

“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

宋玉财¹, 侯增谦¹, 杨天南¹, 张洪瑞¹, 杨竹森², 田世洪², 刘英超¹,
王晓虎¹, 刘燕学¹, 薛传东³, 王光辉¹, 李 政⁴

(1. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037;
3. 昆明理工大学, 云南 昆明 650093; 4. 国土资源部信息中心, 北京 100812)

摘 要: “三江”的兰坪、昌都、玉树、沱沱河地区发育丰富的沉积岩容矿贱金属矿床, 构成一条极具成矿潜力的巨型矿化带。综合分析表明, 带内矿床形成于新生代印-亚大陆碰撞环境, 发育在大陆碰撞造山带内部的褶皱-逆冲带内, 与逆冲和走滑构造控制的新生代盆地相伴。不同矿区均发育逆冲断层, 矿体主要赋存于逆冲断层上盘的碳酸盐岩或碎屑岩内, 受与逆冲相关的盐底辟、逆冲断裂的次级断裂、热液溶洞、白云岩化、灰岩破碎、矿前溶洞垮塌、与褶皱有关的密集劈理或断裂等构造或岩相变化控制。金属呈现 Pb-Zn、Pb-Zn(-Cu-Ag)、Cu-Co、Cu 等组合, 其中, Pb-Zn 矿床主要发育闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、±白铁矿、方解石、白云石, 一些矿床富硫酸盐矿物和萤石, 也常见沥青, 矿化以交代和开放空间充填为主; Pb-Zn(-Cu-Ag) 矿床主要发育闪锌矿、细/灰硫砷铅矿、方铅矿、黝铜矿、黄铁矿、方解石、白云石, 矿化以脉体或热液溶洞内交代/开放空间充填式出现; Cu 矿床由石英-方解石/白云石-Cu 硫化物(黄铜矿、黝铜矿、斑铜矿、辉铜矿)脉构成。Pb-Zn 和 Pb-Zn(-Cu-Ag) 矿床成矿流体以低温($<210^{\circ}\text{C}$)和高盐度主体[$w(\text{NaCl}) > 10\%$]的盆地卤水为主, 脉状 Cu 矿床成矿流体可能来自富 CO_2 、具相对高温($180\sim 230^{\circ}\text{C}$)和低盐度[$w(\text{NaCl}) < 11\%$]的变质流体。盆地卤水中硫酸盐遭受细菌还原±有机热还原或仅经历有机热还原, 为 Pb-Zn 和 Pb-Zn(-Cu-Ag) 矿床提供了还原硫, 下伏火山岩和沉积地层中的硫可能是脉状 Cu 矿床硫的来源, 它们的成矿金属物质均来自于上地壳。该带矿床是一套与岩浆活动无关的后生矿床, 以世界上已知的矿床类型来划分, 金顶、赵发涌、东莫扎扒、莫海拉亨和茶曲帕查矿床等 Pb-Zn 矿床及白秧坪东矿带的 Pb-Zn(-Cu-Ag) 矿床可归为类 MVT 矿床, 白秧坪西矿带脉状 Pb-Zn(-Cu-Ag) 矿床和脉状 Cu 矿床可归为多金属脉状矿床。其中, 金顶等类 MVT 矿床以其形成于大陆碰撞带内部、受控于逆冲推覆构造等特点不能被已建立的 MVT 成矿模型所涵盖, 成矿作用独特。

关键词: 沉积岩容矿 贱金属 大陆碰撞 特征 类型 “三江”

中图分类号: P618.4; P618.5; P618.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)03-0355-26

Sediment-hosted Himalayan base metal deposits in Sanjiang region: characteristics and genetic types

SONG Yu-cai¹, HOU Zeng-qian¹, YANG Tian-nan¹, ZHANG Hong-rui¹, YANG Zhu-sen², TIAN Shi-hong²,
LIU Ying-chao¹, WANG Xiao-hu¹, LIU Yan-xue¹, XUE Chuan-dong³, WANG Guang-hui¹ and LI Zheng⁴

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 4. Information Center, Ministry of Land and Resources, Beijing 100812, China)

Abstract: Significant economic sediment-hosted base metal deposits occur in Lanping, Changdu, Yushu and

