

几种重要热液矿床成矿的岩浆作用贡献探讨

曾钦旺¹⁾, 石少华²⁾, 钱 滔³⁾, 吴承东³⁾, 潘军华⁴⁾, 魏元泵⁵⁾, 陈雨林⁴⁾

1)湖南省地质院, 湖南长沙 410014; 2)湖南省地质调查所, 湖南长沙 410014;
3)湖南省核地质调查所, 湖南长沙 410007; 4)湖南省地球物理地球化学调查所, 湖南长沙 410014;
5)湖南省生态地质调查监测所, 湖南长沙 410119

摘 要: 本文运用地球科学相关基础学科的基本理论知识, 结合地质工作实践认识和矿床地质特征分析, 对几种重要热液矿床成矿的岩浆作用贡献进行分析探讨, 提出了新的认识。研究结果认为: ①地下水是通过补给和排泄交替循环的, 因此, 通过简单的地下水的循环逐步转化为含矿热液成矿是难以实现的, 地下水层控热液矿床成矿流体往往是经历了深部岩浆房驱动的热水循环。②地下卤水不是形成内生多金属矿床的矿源体, 其本身不具有形成多金属矿床的成矿物质条件, 产于板缘地热异常带内的热卤水中的多金属元素, 是板块活动引起的强烈的岩浆-火山活动所提供, 卤水起到了活化、富集和搬运金属元素的作用。③MVT 铅锌矿床和卡林型金矿床的矿床特征本身说明它们的成矿与岩浆热液有成因关系。④根据变质作用和变质岩的定义, 所有的变化是在固态条件下进行的, 变质作用和变质岩难以形成变质热液矿床, 其成因类型可归为岩浆热液矿床。⑤韧性剪切带是岩浆热力作用和构造应力作用下的塑性变形, 成矿是岩浆热液在后期脆性断裂中充填交代而成。对矿床成因的正确认识, 可有效的指导找矿勘查工作。岩浆成矿作用是最广泛、最强烈的成矿作用之一。

关键词: 地下水层控热液矿床; 地下卤水多金属矿床; MVT 铅锌矿床; 卡林型金矿床; 变质热液矿床; 韧性剪切带型金矿床

中图分类号: P611 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2024.020201

Magmatic Contributions to the Mineralization of Several Important Hydrothermal Deposits

ZENG Qinwang¹⁾, SHI Shaohua²⁾, QIAN Tao³⁾, WU Chengdong³⁾,
PAN Junhua⁴⁾, WEI Yuanbeng⁵⁾, CHEN Yulin⁴⁾

1) Geological Bureau of Hunan Province, Changsha, Hunan 410014;
2) Geological Survey Institute of Hunan Province, Changsha, Hunan 410014;
3) Nuclear Geological Survey of Hunan Province, Changsha, Hunan 410007;
4) Geophysical and Geochemical Survey Institute of Hunan Province, Changsha, Hunan 410014;
5) Ecological Geological Survey and Monitoring Institute of Hunan Province, Changsha, Hunan 410119

Abstract: Based on the fundamental theoretical knowledge of relevant basic disciplines within the earth sciences, in combination with an understanding of geological work practices and an analysis of the geological characteristics of mineral deposits, this study examined the contribution of magmatism to the mineralization of several important hydrothermal deposits and revealed some new understandings. The results of the study follow: ① Groundwater is alternately cycled through recharge and drainage, so it is difficult to realize the gradual transformation to ore-bearing hydrothermal mineralization through the simple groundwater cycle. Ore-forming fluids in groundwater-stratified hydrothermal deposits frequently undergo a hot water cycle propelled by deep magma chambers. ② Underground brine is not the formative source of endogenous polymetallic deposits, and it does

本文由中国地质调查局项目(编号: DD20221695)、湖南省自然资源厅项目(编号: 湘资发[2020]41 号)和湖南省地质院科研项目(编号: 201702)联合资助。

收稿日期: 2023-10-14; 改回日期: 2024-01-31; 网络首发日期: 2024-02-05。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 曾钦旺, 男, 1949 年生。本科, 教授级高级工程师。长期从事有色、贵金属、稀有、稀土金属的找矿勘查工作。

E-mail: zqw516003212@163.com。

not have the metallogenic material conditions for the formation of polymetallic deposits. The polymetallic elements in the hot brine within the geothermal anomaly zone at the edge of a plate are provided by the strong volcanic activity caused by plate interaction. The brine plays the roles of activation, enrichment, and transportation of metallic elements. ③ The deposit characteristics of MVT-type lead-zinc deposits and Carlin-type gold deposits indicate that their mineralization is genetically related to magmatic-hydrothermal activity. ④ According to the definitions of metamorphism and metamorphic rocks, all changes occur under solid conditions, and it is difficult for metamorphic hydrothermal deposits to form as a result of metamorphism and metamorphic rocks. Their genetic types can be classified as magmatic-hydrothermal deposits. ⑤ The ductile shear zone is a zone of plastic deformation under the action of magmatic thermodynamics and tectonic stress, and the mineralization that occurs is associated with the emplacement of magmatic-hydrothermal fillings in the late brittle fracture stage. A correct understanding of deposit genesis effectively guides prospecting work, and magmatic mineralization is a widespread and potent mineralization.

Key words: underground water stratified hydrothermal deposit; underground brine polymetallic deposit; MVT Pb-Zn deposit; Carlin-type gold deposit; metamorphic hydrothermal deposit; ductile shear zone-type gold deposit

对矿床成因的正确认识,使找矿勘查工作方向和工作方法更明确,可以有效指导找矿勘查工作,提高找矿勘查工作的效率和效益。

岩浆成矿作用是最广泛、最重要的成矿作用,也是最强烈的成矿作用之一。本文通过对地质类有关学科的进一步学习研究,结合数十年地质工作的实践认识和对若干重要热液矿床地质特征的研究,对地下水层控热液矿床、地下卤水多金属矿床、MVT 铅锌矿床、卡林型金矿床、变质热液矿床、韧性剪切带型金矿床的传统成因认识提出了质疑,对相关矿床成矿潜在的岩浆(水)的贡献做出了进一步分析。

1 层控热液矿床成矿的岩浆作用贡献

根据 2011 年出版印刷的《矿床学》(第三版)(北京地质出版社),内生矿床包括岩浆矿床、伟晶岩矿床、接触交代(矽卡岩)矿床、热液矿床和火山成因矿床。其中,针对热液矿床,这一观点认为,“除与岩浆明显有关的热液矿床外,还有相当一部分与岩浆活动无直接关系”,“我们暂统称其为层控热液矿床”;“这类矿床主要产于地壳浅部和表层,包括造山带的地热异常区和断裂、裂谷带内的地热异常区;这些异常区的地热能使得岩层内同生水或循环的地下水的化学活动性增强,包括溶解围岩中成矿组分的能力,被逐步转化为含矿热液”而成矿(翟裕生等, 2011)。实际上,这就是地下水层控热液矿床的成矿机制。这一观点认为层控热液矿床的成因类型为地下水热液矿床,层控热液矿床为其工业类型。

地下水是“以各种形式埋藏在地壳岩石中的水”,是通过地下水的补给-径流-排泄循环更新的。其中,地下水的补给主要是降水和地表水,排泄方式则主要有含水断裂排泄、含水层排泄、岩溶暗河水

排泄及泉水排泄等形式。依据地下水循环的强烈程度,由上而下划分为积极水交替带、缓慢水交替带及水交替停滞带(地质矿产部《地质辞典》办公室, 1986)。因此,地下水的循环是开放环境下的交替循环,而不是封闭环境的地下水不间断的长久性的自循环,单纯通过地下水的交替循环,使地下水逐步转化为成矿热液是难以实现的。既然地下水不能转化为成矿热液,而岩层内的同生水 and 成矿物质又是有限的,溶出的成矿组分就更有限了,那么地下水也就不能通过循环形成成矿的热液,当然也就不能形成热液矿床了。实际上,相关矿床的成矿流体往往是经历了深部岩浆房驱动的热循环后形成的。同时,岩浆去气可能向成矿流体注入 CO_2 等其他有利成矿的气体组分(蒋昌宏等, 2022)。

