

doi: 10.12097/gbc.2024.12.002

矽卡岩矿床模型研究

谢桂青^{1,2}, 纪云昊², 吴晓林², 李伟², 朱乔乔¹, 张志远³

XIE Guiqing^{1,2}, JI Yunhao², WU Xiaolin², LI Wei², ZHU Qiaoqiao¹, ZHANG Zhiyuan³

1. 中国地质科学院矿产资源研究所/自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

2. 中国地质大学(北京)自然资源部战略性金属矿产找矿理论与技术重点实验室, 北京 100083;

3. 河北地质大学河北省战略性关键矿产资源重点实验室, 河北 石家庄 050031

1. Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Resources Assessment, MNR/Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2. China University of Geosciences (Beijing), Key Laboratory for Exploration Theory & Technology of Critical Mineral Resources MNR, Beijing 100083, China;

3. Hebei Key Laboratory of Strategic Critical Mineral Resources, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China

摘要:【研究目的】矽卡岩矿床是地壳中最丰富的矿床类型之一,是中国多数成矿区带的主攻找矿类型之一。矿床模型不仅用于刻画成矿理论,而且可以用于指导找矿勘查,是评价未发现矿床的重要技术方法,因此,矽卡岩矿床的矿床模型一直受到高度关注,但系统总结近年研究进展相对薄弱。【研究方法】全面收集国内外矽卡岩矿床的资料,结合笔者长达20余年的研究成果,综合分析矽卡岩矿床模型的研究进展。【研究结果】叙述全球矽卡岩矿床的研究历史和主要类型,总结矽卡岩矿床的矿物组合和分带模式及其控制因素,综述与斑岩有关的矽卡岩铜多金属矿床、远成矽卡岩矿床和交代火成岩矽卡岩矿床的研究现状。以中国长江中下游和江南造山带中段湘中地区矽卡岩矿床为对象,从成矿系统角度,构建氧化性矽卡岩铜铁金矿床组合模型和还原性矽卡岩钨金锑矿床组合模型。【结论】两组成矿系统矿床模型拓宽了找矿方向,展望了矽卡岩矿床模型未来研究方向,为新一轮找矿突破战略行动提供借鉴和参考。

关键词: 矽卡岩矿床; 矿物组合; 分带模式; 矿床模型; 成矿系统

创新点: 研究总结了氧化性矽卡岩铜铁金成矿系统组合模型和还原性矽卡岩钨金锑成矿系统模型。

中图分类号: P588.31⁺2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2025)02/03-0201-19

Xie G Q, Ji Y H, Wu X L, Li W, Zhu Q Q, Zhang Z Y. Research on skarn deposit models. *Geological Bulletin of China*, 2025, 44(2/3): 201-219

Abstract: [Objective] Skarn deposits are one of the most abundant types of ore deposit in the Earth's crust and are a major target for mineral exploration in many metallogenic belts across China. Deposit models serve as graphical representations of metallogenic theories and as indispensable tools for guiding exploration efforts and assessing undiscovered mineral resources. Therefore, the deposit model of skarn deposits has received significant attention. However, systematic summaries of recent research progress are relatively limited. [Methods] A comprehensive collection of domestic and international data on skarn deposits is undertaken, combined with the author's over 20 years of research, to analyze the progress of research on skarn deposit models. [Results] The study outlines the global research history and primary types of skarn deposits, summarizes their mineral assemblages, zoning patterns, and controlling factors, and reviews the current state of research on skarn copper-polymetallic deposits associated with porphyry systems, distal skarn deposits, and those formed by the alteration of igneous rocks. This study uses skarn deposits from the Middle to Lower Yangtze River region and

收稿日期: 2024-12-01; 修订日期: 2025-01-10

资助项目: 国家杰出青年科学基金项目《矿床学》(编号: 41925011) 和国家重大研究计划重点支持项目《氧化性富金斑岩-矽卡岩矿床碲、硒富集机制——以长江中下游九瑞、鄂东南矿集区为例》(编号: 92162217)

作者简介: 谢桂青 (1975-), 男, 博士, 研究员, 从事矿床模型与找矿预测研究和教学工作。E-mail: xieguiqing@263.net

the middle section of the Jiangnan Orogenic Belt in China as a case study to develop two metallogenic models: an oxidative skarn copper-iron-gold deposit model and a reductive skarn tungsten-gold-antimony deposit model. **[Conclusions]** These two metallogenic system deposit models broaden the direction of mineral exploration, provide insights into future research on skarn deposit models, and offer references for breakthroughs in exploration strategies.

Key words: skarn deposits; mineral assemblage; zoning patterns; mineral deposit models; metallogenic systems

Highlights: The oxidized skarn Cu-Fe-Au metallogenic system model and reduced skarn W-Au-Sb mineral system are summarized in this paper.

矽卡岩矿床是地壳中最丰富的矿床类型之一,具有矿体品位相对较富的优势,被认为是国际勘查界的“甜点”,其中,矽卡岩铜金矿、矽卡岩金/铅锌矿和碳酸盐交代铅锌银矿是斑岩铜成矿系统的重要组成部分 (Sillitoe, 2010)。斑岩-矽卡岩矿床具有规模大、品位高的特征,一直受到国内外的高度关注。“矽卡岩”是指一种以钙硅酸盐矿物为主的有经济价值的岩石,主要由石榴子石和辉石组成,其成因较复杂,是可以形成于所有时代的岩石,主流观点认为矽卡岩主要产于侵入岩与碳酸盐岩(灰岩和白云岩)的接触带,同时可以产于板岩、砂岩、铁建造、玄武岩和科马提岩中,主要分布于断裂、大型剪切带、浅表地壳系统、海底和变质地体中,不仅可以形成于区域和接触变质作用,也可以形成于不同类型流体(岩浆流体、变质流体、大气降水和海水)的接触交代过程,目前有经济价值的矽卡岩矿床有钨、锡、铜、铅、锌、铁、钼、银、金、铀、稀土、氟和硼矿床 (Meinert et al., 2005)。全球矽卡岩矿床主要分布于环太平洋、特提斯和古亚洲成矿域 (图 1),中国矽卡岩矿床分布广泛 (图 2),是大多数成矿带的主攻找矿类型之一。

已有资料表明,矽卡岩矿床有近 200 年的研究历史,瑞典地质调查局主席 Alfred Elis Törnebohm 在 1875 年的论文首次提到“矽卡岩 (skarn)”,有“富石榴子石褐色矽卡岩和富辉石绿色矽卡岩”的描述 (Meinert et al., 2005)。Burt (1982) 首次以英文总结了 1841—1970 年期间的全球矽卡岩矿床研究资料,将已有的法语和俄语等文献的主要结论翻译成英文。国际上, Zharikov (1970)、Einaudi et al. (1981)、Meinert et al. (2005) 和 Meinert (2020) 较全面地综述了矽卡岩矿床的研究现状,确定不同类型矽卡岩矿物组合,总结了全球主要类型矽卡岩矿床特征。中国矽卡岩矿床的研究相对较早,1935 年孙健初等编著的《扬子江下游铁矿志》提到“接触变质铁矿床”的成因 (翟裕生, 2004)。黄懿等 (1957) 和裴荣富等 (1985) 提出湖北省大冶式铁矿为

广义矽卡岩矿床。徐克勤 (1957) 提出矽卡岩型钨矿床是中国最有远景的钨矿床类型,确定了中国首例矽卡岩型白钨矿床——湖南省瑶岗仙超大型钨矿。常印佛等 (1983) 以安徽省下扬子拗陷的大型铜矿床为例,提出层控式矽卡岩矿床的概念,在侵入岩热变质晕范围内,由热液活动沿一定层位和岩性形成的似层状矿体,并以与矽卡岩化有紧密的成生联系和空间联系为特征,不管矽卡岩化的强弱和成矿前后矿化性质及其演变关系如何,统称为层控式矽卡岩矿床。翟裕生等 (1982) 建立了鄂东区域矽卡岩铁矿床模式。赵一鸣等 (1990; 2023) 出版了《中国矽卡岩矿床》和《世界主要矽卡岩矿床》专著,前者总结了我国矽卡岩矿床的区域成矿规律;后者以典型矿床为例,总结了全球不同类型矽卡岩矿床的特征。由此可见,全球矽卡岩矿床的研究程度相对较高。

矽卡岩矿床常表现多种成矿元素共存,根据主要成矿元素,全球矽卡岩矿床可分为钨、锡、铜、铅、锌、铁、钼、金矿床 (Meinert et al., 2005)。据统计,全球矽卡岩矿床以铜、铁、铅锌和钨矿床为主,占有矽卡岩矿床数量分别为 32%、26%、19% 和 12% (图 3-a)。据统计,中国矽卡岩矿床数量占全球矽卡岩矿床的 38%,其次是美国 (33%),其他国家矽卡岩矿床数量相对较少,中国是全球矽卡岩矿床数量最多的国家 (图 3-b)。中国矽卡岩铁、铜、铅锌矿床占有矽卡岩矿床数量分别为 33%、22% 和 23% (图 3-c),矽卡岩钼、铜、金、铅锌、钨和锡矿床提供了中国钼、铜、金、铅锌、钨和锡矿产资源/储量的 17%、32%、11%、25%、71% 和 87% (图 3-d)。与全球矽卡岩矿床相比,中国最大的矽卡岩钨、锡、钼和铅锌矿床可达世界级规模 (Chang et al., 2019)。因此,中国矽卡岩矿床是揭示成矿规律和构建普适性矿床模型的理想对象。本文总结矽卡岩矿物组合和矿床分带研究进展,综述斑岩有关的矽卡岩铜金属矿床、远成矽卡岩型矿床、交代火山岩矽卡岩矿床的研究现状,构建与氧化和还原岩浆有关的两

类矽卡岩成矿系统的矿床模型,最后提出未来研究方向。

1 矽卡岩矿物组合

矽卡岩矿床因发育矽卡岩矿物组合而命名,确

定矽卡岩矿物组合是研究矽卡岩矿床的核心内容,是建立矿床模型的基础。经典主流观点认为,矽卡岩矿床是相对年轻、热岩浆与相对较老、冷碳酸盐岩地层的双交代产物,根据产出位置可进一步分为:产于岩体内接触带的称为内矽卡岩,产于碳酸盐岩地

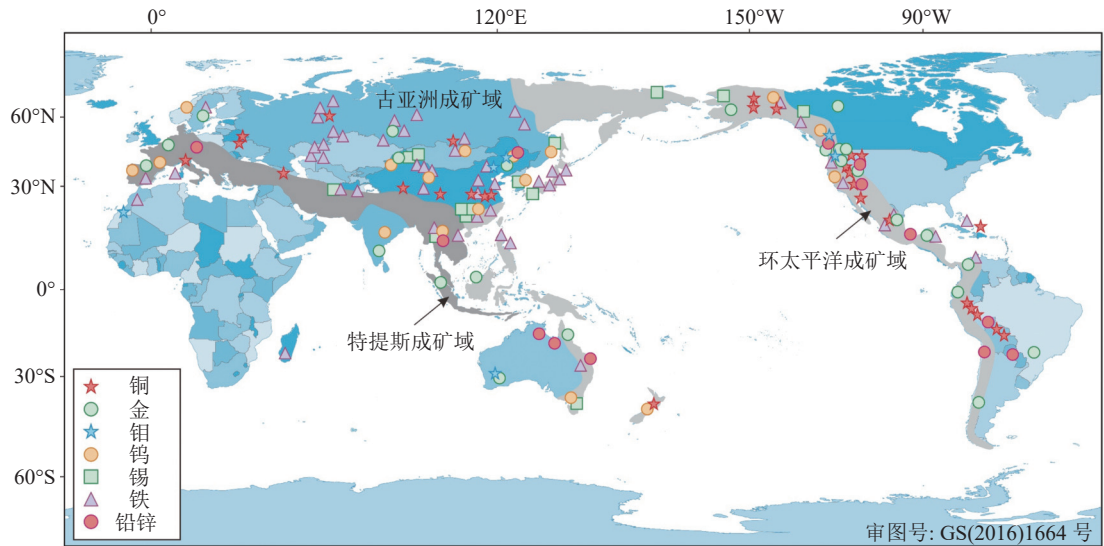


图 1 全球矽卡岩矿床分布图 (据赵一鸣等, 2023 修改)