收稿日期: 2011-03-06; **修订日期:** 2011-03-31

基金项目: 国家科技支撑计划重点资助项目(2006BAB01A08); 国家重点基础研究规划资助项目(2009CB421008, 2009CB421001, 2009CB421007); 国家自然科学基金资助项目(U0933605); 国土资源大调查资助项目(1212010818096)

作者简介: 宋玉财(1978-), 副研究员, 矿物学岩石学矿床学专业, E-mail: songyucui@gmail.com

Tuotuohe areas of Sanjiang region in southwest China. The authors hold that they were formed during Indian-Asian continental collision and developed within the fold-thrust belt combined with thrust and/or strike-slip-related Cenozoic basins in the interior of the collisional zone. Ore bodies are hosted by carbonate and/or clastic rocks as hanging wall of the thrust fault, controlled by thrust-related salt diapir, second-order faults of the thrust fault, syn-ore hydrothermal karst, dolomitization, thrust-related breccias zones in carbonate, pre-ore karst, and fold-related intense cleavages/faults. The metals have Pb + Zn, Pb + Zn (+ Cu + Ag), Cu + Co, or Cu associations in individual ore deposits. Sphalerite, galena, pyrite, $\pm$ marcasite, calcite/dolomite, and bitumen are common in the Pb-Zn deposits whereas sulfates and fluorite are abundant only in some of these ore deposits. The ores exhibit replacement and open-space filling forms. The main minerals in the Pb-Zn(-Cu-Ag) deposits include sphalerite, jordanite, galena, tetrahedrite, pyrite, calcite, and dolomite. They occur in veins or in hydrothermal karst as replacements and open-space fillings. The Cu deposits are composed of quartz + carbonate minerals + Cu sulfides (chalcopyrite, tetrahedrite, bornite and chalcocite) veins. The ore-forming fluids in the Pb-Zn and Pb-Zn(-Cu-Ag) deposits are dominated by basin brines with low temperatures ($<210^{\circ}\text{C}$) and higher salinities [mainly $w(\text{NaCl}) > 10\%$]. The ore-forming fluids are characterized by CO_2 -rich fluids of metamorphic origin having relatively higher temperatures ($180 \sim 230^{\circ}\text{C}$) and lower salinities [$w(\text{NaCl}) < 11\%$] in the Cu veins. Biogenic sulfate reduction $\pm$ thermochemical reduction of sulfate by organic matter might have provided reduced sulfur for most Pb-Zn and Pb-Zn(-Cu-Ag) deposits whereas reduced sulfur in the Cu veins probably originated from volcanic rocks and sedimentary rocks. Upper crustal rocks contributed lead to all ore deposits. The base metal deposits in the Sanjiang region had no apparent affinity with magmatic activity. The authors tend to classify the Jinding, the Zhaofayong, the Dongmohazhua, the Mohailaheng, and the Chaupacha Pb-Zn deposits and the Pb-Zn(-Cu-Ag) deposits in eastern Baiyangping ore belt as MVT-like deposits, and to classify Pb-Zn(-Cu-Ag) veins in western Baiyangping ore belt and the Cu veins as polymetallic veins. Therefore, the Jinding MVT-like deposit, characterized by the tectonic setting of the interior of a continental collisional zone and thrust-controlling, can not be explained by the existing MVT genetic model.

Key words: sediment-hosted; base metal; continent-continent collision; characteristics; type; Sanjiang

大陆-大陆碰撞可以形成多种矿床类型。在大陆碰撞环境下,业已识别出大量与岩浆活动有关的热液矿床,包括斑岩型 Cu(-Mo,-Au) 和斑岩型 Mo 矿床、矽卡岩型 Cu 和 Pb-Zn 矿床、岩浆热液 Sn、Sb(-Au)、Fe-Cu 多金属矿床等(侯增谦等, 2008a; 陈衍景等, 2009; Hou and Cook, 2009)。近来研究显示,大陆碰撞形成的盆-山环境及大规模逆冲推覆/走滑构造十分有利于地壳浅部流体活动,从而形成了一系列以沉积岩为容矿岩石的 Pb-Zn、Pb-Zn(-Cu-Ag)、Cu 等贱金属矿床,其成矿作用显著区别于上述与岩浆活动有关的矿床,构成了大陆碰撞环境成矿谱系中重要的矿床类型分支(Leach *et al.*, 2005; 侯增谦等, 2008b; He *et al.*, 2009; 祝新友等, 2010)。