总结前人研究可发现,地下水层控热液矿床观点总结的层控热液矿床的特点与中低温岩浆热液层控(状)矿床特点相似,但认为这类矿床矿区附近无岩浆岩或肯定与岩浆岩无成因关系,同时也提出了这类矿床独有的特点:①成矿温度较低;②硫化物矿石中 δS^{34} 同位素值变化范围大;③相较于岩浆热液矿床的矿石年龄小于围岩,层控热液矿床的矿石铅同位素年龄可比围岩年轻,也可比围岩老,说明热液将较老地层中的铅带到了较新地层中成矿(翟裕生等, 2011)。但是,实际上,岩浆热液矿床的硫化物矿石中 δS^{34} 同位素值变化范围同样也会大(赵海杰等, 2016);矿石铅同位素年龄同样也可比围岩年轻或比围岩老,因为岩浆热液也可以将较老地层中的铅带到较新地层中去成矿。

对于层控热液矿床地表附近无岩浆岩的现象,不能认为其下部和深部也一定没有岩浆活动。例如,根据 1999 年原地质矿产部《重点成矿区物探、化探、遥感综合成果研究报告》编制的华南地区断裂-岩浆岩推断图,从湖南长沙往东到江西南昌 260 km,

往北东 200 km 到湖北嘉鱼约 26 000 km² 的三角形广大区域内(含湘东北隆起带及江西金山隆起带), 90% 的面积为出露的花岗岩和推断的隐伏花岗岩岩体, 雪峰隆起带及整个华南地区也有大于 60% 的面积为出露的花岗岩和推断的隐伏花岗岩岩体(丁鹏飞等, 1996; 孙文珂等, 1999)(图 1)。再比如, 湘东北地区的黄金洞、万古大型金矿床地表无岩浆岩出露, 离最近的连云山花岗岩体直线距离分别为 13 km 及 11 km, 但根据 1:20 万的重磁异常推断, 矿区下部均有较大面积的隐伏岩体存在(曾钦旺等, 2020)。

下面对归属为层控热液矿床的三个典型矿床类型, 地下卤水多金属矿床、MVT 铅锌矿床和卡林型金矿床成矿进行分析, 进一步论述岩浆作用对层控热液矿床成矿的贡献。

1.1 地下卤水多金属矿床成矿的岩浆作用贡献

1979 年出版的《矿床学》矿床分类里面提出, 地下卤水成矿作用是层控热液矿床的一种重要的、主导的成矿作用, 地下卤水矿床也是层控热液矿床的一种重要类型(袁见齐等, 1979)。

卤水的一般定义是指盐类含量大于 5% 的液态矿产, 聚集于地表的卤水为现代盐湖卤水或盐泉, 聚集于地表以下者称为地下卤水, 与石油聚集一起的称为石油卤水。地下卤水多是盐类矿床(体)被地表水或地下水溶滤下渗聚集的结果, 均与膏盐类矿床及含盐盆地有成因关系(王清明, 2007)。

国内外的现代盐湖、盐泉以及膏盐类矿床、地下卤水矿床, 绝大多数未发现除碱金属和碱土金属以外的重金属元素及其矿层、矿化层、矿物, 或重金属化合物。除了 K、Na、Ca、Mg 的氯化物、硫酸盐、硼酸盐、硝酸盐为主外, 卤水中还含有 Li、Rb、Cs、I、Br 等离子(王清明, 2007), 但是, 没有发现 Cu、Pb、Zn、Au、Ag、Hg、Sb 等元素或其他重金属矿物。这说明, 卤水本身不是金属矿床的矿源体, 这是一种普遍的现象。因为, “地热正常区占地球表面的 99% 以上”(地质矿产部《地质辞典》办公室, 1986), 富含重金属元素的地下热卤水只存在占地球表面不到 1% 的地热异常区, 地下热卤水要富含成矿重金属元素, 仅有地热能是不能实现的, 而是必须有新的矿源体提供重金属等成矿物质, 这个矿源体应该是岩浆-火山热液。

1979 年出版的《矿床学》认为, “红海、美国加利福尼亚州南部索尔顿湖、原苏联里海切兼半岛及堪察加半岛等地的地下热卤水含盐度高, 富含多种金属。当温度降低时能沉淀出多种金属矿物, 是解释热卤水成矿的有力证据”(袁见齐等, 1979)。但是, 世界各国已发现、开采、研究的膏盐类矿床、卤水矿床、盐泉矿床等绝大多数不含重金属元素和重金属矿物, 这些极少数的富含多种重金属元素的地下热卤水, 一定有它的独特的地质环境和生成条件。地球上有 5 大板块边缘地热异常带, 最著名的

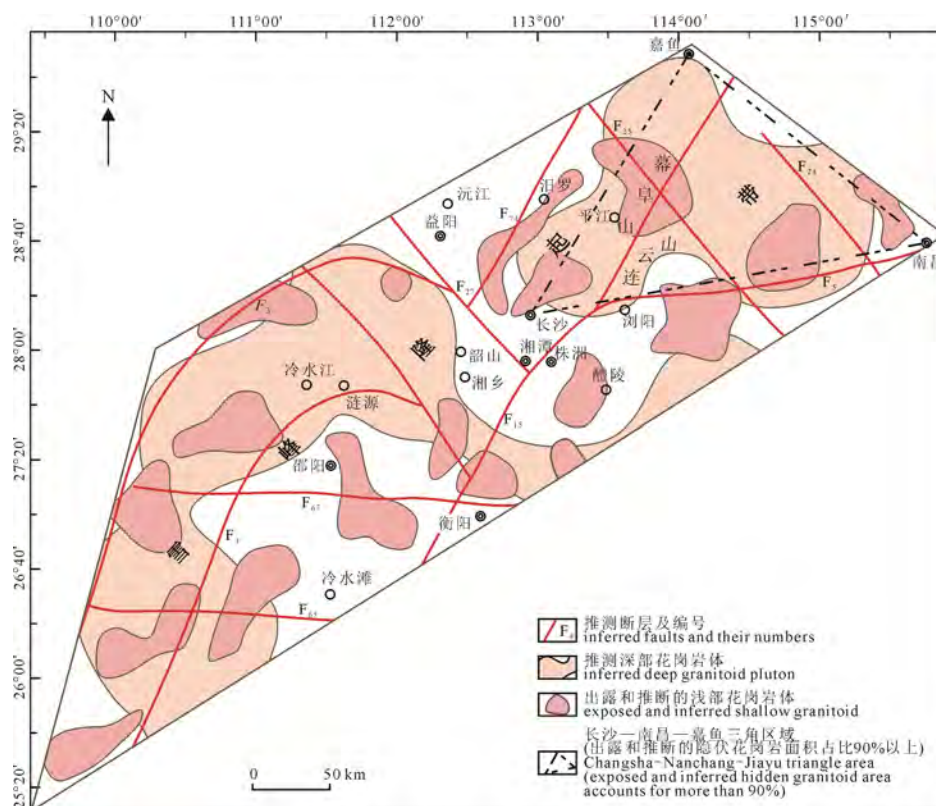


图 1 雪峰隆起带岩体分布推断图(丁鹏飞等, 1996)

Fig. 1 Inferred map of distribution of granitoid plutons in the Xuefeng uplift zone (integrated DING et al., 1996)

地热带是环太平洋地热带和地中海—喜马拉雅地热带, 出露于洋底的最著名的地热带是大西洋中脊地热带, 地热异常带的热源和板块的扩张或消亡有明显关系(地质矿产部《地质辞典》办公室, 1986)。笔者认为, 地球地热资源高焓地热流体的热能主要来源于近代至现代火山活动和地壳浅部的时代不早于上新世的岩浆侵入体, 它们统称为岩浆型热源; 而大断裂的摩擦热, 放射性物质蜕变热, 化学反应热以及其他物理热源, 在这种地热资源中所起的作用极其有限。我们用实例来进一步予以证明。

红海属于红海—亚丁湾—东非裂谷地热带, 是非洲板块与亚洲板块及阿拉伯半岛之间的结合部位。早期两板块挤压碰撞, 后期拉张拆离, 以高热流, 活火山作用及断裂活动强烈为其特征, 形成深大断裂带而成红海。红海的含盐度大于 40%, 板块的挤压、碰撞和拉张拆离构造活动引起的火山、岩浆活动等多种地质作用, 为红海下部海水提供了丰富的成矿物质, 使红海水成为高盐度卤水, 并且含有多种重金属元素。岩浆去气释放一部分水和硫进入循环的热水系统, 同时有可能提供少量的金属。现代海底黑烟囱科学观测也表明大量挥发份和金属是通过去气作用从岩浆分离而进入陆相和海底火山-热液系统的(Yang, 1998)。科学家还在红海的深处发现了大量的大面积热洞(Monin et al., 1982; Modenesi et al., 2022; Baumgartner et al., 2023), 大量岩浆和岩浆热液沿深部洋壳的断裂面涌入海底, 使岩石发生蚀变和矿化, 海水盐度和金属矿化度大幅度增高, 形成富含多金属元素(如 Fe、Co、Mn、Cu、Pb、Zn、Au 及 Ag)的卤水, 出现了深层海水温度达 34~57 °C, 比浅表层海水温度还高的异常现象。这就是红海热卤水富含多种重金属元素的真正原因。

