

西南三江碰撞造山带沉积岩容矿 Pb-Zn-Ag-Cu 贱金属复合成矿与深部过程*

毕献武¹ 唐永永¹ 陶琰¹ 王长明² 胥磊落¹ 戚华文¹ 兰青¹ 木兰^{1,3}

BI XianWu¹, TANG YongYong¹, TAO Yan¹, WANG ChangMing², XU LeiLuo¹, QI HuaWen¹, LAN Qing¹ and MU Lan^{1,3}

1. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室 贵阳 550081

2. 中国地质大学地球科学与资源学院 北京 100083

3. 中国科学院大学 北京 100049

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China

2. School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2019-01-20 收稿, 2019-03-27 改回.

Bi XW, Tang YY, Tao Y, Wang CM, Xu LL, Qi HW, Lan Q and Mu L. 2019. Composite metallogenesis of sediment-hosted Pb-Zn-Ag-Cu base metal deposits in the Sanjiang Collisional Orogen, SW China, and its deep driving mechanisms. *Acta Petrologica Sinica*, 35(5): 1341–1371, doi: 10. 18654/1000-0569/2019. 05. 03

Abstract A great number of sediment-hosted Pb-Zn-Ag-Cu deposits occur in the Meso-Cenozoic sedimentary basins within the Sanjiang Tethyan orogeny, SW China, which compose a significant base metal metallogenic belt with an extension over 1000km along the northeastern margin of the Tibetan Plateau. For it is an important type in the continental collision-related deposit spectrum, further study upon these deposits is greatly helpful to understand and improve the theories of the continental collision metallogenesis and guide the exploration. Many studies suggest that these deposits are distinct from the SEDEX and MVT model in terms of ore controls, host rocks and other features, and that multiple sourced fluids associated with mineralization should have been driven by deep processes. However, it is intensively debated on the geotectonic settings of ore formation and spatial-temporal association with the collisional orogeny due to lack of highly resolved chronological data. Some studies indicate that they were resulted from composite mineralization, but these studies did not well document its mechanisms. A comprehensive study has thus been carried out on the geochronology, ore-forming fluids and metal sources, composite metallogenesis and mechanisms for the Pb-Zn-Ag and Cu polymetallic deposits in the Lanping and Changdu basins. The results show that the Cu deposits were mainly formed in 48 ~ 58Ma and the Pb-Zn deposits were formed in 28 ~ 33Ma. Also, three types of composite mineralization have been recognized: 1) metamorphic fluids and basinal brines or meteoric water, represented by the Jinman-Liancheng Cu deposits; 2) basinal brine and meteoric water, represented by the Jinding deposit; and 3) basinal brine and magmatic fluid with an example of the Lanuoma Pb-Zn-Sb deposit. The Cu deposits happened synchronously with the main collisional compression of the India-Asian continental collision and metamorphic fluids were probably generated by subduction-caused high-pressure metamorphism. The Pb-Zn deposits were formed by basinal brine-dominated fluids driven by orogenic uplift as well as tectonic compression in the stage of the late collisional tectonic transform. Contemporaneous magmatism may have mainly played as heat sources or provided ore materials.

Key words Sediment-hosted Pb-Zn-Ag-Cu base metal deposits; Composite mineralization; Deep driving mechanisms; Sanjiang Collisional Orogen

摘要 西南三江特提斯造山带中生代沉积盆地中(沱沱河、玉树、昌都和兰坪-思茅地区)发育包括金顶超大型铅锌矿床在内的一系列以沉积岩容矿的Pb-Zn-Ag-Cu贱金属矿床,构成长达千余千米的青藏高原东缘贱金属成矿带。作为大陆碰撞环境成矿谱系的重要矿床类型,加强这些矿床的理论研究对提高和完善大陆碰撞造山成矿理论和指导找矿勘查等具有重要

* 本文受国家重点基础研究发展计划项目(2015CB452603)、国家自然科学基金项目(41703047)和中国科学院国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划“陆内成矿作用研究团队”(KZZD-EW-TZ-20)联合资助。

第一作者简介: 毕献武,女,1967年生,研究员,矿床地球化学专业, E-mail: bixianwu@vip.gyig.ac.cn

意义。已有研究表明这些 Pb-Zn-Ag-Cu 矿床的分布受盆地形成后新生代大型逆冲推覆-走滑构造控制,其容矿岩石和成矿作用特征与 SEDEX 和 MVT 矿床存在明显的差异,矿床成矿流体现表现出多来源混合的特征,成矿与深部过程密切相关。尽管取得重要进展,但由于缺乏高精度年代学数据制约,成矿动力学背景及其与碰撞造山的时空联系存在较大争议。一些矿床的研究显示复合成矿迹象,但是复合成矿过程与深部驱动等问题仍不清楚。近年来我们以兰坪和昌都盆地的 Pb-Zn-Ag 多金属矿床和 Cu 多金属矿床为重点研究对象,系统开展了成矿年代学、成矿流体源-运-储系统和复合成矿机制以及深部过程对成矿制约等方面研究。结果表明,兰坪盆地西缘 Cu(Mo) 多金属矿床主要形成于 48~58Ma,兰坪和昌都盆地 Pb-Zn-Ag 多金属矿床主要形成于 27~33Ma。成矿流体现表现出明显的多来源混合的特征,主要存在三种类型:1) 变质流体与盆地卤水或大气降水复合成矿,以金满-连城 Cu 矿床为代表;2) 盆地卤水与大气降水复合成矿,以金顶 Pb-Zn 矿床为代表;3) 盆地卤水和岩浆流体复合成矿,以拉诺玛 Pb-Zn-Sb 矿床为代表。兰坪盆地西缘 Cu 矿床主要形成于新生代印度-欧亚大陆主碰撞挤压阶段,与成矿密切相关的变质流体可能来源于陆-陆碰撞俯冲引起的高压变质。Pb-Zn 矿床主要形成于印度-欧亚大陆晚碰撞构造转换环境,构造挤压和造山隆起驱动盆地流体迁移,同期的岩浆活动主要为成矿提供热驱动力或成矿物质。

关键词 沉积岩容矿 Pb-Zn-Ag-Cu 贱金属成矿;复合成矿;深部过程;三江碰撞造山带

中图法分类号 P611.22

近二十年来,我国在青藏高原及其东缘大陆碰撞造山与成矿研究方面取得了可喜的进展,陆续发现了大批世界级的金属矿床和成矿带,如冈底斯带及其东延哀牢山-红河带的斑岩 Cu(Mo-Au) 矿床(Bi *et al.*, 1996; 毕献武等, 1997, 2006; Hu *et al.*, 1998a; 胡瑞忠等, 1999; 侯增谦等, 2001, 2003; 李光明等, 2002; 王登红等, 2004; 芮宗瑶等, 2006; Hou and Cook, 2009; Sun *et al.*, 2009; Yang *et al.*, 2009; Deng *et al.*, 2015a)、川西碳酸岩型 REE 矿床(袁忠信等, 1995; 阳正熙等, 2000; Wang *et al.*, 2001a; 许成等, 2003; 侯增谦等, 2008a; 田世洪等, 2008; Xie *et al.*, 2009)、三江造山带岩浆热液型 Cu-Pb-Zn-Mo-Fe 矿床(陈琿等, 2010; 王彦斌等, 2010; Ye *et al.*, 2011; 杨喜安等, 2011; Deng *et al.*, 2012, 2014a, b) 和沉积岩容矿的 Pb-Zn-Ag-Cu 多金属矿床等(Hu *et al.*, 1998b; Kyle and Li, 2002; 高兰等, 2005; Xue *et al.*, 2007; 侯增谦等, 2008b; He *et al.*, 2009; 田世洪等, 2009; 宋玉财等, 2011; 江彪等, 2014; Deng *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2017; Tang *et al.*, 2017b; Wang *et al.*, 2018a) 这些实践有力地证明碰撞造山带成矿潜力巨大,而非前人认为的大陆碰撞过程难以成矿(Guild, 1972; Mitchell and Garson, 1981; Kerrich *et al.*, 2005; Bierlein *et al.*, 2006; Groves and Bierlein, 2007)。三江碰撞造山带沉积岩容矿 Pb-Zn-Ag-Cu 多金属矿床作为大陆碰撞环境成矿谱系的重要矿床类型,是世界上 Pb-Zn 的主要来源和 Cu 的重要来源,还提供了大量的 Fe、Mn、Sr、Ba、U、Ag、Co、Ga、Ge、Cd、Tl 等元素(Goodfellow *et al.*, 1993)。加强这类矿床的成因研究对于提高和完善大陆碰撞造山成矿理论和指导找矿勘查等具有重要意义。

我国西南三江地区(因并流的怒江、澜沧江、金沙江而得名)位于特提斯巨型构造域的东部,该区经历了晚古生代-中生代特提斯构造演化和新生代陆陆碰撞造山,频繁的陆-洋转换和盆-山耦合、异常活跃的壳幔物质-能量交换及岩浆流体活动、异常发育的断裂网络系统和汇水盆地系统,造就了丰富的金属矿产资源(邓军等, 2010)。在金沙江和怒江缝

合带之间发育着一系列的中新生代沉积盆地(从北往南依次为沱沱河盆地、玉树盆地、昌都盆地和兰坪-思茅盆地),产出大量的 Pb-Zn-Cu-Ag 金属矿床,以沉积岩容矿,受大型逆冲-推覆和走滑构造控制,形成了一条长达千余千米的贱金属成矿带(图 1, 侯增谦等, 2008b; 宋玉财等, 2011)。目前在该矿带内发现 Pb-Zn-Ag-Cu 矿床、矿点达百余处,是我国最重要的贱金属成矿带之一。该区沉积岩容矿 Pb-Zn-Ag-Cu 多金属矿床作为大陆碰撞环境成矿谱系的重要矿床类型,具有巨大的找矿潜力,受到国内外学者的广泛关注。近年来有关三江碰撞造山带沉积岩容矿的 Pb-Zn-Ag-Cu 多金属矿床的成矿特征和成矿作用研究取得重要进展。研究表明:(1) 这些矿床的形成与分布与新生代碰撞造山构造活动密切相关,其成矿特征不同于世界已知的各类以沉积岩容矿的贱金属矿床(如 SST、MVT、SEDEX 矿床, Xue *et al.*, 2007; 侯增谦等, 2008b; He *et al.*, 2009; 王安建等, 2009); (2) 前人通过多种测年方法(包括 Pb 模式年龄、磷灰石裂变径迹、Re-Os、Ar-Ar 法和地质推断年龄)获得成矿年代主要集中在 68~20Ma 之间(张乾, 1993; 李小明等, 2000; Xue *et al.*, 2003; 徐晓春等, 2004; 刘家军等, 2003; 黄震等, 2005; 王彦斌等, 2005; 李志明等, 2006; 田世洪等, 2009; 王光辉等, 2009); (3) 识别出不同类型的 Pb-Zn-Ag-Cu 多金属矿床,其成矿流体均表现出不同来源流体复合成矿的特征(温汉捷等, 2003; 杨伟光等, 2003; Xue *et al.*, 2007; 薛春纪等, 2007; 薛伟等, 2010; 张峰等, 2010; 张锦让和温汉捷, 2010; 唐永永等, 2011; 陶琰等, 2011); (4) 提出了多种矿床成因模式,如中低温非岩浆热液成矿(高广立, 1989; Hu *et al.*, 1998b; Li, 1998; Kyle and Li, 2002)、壳幔复合成矿(尹汉辉等, 1990; 阙梅英等, 1998)、热水沉积成矿(赵兴元, 1989a; 王京彬等, 1992; 罗君烈等, 1994; 刘家军等, 2000)、MVT 或类 MVT 矿床(宋玉财等, 2011, 2017; 刘英超等, 2013; Leach *et al.*, 2017; 王长明等, 2017)和特殊类型(如金顶型、兰坪型、造山型, Xue *et al.*, 2007; 侯增谦等, 2008b; He *et al.*, 2009; 王安建等, 2009)等。尽管取得上述重要进展,但

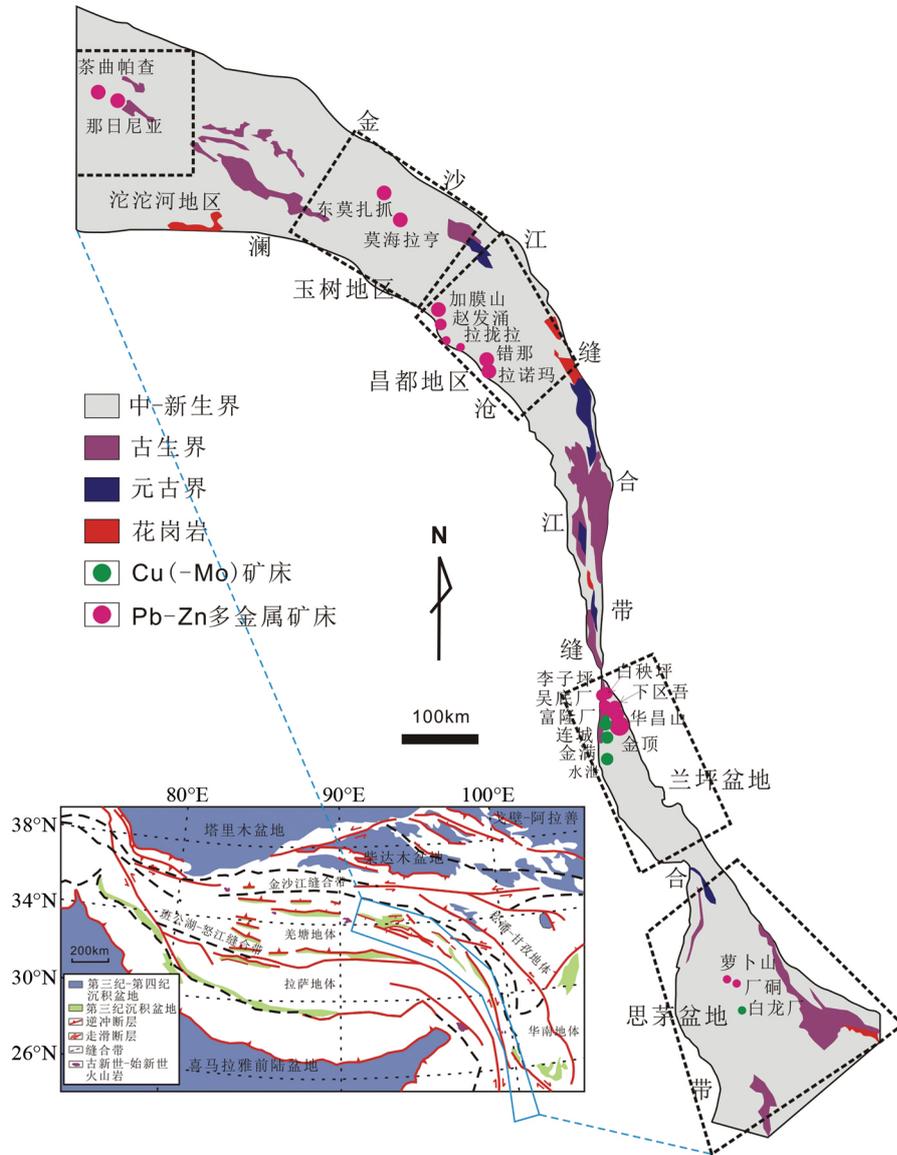


图1 青藏高原大地构造简图及研究区位置(据 Spurlin *et al.* ,2005 修改)

Fig.1 Sketch tectonic map of the Tibetan collision belt and locations of the studied zones (modified after Spurlin *et al.* ,2005)

不难发现关于其成因认识存在较大争议。存在的主要问题包括: (1) 由于测年方法的局限, 导致目前获得的成矿年代时间跨度大, 制约了对这些矿床形成的动力学背景的认识; (2) 研究发现区内贱金属矿床的成矿流体具有多源性复合成矿特征, 但现有研究对 Pb-Zn-Ag-Cu 复合成矿机制及其深部驱动过程研究薄弱, 因而制约了对矿床成因的深入认识。针对上述问题, 在国家“973”项目“我国西南特提斯典型复合成矿系统及其深部驱动机制”的支持下, 通过对兰坪盆地和昌都盆地典型 Zn、Pb、Cu、Ag 多金属矿床成矿构造背景、成矿特征、成矿流体性质和来源、成矿的就位机制的系统研究, 辨析出研究区存在三种矿床类型: 与盆地卤水有关的沉积岩容矿 Pb-Zn 多金属矿床, 以兰坪金顶 Zn-Pb 矿床为代表; 岩浆流体参与成矿的沉积岩容矿 Pb-Zn 多金属矿床, 以昌都盆地拉诺

玛 Zn-Pb-Sb 矿床为代表; 中低温热液脉型 Cu(Mo) -Ag 多金属矿床, 以兰坪盆地西缘金满、连城等 Cu-Mo 多金属矿床为代表, 并深入探讨了矿床成矿机制。本文系统总结了相关研究成果, 以期进一步深化对碰撞造山过程沉积岩容矿的 Pb-Zn-Ag-Cu 多金属矿床成因的认识, 推进相关找矿勘查工作。

1 成矿构造背景与成矿特征

1.1 成矿构造背景

三江碰撞造山带沉积岩容矿 Pb-Zn-Ag-Cu 贱金属成矿带处于青藏高原东、北缘之北部金沙江缝合带和南部龙木错-双湖缝合带-澜沧江缝合带所夹持的羌塘和昌都-思茅地块上(图 1)。研究区经历了原、古、中、新特提斯洋闭合所

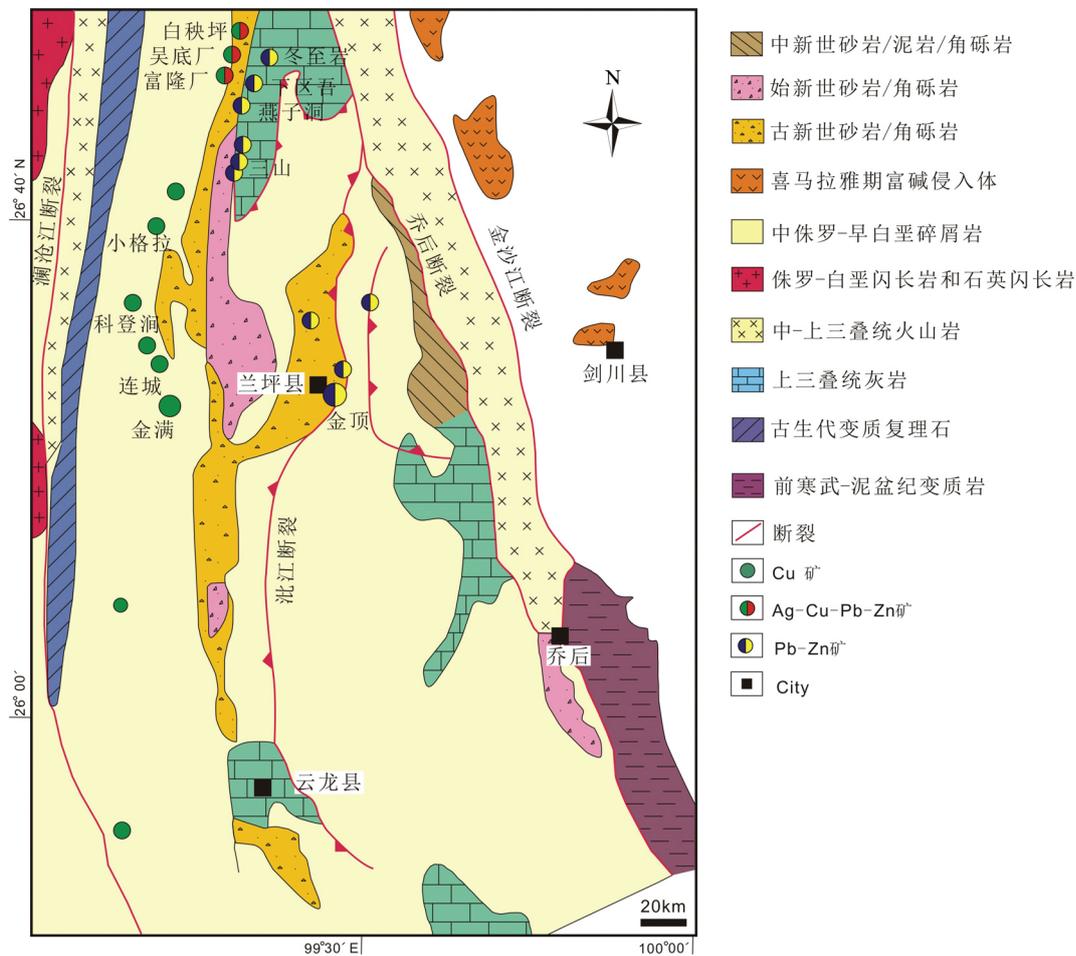


图2 兰坪盆地北段地质简图及主要贱金属矿床分布

Fig. 2 Geological map of the northern Lanping basin and the distribution of major sediment-hosted base metal deposits

引发的增生造山和新生代印度-欧亚大陆汇聚所导致的碰撞造山过程,以发育新生代大规模走滑断裂系统、逆冲推覆构造系统及相伴产生的第三纪前陆盆地和规模宏大的新生代钾质岩浆岩带为典型特征(侯增谦等,2006,2008b;邓军等,2016)。目前在矿带内已发现Pb-Zn-Cu-Ag矿床、矿点达百余处。这些矿床和矿化点主要分布在金沙江缝合带与班公湖-怒江缝合带之间的第三纪前陆盆地中,自北而南依次为沱沱河盆地、风火山盆地、囊谦盆地、昌都盆地和兰坪-思茅盆地等,这些盆地多遭受新生代大型逆冲推覆构造系统的叠加和改造。

兰坪盆地位于三江贱金属成矿带南端,北起维西,南达景东,与思茅盆地相连。盆地东边以维西-乔后断裂与扬子陆块西南缘的金沙江-哀牢山造山带相邻,盆地西侧以澜沧江断裂为界(图2)。兰坪盆地演化历史非常复杂,大致经历了基底形成、陆内盆地演化和盆山转换等三个阶段。在盆地边界断裂外侧出露元古代-古生代变质基底。晚古生代古特提斯洋开始形成,扬子地块西部分裂扩张形成金沙江洋,将兰坪盆地与扬子地块隔开。晚二叠世,夹持兰坪-思茅地块的金沙江洋和西侧的澜沧江洋相向俯冲,滇藏古陆和扬子古

陆逐渐靠近,二叠纪末两大古陆及其所夹持的兰坪地块碰撞在一起。早-中二叠世,兰坪地区表现为强烈的造山作用,普遍缺失下-中三叠统,局部发育少量中、酸性火山岩。晚三叠世,兰坪地区进入陆内裂谷发展阶段,主要接受了上三叠统(外古村组、三合洞组、麦初青组等)海相和下侏罗统(漾江组)海陆交互沉积。中侏罗世,兰坪由陆内裂谷转变为陆内凹陷盆地,充填了中侏罗统-白垩系陆相沉积。新生代,兰坪盆地经历了前陆盆地和走滑-拉分盆地演化,沉积物具有封闭型湖盆环境沉积特征,主要发育含膏盐红色碎屑岩。在整个盆地充填序列中,至少发育6个蒸发岩层位,总厚度达2km(覃功炯和朱上庆,1991;Xue *et al.*,2007)。

昌都盆地北起生达-甲桑卡一线,南至德钦-扎玉一带,东以金沙江缝合带为界,西临怒江缝合带,呈向北撒开,向南收敛的NW向带状展布(图3)。盆地基底由前寒武系吉塘群和西西群组成,主要分布在龙木错-双湖-吉塘-澜沧江缝合带。古生界在区内零星分布,主要有下奥陶统-泥盆系、石炭系和二叠系等,岩性以碎屑岩、碳酸盐岩为主。其中,下奥陶统经历浅变质,泥盆系下段角度不整合于奥陶系之上,二叠系为陆相火山岩、浅海相碎屑岩夹基性凝灰岩。中生界在区

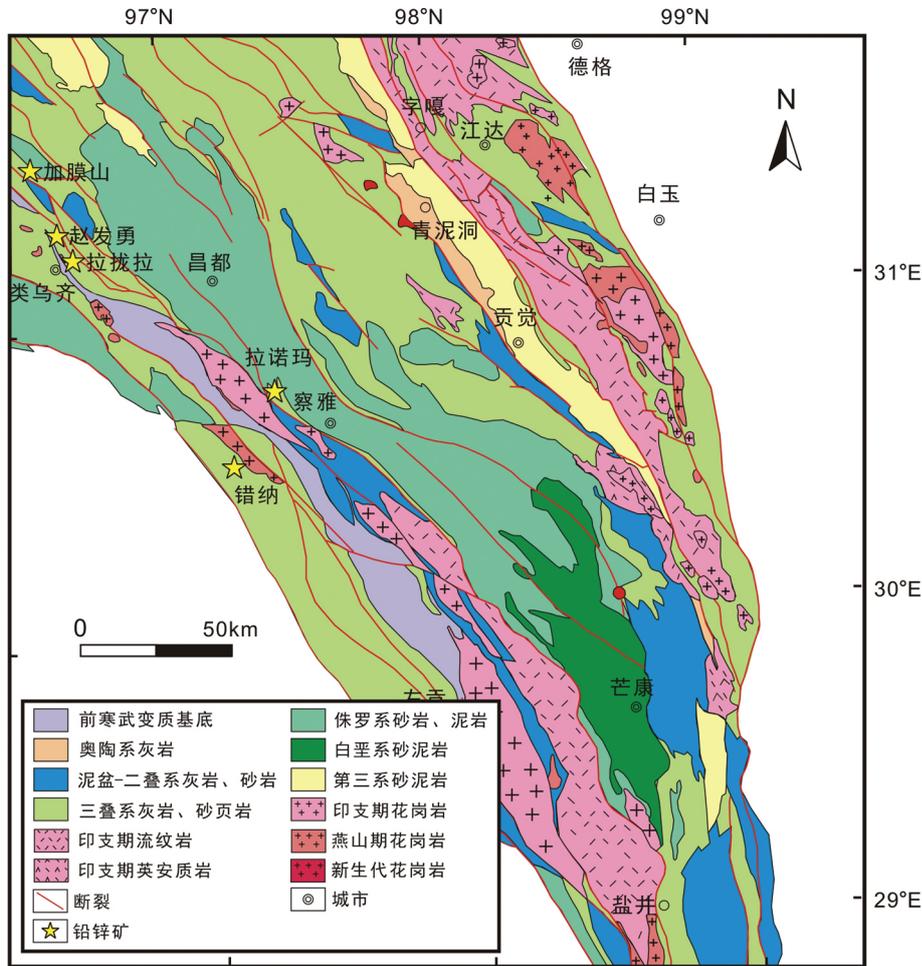


图3 昌都盆地地质图(据 Spurlin *et al.*, 2005 修改)