Fig. 1 Global distribution of skarn deposits

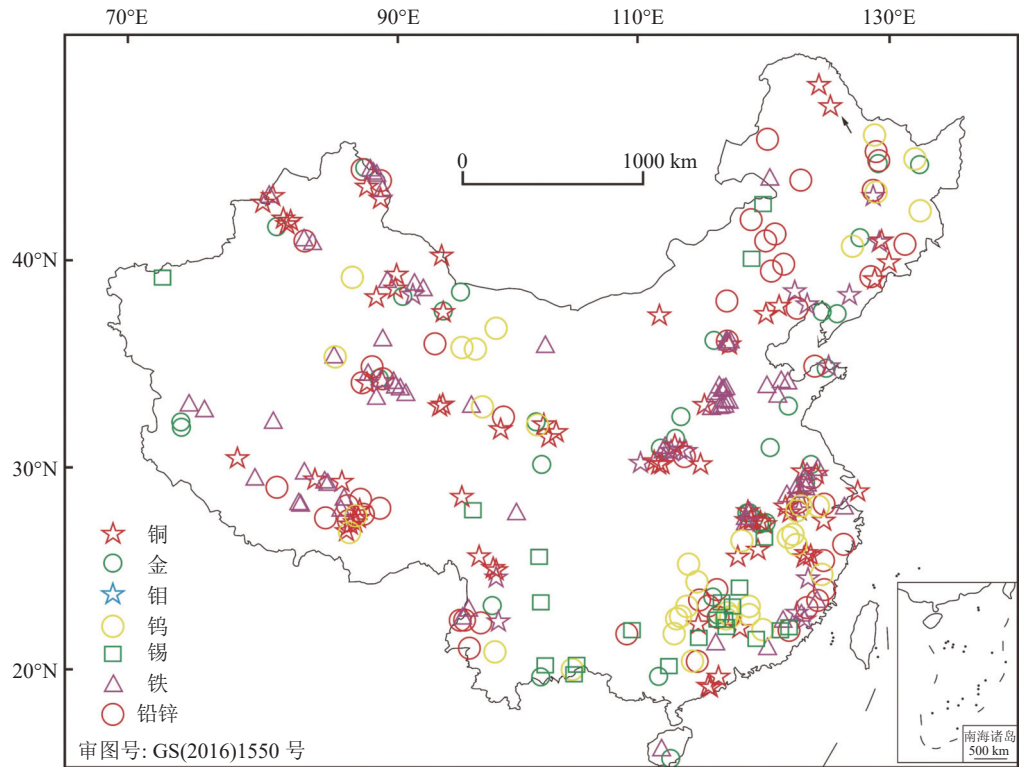


图 2 中国主要矽卡岩矿床分布图 (据 Chang et al., 2019 修改)

Fig. 2 Distribution map of major skarn deposits in China

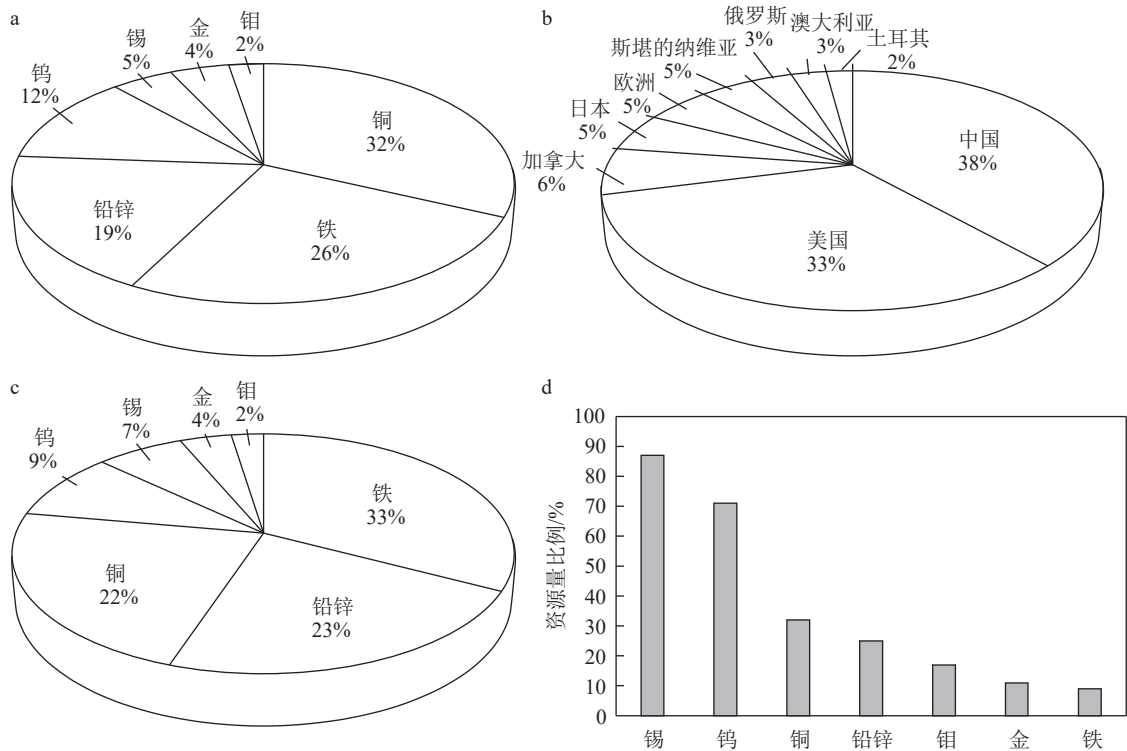


图3 不同类型矽卡岩矿床比例 (据赵一鸣等, 2023; Chang et al., 2019 修改)

Fig. 3 Proportions of different types of skarn deposits

a—不同类型矽卡岩矿床占全球数量比例; b—全球主要国家(地区)矽卡岩矿床数量比例; c—中国不同类型矽卡岩矿床数量占比; d—中国不同类型矽卡岩矿床资源量占比

层中的称为外矽卡岩,内、外矽卡岩在成矿元素含量、金属矿物组合和矿化蚀变类型等方面存在明显差异,可根据未蚀变的残余组构确定内、外矽卡岩,一般矿床外矽卡岩规模大于内矽卡岩,矿体主要产于外矽卡岩 (Einaudi and Burt, 1982)。有些矽卡岩矿床由于原始组构被晚期热液蚀变叠加无法识别,如块状矽卡岩无法区分内、外矽卡岩,比较典型的秘鲁 Antamina 超大型矽卡岩铜矿床,可以通过全岩的 Al_2O_3 与 Y、HREE、Sc、Zr、Nb、Th 和 TiO_2 的相关性图解加以区分 (Mrozek et al., 2020)。

已有研究表明,矽卡岩矿物组合受含矿岩体、赋矿地层、侵位深度等多种因素的影响,已发现百余种矽卡岩矿物,主要有早阶段“无水”矿物石榴子石和辉石等矿物、晚阶段退化蚀变形成“含水”矿物,如角闪石等矿物 (Einaudi and Burt, 1982; Meinert et al., 2005),其中,区分不同类型矽卡岩矿床最重要 2 种矿物为石榴子石和辉石,它们的成分存在一定差异 (图 4)。研究表明,不同矽卡岩矿床中含水矿物的成分存在明显差异,如在矽卡岩金锡钨矿床中角闪石成分富铝,在矽卡岩铜钼铁矿床中角闪石富铁,在矽

卡岩锌矿床中角闪石富锰贫钙 (Meinert, 1992)。Zharikov (1970) 首次总结不同矽卡岩矿床的矽卡岩矿物组合,利用相图确定不同类型矽卡岩矿床的物理化学条件。下面分别介绍石榴子石和辉石 2 种主要矿物特征。

(1) 石榴子石: 成分为 $A_3^{2+}B_2^{3+}Si_3^{4+}O_{12}$, 其中, A 位置为 Ca、Mn、Fe、Mg, B 位置为 Al、Fe。由于碳酸盐岩地层钙含量最高,普遍发育钙铝榴石和钙铁榴石 2 个端元矿物,其分子式分别为 $Ca_3Al_2Si_3O_{12}$ (缩写 Gr) 和 $Ca_3Fe_2Si_3O_{12}$ (缩写 Ad), 两者统称钙质石榴子石。另外还有锰铝榴石 $Mn_3Al_2Si_3O_{12}$ (缩写 Sp) 和铁铝榴石 $Fe_3Al_2Si_3O_{12}$ (缩写 Al) 2 个端元矿物,统称亚钙石榴子石,还有相对少见的镁铝榴石 $Mg_3Al_2Si_3O_{12}$ (缩写 Py) (Meinert, 2020)。

(2) 辉石: 成分为 $A_1^{2+}B_1^{2+}Si_2^{4+}O_6$, 其中 A 位置为 Ca, B 位置为 Fe、Mn、Mg。普遍发育透辉石、钙铁辉石、钙锰辉石 3 个端元矿物,分子式分别为 $CaMgSi_2O_6$ (缩写 Di)、 $CaFeSi_2O_6$ (缩写 Hd)、 $CaMnSi_2O_6$ (缩写 Jo), 其中,透辉石也称为次透辉石 (Salite) (Meinert, 2020)。

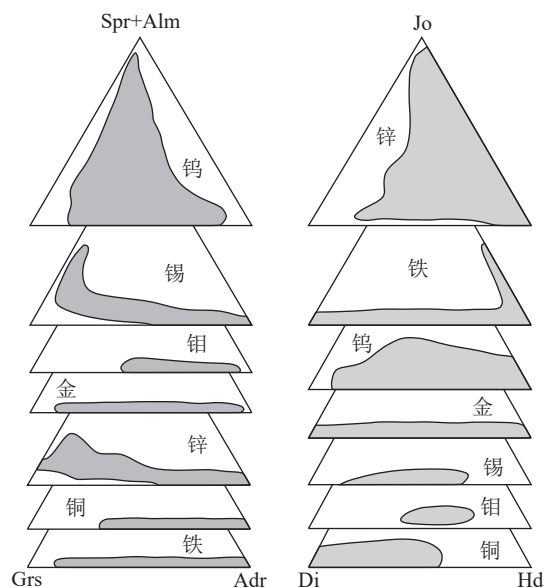


图 4 不同类型矽卡岩矿床石榴子石和辉石成分三角图解
(据 Meinert, 1992 修改)

Fig. 4 Garnet and pyroxene compositional triangle for different types of skarn deposits

Adr—钙铁榴石; Alm—铁铝榴石; Di—透辉石; Grs—钙铝榴石;
Hd—钙铁辉石; Jo—钙锰辉石; Spr—锰铝榴石

矽卡岩矿床中石榴子石和辉石是由不同百分比的上述端元矿物组成的, 如石榴子石由 60% 的钙铁榴石、40% 的钙铝榴石端元矿物组成, 常用 $Ad_{60}Gr_{40}$ 表达, 辉石用类似表达方式。不同类型石榴子石和辉石成分可以指示矽卡岩矿床的氧化还原条件和矿化类型, 如富 Mn 辉石是矽卡岩锌矿床的特有矿物 (Meinert, 1983), 并非所有矽卡岩矿床都发育石榴子石和辉石, 在中国有 10 个钙质矽卡岩矿床不发育石榴子石, 有 28 个不发育辉石 (Chang et al., 2019), 碱性矽卡岩铀-稀土矿床不发育石榴子石 (赵一鸣等, 2023)。研究发现, 矽卡岩铜铁、铅锌和钨锡矿床中辉石的 Mn/Fe 值和 Zn 含量明显不同, 辉石成分可以区分不同类型的矽卡岩矿床 (Nakano et al., 1994)。根据石榴子石和辉石的成分、硫化物种类, 将钨和金进一步分为还原性和氧化性两大类型矽卡岩矿床 (Einaudi et al., 1981; Newberry and Einaudi, 1981; Meinert, 1989)。还原性矽卡岩钨矿床具有钙铁辉石+铁铝榴石的矽卡岩矿物组合, 这 2 种矿物中 Fe 是 +2 价, 矽卡岩矿物主要产于含炭质围岩和还原性岩浆接触带, 形成较深, 退化蚀变相对弱; 氧化性矽卡岩钨矿床以钙铁榴石和绿帘石为主, 矿物组合产于相对较浅的氧化性岩浆接触带, 常伴生铜矿化,

具有较强的退化蚀变 (Einaudi et al., 1981; Newberry and Einaudi, 1981)。还原性矽卡岩金矿与钛铁矿型 ($Fe_2O_3/(FeO+Fe_2O_3)$ 小于 0.45) 岩浆有关, 以钙铁辉石 (Hd 大于 50) 为特征; 氧化性矽卡岩金矿床以石榴子石含量大于辉石、钙铁榴石+透辉石为特征, 共伴生铜矿化 (Meinert, 1989)。

根据碳酸盐岩地层成分, 矽卡岩进一步分为钙质、钙镁质、镁质, 全球以钙质矽卡岩为主, 如中国 64% 的矽卡岩矿床为钙质矽卡岩矿床 (Chang et al., 2019), 硅镁石、方镁石、金云母、滑石、蛇纹石和水镁石为典型镁质矽卡岩矿物。相比钙质矽卡岩, 镁质矽卡岩铜矿床具有高含量磁铁矿、低含量硫化物 (常低于 6%) 和较低的黄铁矿/黄铜矿比的特征, 在贫硅和富硅条件, 镁质矽卡岩分别为镁橄榄石+蛇纹石+滑石、滑石+透闪石矿物组合 (Einaudi et al., 1981; Einaudi, 1982), 含钙镁橄榄石的镁质矽卡岩铜矿床含铜矿物主要为斑铜矿-辉铜矿, 如印尼 Ertsberg 矽卡岩铜金矿床 (Kyle et al., 1991)。另外, 还有锰质矽卡岩和碱质矽卡岩, 其中, 锰质矽卡岩以锰钙辉石+富 Mn 矿物为主, 远离岩体普遍发育矽卡岩铅锌银矿床; 碱质矽卡岩产于碱性花岗岩或正长岩与白云质大理岩的接触带, 矿物组合以霓石、钠铁闪石等为主, 矽卡岩铀-稀土矿床中发育碱质矽卡岩 (赵一鸣等, 2023)。

2 矽卡岩矿床分带

矽卡岩矿床分带研究是建立矿床模型的核心内容。不同类型矽卡岩矿床的含矿岩体和赋矿地层存在较大差异, 但是, 具有相对统一的矽卡岩分带形式, 其形成机制是古老的未得到解决的关键科学问题 (Meinert, 2020)。矽卡岩矿床分带可以通过野外填图获得, 推动找矿勘查, 一直受到高度关注, 在矿集区、矿田、矿床等不同尺度常见矽卡岩矿物组合、硫化物、成矿元素的分带形式, 由岩体向大理岩地层, 石榴子石/辉石比例减少, 石榴子石颜色变浅, 辉石颜色变深, 向外发育硅灰石矽卡岩、漂白化大理岩、大理岩和灰岩, 最外侧大理岩和灰岩中常发育流体逃逸结构, 在页岩和灰岩的层间可见条带矽卡岩和反应矽卡岩 (图 5), 同时硫化物含量和成矿元素组合呈现规律性变化 (Meinert et al., 2005; Chang et al., 2019)。这种矽卡岩矿床分带不仅是确定成矿岩体的可靠方法之一, 而且有助于矽卡岩矿床的找矿勘查,