原苏联堪察加半岛, 位于环太平洋地热异常带, 是欧亚板块与太平洋板块的消亡边界。它以显著的高热流、年轻的造山运动及活火山作用为特点(地质矿产部《地质辞典》办公室, 1986), 隶属新生代阿尔卑斯褶皱带。堪察加半岛有死火山、活火山 300 多座, 还在活动的火山 28 座, 是世界火山种类最丰富、最活跃的火山地区之一。区内地热, 温泉众多, 地热温度最高可达 200 °C。板块活动引起的强烈的火山活动和岩浆活动为该区域卤水提供了丰富的多种金属成矿物质, 从而使该区的卤水富含多种金属元素。

美国加利福尼亚州索尔顿湖, 处在环太平洋板块东大西洋中脊地热异常带, 是位于环太平洋复合型地热带上著名的地热田, 具有高热流、强烈的地热活动, 频繁的地震及火山作用等特点(戴问天,

1978; Zhang et al., 2023)。索尔顿湖位于安德利亚斯大断裂的东部, 区内构造十分发育, 有很多大致平行的南偏东方向的褶皱带与圣安德利亚斯大断裂构成“入”字型构造, 同时, 在该大断裂的西南又有一条与之平行的断裂形成的“入”字型构造。索尔顿湖附近的地热钻井井垢, 富含铜、银及其它金属。卤水的温度在井口为(220±30) °C, 推算在井下达 300~330 °C, 热储温度达到 360 °C。卤水溶解物质总量在 25.8%以上, 属于 Na-K-Ca 氯化物型卤水, 以硫酸离子和硫化物离子形式存在的硫都很少。实际上, 索尔顿湖地热的形成过程如下: 太平洋板块俯冲于北美洲大陆板块之下, 在深部的消亡带形成大量的岩浆并沿大陆板块的深大断裂上侵, 引发了火山活动和岩浆侵入活动; 火山活动、岩浆侵入活动同化并加热了地下卤水和地下水, 使地下卤水成为岩浆热液的一部分; 卤水增加了岩浆和岩浆热液的活度, 促进了金属矿物的形成和富集, 有力的促进了岩浆和岩浆热液的成矿作用, 并形成富含多种金属的热卤水和地热。

所以红海、原苏联堪察加、美国加利福尼亚州的索尔顿湖的富含多种重金属的热卤水的金属物质均是岩浆和火山活动所提供, 并非卤水自身所具有的。

我国新疆罗布泊位于塔里木盆地的东段, 位于两个凹陷的交汇处, 有大断裂 16 条, 其中超岩石圈断裂 2 条, 岩石圈断裂 6 条, 壳断裂 8 条, 形成了干涸状无湖表卤水的干盐湖。在罗布泊孔深 781.5 m 的钻孔中, 发现了氯铜锌矿, 氯化铅、菱铁矿等重金属矿物; 此外, 还检测出 Au、W、Cu、Pb、Zn、Cr、Fe、Ni 等多种金属单质元素(宣之强等, 2016)。实际上, 罗布泊干盐湖深部的金属矿物和金属元素的来源和成因与美国加利福尼亚州索尔顿湖类同, 都是与大地构造活动及深部断裂引起的幔源、壳源岩浆上侵所带来的金属矿物与卤水等盐类物质化学反应而形成, 其深部可能会有更多的金属矿物, 甚至矿床。

以上这些实例, 均有它特殊的大地构造环境和新的成矿物质来源及新的成矿作用, 并非地下卤水矿床本身就具有成矿物质, 也就说明, 地下卤水并不是重金属矿床成矿的矿源。但是, 地下卤水为具有一定温度的地下水, 并含有性质活跃和非常活跃的碱土金属、碱金属离子, 以及氯离子和多种酸根离子, 其在遇到高温的岩浆时, 与岩浆热液和岩浆进行强烈的化学反应, 大幅度的增加了岩浆的气液流体, 降低了岩浆的黏稠度, 加速和提高了岩浆的结晶分异能力, 增加了气液中的成矿物质浓度与活

度,有利于成矿物质的活化、运移和富集,有利于形成富矿和大矿。事实上,一些大型多金属矿床就产在含盐盆地内,如云南南坪金顶特大型铅锌矿床(胡古月等, 2013; 朱志军等, 2016)、云南会泽超大型铅锌矿床(任顺利等, 2018)等。

综上,地下卤水多金属矿床成矿与岩浆-火山活动有密切的成因关系。

1.2 MVT 铅锌矿床成矿的岩浆作用贡献

地下水热液成因观点,将 MVT 铅锌矿床归属为地下水层控热液矿床,认为大多数 MVT 铅锌矿床赋存在一些大型前陆盆地(通常在盆地边缘或盆地之间)的未变质岩层内,矿石大多以开放空隙充填方式形成,具后生成矿特征;矿化最富地段靠近盆地边缘,邻近前陆穹隆区。MVT 矿床闪锌矿、重晶石、方解石及萤石的流体包裹体温度一般为 80~200 °C,有时可接近 300 °C,盐度可高达 13%~30%。其中,闪锌矿流体包裹体成分揭示其为含 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 $B_4O_7^{2-}$ 及 HCO_3^- 等阴、阳离子的卤水(翟裕生等, 2011)。以上特征说明, MVT 铅锌矿床的形成与卤水关系密切,主要成矿元素是在高盐度的热卤水中,呈氯化物络合物形式搬运的。作者认为,其成矿物质并非由卤水和盐类矿床提供的,因为如果是这样, MVT 铅锌矿床就不应该“赋存在大型盆地边缘或盆地之间”,矿化最富地段也不应是“靠近沉积盆地边缘,邻近穹隆状隆起区”,而应该在盆地中心部位卤水和盐类矿物厚度最大,浓度最高的区域。此外,坳陷和穹隆隆起的过渡部位往往是中低温岩浆热液矿床形成的有利地段,不同温度的矿物组合表现了距离岩浆矿源体的远近及地化性质,穹隆构造的形成可能是区域构造挤压应力与岩浆侵入上拱作用力为主的结果(曾钦旺等, 2016);穹隆之下往往有成矿隐伏岩体存在,非常多的岩浆矿床与岩浆热液矿床产于背斜、穹隆、上隆、隆起等褶皱构造内的不同部位。

地下水层控热液矿床观点指出, MVT 铅锌矿床的矿石成份简单,金属矿物主要是方铅矿、闪锌矿,其次是黄铁矿、白铁矿及少量黄铜矿,非金属矿物主要有白云石、重晶石、萤石及方解石,有的 MVT 矿床还含有 Ag、As 及 Sb,或具经济意义的 Cu、Co 及 Ni。MVT 铅锌矿床中的萤石和重晶石往往具有重要的经济价值。作者认为, Cu、Co、Ni 组合矿产是基性-超基性岩的专属矿产,所以产于 MVT 铅锌矿中的具有经济价值的 Cu、Co、Ni 矿,或与基性-超基性岩有关,是水-岩反应的结果。例如,江汉盆地火山岩分布广泛,强烈的火山活动不仅带来了大

量的热能,也带来了深部的物质补给—岩浆热液和热泉;高的热能加速了卤水与玄武岩与地层的水岩反应,导致了成矿元素的富集。这一认识获得了实验工作的支持:玄武岩常温和高温淋滤实验发现,随着温度升高,流体中锂元素含量逐渐增大,并且一定盐度的流体与玄武岩反应更易淋滤出岩石中锂元素,所以认为锂的富集,是内生与外生地质共同作用的结果,即构造-火成岩-干旱气候耦合的结果(余小灿等, 2022)。这些资料说明,岩浆和火山活动是提供成矿物质-多金属元素的主要矿源体,热卤水的参与加速了金属元素的淋出和活化。我们用实例来进一步予以证明。