Fig.3 Geological map of the Changdu basin (modified after Spurlin *et al.*, 2005)

内广泛分布,三叠系以海相碳酸盐岩沉积为主,兼有海陆交互相和陆相火山岩发育;侏罗系发育海相碳酸盐岩和陆相红色碎屑岩;白垩系为陆相碎屑岩沉积。第三纪充填底砾岩、含砾砂岩、砂泥岩和碳酸盐及膏盐建造。中、晚始新世,昌都盆地两侧造山带(分别为金沙江造山带和澜沧江造山带)向盆地推覆,形成对冲推覆的构造格局。东部为自东向西的逆冲推覆系统,推覆体主要为基底元古代深变质杂岩和浅变质的下奥陶统,置于晚古生代和中生代地层之上;西部逆冲推覆系统断面西倾,卷入推覆体的地层包括元古界、震旦-寒武系、上古生界、中-下三叠统地层和海西-印支期的花岗岩,其上广泛覆盖上三叠统-侏罗系裂谷型红层(唐菊兴等, 2006)。始新世晚期-渐新世,盆地发生走滑拉分,沿着已有的深大断裂呈雁行状排列。三叠系-古新统顺层剪切作用强烈,以构造透镜体、劈理化及糜棱岩化为特征,早期具有逆冲剪切,晚期具有正滑剪切的特点(唐菊兴等, 2006; 侯增谦等, 2008b)。

1.2 成矿特征

兰坪盆地发现 Pb、Zn、Ag、Cu、Hg、Sb、As 等矿种达 20 余

种,矿床(点)超过 200 个,包括金顶超大型 Pb-Zn 矿床、白秧坪超大型 Ag-Cu-Pb-Zn 矿集区和金满大型 Cu 矿床。这些矿床呈现南北分段、东西分带特征(图 2),表现为从盆地南部(白洋厂)到中部(金顶)再到北部(白秧坪)等矿床或矿田呈近等间距分布,成矿元素由 Cu-Ag 到 Pb-Zn 再到 Ag-Cu-Pb-Zn。盆地西缘,以金满、连城、科登洞、小格拉等矿床为代表构成一条近 NS 向展布的 Cu 矿化带,向北东延伸至富隆厂、白秧坪、核桃箐、吴底厂一带,形成 Ag-Cu-Pb-Zn 矿化带(杨伟光等, 2003);再往东至冬至岩、下区吾、燕子洞、三山(华昌山、灰山、黑山)等矿床构成一条 NNE 向的 Pb-Zn-Ag-Cu 矿化带,该带向南一直延续到金顶超大型 Pb-Zn 矿床。总的来讲,盆地西部成矿元素以 Cu、Ag 为主,围岩蚀变强,普遍发育硅化;东部以 Pb、Zn 为主,蚀变较弱,以广泛发育碳酸盐化为特点。昌都盆地产出的主要金属有 Pb、Zn、Cu、W、Sn、Au、Ag、U、Th 等,以 Pb-Zn 多金属矿为主导,已查明的 Pb-Zn 矿床(点)20 余处,其中大中型矿床 10 余处,主要产在类乌齐-左贡地体内,受逆冲推覆构造控制,形成一条 NW 向延伸的 Pb-Zn 矿化带。

表 1 昌都和兰坪盆地主要沉积岩容矿贱金属矿床特征

Table 1 Geological features of the major sediment-hosted base metal deposits in the Changdu and Laping basins

典型矿床	金属组合	矿物组成	矿石结构	矿体形态	赋矿围岩	控矿构造	围岩蚀变	产出构造环境	成矿流体性质
昌都地区									
拉诺玛	Pb-Zn-Sb	方铅矿、闪锌矿、硫锑铅矿、方解石	块状、细脉状、角砾状	脉状、透镜状	灰岩(T ₃)	断裂控矿	方解石化、硅化、雌黄化	逆冲断裂带	盆地卤水、岩浆流体 ¹
错那	Pb-Zn	方铅矿、闪锌矿、方解石	块状、细脉状、角砾状	脉状、透镜状	碎屑岩(T ₃)	断裂控矿	方解石化	逆冲断裂带	盆地卤水 ²
赵发涌	Pb-Zn	方铅矿、闪锌矿、方解石	块状、细脉状、角砾状	脉状、透镜状	灰岩(T ₃)	断裂控矿	白云石化	逆冲断裂带	盆地卤水 ³
拉拢拉	Pb-Zn	方铅矿、闪锌矿、方解石	块状、细脉状、角砾状	脉状、透镜状	灰岩(T ₃)	断裂控矿	方解石化、硅化、萤石化	逆冲断裂带	盆地卤水 ⁴
加膜山	Pb-Zn	方铅矿、闪锌矿、方解石	块状、细脉状、角砾状	脉状、透镜状	灰岩(T ₃)	断裂控矿	白云石化、石膏化	逆冲断裂带	盆地卤水 ³
兰坪盆地									
金顶	Pb-Zn-Ag-Cd-Tl-Sr	闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、白铁矿、方解石、石膏	细粒浸染状、块状、脉状、胶状	层状、似层状、透镜状、筒状	灰岩-T ₃ 、碎屑岩-T/E?	逆冲推覆断裂、穹隆	黄铁矿化、方解石化、天青石化、重晶石化、褪色作用	逆冲断裂带	盆地卤水、大气降水 ⁵
菜籽地	Pb-Zn	方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、方解石	块状、脉状、胶状	层状、似层状	灰岩(T ₃)	向斜构造	方解石化	逆冲断裂带	盆地卤水 ⁶
老君山	Pb-Zn	方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、方解石、石英	块状、脉状	层状、似层状	灰岩(T ₃)	逆冲推覆断层	方解石化、硅化	逆冲断裂带	盆地卤水 ⁶
三山	Pb, Zn	闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、方解石、白云石、石英	块状、脉状、角砾状构造	似层状、透镜状	灰岩(T ₃)	逆冲推覆断裂	方解石化、天青石化、硅化	逆冲断裂带	盆地卤水 ⁷
下区吾	Pb-Zn-Ag	闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、黝铜矿、方解石、石英	块状、脉状、角砾状构造	似层状、透镜状	灰岩(T ₃)	逆冲推覆断裂	方解石化、天青石化、硅化	逆冲断裂带	盆地卤水 ⁸
燕子洞	Pb-Zn-Ag	闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、黝铜矿、方解石、石英	块状、脉状、角砾状构造	似层状、透镜状	灰岩(T ₃)	逆冲推覆断裂	方解石化、天青石化、硅化	逆冲断裂带	盆地卤水 ⁸
李子坪	Pb-Zn	闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、黄铜矿、黝铜矿、方解石	块状、脉状、粗粒结构	脉状、透镜状	碎屑岩(J ₂)	逆冲断裂	碳酸盐化、硅化、白云石化	逆冲断裂带	盆地卤水 ⁸
白映坪	Cu, Co, Ag, Pb, Zn	黄铜矿、黝铜矿、闪锌矿、方铅矿、辉银矿、石英、方解石	块状、细脉状、角砾状	脉状、透镜状	碎屑岩(K ₁)	逆冲断裂	碳酸盐化、重晶石化、硅化	逆冲断裂带	盆地卤水 ^{8,9}
吴底厂	Cu-Ag-Pb-Zn	黄铜矿、黝铜矿、闪锌矿、方铅矿、辉银矿、石英、方解石	块状、细脉状、角砾状	脉状、透镜状	碎屑岩(J ₂)	逆冲断裂	碳酸盐化、硅化	逆冲断裂带	盆地卤水 ⁸

续表 1
Continued Table 1

典型矿床	金属组合	矿物组成	矿石结构	矿体形态	赋矿围岩	控矿构造	围岩蚀变	产出构造环境	成矿流体性质
富隆厂	Ag-Cu-Pb-Zn	黝铜矿、汞银矿、辉银矿、方铅矿、方解石	块状、细脉状、角砾状	脉状、透镜状	碎屑岩 (K ₁)	逆冲断裂	碳酸盐化	逆冲断裂带	盆地卤水 ⁸
金满	Cu-Ag	黄铜矿、辉铜矿、斑铜矿、黝铜矿、辉银矿、石英	块状、脉状、角砾状	脉状	碎屑岩 (J ₂)	澜沧江断裂	硅化、方解石化、重晶石化、菱铁矿化	逆冲断裂带	盆地卤水、变质流体 ¹⁰
连城	Cu-Mo	黄铜矿、辉铜矿、斑铜矿、辉钼矿、方解石、石英	块状、脉状	脉状	碎屑岩 (J ₂)	澜沧江断裂	硅化、方解石化	逆冲断裂带	变质流体、大气降水 ¹¹
科登洞	Cu	黄铜矿、辉铜矿、斑铜矿、石英	块状、脉状	脉状	火山岩 (T ₃)	澜沧江断裂	硅化、方解石化	逆冲断裂带	盆地卤水 ¹²
小格拉	Cu	黄铜矿、辉铜矿、斑铜矿、方解石、石英	块状、脉状	脉状	碎屑岩 (J ₂)	澜沧江断裂	硅化、方解石化	逆冲断裂带	
思茅盆地			交代残余、片状、草蓐状和其他形状结构、脉状和浸染状构造	板状、层状	灰岩 (P ₂)	断裂控矿	方解石化	逆冲断裂带	盆地卤水 ⁶
萝卜山	Pb-Zn	方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、方解石	交代残余、片状、草蓐状和其他形状结构、脉状和浸染状构造	板状、层状	灰岩 (P ₂)	断裂控矿	方解石化	逆冲断裂带	盆地卤水 ⁶
厂铜	Pb-Zn	方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、方解石	交代残余、片状、草蓐状和其他形状结构、脉状和浸染状构造	板状、层状	灰岩 (T ₃)	断裂控矿	方解石化	逆冲断裂带	盆地卤水 ⁶
易田	Pb-Zn	方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、方解石	交代残余、片状、草蓐状和其他形状结构、脉状和浸染状构造	板状、层状	灰岩 (T ₃)	断裂控矿	方解石化	逆冲断裂带	盆地卤水 ⁶
MVT 矿床	Pb-Zn (Ag, Co, Cu, Sb, Ga, Ge, In, Cd, Ba)	闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、黄铜矿、石英、方解石、白云石、萤石等	块状、脉状、角砾状	层状、似层状、脉状、与围岩不整合接触	台地碳酸盐岩、白云岩、少量碎屑岩	溶蚀坍塌角砾岩、断层和裂隙，相变过渡、生物礁、基底隆起等	碳酸盐化、重晶石化、硅化、萤石化	造山带前陆盆地、少数褶皱逆冲带、极少数于伸展环境	盆地卤水 ¹³
多金属脉状矿床	Pb, Zn, Cu, Au, Mo	黄铁矿、毒砂、方铅矿、方闪锌矿、方铅矿、含 Ag 矿物、毒砂等	脉状、角砾状、浸染状	脉状	变质岩	构造控矿，断层和裂隙	碳酸盐化、绢云母化、硅化	造山带	变质流体 ^{14,15}

注：1. 陶球等，2011；2. 徐春霞，2017；3. 刘英超，2012；4. 刘英超等，2013；5. Tang *et al.*, 2017b；6. 江彪，2014；7. 陈开旭等，2004；8. 王晓虎等，2011；9. 邹志超，2013；10. 杨立飞等，2016；11. Wang *et al.*, 2018b；12. 张锦让等，2016；13. Leach *et al.*, 2005；14. 陈衍景等，2007；15. Eaton *et al.*, 1995

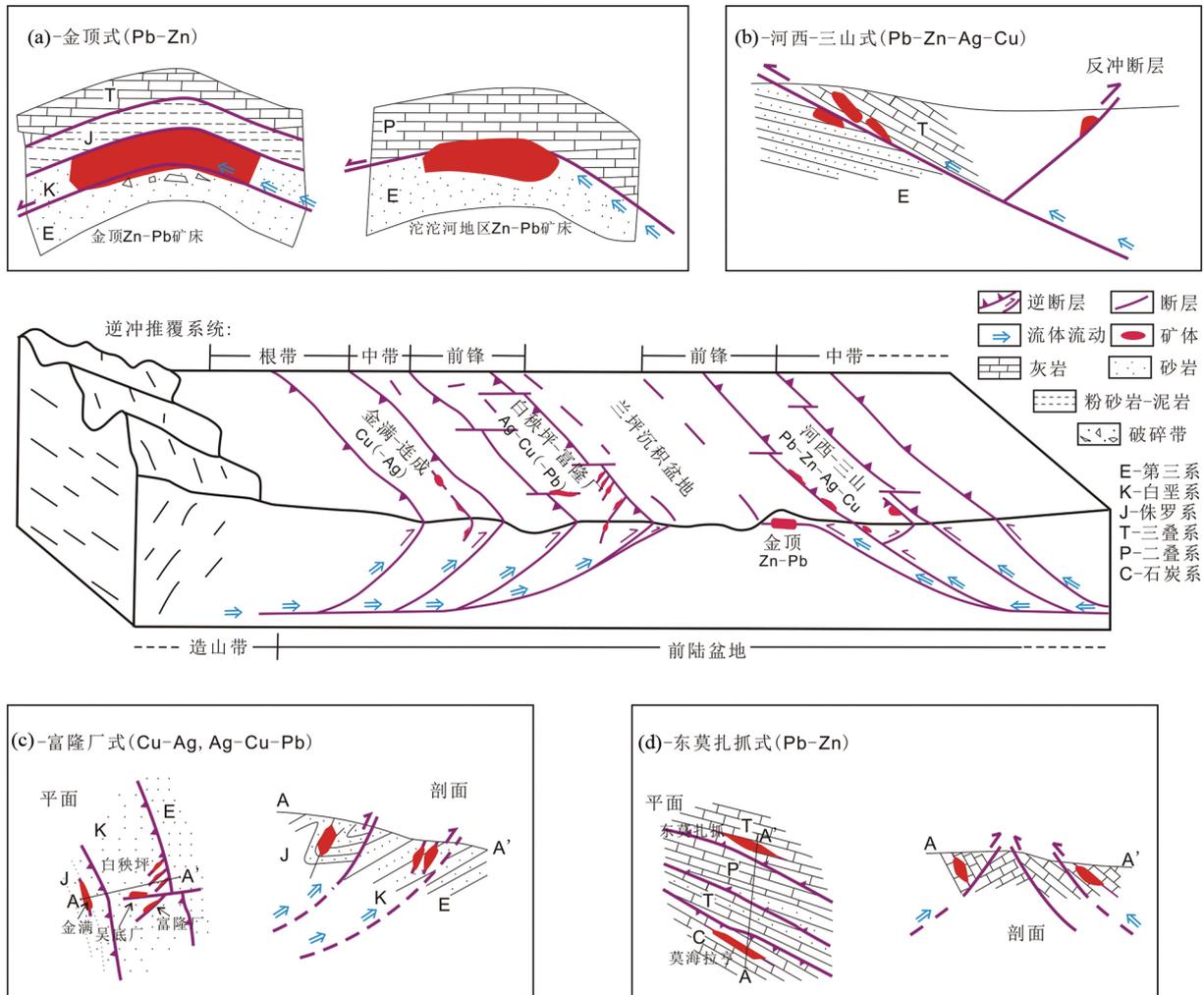


图4 逆冲推覆构造控矿 Pb-Zn-Ag-Cu 矿床模式(据侯增谦等, 2008b)

Fig.4 Models of the thrust-controlled Pb-Zn-Ag-Cu deposits in the Sanjiang Tethyan orogen (modified after Hou *et al.*, 2008b)

下面我们对兰坪-思茅盆地和昌都盆地内的主要沉积岩容矿贱金属矿床的成矿地质特征进行对比分析(表1)。

(1) Pb-Zn 多金属矿床

赋矿围岩 区内的 Pb-Zn 矿床主要赋存在灰岩中,部分矿床以碎屑岩容矿。其中,兰坪三山(灰山、黑山、华昌山)、燕子洞、菜籽地、老君山等矿床产在上三叠统三合洞组灰岩中;昌都拉拢拉、赵发涌、拉诺玛、加膜山矿床产在上三叠统波里拉组、甲丕拉组和乱泥巴组灰岩中;思茅盆地的萝卜山和厂洞矿床赋存在晚二叠世灰岩中,易田矿床赋存在晚三叠世灰岩中;兰坪盆地的富隆厂、吴底厂、李子坪等矿床,矿体主要赋存在侏罗-白垩纪砂岩、粉砂岩中;昌都盆地的错那矿床产在上三叠统阿堵拉组石英砂岩中;金顶 Pb-Zn 矿床的赋矿围岩有灰岩和砂岩两种,传统上认为它们分别属古新统云龙组和下白垩统景星组,也有研究认为赋矿砂岩为晚三叠世三合洞组下段,原来被划为古新统云龙组的灰岩角砾岩可能是晚三叠世三合洞组的中段(宋玉财等, 2011)。

构造控矿 区内 Pb-Zn 矿床主要受大型逆冲推覆-走滑

构造控制,但是不同矿集区或矿床的控矿式样存在差异。侯增谦等(2008b)归纳出四种类型的构造控矿(图4): a) 金顶式,矿体受控于逆冲推覆构造前锋带发育的圈闭系统,往往表现为中生代构造岩片被推覆叠置于第三系前陆盆地之上,并在挤压条件下形成穹窿体; b) 河西-三山式,以主逆冲推覆断层及次级反冲断层控矿,矿化出现在断裂带及上下盘的裂隙或断裂发育部位; c) 富隆厂式,矿床受主逆冲断裂上盘构造岩片的次级断裂或与逆冲推覆伴生的横切主逆冲断层的平移断层控制; d) 东莫扎抓式,主要受逆冲断裂上盘构造岩片内的次级断裂控制,断裂平行于区域逆冲推覆构造带方向,主要为顺层产出,局部可切层。昌都盆地的 Pb-Zn 矿床主要为“东莫扎抓式”。

矿石组成(图5a-h) 金属矿物主要为闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、白铁矿。在金顶矿床中出现了大量的菱锌矿,拉诺玛矿床中发现硫锑铅矿,在白秧坪矿床中出现较多的含 Cu、Co、Ni 金属硫化物,如黄铜矿、黝铜矿、辉铜矿、辉砷钴矿、硫钴镍矿等。脉石矿物主要由方解石、白云石,少量石英和黏

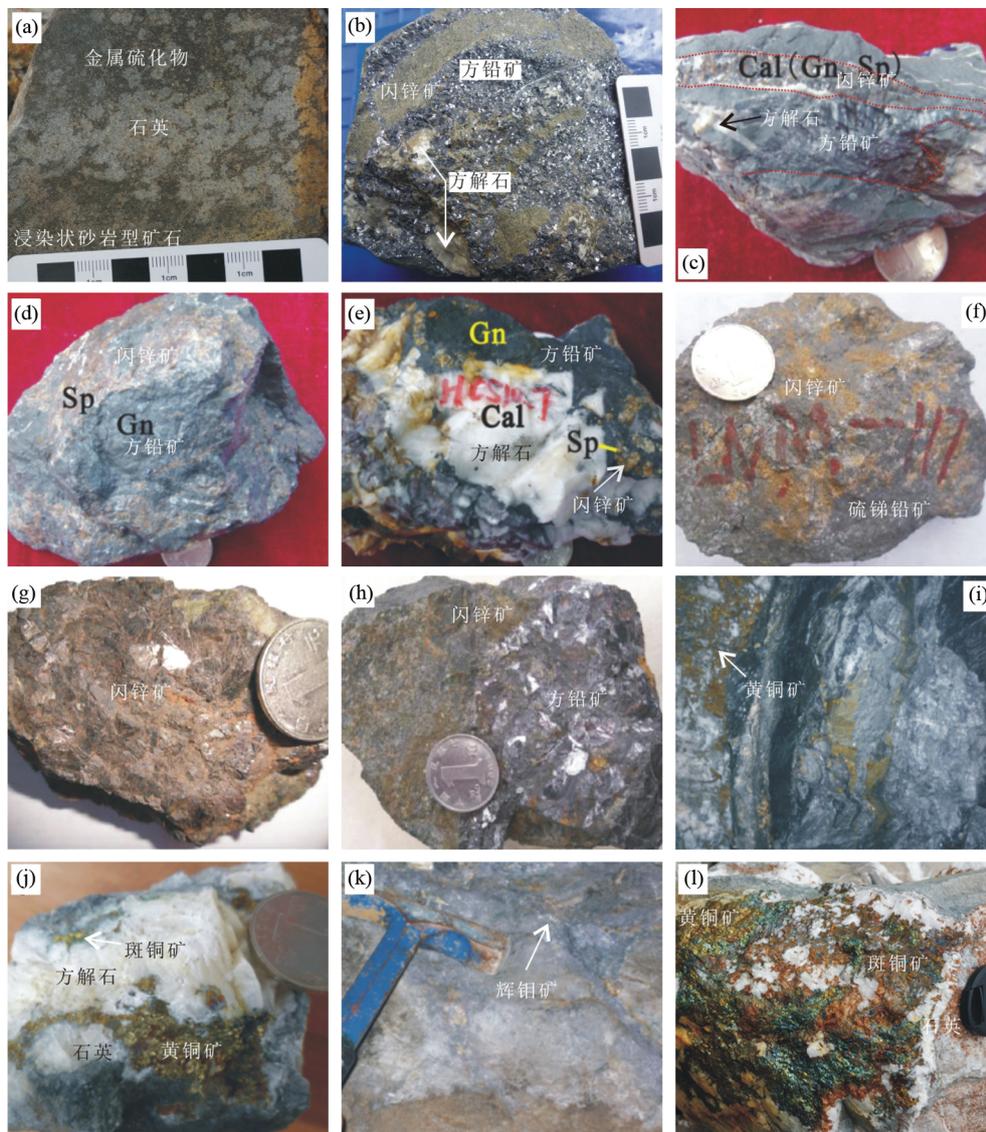


图5 沉积岩容矿 Pb-Zn-Ag-Cu 矿床典型矿石类型

(a) 金顶矿床砂岩型微细浸染状矿化；(b) 金顶矿床晚阶段粗粒方铅矿脉穿切早阶段砂岩型 Zn 矿化；(c) 李子坪矿床脉状方铅矿和闪锌矿；(d) 李子坪矿床中块状方铅矿和闪锌矿；(e) 三山矿床角砾状方铅矿和闪锌矿；(f) 拉诺玛矿床块状硫锑铅矿和闪锌矿；(g) 错那矿床块状闪锌矿矿石；(h) 错那矿床块状方铅矿和闪锌矿矿石；(i) 金满矿床裂隙充填的含黄铜矿石英脉；(j) 金满矿床含黄铜矿的石英-方解石脉；(k) 连城矿床断裂充填脉状辉钼矿；(l) 连城矿床中的含黄铜矿、斑铜矿的石英脉

Fig. 5 Typical ores of the major sediment-hosted Pb-Zn-Ag-Cu deposits in the Lanping and Changdu basins

(a) fine-grained disseminated lead-zinc mineralization in sandstone (Jinding); (b) massive ore with late-stage coarsely-grained vein galena and calcite crosscutting early-stage sandstone-hosted sphalerite (Jinding); (c) coarsely grained vein galena and sphalerite (Liziping); (d) massive galena and sphalerite ore (Liziping); (e) brecciated ore containing galena and sphalerite (Sanshan); (f) massive boulangerite and sphalerite ore (Lanuoma); (g) massive sphalerite ore (Cuona); (h) massive galena and sphalerite ore (Cuona); (i) fracture-filling chalcopyrite-bearing quartz vein (Jinman); (j) chalcopyrite-bearing quartz and calcite vein (Jinman); (k) fracture-filling molybdenite vein (Liancheng); (l) quartz vein type of chalcopyrite and bornite ore (Liancheng)

土矿物。在金顶矿床中出现大量的天青石、石膏、重晶石等，白秧坪地区金属矿床中也发现大量的天青石。可见，不同的 Pb-Zn 矿集区或矿床存在明显的成矿元素组合差异，兰坪盆地以 Pb-Zn (Cd-Tl)、Pb-Zn-Ag-Cu 为主，昌都盆地以 Pb-Zn (Sb) 为主。

膏盐-有机质-金属成矿 区内的贱金属矿床与膏盐建造

显示出密切的时空联系。兰坪盆地中生代地层中识别出 6 个蒸发岩层位，总厚度超过 2000m，这些地层是 Pb-Zn 矿床的重要赋矿层位。兰坪金顶矿床既是超大型 Pb-Zn 矿床，又是大型石膏矿和天青石矿，金属矿体与盐类矿体密切共生；在平面上，石膏矿呈断续环状围绕铅锌矿体展布或分布在金属矿体的上、下及边部地层中。一般认为金顶矿床的硬石膏为

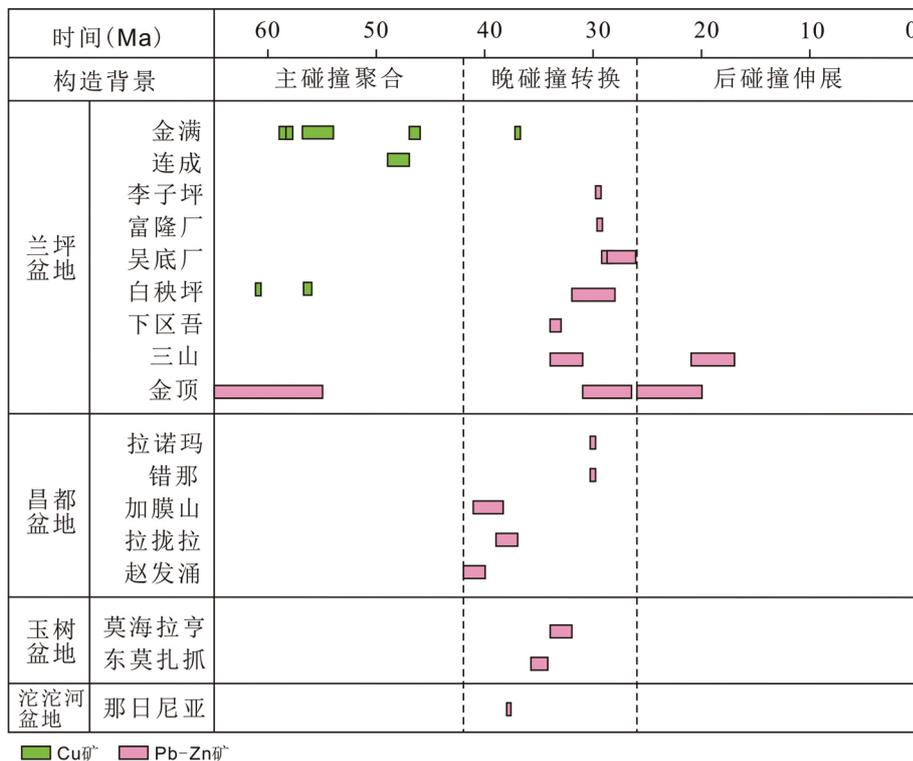


图6 沉积岩容矿贱金属矿床的成矿时代及对应的构造环境

Fig. 6 Formation ages of the sediment-hosted base metal deposits in the Sanjiang Tethyan orogen and their corresponding tectonic settings