特别在找矿早期应关注远离接触带的矽卡岩矿化特征。

已有研究表明,控制矽卡岩矿床分带的主要因素有成矿岩浆性质、赋矿围岩组分、形成深度、岩浆与地层的氧化还原梯度等 (Chang, 2021), 其中, 成矿岩体和赋矿围岩的氧化还原条件最重要, 如冈底斯成矿带甲玛超大型铜多金属矿床研究表明, 氧化还原状态是控制石榴子石/辉石比、石榴子石和辉石成分、硫化物矿物组合在水平和垂向上分带性的主要原因之一 (Shu et al., 2024)。分带明显的矽卡岩矿床产于氧化性岩浆与还原性地层接触带, 两者氧化还原条件相差较大, 近岩体接触带发育辉石石榴子石 (石榴子石含量大于辉石) 矽卡岩、远离岩体接触带为石榴子石辉石 (辉石含量大于石榴子石) 矽卡岩、大理岩接触带发育硅灰石矽卡岩 (Meinert, 1983; Chang et al., 2019), 形成较浅且与斑岩有关的矽卡岩铜多金属矿床普遍发育上述矽卡岩分带。若岩浆和地层均为氧化条件, 如地层中含有膏盐成分, 形成的矽卡岩以辉石石榴子石 (石榴子石含量大于辉石) 矽卡岩或石榴子石矽卡岩为主, 甚至不发育辉石, 中国有 28 个钙质矽卡岩矿床不发育辉石 (Chang et al., 2019)。若岩浆和地层均为还原条件, 形成的矽卡岩以石榴子石辉石 (辉石含量大于石榴子石)、钙铁辉石为主, 多数产于全球还原性矽卡岩金矿床, 如美国 Nickel Plate 金矿床 (Ettlinger et al., 1992), 中国多数还原矽卡岩锡矿床以辉石为主, 不发育或发育少量石榴子石 (Chang et al., 2019)。因此, 含矿岩浆和赋矿地层成分和物理化学条件的确定, 是揭示矽卡岩矿床分带规律的关键。

成矿深度是控制矽卡岩矿床分带的关键因素之一。已有研究表明, 矽卡岩钨矿床形成深度大于矽卡岩铜、锌矿床 (图 6), 矽卡岩钨矿床中矽卡岩厚度较窄, 与斑岩有关的矽卡岩铜矿中矽卡岩规模较大且分带性较好 (Einaudi et al., 1981; Newberry and Einaudi, 1981; Meinert et al., 2005)。成矿深度大于 5 km 的深部矽卡岩矿床, 变质蚀变晕 (硅灰石大理岩和角岩) 范围大于石榴子石和辉石矽卡岩, 退化蚀变较弱, 分带性较差; 而成矿深度小于 5 km 的浅部矽卡岩矿床, 石榴子石+辉石矽卡岩范围大于变质蚀变晕, 退化蚀变较强, 分带性较强, 有利于矽卡岩成矿作用 (Meinert, 1983)。但是, 成矿深度如何定量控制矽卡岩矿床分带还不清楚。另外, 岩浆和热液体系

中的氟含量、赋矿地层中的碳含量均会影响矽卡岩规模和分带形式, 如富氟矽卡岩矿床的内矽卡岩规模大于外矽卡岩, 炭质地层不利于矽卡岩形成 (Chang, 2021)。

除上述矽卡岩矿床矿物组合差异外, 矽卡岩矿物颜色和成分呈现分带规律, 如由岩体近端到远端, 石榴子石颜色变浅, 辉石颜色变深, 其锰含量变高 (Atkinson and Einaudi, 1978; Meinert et al., 2005; Chang et al., 2019)。如美国 Carr Fork 矽卡岩铜矿床中石榴子石近岩体的接触带呈暗红褐色, 远离岩体的接触带呈浅褐色, 靠近大理岩带为绿色 (Atkinson and Einaudi, 1978); 菲律宾 Mexico 大型矽卡岩铜矿从岩体近端到远端, 石榴子石颜色依次为暗红色、红色、褐色、黄色、浅黄色 (Chang, 2021)。但是, 矽卡岩矿床中石榴子石和辉石的颜色变化定量表达和其控制因素还不清楚。最近以西藏冈底斯知不拉矽卡岩铜多金属矿床为对象, 利用光纤光谱仪半定量获得 4 类石榴子石色相值, 发现从岩体近端到大理岩远端, 石榴子石颜色呈褐红色、黄绿色、褐绿色的变化规律 (图 7), 其中, 褐红色钙铁榴石的色相值与铁含量呈反相关性, 提出该矿床深边部找矿潜力较大 (王天语等, 2024)。

3 与斑岩有关的矽卡岩铜多金属矿床

斑岩有关的矽卡岩铜多金属矿床是全球矽卡岩矿床的研究重点, 建立矿床模型, 有助于找矿突破。在碳酸盐岩地区, 斑岩铜矿系统主要发育岩体内斑岩、接触带中矽卡岩、外围碳酸盐交代铅锌矿床和卡林型金矿床 (图 8; Sillitoe, 2020)。据统计, 斑岩铜矿和矽卡岩铜矿提供了全球约 75% 铜资源/储量和 52% 的金资源/储量 (Meinert, 1989), 与斑岩有关的矽卡岩铜矿床是非常重要的矿床类型, 常认为是斑岩-矽卡岩铜矿床; 若发育矽卡岩铅锌矿化, 常称为斑岩-矽卡岩铜多金属矿床, 在环太平洋成矿域普遍发育, 如北美西南部与斑岩有关的矽卡岩铜金矿床, 有高达 500×10^4 t 的铜资源/储量, 达到超大型规模 (Einaudi, 1982)。在中国冈底斯、三江、东昆仑、长江中下游成矿带普遍发育与斑岩有关的矽卡岩铜多金属矿床 (赵一鸣等, 1990), 如冈底斯成矿带甲玛超大型铜多金属矿床和三江北衙超大型金多金属矿床 (Chang et al., 2019; Shu et al., 2024)。

与斑岩有关的矽卡岩铜多金属矿床具有含矿岩

体内发育细脉浸染状矿脉的特征, 发育钾化和石英绢云母化蚀变, 由于缺少角闪岩等暗色矿物, 通常不发育青磐岩化蚀变 (Meinert et al., 2005)。在碳酸盐

岩地层中发育早阶段石榴子石-辉石矽卡岩和晚阶段绿帘石-绿泥石退化蚀变, 钾化与石榴子石-辉石矽卡岩、石英绢云母化与绿帘石-绿泥石退化蚀变同时形

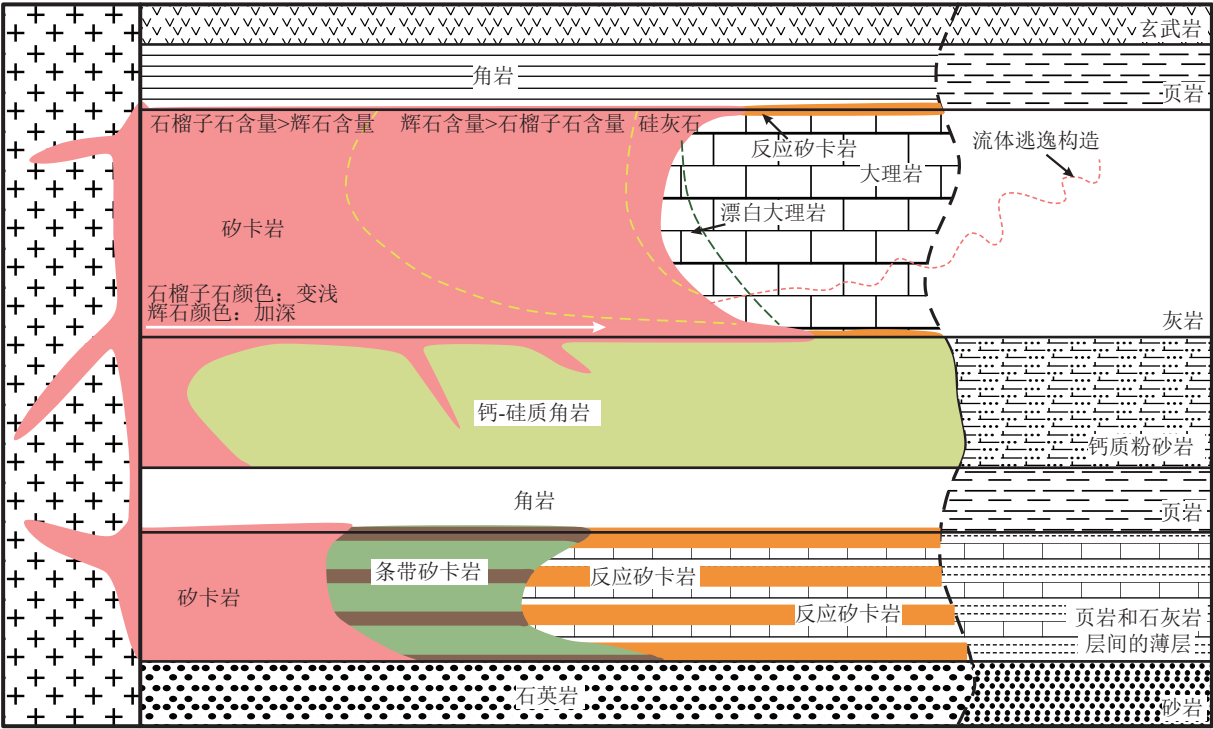


图 5 矽卡岩矿床矽卡岩矿物组合和硫化物分带 (据 Chang et al., 2019 修改)

Fig. 5 Skarn mineral assemblages and sulfide zoning in skarn deposits

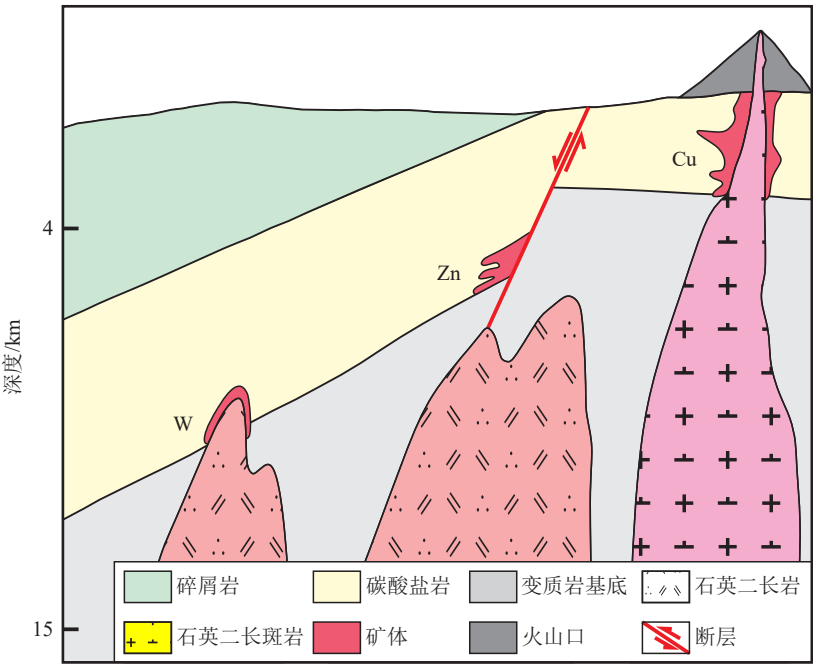


图 6 矽卡岩钨、铜和锌矿床的形成深度 (据 Newberry and Einaudi, 1981 修改)

Fig. 6 Formation depths of skarn tungsten, copper, and zinc deposits

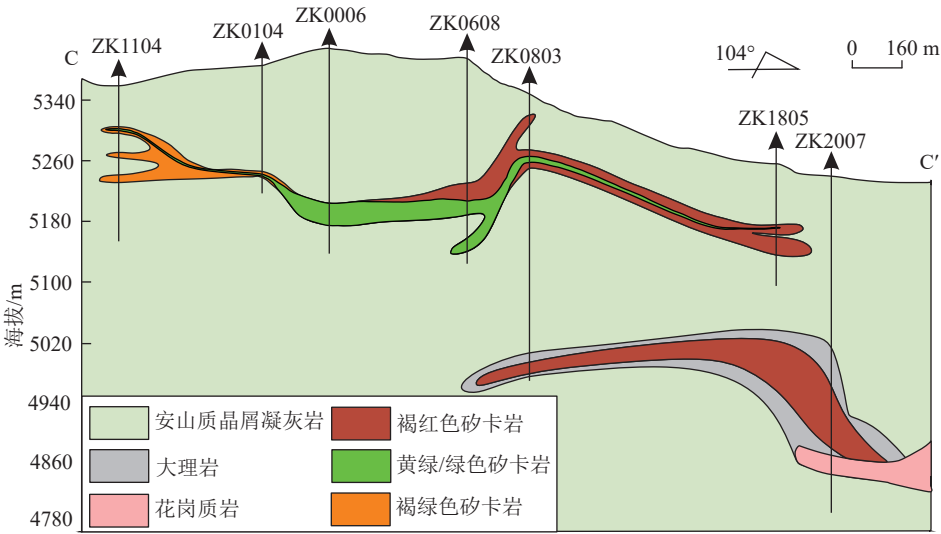


图 7 西藏知不拉矽卡岩铜矿床 CC'剖面石榴子石颜色分带 (据王天语等, 2024 修改)

