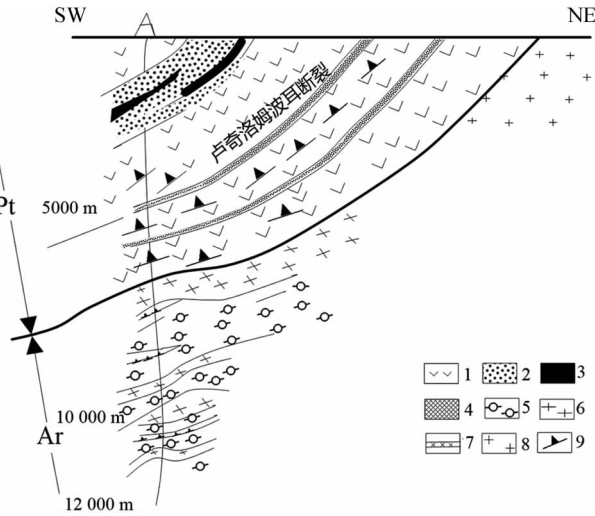


图7 科拉半岛超深钻井简略地质剖面(据亚科夫列夫和卡赞斯基, 1999)
1-4-古元古代彼禅格群(元古宙杂岩):1-变质火山岩;2-变质沉积岩;3-含镍变质超基性岩;4-安山玢岩;5-8-太古宙科拉群(太古宙杂岩);5-含金属硫化物矿物的片麻岩;6-黑云母片麻岩和黑云母-角闪石片麻岩;7-变质基性岩和超基性岩;8-花岗岩类;9-断裂;10-片理化岩石
Fig. 7 Simplified geological section of ultra-deep drilling in the Kola Peninsula (after Yakovlev and Kazansky, 1999)

开采深度已达2500~4000m,南非 Western Deep Level 金矿床的开采深度已达4800m,南非和美国勘查金矿的最深钻孔分别达到5422m和5071m。

俄罗斯在北极附近的科拉半岛打了一口深达12.262km的超深钻(图7),发现了30多种矿物矿化,有18种矿物形态,有8种元素(铁、镍、钴、铜、铅、锌、银、钼)的化合物。金属矿化主要富集在6000~12000m深度的岩层中,在约9000m深度检测到1g/t的含金层,伴生有银和铂族元素;在7000~10000m,有硫化物矿化(铜、镍、锌等);在8000~11000m,发现稀有金属(锂、铍、铌、钽)和稀土元素局部富集(亚科夫列夫和卡赞斯基,1999)。

2.2 国内深部金矿勘探与开发概况

深地资源探测既是解决地质重大基础理论问题的需要,也是保障国家能源资源安全的重大举措,2006年印发的《国务院关于加强地质工作的决定》,提出了东部攻深找盲的战略方针,极大推动了我国深部矿产资源勘查和相关研究工作。目前已在成矿理论、探测装备、找矿技术方法等方面取得重大进展。在成矿理论方面,提出了大陆碰撞成矿理论(侯增谦,2010;陈衍景,2013)、克拉通破坏成矿理论(朱日祥等,2015)、中国东部板内燕山期大规模成矿动力学模型(毛景文和王志良,2000)、胶东型金矿成因模型(邓军等,2023)、金矿热隆-伸展和阶梯成矿模型(宋明春等,2012,2014; Song et al., 2015)、长江中下游陆内成矿模型(吕庆田等,2014)、幔枝构造成矿模型(牛树银等,2022)、勘查区找矿预测模型(叶天竺等,2014)、五层楼+地下室成矿模式(许建祥等,2008),等等。

在探测装备方面,深部钻探、电磁探测、金属矿地震探测系统等装备取得了长足进步,部分装备打破了国外技术垄

断,如广域电磁系统(WFEM)、地面电磁探测系统(SEP)、无缆自定位地震勘探系统等。在探测技术方面,发展了三维成矿预测技术、深穿透地球化学方法、全三维反演的深部探测技术、地物化相互约束的隐伏矿体定位技术、深部阶梯找矿方法等,尤其是高分辨率反射地震在精细揭示1000m以深金属矿控矿构造、追踪矿体方面显示出明显的优势。

近20余年,我国取得了一批重要找矿成果,如:西藏班怒带成为我国首个千万吨级铜资源基地、在新疆和田火烧云地区探明千万吨级铅锌资源基地、在江西朱溪和大湖塘探明了两个世界级钨矿床、山东胶东地区跃居世界第三大金矿集区。累计查明的金和铜资源量分别占新中国成立以来查明总量的50%和25%。

截至2022年底,我国已发现金矿床(点)共计5349处,累计探明金矿资源储量超过 2.1×10^4 t。金资源储量超千吨的有山东、河南、甘肃、内蒙古、云南等,总计资源储量占全国的48%(王登红等,2025)。金矿床在古亚洲成矿域、秦祁昆成矿域、滨太平洋成矿域和特提斯喜马拉雅成矿域中均有分布,金矿的Ⅱ级成矿单元有5个成矿省:天山兴安成金省、塔里木华北成金省、昆仑秦岭成金省、华南成金省和藏滇川青成金省。在87个Ⅲ级成矿单元中,金矿成矿强度大的Ⅲ级成矿单元主要有胶东成矿带、桐柏-大别-苏鲁成矿带、桂西-黔西南-滇东北北部成矿带、西秦岭成矿带、华北陆块南缘成矿带和辽东成矿带等(王岩等,2024)。我国金矿床的类型齐全,世界上已知金矿床成因类型我国均有发现(王登红等,2025),在自然资源部于2020年发布的《矿产地地质勘查规范·岩金》中,将岩金矿床工业类型划分为破碎带蚀变岩型、含金石英脉型、斑岩型、矽卡岩型、角砾岩型、硅质岩层中的含金铁建造型、含金火山岩型和微细粒浸染型8大类。中国金矿具有多期次、多旋回成矿的特点,包括7个主要成矿期,即新太古代-古元古代(五台期, Ar_3/Pt_1 , >1800Ma)、中元古代-新元古代(Pt_1/Pt_2 , 四堡-雪峰期,1800~800Ma; Pt_3 , 晋宁-兴凯期,800~500Ma)、早古生代(加里东期, Pz_1 , 500~400Ma)、晚古生代(华力西期, Pz_2 , 400~250Ma)、早中生代(印支期, Mz_1 , 250~200Ma)、晚中生代(燕山期, Mz_2 , 200~65Ma)和新生代(喜马拉雅期, Kz , <65Ma)。燕山期是我国金矿成矿的高峰期(主要集中于145~105Ma),探明的资源储量占总量的62.4%。其次为印支期和喜马拉雅期(王登红等,2025)。

目前,我国开采金矿的深度超过千米的矿山约有20座,其中山东三山岛金矿床开采深度已达1400m,新立矿区开采深度已超过1600m,三山岛金矿床副井井筒深度2005m,纱岭金矿床主井掘砌工程以1551.8m落底成井,焦家金矿、玲珑金矿、新城金矿床开采深度均已超过1000m;吉林夹皮沟金矿床开采深度达1600m,陕西潼关秦岭金矿床开采深度达1400m,山西繁峙东峪金矿床开采深度达1300m(王伟和刘博,2025)。

进入21世纪以来的20多年间,我国探获的金矿资源储

量显著增长(增加了3.6倍),但矿产产地数量增加缓慢,这意味着增储的空间主要在老矿区周边部和深部(王登红等,2025)。近年来通过理论发展、技术突破和勘查实践,我国在深部金矿找矿方面取得了显著成果,发现了一批具有重要经济价值的深部金矿床。