古新世内陆盐湖蒸发岩(施加辛等, 1983; 白嘉芬等, 1985), 也有学者认为它们属于三叠系碳酸盐岩中的蒸发岩建造(高广立, 1991)。李以科等(2012)研究上三叠统的含盐层位, 提出它们属于非正常蒸发沉积产物的认识, 可能与热水沉积作用有关。近年来在兰坪盆地北部发现了河西大型 Sr 矿、大三界中型 Sr 矿以及若干石膏矿, 这些非金属矿床附近往往有贱金属矿化发现, 膏盐与贱金属成矿的关系尚待深入研究。有机质在几乎所有的矿床中都能见到, 主要以干沥青形式存在, 在金顶矿床尤为突出, 矿石和围岩中产出干酪根、轻油、烃类气、重油、沥青等, 有机质与金属硫化物空间关系密切, 有机质富集处, 往往矿化强烈。

(2) Cu(Mo) 多金属矿床

兰坪盆地西缘出现大量的以沉积岩为容矿岩石的独立 Cu 矿床或 Cu(-Mo-Ag-Co) 矿床, 这类矿床在相邻盆地中很少出现。这些矿床沿兰坪盆地西缘澜沧江断裂带分布, 构成一条显著的 N-S 向 Cu 矿化带。根据赋矿岩石和矿物组成等特征由北往南可分为两类: 一是北段与火山碎屑岩有关的 Cu 矿化, 如恩琪、科登洞、大小格拉等, 以石炭系石登群火山碎屑岩为容矿岩石, 主要矿物为黄铜矿、斑铜矿、石英、方解石。二是以中生代红色碎屑岩为容矿岩石的 Cu(-Mo-Ag-Co) 矿床, 如金满-连城、大华、大麦地、马鞍山等, 其赋矿地层主要为中侏罗统花开佐组, 次为坝注路组和上白垩统景星组和南新组, 其矿物组成有变复杂趋势, 主要的矿石矿物有黝铜矿、

黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿、蓝铜矿、铜蓝、辉钼矿, 脉石矿物有石英、方解石、重晶石和菱铁矿(图 5i-l)。在南段的永平一带的 Cu 矿床中(如厂街、水泄)出现较多的含 Co 矿物, 如辉钴矿、钴黄铁矿、钴毒砂等, 尽管以红色碎屑岩容矿, 在矿区外围出现基性-碱性斑岩体和辉绿辉长岩脉(刘家军等, 2004^①)。这些 Cu 矿床主要受控制于与主逆冲推覆断裂平行的次级断层, 构造控矿式为“富隆厂式”(图 4c)。

2 成矿时代

过去对三江贱金属矿床的测年研究主要集中在兰坪盆地, 获得的成矿年龄时间跨度大, 不同方法获得的结果相差很大, 成矿年代学研究进展缓慢。最近十年来, 随着分析技术的进步, 通过闪锌矿 Rb-Sr 法、方解石和萤石 Sm-Nd 法, 辉钼矿、黄铁矿等金属硫化物 Re-Os 法、古地磁测年法等手段获得了一批高精度年龄数据(表 2)。通过与玉树、沱沱河盆地中的金属矿床年龄数据进行对比发现, 贱金属成矿时代在区域上具有很好的一致性(图 6)。

本课题采用成矿阶段方解石 Sm-Nd 法、辉钼矿 Re-Os 法、

① 刘家军, 张乾, 蒋少涌, 温汉捷, 何明友. 2004. 兰坪盆地铅锌多金属大型矿集区. 国家重点基础研究发展规划项目课题研究报告

表 2 三江带沉积岩容矿 Pb-Zn-Ag-Cu 矿床成矿年龄

Table 2 Age data for the sediment-hosted lead-zinc-silver-copper deposits in the Sanjiang Tethyan orogen

矿床	年龄(Ma)	方法	数据来源
兰坪盆地			
金顶 Pb-Zn	68 ± 5	沥青 Re-Os	高炳宇等 2012
	72 ± 4.4	黄铁矿 Re-Os	Xue <i>et al.</i> , 2003
	114 ± 13, 65 ± 10	黄铁矿 Re-Os	唐永永等 2013b
	28 ~ 33	地质推断	王安建等 2009
	23 ± 3	古地磁法	Yalikun <i>et al.</i> , 2018
	28.7 ± 2.8, 21.0 ± 3.8, 32.1 ± 5.1	磷灰石裂变径迹	李小明等 2000
白秧坪 Ag-Cu-Pb-Zn	61 ± 0.2	石英 Ar-Ar	Xue <i>et al.</i> , 2003
	56.5 ± 0.4	石英 Ar-Ar	何明勤等 2006
	27.4 ± 1.8	方解石 Sm-Nd	Zou <i>et al.</i> , 2015
李子坪 Pb-Zn	29.01 ± 0.04	闪锌矿 Rb-Sr	王晓虎等 2011
富隆厂 Ag-Cu-Pb-Zn	28.99 ± 0.13	闪锌矿 Rb-Sr	王晓虎等 2011
吴底厂 Ag-Cu-Pb-Zn	28.93 ± 0.62	闪锌矿 Rb-Sr	王晓虎等 2011
	30.1 ± 1.9	方解石 Sm-Nd	Zou <i>et al.</i> , 2015
下区吾 Pb-Zn-Ag-Cu	33.3 ± 0.4	方解石 Sm-Nd	Zou <i>et al.</i> , 2015
三山 Pb-Zn-Ag-Cu	19.9 ± 2.3	磷灰石裂变径迹	李小明等 2006
	32.8 ± 1.5	硫化物 Rb-Sr	冯彩霞等 2017
金满 Cu	58.7	磷灰石裂变径迹	李小明等 2000
	54.3 ± 0.2	石英流体包裹体 Ar-Ar	刘家军等 2003
	56.8 ± 0.7	石英流体包裹体 Ar-Ar	徐晓春等 2004
	46.7 ± 0.7	伊利石 K-Ar	毕先梅和莫宣学 2004
	47.2 ± 0.5, 37.0 ± 0.4	伊利石 K-Ar	赵海滨 2006
	36.8 ± 0.8	绢云母 Ar-Ar	王彦斌等 2005
	58.2 ± 0.3	方解石 Sm-Nd	Zhang <i>et al.</i> , 2013
连城 Cu-Mo	48.1 ± 0.9	辉钼矿 Re-Os	王光辉等 2009
	48.7 ± 1.8	辉钼矿 Re-Os	Zhang <i>et al.</i> , 2013
昌都盆地			
拉诺玛 Pb-Zn-Sb	29.9	闪锌矿 Rb-Sr	未发表
错那 Pb-Zn	30	闪锌矿 Rb-Sr	未发表
拉拢拉 Pb-Zn	38.1 ± 0.8	闪锌矿 Rb-Sr	Liu <i>et al.</i> , 2016
赵发涌 Pb-Zn	41.1 ± 1.1	方解石 Sm-Nd	Liu <i>et al.</i> , 2016
加膜山 Pb-Zn	39.9 ± 1.3	方解石 Sm-Nd	Liu <i>et al.</i> , 2016
玉树盆地			
莫海拉亨 Pb-Zn	32.2 ± 0.4	闪锌矿 Rb-Sr	Tian <i>et al.</i> , 2014
	31.8 ± 0.3	萤石 Sm-Nd	Tian <i>et al.</i> , 2014
	33.7 ± 0.5	方解石-萤石 Sm-Nd	田世洪等 2009
东莫扎扒 Pb-Zn	35.0 ± 0.3	闪锌矿 Rb-Sr	Tian <i>et al.</i> , 2014
	34.74 ± 0.02	共生矿物 Rb-Sr	田世洪等 2009
沱沱河盆地			
那日尼亚 Pb-Zn	37.95 ± 0.03	绢云母 Ar-Ar	张翀 2013

闪锌矿 Rb-Sr 法和黄铁矿 Re-Os 法对兰坪和昌都盆地的典型矿床开展了年代学研究。研究表明, 兰坪盆地白秧坪矿集区与矿石矿物共生的热液方解石 Sm-Nd 同位素年龄显示西矿带白秧坪 Cu-Co-Ag 矿段的成矿年龄为 27.4 ± 1.8Ma, 吴底厂 Pb-Zn-Ag 矿段 Sm-Nd 等时线年龄为 30.1 ± 1.9Ma (Zou *et al.*, 2015); 东矿带华昌山矿段和下区吾矿段方解石的 Sm-

Nd 同位素定年、闪锌矿 Rb-Sr 同位素定年结果显示成矿年龄为 33.3 ± 0.4Ma (Zou *et al.*, 2015) 和 32.8 ± 1.5Ma (冯彩霞等 2017)。这与王晓虎等(2011)利用方解石 Sm-Nd 法和闪锌矿 Rb-Sr 法测定白秧坪矿集区(吴底厂、李子坪和富隆厂矿段)的成矿时代(30 ~ 29Ma)一致。我们利用闪锌矿 Rb-Sr 法获得昌都盆地拉诺玛 Pb-Zn-Sb 矿床和错那 Pb-Zn 矿床的

成矿年龄分别为 29.9Ma 和 30.0Ma(未发表),与兰坪盆地 Pb-Zn 成矿时代吻合的很好,但是略晚于昌都盆地加膜山 Pb-Zn 矿床(39.9 ± 1Ma)、赵发涌 Pb-Zn 矿床(41.1 ± 1Ma)和拉拢拉 Pb-Zn 矿床(38.1 ± 0.8Ma, Liu *et al.*, 2016)的成矿时代。兰坪金顶矿床黄铁矿 Re-Os 同位素测年获得两组等时线年龄:65 ± 10Ma 和 114 ± 13Ma(唐永永等, 2013b),前一个年龄数据与 Xue *et al.* (2003) 测试的黄铁矿 Re-Os 等时线年龄(72 ± 4.8Ma)和高炳宇等(2012)开展沥青 Re-Os 测年的结果(68 ± 5Ma)在误差范围内一致,可能代表了主成矿前的一次热液事件(唐永永等, 2013b)。Yalikun *et al.* (2018) 获得金顶矿床古地磁年龄为 23 ± 3Ma,与磷灰石裂变径迹分析结果(21.0 ± 3.8Ma, 22.3 ± 4.4Ma, 28.7 ± 2.8Ma 和 32.1 ± 5.1Ma, Li and Song, 2006; 李小明等, 2000)和依据地质条件推断的成矿年龄(28 ~ 33Ma, 王安建等, 2009)一致,可能代表金顶矿床的最后形成时间。

此外,我们还获得了兰坪盆地连城铜(钼)矿床辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 47.8 ± 1.8Ma,金满与成矿密切共生的方解石的 Sm-Nd 等时线年龄为 58.2 ± 5.4Ma(Zhang *et al.*, 2013)。这与以往测定的连城矿床中辉钼矿 Re-Os 年龄(48.1 ± 0.9Ma, 王光辉等, 2009)和蚀变围岩伊利石 K-Ar 年龄(46.7 ± 0.7Ma, 毕先梅和莫宣学, 2004; 47.2 ± 0.5Ma, 赵海滨, 2006),以及金满矿床中与 Cu 矿密切相关的石英 Ar-Ar 年龄(56.8 ± 0.7Ma, 徐晓春等, 2004)是吻合的。

白秧坪矿集区与 Cu 矿共生的石英 Ar-Ar 等时线年龄为 56 ~ 61Ma(Xue *et al.*, 2003; 何明勤等, 2006),这与金满-连城 Cu 矿床的早期 Cu 矿化时间一致;闪锌矿 Rb-Sr 和方解石 Sm-Nd 测年结果显示 Pb-Zn 成矿集中在 30Ma 左右(王晓虎等, 2011; Zou *et al.*, 2015; 冯彩霞等, 2017)指示白秧坪矿床存在早、晚两期矿化作用的复合成矿:早期以 Cu 为主(古新世),晚期以 Pb-Zn 为主(始新世-渐新世)。

根据上述定年结果,并综合考虑赋矿层位和控矿构造的特征,认为青藏高原东缘 Zn、Pb、Cu、Ag 多金属成矿带 Pb-Zn-Cu-Ag 存在两期成矿作用:Cu-Mo 矿床主要形成于 48 ~ 58Ma;而 Pb-Zn-Ag 成矿作用集中在为 27 ~ 33Ma。结合区域构造演化历史,认为 Pb-Zn-Cu-Ag 成矿系统形成于印度-亚洲大陆碰撞环境,是逆冲推覆构造背景下的产物,两阶段成矿作用发育于碰撞造山过程的不同演化阶段。形成于 48 ~ 58Ma 的 Cu-Mo 矿床主要发育于主碰撞阶段的陆陆汇聚阶段,形成于 27 ~ 33Ma 的 Pb-Zn 矿床主要发育于晚碰撞构造转化阶段。

3 成矿物质基础与成矿金属来源

3.1 成矿物质基础

通过分析兰坪盆地主要沉积岩地层和基底岩石的主、微量元素含量,发现:1)上三叠统麦初青组和挖鲁八组地层具有较高含量的 Pb 和 Zn,平均值分别为 32×10^{-6} 和 $120 \times$

10^{-6} ,远高于中国大陆地壳中 Pb 和 Zn 的元素丰度(15×10^{-6} 和 86×10^{-6} , 黎彤, 1994),这可能与该套地层富集有机质或含煤线有关,有机物质对金属元素起到预富集作用。侏罗系花开佐组部分层位的 Ag 和 Pb 含量偏高,而上三叠统歪古村组火山岩的 Pb 和 Zn 含量稍高,其它时代的地层一般都低于元素的大陆地壳丰度;2)盆地基底岩石系统性地富集 Ag、Cu、Pb 和 Zn,平均含量为 0.12×10^{-6} 、 170×10^{-6} 、 88×10^{-6} 和 149×10^{-6} ,这是中国大陆地壳相应元素丰度的 2 ~ 5 倍。我们通过调研盆地边缘出露的前寒武纪古老变质岩(苍山群、石鼓群和崇山群)发现,苍山群和崇山群相对富集 Pb 和 Tl,特别是在变质程度较高的片麻岩和变粒岩中(分别为 25×10^{-6} 和 0.84×10^{-6}),石鼓群底部的基性变质岩具有较高含量的 Cu 和 Zn(分别为 85×10^{-6} 和 145×10^{-6})。可见,盆地基底岩石是非常好的潜在的物源,上三叠统的碎屑沉积岩和火山岩有能力提供部分成矿元素。昌都盆地错那和拉诺玛矿区含矿地层相对不含矿地层的 Pb(390×10^{-6})、Zn(2886×10^{-6})、Sb(89×10^{-6})、Ag(8.5×10^{-6})、Cd(17.9×10^{-6})含量明显偏高,反应了后期成矿热液叠加改造的结果。区域上前泥盆纪基底岩石(来自吉塘群和西西群)中的 Pb、Zn、Cu 元素含量平均值为 30.6×10^{-6} 、 93.8×10^{-6} 和 13.6×10^{-6} ,显著高于盖层沉积岩(Pb 9.2×10^{-6} , Zn 53×10^{-6} , Cu 9.3×10^{-6} , Ag 和 Cd 均小于 0.5×10^{-6})。暗示盆地基底岩石可能是铅锌矿床成矿物质的主要提供者。

3.2 成矿金属来源

近年来原位微区技术和非传统稳定同位素的发展,为我们研究矿床成矿物质来源提供了新的有效技术手段。我们开展了研究区不同类型典型矿床矿石矿物微量元素和 Pb 同位素的原位分析测试和 Hg、Cu 等非传统同位素组成研究。研究发现,尽管不同类型矿床成矿特征各异,形成的构造背景不同,但其成矿金属均主要来自盆地基地和部分地层。

(1) Pb-Zn 多金属矿床

LA-ICPMS 原位分析闪锌矿微量元素组成发现,兰坪盆地金顶超大型 Pb-Zn 矿床早阶段闪锌矿以富集 Cd、Cu、Ag 和 Sb 为特征,而晚阶段闪锌矿相对富集 Pb、Tl、Fe、Cu、Ag 和 As。其中晚阶段富集的元素组合(Pb、Tl、Ag、Cu)在盆地基底岩石中偏高,暗示盆地基底可能提供了这些元素。金顶矿床的 Hg 主要以类质同象形式富集在闪锌矿中(472×10^{-9} ~ 1010×10^{-9}),其次为黄铁矿和方铅矿。成矿早阶段的金属硫化物明显富集轻 Hg, $\delta^{202}\text{Hg}$ 值变化于 -3.17‰ ~ -1.59‰ ,晚阶段 Hg 同位素组成变重, $\delta^{202}\text{Hg}$ 值为 -1.84‰ ~ -0.57‰ 。金顶矿床 Hg 同位素非质量分馏不明显, $\Delta^{199}\text{Hg}$ 变化于 -0.06‰ ~ 0.10‰ ,与盆地沉积岩类似,指示 Hg 主要来源于盆地沉积岩(图 7)。我们还利用二次离子质谱原位分析了金顶早、晚阶段方铅矿的 Pb 同位素组成,发现两个阶段的 Pb 同位素数据变化范围都大,在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ~ $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解上均呈线性展布(图 8),具有明显的两端元

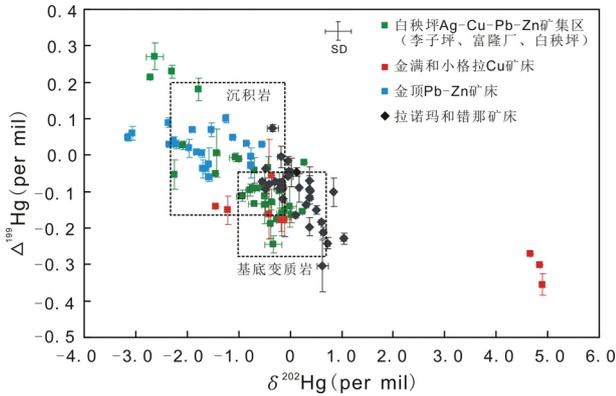


图7 兰坪和昌都盆地典型矿床金属硫化物 Hg 同位素组成

拉诺玛和错那矿床数据来自 Xu *et al.* (2018); 金顶来自 Tang *et al.* (2017a); 其它数据尚未发表

Fig. 7 Mercury isotopic compositions of metal sulfides in typical sediment-hosted base metal deposits in the Lanping and Changdu basins

The data for the Lanuoma and Cuona deposits from Xu *et al.*, 2018; those for the Jinding deposit from Tang *et al.*, 2017a; and the rest of the data are unpublished

混合特征 不同之处在于早阶段 Pb 以富集放射性成因 Pb 为主 ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.1 \sim 18.7$, 均值 18.4; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.3 \sim 15.7$, 均值 15.5; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 37.5 \sim 38.7$, 均值 38.2) 暗示 Pb 主要来源于具有高 μ 特征的源区, 而晚阶段 Pb 较贫放射性成因 Pb ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.0 \sim 18.4$, 均值 18.2; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.2 \sim 15.6$, 均值 15.4; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 37.2 \sim 38.4$, 均值 37.9) 指示 Pb 来自低 μ 源区。通过与可能的物源岩的 Pb 同位素特征进行对比研究, 认为具有高 μ 特征的物源岩石包括盆地上地壳沉积岩和新生代的碱性岩浆岩, 低 μ 的物源岩石主要为下地壳岩石, 很可能与盆地基底有关。兰坪盆地白秧坪、李子坪、富隆厂 Pb-Zn 多金属矿床的闪锌矿相对富集 Ge (19.1×10^{-6})、Cu (272×10^{-6})、Cd (0.24%) 元素。矿石铅同位素组成特征显示成矿物质主要来源于上地壳沉积岩 (图 8)。白秧坪矿床的 $\delta^{202}\text{Hg}$ 变化为 $-2.74\text{‰} \sim -1.80\text{‰}$, $\Delta^{199}\text{Hg}$ 变化为 $-0.05\text{‰} \sim 0.27\text{‰}$, 李子坪的 $\delta^{202}\text{Hg}$ 为 $-0.52\text{‰} \sim 0.25\text{‰}$, $\Delta^{199}\text{Hg}$ 为 $-0.24\text{‰} \sim -0.02\text{‰}$ 和富隆厂的 $\delta^{202}\text{Hg}$ 为 $-1.46\text{‰} \sim -0.13\text{‰}$, $\Delta^{199}\text{Hg}$ 为 $-0.15\text{‰} \sim 0.01\text{‰}$ 。Hg 同位素非质量分馏对 Hg 的来源具有指示意义, 通过与盆地地层和基底岩石对比研究, 认为 Hg 主要来自基底变质岩和地层的混合 (图 7)。

昌都盆地拉诺玛 Pb-Zn 多金属矿床成矿阶段黄铁矿相对富集 Pb、Zn、Cu、Tl、Ag、Sb 这与区域前泥盆纪基底岩石的微量元素富集特征一致。拉诺玛矿床金属硫化物的 Pb 同位素组成变化较大, 在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解上主要落入上地壳和造山带 Pb 范围内 (图 8)。金属硫化物的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值和 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值显示一定程度的线性相关, 暗示矿石

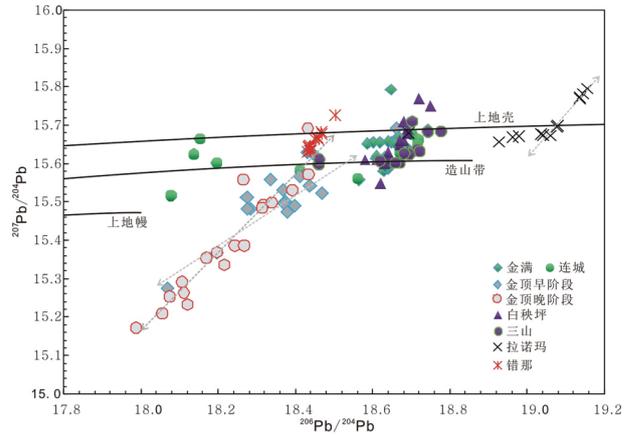


图8 兰坪和昌都盆地典型矿床 Pb 同位素组成

金满矿床数据来自吴南平等 (2003); 连城来自王光辉 (2010); 白秧坪来自李志明等 (2005)、王峰和何明友 (2003); 三山来自魏君奇 (2001)、赵海滨 (2006); 拉诺玛和错那来自杨晨 (2010)、徐春霞 (2017); 金顶矿床数据为 SIMS 原位分析方铅矿的数据, 尚未发表

Fig. 8 Lead isotopic compositions of metal sulfides in typical sediment-hosted base metal deposits in the Lanping and Changdu basins

The data for the Jinman deposit from Wu *et al.*, 2003; Liancheng from Wang (2010); Baiyangping from Li *et al.* (2005) and Wang and He (2003); Sanshan from Wei (2001) and Zhao (2006); and Lanuoma and Cuona from Yang (2010) and Xu (2017). Jinding data acquired from in-situ measurements of galena that remain unpublished

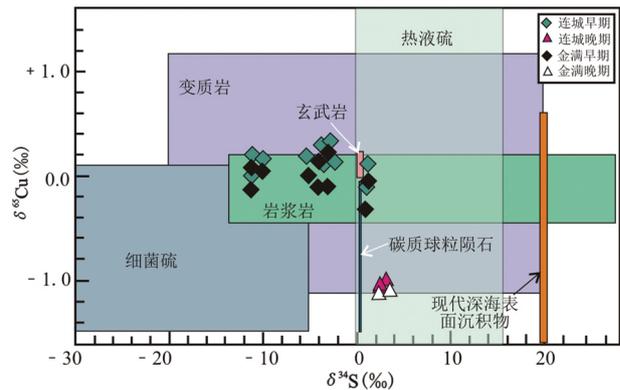


图9 兰坪盆地西缘金满-连城矿床 Cu-S 同位素组成 (引自 Wang *et al.*, 2018b)

Fig. 9 Copper and sulfur isotopic compositions of the Jinman and Liancheng Cu deposits in the western Lanping basin (quote from Wang *et al.*, 2018b)

Pb 具有两端元混合特征, 推测富放射性成因 Pb 的一端来自上地壳沉积岩, 而 Pb 同位素比值低的一端可能来自下地壳 (基底岩石) 或地幔。对昌都盆地拉诺玛和错纳硫化物、地层和变质基底汞同位素研究表明, 拉诺玛硫化物 (纤硫锑铅矿、闪锌矿) $\delta^{202}\text{Hg}$ 值在 $-0.57\text{‰} \sim 1.01\text{‰}$ 之间, 错纳硫化物 (闪