Fig. 7 Garnet color zoning diagram along cross-section CC' of the Zhibula skarn copper deposit, Xizang

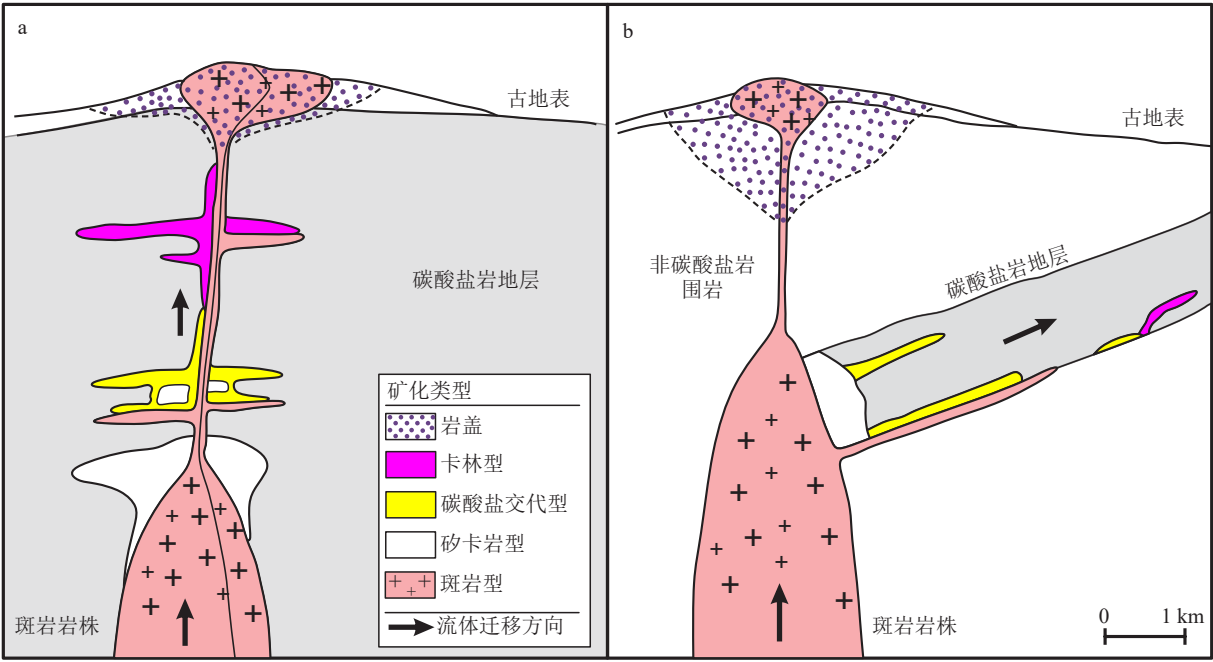


图 8 斑岩-矽卡岩-碳酸盐交代-卡林型矿床组合模型 (据 Sillitoe, 2020 修改)

Fig. 8 Model of porphyry-skarn-carbonate replacement-Carlin deposits

成 (Einaudi et al., 1981; Einaudi, 1982)。已有研究表明, 矽卡岩矿物形成是脱碳反应 ($\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 = \text{CaSiO}_3 + \text{CO}_2$) (Meinert, 2020)。与斑岩有关的矽卡岩铜矿床形成相对较浅, 浅部受断裂控制, 低压高渗透性加速流体向上迁移和 CO_2 脱气, 有利于厚大矽卡岩形成 (Einaudi et al., 1981)。相比矽卡岩铜矿床, 与斑岩有关的矽卡岩铜多金属矿床通常与多世代岩浆活动有成因联系, 流体过饱和造成热液矿物快速沉

淀, 碳酸盐岩地层中常形成细粒块状矽卡岩矿物组合, 且矿物溶解-再沉淀现象普遍发育, 退化蚀变较强, 硫化物中黄铁矿含量大于磁黄铁矿, 还有大量赤铁矿和部分磁铁矿, 常有明显的硫化物分带, 靠近岩体发育硬石膏-黄铁矿-黄铜矿-磁铁矿组合, 远离岩体大理岩接触带发育硅灰石-斑铜矿-黄铜矿, 是由于硬石膏沉淀导致流体中总铁和 Fe/Cu 比下降形成斑铜矿 (Einaudi, 1982)。

4 远成矽卡岩矿床

远成矽卡岩矿床的研究相对薄弱,近年来矿床模型取得了重要进展。热液矿床的形成是复杂的过程,影响因素较多,远成热液矿床指远离岩体的热液矿床,也称为远温矿床(翟裕生等, 2011),岩浆热液成矿系统的远成矿化特征一直受到国际上高度关注。如澳大利亚 2016 年以来一直开展 Distal Footprints 项目,提出远成热液矿床的矿物和物化探找矿标志。传统观点认为,岩浆热液铜钼钨锡矿产于岩体内外接触带,铅锌矿体产于远离岩体接触带的地层中(Graybeal, 2022)。斑岩铜矿系统矿床模型(Sillitoe, 2010; 2020)认为,斑岩-矽卡岩铜钼金矿体产于岩体接触带,而远离岩体接触带发育与岩脉有关的远成矽卡岩铅锌或金矿床,再向外发育受断裂和岩脉控制的碳酸盐交代铅锌矿床(Megaw, 1998)。赵一鸣等(2023)认为,普遍存在远成矽卡岩铅锌银矿床。Meinert et al.(2005)总结了超过大理岩线(大理岩-矽卡岩接触带)的远成蚀变特征,在远离岩体接触带有隐性蚀变的碳酸盐岩地层中可见流体逃逸构造、铁锰氧化物网脉、微细裂隙和缝合线,不同类型缝合线可用于找矿勘查(Hosseini et al., 2022)。但是,利用原位微区等方法表征远成蚀变特征的系统性研究相对薄弱。

远成岩浆热液矿床目前还没有明确的定义。Kwak(1987)将远离含矿岩体 300 m 以外的矿床称为远成矽卡岩矿床。对于斑岩铜矿系统来说,最外围低温金矿化蚀化可以远离岩体 4~5 km(Sillitoe, 2010; 2020),远离岩体大于 4 km 的矽卡岩矿床成矿流体可以是以岩浆流体为主(Williams-Jones et al., 2010)。中国发育多个远离岩体 4~4.5 km 的矽卡岩铅锌矿床,还有远成矽卡岩锡、金、铜、钨和钼矿床(Chang et al., 2019)。因此,本文初步将矿体离岩体距离 0.3~5 km 的矽卡岩矿床定义为远成矽卡岩矿床,是否有更远的远成矽卡岩矿床需要进一步研究。

近年来,国内外发现多个远成矽卡岩铜多金属矿床,如摩洛哥 Amensif 矽卡岩铜多金属矿产于碳酸盐岩地层,矿区仅发育酸性岩脉,深部和浅部依次发育铜、锌矿化分带,但铜铅锌矿规模相对较小(铜和铅锌资源/储量分别为 1×10^4 t、 4×10^4 t)(Jinari et al., 2023)。最近东秦岭全球最大的钼成矿带发现多

个大中型铜多金属矿床,以板厂大型铜钼矿床(铜和钼资源量分别为 111×10^4 t、 30×10^4 t)为例,该矿区由西向东、由深向浅依次发育钼、铜、铅锌分带,发现晚中生代花岗质岩脉有流体出溶的单向固结结构(UST)直接证据,以岩脉为中心向外依次发育石榴子石-辉石矽卡岩、绿泥石矽卡岩、网脉状绿泥石化大理岩,提出板厂是与岩脉在时间、空间和成因上有联系的远成大型矽卡岩铜钼矿床,外围发育碳酸盐交代铅锌银矿体(图 9; Li et al., 2024),类似于斑岩铜矿系统中与岩脉有关的远成铅锌或金矿床(Sillitoe, 2010; 2024),推测深部有靠近岩体的矽卡岩铜钼矿床,找矿潜力较大。

已有研究表明,矽卡岩钨矿床与粗粒花岗岩、石英二长岩和细晶岩、伟晶岩脉有密切成因联系,矿体产于岩体内外接触带,其形成位置相对较深且温度较高,隐爆角砾岩和裂隙不发育,有些钨矿区早期由于勘查深度有限未发现成矿岩体,导致认为产于变沉积岩的层状矽卡岩钨矿床是海底喷流沉积或变质成因(Einaudi et al., 1981)。近年来研究认为,这些层状钨矿是深部岩体有关的矽卡岩钨矿床(Gaspar and Inverno, 2000)。全球识别出多个远成还原性矽卡岩钨铜金矿床,如俄罗斯期东部 Agylki 矿床(10×10^4 t WO_3 和 1.27% WO_3 、2.7% Cu 和 1.38×10^{-6} Au)和 Skrytoe 矿床(14.5×10^4 t WO_3 和 0.49% WO_3)(Soloviev et al., 2020)。最近以湘中矿集区曹家坝大型钨矿床(7×10^4 t 的 WO_3 和 0.37% WO_3)为对象,开展矿床成因研究,结果表明,该矿床产于泥盆纪灰岩与碎屑岩接触的硅钙界面附近,未发现含矿岩体,矿体规模与矽卡岩厚度呈正比,石榴子石和辉石成分、磁黄铁矿、低 Mo 白钨矿的特征类似于全球还原性矽卡岩钨矿床(Xie et al., 2019a)。结合成矿时代和地质地球物理资料,提出曹家坝是华南低温成矿域的首个远成还原性矽卡岩钨矿床,推测深部有靠近岩体接触带的矽卡岩钨矿床,找矿潜力较大(Xie et al., 2019a),是中国目前为止已知唯一有价值的远成矽卡岩钨矿床(Chang et al., 2019)。

5 交代火成岩矽卡岩矿床

交代火成岩矽卡岩矿床是近年来新识别的矿床类型,其矿床模型的研究相对薄弱。如前文所述,矽卡岩矿床可以形成于多种地质条件,矽卡岩主要产于侵入岩与碳酸盐岩的接触带,若赋矿地层为钙质

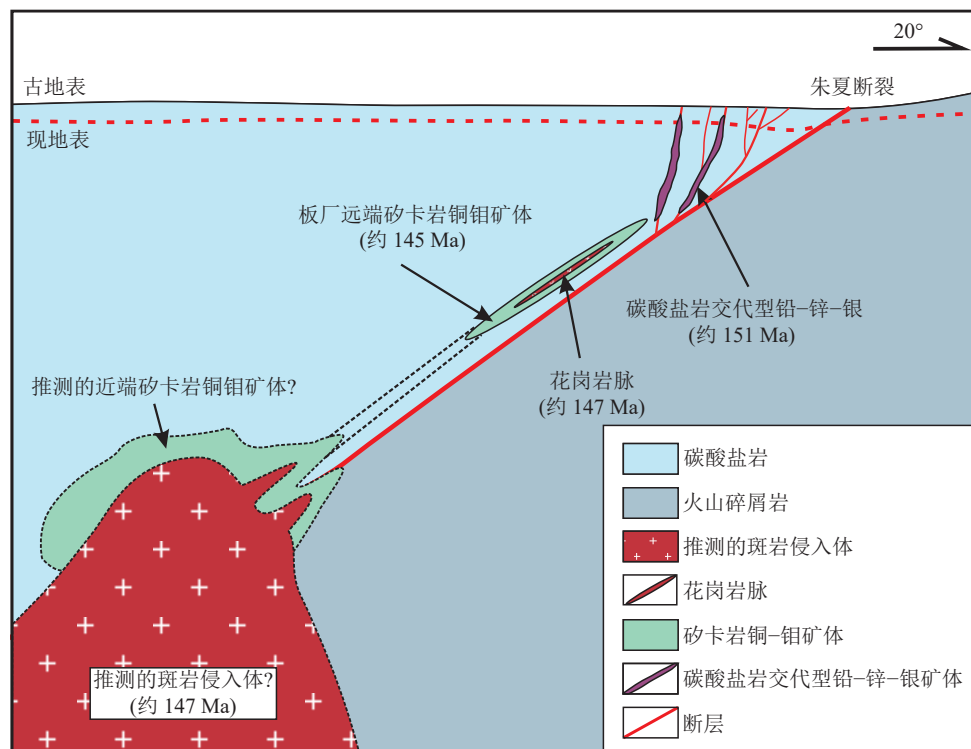


图9 东秦岭板厂矽卡岩铜钼+碳酸盐岩交代铅锌银矿床组合模型 (据 Li et al., 2024 修改)

Fig. 9 Combined model of distal skarn Cu-Mo deposits and vein-type Pb-Zn-Ag deposits in the Banchang area, East Qinling

粉砂岩等碎屑岩,形成细粒相对均一的钙-硅酸矿物组成的角岩,是变质作用下重结晶的产物 (Einaudi and Burt, 1982),在有些矽卡岩矿床中发育产于角岩中的细脉浸染状低品位矿体,如冈底斯成矿带甲玛超大型铜多金属矿床 (Shu et al., 2024)。中国探明了3个交代碎屑岩的矽卡岩铁、钨和钼矿床,矿体主要产于富钙砂岩+粉砂岩与岩体的接触带,赋矿地层为碎屑岩夹有碳酸盐岩或下部有碳酸盐岩地层 (Chang et al., 2019)。全球发现有3类交代火成岩矽卡岩矿床 (Chang et al., 2018): ①矿体主要产于中酸性火山岩的矽卡岩矿床。此类型矽卡岩矿床有矽卡岩锡、铁和金矿床,如科特迪瓦北部 Tongon 超大型矽卡岩金矿床 (295 t 金,平均品位 2.5×10^{-6}),矿体产于玄武岩-安山岩结晶凝灰岩中受构造控制的矽卡岩中 (图 10),存在石榴子石/辉石降低、辉石中铁含量升高、葡萄石-绿帘石-斜帘石-钠长石-绿纤石退化蚀变强度升高、Au 品位升高的分带形式 (Lawrence et al., 2017)。有学者提出中国长江中下游3个大型玢岩铁矿属于该类型矽卡岩矿床 (Chang et al., 2019),其成因类型还存在一定争议。②矿体产于火山岩与碳酸盐岩界面且以火山岩为主的矽卡岩矿床。加拿大不