在胶东成矿带,山东省地质矿产勘查开发局第六地质大队于2006年提交了《山东省莱州市寺庄矿区深部金矿详查报告》,探获金资源储量51.83t,矿体的最大赋矿标高为-1003m(宋明春等,2007,2008),率先实现了我国深部金矿找矿的突破,揭示了金矿深部找矿的序幕。此后主要在500~2000m深度范围内取得深部找矿重大突破,陆续发现并探明了焦家深部、马塘、纱岭、东风171脉、西岭、海域、水旺庄等资源量超过100t的特大型金矿床。目前胶东地区已完成超过2000m深度的钻孔近200个,完成大于3000m深度的钻孔14个,最深钻孔深度达4006.17m。找矿突破战略行动10年新增深部金资源量约2958t,新发现12个大型及以上金矿床,在海域发现并探明了金矿床。形成了三山岛、焦家、玲珑3个千吨级金矿田/矿床(宋明春等,2022)。

在华北陆块北缘成矿带,内蒙古哈达门沟矿区探获金资源量突破100t,其中100号脉群普查新增金资源31.86t,13号脉控制最大斜深2000m,矿脉垂向延伸最大达1600m(刘必政等,2021)。在夹皮沟金矿床深部,742~754.9m处见有10m厚的细脉浸染型金矿体,平均金品位为2.2g/t(姚磊等,2018)。

在辽东-吉南成矿带,青城子矿集区最深矿体(130脉)埋深达1692m,是辽东已知见矿最深的金矿体;五龙金矿在1500m深度发现含金石英脉,厚度3.7m,品位5.74g/t;在五龙金矿床四分矿15中段(619m深度)发现,鸡心沟断裂带发育含金细脉蚀变岩,已经控制厚达40m的强烈硅化、绢云母化及黄铁矿化蚀变带,连续22m采样分析结果中金平均品位为2.205g/t,坑内水平钻探185m仍未穿透该矿化蚀变带。地球物理探测也指示已知矿脉向深部和边部仍具有较大的延伸范围。预测鸭绿江成矿带黄金资源潜力巨大,具备新增数千吨级黄金资源的潜力(朱日祥等,2024;曾庆栋等,2025)。

在辽西-太行成矿带,山西省规模最大的义兴寨金矿床河湾矿段石英脉型矿体的深部发现厚大蚀变斑岩型金矿体,新增金资源量>60t(张立中,2018;张会琼等,2025)。在河北金厂峪金矿床的浅部(-100~300m标高)矿脉富集区之下,发现了深部(-500~-200m)矿脉富集区,新增金金属量18.87t。

在秦岭成矿带,甘肃早子沟金矿床累计查明金资源量132.8t,矿床深部发现缓倾斜盲矿体,存在“上脉下层”的矿体分布特征,在500~1000m深度出现新的富集带,Au、As、Sb、Ag等指示元素异常模型显示,2500m以深异常规模变大,且延伸稳定,指示深部很有可能出现厚大盲矿体(汤磊等,2020;田向盛等,2024)。陕西八卦庙金矿床累计查明

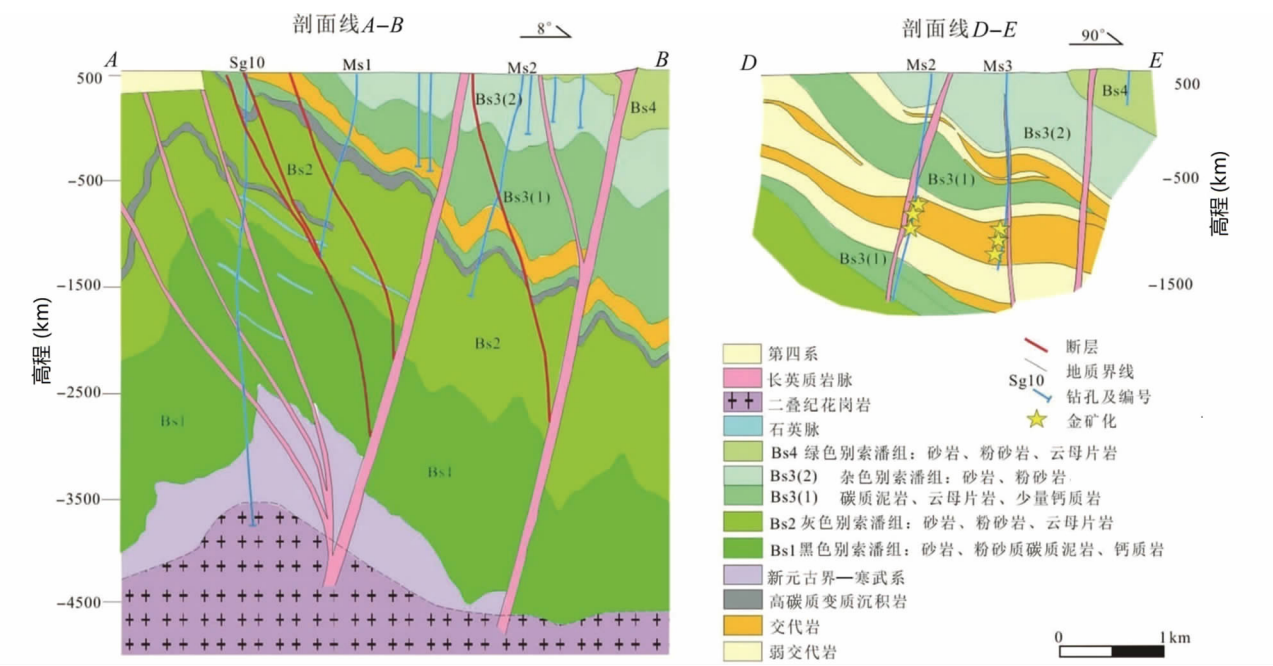


图 8 乌兹别克斯坦穆龙套金矿床地质剖面图 (据 Kempe *et al.*, 2001; Well *et al.*, 2004)
Fig. 8 Sections of Muruntau deposit, Uzbekistan (after Kempe *et al.*, 2001; Well *et al.*, 2004)

金资源量 106.69t,近年来深边部新增金资源量 30t 以上(王瑞廷等, 2025),矿体垂向延伸最大深度超过 600m,在 1000m 标高以下的深部含金石英脉仍很发育(张凤巍, 2021)

在滇黔桂成矿带,贵州水银洞金矿床为全隐伏卡林型金矿床,累计查明金资源量 260.45t,其中 2011 年以来新增 177.41t,矿体最大埋深 1400m(刘建中等, 2017)。在西南三江成矿带,云南鹤庆北衙金矿床从浅部“红土型”矿向深部斑岩-矽卡岩型矿延伸,围绕喜马拉雅期斑岩体呈现“中心铜金矿→外围铁金铅锌矿→边缘铅锌银矿”的复合成矿分带(和中华等, 2013),斑岩型 Cu-Au-Ag 矿体埋深多在 1600m 以下(高歌等, 2019),累计查明金资源量超过 370t(鲍新尚等, 2019),其中 1540m 标高以下金金属量 106.787t,三维综合信息分析圈定了万洞山矿段 1000m 深度的深部靶区(周放等, 2020)。