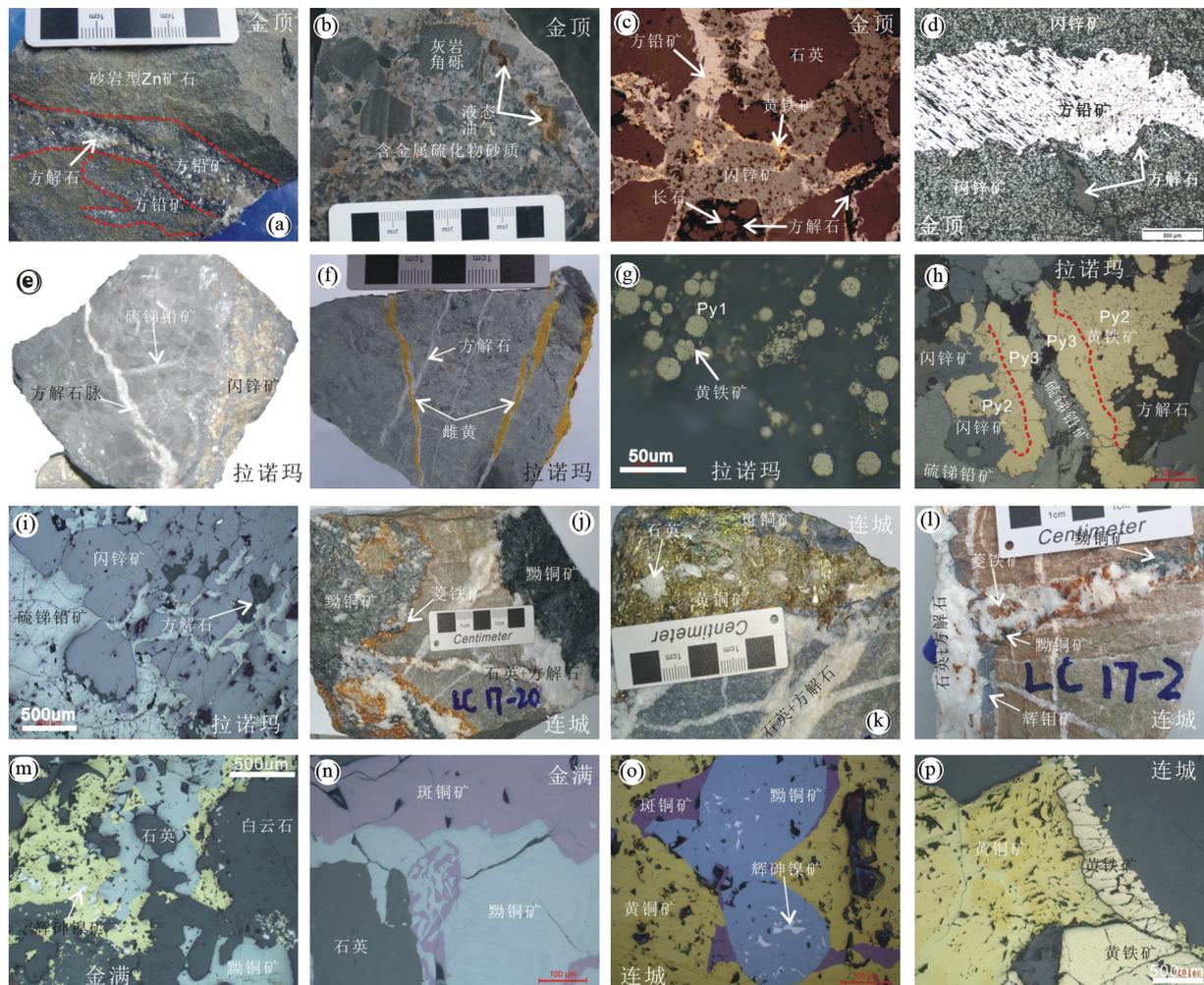


图 10 兰坪和昌都盆地典型复合矿床的矿石特征

(a) 金顶矿床晚阶段粗粒、脉状方铅矿穿切早阶段细粒浸染状砂岩型 Zn 矿石; (b) 金顶矿床灰岩角砾岩型矿石, 在角砾间空隙充填含金属硫化物的砂质胶结物(低品位), 沿着裂隙有液态油滴渗出; (c) 金顶矿床浸染状砂岩型矿石, 金属硫化物呈胶结物状胶结石英碎屑; (d) 金顶矿床晚阶段脉状方铅矿穿切早期块状闪锌矿; (e) 拉诺玛矿床块状矿石, 晚期硫锑铅矿和方解石呈细脉状切入; (f) 拉诺玛矿床晚期方解石-雌黄细脉沿裂隙充填; (g) 拉诺玛矿床早期莓球状黄铁矿(Py1); (h) 拉诺玛矿床晚期硫锑铅矿穿切和包裹早期金属硫化物, 存在两个世代的黄铁矿(Py2 和 Py3); (i) 拉诺玛矿床晚期硫锑铅矿沿裂隙侵入早期闪锌矿矿石; (j) 连城黝铜矿矿石; (k) 连城黄铜矿与石英共生; (l) 连城辉钼矿、黝铜矿与石英和方解石共生, 呈脉状沿裂隙充填; (m) 金满矿床黄铜矿-黝铜矿矿石, 黄铜矿出溶辉砷镍矿; (n) 金满矿床晚期斑铜矿侵入早期黝铜矿; (o) 连城矿床的黝铜矿中发现辉砷镍矿出溶体; (p) 连城矿床晚期黄铁矿交代早期黄铜矿

Fig. 10 Ore characteristics of typical composite deposits in the Lanping and Changdu basins

(a) coarsely crystallized galena and calcite veins, forming in the late stage of mineralization of the Jinding deposit, cut earlier fine-grained disseminated Zn dominant sandstone-hosted ore; (b) limestone breccia ore, of which low grade sandstone matrix cements limestone breccias, and liquid oil comes out of cracks; (c) fine-grained disseminated sandstone-hosted ore, where sulfides occur as cement among quartz clasts; (d) late-stage galena vein cut earlier sphalerite; (e) massive ore composed of sphalerite, boulangerite and calcite in the Lanuoma deposit; (f) late precipitates of calcite and orpiment fill cracks in the Lanuoma deposit. (g) spherical textures of early pyrite; (h) boulangerite vein of late stage cut and include earlier sulfides, and two generations of pyrite are recognized; (i) boulangerite vein intrudes earlier sphalerite; (j) tetrahedrite ore in the Liancheng deposit; (k) chalcopyrite is intergrown with quartz; (l) a quartz-tetrahedrite-molybdenite vein fills cracks; (m) exsolution of gersdorffite in chalcopyrite in the Jinman deposit; (n) bornite intrudes earlier tetrahedrite; (o) gersdorffite exsolution in tetrahedrite in the Liancheng deposit; (p) pyrite engulfs earlier chalcopyrite in the Liancheng deposit

锌矿、方铅矿) $\delta^{202}\text{Hg}$ 值在 $-0.50\text{‰} \sim 0.70\text{‰}$ 之间。两个矿床硫化物的 $\delta^{202}\text{Hg}$ 变化范围小于赋矿围岩——上三叠统地层 ($\delta^{202}\text{Hg} = -1.82\text{‰} \sim 1.41\text{‰}$), 与变质基底类似 ($\delta^{202}\text{Hg} = -0.98\text{‰} \sim 0.62\text{‰}$)。这两个矿床具有显著的非质量分馏 ($\Delta^{199}\text{Hg} = -0.23\text{‰} \sim -0.04\text{‰}$), 与基底变质岩接近

($\Delta^{199}\text{Hg} = -0.16\text{‰} \sim -0.08\text{‰}$) 指示汞主要来自变质基底, 沉积岩地层可能也有少量加入(图 7)。

(2) Cu(Mo) 多金属矿床

兰坪盆地西缘金满-连城 Cu 多金属矿床的 Pb 同位素组成总体变化较小, 大部分落在上地壳演化岩和造山带 Pb 演

表3 典型矿床成矿流体特征对比

Table 3 Comparison of ore fluid features between typical composite deposits in the Lanping and Changdu basins

成矿流体特征	金顶		拉诺玛	金满-连城
	早阶段	晚阶段		
均一温度(°C)	150~300	50~200	120~315	124~446
盐度(wt% NaCleqv)	>8	<8	3.9~19.1	0.4~24.6
H-O 同位素(δD_{H_2O} ; $\delta^{18}O_{H_2O}$)	-109.3‰~50.1‰; 7.0‰~17.3‰	-100.6‰~-65.7‰; -8.64‰~-7.31‰		-110‰~-51‰; 2.2‰~9.8‰
C-O 同位素($\delta^{13}C_{PDB}$; $\delta^{18}O_{H_2O}$)	-25.2‰~-2.6‰; 21.9‰~24.9‰	-9.0‰~-6.2‰; 20.2‰~22.4‰	-3.5‰~1.8‰; 11.4‰~20.7‰	-7.4‰~-1.5‰; 10.3‰~17.4‰
S 同位素($\delta^{34}S_{CDT}$)	-42.1‰~-10.2‰	8.4‰~7.7‰	-3‰~6‰	-17.9‰~16.3‰, 平均值-4.4‰
He 同位素($^3He/^4He$) /Ra	0.03~0.06	0.01~0.04	0.09~0.29	0.01~0.07

注: 金顶据 Li, 1998; Tang *et al.*, 2004; Tang *et al.*, 2017b; 曾荣, 2007; 罗君烈等, 1994; 唐永永等, 2011; 叶庆同等, 1992; 赵兴元, 1989b. 拉诺玛据陶琰等, 2011; 徐春霞, 2017. 金满-连城据 Chi and Xue, 2011; Wang *et al.*, 2018b; 王光辉, 2010; 张锦让等, 2015a

化线之间, 金满-连城 Cu 矿床可能有部分深源 Pb 的加入(图 8)。金满矿床成矿早阶段 Cu 同位素组成($\delta^{65}Cu = -0.35‰ \sim -0.21‰$) 在零附近, Cu 主要来自深部地壳或上地幔; 晚阶段硫化物富集 Cu 的轻同位素, $\delta^{65}Cu$ 值达 $-1.10‰$ 和 $-1.02‰$, Cu 主要来自盆地内地层(杨立飞等, 2016)。连城矿床的 Cu 同位素组成具有和金满矿床类似的分布规律(图 9), 即早阶段 Cu 同位素分布集中($\delta^{65}Cu = -0.3‰ \sim -0.2‰$), 靠近零值, 相对富集重同位素, 晚阶段富集 Cu 的轻同位素($-1.08‰ \sim -1.01‰$), Wang *et al.* (2018b) 认为成矿金属铜主要来源于盆地基底变质岩。金满和小格拉 Cu 矿床的 $\delta^{202}Hg$ 值变化于 $-1.47‰ \sim 4.87‰$, 指示成矿流体中的 Hg 发生过沸腾作用; Hg 同位素非质量分馏显著, $\Delta^{199}Hg$ 值变化于 $-0.35‰ \sim -0.07‰$, 指示 Hg 主要来自基底岩石(图 7)。

4 典型矿床流体特征和成矿过程

近年来国内外研究者在三江带贱金属矿床中识别出至少三种类型的成矿流体: 低温($< 200^\circ C$) 高盐($> 20\%$ NaCleqv) 的盆地卤水, 高温($> 250^\circ C$) 中低盐($< 6\%$ NaCleqv) 富 CO_2 的深源流体和低温低盐的大气降水(Li, 1998; Xue *et al.*, 2007; 薛春纪等, 2007; 刘英超等, 2010, 2013; 王光辉, 2010; 宋玉财等, 2011; 唐永永等, 2011; 陶琰等, 2011; 薛伟等, 2010; 张锦让等, 2012; Chi *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2017; Tang *et al.*, 2017b; 王长明等, 2017; Wang *et al.*, 2018b) 认为几乎所有矿床的成矿流体均是这几种流体不同程度的混合。通过对昌都盆地和兰坪盆地典型的 Zn、Pb、Cu、Ag 多金属矿床成矿流体特征和来源、成矿的就位机制的系统研究发现, 成矿流体表现出多来源混合的特征, 主要存在三种类型: 1) 盆地卤水与大气降水复合成矿, 以金顶 Pb-Zn 矿床为代表; 2) 盆地卤水和岩浆流体复合成矿,

以拉诺玛 Pb-Zn-Sb 矿床为代表; 3) 变质流体与盆地卤水或大气降水复合成矿, 以金满-连城 Cu 矿床为代表。这些典型矿床的矿石和成矿流体特征分别见图 10 和表 3。

(1) 盆地卤水与大气降水复合成矿——以兰坪金顶超大型 Zn-Pb 矿床为例

这类矿床主要形成于 27~33Ma, 因发育于晚碰撞构造转化阶段、后生成因、成矿流体以低温高盐度的盆地卤水为主、成矿金属来源于壳源等特征与 MVT 矿床类似, 其差异性主要表现为部分矿床以碎屑岩容矿, 而典型的 MVT 矿床的容矿岩石为碳酸盐岩。以兰坪金顶超大型 Zn-Pb 矿床为代表。金顶矿床热液成矿作用至少可以区分出早、晚两个阶段(图 10a-d), 早阶段矿化以 Zn 为主, 主要以微细浸染状金属硫化物产于砂岩中, 少量产于灰岩角砾岩中。角砾岩中的金属矿物粒度明显变大。这一阶段最主要的矿石矿物为闪锌矿, 其次为方铅矿和黄铁矿、白铁矿。晚矿化阶段以 Pb 为主, 常见结晶好颗粒大的方铅矿与方解石共生。方铅矿常以大脉状穿切早阶段块状锌矿石, 有时在砂岩中见到晚期细粒的方铅矿细脉切穿早期浸染状锌矿石。从矿石的组成特征来看, 早、晚阶段的成矿作用明显是性质不同的两期热液活动的产物。

成矿流体特征和来源 研究显示, 金顶矿床流体包裹体主要类型有纯液单相包裹体、气-液相包裹体、富 CO_2 包裹体和有机包裹体, 其均一温度和盐度变化较大($54 \sim 370^\circ C$, $1.2\% \sim 18\%$ NaCleqv) 并且具有明显的多峰特征(Li, 1998; Xue *et al.*, 2007; Tang *et al.*, 2017b) 暗示成矿流体具有多源性。最近我们对金顶铅锌矿床开展了闪锌矿中气液相流体包裹体的显微测温工作、成矿期方解石中单个流体包裹体的 LA-ICPMS 研究。研究结果表明, 其均一温度为 $60 \sim 180^\circ C$ (峰值为 $150 \sim 180^\circ C$) 盐度为 $10\% \sim 30\%$ NaCleqv (峰值 $22\% \sim 28\%$ NaCleqv), 流体为低温高盐的卤水, 其特征与典型 MVT 矿床的盆地卤水($90 \sim 150^\circ C$, $10\% \sim 30\%$ NaCleqv,

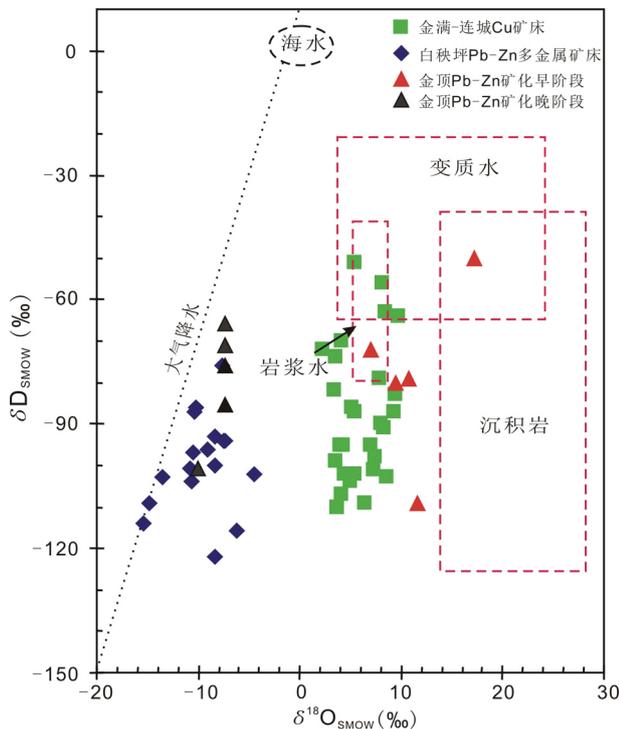


图 11 兰坪和昌都盆地典型矿床流体包裹体 H-O 同位素组成

金满-连城数据来自张锦让等(2012), 肖荣阁等(1994); 白秧坪来自龚文君等(2000), 李志明等(2005), 王峰(2004); 金顶数据来自赵兴元(1989b), 叶庆同等(1992), 曾荣(2007)

Fig. 11 Plot of δD vs. $\delta^{18}O$ values of water in fluid inclusions from typical sediment-hosted base metal deposits in the Lanping and Changdu basins

The data for the Jinman and Liancheng deposits from Zhang *et al.* (2012) and Xiao *et al.* (1994); Baiyangping from Gong *et al.* (2000), Li *et al.* (2005) and Wang (2004); Jinding from Zhao (1989b), Ye *et al.* (1992) and Ceng (2007)

Leach *et al.*, 2005) 一致。成矿期方解石单个流体包裹体的化学组成研究显示, 成矿流体的 K/Na、Rb/Na、Zn/Na、Cl/Br、Ca/K 比值都与 MVT 矿床的盆地卤水的化学组成一致。金顶矿床成矿早阶段流体包裹体 H-O 同位素组成 ($\delta D_{H_2O} = -50.1‰ \sim -109.3‰$, $\delta^{18}O_{H_2O} = 7.0‰ \sim 17.3‰$) 指示流体混合或者强烈水-岩反应, 晚阶段流体 δD_{H_2O} 为 $-65.7‰ \sim -100.6‰$, $\delta^{18}O_{H_2O}$ 为 $-7.3‰ \sim -8.6‰$, 类似于大气降水 (图 11)。成矿早阶段方解石 C-O 同位素 ($\delta^{13}C_{PDB} = -2.6‰ \sim -24.5‰$, $\delta^{18}O_{SMOW} = 21.9‰ \sim 24.9‰$) 显示明显的海相碳酸盐岩溶解与地层有机碳的混合特征, 成矿晚阶段方解石的 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值为 $-7.0‰ \sim -6.2‰$, $\delta^{18}O_{SMOW}$ 为 $20.2‰ \sim 22.4‰$ (图 12) 这种同位素组成类似于大气降水成因的方解石 (罗君烈等, 1994)。流体包裹体 He-Ar 同位素特征 ($^3He/^4He = 0.01 \sim 0.06Ra$) 指示早、晚阶段成矿流体都为壳源流体, 没有幔源组分加入。由此推测, 早阶段成矿流体很可能是低高温

盐的盆地卤水在深循环过程中被加热且发生了强烈水-岩反应的产物, 而晚阶段成矿流体以古大气降水为主。

硫的来源和形成机制 金顶 Zn-Pb 矿床是全球最大的 17 个超大型矿床之一, 是我国最大的 Pb-Zn 矿床。截止目前已探明铅锌矿硫化物矿石超过 $2.2 \times 10^8 t$ (朱上庆等, 2000), 估算所需的硫化氢约 $320 \times 10^4 m^3$ 。那么成矿所需要的巨量的还原硫从何而来呢? 本研究利用现代微区分析技术开展了金顶铅锌矿早、晚成矿阶段硫化物原位微区硫同位素组成的分析。结果表明, 金顶铅锌矿床闪锌矿为主的矿化阶段 (早阶段) $\delta^{34}S$ 值为 $-42.1‰ \sim -10.2‰$, 方铅矿为主的矿化阶段 (晚阶段) 硫化物的 $\delta^{34}S$ 值介于 $-8.4‰ \sim 7.7‰$ 之间 (图 13a)。进一步分析认为, 早阶段成矿过程中的还原硫主要来自细菌还原硫酸盐作用; 晚成矿阶段还原硫主要来自硫酸盐热化学还原反应。矿石结构和硫酸盐的 S 同位素组成研究显示晚三叠世蒸发岩建造为成矿提供充足的硫。

成矿机制 金顶超大型铅锌矿床的形成大致经历了沉积成岩期、热液矿化期和表生期三个阶段。沉积成岩期: 中生代末期, 随着印度大陆与欧亚大陆相互作用的逐步加强, 兰坪盆地受两侧造山带的控制, 沉积物向盆地中心汇聚, 再加上生物-有机质的吸附、络合作用, 形成了初始的矿源层。热液矿化期: 进入新生代, 随着印度板块向欧亚板块西南缘的俯冲作用, 盆地由拉张转为挤压, 形成了走滑拉分盆地。始新世以来的区域压扭作用, 使碰撞前的中生代地层系统叠覆于新生代地层之上, 形成逆冲推覆构造系统。在金顶矿区表现为以 F_2 逆冲推覆构造为主发育一系列与之平行的逆冲推覆断层, 使中生代地层覆于新生界代地层之上。在造山带重力或热对流机制的驱动下, 含金属盆地卤水沿着走滑深大断裂上升至浅部, 之后顺着地壳浅部的逆冲推覆构造下方的拆离滑脱带迁移。当这种含金属流体在有利的地质条件下 (如穹窿构造、张性构造、层间滑脱构造等) 遇到富细菌成因的 H_2S 的地下水时, 成矿金属迅速沉淀下来。在晚矿化阶段, 下渗的大气降水流经围岩时, 盆地中的蒸发岩发生溶解, 同时围岩中的金属元素以硫酸盐或亚硫酸盐的形式被活化迁移。当成矿流体搬运至金顶穹窿时, 流体中的 SO_4^{2-} 与穹窿中的有机质发生热化学还原反应生成还原硫, 金属元素随即沉淀下来。表生期: 成矿作用主要表现为矿床形成以后, 含矿岩石在构造运动和大气、水的作用下遭到破坏和改造, 产生了新的氧化矿物组合, 使矿体进一步富集, 局部形成次生硫化矿物。

(2) 盆地卤水和岩浆流体复合成矿——以昌都盆地拉诺玛 Zn-Pb-Sb 矿床为例

这类铅锌多金属矿床的成矿时代集中在 30Ma 左右, 发育于晚碰撞构造转换阶段、后生成因, 但成矿流体的温度和盐度特征、成矿流体的来源以及成矿的驱动机制等方面均与典型的 MVT 矿床存在差异。以昌都盆地拉诺玛 Pb-Zn-Sb 矿床为代表。昌都拉诺玛矿床上部以 Pb、Zn、Sb 氧化矿石为主, 深部以硫锑铅矿、闪锌矿为主。原生硫化物矿石主要沿

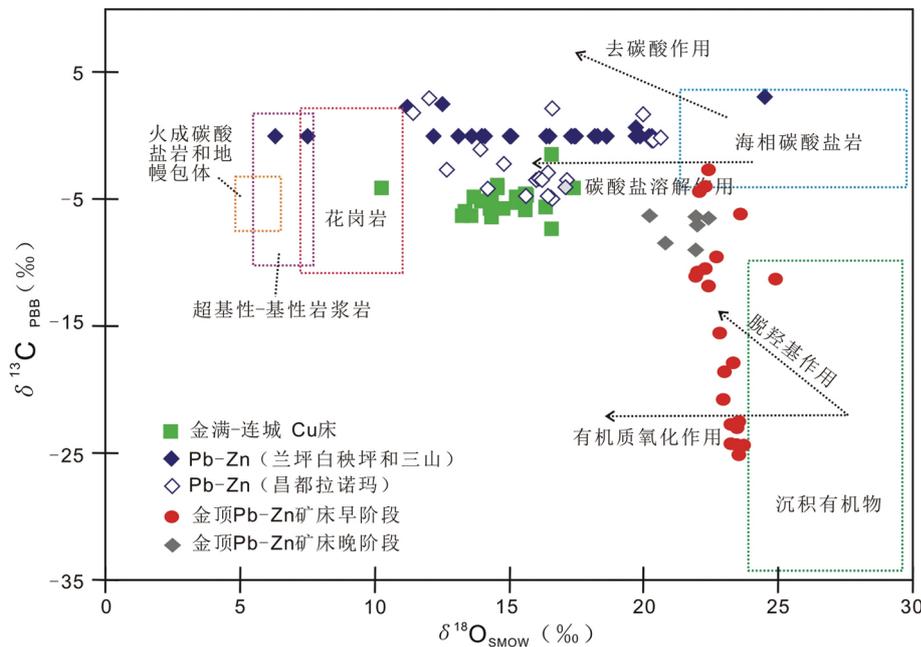


图 12 兰坪和昌都盆地典型矿床成矿期方解石 C-O 同位素组成

金满、连城数据来自张锦让等(2012)、刘家军等(2000);白秧坪和三山来自邹志超(2013)、陈开旭等(2000);拉诺玛来自陶琰等(2011)、徐春霞(2017);金顶来自唐永永等(2011)、罗君烈等(1994)

Fig. 12 Plot of $\delta^{13}\text{C}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ for calcite from typical sediment-hosted base metal deposits in the Lanping and Changdu basins

The data for the Jinman and Liancheng deposits from Zhang *et al.* (2012) and Liu *et al.* (2010); Baiyangping and Sanshan from Zou (2013) and Chen *et al.* (2000); Lanuoma from Tao *et al.* (2011) and Xu (2017); and Jinding from Tang *et al.* (2011) and Luo *et al.* (1994)

构造破裂面呈脉状、网脉状、团块状等充填。根据矿物共生组合和穿插关系,识别出 3 阶段成矿作用: 早期为微晶黄铁矿,黄铁矿呈浸染状或莓球状分布在微晶灰岩裂隙中; 中期为主成矿阶段,主要为黄铁矿、闪锌矿和硫锑铅矿,形成时间大致为黄铁矿早于闪锌矿早于硫锑铅矿,晚期形成的矿物会交代或包裹早期形成的矿物; 晚期为方解石、雌黄、雄黄,呈脉状充填在灰岩裂隙中,有时见穿插早期金属硫化物(图 10e-i)。

成矿流体特征和来源 拉诺玛铅锌锡多金属矿以锑铅锌共生组合为特征。我们系统开展了该矿床闪锌矿流体包裹体显微测温学和包裹体成分分析。结果显示,流体包裹体主要有 2 种类型,气液两相包裹体和富 CO_2 包裹体。其中气液两相包裹体分布较广,在不同矿化阶段都有产出,富 CO_2 包裹体数量较少,仅见于晚期雌黄中。流体包裹体的均一温度分布于 $120 \sim 315^\circ\text{C}$ 之间,大部分都集中在 $150 \sim 225^\circ\text{C}$ 之间,均一温度分布集中,基本符合塔式分布,盐度变化范围在 $3.9\% \sim 19.1\% \text{ NaCl}_{\text{eq}}$ 之间,盐度变化较大,暗示成矿流体可能是几种不同盐度的流体等温混合的结果。热液方解石的碳同位素组成 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}} = -3.5\text{‰} \sim 1.8\text{‰}$,氧同位素组成 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}} = 11\text{‰} \sim 16\text{‰}$,介于海相碳酸盐岩和与花岗岩有关的热液之间,指示其来源为深部构造岩浆活动与海相碳酸盐岩溶解作用的混合(图 12)。He-Ar 同位素组成($^3\text{He}/^4\text{He} = 0.09 \sim 0.29\text{Ra}$)揭示成矿流体以地壳流体为主,但确有少量

地幔物质加入。闪锌矿中的流体显示出不同盐度流体混合的特征,这可能是促使金属矿物沉淀非常重要的机制。综合分析认为,拉诺玛 Pb-Zn 矿床为中高温岩浆流体和低温、中、高盐度盆地卤水混合成因的热液矿床。