列颠哥伦比亚省矽卡岩铁矿床属于此类型矽卡岩矿床, Merry Widow 铁矿体主要产于玄武岩中; Iron Hill 铁矿体产于大理岩与火山岩层界面且以火山岩为主 (图 11; Meinert, 1984)。最近,在塞尔维亚 Timok 矿集区火山岩夹钙质粉砂岩和大理岩中,发现厚大矽卡岩金、铜金矿体,是第二种类型的矽卡岩矿床 (未发表资料)。③矿体产于内矽卡岩的矽卡岩矿床,此类型矿床与产于岩体与地层的接触带的矽卡岩矿床成矿机制类似。上述第一和第二类矽卡岩床主要产于火山岩,是否存在交代基性侵入岩的矽卡岩矿床还需要进一步研究。这些交代火成岩矽卡岩矿床的成矿机制还不清楚,初步研究表明,赋矿火成岩多为富钙的中基性岩 ($\text{CaO} = 6\% \sim 11\%$),可以提供矽卡岩矿物形成所必需的钙,同时热液体系为富氟、磷和硫的高酸性流体 (如富氟磷灰石和硬石膏),能溶解交代富钙火成岩而形成矽卡岩矿床 (Chang et al., 2019)。

6 氧化性矽卡岩铜铁金矿床组合模型

矽卡岩铜矿床是全球数量最多的矽卡岩矿床,矽卡岩铁矿床是全球规模最大的矽卡岩矿床,与氧

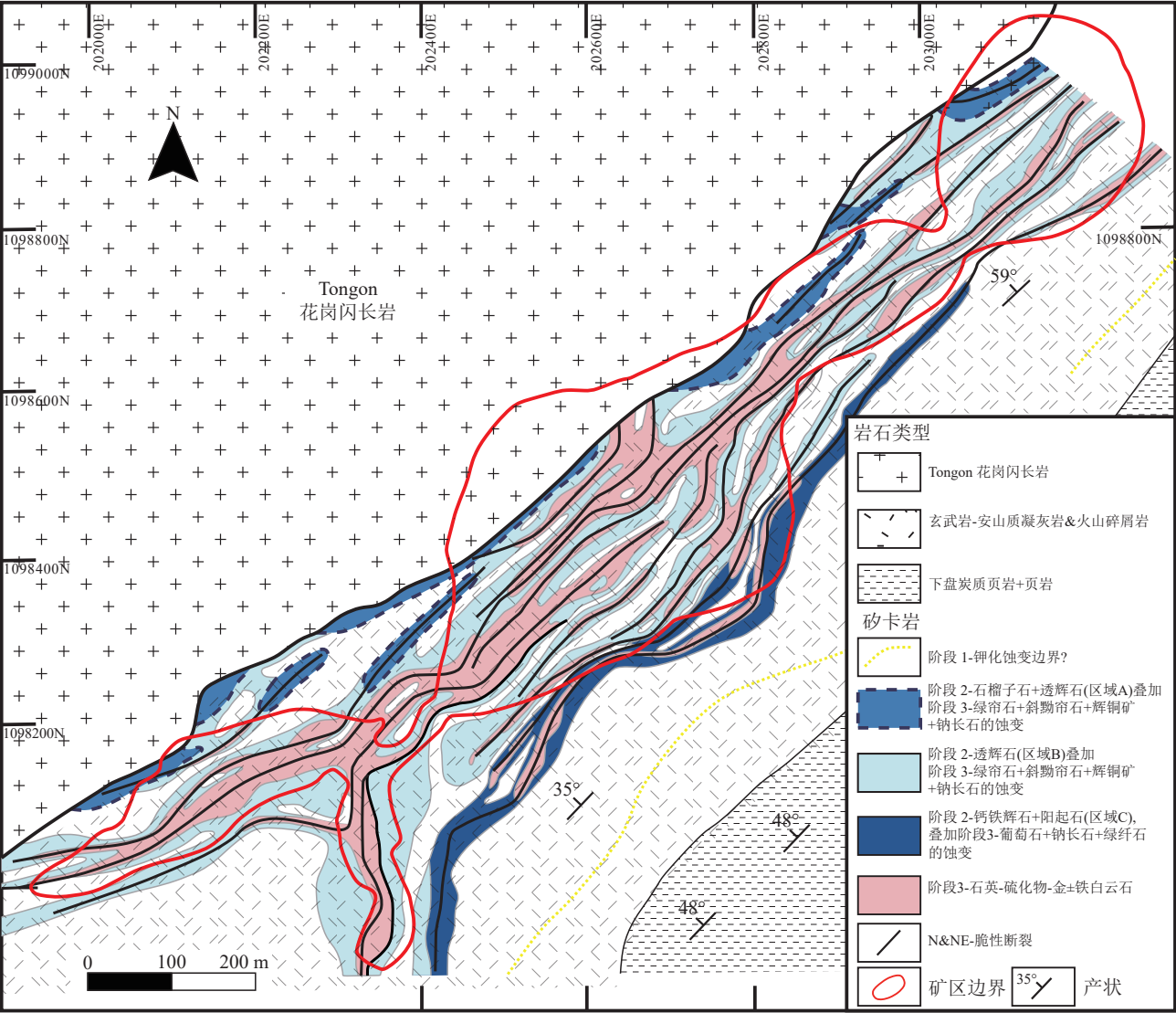


Fig. 10 Cross-section of the Tongon giant skarn gold deposit in northern Côte d'Ivoire

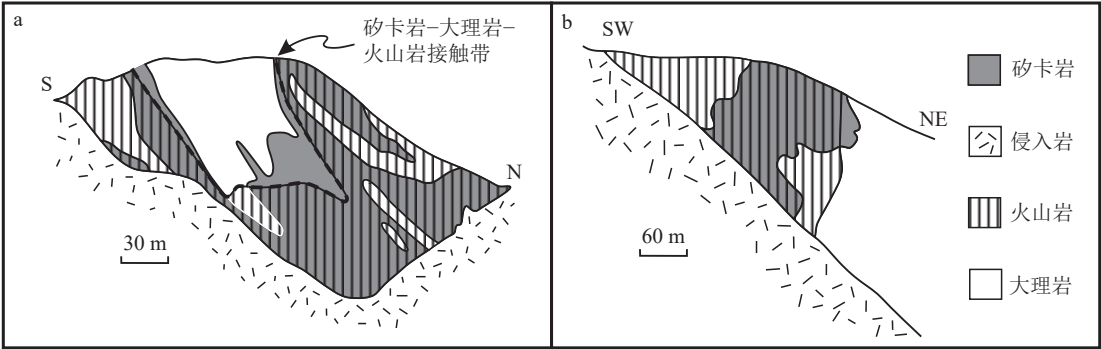


Fig. 11 Cross-sections of the Merry Widow(a) and Iron Hill(b) skarn Fe deposits in British Columbia, Canada

化性岩浆有成因联系 (Einaudi et al., 1981; Meinert et al., 2005)。还原性矽卡岩金矿床与还原性闪长岩和花岗闪长岩有成因联系, 氧化性矽卡岩金矿与氧化性含磁铁矿的富碱中酸性岩浆有关; 相比于矽卡岩型矿床, 斑岩型矿床具有规模大、品位低的特征, 氧化性斑岩铜矿系统提供了全球 75% 的铜和 20% 的金资源量 (Sillitoe, 2010)。矽卡岩矿床的全球金产量绝大多数来源于与斑岩有关的矽卡岩铜金矿床, 一般 Cu 和 Au 品位分别为 1% 和 0.5×10^{-6} (Meinert, 1989; 2000; Chen et al., 2007)。因此, 氧化性矽卡岩铜铁金矿床的矿床组合模型一直是国际研究的焦点。

前人对全球矽卡岩铜、铁矿床开展了大量研究, 但矽卡岩铜矿与铁矿成矿差异的根本原因还不清楚。有些学者根据岩体的主量元素含量平均值, 推测矽卡岩铁矿床含矿岩浆的地幔物质比例高于矽卡岩铜矿床 (Meinert, 1995), 但是, 两类矿床含矿岩体有类似的 SiO_2 含量。由于含矿岩体普遍受到不同程度蚀变, 这种基于全岩主量元素的研究结果存疑, 全球多处探明了与酸性侵入体密切相关的矽卡岩铁矿床 (Pons et al., 2010), 如目前中国东部最大的矽卡岩铁矿床——福建马坑 (赵一鸣等, 1990)。最近的研究表明, 长江中下游鄂东南地区有 2 期矽卡岩矿床成岩成矿事件, 分别为: 早期 (144~137 Ma) 矽卡岩铜铁矿床的含矿岩浆是厚地壳 (>50 km) 岩石圈地幔部

分熔融的产物; 晚期 (133~132 Ma) 矽卡岩铁矿床含矿岩浆形成于正常地壳 (~30 km) 环境 (图 12), 是约 35% 下地壳和 65% 幔源岩浆混合的产物。突破了前人传统观点, 提出成铜岩浆的地幔物质所占比例大于成铁岩浆 (Xie et al., 2015)。地质、矿物和同位素证据表明, 成铁岩浆在浅部地壳中同化了少量的膏盐地层, 在热液阶段形成大规模硬石膏/石膏, 推测膏盐层参与晚期矽卡岩铁矿床成矿作用的比例大于早期矽卡岩铜铁矿床 (Xie et al., 2015), 修正了国际上关于“矽卡岩铁矿床的硫源于岩浆”的观点。综上所述, 幔源组分和膏盐层参与成矿比例的不同, 是造成矽卡岩铜铁矿与铁矿成矿差异的主要原因, 建立了矽卡岩铜铁矿床-膏盐层成矿系统矿床组合模型 (图 13; 谢桂青等, 2025), 提出在膏盐层和花岗岩发育地区寻找矽卡岩铁矿床的新找矿空间。

据统计, 长江中下游至少有 22 个矽卡岩铜矿床共伴生金矿化, 一般 Cu 和 Au 品位分别为 0.77%~1.6% 和 1×10^{-6} ~ 9.5×10^{-6} , 金资源/储量大于 600t, 含矿岩体为氧化性 ($\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 大于 0.5) 石英二长闪长岩、花岗闪长岩和二长岩, 以透辉石和钙铁榴石、高 Cu/Au 和 Ag/Au 为特征, 不同于国外的还原性矽卡岩金矿床, 为氧化性富金矽卡岩矿床 (Zhao et al., 1999)。鄂东南氧化性矽卡岩铜金矿田的解剖研究发现, 矽卡岩铜金矿床的 Cu 和 Au 品位呈正相关性, 自然金产于黄铜矿、碎裂黄铁矿中 (Xie et al., 2020), 在

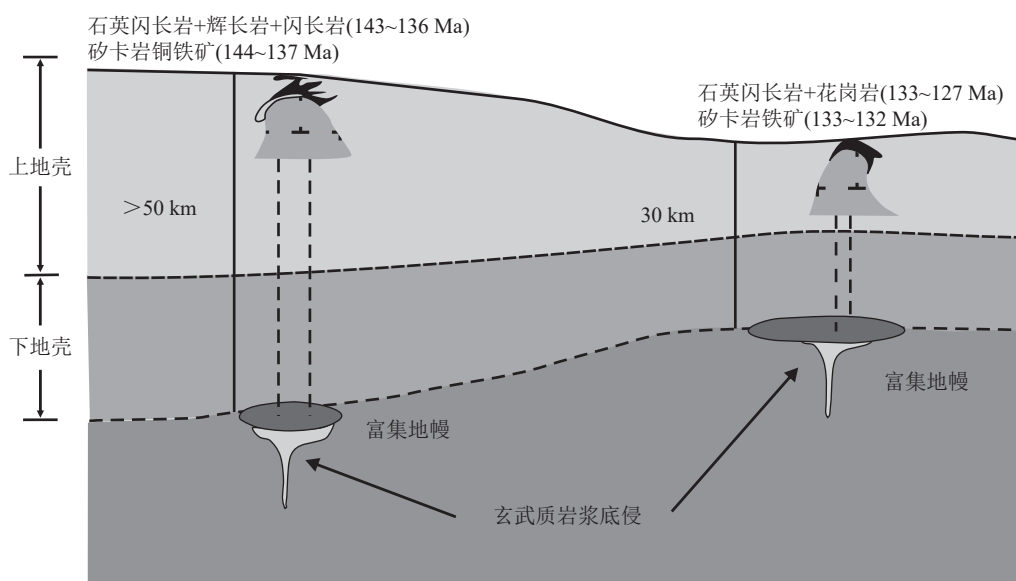


图 12 鄂东矿集区两期矽卡岩铜铁多金属矿床模型 (据谢桂青等, 2016 修改)

Fig. 12 Two episodes skarn Cu-Fe polymetallic deposit model in the Edong ore cluster