在我国,新生代印度-亚洲大陆碰撞形成了规模宏大的青藏高原,孕育了丰富的大型、超大型矿床,构成了数条重要的成矿带。其中,以冈底斯和玉龙斑岩型 Cu、哀牢山造山型 Au 等为代表的大型成矿

带已为人所知,而对于沉积岩容矿类型的矿床,人们更多了解的是“三江”南段兰坪盆地内的 Pb-Zn 和 Cu 等贱金属矿床(金顶、白秧坪、金满等),这类矿床到底是仅局限于兰坪盆地内,还是发育在青藏高原更广阔的空间,能否形成具有规模的成矿带,过去很少了解。近年来,我们对“三江”北段(泛指青海南部地区)的成矿地质环境和成矿作用开展了研究,发现其中多个具大型远景的 Pb-Zn 矿床均可以和南段(兰坪盆地)及中段(昌都地区)的矿床类比,由此,侯增谦等(2008b)提出环青藏高原东、北缘的“三江”地区,发育着一条巨型 Pb-Zn-Cu-Ag 贱金属矿化带,是大陆碰撞造山形成的重要矿床类型之一。

关于这条带上的沉积岩容矿贱金属矿床特征,过去报道多集中于兰坪盆地(He *et al.*, 2009, 和其文章)、“三江”北段的资料还是初步积累(侯增谦等, 2008b),同时多数研究是对不同矿床特征的分述,缺乏总体上的对比和总结。近来,随着“三江”北

段研究工作的深入以及对兰坪盆地一些成矿问题的重新认识,使我们有从更广阔空间审视矿床的成矿特点,并从总体上把握矿床的形成规律。本文在综合分析前人数据的基础上,结合最新掌握的资料,深入分析这条巨型成矿带的成矿环境,总结带内不同矿床在容矿围岩和控矿构造、矿石矿化、成矿流体、矿床硫铅同位素等方面共有特点和差别,并以此为基础,讨论成矿时代、成矿流体与物质来源,与世界上类似的矿床进行对比,探讨矿床的成因类型和成矿特色。要强调的是,本文是对该带成矿作用研究的阶段性认识,侧重介绍矿床的基本特征及其与国内外已知矿床类型的异同,关于成矿机制等更深入的研究还待以后进一步探索。

1 成矿地质环境与矿床分布

“三江”地处青藏高原东、北缘,由并流的怒江、澜沧江、金沙江而得名。本文所提及的沉积岩容矿Pb-Zn等贱金属矿床,发育在“三江”南段的兰坪盆地、中段的昌都地区、北段的玉树地区和沱沱河地区,处于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北羌塘和昌都-思茅地块上(图1)。

研究区为一个晚古生代至新生代长期发育的盆地沉积区,地层主要出露自石炭纪以来的沉积岩和火山岩(图1、图2)。总体而言,石炭系-二叠系为海相沉积,三叠系-侏罗系为海相和海-陆交互沉积,白垩纪以来地层为陆相沉积。全区普遍缺失下三叠统,形成中/上三叠统与二叠系的不整合,反映古特提斯阶段的碰撞造山影响全区;另一个重要的区域不整合出现在古近纪地层和白垩纪地层之间,反映了喜马拉雅期碰撞造山对全区的影响。该区自从侏罗纪以来,沉积了巨厚的红色碎屑岩,甚至形成石膏和盐矿,反映了当时由海水或湖水蒸发形成的盐湖分布广泛。由于较低温度($< 200^{\circ}\text{C}$)下搬运Pb、Zn需要高盐度的卤水(Leach *et al.*, 2005),这些盐湖的发育能够提供大量高盐度卤水,十分有利于Pb、Zn的搬运、进而成矿。该区的构造演化历史十分复杂,和金沙江带、龙木错-双湖、班公湖-怒江、