此外,在天山西段成矿带,新疆萨瓦亚尔顿金矿床查明金金属量 119.5t,控制矿体最大深度 1000m,矿体深部仍未封闭(孟宝东等, 2016)。在桐柏-大别成矿带,河南老湾金矿深部新增资源量使该矿床资源总量从 69t 扩大至 208t,矿床局部控制深度达 1500m,ZK2052 钻孔在 -1298.41m 标高(垂深 1534.64m)发现品位 5.46g/t、厚度 1.06m 的金矿体,预测成矿深度可达 3000m(陈建立等, 2021)。在长江中下游成矿带的安徽铜陵冬瓜山深部铜(金)矿床,矿体自上而下构成了“多层楼”状结构,深部发现斑岩型矿体,新增金资源量 30t(陈可等, 2021; 范子良等, 2016)。在江南陆块南缘成矿带,湖南万古金矿田累计探获黄金资源量 300.2t,在 2000m 以上深度地层发现 40 余条金矿脉。

国家有关部委相继部署实施了深部探测技术与实验研究专项(SinoProbe)、深部资源探测核心技术研发与应用示范战略性先导专项、863 项目深部矿产资源勘探技术、危机矿山接替资源找矿、找矿突破战略行动、深地资源勘查开采国家重点研发计划专项、深地国家科技重大专项等,其研究成果为第二深度空间或者更大深度范围找到大型与超大型矿床提供支撑。

3 第二深度空间发现大型、超大型金矿床的典型实例

全球第二深度空间发现和查明了一系列的金矿床,其埋藏深、规模大、品位高,下面仅举两个典型金矿床的实例表征。

3.1 乌兹别克斯坦穆龙套造山型金矿床

穆龙套金矿是造山型金矿,黄金储量世界第一,累计探明金资源储量约 6000t。自 1958 年矿山开发以来,已累计产金超过 2000t。近年来其年产量通常约 31t 左右。

穆龙套金矿位于中亚造山带,处在剪切带与断裂带的交汇部位。矿床为规模巨大、构造复杂的“矿楼”状,呈微向东倾的陡立矿柱(Well *et al.*, 2004)。金矿化以石英细网脉状为主(区别于石英脉型的粗脉,也与典型的浸染状蚀变岩型矿化不同),矿脉通常沿着断裂和裂隙分布。由含金的石英网脉,石英-硫化物细脉,石英方解石细脉,石英-电气石脉交错发育而成。

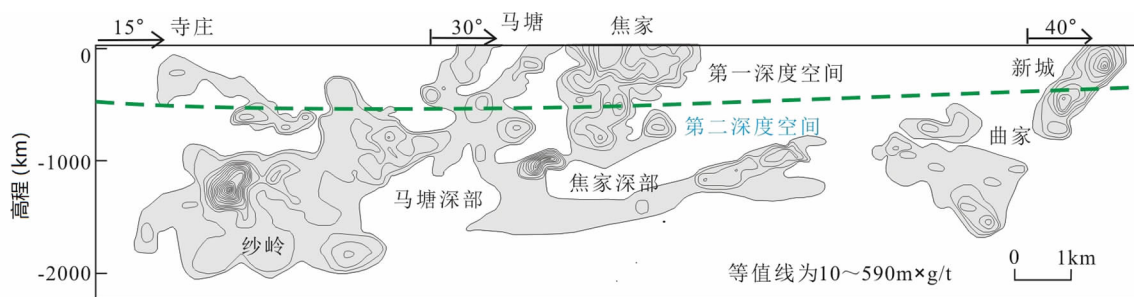


图9 焦家金矿床主矿体品位×厚度等值线垂直纵投影图

Fig. 9 Vertical projection map of grade-thickness contour lines of the main orebody of Jiaojia gold deposit

通过持续的深部勘探,显著增加了金的资源储量,并发现了多个新的金矿化带和矿体。目前已控制矿脉垂直深度达2500~3000m,斜向延深已超过4500m(图8)。揭示出穆龙套金矿深部巨大的金矿资源潜力。

3.2 山东省焦家蚀变岩型金矿床

山东省胶东焦家金矿床是我国破碎带蚀变岩型(焦家式)金矿的典型产地和命名地,受控于焦家断裂。以往沿焦家断裂发现并查明了寺庄、马塘、焦家和新城等多个第一深度空间的金矿床,累计查明金资源储量约300t,目前已基本开采完毕。近年来,通过第二深度空间找矿,陆续发现并探明了焦家深部、马塘深部、纱岭、曲家等深部矿床,在-2200~-600m标高范围内累计查明深部金资源量约1200t(图9)。在莱州吴一村地区实施了一口深度3266.06m的科研深钻,在2416.29~3234.16m控制了焦家金矿带,蚀变带厚度达817.87m。新发现金矿体6层,累计见矿厚度20.87m,平均品位1.85g/t(于学峰等,2019)。

研究发现,以往分别勘查和开采并认为是独立金矿床的多个金矿区,其主要矿体在深部和走向上藕断丝连,实际上构成同一金矿床,这一矿床的深部和浅部总计查明金资源量约1500t,是世界罕见的超巨型金矿床(Song *et al.*, 2014, 2023; 宋明春等, 2019)。第一深度空间的浅部金矿体和第二深度空间的深部金矿体沿焦家断裂带倾斜方向分布,在断裂倾角陡-缓转折和较缓倾斜段赋存厚大矿体,构成阶梯成矿模式(宋明春等, 2012)。在不同区域,浅部和深部矿体之间存在垂直距离150~550m的低品位矿带(Au品位1.0~2.5g/t)或无矿间隔(宋明春等, 2011)。

4 我国第二深度空间金矿找矿技术方法

国际上金矿找矿技术方法通常包括地质学方法、地球化学方法和地球物理方法等。我国以往的浅部金矿勘查主要是采用常规的地球物理和地球化学方法圈定地表或浅部异常体,其后围绕着异常和控矿构造进行普查找矿,地质工作者将这种方法称为“跟着构造走、围着异常转”。但是,第二

深度空间的金矿床埋藏深度大、地表信息弱、找矿线索少,传统技术方法很难探测到深部矿的信息,不能有效用于深部找矿。通过近20余年的勘查实践,目前已初步形成了深部找矿的技术体系。

4.1 就矿找矿和模式找矿

就矿找矿是由朱训于1982年提出的矿产勘查理论方法,其核心是,依据已知找矿线索(就矿)开展地质勘查(找矿)工作,攻深找盲、探边摸底。其理论依据主要是,矿床往往具有集群性、分带性或垂向延伸特征,已知矿体可能是更大成矿系统的一部分;地质构造、岩性、蚀变等控矿因素在空间上具有延续性。其主要找矿路径包括:通过评价已知矿点,检查各类异常或根据其他线索来发现矿床;在已知成矿远景区(带)或已知具有工业价值的矿床周围寻找同类型的新矿床;通过在老矿区追索已知矿体在空间上的延展扩大资源远景;在已知矿床范围内找寻新矿体、新的含矿层位和新的矿化类型;在已知矿床范围内,通过对共生矿产和伴生有益组分的综合评价,综合勘探扩大资源远景。据全国危机矿山接替资源找矿项目管理办公室于2011年编写的《矿山接替资源勘查项目成果报告》,在230多个专项安排的危机矿山勘查项目中,就矿找矿取得了显著成效,新增探明储量的矿产有22种,新增探明储量的矿山有218个。就矿找矿的典型案例如:在内蒙古大营“就煤找铀”,探明具有世界级规模大铀矿;在豫西“就煤找铝”,找到大型铝土矿;世界级资源基地湖南花垣铅锌矿,远景资源量超过70亿t的辽宁大台沟铁矿,世界第一大钨矿江西大湖塘钨矿等。胶东第二深度空间探明的超大型金矿床,是根据浅部金矿体向深部延伸的侧伏、尖灭再现等规律就矿找矿的重要成果。