矽卡岩矿床外围的沉积岩已发现大规模金矿体,产于碳酸盐岩中的低温金矿床与斑岩-矽卡岩铜金矿床的成矿时代基本一致(140 ± 5 Ma),两者有类似的控矿构造、碲金化物+雄黄+雌黄矿物组合和同位素组成,基于此,确定产于灰岩中的低温金矿床是远离隐伏岩浆接触带的低温金矿床(Xie et al., 2019b),也是卡林型金矿向碳酸盐交代型多金属矿床过渡的新类型金矿床(Sillitoe, 2020)。长江中下游探明多个明矾石高硫体系和相关的中小型高硫和低硫型浅成低温金/银矿床,位于该带中段的安庆-贵池矿集区抛刀岭大型金矿的金资源/储量大于35 t(黄柯等, 2022),矿体主要产于花岗闪长斑岩脉,少部分产于志留纪碎屑岩中,有些学者推测其为斑岩型金矿床,矿区广泛发育雄黄-雌黄低温矿物组合,金矿化主要与伊利石-白云母-石英-黄铁矿±碳酸盐有关,与含金黄铁矿共生的热液白云母原位 LA-ICP-MS/MS Rb-Sr 定年表明,金矿化主要发生在134~132 Ma,明显晚于赋矿石英闪长斑岩(148~147 Ma)和花岗闪长斑岩(142~141 Ma),金矿化与深部晚期隐伏岩浆作用有关(未发表资料),并得到最新找矿勘查资料证实,抛刀岭西侧新发现的金矿体主要产于泥质页岩、粉砂岩中(与安徽324队江志交流)。根据蚀变矿物、硫化物组合和同位素的证据,初步提出抛刀岭为长江中下游首例中硫型浅成低温金矿床(黄柯等, 2022),深部部具有较大的找矿潜力。结合区域资料,提出产于沉积岩和脉岩中的金矿床是与隐伏岩浆有关的远成低温金矿床,是长江中下游成矿带的新类型金矿(谢桂青等, 2017),与相邻的斑岩-矽卡岩铜矿床构成同一成矿系统,形成以岩体为中心的铜金、铅锌、金的分带模型,建立了氧化性岩浆有关的斑岩-矽卡岩铜金矿床+远成低温金矿床组合模型(图14),提出加强在斑岩-矽卡岩铜金矿床外围寻找受断裂控制的远成低温金矿床,开拓了找矿的新方向。

7 还原性矽卡岩钨金锑矿床组合模型

根据含矿岩浆氧化还原条件和分异程度不同,中国矽卡岩矿床分为四大类型:与氧化性中-强分异岩浆有关的斑岩-矽卡岩钨铜铅锌矿床、与氧化性弱—中分异岩浆有关的斑岩-矽卡岩铁-铜-金铅锌矿床、与还原性强分异岩浆有关的锡钨铅锌矿床、与还原性弱分异岩浆有关的金铅锌矿床,其中,还原性金矿床在中国主要为远成矽卡岩矿床,4类矿床均有不

同成矿元素分带性,如与还原性强分异岩浆有关的锡钨铅锌矿床存在岩体中云英岩锡±钨,近端矽卡岩锡±铜±铁、远成矽卡岩锡和更远成矽卡岩铅锌矿体(Chang et al., 2019)。湘中地区岩体以还原性为主,不同于长江中下游矽卡岩铜铁金矿床相关的氧化性岩浆(图15)。

20世纪90年代以来,国际上提出钨锡成矿省中有与还原性侵入岩有关的金矿床(Thompson et al., 1999),以产有钛铁矿还原性花岗质岩中的席状矿脉为特征,形成深度为5~7 km,硫化物和铜含量均较低,推测外围有锑金矿脉和远成铅锌银矿脉(Hart, 2007),产于浅变质岩中的金矿床是与侵入岩有关的金矿还是以变质流体为主的造山型金矿床一直存在较大争议(Sillitoe, 2024)。前文所述,矽卡岩钨矿床可分为还原性和氧化性钨矿床,但还原性矽卡岩钨矿床的规模明显大于氧化性矽卡岩钨矿床,前者形成深度与还原性侵入岩有关的金矿床相当(Newberry and Einaudi, 1981; Meinert et al., 2005; Hart, 2007)。中国探明了多个世界级矽卡岩钨锡矿床,华南地区超大型—大型钨矿床主要为还原性矽卡岩钨矿床,如江南造山带东段还原性钨矿床规模明显大于氧化性钨矿床,岩浆过程是控制上述2类钨矿床的关键因素,认为中地壳的物质部分熔融形成了还原性钨矿床含矿岩浆,氧化性钨矿床含矿岩浆是下地壳岩浆和幔源混合的产物(Song et al., 2021)。因此,还原性矽卡岩钨金锑矿床的矿床组合模型一直是国际研究的焦点。

华南东部、西部分别发育全球最大的与花岗岩有关的钨锡矿床、全球第二大低温锑金矿床,两者内在的成因联系是尚待解决的科学难题(胡瑞忠等, 2021)。传统观点认为:W为高温、亲石成矿元素,Au为亲铜元素,Sb为低温成矿元素(刘英俊等, 1984),三者似乎难以同步富集。湘中是全球最大的锑和金矿集区,位于华南东部和西部的过渡地区,研究识别产于硅钙界面的曹家坝大型钨矿床为中国首个远成还原性矽卡岩钨矿床,成矿作用与隐伏岩浆有成因联系,形成于中晚三叠世,伴生金锑矿化(Xie et al., 2019a);产于板岩中的脉状锑金矿床共伴生钨矿化,主要形成于中—晚三叠世,存在燕山期矿化叠加,可见亲岩浆矿物(白钨矿、黑钨矿、铜铋锑化物和 Bi_7Te_3)与自然金共生,钨和锑金矿床中白钨矿具有类似的铼-钨-氢-氧同位素组成,推测它们为

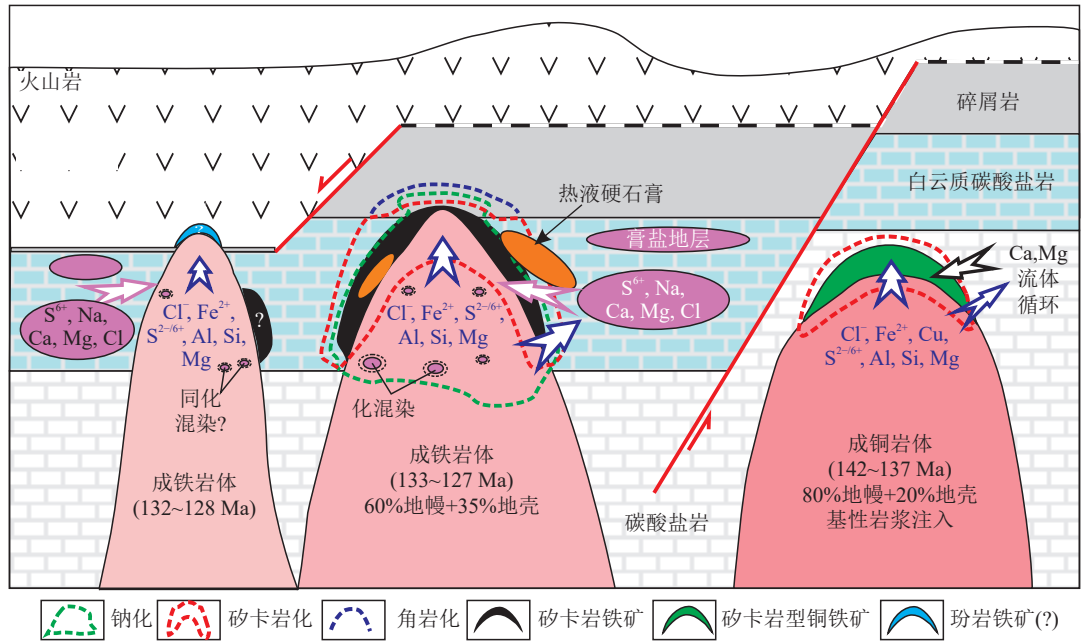


图 13 鄂东矿集区矽卡岩铜铁矿床+膏盐层成矿系统矿床模型 (据谢桂青等, 2025 修改)

Fig. 13 Deposit model of skarn Cu-Fe deposits and evaporite layer metallogenic systems in the Edong ore cluster

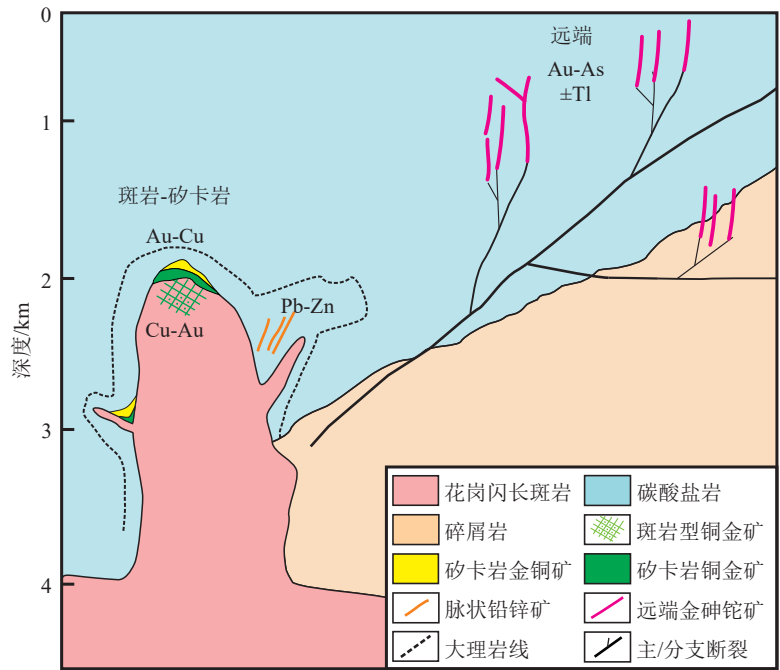


图 14 长江中下游氧化性岩浆有关的斑岩-矽卡岩铜金矿床+远成低温金矿床组合模型 (据 Xie et al., 2019b 修改)

Fig. 14 Model of porphyry-skarn Cu-Au deposits associated with oxidized magmatism and distal low-temperature Au deposits in the Middle-Lower Yangtze River region

与还原性侵入岩有关的远成金锑矿床 (Li et al., 2018; 张志远等, 2023)。结合近年来在还原性花岗质岩体中探明的细脉浸染状钨矿床和石英型钨矿床, 确定低温金锑矿与还原性花岗岩有关的钨矿为同一

成矿系统, 建立了还原性岩浆有关的斑岩-矽卡岩钨矿床+低温金锑矿床组合模型 (图 16), 揭示矿田 (床) 尺度有“上钨、中金、下钨”的分带规律, 提出钨、金和钨矿互为找矿标志的新认识。这种“上钨下

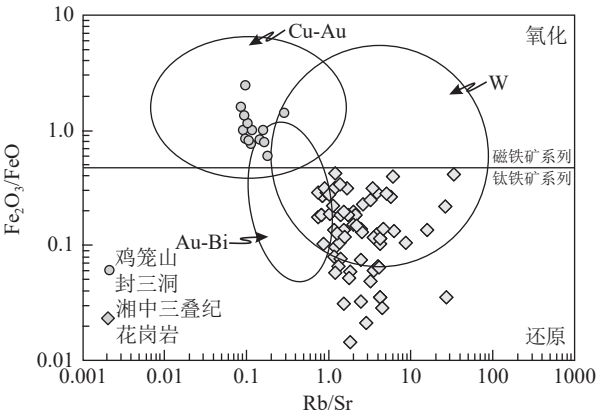


图 15 鄂东南和湘中地区含矿岩体的氧化还原条件 (原始数据来源于 Wang et al., 2007, 2012, 2015; 陈卫峰等, 2007; Qiu et al., 2014; Xu et al., 2014; 刘凯等, 2014; Xie et al., 2015; 柏道远等, 2016)

Fig. 15 Redox conditions of ore-bearing intrusions in southeastern Hubei and central Hunan regions

金”分带不仅在湘中地区普遍发育,在秦岭等多个成矿带也具有类似的分带现象。突破了国外还原性侵入岩有关金矿主要在岩体内部发育的传统认识 (Thompson et al, 1999), 提出中国独具特色的产于地层中还原性侵入岩有关的矽卡岩钨金铋成矿系统 (Xie et al., 2019a, c)。谢桂青等 (2021) 全面分析了华南已有的三叠纪矿床特征, 揭示成矿带尺度钨金铋成矿元素分带规律, 认为湘中和右江低温铋金矿深部有很大的找矿潜力 (图 17), 开拓了找矿新方向。最近, 在贵州右江卡林型金矿集区土壤发现钨化探异常, 矿石的 Au 和 W 含量呈正相关性, 暗示深部有寻找钨矿床的找矿潜力 (与高伟交流)。在湘中低温铋金矿区深部多处发现金和钨矿体, 如湖南龙山、板

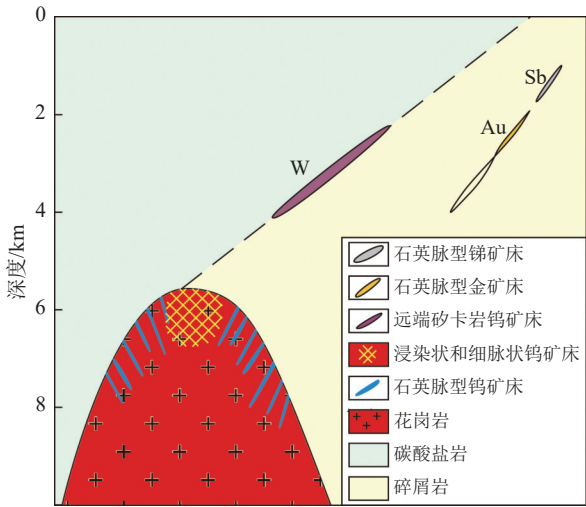


图 16 还原性岩浆有关的斑岩-矽卡岩钨矿床+低温金铋矿床组合模型

Fig. 16 Model of porphyry-skarn W deposits associated with reduced magmatism and low-temperature Au-Sb deposit associations