云南兰坪县金顶铅锌矿床累计探明 Pb + Zn 储量 1 500 万 t,是亚洲第二大铅锌矿床,也是金属储量超过千万吨的世界级超大型矿床之一,是 MVT 铅锌矿床的典型代表(Leach et al., 2016; Song et al., 2019)。其产于一个新生代穹隆之中,穹隆顶部被剥蚀掉,矿床的 6 个矿段环绕穹隆分布。在大地构造背景上,矿床产于金沙江—红河大断裂与澜沧江大断裂之间的兰坪中生代盆地中,位于内陆板块的缝合带内,为大地构造复杂活动地带。盆地西部为脉状铜多金属成矿带,成矿元素以 Cu 为主,中东部为 Pb、Zn 成矿带,成矿元素组合为 Pb、Zn、Ag。此外,东边部还有单独的和伴生的黄铁矿、天青石矿及石膏矿(Song et al., 2020)。

关于矿床成因,对于盆地西部的 Cu 多金属成矿带的岩浆热液成因认识趋于一致(周道卿等, 2015),但对于中东部包括金顶矿床在内的 Pb-Zn-Ag 成矿带的矿床成因则还有不同看法(王江海等, 1998; 邓军等, 2012; 张锦让等, 2012)。笔者认为,金顶铅锌矿床的成矿是岩浆上侵提供成矿物质、热液和热源、热动力,丰富的地下卤水起了进一步活化、富集、搬运成矿物质的重要作用,具体依据如下:

(1)兰坪盆地处于内陆板块的缝合带内的西南三江构造成矿带上,成矿带新生代受印-亚大陆碰撞的影响,形成大型逆冲带(侯增谦等, 2008)。区域深大断裂和褶皱发育,有利于壳、幔源岩浆的形成和侵入,在兰坪盆地的西边缘元古界老地层的东缘断裂的两侧已出露有花岗岩(Peng et al., 2008)。推测在元古界地层东边的金顶矿区应该存在有隐伏的花岗岩体,所以才出现了西部 Cu 多金属矿化的高-中温成矿带,中东部的 Pb-Zn-Ag 中-低温成矿带和东边部的黄铁矿、石膏、硬石膏、天青石低温成矿带的分带。Cu 矿化是酸性岩浆岩成矿的专属矿种,这种从高中温—中低温—低温的成矿温度分带是岩浆

热液矿床矿化元素的特征分带。东边部石膏、黄铁矿、天青石矿的成矿说明了大量卤水的存在。

(2)在金顶,矿体和矿段环绕穹窿带分布,穹窿控制了 Pb-Zn 矿的成矿。作者前期研究发现,穹窿构造是区域构造应力与岩浆侵入上拱为主的共同作用的结果(曾钦旺等, 2020), 如果以区域压应力为主, 则形成背斜褶皱, 如果以岩浆侵入上拱的作用力为主, 则形成穹窿。所以, 笔者认为金顶穹窿构造下部有隐伏岩体存在。此外, 金顶地区的重磁资料证明, 兰坪盆地深部存在较大规模的中酸性隐伏岩体(周道卿等, 2015)。而且, 越来越多的地质证据表明, 金顶铅锌矿床的形成是受推覆构造控制, 与喜山期构造运动、深部岩浆及流体活动有关的特殊的内生矿床(杨振军等, 2017)。这些资料证明, 金顶矿区下部存在大规模的隐伏岩体。

(3)兰坪盆地铅锌成矿与地下卤水有不可分割的密切关系。兰坪—思茅盆地处于滇西三江褶皱逆冲带东南端, 其次一级的凹陷中, 沉积了众多的古新统勐野井组石盐矿床和地下卤水矿床(Song et al., 2020)。地下卤水以盐泉形式出露地表, 亦广为分布, 仅兰坪及附近 5 个县有名的盐泉就有 12 处之多, 卤水的矿化度为 52~92 g/L(王清明, 2007)。这些资料说明, 金顶矿区及附近的地下卤水十分丰富。研究认为, 兰坪盆地内部金顶、白秧坪等主要矿床的成矿流体均与盆地热卤水有密切关联(邓军等, 2012)。前面“地下卤水多金属矿床的岩浆作用贡献”一节, 已经论述了地下卤水对岩浆成矿物质的活化、富集、运移的重要成矿作用。

因此, 作者认为, 金顶超大型铅锌矿床的形成与巨大的成矿母岩体的成矿物质的高丰度、多期次的构造-岩浆演化、分异、富集及丰富的地下卤水的成矿作用密不可分。

根据以上资料分析, 以及上一节地下卤水多金属矿床的岩浆作用贡献所提供的依据, 我们认为构造-岩浆活动为 MVT 铅锌矿床提供了成矿物质、成矿热液、热源及热动力, 起主导的成矿作用, 盐类矿物和卤水起了活化、搬运及富集成矿物质的作用。

1.3 卡林型金矿床成矿的岩浆作用贡献

国内常把微细粒浸染型金矿称为卡林型金矿或类卡林型金矿。根据 2011 年出版印刷的《矿床学》(第三版)(翟裕生等, 2011)对卡林型金矿床的特征总结, 结合矿床成矿背景和成矿地质条件, 提出卡林型金矿床成矿的岩浆作用贡献如下。

(1)卡林型金矿床往往发育于地壳活动较为强烈的区域, 如不同大地构造单元的结合部位, 稳定大陆边缘的裂谷带及造山带, 中国西南地区的卡林

型金矿主要产于扬子地块与华南褶皱带的结合部位(陈本金, 2010)。这些地壳强烈活动的地区, 往往是岩浆、火山强烈活动的地区, 也是地热异常区。产于这些地区的卡林型金矿床与岩浆、火山活动必然有着不可分割的成因关系, 就像红海、美国索尔顿湖、原苏联里海切兼半岛及堪察加半岛等地的地下热卤水含盐度高、富含多种金属的原因一样, 是岩浆、火山活动的结果。

(2)卡林型金矿床区域内岩浆岩不发育, 可见少量岩脉, 深部常有隐伏岩体存在, 在成矿区域内同成矿期的岩浆活动较强烈(刘显凡等, 2003; Muntean et al., 2011)。这一特征说明了“较强烈”的岩浆活动和卡林型金矿成矿的密切关系。岩浆成因的金矿成矿温度本来就是中低温的, 离岩浆源的距离相对较远, 所以, 同成矿期的岩浆活动就显得没有那么强烈。美国卡林型金矿, 经过数十年的开采, 已经在多个矿床的深部发现了与成矿有关的花岗岩体, 并有“矿区中酸性岩脉发育、矿体主要受高角度断层控制, 通常产于岩脉的一侧或附近、在几乎所有的卡林型金矿区内或者其附近都存在以岩墙和岩脉产出的长英质侵入体, 这些侵入体提供成矿热能和成矿流体, 美国卡林型金矿矿集区岩浆作用可以分为三期……”的相关总结。成矿年代学研究显示, 内华达卡林型金矿成矿年龄与该地区深部岩浆侵入的时空基本一致, 也暗示了金成矿作用与岩浆活动关系密切(Arehart et al., 2003; Kesler et al., 2005; Muntean et al., 2011)。实际上, 世界各地有不少超大型、大型内生金属矿床的地表少见甚至未见岩浆岩或岩脉, 但其深部往往存在隐伏的成矿母岩体(Muntean et al., 2011)。例如, 世界著名的铋都—湖南锡矿山铋矿田, 矿床产于上泥盆统余田桥组的碳酸盐岩层中, 铋矿体顺层产出, 具有层控热液矿床的基本特征。锡矿山铋矿田地表只出露了一条与区域构造线一致的煌斑岩脉。但是, 积数十年铋矿的找矿勘查成果和科学研究成果的总结, 锡矿山铋矿、湘西沃溪钨铋金矿及湘中锡矿山式铋矿的成因却统一被认为和深部岩浆作用有关(金景福等, 1999; 彭渤等, 2000a; Liu et al., 2023)。

(3)卡林型金矿主要热液蚀变为硅化、黄铁矿化、毒砂化和白云石化等(吴松洋, 2019), 其在空间上从远到近, 时间上从早到晚发育的顺序说明了岩浆矿源体的存在和作用, 因为这并非地下水热液所能形成的变化顺序。例如, 卡林型金矿床的“高温矽卡岩化只存在于接触侵入岩的矿床中”(翟裕生等, 2011), 在侵入岩之外则应该是岩浆热液的成矿作用, 矽卡岩化是酸性岩浆与碳酸盐岩接触交代的产