成矿模式是通过研究矿床的形成机制、控制因素和空间分布规律,建立理论模型,将地质理论与勘查实践结合,从已知矿床中提炼规律,预测未知矿体。基于成矿模式的找矿方法是深部找矿的重要方法,广泛应用的典型成矿模式如:斑岩铜矿成矿模式、火山块状硫化物成矿模式、卡林型金矿成矿模式等。通过深部找矿实践,我国发展了一批具有显著找矿成效的成矿/找矿模式/模型,如勘查区“三位一体”找矿预测模型、“五层楼+地下室”成矿模式、金矿“阶梯”成矿模式等。

表 2 胶东深部金矿找矿主要电磁方法技术要点

Table 2 Technical highlights of main electromagnetic methods for deep gold prospecting in Jiaodong

方法	作用	技术参数	提高分辨率技术要点
CSAMT	识别深度成矿结构面及其变化	发射极距 1.5km、接收极距 10 ~ 60m、收发距约 10km、工作频段 1 ~ 9600Hz	加密测点,控制横向分辨率;加密频点,控制纵向分辨率
SIP	识别局部矿化体	偶极距 100m、供电极距 200 ~ 400m、隔离系数 4 ~ 40、测量频带 0.0156 ~ 256Hz	增大隔离系数及发射功率,获取 2000m 深度的高分辨率数据
MT	识别深部控矿断裂结构及变化	单站五分量数据采集系统、“十”字型装置、接收极距 80 ~ 100m、有效频率 0.01Hz、采集时间 ≥ 8h	基于低频特点,探测深度可达 5000m
WFEM	识别断裂深部形态	发射极距 1 ~ 1.5km、接收极距 50 ~ 100m、收发距 3 ~ 5 倍的 Hmax、发射电流 ≥ 80A、采集频率 3/256 ~ 8192Hz	在 5000m 深度仍保持着较好的综合分辨率

通过胶东深部金矿找矿实践和成矿规律研究发现,控矿断裂沿倾向出现若干个倾角由陡变缓的变化台阶,金矿体主要沿台阶的平缓部位和陡、缓转折部位富集,构成“阶梯”成矿模式(宋明春等, 2012)。根据这一模式,胶东深部金矿找矿突破传统的“圈异常”找矿范式,提出了以探测深部赋矿台阶为目标的深部阶梯找矿新方法(宋明春等, 2022)。应用这一方法,在胶东 500 ~ 2000m 深度范围内探明了多个资源量达 100t 以上的金矿床。实现了第二深度空间找矿重大突破。

4.2 多深度层次地球物理勘查技术

受不同地球物理方法的分辨率、探测深度,以及不同深度岩石物性和成矿信息特征所限,不同深度的金矿勘查采用差异化探测技术。地球物理方法的探测深度取决于方法原理、仪器性能、地质条件及噪声干扰等因素(Xue *et al.*, 2020),常用于金矿勘查的地球物理方法的一般探测深度是:直流电阻率法 0.1 ~ 1km,激发极化法(IP) 50 ~ 800m,瞬变电磁法(TEM) 10m ~ 1.5km,可控源音频大地电磁(CSAMT) 0.1 ~ 3km,广域电磁法(WFEM) 0.1 ~ 5km,天然源大地电磁(MT) 1km ~ 数百 km,高精度磁测 0.1m ~ 10km,反射地震 0.1 ~ 15km。

通过胶东地区金矿找矿实践,建立了多深度层次金矿勘查地球物理技术体系。针对地表 ~ 500m 深度的浅部勘查,主要采用“电阻率法 + 激发极化法 + 磁法”组合,圈定矿化异常体和断裂构造;针对 500 ~ 2000m 深度的第二深度空间探矿增储,通过“音频大地电磁 + 频谱激电”测深,提取充电率、时间常数与频率相关系数等多参数异常信息;针对 2000 ~ 3000m 深度的资源潜力评价,应用“广域电磁/大地电磁 + 反射地震”联合反演方法,捕捉视电阻率梯级带异常和地震断面波振幅突变信息(宋明春等, 2022)。该技术体系通过“深度分层-方法优选-参数优化”(表 2),实现了胶东重要矿区 2000m 深度矿体的精细定位,最大有效探测深度突破 3000m。

4.3 三维地质建模和智能预测技术

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,大数据时代为第二深度空间找矿与资源评价提供了新的契机和机遇。我国在金属矿产三维地质建模与智能预测领域已取得了成功应用,大数据、人工智能与地质建模相结合,显著提升了深部资源勘探效率。

在华北重点金矿集区(山东焦家-三山岛、招平南段和辽宁五龙、青城子),较系统地收集和构建了地学多要素数据,开展了矿集区的三维/四维地质建模,拓展了矿集区尺度的多元地学三维勘探变量,优选了 1000 ~ 3000m 深度的找矿靶区,部分找矿靶区深度达 3000 ~ 5000m(王功文等, 2021)。针对胶东成矿带,建立了区域、主要金矿床集中区和典型矿床多尺度三维地质模型,提出了基于阶梯成矿模式、重点根据断裂倾角梯变和缓倾角段控矿规律的深部找矿靶区预测方法和基于控矿断裂浅部资源量的深部金矿资源潜力预测方法,预测三山岛、焦家、招平三条控矿断裂 - 5000 ~ - 2000m 深度金资源量约 3598 ~ 6490t,认为胶东金资源总量有望超过万吨(宋明春等, 2023b);提出了浅部数据驱动-深部知识驱动-浅部、深部结合的耦合建模思路与方法,构建了三山岛、焦家和招平断裂带 3000m 深度以浅的成矿构造三维模型,圈定了 12 个深部金矿找矿靶区(毛先成等, 2020)。

5 结论

在全球具有代表性的 9 种金矿成因类型中,除浅成热液金矿外,多数矿床的最大成矿深度在 6 ~ 10km,而造山型金矿的最大成矿深度可达 20km。我国地质构造类型多样,许多区域具备深部成矿的物质基础。而且,我国金矿资源分布广泛,成因类型涵盖了世界主要类型,存在若干成矿带和金矿集区,大部分成矿带/金矿集区勘查深度尚不足 500m。21 世纪以来,我国不断强化第二深度空间金矿勘查,在华北陆块北缘、辽东-吉南、秦岭等成矿带,均取得了深部找矿突破,目前形成了三山岛、焦家、玲珑 3 个千吨级金矿田/床。

胶东、辽东等金矿集区的深部找矿突破,暗示我国主要成矿带/矿集区第二深度空间找矿潜力巨大。在我国 55 个金矿集区中,成矿密度和成矿强度大的豫西灵宝(崤山)、桐柏、燕辽、赣东北和闽西南等矿集区,以及矿产地数量多的陕

甘川、五台-太行、滇黔桂等矿集区,有望在第二深度空间找到大型、超大型矿床。

地质学、地球物理学中各分支学科、地球化学、计算机科学等多学科知识交叉,以及与 AI 找矿技术的融合,将能够高效处理和分析多源、异构海量地质数据,有效识别深部层序与结构和矿化信息,助力推动深部智能勘查与精准找矿。