硫的来源和形成机制 在详细的矿相学研究的基础上,把主成矿作用又细分为早、晚两个阶段: 早阶段以 Zn 矿化为主,表现为黄棕色闪锌矿(Sp1)和多孔筛状黄铁矿(Py2)为主的矿物组合; 晚阶段以 Pb-Sb 矿化为主,表现为黄白色闪锌矿(Sp2)、半自形-自形黄铁矿(Py3)和 S-Sb-Pb 矿物及方解石为主的矿物组合(图 10g, h)。利用 LA-MC-ICPMS 及 NANO-SIMS 原位分析方法研究了不同矿化阶段金属硫化物的硫同位素组成。早阶段 Py2 和 Sp1 的 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布集中($-3\text{‰} \sim 2.3\text{‰}$),靠近 0 值,具有幔源岩浆 S 特征; 而晚阶段 Sp2 和 Py3 的 $\delta^{34}\text{S}$ 值有增大趋势,变化于 $0.2\text{‰} \sim 6.0\text{‰}$,暗示了岩浆硫与地层硫的混合。这表明拉诺玛矿床存在岩浆硫和硫酸盐两个硫源: 早阶段以岩浆硫为主,晚阶段为岩浆硫和地层硫(通过硫酸盐热化学还原作用形成 H_2S)的混合。

成矿机制 已有研究表明昌都盆地铅锌矿带中的矿床矿点主要产在澜沧江西侧基底变质岩出露的盆地边缘地带,该地带处于刚性变质基底与相对柔性的盆地沉积地层的过渡位置,在喜山期印度板块向欧亚大陆碰撞影响下成为剪切强烈活动部位,为深部构造岩浆活动及深源热液流体运移的有利通道。结合对拉诺玛铅锌锡多金属矿床的成矿流体性质及来源、成矿成矿构造背景的综合研究表明,该矿床的成

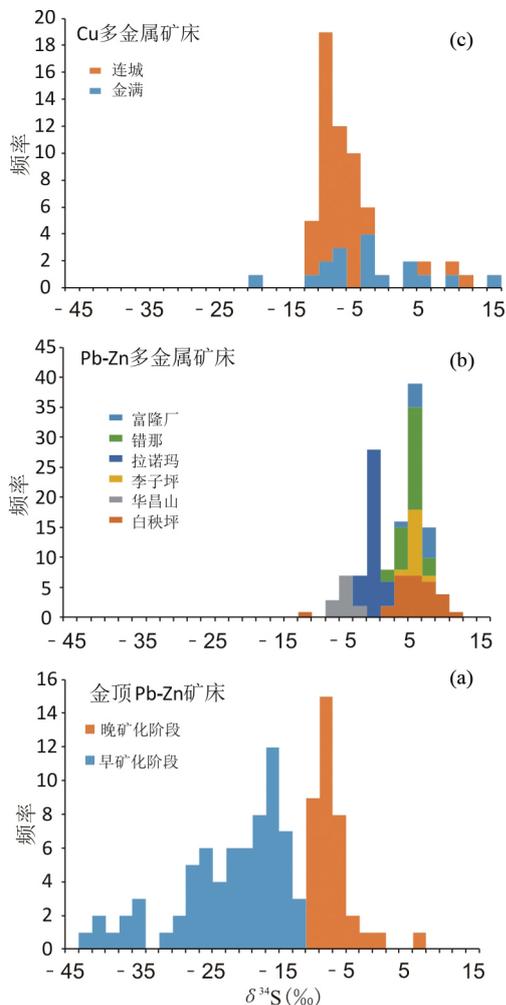


图 13 兰坪和昌都盆地典型矿床金属硫化物 S 同位素组成直方图

金满、连城数据来自张锦让和温汉捷(2012)和本文(未发表),白秧坪来自魏君奇(2001)、王峰和何明友(2003)、李志明等(2005);华昌山和李子坪来自邹志超(2013);富隆厂来自本文(未发表);拉诺玛和错那来自陶琰等(2011)、徐春霞(2017);金顶来自 Tang *et al.* (2014)

Fig. 13 Histogram of sulfur isotopic compositions of metal sulfides from typical sediment-hosted base metal deposits in the Lanping and Changdu basins

The data for the Jintan and Liancheng deposits from Zhang and Wen (2012) and our unpublished data; Baiyangping from Wei (2001), Wang and He (2003) and Li *et al.* (2005); Huachangshan and Liziping from Zou (2013); Fulongchang from our unpublished data; Lanuoma and Cuona from Tao *et al.* (2011) and Xu (2017); and Jinding from Tang *et al.* (2014)

矿作用与所处构造环境强烈的剪切破裂所诱发的地幔动力学过程有关。成矿金属主要来源于盆地基底岩石和地层,深部岩浆作用提供了早阶段成矿需要的硫,晚阶段金属硫化物沉淀所需的还原硫主要来自硫酸盐(石膏)的热化学还原反应。成矿流体驱动机制包括重力驱动及深部构造岩浆活动引起的热驱动,这些因素综合作用导致大规模成矿流体迁

移,成矿物质在地壳浅部开放空间沉淀成矿。

(3) 变质流体与盆地卤水或大气降水复合成矿——以金满-连城 Cu(Mo) 矿床为例

该类型的矿床主要分布在兰坪盆地西缘,形成于 48 ~ 58Ma、发育于主碰撞阶段的陆陆汇聚阶段,以金满、连城等 Cu-Mo 多金属矿床为代表。金满、连城 Cu(Mo) 矿床的矿石构造以脉状、网脉状为主,结构有充填结构、交代结构、包含结构等。主要金属硫化物为黄铜矿、黝铜矿、斑铜矿、辉铜矿、辉钼矿等,脉石矿物多为石英、白云石和方解石(图 10j-p)。金满矿床成矿分为两个阶段:早期为石英-硫化物阶段和晚期的石英-碳酸盐-硫化物阶段(杨立飞等,2016),连城矿床识别出四个矿物生长阶段,从早到晚依次为:①石英-碳酸盐阶段;②石英-黄铜矿-辉钼矿阶段;③碳酸盐-黝铜矿(黄铜矿-斑铜矿)阶段;④碳酸盐-石英阶段(Wang *et al.*, 2018b)。其中第 2 阶段为主要成矿阶段。

成矿流体特征和来源 流体包裹体研究表明,金满 Cu 矿床和连城 Cu-Mo 矿床主要有气-液两相包裹体和含 CO₂ 包裹体,成矿流体整体上是一种中高温、中低盐度、极富 CO₂ 的流体。成矿过程中主要存在三种性质流体参与:中高温低盐度富 CO₂ 流体、中低温中高盐度盆地卤水和大气降水(张锦让等,2015b)。成矿早阶段出现大量富 CO₂ 包裹体,这在整个兰坪盆地是十分罕见的,不属于典型的盆地流体系统。关于这种富 CO₂ 流体,目前一般认为有以下几种可能的来源:幔源流体、下地壳中高级变质流体以及岩浆热液(Kerrick and Fyfe, 1981; Phillips and Powell, 1993; 陈衍景等, 2007; Chi and Xue, 2011)。根据连城 Cu-Mo 矿床早阶段热液石英脉发育富 CO₂ 流体包裹体,均一温度为 124 ~ 446℃,盐度为 0.4% ~ 24.6% NaCl_{eq},晚阶段主要发育方解石脉,包裹体以水溶液包裹体为主,均一温度为 145 ~ 256℃,盐度为 1.4% ~ 22.9% NaCl_{eq};早阶段石英流体包裹体的 H-O 同位素组成($\delta^{18}O = 7.8‰ \sim 11.9‰$, $\delta D = 48‰ \sim -72‰$),指示这种富 CO₂ 流体主要来源于变质流体(图 11),而晚阶段成矿流体为变质水与大气降水的混合(Wang *et al.*, 2018b)。C 同位素特征也指示深源流体与盆地流体混合的特征(图 12)。稀有气体同位素研究发现,盆地西缘 Cu 矿床的成矿流体的 ³He/⁴He 值介于 0.01 ~ 0.07Ra,明显区别于幔源 He 的特征(³He/⁴He = 6 ~ 9Ra) 暗示了幔源流体参与成矿的可能性较小,高温低盐富 CO₂ 流体来自变质流体的可能性更大。

硫的来源和形成机制 Cu(Mo) 矿床早阶段金属硫化物的 S 同位素组成变化相对较大,以富集轻 S 为特征,其 $\delta^{34}S$ 值介于 -11.6‰ ~ 1.1‰(图 13c),金满矿床多数集中在零值附近,连城数据比较分散,结合矿床中发现干沥青以及矿石发育木质结构现象(刘家军等,2001),推测该阶段 S 可能是地层硫酸盐还原与生物成因硫混合所致,不排除深源 S 加入;晚阶段 $\delta^{34}S$ 值(2.1‰ ~ 3.4‰)变大,指示海相沉积岩来源的硫数量增加,生物成因 S 减少(杨立飞等,2016; Wang *et al.*, 2018b)。

成矿机制 在金满 Cu-Ag 和连城 Cu-Mo 矿床中常见到含 CO₂ 包裹体和水溶液包裹体共生的现象,这种现象通常被认为是流体不混溶的直接证据(Roedder, 1984; 卢焕章等, 2004)。结合流体包裹体和上述 C、H、O、S 同位素组成研究表明,连城 Cu-Mo 矿床中成矿流体早中阶段富含 CO₂ 和其它挥发分,随着成矿作用的进行,CO₂ 和其它挥发分逸失,到晚阶段成矿流体演化成富含水的流体;伴随着成矿,流体温度逐渐降低,早中阶段流体盐度略有下降,从中阶段到晚阶段则盐度明显降低。成矿过程早阶段发生了强烈的流体沸腾作用,沸腾作用以大量 CO₂ 等挥发份逃逸为主要特征,CO₂ 等挥发份大量逃逸,导致成矿体系趋于不稳定,促使 Mo、Cu 等大量成矿物质沉淀,最终成矿。盆地卤水、下渗的大气降水与富 CO₂ 流体的混合,可能也导致了部分成矿物质的沉淀(张锦让等, 2015a)。因此,连城 Cu-Mo 多金属矿床成矿物质沉淀的主要机制为流体降温沸腾,次要机制为流体的混合。金满矿床成矿过程中主要有两种性质的流体参与:壳源变质流体,以中高温、中低盐度、富含 CO₂ 为特征;盆地卤水,以中低温、中高盐度、贫 CO₂ 为特征,主要的成矿机制是向上运移的深源变质流体与向下运移的盆地卤水的混合导致成矿物质沉淀成矿。

5 复合成矿机制与深部过程

5.1 复合成矿与元素超常富集

三江特提斯造山带新生代贱金属元素爆发式成矿是印度-欧亚大陆碰撞造山过程中引起的壳幔作用和构造体制转换的浅部响应,在区带尺度或矿田尺度具有明显的多期复合成矿特色。业已识别出两期成矿事件:①印度-欧亚大陆主碰撞陆-陆汇聚阶段的 Cu-Mo 矿化(48~58Ma),主要发生在兰坪盆地西缘;②印度-欧亚大陆晚碰撞构造转换阶段的 Pb-Zn 矿化(27~33Ma),在三江贱金属成矿带内广泛发育。存在三种不同来源流体复合成矿类型:变质流体与盆地卤水或大气降水复合成矿,如金满-连城、白秧坪等;盆地卤水与岩浆流体复合成矿,以拉诺玛为代表;盆地卤水与大气降水复合成矿,如金顶。金顶超大型 Pb-Zn 多金属矿床是中国目前最大的铅锌矿床,也是世界上铅锌金属储量超过千万吨的十几个超大型矿床之一。目前在整个三江贱金属成矿带上尚未发现第二个类似规模的矿床。究其原因,研究发现金顶超大型 Pb-Zn 多金属矿床的成矿金属的来源与区带上其他沉积岩容矿 Pb-Zn 多金属矿床相同,但其成矿过程存在显著差异。金顶超大型 Pb-Zn 多金属矿床的形成是一系列成矿有利因素(地质背景、控矿构造、蒸发岩建造、有机质等)耦合的结果,并且有着复杂的成矿演化历史,表现出显著的多期复合成矿特征,成矿特征具有独特性。具体表现如下:

(1) 多期矿化复合成矿

依据矿石矿物的组构特征可将金顶 Pb-Zn 矿床热液成矿过程分为早、晚成矿阶段。早矿化阶段主要包括产在砂岩

型矿石中的微细浸染状矿化和产在灰岩角砾岩型矿石中的块状矿化。砂岩型矿石中的浸染状矿化主要是细粒硫化物交代硅质碎屑之间的碳酸盐胶结物。灰岩角砾岩型矿石中的块状矿化或脉状矿化主要是以闪锌矿为主的硫化物矿化充填在角砾间隙中。早矿化阶段典型矿物组合为闪锌矿+方铅矿+黄铁矿。晚矿化阶段主要包括产在灰岩角砾岩型矿石中的粗结晶的大脉状或团块状方铅矿和少量的胶状闪锌矿等。晚矿化阶段典型矿物组合为方铅矿+闪锌矿+黄铁矿(少)+方解石+重晶石。常见晚阶段方铅矿-方解石脉穿切早阶段块状或浸染状 Zn 矿石(图 10a, d)。

C-O 同位素 金顶铅锌矿床方解石 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化大 $\delta^{18}\text{O}$ 相对集中(图 12)。早矿化阶段脉状方解石中的碳具有多源性,一部分样品沿着海相碳酸盐溶解作用分布,另一部分沿着沉积有机物的氧化作用分布,表明海相碳酸盐岩与沉积有机物是流体中碳的主要来源。而兰坪盆地区域上分布最广泛的上三叠统三合洞组是一套灰黑色、深灰色海相、泻湖相泥灰岩、富碳灰岩,其有机碳含量为 0.7‰~3.4‰,这些灰岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 -21.8‰~-19.6‰(罗君烈等, 1994),接近于矿石中沥青的碳同位素组成(-27.7‰~-27.4‰,高永宝等, 2008)。由于海相灰岩的溶解和脱水作用,同时伴随着有机质的热裂解,成矿流体中的碳可能主要来自于海相碳酸盐岩和沉积有机物。这指示了早矿化阶段成矿流体的形成与含有机质丰富的上三叠统三合洞组灰岩有关。晚矿化阶段结核状方解石在图 12 上投在海相碳酸盐岩溶解作用线下方,其 $\delta^{13}\text{C}$ 变化于 -7.0‰~-6.2‰,平均值为 -6.6‰,通常这种碳同位素组成表明,流体中的碳来自于深部或者碳酸盐与有机碳的混合作用(Hoefs, 1997; 彭建堂和胡瑞忠, 2001)。而该期方解石 $\delta^{13}\text{C}$ 较窄的变化范围,排除了有机物为方解石提供主要碳的可能性。流体包裹体研究表明金顶矿床晚阶段成矿流体温度介于 170~230℃ 之间。据 Zheng(1991)的方解石与水处于氧同位素平衡时的分馏方程($1000\ln a_{\text{方解石-水}} = 4.01 \times 10^6 / T^2 - 4.66 \times 10^3 / T + 1.71$)计算,与结核状方解石平衡的流体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{流体}}$ 介于 8.6‰~14.1‰,该值偏离原生水(约 5‰~7‰)和岩浆水(约 5.5‰~8.5‰, Ohmoto, 1986),最可能指示了古大气降水。

S 同位素组成 前述金顶铅锌矿早、晚成矿阶段硫化物原位微区硫同位素组成的分析(图 13a)表明,金顶矿床早矿化阶段金属硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -42.1‰~-10.2‰,晚矿化阶段的 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 -8.4‰~7.7‰ 之间,指示早阶段成矿过程中的还原硫主要来自细菌还原硫酸盐作用,晚阶段还原硫主要来自硫酸盐热化学还原反应(Tang et al., 2014)。

有机质与成矿 金顶矿床与矿石伴生的有机质主要有五种存在形式(图 14):①离散状干酪根、重油等;②裂隙或空洞充填的原油和沥青;③孔洞中生长的晶簇状沥青,与方解石伴生,常被脉状方铅矿及闪锌矿包裹;④裂隙中的脉状沥青,明显受到热蚀变,在沥青中见方解石;⑤与金属硫化物密切伴生的固体沥青。有机地球化学和同位素地球化学研

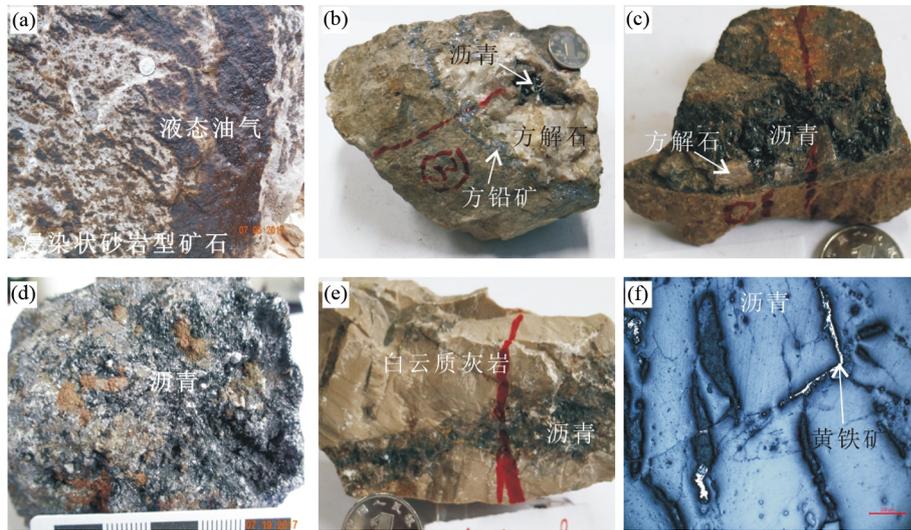


图 14 金顶矿床中的有机质

(a) 砂岩型矿石中产出的弥散状重油; (b) 沥青与方解石呈晶簇状产于矿石孔隙中; (c) 脉状沥青充填裂隙; (d) 与金属硫化物密切伴生的沥青; (e) 三合洞组灰岩裂隙中的沥青; (f) 镜下发现沥青中包裹黄铁矿, 并于白云石共生

Fig. 14 Occurrences of organic matter in the Jinding deposit

(a) dispersive heavy oil in sandstone ore; (b) bitumen and calcite occur as vug in caves; (c) vein bitumen fills fractures; (d) bitumen accompanied by sulfides; (e) bitumen vein fills fractures in the limestone of the Sanhedong Formation; (f) bitumen includes pyrite that is intergrown with dolomite (under reflected light)

究显示, 矿区的有机质主要来自于海相的细菌和藻类, 沉积环境为强还原、高盐度环境。与矿石伴生的有机质主要来自上三叠统三合洞组海相碳酸盐岩。与矿石伴生固体沥青中的 Zn、Pb、Cd 及 Tl 等元素变化较大, 但大部分沥青明显富集这些元素, 指示沥青与成矿热液有密切关系。矿石中沥青的硫含量明显低于三叠系地层中沥青的硫含量。结合 C、S 同位素证据, 暗示了成矿所需的还原性硫可能有多种来源, 包括有机质热解释放出的硫、硫酸盐热化学还原形成的硫、以及细菌还原作用形成的硫。

膏盐与成矿系统的岩-矿相学结合地球化学研究显示, 金顶矿床存在三期膏盐(图 15): ①成矿前的硬石膏、石膏、天青石(膏盐矿的主体); ②成矿期重晶石; ③表生期石膏、天青石和重晶石。成矿前的硬石膏和石膏具有和晚三叠世海水近于一致的 S ($\delta^{34}\text{S}$: 14.2‰ ~ 16.8‰, 平均 15.2‰) 和 Sr 同位素 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$: 0.7082 ~ 0.7097, 平均 0.7087) 组成, 表明它们是晚三叠世海水蒸发的产物, 膏盐裹挟大量的上三叠统三合洞组灰岩角砾暗示它们很可能属于三合洞组蒸发岩, 经历了强烈的构造变形和溶蚀坍塌从而变成现在见到的孤立产出的盐丘、盐枕、岩穿刺等式样。成矿前的天青石具有明显的层控性, 主要产在上三叠统三合洞组灰岩中, 其 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化于 2.6‰ ~ 15.3‰ (平均 9.6‰), 显著偏离晚三叠世海水的 S 同位素组成 (15‰), $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值 (0.7101 ~ 0.7124, 平均 0.7109) 也大于成矿前石膏-硬石膏, 指示天青石可能是晚三叠世热水沉积的产物。研究表明, 成矿前的石膏、天青石和重晶石被金属硫化物广泛交代(图 15g-i), 结合金属硫化物的 S 同位素组成 ($\delta^{34}\text{S}$ 值集中在 -25‰ ~

-10‰), 认为这些膏盐通过细菌还原作用为铅锌金属沉淀提供了充足的还原硫。此外, 膏盐的溶解、变形和迁移对于成矿流体形成、运移和矿体定位等具有重要意义。在热液成矿晚阶段发现与方铅矿共生的重晶石(图 15d), 指示成矿流体具有较强的氧化性, 很可能与大气降水加入有关。表生期石膏呈纤维状、集束状或晶洞透石膏, 富集 Pb 和 Zn, $\delta^{34}\text{S}$ 值多为负值, 表明它们是次生氧化的产物。

(2) 金顶超大型 Zn-Pb 矿床成矿的独特性

前已述及金顶矿床成矿物质来源与区带上的 Pb-Zn 多金属矿床具有很多相似性, 盆地基底作为重要的物质基础为成矿提供了金属来源。通过与区内众多的 Pb-Zn-Ag-Cu 贱金属矿床的对比分析认为, 金顶矿床在控矿构造和成矿流体上存在独特性, 体现在:

穹隆构造 新生代强烈的挤压推覆和盐丘底辟综合作用导致金顶穹隆构造的形成(Leach *et al.*, 2017)。金顶矿床就产在穹隆中, 并且矿化作用随着穹隆翼部地层产状的陡缓变化而变化, 在产状较缓的部位, 矿体较厚, 产状陡的部位, 矿体较薄, 体现了穹隆褶皱过程中在侧压力作用下, 随翼部地层产生滑动, 平缓地段即为引张地带, 因而矿体较厚, 陡倾地段即为挤压地段, 因而矿体变薄、变贫。由此可见, 穹隆构造对金顶铅锌矿化具有至关重要的作用。穹隆顶部的虚脱部位是理想的压力释放区, 这对于从深部而来的含矿盆地卤水是良好的储集空间。同时, 在穹隆形成过程中产生的层间滑脱带为成矿流体运移提供了通道, 对于层间滑脱带的平缓地段, 是矿质沉淀的有利场所。

成矿流体性质 金顶矿床成矿阶段方解石的 C 同位素

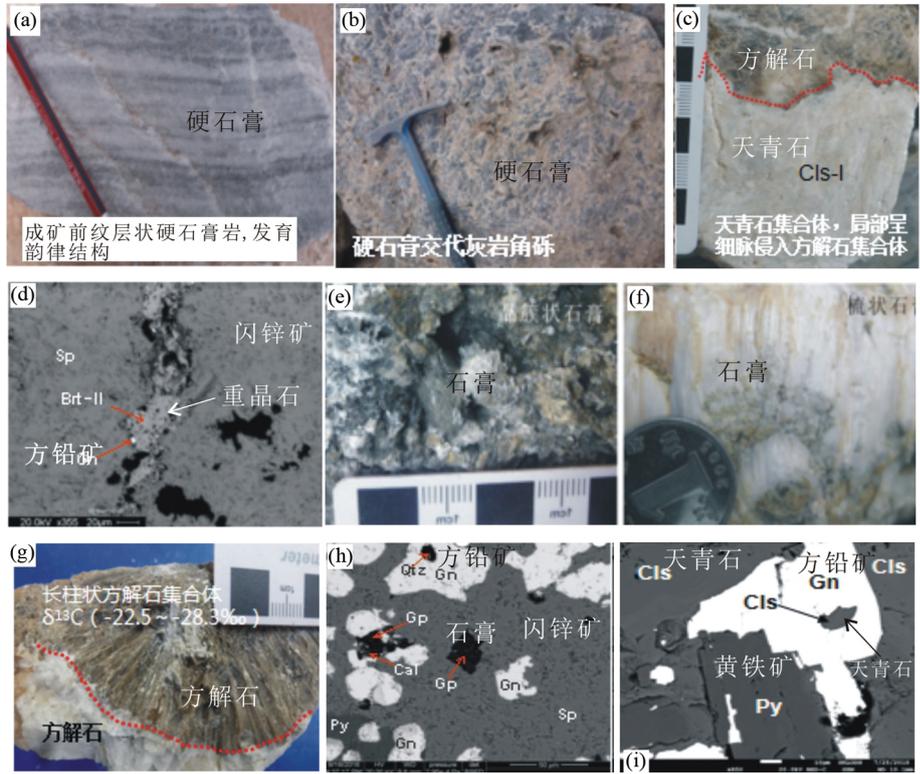


图 15 金顶矿床发育的不同类型膏盐

(a) 成矿前纹层状硬石膏岩,发育韵律结构; (b) 成矿前硬石膏胶结灰岩角砾; (c) 成矿前天青石集合体,可见细脉状天青石侵入方解石; (d) 成矿期重晶石-方铅矿细脉(晚阶段)穿切早阶段闪锌矿; (e) 成矿后晶簇状石膏; (f) 成矿后梳状石膏; (g) 方解石交代天青石并保留天青石假像; (h) 方解石和方铅矿交代石膏,具有交代残余结构; (i) 黄铁矿交代天青石保留假像结构,方铅矿包裹天青石

Fig. 15 Occurrences of evaporite and gypsum in the Jinding deposit

(a) pre-ore laminar anhydrite; (b) pre-ore anhydrite cements limestone breccias; (c) pre-ore celestine collection, locally with veinlets intruding calcite; (d) ore-stage barite-galena vein cutting earlier sphalerite; (e) post-ore vug gypsum; (f) post-ore comb gypsum; (g) calcite replaced columnar celestine and remain pseudomorphic crystals; (h) gypsum was replaced by calcite and galena with metasomatic relict textures; (i) pseudomorphic pyrite replacing celestine, which were included or altered by later galena