雅江缝合带的演化均可能相关,梳理起来,可粗略概括为:晚石炭世或二叠纪之前(下限未知)为被动陆缘或张性裂谷盆地演化阶段(莫宣学等, 1993; 简平等, 1999; 潘桂棠等, 2003),晚石炭/早二叠世-晚二叠/中三叠世为活动大陆边缘演化阶段(莫宣学等, 1993; 钟大赉, 1998; 牟传龙等, 1999; 谭富文等, 1999; 潘桂棠等, 2003; 朱迎堂等, 2003, 2004; 王毅智等, 2007),早/晚三叠世-白垩纪为洋盆闭合后的碰撞后裂谷盆地或/和前陆盆地、陆内断陷、拗陷盆地演化阶段(朱创业等, 1997; 牟传龙等, 1999; 朱同兴, 1999; 陶晓风等, 2002; 李勇等, 2001, 2002; 潘桂棠等, 2003),新生代以来为与褶皱逆冲或/和走滑拉分有关的盆地演化阶段(牟传龙等, 1999; Wang *et al.*, 2001; 陶晓风等, 2002; Horton *et al.*, 2002; Zhu *et al.*, 2006; 周江羽等, 2011)。

从青藏高原碰撞造山的构造环境上看,矿床空间上与断续展布的古新世-中新世盆地和褶皱-逆冲构造相伴(图1),即为一个碰撞造山带的褶皱-逆冲-盆地发育区,但区别于大型褶皱-逆冲-盆地区:它总体位于碰撞造山带内部而非边缘,盆地的规模较小且非典型前陆盆地,大规模逆冲非单一地向造山带外围推进(Yin and Harrison, 2000; Spurlin *et al.*, 2005; 李亚林等, 2006; He *et al.*, 2009)。研究区古新世-中新世盆地发育,但盆地规模不大,呈狭长带状,在东缘近南北向和北西向、在北缘北西西-南东东向展布,它们的边界往往为逆冲断层,内部充填陆相红色碎屑岩和膏盐建造,在“三江”北段盆地内还夹有火山碎屑岩(周江羽等, 2011)。盆地基底在南段的兰坪-思茅盆地显示为侏罗-白垩纪地层,在中、北段显示为石炭、二叠、晚三叠世地层(图1)。关于盆地性质,许多学者认为前陆盆地(Wang *et al.*, 2001)或走滑拉分盆地(牟传龙等, 1999; 王世锋等, 2002),或前陆盆地和走滑拉分盆地都有出现(陶晓风等, 2002; Zhu *et al.*, 2006),一些学者则直接称其为逆冲挤压和走滑拉分控制的盆地(Horton *et al.*, 2002; 周江羽等, 2011)。该区逆冲构造近N-S或NW-SE走向,常常作为新生代盆地的边界出现,显示出对盆地的控制或破坏。从1:25万^{①②}或1:20万^③地质图上看,逆冲总体似有“对冲”

① 成都理工大学. 2004. 1:25万温泉兵站幅地质图(I46C003002).

② 青海省地质调查院. 2005. 1:25万沱沱河幅地质图(I46C002002).

③ 云南省地质局. 1974. 1:20万兰坪幅地质图(G-47-X VI).