致谢 感谢中国科学院地质与地球物理研究所李兴辉副研究员在文字校对方面的帮助。感谢审稿人提出的宝贵修改意见。

References

- Ague JJ. 2003. Fluid flow in the deep crust. *Treatise on Geochemistry*, 3: 195-228
- Bao XS, Yang LQ, He WY, Gao X and Li MM. 2019. Constraints of chemical compositions of biotite and zircon on crystallization conditions of magma: An example from the Beiya giant Au deposit, SW China. *Acta Petrologica Sinica*, 35(5): 1447-1462 (in Chinese with English abstract)
- Cai WY. 2020. Metallogenesis of copper-molybdenum-gold polymetallic in the Duobaoshan orefield, Heilongjiang Province. Ph. D. Dissertation. Changchun: Jilin University (in Chinese with English abstract)
- Chao WX. 2018. Geological characteristics and genesis of Zhengguang gold deposit in Heihe City, Heilongjiang Province. Master Degree Thesis. Changchun: Jilin University (in Chinese with English abstract)
- Chen JL, Chen YN, Chen JD and Guo P. 2021. Orogenic cause and prospecting potential of Laowan gold deposit in Tongbai-Dabie orogenic belt. *Metal Mine*, (2): 127-138 (in Chinese with English abstract)
- Chen K, Liu ZF, Shao YJ and Liu QQ. 2021. Genesis of Dongguashan copper-gold deposit in Tongling ore concentration area, Anhui. *Mineral Exploration*, 12(5): 1152-1160 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ. 2013. The development of continental collision metallogeny and its application. *Acta Petrologica Sinica*, 29(1): 1-17 (in Chinese with English abstract)
- Deng J, Wang QF, Zhang L, Xue SC, Liu XF, Yang L, Yang LQ, Qiu KF and Liang YY. 2023. Metallogenetic model of Jiaodong-type gold deposits, eastern China. *Science China (Earth Sciences)*, 66(10): 2287-2310
- Di QY, Xue GQ, Lei D, Wang ZX, Li H and Olalekan F. 2020. Demonstration of the newly developed MTEM systems for gold detection in China. *Geological Journal*, 55(3): 1763-1770
- Fan ZL, Xu XC, Chen LJ, He J and Xie QQ. 2016. The geological features and metallogenetic setting of the porphyry copper-molybdenum-gold deposits in Tongling ore district. *Acta Petrologica Sinica*, 32(2): 351-368 (in Chinese with English abstract)
- Gao G, Zhu JY and Li K. 2019. Geological characteristics and genesis of Beiya gold polymetallic deposit in northwestern Yunnan Province. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 34(2): 179-186 (in Chinese with English abstract)
- He ZH, Zhou YM, He WY, Su GS, Li WH and Yang SW. 2013. Genetic types and metallogenetic regularity of Beiya superlarge gold-polymetallic deposit, northwestern Yunnan. *Mineral Deposits*, 32(2): 244-258 (in Chinese with English abstract)
- Hou ZQ. 2010. Metallogenesis of continental collision. *Acta Geologica Sinica*, 84(1): 30-58 (in Chinese with English abstract)
- Kempe U, Belyatsky B, Krymsky R, Kremenetsky A and Ivanov P. 2001. Sm-Nd and Sr isotope systematics of scheelite from the giant Au(-W) deposit Muruntau (Uzbekistan): Implications for the age and sources of Au mineralization. *Mineralium Deposita*, 36(5): 379-392
- Liu BZ, Guo XD, Fu B, Miao G, Zhang SY, Pan ZN and Liu H. 2021. Metallogenic geological characteristics and prospecting direction in Hadamengou Gold District in Wulashan, Inner Mongolia. *Gold*, 42(8): 23-26 (in Chinese with English abstract)
- Liu JZ, Yang CF, Wang ZP, Wang DF, Qi LS, Li JH, Hu CW and Xu LY. 2017. Geological research of Shuiyindong gold deposit in Zhenfeng County, Guizhou Province. *Geological Survey of China*, 4(2): 32-41 (in Chinese with English abstract)
- Lü QT, Dong SW, Shi DN, Tang JT, Jiang GM, Zhang YQ, Xu T and SinoProbe-03-CJ Group. 2014. Lithosphere architecture and geodynamic model of Middle and Lower Reaches of Yangtze Metallogenic Belt: A review from SinoProbe. *Acta Petrologica Sinica*, 30(4): 889-906 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW and Wang ZL. 2000. A preliminary study on time limits and geodynamic setting of large-scale metallogeny in East China. *Mineral Deposits*, 19(4): 289-296 (in Chinese with English abstract)
- Mao XC, Wang Q, Chen J, Deng H, Liu ZK, Wang JL, Chen JP and Xiao KY. 2020. Three-dimensional modeling of deep metallogenic structure in northwestern Jiaodong Peninsula and its gold prospecting significance. *Acta Geoscientia Sinica*, 41(2): 166-178 (in Chinese with English abstract)
- Maruyama S, Santosh M and Zhao D. 2007. Superplume, supercontinent, and post-perovskite: Mantle dynamics and anti-plate tectonics on the Core-Mantle Boundary. *Gondwana Research*, 11(1-2): 7-37
- Meng BD, Shi YJ and Li MF. 2016. Metallogenic model of the Sawayton gold deposit, Wuqia County, Xinjiang. *Xinjiang Nonferrous Metals*, 39(1): 57-59 (in Chinese)
- Micklethwaite S, Sheldon HA and Baker T. 2010. Active fault and shear processes and their implications for mineral deposit formation and discovery. *Journal of Structural Geology*, 32(2): 151-165
- Niu SY, Chen C, Zhang FX, Sun AQ, Wang FX, Ma BJ, Zhang JZ, Li FY, Wang BD and Xu CS. 2022. Metallogenic theory of mantle branch structure and its prospecting practices. *Journal of Hebei GEO University*, 45(2): 1-22 (in Chinese with English abstract)
- Niu SY, Chen C, Song MC, Zhang FX, Ma BJ and Hu HB. 2025. Metallogenic and ore-controlling processes of thermal plume uprising (core-mantle-crust interaction) and mantle branch structures: A case study of the Guojiadian mantle branch structure's role in ore controlling. *Journal of Hebei GEO University*, 48(5): 1-11 (in Chinese with English abstract)
- Pei RF, Qiu XP, Yin BC and Xiong QY. 1999. The explosive anomaly of ore-forming processes and superaccumulation of metals. *Mineral Deposits*, 18(4): 333-340 (in Chinese with English abstract)
- Qin KZ, Zhao JX, Fan HR, Tang DM, Li GM, Yu KL, Cao MJ and Su BX. 2021. On the ore-forming depth and possible maximum vertical extension of the major type ore deposits. *Earth Science Frontiers*, 28(3): 271-294 (in Chinese with English abstract)
- Robert F, Brommecker R, Bourne BT, Dobak PJ, McEwan CJ, Rowe RR and Zhou X. 2007. Models and exploration methods for major gold deposit types. In: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration. Toronto, 691-711
- Song GX, Qin KZ, Wang L, Guo JH, Li ZZ, Tong KY, Zou XY and Li GM. 2015. Type, zircon U-Pb age and Paleo-volcano edifice of Zhengguang gold deposit in Duobaoshan orefield in Heilongjiang Province, NE-China. *Acta Petrologica Sinica*, 31(8): 2402-2416 (in Chinese with English abstract)
- Song MC, Meng QB, Yang CH, Jiao XM, Cui SX, Yang ZL and Jiang HL. 2007. Discovery and prospecting significance of the deep-seated giant gold deposit in the Sizhuang mining area, Jiaodong. *Geology in China*, 34(Suppl. 1): 220-224 (in Chinese)
- Song MC, Cui SX, Yang ZL, Jiang HL, Yang CH and Jiao XM. 2008. Great progress and far-reaching significance of deep exploration in the Jiaojia metallogenic belt, Shandong province. *Geology and Prospecting*, 44(1): 1-8 (in Chinese with English abstract)