物, 这说明了在卡林型金矿的形成过程中, 是岩浆热液明显起了重要的成矿作用。

2 变质热液矿床的岩浆热液成因分析

1979年出版的《矿床学》中矿床分类的热液矿床中有变质热液矿床(袁见齐等, 1979), 2003年出版的地质矿产行业标准《岩金矿地质勘查规范》也有变质-热液矿床这一类型。虽然, 新版《矿床学》(翟裕生等, 2011)已经没有变质热液矿床这个类别了, 2020年出版的地质矿产行业标准《矿产地质勘查规范 岩金》(中华人民共和国自然资源部, 2020)8种岩金矿工业类型所显示的成因类型也没有变质热液矿床这一类型, 但变质热液矿床至今仍然有比较大的影响, 一些变质岩区甚至浅变质岩区的热液矿床仍被视为变质热液成因。中国地质大学(北京)国家级特色专业地质学系列教材《变质岩岩石学》对变质作用的定义是: 地幔和地壳中的岩浆岩, 沉积岩及先成的变质岩受到内力地质作用而处在与原岩不同的物理化学体系下, 必定要在固体状态下改变或调整它的矿物组合, 结构构造特征, 有时甚至改变其化学组成以适应新的外部条件, 这种变化统称为变质作用, 经变质作用形成的岩石总称为变质岩(程素华等, 2016)。从上述定义可知, 变质作用属于内力作用的范畴。因此, 一方面, 它与沉积岩中在表生作用下形成自生成矿物的成岩作用是不同的; 另一方面, 因为所有变质作用的温度范围并未达到岩石的熔融点, 所有的变化是在固态条件下进行的, 因此常称为次固相线的变化, 即所有的重结晶作用是在固体相线下进行的, 这便是变质作用与岩浆作用的区别。

从上述变质作用和变质岩的定义、成岩条件和特点可知, 变质岩在变质成岩过程中基本上没有熔融, 即使有岩石的孔隙水、矿物的结晶水参与, 作用也是有限的, 因此, 也就不可能演化为形成矿床的热液。所以变质作用和变质岩难以形成变质热液矿床, 只能形成变质矿床。

下面以 2003年出版的地质矿产行业标准《岩金矿地质勘查规范》(中华人民共和国国土资源部, 2003)中划为变质-热液矿床的两个典型矿床, 河南桐柏银洞坡金矿床和湖南沃溪钨-铋-金矿床为例进行分析。

(1) 河南桐柏银洞坡金矿床

作者曾经工作并发现了其中一个重要矿段(母猪沟矿段)的河南省桐柏县银洞坡超大型金矿床, 受河前庄背斜核部及层间断裂控制, 矿体是由含金石英脉、石英网脉及碳酸盐岩脉沿硅化炭质绢云母石英

片岩、白云母石英片岩破碎裂隙充填交代而成矿。在区内还发育有炭质绢云母石英片岩及白云母石英片岩的挤压片理化带, 因没有后期的沿破碎裂隙充填交代的石英脉或石英网脉, 则不形成工业矿体。

银洞坡金矿床的成因类型主要有两种观点: 岩浆热液矿床和沉火山岩变质热液矿床(万守全, 2006; 张静等, 2009; 韦昌山等, 2020; Chao et al., 2023; 唐相伟等, 2023)。作者认为其成因类型应该为岩浆热液矿床, 依据是: ①区域岩浆岩发育, 有侵入岩、火山岩和各种脉岩。矿区内岩浆岩以脉岩形式存在, 主要为中-基性脉岩。矿区内发育含矿和不含矿两种石英脉, 其中含矿石英脉与主构造线方向一致, 含浸染状黄铁矿、方铅矿、闪锌矿, 硫化物含量达3%~5%, 含矿石英脉和这些硫化物是金的主要载体矿物和矿化标志。石英脉是构造和岩浆热液多次活动的结果。②本区区域变质作用所形成的各种变质岩类并不含矿, 甚至连硅化炭质绢云母石英片岩也不含矿。矿体是由含金石英脉、石英网脉、碳酸盐岩脉沿硅化炭质绢云母石英片岩或白云母石英片岩断裂破碎裂隙切穿片理充填交代而形成, 是在区域变质作用形成片岩之后, 岩浆热液沿后期断裂充填交代的产物。③本区的赋矿层位为晚元古界歪山头组(Pt_3w), 而沉火山岩建造-细碧角斑岩系大栗树组(Pt_3d)和刘山崖组(Pt_3l), 是赋矿地层歪山头组(Pt_3w)的上部地层。温度和压力是变质作用的主要因素, 如果变质作用可以形成变质热液, 变质热液也应该向温度和压力低的上部地层运移, 而不可能向下部温度和压力高的地层运移, 所以该矿床的成矿物质不可能是上部的沉火山岩-细碧角斑岩系提供。④该矿区的 S 同位素绝对值较小, 变化区间窄, 接近陨硫, 说明矿石中的 S 来自地壳深部或上地幔, 成矿物质应该是来自壳-幔共熔的同熔型岩浆岩(张静等, 2006; 唐相伟等, 2023)。综上所述, 银洞坡金矿床的成因类型应该是岩浆热液矿床。

(2) 湖南湘西沃溪钨-铋-金矿床

湖南沃溪金矿床为产于雪峰隆起带一大型以金为主的 W、Sb、Au 共生矿床。矿床产于雪峰弧形构造隆起带与安化—桃江近东西向构造带交汇处的沃溪复式背斜的东端, 上元古界板溪群上部的红色绢云母板岩、砂质板岩与钙质板岩为赋矿围岩。矿体受层间断裂和 NE 向次级褶皱构造控制, 为石英单脉型与石英网脉型金矿床。作者在《雪峰隆起带金矿成因新析》一文中, 从岩石学、矿物学、地球物理、地球化学、构造地质学及同位素地球化学 6 个方面论述了雪峰隆起带金矿床的成因类型为岩浆热液矿床(曾钦旺等, 2020)。

本文针对沃溪金矿岩浆热液成因提出几点具体依据: ①白钨矿及黑钨矿是酸性花岗岩类专属性的矿种。沃溪金矿的矿石矿物中复杂的微量元素和组成可与雪峰隆起带南缘白马山岩体等印支—燕山期花岗岩相类比。②上元古界板溪群、冷家溪群板岩类岩石为浅变质岩。《变质岩石学》(贺同兴等, 1980)明确指出板岩具有明显的板理构造, 板理(或劈理)构造一般为低级区域变质时或区域动力变质时, 在应力强温度低的条件下形成, 常见于板岩中。板岩是指原岩矿物成分基本没有重结晶的泥质、粉砂质低级变质岩, 也包括一部分中酸性凝灰质岩屑, 新生矿物很少, 仍以隐晶质为主。既然在形成板岩的变质过程中矿物成分没有重结晶, 大部分仍为隐晶质黏土矿物, 那就不可能形成使原岩中的 W、Sb 及 Au 元素活化迁移的变质热液, 沃溪钨-锑-金矿床在区域变质作用下也不可能形成石英脉、石英网脉型矿体, 矿床成矿物质不可能来自围岩(曾钦旺等, 2020)。③构造地质理论、地质及矿床实例说明形成断裂构造的动力变质作用不是直接的成矿作用, 断裂构造本身并不能单独成矿。所以, 雪峰隆起带金矿床不是动力变质矿床(曾钦旺等, 2020)。④前人通过岩石化学、微量元素地球化学和 W-Sb-Au 矿石矿物学特征等方面的对比研究, 探讨了雪峰隆起带 W-Sb-Au 矿床与印支—燕山期岩浆作用不但具有直接的时空关系, 而且具有成因联系(彭渤等, 2000b)。

以上资料和研究成果说明, 湖南沃溪 W-Sb-Au 矿床的成因类型不是变质热液矿床, 也不可能是动力变质矿床, 而是岩浆热液矿床。

从本文以上对变质热液矿床的成因分析认识, 变质热液矿床应该就是岩浆热液矿床。

3 韧-脆性剪切带型金矿成矿的岩浆作用贡献分析

韧性剪切带又称为韧性断裂, 是岩石在塑性状态下连续变形形成的狭长高应变带, 韧性剪切带是地壳中深-深层次的主要构造类型之一。根据天然变形研究和实验变形结果分析, 长英质岩石发生脆性到韧性转变的温度范围为 250~350 °C, 按照正常地壳热增温率计算, 相当于 10~15 km 的地壳深度范围(宋鸿林等, 2015)。大陆地壳的平均厚度约 40 km, 在这个深度之内地壳深熔作用是完全可以熔出长英质岩浆的。在大陆构造背景下至少有以下三种环境可以形成长英质和花岗岩类岩浆: 位于俯冲的大洋岩石圈之上的陆弧或碰撞后的环境, 大陆裂谷或有地幔柱上升的区域, 陆-陆碰撞导致地幔加厚的区域, 例如, 喜马拉雅地区。不过在很多造山带, 因碰