组成变化很大, O 同位素组成非常集中,与沉积岩的 O 同位素组成类似(图 12)。早、晚阶段方解石的 C-O 同位素组成存在显著差别,早阶段成矿流体中的 C 主要来源于晚三叠世富含有机质的海相碳酸盐岩的溶解, C 为碳酸盐岩和有机碳的混合;晚阶段流体中的 C 为大气降水成因(Tang *et al.*, 2017b)。相比之下,兰坪盆地西缘 Cu 矿床的 C-O 组成($\delta^{13}C = -7.4‰ \sim -1.5‰$, $\delta^{18}O = 10.3‰ \sim 17.4‰$)显示了地幔-岩浆碳和沉积碳酸盐碳的混合,以地幔-岩浆碳为主。白秧坪和拉诺玛等 Pb-Zn 多金属矿床的方解石的 $\delta^{13}C$ 变化于 $-5‰ \sim 3‰$, $\delta^{18}O$ 变化范围很大($6‰ \sim 24‰$),主要是盆地流体与围岩发生水岩反应的结果(陈开旭等, 2000),或者是深部构造-岩浆热液与地层中海相碳酸盐岩溶解作用形成的流体的混合(陶琰等, 2011)。金顶矿床的金属硫化物的 S 同位素组成具有双峰式分布特征(图 13a),尤其是早阶段以显著富集轻 S 同位素为特征,表明金属硫化物沉淀所需的硫主要为细菌成因硫。在成矿晚阶段,硫酸盐的热化学还原作用可能发挥了重要作用(Tang *et al.*, 2014)。而区内的其它 Pb-Zn 多金属矿床的 S 同位素组成明显偏重(图 13b),指示

硫主要为地层硫酸盐热化学还原作用的产物(李明等, 2005; 邹志超, 2013)。金满、连城的 S 同位素组成类似于 Pb-Zn 多金属矿床(图 13c),硫主要来源于地层硫酸盐的热化学还原作用,在成矿早期有少量的细菌成因 S 的参与(Wang *et al.*, 2018b)。由此可见,细菌成因硫对金顶超大型矿床的形成具有至关重要的作用。

对比研究认为,金顶超大型 Pb-Zn 多金属矿床是一系列成矿有利因素(如:地质背景、控矿构造、有机质、膏盐等)耦合的结果,具有显著的多期复合成矿的特征。金顶矿床早期发育以 Zn 为主的矿化作用,这在区带内的其它矿床中没有发现或表现很弱。

5.2 深部过程制约

三江带沉积岩容矿贱金属矿床显示明显的多期成矿特点,成矿作用从古新世印度-欧亚大陆对接碰撞开始,延续至渐新世晚碰撞挤压向伸展转换期。兰坪盆地西缘 Cu-Mo 矿床(以金满、连城为代表)主要形成于 48 ~ 58Ma,成矿流体为中高温、低盐度、富 CO_2 的变质流体与低温高盐的盆地流体

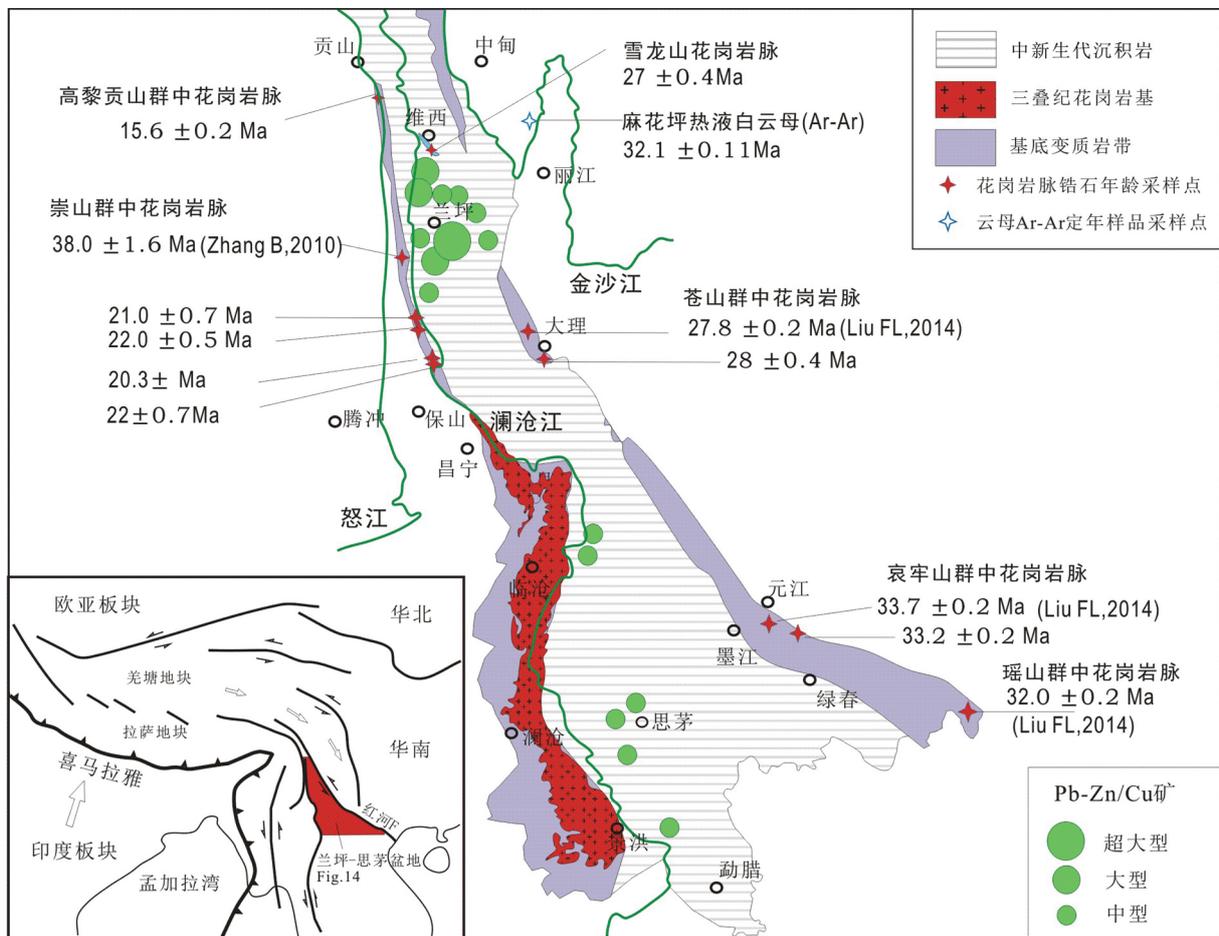


图 16 兰坪-思茅盆地地质构造简图(据 Deng *et al.*, 2015b; Lin *et al.*, 2009 修改)及周缘新生代花岗岩脉锆石 U-Pb 年龄数据来源于 Zhang *et al.* (2010), Liu *et al.* (2015) 和本课题未发表数据

Fig. 16 Simplified geological map of the Lanping-Simao basin and adjacent region (modified after Deng *et al.*, 2015b; Lin *et al.*, 2009) with geochronological data of the Cenozoic leucogranitic veins in metamorphic rocks

The data from Zhang *et al.* (2010), Liu *et al.* (2015) and our unpublished data

的混合(刘家军等, 2000; 王光辉, 2010; Chi and Xue, 2011; 张锦让等, 2012; Zhang *et al.*, 2013), 成矿金属主要来自盆地基底的变质岩系(杨立飞等, 2016; Wang *et al.*, 2018b)。由于 Cu-Mo 矿床的形成时代对应新生代印度-欧亚大陆主碰撞阶段, 此时两大陆之间正发生强烈碰撞俯冲, 引起地壳缩短加厚和深熔作用, 同时伴随强烈的逆冲推覆和高压变质(侯增谦, 2010)。形成 Cu-Mo 矿床的关键性流体——深源变质流体, 可能正是大陆碰撞俯冲过程中引起的高压变质作用所释放出来的(Jiang *et al.*, 2009; Sun *et al.*, 2009), 同时强烈的构造挤压为变质流体的迁移提供了驱动力。深源变质流体在迁移过程中, 从基底岩系和围岩中萃取成矿金属并沿着深断裂上升至浅部逆冲推覆构造中, 由于外界条件突变, 如: 压力下降, 流体沸腾等过程, 可能导致金属硫化物的沉淀。

区域上的 Pb-Zn 多金属成矿作用集中在 27 ~ 33Ma 之间, 对应的成矿背景为印度-欧亚大陆碰撞晚期的逆冲与走

滑构造转换期。始新世以来的区域压扭作用使碰撞前的中生代地层叠覆于第三系前陆盆地之上, 形成大型的逆冲推覆构造, 这为成矿流体迁移和汇聚提供了条件。强烈的造山隆起可能驱动低温高盐的盆地卤水运移, 在此过程中从基底和围岩中萃取成矿金属元素并运移至地壳浅部逆冲推覆带, 与富含 H_2S 的流体混合导致金属硫化物快速沉淀。此外, Pb-Zn 多金属矿床的形成时间与在兰坪-思茅盆地周缘发现的新生代岩浆侵位时间基本吻合, 暗示二者之间可能存在某种成因联系。

兰坪盆地内部莲花山岩体和卓潘岩体的锆石 U-Pb 定年结果显示岩体侵位时代 33 ~ 34Ma, 这些岩体普遍具有富碱、高 K, 富集 U、Th 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta 等高场强元素, 轻稀土富集等特征; 锆石 Hf 同位素变化较大, 莲花山岩体变化于 1.4 ~ 4.6, 卓潘岩体变化于 -10.6 ~ -4.3, 反映了新生地壳重熔和古老地壳物质深熔作用的产物(刘金宇等, 2017; 杜斌等, 2018)。这些岩体与盆地东侧的扬子西缘钾

质岩体群同属金沙江-哀牢山钾质岩浆岩带的组成部分,它们是始新世古特提斯缝合带加厚岩石圈拆沉作用导致的软流圈上涌而诱发。

此外,在兰坪-思茅盆地周边基底变质岩中有大量的新生代花岗岩脉(Wang *et al.*, 2006b; Zhang *et al.*, 2010, 2014; Liu *et al.*, 2015) 这些花岗岩脉为过铝质高钾钙碱性的浅色花岗岩, ZrO_2 饱和温度为 700 ~ 800°C, 锆石 U-Pb 年龄分布在 16 ~ 38Ma(图 16)。研究认为,这些花岗岩脉的形成主要是由于强烈的逆冲推覆作用造成了陆壳物质的重熔作用造成的。据花岗岩脉锆石 Hf 同位素组成可以从成因上区分出两类花岗岩脉,一类锆石 Hf 同位素组成为较低的负值(-5 ~ -10),是中上地壳物质深熔形成的花岗岩脉,另一类锆石 Hf 同位素组成为 5 ~ -2,可能是新生地壳的深熔或壳幔混合来源成因。盆地周边基底变质带中的花岗岩脉反映了三江特提斯构造转换带强烈的挤压、走滑、逆冲推覆导致地壳加厚、糜棱岩化及深熔作用,造成区域中上部地壳广泛的变质变形作用及岩浆活动。

综上所述,在印度-欧亚大陆晚碰撞构造转换背景下,青藏高原东缘形成大规模的剪切系统、逆冲推覆构造系统,走滑断裂系统及相伴产出的走滑拉分盆地,导致拼合块体大幅旋转、小幅滑移和地壳缩短(Wang *et al.*, 2001b, 2006a; 刘俊来等, 2006; 侯增谦, 2010) 并伴随有强烈的构造岩浆活动(Hou *et al.*, 2006; 侯增谦等, 2006)。在兰坪-思茅盆地及周缘发现的岩浆活动可区分出两种成因类型: ①盆地伸展背景下软流圈上侵,发生富集岩石圈地幔或新生下地壳部分熔融,形成的碱性岩、富碱斑岩及钾质碱性火山岩; ②与逆冲推覆、剪切走滑有关的中上地壳物质深熔,其代表性产物为过铝质高钾钙碱性的浅色花岗岩脉。分析认为,同期构造岩浆活动可能为中上地壳成矿物质的大规模活化迁移提供了充足的热动力条件,不排除在部分矿床中可能提供部分成矿流体和成矿物质来源。

6 主要认识

(1) 三江碰撞造山带沉积岩容矿的 Pb、Zn、Ag、Cu 贱金属矿床形成于印度-欧亚大陆碰撞环境。Cu-Mo 矿床主要形成于 48 ~ 58Ma, Pb-Zn-Ag 成矿作用集中在 27 ~ 33Ma, 分别对应主碰撞陆-陆汇聚阶段和晚碰撞构造转换阶段。

(2) 盆地基底岩石为区内沉积岩容矿 Pb-Zn-Ag-Cu 贱金属成矿提供了重要的物质来源。

(3) 区内贱金属矿床复合成矿作用普遍发育。矿床成矿流体普遍具有多来源混合的特征,主要存在三种类型: 盆地卤水与大气降水复合成矿,以金顶 Pb-Zn 矿床为代表; 盆地卤水和岩浆流体复合成矿,以拉诺玛 Pb-Zn-Sb 矿床为代表; 变质流体与盆地卤水或大气降水复合成矿,以金满-连城 Cu 矿床为代表。金顶超大型 Pb-Zn 多金属矿床的形成是一系列成矿有利因素(地质背景、控矿构造、蒸发岩建造、有机质

等)耦合的结果,表现出显著的多期复合成矿特征。金顶矿床早期以 Zn 为主的矿化作用,在区带上的其它矿床中相对较弱或缺失。

(4) 新生代印度-欧亚大陆碰撞造山引起的区域大规模变质和深熔作用为中上地壳成矿物质的大规模活化迁移提供了充足的背景条件,主要为热动力条件,在个别矿床中可能提供部分成矿流体和成矿物质来源。

致谢 本文发表恰逢翟裕生院士九十华诞,先生长期从事矿田构造、矿床地质及成矿规律研究,提出控矿接触带构造体系理论,对成矿系列、成矿模式和成矿系统具有高深的独特见解,为我国矿床学发展做出了杰出的重要贡献。谨以此文向翟先生表达我们的美好祝愿和敬仰之情。野外工作中得到云南省地质矿产勘查开发局、云南金顶锌业有限公司和各矿山工作人员的大力支持和帮助。感谢中国科学院地球化学研究所肖加飞副研究员、盛响元、李娟和刘跃福博士为本文清绘图件和交流数据。此外,感谢两名审稿人对本文认真和细致的评审,他们的意见对本文质量的提高大有裨益。

References

- Bai JF, Wang CH and Na RX. 1985. Geological characteristics of the Jinding lead-zinc deposit in Yunnan with a special discussion on its genesis. *Mineral Deposits*, 4(1): 1-10 (in Chinese with English abstract)
- Bi XM and Mo XX. 2004. Transition from diagenesis to low-grade metamorphism and related minerals and energy resources. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 287-294 (in Chinese with English abstract)
- Bi XW, Hu RZ and He MY. 1996. Age determination of Ailaoshan gold metallogenic belt by ESR method and its geological significance. *Chinese Science Bulletin*, 41(18): 1546-1549
- Bi XW, Hu RZ and He MY. 1997. Characteristics of ore-forming fluid of three gold deposits in Ailaoshan gold mineralization belt. *Acta Mineralogica Sinica*, 17(4): 435-441 (in Chinese with English abstract)
- Bi XW, Hu RZ, Mungall JE, Hanley JJ, Peng JT, Wu KX and Li HL. 2006. Mineral chemistry studies of Cu- and Au-mineralized alkaline intrusions. *Acta Mineralogica Sinica*, 26(4): 377-386 (in Chinese with English abstract)
- Bierlein FP, Groves DI, Goldfarb RJ and Dubé B. 2006. Lithospheric controls on the formation of provinces hosting giant orogenic gold deposits. *Mineralium Deposita*, 40(8): 874-886
- Chen H, Li F, Jian RT, Luo SL and Yao W. 2010. Zircon SHRIMP dating of the Laochang granite porphyry in Lancang, Yunnan and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 84(4): 485-491 (in Chinese with English abstract)
- Chen KX, He LQ, Yang ZQ, Wei JQ and Yang AP. 2000. Oxygen and carbon isotope geochemistry in Sanshan-Baiyangping copper-silver polymetallogenic enrichment district, Lanping, Yunnan. *Geology and Mineral Resources of South China*, (4): 1-8 (in Chinese with English abstract)
- Chen KX, Yao SZ, He LQ, Wei JQ, Yang AP and Huang HL. 2004. Ore-forming fluid in Baiyangping silver-polymetallic mineralization concentration field in Lanping, Yunnan Province. *Geological Science and Technology Information*, 23(2): 45-50 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Ni P, Fan HR, Pirajno F, Lai Y, Su WC and Zhang H. 2007.

- Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 2085–2108 (in Chinese with English abstract)
- Chi GX and Xue CJ. 2011. Abundance of CO₂-rich fluid inclusions in a sedimentary basin-hosted Cu deposit at Jinman, Yunnan, China: Implications for mineralization environment and classification of the deposit. *Mineralium Deposita*, 46(4): 365–380
- Chi GX, Xue CJ, Sun XA, Lai JQ, Luo P, Song H, Li S and Zeng R. 2017. Formation of a giant Zn-Pb deposit from hot brines injecting into a shallow oil-gas reservoir in sandstones, Jinding, southwestern China. *Terra Nova*, 29(5): 312–320
- Deng J, Hou ZQ, Mo XX, Yang LQ, Wang QF and Wang CM. 2010. Superimposed orogenesis and metallogenesis in Sanjiang Tethys. *Mineral Deposits*, 29(1): 37–42 (in Chinese with English abstract)
- Deng J, Wang CM and Li GJ. 2012. Style and process of the superimposed mineralization in the Sanjiang Tethys. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1349–1361 (in Chinese with English abstract)
- Deng J, Wang QF, Li GJ and Santosh M. 2014a. Cenozoic tectono-magmatic and metallogenic processes in the Sanjiang region, southwestern China. *Earth-Science Reviews*, 138: 268–289
- Deng J, Wang QF, Li GJ, Li CS and Wang CM. 2014b. Tethys tectonic evolution and its bearing on the distribution of important mineral deposits in the Sanjiang region, SW China. *Gondwana Research*, 26(2): 419–437
- Deng J, Wang QF, Li GJ, Hou ZQ, Jiang CZ and Danyushevsky L. 2015a. Geology and genesis of the giant Beiya porphyry-skarn gold deposit, northwestern Yangtze Block, China. *Ore Geology Reviews*, 70: 457–485
- Deng J, Wang QF, Li GJ and Zhao Y. 2015b. Structural control and genesis of the Oligocene Zhenyuan orogenic gold deposit, SW China. *Ore Geology Reviews*, 65: 42–54
- Deng J, Wang QF and Li GJ. 2016. Superimposed orogeny and composite metallogenic system: Case study from the Sanjiang Tethyan belt, SW China. *Acta Petrologica Sinica*, 32(8): 2225–2247 (in Chinese with English abstract)
- Deng J, Wang CM, Bagas L, Selvaraja V, Jeon H, Wu B and Yang LF. 2017. Insights into ore genesis of the Jinding Zn-Pb deposit, Yunnan Province, China: Evidence from Zn and in-situ S isotopes. *Ore Geology Reviews*, 90: 943–957
- Du B, Wang CM, Yang LF, Shi KX, Zhang D, Chen Q, Zhu JX and Zhang SH. 2018. Magma source and formation mechanism of the Zhuopan alkaline complex in Yongping, Southwest China: Constraints from geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 34(5): 1376–1396 (in Chinese with English abstract)
- Eaton GF, Criss RE, Fleck RJ, Bond WD, Cleland RW and Wavra CS. 1995. Oxygen, carbon, and strontium isotope geochemistry of the Sunshine mine, Coeur d'Alene mining district, Idaho. *Economic Geology*, 90(8): 2274–2286
- Feng CX, Liu S, Bi XW, Hu RZ, Chi GX, Chen JJ, Feng Q and Guo XL. 2017. An investigation of metallogenic chronology of eastern ore block in Baiyangping Pb-Zn-Cu-Ag polymetallic ore deposit, Lanping Basin, western Yunnan Province. *Mineral Deposits*, 36(3): 691–704 (in Chinese with English abstract)
- Gao BY, Xue CJ, Chi GX, Li C, Qu WJ, Du AD, Li ZX and Gu H. 2012. Re-Os dating of bitumen in the giant Jinding Zn-Pb deposit, Yunnan and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1561–1567 (in Chinese with English abstract)
- Gao GL. 1989. Review of geological origin about Jinding lead-zinc ore deposit. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 14(5): 467–475 (in Chinese with English abstract)
- Gao GL. 1991. Formation age and involved problems on anhydrite ore in Jinding lead-zinc ore area. *Yunnan Geology*, 10(2): 191–206 (in Chinese with English abstract)
- Gao L, Wang AJ, Liu JL, Xiu QY, Cao DH and Zhai YF. 2005. New progress in study of superlarge Jinding Pb-Zn deposit: Discovery of intrusive breccia and its geological implications. *Mineral Deposits*, 24(4): 457–461 (in Chinese with English abstract)
- Gao YB, Xue CJ and Zeng R. 2008. Forming mechanisms of H₂S in the Jinding Pb-Zn deposit, Lanping Basin, Northwest Yunnan Province. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 30(4): 367–372 (in Chinese with English abstract)
- Gong WJ, Tan KX, Li XM and Gong GL. 2000. Geochemical characteristics of fluid and mechanism for ore formation in the Baiyangping copper-silver deposit, Yunnan. *Geotectonica et Metallogenia*, 24(2): 175–181 (in Chinese with English abstract)
- Goodfellow WD, Lydon JW and Turner RJW. 1993. Geology and genesis of stratiform sediment-hosted (Sedex) zinc-lead-silver sulfide deposits. In: Kirkham RV, Sinclair WD, Thorpe RI and Dule JM (eds.). *Mineral Deposit Modeling*. Geological Association of Canada, 201–251
- Groves DI and Bierlein FP. 2007. Geodynamic settings of mineral deposit systems. *Journal of the Geological Society*, 164(1): 19–30
- Guild PM. 1972. Metallogeny and the new global tectonics. *Proceedings of the 24th IGC*, 17–24
- He LQ, Song YC, Chen KX, Hou ZQ, Yu FM, Yang ZS, Wei JQ, Li Z and Liu YC. 2009. Thrust-controlled, sediment-hosted, Himalayan Zn-Pb-Cu-Ag deposits in the Lanping foreland fold belt, eastern margin of Tibetan Plateau. *Ore Geology Reviews*, 36(1–3): 106–132
- He MQ, Liu JJ, Li CY, Li ZM, Liu YP, Yang AP and Sang HQ. 2006. ⁴⁰Ar-³⁹Ar dating of ore quartz from the baiyangping Cu-Co polymetallic mineralized concentration area, Lanping, Yunnan. *Chinese Journal of Geology*, 41(4): 688–693 (in Chinese with English abstract)
- Hoefs J. 1997. *Stable Isotope Geochemistry*. 4th Edition. Berlin Heidelberg: Springer
- Hou ZQ, Qu XM, Huang W and Gao YF. 2001. Gangdise porphyry copper metallogenic belt: The possible second “Yulong” copper belt. *Chinese Geology*, 28(10): 27–29, 40 (in Chinese)
- Hou ZQ, Qu XM, Wang SX, Gao YF, Du AD and Huang W. 2004. Re-Os age for molybdenite from the Gangdise porphyry copper belt on Tibetan Plateau: Implications for geodynamic setting and duration of the Cu mineralization. *Science in China (Series D)*, 47(3): 221–231
- Hou ZQ, Tian SH, Yuan ZX, Xie YL, Yin SP, Yi LS, Fei HC and Yang ZM. 2006. The Himalayan collision zone carbonatites in western Sichuan, SW China: Petrogenesis, mantle source and tectonic implication. *Earth and Planetary Science Letters*, 244(1–2): 234–250
- Hou ZQ, Pan GT, Wang AJ, Mo XX, Tian SH, Sun XM, Ding L, Wang EQ, Gao YF, Xie YL, Zeng PS, Qin KZ, Xu JF, Qu XM, Yang ZM, Yang ZS, Fei HC, Meng XJ and Li ZQ. 2006. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: II. Mineralization in late-collisional transformation setting. *Mineral Deposits*, 25(5): 521–543 (in Chinese with English abstract)
- Hou ZQ, Tian SH, Xie YL, Yuan ZX, Yang ZS, Yin SP, Fei HC, Zou TR, Li XY and Yang ZM. 2008a. Mianning-Dechang Himalayan REE belt associated with carbonatite-alkalic complex in eastern Indo-Asian collision zone, Southwest China: Geological characteristics of REE deposits and a possible metallogenic model. *Mineral Deposits*, 27(2): 145–176 (in Chinese with English abstract)
- Hou ZQ, Song YC, Li Z, Wang ZL, Yang ZM, Yang ZS, Liu YC, Tian SH, He LQ, Chen KX, Wang FC, Zhao CX, Xue WZ and Lu HF. 2008b. Thrust-controlled, sediments-hosted Pb-Zn-Ag-Cu deposits in eastern and northern margins of Tibetan orogenic belt: Geological features and tectonic model. *Mineral Deposits*, 27(2): 123–144 (in Chinese with English abstract)
- Hou ZQ and Cook NJ. 2009. Metallogenesis of the Tibetan collisional orogen: A review and introduction to the special issue. *Ore Geology Reviews*, 36(1–3): 2–24
- Hou ZQ. 2010. Metallogenesis of continental collision. *Acta Geologica Sinica*, 84(1): 30–58 (in Chinese with English abstract)
- Hu RZ, Bi XW, He MY, Liu BG, Turner G and Burnard PG. 1998a.