- Song MC, Song YX, Cui SX, Jiang HL, Yuan WH and Wang HJ. 2011. Characteristic comparison between shallow and deep-seated gold ore bodies in Jiaojia superlarge gold deposit, northwestern Shandong peninsula. *Mineral Deposits*, 30(5): 923-932 (in Chinese with English abstract)
- Song MC, Yi PH, Xu JX, Cui SX, Shen K, Jiang HL, Yuan WH and Wang HJ. 2012. A step metallogenetic model for gold deposits in the northwestern Shandong Peninsula, China. *Science China (Earth Sciences)*, 55(6): 940-948
- Song MC, Deng J, Yi PH, Yang LQ, Cui SX, Xu JX, Zhou ML, Huang TL, Song GZ and Song YX. 2014. The kiloton class Jiaojia gold deposit in eastern Shandong province and its genesis. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 88(3): 801-824
- Song MC, Li SZ, Yi PH, Cui SX, Xu JX, Lü GX, Song YX, Jiang HL, Zhou ML, Zhang PJ, Huang TL, Liu CC and Liu DH. 2014. Classification and metallogenic theory of the Jiaojia-style gold deposit in Jiaodong Peninsula, China. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 44(1): 87-104 (in Chinese with English abstract)
- Song MC. 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*, 34(9): 1758-1771 (in Chinese with English abstract)
- Song MC, Li SZ, Santosh M, Zhao SJ, Yu S, Yi PH, Cui SX, Lü GX, Xu JX, Song YX and Zhou ML. 2015. Types, characteristics and metallogenesis of gold deposits in the Jiaodong Peninsula, Eastern North China Craton. *Ore Geology Reviews*, 65: 612-625
- Song MC, Song YX, Ding ZJ, Wei XF, Sun SL, Song GZ, Zhang JJ, Zhang PJ and Wang YG. 2019. The discovery of the Jiaojia and the Sanshandao giant gold deposits in Jiaodong Peninsula and discussion on the relevant issues. *Geotectonica et Metallogenia*, 43(1): 92-110 (in Chinese with English abstract)
- Song MC, Xue GQ, Liu HB, Li YX, He CY, Wang HJ, Wang B, Song YX and Li SY. 2021. A geological-geophysical prospecting model for deep-seated gold deposits in the Jiaodong Peninsula, China. *Minerals*, 11(12): 1393
- Song MC, Yang LQ, Fan HR, Yu XF, Ding ZJ, Zhang YW, Qiu KF, Li J, Zhang L, Wang B and Li SY. 2022. Current progress of metallogenic research and deep prospecting of gold deposits in the Jiaodong Peninsula during 10 years for Exploration Breakthrough Strategic Action. *Geological Bulletin of China*, 41(6): 903-935 (in Chinese with English abstract)
- Song MC, Wang L, Song YX, Li J, Wang B, Wei XF, Zhang JJ and Song GZ. 2023. Geometry and origin of supergiant gold deposits in the Jiaodong gold province, eastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 254: 105744
- Song MC, Song YX, Li J, Liu HB, Li J, Dong LL, He CY and Wang RS. 2023a. Thermal doming-extension metallogenic system of Jiaodong type gold deposits. *Acta Petrologica Sinica*, 39(5): 1241-1260 (in Chinese with English abstract)
- Song MC, Zhou ML, Bao ZY, Wen GJ, Li SY, Fan JM, Yang ZL, He CY, Gao MX, Wang HJ, Wang YQ and Li RX. 2023b. 3D metallogenic prediction of deep gold deposits for Jiaodong Peninsula and its huge resource potential. *Metal Mine*, (1): 246-258 (in Chinese with English abstract)
- Song MC, Li J, Lü S, Xiao QL, Liu Y, Li Z, Tang ZY and Wang YC. 2025. Metallogenic system and prospecting potential of gold deposits in eastern Hebei province. *Mineral Deposits*, 44(6): 1149-1180 (in Chinese with English abstract)
- Tang L, Lin CG, Cheng ZZ, Jia RY, Li HR and Li KN. 2020. 3D characteristics of primary halo and deep prospecting prediction in the Zaozigou gold deposit, Hezuo City, Gansu Province. *Geological Bulletin of China*, 39(8): 1173-1181 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW. 2001. The exchange of substance and energy, different sphere coupling and deep dynamical process within the earth. *Earth Science Frontiers*, 8(3): 1-8 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW. 2002. Deep structure of the earth, deep dynamic process and leading direction in China. *Geological Review*, 48(2): 125-139 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW. 2003. Dynamic process of substance and energy exchanges in depths of the earth and formation of mineral resources. *Geotectonica et Metallogenia*, 27(1): 3-21 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW. 2005. Dynamic processes of material and energy exchange in the Earth's interior. In: Li XX (ed.). 100 Interdisciplinary Science Puzzles of the 21st Century. Beijing: Science Press, 327-338 (in Chinese)
- Teng JW. 2006. Strengthening geophysical exploration and exploitation of metallic minerals in the second deep space of the crustal interior. *Geological Bulletin of China*, 25(7): 767-771 (in Chinese with English abstract)
- Teng JW, Xue GQ and Song MC. 2022. Theory on exploring mineral resources in the second deep space and practices with electromagnetic method. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 65(10): 3975-3985 (in Chinese with English abstract)
- Tian XS, Sun XC, Qiu KF and Wang YX. 2024. Gold mineralization characteristics and prospecting potential evaluation of Zaozigou gold deposit in the West Qinling orogenic belt. *Gold*, 45(4): 65-70 (in Chinese with English abstract)
- Wang DH, Qin JH, Wang CH, Liu SB and Jiang B. 2025. Metallogenic regularity, centennial exploration results of gold deposit in China, and suggestions for a new round of prospecting: Research and compilation of "Geology of Mineral Resources of China · Gold Ore Volume". *Acta Geoscientia Sinica*, 46(1): 20-34 (in Chinese with English abstract)
- Wang GW, Zhang ZQ, Li RX, Li JJ, Sha DM, Zeng QD, Pang ZS, Li DP and Huang LL. 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
- Wang RT, Wei YR, Li QF, Gao Y, Ji YF, Pang ZJ and Cheng H. 2025. A brief analysis of green exploration, development and comprehensive utilization of resources in the Baguamiao Gold deposit, Feng County, Shaanxi Province, China. *Acta Mineralogica Sinica*, 45(1): 1-13 (in Chinese with English abstract)
- Wang W and Liu B. 2025. Countermeasures and suggestions for deep gold mineral resource development in China. *Gold*, 46(10): 11-18 (in Chinese with English abstract)
- Wang Y, Wang DH, Wang CH, Li H, Liu JY, Sun H, Gao XY, Jin YN, Qin Y and Huang F. 2024. Quantitative research on metallogenic regularity of gold deposits in China based on geological big data. *Earth Science Frontiers*, 31(4): 438-455 (in Chinese with English abstract)
- Well YJ, Yantzen V, Grapnerl, *et al.* 2004. Marinfall Uzbekistan; Report on CERCAMS Research Project. Spring Hill: Taylor Wall & Associate
- Xu JX, Zeng ZL, Wang DH, Chen ZH, Liu SB, Wang CH and Ying LJ. 2008. A new type of tungsten deposit in southern Jiangxi and the new model of "Five Floors + Basement" for prospecting. *Acta Geologica Sinica*, 82(7): 880-887 (in Chinese with English abstract)
- Xue GQ, Li H, He YM, Xue JJ and Wu X. 2020. Development of the inversion method for transient electromagnetic data. *IEEE Access*, 8: 146172-146181
- Yakovlev YN and Kazansky. 1999. Comparison of mineralization between the Kola Peninsula superdeep drilling profile and the surface. Ding WL (Trans.). *World Geology*, 18(4): 36-46 (in Chinese)
- Yao L, Lü ZC, Chen H and Zhang MC. 2018. A reappraisal on the new discovery of deep ore exploration of mines and adjacent areas and its significances. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 54(2): 296-307 (in Chinese with English abstract)
- Ye TZ, Lü ZC, Pang ZS, Zhang DH, Liu SY, Wang QM, Liu JJ, Cheng ZZ, Li CL, Xiao KY, Zhen SM, Du ZZ and Chen ZL. 2014. Prospecting Prediction Theory and Methods for Exploration Areas (General Theory). Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)