撞期间仅仅靠地幔增厚加热产生的花岗岩的实例很少(桑隆康等, 2016)。所以, 就有壳熔花岗岩和同熔花岗岩之分类, 那么在形成韧性剪切带型塑性体之下, 完全可以形成长英质-花岗质岩浆。

所以, 韧性剪切带之下往往存在部分熔融和相应的岩浆岩, 韧性剪切带型金矿实际上是在韧性剪切带之后的脆性断裂中成矿, 故常称之为脆-韧性剪切带型金矿床。因为韧性剪切带的变形没有明显的破裂面, 剪切带与围岩之间没有明显的界线, 只是走向上发生偏移或者厚度有所变化, 但仍保持连续性(程素华等, 2016), 所以, 在塑性变形时, 是没有形成流体的, 即使有成矿流体也是难以进入韧性剪切带内的, 当然也就不能成矿了。只有在塑性变形体冷却为脆性体后, 在又一次构造-岩浆活动期间, 在原韧性剪切变形带中形成了新一期的脆性断裂构造, 岩浆热液才能进入脆性断裂充填交代成矿。我们用实例来进一步予以证明。

雪峰隆起带湘东北雁林寺金矿床, 是赋存于新元古界冷家溪群黄浒洞组板岩、浅变质砂岩中的韧性剪切带内的后期小型脆性断裂内的石英脉型和蚀变岩型金矿床。矿区周边分布有印支—燕山期小岩体, 矿区钻孔中见到较多的辉绿岩脉。据区域重磁资料分析, 推测下部有较大的隐伏岩体, 矿区金矿床的形成与岩浆侵入密不可分(陈冲等, 2018)。较多的研究者认为该区域金成矿与岩浆作用关系密切(Deng et al., 2017; Zhang et al., 2022)。《湖南省金矿第二轮成矿远景区划报告》(钟九思, 1993)认为雁林寺金矿床位于印支—燕山期多次侵入的复式花岗岩体之上, 金矿在空间、时间及成因上与花岗岩关系密切。韧性剪切带只是金成矿的岩浆热力作用的一种表现形式。雪峰隆起带上的金矿床既不是变质热液金矿床, 不是动力变质(热液)矿床, 不是地下水热液矿床, 也不是火山热液矿床, 更不是沉积型岩金矿床, 而是岩浆热液矿床(曾钦旺等, 2020)。

针对青海野骆驼泉韧性剪切带型金矿床, 前人通过对其含矿构造, 矿床地质和流体包裹体研究结果表明, 该矿床明显受三级构造系统控制, 存在着三期构造—流体—矿化模式。早期韧性剪切作用是晚加里东造山运动的深层次塑性流变产物, 高密度中-低温含 CO₂ 流体作用导致金的初始富集; 主成矿期发生在脆-韧性剪切变形阶段, 产生大量含金构造透镜体, 为地壳较浅层次压扭性应力作用产物, 以富含成矿物质的富液相流体为主; 晚期发育的脆性裂隙为造山作用之后地壳浅层次及近地表条件下张扭性应力作用结果, 指示构造活动和矿化已接近尾声。这些认识表明, 青海野骆驼泉韧性剪切带型

金矿实际为破碎带蚀变岩型岩浆热液金矿床(丰成友等, 2002)。

4 结论

(1)地下水层控热液矿床成矿流体往往是经历了深部岩浆房驱动的热水循环, 通过单纯的地下水循环逐步转化为含矿热液成矿是难以实现的。归属于地下水层控热液矿床的地下卤水多金属矿床、MVT 铅锌矿床、卡林型金矿床自身的一些矿床地质特征, 也进一步展示了成矿过程中的岩浆作用贡献。

(2)变质作用和变质岩难以形成变质热液矿床, 以往所谓的变质热液矿床成矿过程中岩浆作用至关重要; 韧性剪切带型金矿床是产于韧性剪切带中的后期脆性构造中的矿床, 其成矿过程都有岩浆作用的参与和贡献。

对这些矿床成因的新认识, 使我们进一步认识到岩浆成矿的广泛性和重要性, 认为岩浆成矿作用是最广泛、最强烈的成矿作用之一。对以上几种热液矿床的岩浆热液成因分析, 有利于促进地质找矿工作更加重视岩浆岩特别是隐伏岩体的成矿作用和找矿工作, 使找矿勘查方向、方法更明确, 提高找矿勘查的工作效率和效益, 有效促进地质工作的进展, 对矿床学一些问题的探讨, 有助于矿床学的发展。

致谢: 衷心感谢中国地质科学院地质研究所侯增谦院士对本文高水平的详细评述和宝贵的修改意见。感谢水文地质专家湖南省地质灾害调查监测所皮建高和谢顺赞两位研究员级高工, 湖南工程职业技术学院地质和化探副教授张泰然为本文创作所提供的专业咨询。感谢审稿专家和责任编辑严格认真的工作及宝贵的修改意见和建议。

Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (No. DD20221695), Hunan Provincial Department of Natural Resources (No. Xiangzifa[2020]41), and Geological Bureau of Hunan Province (No. 201702).

参考文献:

- 陈本金, 2010. 黔西南水银洞卡林型金矿床成矿机制及大陆动力学背景[D]. 成都: 成都理工大学.
- 陈冲, 郭爱民, 孙骥, 等, 2018. 湘东北雁林寺金矿床地质特征及找矿标志[J]. 黄金, 39(6): 14-20.
- 程素华, 游振东, 2016. 变质岩岩石学[M]. 北京: 地质出版社: 73-83.
- 戴问天, 1978. 索尔顿湖地下热卤水及其成矿现象[J]. 地质与勘

- 探, 14(6): 81-85.
- 邓军, 王长明, 李龚健, 2012. 三江特提斯叠加成矿作用样式及过程[J]. 岩石学报, 28(5): 1349-1361.
- 地质矿产部《地质辞典》办公室, 1986. 地质辞典(四): 矿床地质—应用地质分册[M]. 北京: 地质出版社: 280-330.
- 丁鹏飞, 酆逸根, 林树榆, 等, 1996. 华南地区 1:100 万物探化探遥感综合成果报告附图 1[R]. 蚌埠: 地质矿产部第一综合物探大队.
- 丰成友, 张德全, 余宏全, 等, 2002. 韧性剪切构造演化及其对金成矿的制约——以青海野骆驼泉金矿为例[J]. 矿床地质, 21(S1): 582-585.
- 贺同兴, 卢良兆, 李树勋, 等, 1980. 变质岩岩石学[M]. 北京: 地质出版社.
- 侯增谦, 宋玉财, 李政, 等, 2008. 青藏高原碰撞造山带 Pb-Zn-Ag-Cu 矿床新类型: 成矿基本特征与构造控矿模型[J]. 矿床地质, 27(2): 123-144.
- 胡古月, 李延河, 曾普胜, 2013. 膏盐在金顶铅锌矿成矿中的作用: 硫和锶同位素证据[J]. 地质学报, 87(11): 1694-1702.
- 蒋昌宏, 杜德宏, 王孝磊, 2022. 陆内穿地壳岩浆系统及其去气作用和环境效应[J]. 岩石学报, 38(5): 1360-1374.
- 金景福, 陶琰, 赖万昌, 等, 1999. 湘中锡矿山式钨矿成矿规律及找矿方向[M]. 成都: 四川科学技术出版社: 115-123.
- 刘显凡, 吴德超, 刘远辉, 等, 2003. 黔西南低温成矿域中不同层位不同类型金矿的内在统一成矿机制探讨[J]. 沉积与特提斯地质, (3): 93-101.
- 彭渤, ADAM P, 陈广浩, 2000a. 湘西沃溪钨锡金矿床超纯自然金[J]. 大地构造与成矿学, 24(01): 51-56.
- 彭渤, 陈广浩, 2000b. 湖南锡金矿成矿大爆发: 现象与机制[J]. 大地构造与成矿学, (4): 357-364.
- 任顺利, 李延河, 曾普胜, 等, 2018. 膏盐层在云南会泽和毛坪铅锌矿成矿中的作用: 硫同位素证据[J]. 地质学报, 92(5): 1041-1055.
- 桑隆康, 马昌前, 王国庆, 等, 2016. 岩石学(第 3 版)[M]. 北京: 地质出版社: 235-251.
- 宋鸿林, 张长厚, 王根厚, 2015. 构造地质学[M]. 北京: 地质出版社: 227-233.
- 孙文珂, 吴海成, 丁鹏飞, 等, 1999. 重点成矿区物探化探遥感编图成果综合研究成果报告[R]. 北京: 国土资源部咨询研究中心.
- 唐相伟, 张晓飞, 杨泽强, 等, 2023. 河南银洞坡金矿“三位一体”找矿预测地质模型及应用示范[J]. 地质通报, <https://link.cnki.net/urlid/11.4648.P.20231204.2011.005>.
- 万守全, 2006. 河南省桐柏县银洞坡金矿成矿作用[J]. 物探与化探, (5): 387-392.
- 王江海, 颜文, 常向阳, 等, 1998. 陆相热水沉积作用[M]. 北京: 地质出版社: 120-150.
- 王清明, 2007. 石盐矿床与勘查[M]. 北京: 化学工业出版社: 38-178.
- 韦昌山, 熊成云, 蔡锦辉, 等, 2020. 东秦岭—大别及邻区构造