- Mineralizer constraint on gold mineralization of Ailaoshan gold belt. *Science in China (Series D)*, 41(Suppl. 1): 74 – 82
- Hu RZ, Turner G, Burnard PG, Zhong H, Ye ZJ and Bi XW. 1998b. Helium and argon isotopic geochemistry of Jinding superlarge Pb-Zn deposit. *Science in China (Series D)*, 41(4): 442 – 448
- Hu RZ, Bi XW, Turner G and Burnard P. 1999. Helium and argon isotopic geochemistry of gold mineralizing fluid of Ailaoshan gold mineralization belt. *Science in China (Series D)*, 29(4): 321 – 330 (in Chinese)
- Huang Z, Xu XC, Xie QQ, Chen TH and Yue SC. 2005. ^{40}Ar - ^{39}Ar fast neutron activation dating of quartz from the Shuixie copper (Cobalt) deposit in the Lanping Basin, Yunnan. *Chinese Journal of Geology*, 40(1): 125 – 128 (in Chinese)
- Jiang B. 2014. Mineralization of sedimentary-rock-hosted lead-zinc deposits of the Lanping-Simaao basin in southern part of Sanjiang area. Ph. D. Dissertation. Beijing: China University of Geosciences, 1 – 195 (in Chinese with English summary)
- Jiang B, Deng J and Zhang CQ. 2014. Sediment-hosted lead-zinc deposits in Sanjiang Region, SW China: Characteristics and regional metallogeny. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2532 – 2544 (in Chinese with English abstract)
- Jiang SH, Nie FJ, Hu P, Lai XR, Liu YF. 2009. Mayum: An orogenic gold deposit in Tibet, China. *Ore Geology Reviews*, 36(1 – 3): 160 – 173
- Kerrick R and Fyfe WS. 1981. The gold-carbonate association: Source of CO_2 , and CO_2 fixation reactions in Archaean lode deposits. *Chemical Geology*, 33(1 – 4): 265 – 294
- Kerrick R, Goldfarb RJ and Richards JPR. 2005. Metallogenic provinces in an evolving geodynamic framework. In: Hedenquist JW, Thompson JFH, Goldfarb RJ and Richards JP (eds.). One Hundredth Anniversary Volume. Society of Economic Geologists, 1097 – 1136
- Kyle JR and Li N. 2002. Jinding: A giant tertiary sandstone-hosted Zn-Pb deposit, Yunnan, China. *Society of Economic Geologists Newsletter*, 50(1): 9 – 16
- Leach DL, Sangster DF, Kelley KD, Large RR, Garven G, Allen CR, Gutzmer J and Walters SG. 2005. Sediment-hosted lead-zinc deposits: A global perspective. *Economic Geology*, 100: 561 – 607
- Leach DL, Song YC and Hou ZQ. 2017. The world-class Jinding Zn-Pb deposit: Ore formation in an evaporite dome, Lanping Basin, Yunnan, China. *Mineralium Deposita*, 52(3): 281 – 296
- Li GM, Wang GM, Gao DF, Huang ZY and Yao P. 2002. Perspective of copper ore deposit and its exploration direction in Gangdise metallogenic belt, Tibet. *Mineral Deposits*, 21(Suppl. 1): 144 – 147 (in Chinese)
- Li N. 1998. Depositional controls and genesis of the Jinding sandstone-hosted Zn-Pb deposit, Yunnan Province, Southwest China. Ph. D. Dissertation. Austin, Texas: University of Texas, 1 – 100
- Li T. 1994. Element abundances of China's continental crust and its sedimentary layer and upper continental crust. *Geochimica*, 23(2): 140 – 145 (in Chinese with English abstract)
- Li XM, Tan KX, Gong WJ and Gong GL. 2000. Study on the metallogenic epoch of the Jinding lead-zinc deposit with apatite fission track analysis. *Geotectonica et Metallogenia*, 24(3): 282 – 286 (in Chinese with English abstract)
- Li XM and Song YG. 2006. Cenozoic evolution of tectono-fluid and metallogenic process in Lanping Basin, western Yunnan Province, Southwest China: Constraints from apatite fission track data. *Chinese Journal of Geochemistry*, 25(4): 396 – 401
- Li YK, Wang AJ, Cao DH, Huang YF, Zhang MC, Li RP, Yang LJ and Xi WW. 2012. Sequence stratigraphic definition of Late Triassic salt-bearing horizons in northern Lanping basin of northwestern Yunnan Province and its implications. *Geological Bulletin of China*, 31(8): 1313 – 1322 (in Chinese with English abstract)
- Li ZM, Liu JJ, Qin JZ, Liao ZT, He MQ and Liu YP. 2005. Ore-forming material sources of the Baiyangping copper-cobalt-silver polymetallic deposit in Lanping basin, western Yunnan. *Geology and Prospecting*, 41(1): 1 – 6 (in Chinese with English abstract)
- Li ZM, Liao ZT, Liu JJ, Qin JZ and Zhang CJ. 2006. The metallogenic age of Jinding super-large scale lead-zinc deposit in Lanping Basin. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 21(1): 23 – 27 (in Chinese with English abstract)
- Lin TH, Lo CH, Chung SL, Hsu FJ, Yeh MW, Lee TY, Ji JQ, Wang YZ and Liu DY. 2009. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Jiali and Gaoligong shear zones: Implications for crustal deformation around the Eastern Himalayan Syntaxis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(5): 674 – 685
- Liu FL, Wang F, Liu PH, Yang H and Meng E. 2015. Multiple partial melting events in the Ailao Shan-Red River and Gaoligong Shan complex belts, SE Tibetan Plateau: Zircon U-Pb dating of granitic leucosomes within migmatites. *Journal of Asian Earth Sciences*, 110: 151 – 169
- Liu JJ, Li CY, Pan JY, Hu RZ, Liu XF and Zhang Q. 2000. Isotopic geochemistry of copper deposits in sandstone and shale of Lanping-Simaao basin, western Yunnan. *Mineral Deposits*, 19(3): 223 – 234 (in Chinese with English abstract)
- Liu JJ, Li CY, Zhang Q, Pan JY, Liu YP, Liu XF, Liu SR and Yang WG. 2001. Wood textures in Jinman copper deposit in western Yunnan and their genetic implications. *Science in China (Series D)*, 44(6): 545 – 554
- Liu JJ, Li ZM, Zhang Q, Liu YP, Li CY, He MQ and Sang HQ. 2003. ^{40}Ar - ^{39}Ar fast neutron activation age of quartz from the Jinman copper mine, west Yunnan. *Chinese Journal of Geology*, 38(4): 529 – 531 (in Chinese)
- Liu JL, Song ZJ, Cao SY, Zhai YF, Wang AJ, Gao L, Xiu QY and Cao DH. 2006. The dynamic setting and processes of tectonic and magmatic evolution of the oblique collision zone between Indian and Eurasian plates: Exemplified by the tectonic evolution of the Three River region, eastern Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 755 – 786 (in Chinese with English abstract)
- Liu JY, Deng J, Li GJ, Xiao CH, Meng FJ, Chen FC, Wu W and Zhang QW. 2017. Petrogenesis and tectonic significance of the Lianhuashan intrusion in the Lanping Basin, western Yunnan: Constraints from bulk element composition, zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions. *Acta Petrologica Sinica*, 33(7): 2115 – 2128 (in Chinese with English abstract)
- Liu YC, Hou ZQ, Yang ZS, Tian SH, Song YC, Xue WW, Wang FC and Zhang YB. 2010. Fluid inclusion constraints on the origin of Dongmohazhua Pb-Zn ore deposit, Yushu area, Qinghai Province. *Acta Petrologica Sinica*, 26(6): 1805 – 1819 (in Chinese with English abstract)
- Liu YC. 2012. Characteristics and metallogenic genesis of the carbonate-hosted lead-zinc deposits in the middle part of Sanjiang area, Tibetan Plateau. Ph. D. Dissertation. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 1 – 259 (in Chinese with English summary)
- Liu YC, Hou ZQ, Yu YS, Tian SH, Li YL and Yang ZS. 2013. Characteristics and genesis of Lalongla MVT-like deposit in Changdu region, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 29(4): 1407 – 1426 (in Chinese with English abstract)
- Liu YC, Hou ZQ, Yang ZS, Tian SH, Song YC, Yu YS and Ma W. 2016. Geology and chronology of the Zhaofayong carbonate-hosted Pb-Zn ore cluster: Implication for regional Pb-Zn metallogenesis in the Sanjiang belt, Tibet. *Gondwana Research*, 35: 15 – 26
- Liu YC, Kendrick MA, Hou ZQ, Yang ZS, Tian SH, Song YC and Honda M. 2017. Hydrothermal fluid origins of carbonate-hosted Pb-Zn deposits of the Sanjiang Thrust Belt, Tibet: Indications from noble gases and halogens. *Economic Geology*, 112(5): 1247 – 1268
- Lu HZ, Fan HR, Ni P, Ou GX, Shen K and Zhang WH. 2004. Fluid Inclusions. Beijing: Science Press, 1 – 487 (in Chinese)
- Luo JL, Yang YH, Zhao Z, Chen JC and Yang JZ. 1994. Evolution of the Tethys in Western Yunnan and Mineralization for Main Metal Deposits. Beijing: Geological Publishing House, 157 – 220 (in Chinese)
- Mitchell AHG and Garson MS. 1981. *Mineral Deposits and Global Tectonic Settings*. London: Academic Press Inc. Ltd., 1 – 266

- Ohmoto H. 1986. Stable isotopes in high temperature geological processes. In: Valley JW, Taylor Jr HP and O'Neil JR (eds.). *Reviews in Mineralogy*. Mineralogical Society of America, 491–559
- Peng JT and Hu RZ. 2001. Carbon and oxygen isotope systematics in the Xikuangshan giant antimony deposit, central Hunan. *Geological Review*, 47(1): 34–41 (in Chinese with English abstract)
- Phillips GN and Powell JK. 1993. Link between gold provinces. *Economic Geology*, 88(4): 1084–1098
- Qin GJ and Zhu SQ. 1991. Genetic model and prospecting prediction of Jinding lead-zinc ore deposit. *Yunnan Geology*, 10(2): 145–190 (in Chinese with English abstract)
- Que MY, Cheng DM, Zhang LS, Xia WJ and Zhu CY. 1998. *Copper Deposits in the Lanping-Simao Basin*. Beijing: Geological Publishing House, 1–46 (in Chinese)
- Roedder E. 1984. Fluid inclusions. In: Ribbe PH (ed.). *Reviews in Mineralogy*. Washington: Mineralogical Society of America, 644
- Rui ZY, Hou ZQ, Li GM, Liu B, Zhang LS and Wang LS. 2006. A genetic model for the Gandisè porphyry copper deposits. *Geological Review*, 52(4): 459–466 (in Chinese with English abstract)
- Shi JX, Yi FH and Wen QD. 1983. The rock-ore characteristics and mineralization of Jinding lead-zinc deposit, Lanping. *Yunnan Geology*, 2(3): 179–194 (in Chinese)
- Song YC, Hou ZQ, Yang TN, Zhang HR, Yang ZS, Tian SH, Liu YC, Wang XH, Liu YX, Xue CD, Wang GH and Li Z. 2011. Sediment-hosted Himalayan base metal deposits in Sanjiang region: Characteristics and genetic types. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(3): 355–380 (in Chinese with English abstract)
- Song YC, Hou ZQ, Liu YC and Zhang HR. 2017. Mississippi valley-type (MVT) Pb-Zn deposits in the Tethyan domain: A review. *Geology in China*, 44(4): 664–689 (in Chinese with English abstract)
- Spurlin MS, Yin A, Horton BK, Zhou JY and Wang JH. 2005. Structural evolution of the Yushu-Nangqian region and its relationship to syn-collisional igneous activity, east-central Tibet. *GSA Bulletin*, 117(9–10): 1293–1317
- Sun XM, Xiong DX, Shi GY, Wang SW and Zhai W. 2009. Crust-mantle interaction in the Ailaoshan gold belt and its contribution to gold mineralization: A case study of Daping gold mine in Yunnan Province, China. *Ore Geology Reviews*, 36: 235–249
- Tang JX, Zhong KH, Liu ZC, Li ZJ, Dong SY and Zhang L. 2006. Intracontinent orogen and metallogenesis in Himalayan Epoch: Changdu Large composite basin, eastern Tibet. *Acta Geologica Sinica*, 80(9): 1364–1376 (in Chinese with English abstract)
- Tang YY, Bi XW, He LP, Wu LY, Feng CX, Zou ZC, Tao Y and Hu RZ. 2011. Geochemical characteristics of trace elements, fluid inclusions and carbon-oxygen isotopes of calcites in the Jinding Zn-Pb deposit, Lanping, China. *Acta Petrologica Sinica*, 27(9): 2635–2645 (in Chinese with English abstract)
- Tang YY, Bi XW, Wu LY, Zou ZC and He LP. 2013a. Carbon, oxygen, strontium and lead isotopic geochemistry in the Jinding super-large Zn-Pb deposit, Yunnan Province. *Geochimica*, 42(5): 467–480 (in Chinese with English abstract)
- Tang YY, Bi XW, Wu LY, Wang L, Zou ZC and He LP. 2013b. Re-Os isotopic dating of pyrite from Jinding Zn-Pb ore deposit and its geological significance. *Acta Mineralogica Sinica*, 33(3): 287–294 (in Chinese with English abstract)
- Tang YY, Bi XW, Fayek M, Hu RZ, Wu LY, Zou ZC, Feng CX and Wang XS. 2014. Microscale sulfur isotopic compositions of sulfide minerals from the Jinding Zn-Pb deposit, Yunnan Province, Southwest China. *Gondwana Research*, 26(2): 594–607
- Tang YY, Bi XW, Yin RS, Feng XB and Hu RZ. 2017a. Concentrations and isotopic variability of mercury in sulfide minerals from the Jinding Zn-Pb deposit, Southwest China. *Ore Geology Reviews*, 90: 958–969
- Tang YY, Bi XW, Fayek M, Stuart FM, Wu LY, Jiang GH, Xu LL and Liang F. 2017b. Genesis of the Jinding Zn-Pb deposit, northwest Yunnan Province, China: Constraints from rare earth elements and noble gas isotopes. *Ore Geology Reviews*, 90: 970–986
- Tao Y, Bi XW, Xin ZL, Zhu FL, Liao MY and Li YB. 2011. Geology, geochemistry and origin of Lanuoma Pb-Zn-Sb deposit in Changdu area, Tibet. *Mineral Deposits*, 30(4): 599–615 (in Chinese with English abstract), 88(2): 558–569
- Tian SH, Hou ZQ, Yang ZS, Yang ZM, Yuan ZX, Wang YB, Xie YL, Liu YC and Li Z. 2008. Zircon U-Pb ages, Hf isotopic compositions and geological significance: A case study of carbonatite and nordmarkite from the Dalucao REE deposit, Sichuan province. *Acta Petrologica Sinica*, 24(3): 544–554 (in Chinese with English abstract)
- Tian SH, Yang ZS, Hou ZQ, Liu YC, Gao YG, Wang ZL, Song YC, Xue WW, Lu HF, Wang FC, Su AN, Li ZZ, Wang YX, Zhang YB, Zhu T, Yu CJ and Yu YS. 2009. Rb-Sr and Sm-Nd isochron ages of Dongmohazhua and Mohailaheng Pb-Zn ore deposits in Yushu area, southern Qinghai and their geological implications. *Mineral Deposits*, 28(6): 747–758 (in Chinese with English abstract)
- Tian SH, Gong YL, Yang ZS, Hou ZQ, Liu YC, Song YC, Xue WW, Lu HF, Wang FC, Zhang YB, Zhu T and Yu CJ. 2014. Rb-Sr and Sm-Nd isochron ages of the Dongmohazhua and Mohailaheng Pb-Zn ore deposits in the Yushu area, southern Qinghai and their geological implications. *Acta Geologica Sinica*, 88(2): 558–569
- Wang AJ, Cao DH, Gao L, Wang GS, Guan Y, Xiu QY and Liu JL. 2009. A probe into the genesis of Jinding super-large lead-zinc ore deposit. *Acta Geologica Sinica*, 83(1): 43–54 (in Chinese with English abstract)
- Wang CM, Chen JY, Yang LF, Zhang D, Du B and Shi KX. 2017. Tectonic-fluid-mineral system in the Lanping basin, Sanjiang Tethys. *Acta Petrologica Sinica*, 33(7): 1957–1977 (in Chinese with English abstract)
- Wang CM, Yang LF, Bagas L, Evans NJ, Chen JY and Du B. 2018a. Mineralization processes at the giant Jinding Zn-Pb deposit, Lanping Basin, Sanjiang Tethys Orogen: Evidence from in situ trace element analysis of pyrite and marcasite. *Geological Journal*, 53(4): 1279–1294
- Wang CM, Bagas L, Chen JY, Yang LF, Zhang D, Du B and Shi KX. 2018b. The genesis of the Liancheng Cu-Mo deposit in the Lanping Basin of SW China: Constraints from geology, fluid inclusions, and Cu-S-H-O isotopes. *Ore Geology Reviews*, 92: 113–128
- Wang DH, Yang JM, Yan SH, Xu J, Chen YC, Pu GP and Luo YN. 2001a. A special orogenic-type rare earth element deposit in Maoniuping, Sichuan, China: Geology and geochemistry. *Resource Geology*, 51(3): 177–188
- Wang DH, Qu WJ, Li ZW, Ying HL and Chen YC. 2005. Mineralization episode of porphyry copper deposits in the Jinshajiang-Red River mineralization belt: Re-Os dating. *Science in China (Series D)*, 48(2): 192–198
- Wang E, Xu FY, Zhou JX, Wan JL and Burchfiel BC. 2006a. Eastward migration of the Qaidam Basin and its implications for Cenozoic evolution of the Altyn Tagh Fault and associated river systems. *GSA Bulletin*, 118(3–4): 349–365
- Wang F and He MY. 2003. Lead and sulfur isotopic tracing of the ore-forming material from the Baiyangping copper-silver polymetallic deposit in Lanping, Yunnan. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 23(2): 82–85 (in Chinese with English abstract)
- Wang F. 2004. Geochemical mechanism of the silver polymetallic deposit in Baiyangping, Northwest Yunnan. Ph. D. Dissertation. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology, 1–82 (in Chinese with English summary)
- Wang GH, Song YC, Hou ZQ, Wang XH, Yang ZS, Yang TN, Liu YX, Jiang YF, Pan XF, Zhang HR, Liu YC, Li Z and Xue CD. 2009. Re-Os dating of molybdenite from Liancheng vein copper deposit in Lanping basin and its geological significance. *Mineral Deposits*, 28(4): 413–424 (in Chinese with English abstract)
- Wang GH. 2010. A genetic study on the Jinman-Liancheng vein Cu deposits in the northwestern Yunnan. Master Degree Thesis. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 1–84 (in Chinese with English summary)
- Wang JB, Li CY and Chen XZ. 1992. New viewpoint on the genesis of

- Jinding Pb-Zn deposit. Geological Exploration for Non-ferrous Metals, 1(4): 200-206, 256 (in Chinese with English abstract)
- Wang JH, Yin A, Harrison TM, Grove M, Zhang YQ and Xie GH. 2001b. A tectonic model for Cenozoic igneous activities in the eastern Indo-Asian collision zone. Earth and Planetary Science Letters, 188(1-2): 123-133
- Wang XH, Hou ZQ, Song YC, Yang TN and Zhang HR. 2011. Baiyangping Pb-Zn-Cu-Ag polymetallic deposit in Lanping basin: Metallogenic chronology and regional mineralization. Acta Petrologica Sinica, 27(9): 2625-2634 (in Chinese with English abstract)
- Wang YB, Chen W and Zeng PS. 2005. Constraints of sericite ^{40}Ar - ^{39}Ar ages on the metallogenic epoch of the Jinman vein copper deposit in the Lanping basin, northwestern Yunnan. Geological Bulletin of China, 24(2): 181-184 (in Chinese with English abstract)
- Wang YB, Han J, Zeng PS, Wang DH, Hou KJ, Yin GH and Li WC. 2010. U-Pb dating and Hf isotopic characteristics of zircons from granodiorite in Yangla copper deposit, Deqin County, Yunnan, Southwest China. Acta Petrologica Sinica, 26(6): 1833-1844 (in Chinese with English abstract)
- Wang YJ, Fan WM, Zhang YH, Peng TP, Chen XY and Xu YG. 2006b. Kinematics and ^{40}Ar / ^{39}Ar geochronology of the Gaoligong and Chongshan shear systems, western Yunnan, China: Implications for Early Oligocene tectonic extrusion of SE Asia. Tectonophysics, 418(3-4): 235-254
- Wei JQ. 2001. S-Pb isotopic geochemistry of copper multi-metal deposits in Hexi, Yunnan Province. Geology and Mineral Resources of South China, (3): 36-39 (in Chinese with English abstract)
- Wen HJ, Qiu YZ, Zhang GS and Yang GS. 2003. Geological and geochemical evidence for large-scale ore-forming fluid evolution in the Lanping basin. Ningbo: 9th Annual Meeting of Chinese Society of Mineral, Rock and Geochemistry, 67-68 (in Chinese)
- Wu NP, Jiang SY, Liao QL, Pan JY and Dai BZ. 2003. Lead and sulfur isotope geochemistry and the ore sources of the vein-type copper deposits in Lanping-Simao basin, Yunnan Province. Acta Petrologica Sinica, 19(4): 799-807 (in Chinese with English abstract)
- Xiao RG, Chen HQ, Shuai KY and Yang ZF. 1994. Mineralization of Jinman copper deposit in Mesozoic sedimentary rocks in Lanping, Yunnan Province. Geoscience, 8(4): 490-496 (in Chinese with English abstract)
- Xie YL, Hou ZQ, Yin SP, Dominy SC, Xu JH, Tian SH and Xu WY. 2009. Continuous carbonatitic melt-fluid evolution of a REE mineralization system: Evidence from inclusions in the Maoniuping REE deposit, western Sichuan, China. Ore Geology Reviews, 36(1-3): 90-105
- Xu C, Huang ZL, Liu CQ, Qi L, Li WB and Guan T. 2003. Indicator of fluorite Sr and Nd isotope to mantle-derived ore-forming fluids in Maoniuping REE deposit, Sichuan Province, China. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 28(1): 41-46 (in Chinese with English abstract)
- Xu CX. 2017. Geochemical features and ore genesis of sediment-hosted lead-zinc deposits in the Changdu area, Tibet: Exemplified by Lanuoma and Cuona Pb-Zn deposits. Ph. D. Dissertation. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 1-140 (in Chinese with English summary)
- Xu CX, Yin RS, Peng JT, Hurley JP, Lepak RF, Gao JF, Feng XB, Hu RZ and Bi XW. 2018. Mercury isotope constraints on the source for sediment-hosted lead-zinc deposits in the Changdu area, southwestern China. Mineralium Deposita, 53(3): 339-352
- Xu XC, Huang Z, Xie QQ, Yue SC and Liu Y. 2004. Ar-Ar isotopic ages of Jinman and Shuixie copper polymetallic deposits in Yunnan province, and their geological implications. Geological Journal of China Universities, 10(2): 157-164 (in Chinese with English abstract)
- Xue CJ, Chen YC, Wang DH, Yang JM, Yang WG and Zeng R. 2003. Geology and isotopic composition of helium, neon, xenon and metallogenic age of the Jinding and Baiyangping ore deposits, Northwest Yunnan, China. Science in China (Series D), 46(8): 789-800
- Xue CJ, Zeng R, Liu SW, Chi GX, Qing HR, Chen YC, Yang JM and Wang DH. 2007. Geologic, fluid inclusion and isotopic characteristics of the Jinding Zn-Pb deposit, western Yunnan, South China: A review. Ore Geology Reviews, 31(1-4): 337-359
- Xue CJ, Chi GX, Chen YC, Zeng R, Gao YB and Qing HR. 2007. Fluid dynamic processes of large-scale mineralization in the Lanping basin, Yunnan, SW-China: Evidence from fluid inclusions and basin fluid modeling. Earth Science Frontiers, 14(5): 147-157 (in Chinese with English abstract)
- Xue W, Xue CJ, Chi GX, Shi HG, Gao BY and Yang SF. 2010. Study on the fluid inclusions of Baiyangping poly-metallic deposit in Lanping basin, northwestern Yunnan, China. Acta Petrologica Sinica, 26(6): 1773-1784 (in Chinese with English abstract)
- Yalikul Y, Xue CJ and Symons DTA. 2018. Paleomagnetic age and tectonic constraints on the genesis of the giant Jinding Zn-Pb deposit, Yunnan, China. Mineralium Deposita, 53(2): 245-259
- Yang C. 2010. Study on the sources of ore-forming metals and fluids of the Lanuoma lead-zinc polymetallic deposit in the eastern Tibet. Master Degree Thesis. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 1-70 (in Chinese with English summary)
- Yang LF, Shi KX, Wang CM, Wu B, Du B, Chen JY, Xia JS and Chen J. 2016. Ore genesis of the Jinman copper deposit in the Lanping Basin, Sanjiang Orogen: Constraints by copper and sulfur isotopes. Acta Petrologica Sinica, 32(8): 2392-2406 (in Chinese with English abstract)
- Yang WG, Yu XH, Li WC, Dong FL and Mo XX. 2003. The characteristics of metallogenic fluids and metallogenic mechanism in Baiyangping silver and polymetallic mineralization concentration area in Yunnan Province. Geoscience, 17(1): 17-23 (in Chinese with English abstract)
- Yang XA, Liu JJ, Han SY, Zhang HY, Luo C, Wang H and Chen SY. 2011. U-Pb dating of zircon from the Linong granodiorite, Re-Os dating of molybdenite from the ore body and their geological significances in Yangla copper deposit, Yunnan. Acta Petrologica Sinica, 27(9): 2567-2576 (in Chinese with English abstract)
- Yang ZM, Hou ZQ, White NC, Chang ZS, Li ZQ and Song YC. 2009. Geology of the post-collisional porphyry copper-molybdenum deposit at Qulong, Tibet. Ore Geology Reviews, 36(1-3): 133-159
- Yang ZX, Williams-Jones AE and Pu GP. 2000. Geological features of Maoniuping REE deposit, Sichuan, China. Journal of Mineralogy and Petrology, 20(2): 28-34 (in Chinese with English abstract)
- Ye L, Cook NJ, Ciobanu CL, Liu YP, Zhang Q, Liu TG, Gao W, Yang YL and Danyushevskiy L. 2011. Trace and minor elements in sphalerite from base metal deposits in South China: A LA-ICPMS study. Ore Geology Reviews, 39(4): 188-217
- Ye QT, Hu YZ and Yang YQ. 1992. Regional Geochemistry Background and the Gold-silver-lead-zinc Mineralization in Sanjiang Area. Beijing: Geological Publishing House, 217-264 (in Chinese)
- Yin HH, Fan WM and Lin G. 1990. Deep processes and mantle-crust compound mineralization in the evolution of the Lanpin-Simao Mesozoic-Cenozoic Diwa basin in western Yunnan, China. Tectonics and Metallogenic Geology, 14(2): 113-124 (in Chinese with English abstract)
- Yuan ZX, Shi ZM and Bai G. 1995. The Maoniuping REE Deposit in Mianing County, Sichuan Province. Beijing: Geological Publishing House, 1-10 (in Chinese)
- Zeng R. 2007. The large-scale fluid ore-forming process in the Lanping basin: Taking the Jinding and Baiyangping deposits as the examples. Ph. D. Dissertation. Xi'an: Chang'an University, 1-109 (in Chinese with English summary)
- Zhang B, Zhang JJ and Zhong DL. 2010. Structure, kinematics and ages of transpression during strain-partitioning in the Chongshan shear zone, western Yunnan, China. Journal of Structural Geology, 32(4): 445-463
- Zhang B, Zhang JJ, Liu J, Wang Y, Yin CY, Guo L, Zhong DL, Lai QZ and Yue YH. 2014. The Xuolongshan high strain zone: Cenozoic structural evolution and implications for fault linkages and deformation along the Ailao Shan-Red River shear zone. Journal of