溪大型铋矿床深部发现厚大金矿体, 在杏枫山金矿区发现品位高、资源潜力大的还原性矽卡岩钨矿体 (彭建堂, 2019)。

8 展 望

矽卡岩矿床是岩浆热液矿床的最重要类型之一, 勘查开发和研究历史很长。斑岩-矽卡岩复合矿床一直是国际矿床界勘查的主攻类型, 对于特定具体矿床来说, 斑岩、矽卡岩矿体占比存在明显的差异, 有些矽卡岩矿床有少量资源/储量的斑岩铜矿体 (如印尼 Batu Hijau)、30% 资源/储量的斑岩铜矿体 (如美国 Bingham)、60% 资源/储量的斑岩铜矿体 (如

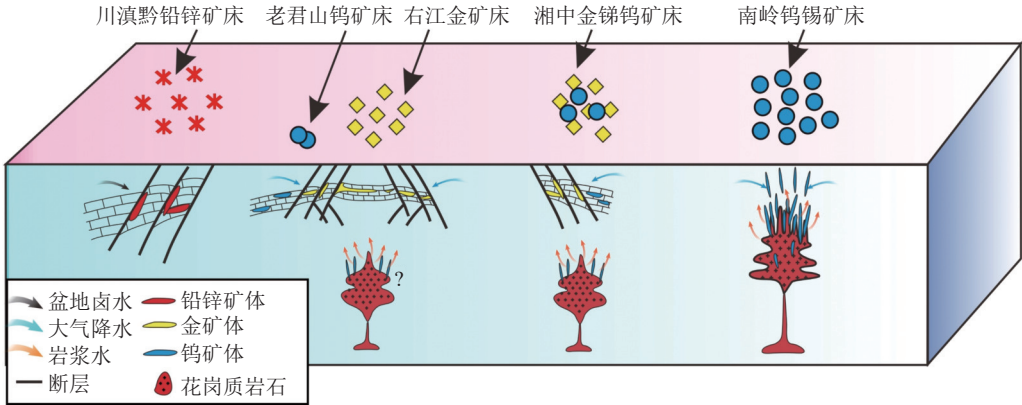


图 17 华南地区三叠纪矿床分带模型 (据谢桂青等, 2021 修改)

Fig. 17 Mineral deposit model for the Triassic deposits in South China

印尼 Grasberg 和中国甲玛) 和 80% 资源/储量的斑岩铜矿体 (如巴布亚新几内亚 OK Tedi)(Chang et al., 2015)。中国东昆仑和长江中下游成矿带探明了以矽卡岩矿体为主的斑岩-矽卡岩铜矿床, 如江西省城门山大型铜矿床 (铜资源/储量 235×10^4 t), 其中, 斑岩、矽卡岩和层间交代矿体占全区铜资源/储量比例分别为 15%、30% 和 55%(未发表资料)。到目前为止, 控制矽卡岩矿体/斑岩矿体比例的根本原因还不清楚。除产于岩体与碳酸盐岩地层接触带的矽卡岩矿床外, 还应加强远成矽卡岩矿床和交代火成岩矽卡岩矿床的矿床模型研究。建议以关键科技问题为导向的大比例尺矿产专题填图, 如成矿系统的大富矿体就位机制, 开展斑岩-矽卡岩矿床成矿地质要素调查与找矿预测; 研究矿集区、矿田、矿床等多尺度的矽卡岩矿物组合、硫化物和成矿元素的分带模式; 从成矿系统角度, 以比较矿床学为指导思想, 构建“三位一体”找矿模型, 在新层位、新类型、新矿种等方面开拓找矿方向, 实现找矿增储, 推动大型资源基地建设。

矽卡岩矿床常共伴生多种成矿元素矿化, 需建立研究相对较少的矽卡岩铀、稀土、铍、氟和硼矿床的矿床模型, 近年来, 在南岭和东南沿海发现大规模的伴生矽卡岩萤石矿床, 中国东南沿海矽卡岩矿床共生大型矽卡岩萤石矿 (朱启象, 2024), 南岭矽卡岩钨锡矿共伴生大规模萤石矿 (侯占德等, 2024), 如湖南柿竹园超大型钨多金属矿床探明萤石资源 8000×10^4 t(毛景文等, 2024)。矽卡岩矿床共伴生多种稀散元素矿化, 如斑岩-矽卡岩铜金矿床常伴生大量的碲、硒资源, 提供了全球目前几乎所有的碲、硒产量, 长江中下游成矿带多处铜多金属矿床共伴生大规模的碲、硒矿床, 相当于 18 个大型碲矿床、21 个大型硒矿床, 这些矿产资源已部分回收利用, 但碲、硒的成矿规律和矿床模型还不清楚 (谢桂青等, 2024)。因此, 建议加强矽卡岩矿床共伴生矿化的矿床模型和找矿预测的研究, 提升综合利用水平。

矽卡岩矿床与不同类型岩浆有成因联系, 近年来晶粥岩浆系统的研究取得了重要进展, 堆晶体和相关低分异的闪长质岩浆形成铜多金属矿床, 高分异的花岗质岩浆形成钨锡多金属矿床, 但穿地壳岩浆系统与矽卡岩成矿关统的耦合关系还不清楚。除了岩浆岩成矿专属性外, 赋矿地层、成矿深度、剥蚀深度对矽卡岩矿床的成矿系统影响相对薄弱, 初步

研究表明, 地层中有机碳和成矿较深均不利于矽卡岩的形成 (Chang et al., 2008)。因此, 建议加强成矿带、矿集区和矿田等尺度, 评估穿地壳岩浆系统、赋矿地层物理性质、成矿深度和剥蚀深度对矽卡岩矿床形成的影响。相比斑岩铜矿, 矽卡岩矿床的指针矿物勘查标识的研究程度较低, 产于碳酸盐岩中的岩浆热液矿床普遍发育广泛的隐性蚀变 (cryptic alteration)。因此, 建议开展矿田、矿床尺度的蚀变矿物短波-远红外-拉曼多光谱的研究, 结合矿化蚀变分带和矿物原位成分分析, 构建基于大数据的多矿物多光谱多参数的矿床模型, 探讨不同矿床类型之间的内在联系, 破解新矿床成矿机制, 开拓找矿新方向, 推动找矿突破。

致谢: 本文第一作者自 2003 年以来一直开展矽卡岩矿床的矿床模型与找矿预测研究, 得到了湖北、湖南等多个省份一线地勘队伍和多位老师的大力支持和指导, 在此表示衷心感谢; 同时感谢两位审稿专家的建议性意见。

References

- Atkinson W W Jr, Einaudi M T. 1978. Skarn formation and mineralization in the contact aureole at Carr Fork, Bingham, Utah[J]. *Economic Geology*, 73: 1326–1365.
- Bai D H, Wu N J, Zhong X, et al. 2016. Geochronology, Petrogenesis and tectonic setting of Indosinian Wawutang granites, Southwestern Hunan Province[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 40: 1075–1091(in Chinese with English abstract).
- Burt D M. 1982. Skarn deposits—Historical bibliography through 1970[J]. *Economic Geology*, 77: 755–763.
- Chang Y F, Liu X G. 1983. On strata-bound skarn deposits[J]. *Mineral Deposits*, 2(1): 11–20 (in Chinese with English abstract).
- Chang Z S, Meinert L D, Lawrence D M, et al. 2018. Skarns replacing igneous rocks[C]//15th Quadrennial IAGOD Symposium, Salta, Argentina, 28–31 August: 207–208.
- Chang Z S, Mrozek S, Meinert L D, et al. 2015. Skarn-porphyry transition: An example from the Antamina skarn, Peru[C]//Proceedings of PACRIM, AusIMM PACRIM Congress, 18–21 March 2015, Hong Kong, China: 409–413.
- Chang Z S, Shu Q H, Meinert L D. 2019. Skarn deposits of China[M]. SEG Special Publications, 22: 189–234.
- Chang Z S. 2021. Skarn: Zoning patterns and controlling factors[C]//The 13th MGRI Annual Convention, Jakarta, 14–16 December: 19–25.
- Chen W F, Chen P R, Huang H Y, et al. 2007. Chronological and geochemical studies of granite and enclave in Baimashan pluton, Hunan, South China[J]. *Science in China (Series D)*, 50(11): 1606–1627(in Chinese with English abstract).

- Chen Y J, Chen H Y, Zaw K, et al. 2007. Geodynamic settings and tectonic model of skarn gold deposits in China: an overview[J]. *Ore Geology Reviews*, 31: 139–169.
- Einaudi M T, Burt D M. 1982. Introduction—Terminology, classification, and composition of skarn deposits[J]. *Economic Geology*, 77: 745–754.
- Einaudi M T, Meinert L D, Newberry R J. 1981. Skarn deposits[J]. *Economic Geology*, 75th Anniversary Volume: 317–391.
- Einaudi M T. 1982. General features and origin of skarns associated with porphyry copper plutons[C]//Titley S R. *Advances in Geology of the Porphyry Copper Deposits, Southwestern U. S. Arizona*: Univ. Arizona Press: 185–209.
- Ettlinger A D, Meinert L D, Ray G E. 1992. Gold skarn mineralization and fluid evolution in the Nickel Plate deposit, Hedley District, British Columbia[J]. *Economic Geology*, 87: 1541–1565.
- Gaspar L M, Inverno C M C. 2000. Mineralogy and metasomatic evolution of distal strata-bound scheelite skarns in the Riba de Alva Mine, Northeastern Portugal[J]. *Economic Geology*, 95: 1259–1275.
- Graybeal F T. 2022. Aspects of mineral exploration thinking[J]. *SEG Discovery*, 128: 24–35.
- Hart C J R. 2007. Reduced intrusion-related gold systems[M]. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division Special Publication, 5: 95–112.
- Hosseini Z, Swennen R, Mahboubi A, et al. 2022. Stylolites (re)activation: A factor in fluid flow and ore emplacement of Irankuh[J]. *Sedimentary Geology*, 431: 106108.
- Hou Z D, Zhao Z, Xu Y M, et al. 2024. Exploration model and deep prospecting prediction of Jiepailing tin-fluorite deposit in Hunan Province, China[J]. *Mineral Deposits*, 43(1): 128–143(in Chinese with English abstract).
- Hu R Z, Yan P L, Qiu L, et al. 2021. Large scale low-temperature metallogenesis in south China[M]. Beijing: Science Press: 1–468(in Chinese).
- Huang K, Xie G Q, Duan L A, et al. 2022. Identification of Paodaoling large intermediate-sulfidation epithermal gold deposit in Middle–Lower Yangtze River Valley metallogenic belt and its implication for mineral exploration[J]. *Mineral Deposits*, 41(2): 440–448 (in Chinese with English abstract).
- Huang Y, Pei R F, Ren G Z, et al. 1957. On the Daye-type iron deposit[J]. *Acta Geologica Sinica*, 37(2): 191–202(in Chinese with English abstract).
- Jinari A, Rddad L, Mouguina E M, et al. 2023. Origin of the Amensif Zn–Cu (Pb–Ag–Au) distal skarn deposit (Western High Atlas, Morocco): Constraints from C–O–S isotopes[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 199: 104850.
- Kwak T A P, White A J R. 1982. Contrasting W–Mo–Cu and W–Sn–F skarn types and related granitoids[J]. *Mineralium Deposita*, 32: 339–351.
- Kwak T A P. 1987. W–Sn skarn deposits and related metamorphic skarns and granitoids[M]. Elsevier: 1–451.
- Kyle J R, Rubin J N, McMahon T P, et al. 1991. Preliminary investigations of porphyry-skarn copper-gold orebodies, Ertzberg district, Irian Jaya, Indonesia[C]//Geological Society of Canada, Abstracts with Program, 16: A69.
- Lawrence D M, Allibone A H, Chang Z S, et al. 2017. The Tongon Au deposit, Northern Cote d'Ivoire: An example of Paleoproterozoic Au skarn mineralization[J]. *Economic Geology*, 112: 1571–1593.
- Li W, Xie G Q, Mao J W, et al. 2018. Muscovite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and in situ sulfur isotope analyses of the slate-hosted Gutaishan Au–Sb deposit, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 101: 839–853.
- Li Z Y, Xie G Q, Li S L, et al. 2024. Geology and geochronology of the Banchang distal Cu–Mo skarn deposit, Central China[J]. *Mineralium Deposita*, 59: 1185–1205.
- Lindgren W. 1933. *Mineral Deposits*[M]. McGraw-Hill: 1–930.
- Liu K, Mao J R, Zhao X L, et al. 2014. Geological and geochemical characteristics and genetic significance of the Ziyunshan pluton in Hunan province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88: 208–227(in Chinese with English abstract).
- Liu Y J, Cao L M, Li Z L, et al. 1984. *Element geochemistry*[M]. Beijing: Science Press: 1–548(in Chinese).
- Mao J W, Liu M, Yao F J, et al. 2024. Some points concerned in field of prospecting and exploration in China and future considerations[J]. *Mineral Deposits*, 43: 1211–1222(in Chinese with English abstract).
- Megaw P K M. 1998. Carbonate-hosted Pb–Zn–Ag–Cu–Au replacement deposits[C]//Lentz D R. *Mineralized Intrusion-Related Skarn Systems*. Mineral Association of Canada, Short Course, 26: 337–357.
- Meinert L D, Dipple G M, Nicolescu S. 2005. World skarn deposits[J]. *Economic Geology*, 100th Anniversary Volume: 299–336.
- Meinert L D. 1983. Variability of skarn deposits: Guides to exploration[C]//Boardman S J. *Revolution in the earth sciences*. Dubuque, Iowa, Kendall-Hunt, 301–316.
- Meinert L D. 1984. Mineralogy and petrology of iron skarns in western British Columbia, Canada[J]. *Economic Geology*, 79: 869–882.
- Meinert L D. 1989. Gold skarn deposits—Geology and exploration criteria[J]. *Economic Geology Monograph*, 6: 537–552.
- Meinert L D. 1992. Skarns and skarn deposits[J]. *Geoscience Canada*, 19: 145–162.
- Meinert L D. 2020. Geology, policy, and wine—the intersection of science and life[J]. *Geochemical Perspectives*, 9: 1–133.
- Mrozek S, Chang Z, Spandler C, et al. 2020. Classifying skarns and quantifying metasomatism at the Antamina deposit, Peru: Insights from whole-rock geochemistry[J]. *Economic Geology*, 115: 177–188.
- Nakano T, Yoshino T, Shimazaki H, et al. 1994. Pyroxene composition as an indicator in the classification of skarn deposits[J]. *Economic Geology*, 89: 1567–1580.
- Newberry R J, Einaudi M T. 1981. Tectonic and geochemical setting of tungsten skarn mineralization in the Cordillera[J]. *Arizona Geological Society Digest*, 14: 99–112.
- Pei R F, Liu Y, Lü F X. 1985. The rediscussion about Daye iron deposits[C]//Collector of institute of mineral deposits, Chinese Academy of Geological Sciences. Beijing: Geological Society of China, (3): 1–11(in Chinese).