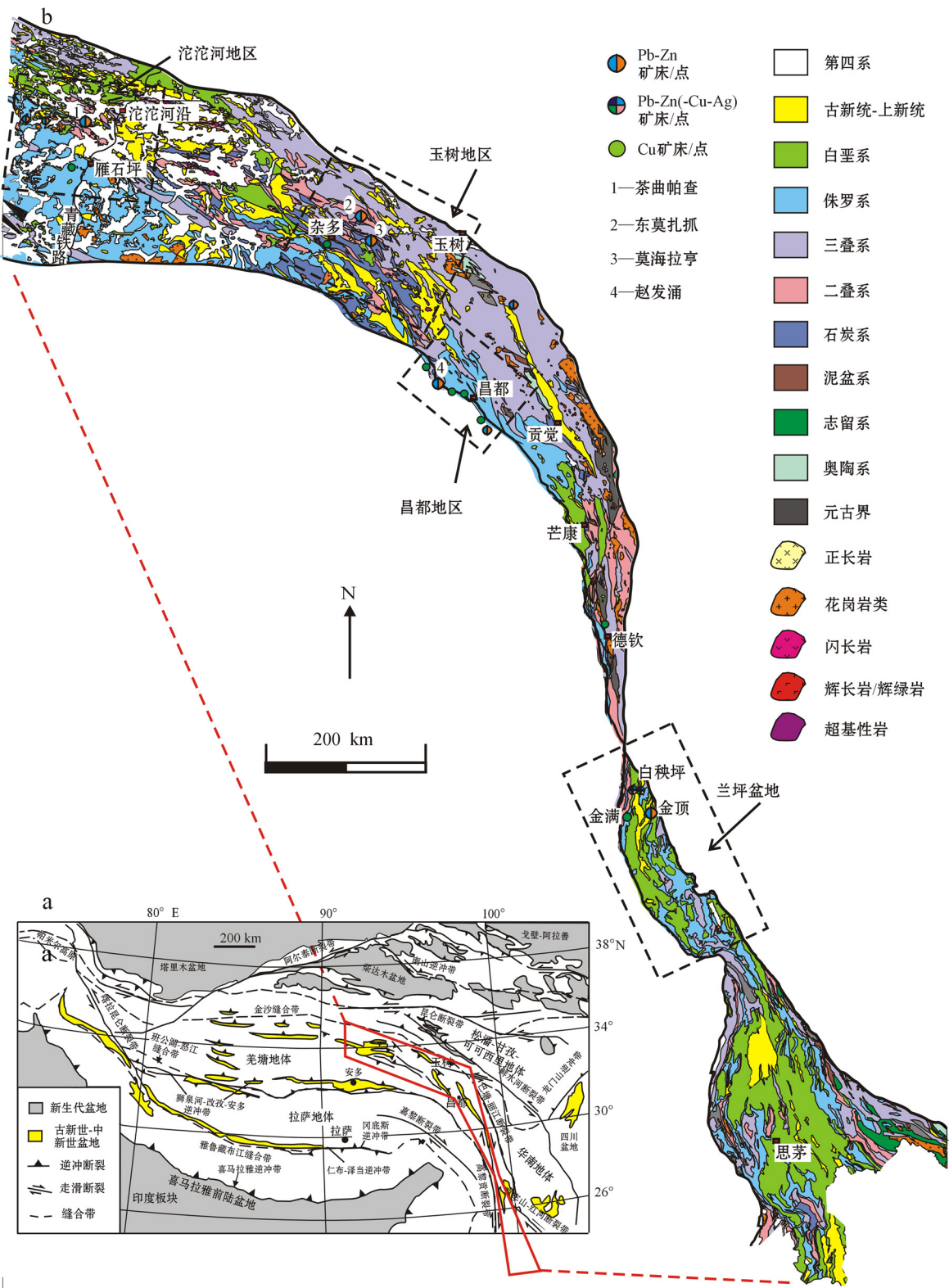


图 1 “三江”喜马拉雅期沉积岩容矿贱金属矿床分布区地质简图[a 据 Wang 等(2001)修改; b 据 1:100 万地质图^①简化]
Fig. 1 Simplified geological map of the Sanjing region showing the distribution of sediment-hosted Himalayan base metal deposits
(a modified after Wang *et al.*, 2001; b simplified after 1:1 000 000 Geological Map^①)

① 中国地质科学院地质研究所, 中华人民共和国地质图(1:100 万)——国际分幅, 未发表.

的特点,即自两侧向中部逆冲,兰坪盆地和昌都地区的构造分析显示了这一点(唐菊兴等, 2006; He *et al.*, 2009)。逆冲也通常显示多期次特征,在兰坪盆地,东部逆冲带大致发育于 ~ 34 Ma和/或 ~ 56 Ma,而西部褶皱-逆冲发育时限不晚于 $48\sim 49$ Ma(王光辉等, 2009)。在玉树地区,逆冲至少发生2次,早于 51 Ma和晚于 23 Ma(Spurlin *et al.*, 2005)。在沱沱河地区,早期冲断发生于 $52\sim 42$ Ma,晚期冲断发生于 $40\sim 24$ Ma(李亚林等, 2006)。

除逆冲构造外,走滑构造也普遍发育,但主要限于高原东缘,目前尚无证据显示其延伸至沱沱河地区。大型走滑断裂很少在新生代盆地内部被识别,它们往往出现在盆地外部,与成矿之间的关系不清楚,但对新生代盆地的发育和区域富碱岩浆活动起着重要控制作用(Wang *et al.*, 2001; Sprulin *et al.*, 2005)。