Yu XF, Yang DP, Li DP, Shan W, Xiong YX, Chi NJ, Liu PR and Yu LH. 2019. Mineralization characteristics and geological significance in 3000m depth of Jiaojia gold metallogenic belt, Jiaodong Peninsula. *Acta Petrologica Sinica*, 35(9): 2893-2910 (in Chinese with English abstract)

Zeng QD, Wang FW, Liu FX, Tian SH, Yang JH and Zhu RX. 2025. New discovery of altered-rock type gold deposit at Wulong in the Liaodong gold province. *Acta Petrologica Sinica*, 41(9): 2889-2896 (in Chinese with English abstract)

Zhai YS, Deng J, Wang JP, Peng RM, Liu JJ and Yang LQ. 2004. Researches on deep ore prospecting. *Mineral Deposits*, 23(2): 142-149 (in Chinese with English abstract)

Zhang FW. 2021. Analysis of geological characteristics and deep prospecting potential of Baguamiao gold deposit. *Gansu Science and Technology*, 37(20): 45-48 (in Chinese with English abstract)

Zhang HQ, Wang YW, Sun RL, Yang WL and Chen Y. 2025. Characteristics of porphyry metallogenic system and orebody localization regularities of Yixingzhai gold deposit. *Mineral Deposits*, 44(2): 299-316 (in Chinese with English abstract)

Zhang LZ. 2018. Element geochemistry and age of the altered-porphyry gold mineralization in Yixingzhai gold deposit, Fanshi city, Shanxi Province. *Geology and Mineral Resources of South China*, 34(2): 134-141 (in Chinese with English abstract)

Zhao ZH, Zheng WZ, Qu H, Guo Y, Li CL, Wang Z and Zhang JF. 2012. Cu-Au mineralization and metallogenic regularity of Duobaoshan area, Heilongjiang Province. *Mineral Deposits*, 31(3): 601-614 (in Chinese with English abstract)

Zhou F, Wang BD, He J, Hao M, Wang P and Dong YX. 2020. Deep ore body targeting based on 3D integrated information. *Earth Science*, 45(8): 3028-3039 (in Chinese with English abstract)

Zhu RX, Fan HR, Li JW, Meng QR, Li SR and Zeng QD. 2015. Decratonic gold deposits. *Science China (Earth Sciences)*, 58(9): 1523-1537

Zhu RX, Yang JH, Wang GW, Zeng QD, Xue GQ, Xu T, Li XH, Zhang P, Lei D and Zhu G. 2024. The genesis and resource potential of gold deposits in the Liaodong Peninsula. *Science China (Earth Sciences)*, 67(3): 657-672

附中文参考文献

鲍新尚, 杨立强, 和文言, 高雪, 李萌萌. 2019. 黑云母和锆石化学组分对岩浆结晶条件的约束: 以滇西北衙超大型金矿床为例. *岩石学报*, 35(5): 1447-1462

蔡文艳. 2020. 黑龙江省多宝山矿集区铜-钼-金多金属成矿作用研究. 博士学位论文. 长春: 吉林大学

晁温馨. 2018. 黑龙江省黑河市争光金矿矿床地质特征及成因研究. 硕士学位论文. 长春: 吉林大学

陈建立, 陈英男, 陈金铎, 郭鹏. 2021. 桐柏-大别造山带老湾金矿造山型成因及找矿前景. *金属矿山*, (2): 127-138

陈可, 刘忠法, 邵拥军, 刘清泉. 2021. 铜陵矿集区冬瓜山铜(金)矿床成因分析. *矿产勘查*, 12(5): 1152-1160

陈衍景. 2013. 大陆碰撞成矿理论的创建及应用. *岩石学报*, 29(1): 1-17

邓军, 王庆飞, 张良, 薛胜超, 刘学飞, 杨林, 杨立强, 邱昆峰, 梁亚运. 2023. 胶东型金矿成因模型. *中国科学(地球科学)*, 53(10): 2323-2347

范子良, 徐晓春, 陈林杰, 何俊, 谢巧勤. 2016. 安徽铜陵矿集区斑岩型铜钼金矿床地质特征及成矿背景. *岩石学报*, 32(2): 351-368

高歌, 朱杰勇, 李科. 2019. 滇西北衙金多金属矿床地质特征及成因探讨. *地质找矿论丛*, 34(2): 179-186

和中华, 周云满, 和文言, 苏纲生, 李万华, 杨绍文. 2013. 滇西北衙超大型金多金属矿床成因类型及成矿规律. *矿床地质*, 32(2): 244-258

侯增谦. 2010. 大陆碰撞成矿论. *地质学报*, 84(1): 30-58

刘必政, 郭晓东, 付斌, 缪广, 张少远, 潘振宁, 刘华. 2021. 内蒙古乌拉山哈达门沟金矿区成矿地质特征及找矿方向. *黄金*, 42(8): 23-26

刘建中, 杨成富, 王泽鹏, 王大福, 祁连素, 李俊海, 胡承伟, 徐良易. 2017. 贵州省贞丰县水银洞金矿床地质研究. *中国地质调查*, 4(2): 32-41

吕庆田, 董树文, 史大年, 汤井田, 江国明, 张永谦, 徐涛, SinoProbe-03-CJ 项目组. 2014. 长江中下游成矿带岩石圈结构与成矿动力学模型——深部探测综述. *岩石学报*, 30(4): 889-906

毛景文, 王志良. 2000. 中国东部大规模成矿时限及其动力学背景的初步探讨. *矿床地质*, 19(4): 289-296

毛先成, 王琪, 陈进, 邓浩, 刘占坤, 王金利, 陈建平, 肖克炎. 2020. 胶西北金矿集区深部成矿构造三维建模与找矿意义. *地球学报*, 41(2): 166-178

孟宝东, 石玉君, 李明飞. 2016. 新疆乌恰县萨瓦亚尔顿金矿床成矿模式探讨. *新疆有色金属*, 39(1): 57-59

牛树银, 陈超, 张福祥, 孙爱群, 王丰翔, 马宝军, 张建珍, 李凤友, 王宝德, 许传诗. 2022. 幔枝构造成矿理论及其找矿实践. *河北地质大学学报*, 45(2): 1-22

牛树银, 陈超, 宋明春, 张福祥, 马宝军, 胡华斌. 2025. 地球之核-幔-壳热柱上涌与幔枝构造成矿控矿作用——以郭家店幔枝构造控矿作用为例. *河北地质大学学报*, 48(5): 1-11