- Peng J T. 2019. The first discovery of tungsten orebodies with high ore grades in the Xingfengshan gold deposit, Longhui County, Hunan Province[J]. *Geological Reviews*, 65(3): 664–670 (in Chinese with English abstract).
- Qiu L, Yan D P, Zhou M F, et al. 2014. Geochronology and geochemistry of the Late Triassic Longtan pluton in South China: Termination of the crustal melting and Indosinian orogenesis[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 103: 649–666.
- Shu Q H, Deng J, Chang Z S. 2024. Skarn zonation of the giant Jiamia Cu–Mo–Au deposit in southern Tibet, SW China[J]. *Economic Geology*, 119: 1–22.
- Sillitoe R H. 2010. Porphyry copper systems[J]. *Economic geology*, 105: 3–41.
- Sillitoe R H. 2020. Carlin-type and distal-disseminated gold deposits: a carbonate-replacement deposit perspective[C]//Koutz F R, Pennell W M. Vision for discovery: Geology and ore deposits of the basin and Range. v. 2. Geological Society of Nevada, Reno: 1055–1074.
- Sillitoe R H. 2024. Metallogeny and mineral exploration—Some personal reminiscences[J]. *Geochemical Perspectives*, 13: 1–196.
- Soloviev S G, Kryazhev S G, Dvurechenskaya S S. 2020. Geology, mineralization, and fluid inclusion characteristics of the Agylki reduced tungsten (W–Cu–Au–Bi) skarn deposit, Verkhoyansk fold-and-thrust belt, Eastern Siberia[J]. *Ore Geology Reviews*, 120: 103452.
- Song S W, Mao J W, Xie G Q, et al. 2021. The world-class mid-Mesozoic Jiangnan tungsten belt, South China: Coeval large reduced and small oxidized tungsten systems controlled by different magmatic petrogenesis[J]. *Ore Geology Reviews*, 139: 104543.
- Thompson J F H, Sillitoe R H, Baker T, et al. 1999. Intrusion-related gold deposits associated with tungsten-tin provinces[J]. *Mineralium Deposita*, 34: 323–334.
- Wang K X, Chen W F, Chen P R, et al. 2015. Petrogenesis and geodynamic implications of the Xiema and Ziyunshan plutons in Hunan Province, South China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 111: 919–935.
- Wang K X, Chen P R, Chen W F, et al. 2012. Magma mingling and chemical diffusion in the Taojiang granitoids in the Hunan Province, China: Evidences from petrography, geochronology and geochemistry[J]. *Mineralogy and Petrology*, 106: 43–264.
- Wang T Y, Xie G Q, Zuo J Z, et al. 2024. Thermal infrared spectral characteristics of garnet in the Zhibula Cu skarn deposit, Xizang, and their implications for mineral exploration[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 48: 1330–1343(in Chinese with English abstract).
- Wang Y, Fan W, Sun M, et al. 2007. Geochronological, geochemical and geothermal constraints on petrogenesis of the Indosinian peraluminous granites in the South China Block: A case study in the Hunan Province[J]. *Lithos*, 96: 475–502.
- Williams-Jones A E, Samson I M, Ault K M, et al. 2010. The genesis of distal zinc skarns: Evidence from the Mochito deposit, Honduras[J]. *Economic Geology*, 105: 1411–1440.
- Xie G Q, Han Y X, Mao J W, et al. 2017. Discovery of new types of gold deposits in the Fengshan ore field in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River: Distal disseminated gold deposits[J]. *Mineral Deposits*, 36(1): 265–268(in Chinese with English abstract).
- Xie G Q, Mao J W, Bagas L, et al. 2019a. Mineralogy and titanite geochronology of the Caojiaba W deposit, Xiangzhong metallogenic province, southern China[J]. *Mineralium Deposita*, 54: 459–472.
- Xie G Q, Mao J W, Richards J P, et al. 2019b. Distal Au deposits associated with Cu–Au skarn mineralization in the Fengshan area, Eastern China[J]. *Economic Geology*, 114: 127–142.
- Xie G Q, Mao J W, Li W, et al. 2019c. Granite-related Yangjiashan tungsten deposit, southern China[J]. *Mineralium Deposita*, 54: 67–80.
- Xie G Q, Mao J W, Zhang C Q, et al. 2021. Triassic deposits in South China: Geological characteristics, ore-forming mechanism and ore deposit model[J]. *Earth Science Frontiers*, 28(3): 252–270(in Chinese with English abstract).
- Xie G Q, Mao J W, Zhu Q Q, et al. 2015. Geochemical constraints on Cu–Fe and Fe skarn deposits in the Edong district, Middle–Lower Yangtze River metallogenic belt, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 64: 425–444.
- Xie G Q, Mao J W, Zhu Q Q, et al. 2020. Mineral deposit model of Cu–Fe–Au skarn system in the Edongnan Region, Eastern China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 94: 1797–1807.
- Xie G Q, Wu X L, Li X H, et al. 2024. A primary study on the current status and mineralization regularities of associated Te and Se resources in porphyry-skarn Cu polymetallic deposits in the Middle–Lower Yangtze River Valley metallogenic belt, China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 43: 35–48(in Chinese with English abstract).
- Xie G Q, Zhu Q Q, Gao B L, et al. 2025. Ore deposit model of the Daye-type iron deposits in the Edongnan district, Eastern China[J]. *Mineral Deposits*, 44(1): 67–84.
- Xie G Q, Zhu Q Q, Li W, et al. 2016. Geology of Daye type iron deposits in Hubei Province[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1–141 (in Chinese with English abstract).
- Xu H J, Ma C Q, Zhao J H, et al. 2014. Petrogenesis of Dashenshan I-type granodiorite: Implications for Triassic crust–mantle interaction, South China[J]. *International Geology Review*, 56: 332–350.
- Zhai Y S, Shi Z L, Lin X D, et al. 1982. Genesis of "Daye type" iron ore deposits in eastern Hubei, China[J]. *Earth Science–Journal of Wuhan College of Geology*, 3(18): 239–251(in Chinese with English abstract).
- Zhai Y S. 2004. Mr. Xie Jiarong for his contributions to mineral deposit science and mineral exploration[J]. *Chinese Geological Education*, 13(1): 44–47 (in Chinese).
- Zhai Y S, Yao S Z, Cai K Q. 2011. *Mineral Deposits*[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1–413(in Chinese).
- Zhang Z Y, Xie G Q, Yuan L, 2023. Discussion of the genetic relations between W and Sb–Au mineralization of Xiangzhong ore district: Constraints from Sr–Nd–H–O isotopic compositions of the Caojiaba W and Longshan Sb–Au deposits[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 39(6): 1847–1860(in Chinese with English abstract).
- Zhao Y M, Feng C Y, Qu H Y, et al. 2023. Major skarn deposit in the world[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese with English abstract).

English abstract).

Zhao Y M, Lin W W, Bi C S, et al. 1990. Sharn deposits of China[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-354 (in Chinese).

Zhao Y M, Zhang Y N, Bi C S. 1994. Geology of gold-bearing skarn deposits in the Middle and Lower Yangtze River Valley and adjacent regions[J]. Ore Geology Reviews, 14: 227-249.

Zharikov V A. 1970. Skarns[J]. International Geology Review, 12: 541-559, 619-647, 760-775.

Zhu Q X. 2024. Geochemical characteristics and genesis of the skarn type fluorite deposit in Fengshan-Chibanchang, Southwest Fujian Province[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 52: 236-244.

附中文参考文献

柏道远, 吴能杰, 钟响, 等. 2016. 湘西南印支期瓦屋塘岩体年代学、成因与构造环境[J]. 大地构造与成矿学, 40: 1075-1091.

常印佛, 刘学圭. 1983. 关于层控式矽卡岩型矿床——以安徽省内下扬子坳陷中一些矿床为例[J]. 矿床地质, (1): 11-20.

陈卫峰, 陈培荣, 黄宏业, 等. 2007. 湖南白马山岩体花岗岩及其包体的年代学和地球化学研究[J]. 中国科学(D辑), 37(7): 873-893.

侯占德, 赵正, 许以明, 等. 2024. 湖南界牌岭大型锡-萤石矿床勘查模型与深部找矿预测[J]. 矿床地质, 43(1): 128-143.

胡瑞忠, 颜平亮, 邱亮, 等. 2021. 华南大规模低温成矿作用[M]. 北京: 科学出版社: 1-468.

黄柯, 谢桂青, 段留安, 等. 2022. 长江中下游抛刀岭大型中硫型浅成低温热液金矿床的厘定及其找矿启示[J]. 矿床地质, 41: 440-448.

黄懿, 裴荣富, 任冠政, 等. 1957. 论大冶式铁矿[J]. 地质学报, 37(2): 191-202.

刘凯, 毛建仁, 赵希林, 等. 2014. 湖南紫云山岩体的地质地球化学特征及其成因意义[J]. 地质学报, 88: 208-227.

刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 1984. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1-548.

毛景文, 刘敏, 姚佛军, 等. 2024. 当前中国找矿勘查值得关注的问题与

发展方向[J]. 矿床地质, 43: 1211-1222.

裴荣富, 刘瑛, 吕凤翔. 1985. 再论大冶式铁矿[J]. 中国地质科学院矿床地质研究所刊, (3): 1-11.

彭建堂. 2019. 湖南杏枫山金矿区首次发现高品位的钨矿体[J]. 地质论评, 65: 664-670.

王天语, 谢桂青, 左俊增, 等. 2024. 西藏知不拉矽卡岩铜多金属矿床石榴子石热红外光谱特征及其找矿指示意义[J]. 大地构造与成矿学, 48: 1330-1343.

谢桂青, 韩颖霄, 毛景文. 2017. 长江中下游成矿带丰山矿田发现新类型金矿——远端浸染型金矿床[J]. 矿床地质, 36: 265-268.

谢桂青, 毛景文, 张长青, 等. 2021. 华南地区三叠纪矿床地质特征、成矿规律和矿床模型[J]. 地学前缘, 28: 252-270.

谢桂青, 吴晓林, 李新昊, 等. 2024. 长江中下游斑岩-矽卡岩铜多金属矿床共生碲、硒资源现状和成矿规律浅析[J]. 矿物岩石地球化学通报, 43: 35-48.

谢桂青, 朱乔乔, 高宝龙, 等. 2025. 大冶式铁矿的矿床模型探讨[J]. 矿床地质, 44(1): 67-84.

谢桂青, 朱乔乔, 李伟, 等. 2016. 湖北大冶式铁矿地质[M]. 北京: 地质出版社: 1-141.

翟裕生. 2004. 谢家荣先生对矿床学和矿产勘查工作的贡献[J]. 中国地质教育, 13(1): 44-47.

翟裕生, 石淮立, 林新多, 等. 1982. 鄂东大冶式铁矿成因的若干问题[J]. 地球科学—武汉地质学院学报, 3(18): 239-251.

翟裕生, 姚书振, 蔡克勤, 等. 2011. 矿床学[M]. 北京: 地质出版社: 1-413.

张志远, 谢桂青, 袁亮. 2023. 湘中矿集区钨与铋-金成因联系探讨: 来自曹家坝钨矿床和龙山铋金矿床 Sr-Nd-H-O 同位素的制约[J]. 岩石学报, 39: 1847-1860.

赵一鸣, 丰成友, 瞿泓滢, 等. 2023. 世界主要矽卡岩矿床[M]. 北京: 地质出版社.

赵一鸣, 林文蔚, 毕成思, 等. 1990. 中国矽卡岩矿床[M]. 北京: 地质出版社: 1-354.

朱启象. 2024. 闽西南凤山-赤坂场矽卡岩型萤石矿床地球化学特征及成因[J]. 福州大学学报(自然科学版), 52: 236-244.