“三江”沉积岩容矿贱金属矿化带从南到北至少包括4个矿集区,即兰坪、昌都、玉树、沱沱河矿集区。在兰坪盆地,发育有金顶超大型Pb-Zn矿床,主要由北厂、架崖山、蜂子山、跑马坪等矿段构成。盆地北部发育有白秧坪矿集区,其西矿带主要包括白秧坪Cu-Co、富隆厂Pb-Zn-Cu-Ag、吴底厂Pb-Zn、李子坪Pb-Zn矿床,本文将除白秧坪Cu-Co矿床外的其他矿床统称为白秧坪西矿带Pb-Zn(-Cu-Ag)矿床;白秧坪矿集区东矿带指三山-河西一带矿床,主要包括河西Pb(-Sr)矿床、下区五Ag矿床、燕子洞和灰山Pb-Zn-Cu-Ag、华昌山Pb-Zn-Ag、黑山Pb-Zn-Ag等矿床,本文统称为白秧坪东矿带Pb-Zn(-Cu-Ag)矿床。在盆地西部,沿澜沧江一线,分布有金满、连城、科登洞、小格拉、河梅沟等脉状Cu矿床、矿点。在昌都矿集区,发育包括赵发涌一带Pb-Zn矿床在内的大量沉积岩容矿Pb-Zn矿床和Cu矿床(唐菊兴等, 2006)。在玉树矿集区,主要矿床有近来发现的东莫扎抓和莫海拉亨Pb-Zn矿床、吉龙Cu矿化点。在沱沱河矿集区,发育有近来发现的茶曲帕查Pb-Zn矿床,以及纳保扎陇和空介等Pb-Zn矿化点。由此,按照金属元素组合,上述矿床可被划分为Pb-Zn矿床、Pb-Zn(-Cu-Ag)矿床、Cu-Co矿床、Cu矿床,它们的基本特征列入表1。

2 容矿围岩与控矿构造

2.1 容矿围岩

尽管沉积岩容矿的贱金属矿床与新生代沉积盆

地空间相伴(图1),但除个别矿区内新生代地层中出现零星矿化外,新生代地层基本不含矿,矿主体赋存在老于新生代的地层中(表1,图2)。

对于Pb-Zn矿床,这些较老地层以碳酸盐岩最为普遍,其次为钙质砂岩(图2)。在兰坪盆地金顶Pb-Zn矿床,普遍认为矿体赋存于白垩纪景星组钙质细砂岩、古近纪云龙组含灰岩角砾砂岩、晚三叠世灰岩角砾岩内(Xue *et al.*, 2007),但关于砂岩和含灰岩角砾砂岩的时代存在疑问(修群业等, 2006; 王安建等, 2009),我们最新矿区填图的认识也趋向于此,并初步认为原被划为白垩纪景星组的砂岩可能为晚三叠世三合洞组下段(T_3s^1),原被划为古新世云龙组的含灰岩角砾砂岩可能为晚三叠世三合洞组中段(T_3s^2),“真正”的云龙组地层是一套砖红色的泥砾岩、泥岩、粉砂岩(图3),不含矿,故在金顶矿床是否有新生代地层赋矿目前难做定论。在昌都地区,大量的Pb-Zn矿床主要出现在三叠纪碳酸盐岩内(唐菊兴等, 2006)。在玉树地区,东莫扎抓矿床主矿体赋存在晚三叠世波里拉组白云石化灰岩内,局部矿化出现在二叠纪九十道班组灰岩中,莫海拉亨矿床矿体赋存在早石炭世杂多群灰岩中(图3)。在沱沱河地区,茶曲帕查Pb-Zn矿床矿体出现在二叠纪九十道班组生物碎屑灰岩内,不整合于其上的中新世五道梁组泥灰岩局部也见零星的方铅矿矿化(图3)。

对于Pb-Zn(-Cu-Ag)和Cu-Co矿床,在兰坪盆地白秧坪西矿带,其赋矿围岩可以是各种岩性,矿化对围岩性质没有明显的选择性,这与矿化主要受断裂控制有关,它们出现在侏罗纪花开佐组灰岩、泥灰岩、泥岩、砂岩内,或出现在白垩纪景星组钙质砂岩中(图2)。在东矿带,矿化主要出现晚三叠世三合洞组灰岩中(图3),古近纪碎屑岩内局部出现Cu矿化。