Structural Geology, 69: 209–233

- Zhang C. 2013. Study on the metallogenesis of the Nariniya lead-zinc deposits, Tuotuohe, Qinghai. Master Degree Thesis. Nanchang: East China Institute of Technology, 1–75 (in Chinese with English summary)
- Zhang F, Tang JX, Chen HD, Yang CQ, Li L, Fan XH, Chen SH, Chen WB and Xie H. 2010. Evolution of Lanping basin and the characteristics of Minerogenic fluid in Lanping basin. *Acta Mineralogica Sinica*, 30(2): 223–229 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JR and Wen HJ. 2010. Preliminary study on fluid inclusions of the Liancheng copper-molybdenum deposit. *Mineral Deposits*, 29 (Suppl. 1): 623–624 (in Chinese)
- Zhang JR and Wen HJ. 2012. Sulfur and lead isotope compositions and tracing of copper deposits on the western border of the Lanping basin, Yunnan Province. *Geochimica*, 41(2): 166–180 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JR, Wen HJ, Qin CJ and Wang JS. 2012. Fluid inclusion and stable isotopes study of Liancheng Cu-Mo polymetallic deposit in Lanping basin, Yunnan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1373–1386 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JR, Wen HJ, Qiu YZ, Zhang YX and Li C. 2013. Ages of sediment-hosted Himalayan Pb-Zn-Cu-Ag polymetallic deposits in the Lanping basin, China: Re-Os geochronology of molybdenite and Sm-Nd dating of calcite. *Journal of Asian Earth Sciences*, 73: 284–295
- Zhang JR, Wen HJ and Zou ZC. 2016. Geology and geochemistry of the Kedengjian vein-type copper deposit in western Lanping basin. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 35(4): 692–702 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JR, Wen HJ, Zou ZC and Du SJ. 2015a. Origin of CO₂-rich ore-forming fluids in the vein-type Cu deposits in western Lanping basin, Yunnan: Evidence from He and Ar isotopes. *Geochimica*, 44(2): 167–177 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JR, Wen HJ, Qiu YZ, Zou ZC and Du SJ. 2015b. Characteristics of ore-forming fluids of Cu-Ag (±Pb-Zn) polymetallic deposits in western Lanping basin, Yunnan Province. *Mineral Deposits*, 34(3): 497–520 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q. 1993. Pb isotopic composition of Jinding super-large Pb-Zn deposit in Yunnan Province and discussion on the source of lead. *Geology and Prospecting*, 29(5): 21–28 (in Chinese with English abstract)
- Zhao HB. 2006. Study on the characteristics and metallogenic conditions of copper-polymetallic deposits in middle-northern Lanping basin, western Yunnan. Ph. D. Dissertation. Beijing: China University of Geosciences, 1–135 (in Chinese with English summary)
- Zhao XY. 1989a. Stable isotope geochemistry of the Jinding lead-zinc ore deposit, Yunnan. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 14(5): 495–502 (in Chinese with English abstract)
- Zhao XY. 1989b. On the genesis of the Jinding lead-zinc ore deposit in Yunnan. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 14(5): 523–530 (in Chinese with English abstract)
- Zheng YF. 1991. Calculation of oxygen isotope fractionation in metal oxides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(8): 2299–2307
- Zhu SQ, Qin GJ, Wen CQ and Chen SF. 2000. Superlarge Jinding continental clastic rock-hosted lead-zinc deposit. In: Tu GC (ed.). *The Super-large Deposits in China (I)*. Beijing: Science Press (in Chinese)
- Zou ZC. 2013. The ore-forming fluid and metallogenic mechanism of the Ag-Cu polymetallic ore deposits at the Baiyangping area, the Lanping basin, Yunnan Province, China. Ph. D. Dissertation. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 1–128 (in Chinese with English summary)
- Zou ZC, Hu RZ, Bi XW, Wu LY, Feng CX and Tang YY. 2015. Absolute and relative dating of Cu and Pb-Zn mineralization in the Baiyangping area, Yunnan Province, SW China: Sm-Nd geochronology of calcite. *Geochemical Journal*, 49(1): 103–112

附中文参考文献

- 白嘉芬, 王长怀, 纳荣仙. 1985. 云南金顶铅锌矿床地质特征及成因初探. *矿床地质*, 4(1): 1–10
- 毕先梅, 莫宣学. 2004. 成岩-极低级变质-低级变质作用及有关矿产. *地学前缘*, 11(1): 287–294
- 毕献武, 胡瑞忠, 何明友. 1997. 哀牢山金矿带主要金矿床成矿流体特征. *矿物学报*, 17(4): 435–441
- 毕献武, 胡瑞忠, Mungall JE, Hanley JJ, 彭建堂, 吴开兴, 李鸿莉. 2006. 与铜-金矿化有关的富碱侵入岩矿物化学研究. *矿物学报*, 26(4): 377–386
- 陈琛, 李峰, 坚润堂, 罗思亮, 姚巍. 2010. 云南澜沧老厂花岗斑岩锆石 SHRIMP 定年及其地质意义. *地质学报*, 84(4): 485–491
- 陈开旭, 何龙清, 杨振强, 魏君奇, 杨爱平. 2000. 云南兰坪三山-白秧坪铜银多金属成矿富集区的碳氧同位素地球化学. *华南地质与矿产*, (4): 1–8
- 陈开旭, 姚书振, 何龙清, 魏君奇, 杨爱平, 黄惠兰. 2004. 云南兰坪白秧坪铜银多金属矿集区成矿流体研究. *地质科技情报*, 23(2): 45–50
- 陈衍景, 倪培, 范宏瑞, Pirajno F, 赖勇, 苏文超, 张辉. 2007. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征. *岩石学报*, 23(5): 2085–2108
- 邓军, 侯增谦, 莫宣学, 杨立强, 王庆飞, 王长明. 2010. 三江特提斯复合造山与成矿作用. *矿床地质*, 29(1): 37–42
- 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. *岩石学报*, 28(5): 1349–1361
- 邓军, 王庆飞, 李龚健. 2016. 复合造山和复合成矿系统: 三江特提斯析析. *岩石学报*, 32(8): 2225–2247
- 杜斌, 王长明, 杨立飞, 石康兴, 张端, 陈奇, 祝佳萱, 张淑花. 2018. 西南三江永平卓潘碱性杂岩体源区与形成机制: 全岩元素、锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素联合约束. *岩石学报*, 34(5): 1376–1396
- 冯彩霞, 刘燊, 毕献武, 胡瑞忠, 池国祥, 陈俊瑾, 冯强, 郭晓磊. 2017. 滇西兰坪盆地白秧坪 Pb-Zn-Cu-Ag 多金属矿床东矿带成矿年代学探讨. *矿床地质*, 36(3): 691–704
- 高炳宇, 薛春纪, 池国祥, 李超, 屈文俊, 杜安道, 李足晓, 顾浩. 2012. 云南金顶超大型铅锌矿床沥青 Re-Os 法测年及地质意义. *岩石学报*, 28(5): 1561–1567
- 高广立. 1989. 论金顶铅锌矿床的地质问题. *地球科学-中国地质大学学报*, 14(5): 467–475
- 高广立. 1991. 金顶铅锌矿区硬石膏矿的形成时代及其所涉及的问题. *云南地质*, 10(2): 191–206
- 高兰, 王安建, 刘俊来, 修群业, 曹殿华, 翟云峰. 2005. 滇西北兰坪金顶超大型矿床研究新进展: 侵位角砾岩的发现及其地质意义. *矿床地质*, 24(4): 457–461
- 高永宝, 薛春纪, 曾荣. 2008. 兰坪金顶铅锌硫化物成矿中硫化氢成因. *地球科学与环境学报*, 30(4): 367–372
- 龚文君, 谭凯旋, 李小明, 龚革联. 2000. 兰坪白秧坪铜银多金属矿床流体地球化学特征及成矿机制探讨. *大地构造与成矿学*, 24(2): 175–181
- 何明勤, 刘家军, 李朝阳, 李志明, 刘玉平, 杨爱平, 桑海清. 2006.

- 云南兰坪白秧坪铜钴多金属矿集区矿石中石英的⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄. 地质科学, 41(4): 688-693
- 侯增谦, 曲晓明, 黄卫, 高永丰. 2001. 冈底斯斑岩铜矿成矿带有望成为西藏第二条“玉龙”铜矿带. 中国地质, 28(10): 27-29, 40
- 侯增谦, 曲晓明, 王淑贤, 高永丰, 杜安道, 黄卫. 2003. 西藏高原冈底斯斑岩铜矿带辉钼矿 Re-Os 年龄: 成矿作用时限与动力学背景应用. 中国科学(D 辑), 33(7): 609-618
- 侯增谦, 潘桂棠, 王安建, 莫宣学, 田世洪, 孙晓明, 丁林, 王二七, 高永丰, 谢玉玲, 曾普胜, 秦克章, 许继峰, 曲晓明, 杨志明, 杨竹森, 费红彩, 孟祥金, 李振清. 2006. 青藏高原碰撞造山带: II. 晚碰撞转换成矿作用. 矿床地质, 25(5): 521-543
- 侯增谦, 田世洪, 谢玉玲, 袁忠信, 杨竹森, 尹淑苹, 费红彩, 邹天人, 李小渝, 杨志明. 2008a. 川西冕宁-德昌喜马拉雅期稀土元素成矿带: 矿床地质特征与区域成矿模型. 矿床地质, 27(2): 145-176
- 侯增谦, 宋玉财, 李政, 王召林, 杨志明, 杨竹森, 刘英超, 田世洪, 何龙清, 陈开旭, 王富春, 赵呈祥, 薛万文, 鲁海峰. 2008b. 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. 矿床地质, 27(2): 123-144
- 侯增谦. 2010. 大陆碰撞成矿论. 地质学报, 84(1): 30-58
- 胡瑞忠, 毕献武, Turner G, Burnard P. 1999. 哀牢山金矿带金成矿流体 He 和 Ar 同位素地球化学. 中国科学(D 辑), 29(4): 321-330
- 黄震, 徐晓春, 谢巧勤, 陈天虎, 岳书仓. 2005. 兰坪盆地水泄铜(钴)矿床石英的⁴⁰Ar-³⁹Ar 快中子活化年龄. 地质科学, 40(1): 125-128
- 江彪. 2014. 三江南段兰坪-思茅盆地沉积岩容矿型铅锌成矿作用. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学, 1-195
- 江彪, 邓军, 张长青. 2014. 西南三江地区沉积岩容矿型铅锌成矿特征和成矿规律. 地质学报, 88(12): 2532-2544
- 李光明, 王高明, 高大发, 黄志英, 姚鹏. 2002. 西藏冈底斯铜矿资源前景与找矿方向. 矿床地质, 21(增1): 144-147
- 黎彤. 1994. 中国陆壳及其沉积层和上陆壳的化学元素丰度. 地球化学, 23(2): 140-145
- 李小明, 谭凯旋, 龚文君, 龚革联. 2000. 利用磷灰石裂变径迹法研究金顶铅锌成矿时代. 大地构造与成矿学, 24(3): 282-286
- 李以科, 王安建, 曹殿华, 黄玉凤, 张明超, 李瑞萍, 杨利军, 隰弯弯. 2012. 滇西北兰坪盆地北部上三叠统含盐层位的厘定及其意义. 地质通报, 31(8): 1313-1322
- 李志明, 刘家军, 秦建中, 廖宗廷, 何明勤, 刘玉平. 2005. 兰坪盆地白秧坪铜钴银多金属矿床成矿物质来源研究. 地质与勘探, 41(1): 1-6
- 李志明, 廖宗廷, 刘家军, 秦建中, 张长江. 2006. 兰坪盆地金顶超大型铅锌矿床成矿年龄探讨. 地质找矿论丛, 21(1): 23-27
- 刘家军, 李朝阳, 潘家永, 胡瑞忠, 刘显凡, 张乾. 2000. 兰坪-思茅盆地砂页岩中铜矿床同位素地球化学. 矿床地质, 19(3): 223-234
- 刘家军, 李朝阳, 张乾, 潘家永, 刘玉平, 刘显凡, 刘世荣, 杨伟光. 2001. 滇西金满铜矿床中木质结构及其成因意义. 中国科学(D 辑), 31(2): 89-95
- 刘家军, 李志明, 张乾, 刘玉平, 李朝阳, 何明勤, 桑海清. 2003. 滇西金满脉状铜矿床的⁴⁰Ar-³⁹Ar 快中子活化年龄. 地质科学, 38(4): 529-531
- 刘俊来, 宋志杰, 曹淑云, 翟云峰, 王安建, 高兰, 修群业, 曹殿华. 2006. 印度-欧亚侧向碰撞带构造-岩浆演化的动力学背景与过程——以藏东三江地区构造演化为例. 岩石学报, 22(4): 775-786
- 刘金宇, 邓军, 李龚健, 肖昌浩, 孟富军, 陈福川, 吴伟, 张琦玮. 2017. 滇西兰坪盆地莲花山岩体成因与构造意义: 岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素约束. 岩石学报, 33(7): 2115-2128
- 刘英超, 侯增谦, 杨竹森, 田世洪, 宋玉财, 薛万文, 王富春, 张玉宝. 2010. 青海玉树东莫扎扎铅锌矿床流体包裹体研究. 岩石学报, 26(6): 1805-1819
- 刘英超. 2012. 青藏高原三江中段碳酸盐岩容矿铅锌矿床成矿特征与成因研究. 博士学位论文. 北京: 中国地质科学院, 1-259
- 刘英超, 侯增谦, 于玉帅, 田世洪, 李玉龙, 杨竹森. 2013. 西藏昌都地区拉拉拉类 MVT 铅锌矿床矿化特征与成因研究. 岩石学报, 29(4): 1407-1426
- 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 欧光习, 沈昆, 张文淮. 2004. 流体包裹体. 北京: 科学出版社, 1-487
- 罗君烈, 杨友华, 赵准, 陈吉琛, 杨荆舟. 1994. 滇西特提斯的演化及主要金属矿床成矿作用. 北京: 地质出版社, 157-220
- 彭建堂, 胡瑞忠. 2001. 湘中锡矿山超大型锡矿床的碳-氧同位素体系. 地质论评, 47(1): 34-41
- 覃功炯, 朱上庆. 1991. 金顶铅锌矿床成因模式及找矿预测. 云南地质, 10(2): 145-190
- 阙梅英, 程敦模, 张立生, 夏文杰, 朱创业. 1998. 兰坪-思茅盆地铜矿床. 北京: 地质出版社, 1-46
- 芮宗瑶, 侯增谦, 李光明, 刘波, 张立生, 王龙生. 2006. 冈底斯斑岩铜矿成矿模式. 地质论评, 52(4): 459-466
- 施加辛, 易凤煌, 文启. 1983. 兰坪金顶铅锌矿床的岩矿特征及成因. 云南地质, 2(3): 179-194
- 宋玉财, 侯增谦, 杨天南, 张洪瑞, 杨竹森, 田世洪, 刘英超, 王晓虎, 刘燕学, 薛传东, 王光辉, 李政. 2011. “三江”喜马拉雅期沉积岩容矿贱金属矿床基本特征与成因类型. 岩石矿物学杂志, 30(3): 355-380
- 宋玉财, 侯增谦, 刘英超, 张洪瑞. 2017. 特提斯域的密西西比河谷型(MVT)铅锌矿床. 中国地质, 44(4): 664-689
- 唐菊兴, 钟康惠, 刘肇昌, 李志军, 董树义, 张丽. 2006. 藏东缘昌都大型复合盆地喜马拉雅期陆内造山与成矿作用. 地质学报, 80(9): 1364-1376
- 唐永永, 毕献武, 和利平, 武丽艳, 冯彩霞, 邹志超, 陶琰, 胡瑞忠. 2011. 兰坪金顶铅锌矿方解石微量元素、流体包裹体和碳-氧同位素地球化学特征研究. 岩石学报, 27(9): 2635-2645
- 唐永永, 毕献武, 武丽艳, 邹志超, 和利平. 2013a. 云南金顶超大型铅锌矿床碳、氧、锶、铅同位素地球化学. 地球化学, 42(5): 467-480
- 唐永永, 毕献武, 武丽艳, 王雷, 邹志超, 和利平. 2013b. 金顶铅锌矿黄铁矿 Re-Os 定年及其地质意义. 矿物学报, 33(3): 287-294

- 陶琰, 毕献武, 辛忠雷, 朱飞霖, 廖名扬, 李玉帮. 2011. 西藏昌都地区拉诺玛铅锌锡多金属矿床地质地球化学特征及成因分析. 矿床地质, 30(4): 599-615
- 田世洪, 侯增谦, 杨竹森, 杨志明, 袁忠信, 王彦斌, 谢玉玲, 刘英超, 李政. 2008. 四川大陆槽稀土矿床碳酸岩-英碱正长岩锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素性质及其地质意义. 岩石学报, 24(3): 544-554
- 田世洪, 杨竹森, 侯增谦, 刘英超, 高延光, 王召林, 宋玉财, 薛万文, 鲁海峰, 王富春, 苏媛娜, 李真真, 王银喜, 张玉宝, 朱田, 俞长捷, 于玉帅. 2009. 玉树地区东莫扎抓和莫海拉亨铅锌矿床 Rb-Sr 和 Sm-Nd 等时线年龄及其地质意义. 矿床地质, 25(6): 747-758
- 王安建, 曹殿华, 高兰, 王高尚, 管焯, 修群业, 刘俊来. 2009. 论云南兰坪金顶超大型铅锌矿床的成因. 地质学报, 83(1): 43-54
- 王长明, 陈晶源, 杨立飞, 张端, 杜斌, 石康兴. 2017. 三江特提斯兰坪盆地构造-流体-成矿系统. 岩石学报, 33(7): 1957-1977
- 王登红, 屈文俊, 李志伟, 应汉龙, 陈毓川. 2004. 金沙江-红河成矿带斑岩铜钼矿的成矿集中期: Re-Os 同位素定年. 中国科学(D 辑), 34(4): 345-349
- 王峰, 何明友. 2003. 兰坪白秧坪铜银多金属矿床成矿物质来源的铅和硫同位素示踪. 沉积与特提斯地质, 23(2): 82-85
- 王峰. 2004. 云南白秧坪银多金属矿床形成的地球化学机制. 博士学位论文. 成都: 成都理工大学, 1-82
- 王光辉, 宋玉财, 侯增谦, 王晓虎, 杨竹森, 杨天南, 刘燕学, 江迎飞, 潘小菲, 张洪瑞, 刘英超, 李政, 薛传东. 2009. 兰坪盆地连城脉状铜矿床辉钼矿 Re-Os 定年及其地质意义. 矿床地质, 28(4): 413-424
- 王光辉. 2010. 滇西兰坪盆地金满-连城脉状铜矿床成因研究. 硕士学位论文. 昆明: 昆明理工大学, 1-84
- 王京彬, 李朝阳, 陈晓钟. 1992. 金顶铅锌矿床成因新说. 有色金属矿产与勘查, 1(4): 200-206, 256
- 王晓虎, 侯增谦, 宋玉财, 杨天南, 张洪瑞. 2011. 兰坪盆地白秧坪铅锌铜银多金属矿床: 成矿年代及区域成矿作用. 岩石学报, 27(9): 2625-2634
- 王彦斌, 陈文, 曾普胜. 2005. 滇西北兰坪盆地金满脉状铜矿床绢云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄对成矿时代的约束. 地质通报, 24(2): 181-184
- 王彦斌, 韩娟, 曾普胜, 王登红, 侯可军, 尹光侯, 李文昌. 2010. 云南德钦羊拉大型铜矿区花岗岩闪长岩的锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义. 岩石学报, 26(6): 1833-1844
- 魏君奇. 2001. 云南河西铜多金属矿 S、Pb 同位素地球化学. 华南地质与矿产, (3): 36-39
- 温汉捷, 裘愉卓, 张贵山, 杨光树. 2003. 兰坪盆地大规模成矿流体演化的地质地球化学证据. 见: 中国矿物岩石地球化学学会第九届学术年会论文摘要集. 宁波: 中国矿物岩石地球化学学会, 67-68
- 吴南平, 蒋少涌, 廖启林, 潘家永, 戴宝章. 2003. 云南兰坪-思茅盆地脉状铜矿床铅、硫同位素地球化学与成矿物质来源研究. 岩石学报, 19(4): 799-807
- 肖荣阁, 陈卉泉, 帅开业, 杨忠芳. 1994. 云南兰坪金满中生代沉积岩中的铜矿成矿作用. 现代地质, 8(4): 490-496
- 许成, 黄智龙, 刘丛强, 漆亮, 李文博, 管涛. 2003. 四川牦牛坪稀土矿床萤石 Sr、Nd 同位素对地幔成矿流体的指示意义. 地球科学, 28(1): 41-46
- 徐春霞. 2017. 西藏昌都地区沉积岩容矿型 Pb-Zn 矿床的地球化学特征及其成因研究——以拉诺玛和错纳 Pb-Zn 矿床为例. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 1-140
- 徐晓春, 黄震, 谢巧勤, 岳书仓, 刘因. 2004. 云南金满-水泄铜多金属矿床的 Ar-Ar 同位素年代学及其地质意义. 高校地质学报, 10(2): 157-164
- 薛春纪, Chi GX, 陈毓川, 曾荣, 高永宝, Qing HR. 2007. 西南三江兰坪盆地大规模成矿的流体动力学过程——流体包裹体和盆地流体模拟证据. 地学前缘, 14(5): 147-157
- 薛伟, 薛春纪, 池国祥, 石海岗, 高炳宇, 杨寿发. 2010. 滇西北兰坪盆地白秧坪多金属矿床流体包裹体研究. 岩石学报, 26(6): 1773-1784
- 杨晨. 2010. 藏东拉诺玛铅锌多金属矿床成矿物质和成矿流体来源研究. 硕士学位论文. 贵阳: 中国科学地球化学研究所, 1-70
- 杨立飞, 石康兴, 王长明, 吴彬, 杜斌, 陈晶源, 夏锦胜, 陈晶. 2016. 西南三江兰坪盆地金满铜矿床成因研究: 来自铜和硫同位素的联合约束. 岩石学报, 32(8): 2392-2406
- 杨伟光, 喻学惠, 李文昌, 董方浏, 莫宣学. 2003. 云南白秧坪银多金属矿集成矿流体特征及成矿机制. 现代地质, 17(1): 27-33
- 杨喜安, 刘家军, 韩思宇, 张红雨, 罗诚, 汪欢, 陈思尧. 2011. 云南羊拉铜矿床里农花岗岩闪长岩体锆石 U-Pb 年龄、矿体辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义. 岩石学报, 27(9): 2567-2576
- 阳正熙, Williams-Jones AE, 蒲广平. 2000. 四川冕宁牦牛坪稀土矿床地质特征. 矿物岩石, 20(2): 28-34
- 叶庆同, 胡云中, 杨岳清. 1992. 三江地区区域地球化学背景和金银铅锌成矿作用. 北京: 地质出版社, 217-246
- 尹汉辉, 范蔚茗, 林舸. 1990. 云南兰坪-思茅地洼地演化的深部因素及幔-壳复合成矿作用. 大地构造与成矿学, 14(2): 113-124
- 袁忠信, 施泽民, 白鸽. 1995. 四川冕宁牦牛坪稀土矿床. 北京: 地震出版社, 1-10
- 曾荣. 2007. 兰坪盆地流体大规模成矿过程——以金顶和白秧坪矿床为例. 博士学位论文. 西安: 长安大学, 1-109
- 张翀. 2013. 青海沱沱河盆地那日尼亚铅锌矿床成矿作用研究. 硕士学位论文. 南昌: 东华理工大学, 1-75
- 张峰, 唐菊兴, 陈洪德, 杨长青, 李陵, 范小华, 陈生华, 陈文彬, 解惠. 2010. 兰坪盆地演化与盆内成矿流体特征. 矿物学报, 30(2): 223-229
- 张锦让, 温汉捷. 2010. 连城铜钼矿床流体包裹体初步研究. 矿床地质, 29(增1): 623-624
- 张锦让, 温汉捷. 2012. 云南兰坪盆地西缘脉状铜多金属矿床-硫同位素组成及成矿示踪. 地球化学, 41(2): 166-180
- 张锦让, 温汉捷, 秦朝建, 王加昇. 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. 岩石学报, 28(5): 1373-1386
- 张锦让, 温汉捷, 邹胜超, 杜胜江. 2015a. 云南兰坪盆地西缘脉状铜矿床富 CO_2 流体来源的 He 和 Ar 同位素证据. 地球化学, 44

(2): 167 - 177

- 张锦让, 温汉捷, 裘愉卓, 邹志超, 杜胜江. 2015b. 兰坪盆地西缘沉积岩容矿脉状 Cu-Ag(±Pb-Zn) 多金属矿床成矿流体特征. 矿床地质, 34(3): 497 - 520
- 张锦让, 温汉捷, 邹志超. 2016. 兰坪盆地科登洞脉状铜矿床地质、地球化学特征. 岩石矿物学杂志, 35(4): 692 - 702
- 张乾. 1993. 云南金顶超大型铅锌矿床的铅同位素组成及铅来源探讨. 地质与勘探, 29(5): 21 - 28
- 赵海滨. 2006. 滇西兰坪盆地中北部铜多金属矿床成矿特征及地质条件. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学, 1 - 135

- 赵兴元. 1989a. 云南金顶铅锌矿床成因研究. 地球科学-中国地质大学学报, 14(5): 523 - 530
- 赵兴元. 1989b. 云南金顶铅锌矿床稳定同位素地球化学研究. 地球科学-中国地质大学学报, 14(5): 495 - 502
- 朱上庆, 覃功炯, 温春齐, 陈式房. 2000. 金顶超大型陆相碎屑岩铅锌矿床. 见: 涂光炽著. 中国超大型矿床(1). 北京: 科学出版社
- 邹志超. 2013. 白秧坪银铜多金属矿集区成矿流体及成矿机制研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 1 - 128