- 控矿规律与找矿预测[M]. 北京: 地质出版社: 1-226.
- 吴松洋, 2019. 黔西南卡林型金矿构造-岩浆-热液成矿模式研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 宣之强, 刘成林, 刘宝坤, 2016. 中国第四纪盐湖矿床及盐类矿物组合综述[J]. 化工矿床地质, 38(4): 250-254.
- 杨振军, 杨国龙, 李穗, 等, 2017. 云南金顶铅锌矿床地质特征及成因新认识[J]. 矿产勘查, 8(1): 75-82.
- 余小灿, 刘成林, 王春连, 等, 2022. 江汉盆地大型富锂卤水矿床成因与资源勘查进展: 综述[J]. 地学前缘, 29(1): 107-123.
- 袁见齐, 朱上庆, 翟裕生, 1979. 矿床学[M]. 北京: 地质出版社: 201-209.
- 曾钦旺, 刘云华, 钱滔, 等, 2020. 雪峰隆起带金矿成因新析[J]. 中国地质, 47(4): 914-931.
- 曾钦旺, 彭陆军, 田威武, 等, 2016. 湖南大义山岩体白沙子岭矿区钨锡矿深部找矿探索[J]. 中国地质, 43(5): 1625-1636.
- 翟裕生, 姚书振, 蔡克勤, 2011. 矿床学(第三版)[M]. 北京: 地质出版社: 123-226, 321-381.
- 张锦让, 温汉捷, 秦朝建, 等, 2012. 兰坪盆地连城 Cu-Mo 多金属矿床流体包裹体和稳定同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 28(5): 1373-1386.
- 张静, 陈衍景, 陈华勇, 等, 2006. 河南省桐柏县银洞坡金矿床同位素地球化学[J]. 岩石学报, 22(10): 2551-2560.
- 张静, 杨艳, 鲁颖淮, 2009. 河南围山城金银成矿带铅同位素地球化学及矿床成因[J]. 岩石学报, 25(2): 444-454.
- 赵海杰, 余长发, 韩心巧, 等, 2016. 广东大降坪硫(铅锌)矿床岩浆热液叠加作用——来自闪锌矿 Rb-Sr 年龄及硫同位素的证据[J]. 矿床地质, 35(4): 795-808.
- 中华人民共和国国土资源部, 2003. 岩金矿地质勘查规范(DZ/T 0205—2002)[S]. 北京: 地质出版社.
- 中华人民共和国自然资源部, 2020. 矿产地地质勘查规范 岩金(DZ/T 0205—2020)[S]. 北京: 地质出版社.
- 钟九思, 1993. 湖南省金矿第二轮成矿远景区划报告[R]. 长沙: 湖南省地质研究所.
- 周道卿, 曹宝宝, 李龚健, 等, 2015. 西南三江兰坪盆地隐伏岩体探测及其成矿效应[J]. 岩石学报, 31(11): 3466-3476.
- 朱志军, 郭福生, 2016. 滇西兰坪盆地金顶铅锌矿盐构造发育特征及其与成矿关系[J]. 大地构造与成矿学, 40(2): 344-353.
- Geology, 619: 121320.
- CHAO Weiwei, YE Huishou, TANG Xiangwei, et al., 2023. Textural, trace element, and sulfur isotope analyses of pyrite from the Yindongpo deposit, East Qinling Orogen: Implications for gold mineralization[J]. Ore Geology Reviews, 163: 105796.
- CHEN Benjin, 2010. Ore-forming mechanism and background of continental dynamics of the Shuiyindong carlin-type gold deposit, southwestern Guizhou, China[D]. Chengdu: Chengdu Univeisity of Tectnology(in Chinese with English abstract).
- CHEN Chong, GUO Aimin, SUN Ji, et al., 2018. Geological characteristics and prospecting signs of the Yanlinsi Gold Deposit in the northeast of Hunan Province[J]. Gold, 39(6): 14-20(in Chinese with English abstract).
- CHENG Suhua, YOU Zhendong, 2016. Metamorphic Petrology[M]. Beijing: Geological Publishing House: 73-83(in Chinese).
- DAI Wentian, 1978. Underground hot brine and its metallogenic phenomena in Salton Lake[J]. Geology and Exploration, 14(6): 81-85(in Chinese).
- DENG Jun, WANG Changming, LI GongJian, 2012. Style and process of the superimposed mineralization in the Sanjiang Tethys[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(5): 1349-1361(in Chinese with English abstract).
- DENG Teng, XU Deru, CHI Guoxiang, et al., 2017. Geology, geochronology, geochemistry and ore genesis of the Wangu gold deposit in northeastern Hunan Province, Jiangnan Orogen, South China[J]. Ore Geology Reviews, 88: 619-637.
- DING Pengfei, LI Yigen, LIN Shuyu, et al., 1996. Figure attached to the report of 1:1000000 comprehensive results of geophysical and geochemical exploration in South China[R]. Bengbu: Ministry of Geology and Mineral Resources, the First Comprehensive Geophysical Exploration Group(in Chinese).
- FENG Chengyou, ZHANG Dequan, SHE Hongquan, et al., 2002. Structural evolution of ductile shear belt and its constraints on gold mineralization: Exemplified by Yeluotuoquan Gold Deposit, Qinghai Province[J]. Mineral Deposits, 21(S1): 582-585(in Chinese with English abstract).
- HE Tongxing, LU Liangzhao, LI Shuxun, et al., 1980. Petrology of metamorphic rocks[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- HOU Zengqian, SONG Yucai, LI Zheng, et al., 2008. Thrust-controlled, sediments-hosted Pb-Zn-Ag-Cu deposits in eastern and northern margins of Tibetan orogenic belt: geological Geological features and tectonic model[J]. Mineral Deposits, 27(2): 123-144(in Chinese with English abstract).
- HU Guyue, LI Yanhe, ZENG Pusheng, 2013. The Role of halosalt in mineralization of the Jinding Pb-Zn deposit: Evidence from sulfur and strontium isotopic compositions[J]. Acta Geological