裴荣富, 邱小平, 尹冰川, 熊群尧. 1999. 成矿作用爆发异常及巨量金属堆积. *矿床地质*, 18(4): 333-340

秦克章, 赵俊兴, 范宏瑞, 唐冬梅, 李光明, 余可龙, 曹明坚, 苏本勋. 2021. 试论主要类型矿床的形成深度与最大延深垂幅. *地学前缘*, 28(3): 271-294

宋国学, 秦克章, 王乐, 郭继海, 李真真, 佟匡胤, 邹心宇, 李光明. 2015. 黑龙江多宝山矿田争光金矿床类型、U-Pb 年代学及古火山机构. *岩石学报*, 31(8): 2402-2416

宋明春, 孟庆宝, 杨承海, 焦秀美, 崔书学, 杨之利, 姜洪利. 2007. 胶东寺庄矿区深部特大型金矿的发现及其找矿意义. *中国地质*, 34(增1): 220-224

宋明春, 崔书学, 杨之利, 姜洪利, 杨承海, 焦秀美. 2008. 山东焦家金矿带深部找矿的重大突破及其意义. *地质与勘探*, 44(1): 1-8

宋明春, 宋英昕, 崔书学, 姜洪利, 袁文花, 王化江. 2011. 胶东焦家特大型金矿床深、浅部矿体特征对比. *矿床地质*, 30(5): 923-932

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. *中国科学(地球科学)*, 42(7): 992-1000

宋明春, 李三忠, 伊丕厚, 崔书学, 徐军祥, 吕古贤, 宋英昕, 姜洪利, 周明岭, 张丕建, 黄太岭, 刘长春, 刘殿浩. 2014. 中国胶东焦家式金矿类型及其成矿理论. *吉林大学学报(地球科学版)*, 44(1): 87-104

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, 魏绪峰, 孙绍立, 宋国政, 张军进, 张丕建, 王永国. 2019. 胶东焦家和三山岛巨型金矿床的发现及有关问题讨论. 大地构造与成矿学, 43(1): 92-110

宋明春, 杨立强, 范宏瑞, 于学峰, 丁正江, 张永文, 邱昆峰, 李杰, 张良, 王斌, 李世勇. 2022. 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, 刘洪波, 李健, 董磊磊, 贺春艳, 王润生. 2023a. 胶东型金矿热隆-伸展成矿系统. 岩石学报, 39(5): 1241-1260

宋明春, 周明岭, 鲍中义, 温桂军, 李世勇, 范家盟, 杨真亮, 贺春艳, 高美霞, 王洪军, 王永庆, 李瑞翔. 2023b. 胶东深部金矿三维成矿预测及巨大的资源潜力. 金属矿山, (1): 246-258

宋明春, 李杰, 吕水, 肖庆玲, 刘育, 李振, 唐宗源, 王一存. 2025. 冀东地区金矿床成矿系统及找矿潜力. 矿床地质, 44(6): 1149-1180

汤磊, 林成贵, 程志中, 贾儒雅, 李鸿睿, 李康宁. 2020. 甘肃省合作市早子沟金矿原生晕三维特征及深部找矿预测. 地质通报, 39(8): 1173-1181

滕吉文. 2001. 地球内部物质、能量交换与资源和灾害. 地学前缘, 8(3): 1-8

滕吉文. 2002. 中国地球深部结构和深层动力过程与主体发展方向. 地质论评, 48(2): 125-139

滕吉文. 2003. 地球深部物质和能量交换的动力过程与矿产资源的形成. 大地构造与成矿学, 27(1): 3-21

滕吉文. 2005. 地球内部物质与能量交换和动力学过程. 见: 李喜先编. 21 世纪 100 个交叉科学难题. 北京: 科学出版社, 327-338

滕吉文. 2006. 强化开展地壳内部第二深度空间金属矿产资源地球物理找矿、勘探和开发. 地质通报, 25(7): 767-771

滕吉文, 薛国强, 宋明春. 2022. 第二深度空间矿产资源探查理念与电磁法找矿实践. 地球物理学报, 65(10): 3975-3985

田向盛, 孙新春, 邱昆峰, 王玉玺. 2024. 西秦岭造山带早子沟金矿床金矿化特征及找矿潜力评价. 黄金, 45(4): 65-70

王登红, 秦锦华, 王成辉, 刘善宝, 江彪. 2025. 中国金矿成矿规律与百年勘查成果及新一轮找矿突破行动建议——《中国矿产地质志·金矿卷》研编. 地球学报, 46(1): 20-34

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

王瑞廷, 卫亚儒, 李青锋, 高毅, 冀月飞, 庞振甲, 成欢. 2025. 陕西凤县八卦庙金矿床绿色勘查开发与资源综合利用浅析. 矿物学报, 45(1): 1-13

王伟, 刘博. 2025. 中国深部金矿资源开发对策和建议. 黄金, 46(10): 11-18

王岩, 王登红, 王成辉, 黎华, 刘金宇, 孙赫, 高新宇, 金雅楠, 秦燕, 黄凡. 2024. 基于地质大数据的中国金矿时空分布规律定量研究. 地学前缘, 31(4): 438-455

许建祥, 曾载淋, 王登红, 陈郑辉, 刘善宝, 王成辉, 应立娟. 2008. 赣南钨矿新类型及“五层楼+地下室”找矿模型. 地质学报, 82(7): 880-887

亚科夫列夫 Ю. И., 卡赞斯基 В. И., 丁万烈. 1999. 科拉半岛超深钻井剖面与地表的矿化对比. 世界地质, 18(4): 36-46

姚磊, 吕志成, 陈辉, 张明超. 2018. 再谈矿山深部及外围找矿新发现及意义. 南京大学学报(自然科学), 54(2): 296-307

叶天竺, 吕志成, 庞振山, 张德会, 刘士毅, 王全明, 刘家军, 程志中, 李超岭, 肖克炎, 甄世民, 杜泽忠, 陈正乐. 2014. 勘查区找矿预测理论与方法(总论). 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(9): 2893-2910

曾庆栋, 汪凤伟, 刘福兴, 田树海, 杨进辉, 朱日祥. 2025. 辽东金矿省五龙蚀变岩型金矿新发现. 岩石学报, 41(9): 2889-2896

翟裕生, 邓军, 王建平, 彭润民, 刘家军, 杨立强. 2004. 深部找矿研究问题. 矿床地质, 23(2): 142-149

张凤巍. 2021. 八卦庙金矿地质特征及深部找矿潜力分析. 甘肃科技, 37(20): 45-48

张会琼, 王玉往, 孙荣良, 杨卫立, 陈昱. 2025. 义兴寨金矿床斑岩成矿系统特征与矿体定位规律. 矿床地质, 44(2): 299-316

张立中. 2018. 山西省繁峙义兴寨金矿新发现蚀变斑岩型金矿体的地质地球化学特征与成矿时代. 华南地质与矿产, 34(2): 134-141

赵忠海, 郑卫政, 曲晖, 郭艳, 李成禄, 王卓, 张俭峰. 2012. 黑龙江多宝山地区铜金成矿作用及成矿规律. 矿床地质, 31(3): 601-614

周放, 王保弟, 贺娟, 郝明, 王鹏, 董芸希. 2020. 三维综合信息分析圈定北衙金矿床深部靶区. 地球科学, 45(8): 3028-3039

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. 中国科学: 地球科学, 45(8): 1153-1168

朱日祥, 杨进辉, 王功文, 曾庆栋, 薛国强, 徐涛, 李兴辉, 张朋, 雷达, 朱光. 2024. 辽东地区金矿床成因与资源潜力. 中国科学(地球科学), 54(3): 677-692