- Sinica, 87(11): 1694-1702(in Chinese with English abstract).
- JIANG Changhong, DU Dehong, WANG Xiaolei, 2022. Degassing and environmental effect of intracontinental transcrustal magmatic system[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(5): 1360-1374(in Chinese with English abstract).
- JIN Jingfu, TAO Yan, LAI Wanchang, et al., 1999. Metallogenic regularity and prospecting direction of Tin-type antimony deposit in Central Hunan[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press: 115-123(in Chinese).
- KESLER S E, RICIPUTI L C, YE Z, 2005. Evidence for a magmatic origin for Carlin-type gold deposits: isotopic composition of sulfur in the Betze-Post-Screamer deposit, Nevada, USA[J]. *Mineralium Deposita*, 40(2): 127-136.
- LEACH D L, SONG Yucai, HOU Zengqian, 2016. The world-class Jinding Zn-Pb deposit: ore formation in an evaporate dome, Lanping Basin, Yunnan, China[J]. *Mineralium Deposita*, 52: 281-296.
- LIU Xianfan, WU Dechao, LIU Yuanhui, et al., 2003. The genetic mechanisms of the gold deposits in low-temperature mineralization area in southwestern Guizhou[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, (3): 93-101(in Chinese with English abstract).
- LIU Xianghua, XU Junwei, LAI Jianqing, et al., 2023. Genetic significance of trace elements in hydrothermal quartz from the Xiangzhong metallogenic province, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 152: 105229.
- Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China, 2003. Specifications for hard-rock gold exploration (DZ/T 0205-2002)[S]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, 2020. Specifications for rock gold mineral exploration (DZ/T 0205-2020)[S]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- MODENESI M C, SANTAMARINA J C, 2022. Hydrothermal metalliferous sediments in Red Sea deeps: Formation, characterization and properties[J]. *Engineering Geology*, 305: 106720.
- MONIN A S, PLAKHIN E A, 1982. Stratification and space-time variability of Red Sea hot brines[J]. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 29(11): 1271-1291.
- MUNTEAN J L, CLINE J S, SIMON A C, et al., 2011. Magmatic-hydrothermal origin of Nevada's Carlin-type gold deposits[J]. *Nature Geoscience*, 4: 122-127.
- Office of Geological Dictionary, Ministry of Geology and Mineral Resources, 1986. Geological Dictionary (4): Application Geology of Mineral Deposit Geology[M]. Beijing: Geological Publishing House: 280-330(in Chinese).
- PENG Bo, ADAM P, CHEN Guanghao, 2000a. Super-pure native gold in W-Sb-Au ores from the Woxi deposit in western Hunan province, China[J]. *Geotectonica and Metallogenia*, 24(01): 51-56(in Chinese with English abstract).
- PENG Bo, CHEN Guanghao, 2000b. Phenomena and formational mechanism for metallogenetic explosion of Sb-Au ore deposits in Hunan Province, China[J]. *Geotectonica and Metallogenia*, (4): 357-364(in Chinese with English abstract).
- PENG Touping, WANG Yuejun, ZHAO Guochun, et al., 2008. Arc-like volcanic rocks from the southern Lancangjiang zone, SW China: Geochronological and geochemical constraints on their petrogenesis and tectonic implications[J]. *Lithos*, 102(1-2): 358-373.
- REN Shunli, LI Yanhe, ZENG Pusheng, et al., 2018. Effect of sulfate evaporate salt layer in mineralization of the Huize and Maoping Lead-Zinc deposits in Yunnan: Evidence from sulfur isotope[J]. *Acta Geological Sinica*, 92(5): 1041-1055(in Chinese with English abstract).
- SANG Longkang, MA Changqian, WANG Guoqing, et al., 2016. Structural Geology[M]. Beijing: Geological Publishing House: 227-233(in Chinese).
- SONG Honglin, ZHANG Changhou, WANG Genhou, 2015. Structural Geology[M]. Beijing: Geological Publishing House: 227-233(in Chinese).
- SONG Yucai, HOU Zengqian, XUE Chuandong, et al., 2020. New mapping of the world-Class Jinding Zn-Pb deposit, Lanping Basin, Southwest China: Genesis of ore host rocks and records of hydrocarbon-rock interaction[J]. *Economic Geology*, 115(5): 981-1002.
- SONG Yucai, LIU Yingchao, HOU Zengqian, et al., 2019. Sediment-hosted Pb-Zn deposits in the Tethyan domain from China to Iran: Characteristics, tectonic setting, and ore controls[J]. *Gondwana Research*, 75: 249-281.
- SUN Wenke, WU Haicheng, DING Pengfei, et al., 1999. Report on comprehensive achievements of geophysical, geochemical and remote sensing exploration in key metallogenic areas[R]. Beijing: Consulting Research Center, Ministry of Land and Resources(in Chinese).
- TANG Xiangwei, ZHANG Xiafei, YANG Zeqiang, et al., 2023. The "trinity" prospecting prediction geological model and application demonstration of Yindongpo gold deposit in Henan province[J]. *Geological Bulletin of China*, <https://link.cnki.net/urlid/11.4648.P.20231204.2011.005>(in Chinese with English abstract).
- WAN Shouquan, 2006. Mineralization of the Yindongpo gold deposit in Tongbai County, Henan Province[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, (5): 387-392(in Chinese with English abstract).

- WANG Jianghai, YAN Wen, CHANG Xiangyang, et al., 1998. Continental Hydrothermal Sedimentation[M]. Beijing: Geological Publishing House: 120-150(in Chinese).
- WANG Qingming, 2007. Stone salt deposit and exploration[M]. Beijing: Chemical Industry Press: 38-178(in Chinese).
- WEI Changshan, XIONG Chengyun, CAI Jinhui, et al., 2020. Tectonic ore-controlling rule and prospecting prediction of East Qinling-Dabie and its territorial area[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-226(in Chinese).
- WU Songyang, 2019. The study of tectonic-magmatic-hydrothermal metallogenic model of carlin-type gold deposit in Southwestern Guizhou Province, China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing)(in Chinese with English abstract).
- XUAN Zhiqiang, LIU Chenglin, LIU Baokun, 2016. A summary of Quaternary saline lake deposits and mineral assemblages in China[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 38(4): 250-254(in Chinese with English abstract).
- YANG Kaihui, 1998. Magmatic fluids and mineralization-Observations of subaerial volcanic-hydrothermal processes, black smokers on modern sea floor and melt inclusion studies[J]. *Earth Science Frontiers*, 5(3): 7-29.
- YANG Zhenjun, YANG Guolong, LI Sui, et al., 2017. Geological characteristics of Jinding Pb-Zn deposit and new cognition for the deposit genesis, Yunnan[J]. *Mineral Exploration*, 8(1): 75-82(in Chinese with English abstract).
- YU Xiaocan, LIU Chenglin, WANG Chunlian, et al., 2022. Genesis of lithium brine deposits in the Jiangnan Basin and progress in resource exploration: A review[J]. *Earth Science Frontiers*, 29(1): 107-123(in Chinese with English abstract).
- YUAN Jianqi, ZHU Shangqing, ZHAI Yusheng, 1979. Ore Deposit Geology[M]. Beijing: Geological Publishing House: 201-209(in Chinese).
- ZENG Qinwang, LIU Yunhua, QIAN Tao, et al., 2020. The genesis of gold deposits in Xuefeng uplift zone[J]. *Geology in China*, 47(4): 914-931(in Chinese with English abstract).
- ZENG Qinwang, PENG Lujun, TIAN Weiwu, et al., 2016. Deep Exploration of the Baishaziling tungsten-tin ore district, Dayishan pluton, Hunan[J]. *Geology in China*, 43(5): 1625-1636(in Chinese with English abstract).
- ZHAI Yusheng, YAO Shuzhen, CAI Keqin, 2011. Ore Deposit Geology(Third Edition)[M]. Beijing: Geological Publishing House: 123-226, 321-381(in Chinese).
- ZHANG Chengyuan, PENG Zhigang, LIU Xiaoyan, et al., 2023. Spatio-temporal variations of shallow seismic velocity changes in Salton Sea Geothermal Field, California in response to large regional earthquakes and long-term geothermal activities[J]. *Earthquake Research Advances*, 3(2): 100178.
- ZHANG Jing, CHEN Yanjing, CHEN Huayong, et al., 2006. Isotope geochemistry of the Yindongpo gold deposit, Tongbai county, Henan province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2551-2560(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Jing, YANG Yan, LU Yinghuai, 2009. Lead isotope geochemistry of the Weishancheng gold-silver ore belt, Henan Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 444-454(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Jinrang, WEN Hanjie, QIN Chaojian, et al., 2012. Fluid inclusion and stable isotopes study of Liancheng Cu-Mo polymetallic deposit in Lanping basin, Yunnan Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1373-1386(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Yuce, SHAO Yongjun, LIU Qingquan, et al., 2022. Pyrite textures, trace element and sulfur isotopes of Yanlinsi slate-hosted deposit in the Jiangnan Orogen, South China: Implications for gold mineralization processes[J]. *Ore Geology Reviews*, 148: 105029.
- ZHAO Haijie, YU Zhangfa, HAN Xinqiao, et al., 2016. Magmatic hydrothermal superimposition in Dajiangping S(Pb-Zn) deposit, Guangdong Province: Rb-Sr isochron age and sulfur isotope evidence[J]. *Mineral Deposits*, 35(4): 795-808(in Chinese with English abstract).
- ZHONG Jiusi, 1993. Report on the second round of metallogenic prospect zoning of gold deposits in Hunan Province[R]. Changsha: Hunan Institute of Geology(in Chinese).
- ZHOU Daoqing, CAO Baobao, LI Gongjian, et al., 2015. Prognosis and ore-forming effect of concealed metallogenetic pluton in Lanping basin, western Yunnan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(11): 3466-3476(in Chinese with English abstract).
- ZHU Zhijun, GUO Fusheng, 2016. Characteristics of salt structures and links to Pb-Zn mineralization of the Jinding deposit in Lanping Basin, Western Yunnan[J]. *Geotectonica and Metallogenia*, 40(2): 344-353(in Chinese with English abstract).