对以Cu为主的矿床,主要以红色泥岩、粉砂岩、砂岩为赋矿围岩(图2),其中以出现在侏罗纪碎屑岩中最为典型和普遍(表1)。

2.2 控矿构造

该区贱金属矿床受逆冲推覆及相关构造控制,矿体多出现在逆冲断裂附近(距离断裂面 < 500 m,个别稍远),特别是断裂上盘,是矿体主要赋存位置(图3),但不同矿床控制矿体定位的构造(容矿构造)又有差别。

在金顶矿床,我们最新填图反映矿体产于逆冲推覆岩片中,矿体的上、下边界均为逆冲断层(图3),

表 1 “三江”喜马拉雅期主要沉积岩容矿贱金属矿床、矿点及基本特征

Table 1 Major Himalayan sediment-hosted base metal deposits in Sanjiang region and their basic features

矿床/矿点	金属组合	储量	平均品位	围岩	主要矿物
兰坪盆地	金顶	Zn: 12.84 Mt ^a Pb: 2.64 Mt ^a	Pb: 1.16%~2.42% ^a Zn: 8.32%~10.52% ^a	晚三叠世三合洞组(?)钙质砂岩、晚三叠世三合洞组(?)含灰岩角砾砂岩、灰岩角砾岩(未知时代)	方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、白铁矿、方解石、天青石、石膏
	河西		/	晚三叠世三合洞组碳酸盐岩	方铅矿、天青石
	下区吾		Ag: 23.32~220.07 g/t ^b	晚三叠世三合洞组白云岩、古近纪碎屑岩	黝铜矿、蓝铜矿、辉银矿、黄铁矿
	燕子洞	Pb-Zn-Cu-Ag	Pb: 1.95% ^b Zn: 2.41% ^b Cu: 1.11%~1.81% ^b Ag: 165~189 g/t ^b	晚三叠世三合洞组白云岩(赋存 Pb-Zn)、古近纪碎屑岩(赋存 Cu)	闪锌矿、细硫砷铅矿、天青石; 砷黝铜矿、辉铜矿、黄铁矿、方解石、白云石、重晶石
白秋坪东矿带	华昌山	Zn+Pb: >0.5 Mt ^b Ag: >3000 t ^b	Pb: 1.46% ^b Zn: 1.60% ^b Ag: 15.8 g/t ^b	晚三叠世三合洞组白云质灰岩	闪锌矿、细硫砷铅矿、方解石
	灰山	Cu: ~0.3 Mt ^b	Pb: 3.55% ^b Zn: 2.36% ^b Ag: 114.9 g/t ^b	晚三叠世三合洞组白云质灰岩	闪锌矿、细硫砷铅矿、方解石、萤石
黑山			Pb: 1.27% ^b Zn: 3.39% ^b Ag: 23.3 g/t ^b	晚三叠世三合洞组白云质灰岩	闪锌矿、细硫砷铅矿、方解石
	白秋坪	Cu: 0.12 Mt ^b	Cu: 0.86%~3.3% ^b Co: 0.10%~0.27% ^b	早白垩世景星组砂岩、粉砂岩	黝铜矿、砷黝铜矿、辉铜矿、辉砷钴矿、辉砷镍矿、含钴毒砂、黄铁矿、石英、方解石、重晶石
白秋坪西矿带	富隆厂	/	Pb: 4.2%~7.4% ^b Zn: / Cu: 0.63%~11.70% ^b Ag: 328%~547 g/t ^b	早白垩世景星组砂岩、粉砂岩	闪锌矿、细硫砷铅矿、黝铜矿、砷黝铜矿、辉银矿、汞银矿、黄铁矿、方铅矿、方解石/铁白云石
	吴底厂	/	Pb: 4.2%~10.4% ^b Zn: 12.2%~15.33% ^b	中侏罗世花开佐组泥岩、泥灰岩、砂岩	闪锌矿、细硫砷铅矿、黄铁矿、方解石/铁白云石
李子坪	Pb-Zn	/	/	中侏罗世花开佐组灰岩、泥岩、砂岩	闪锌矿、细硫砷铅矿、黄铁矿、方解石/铁白云石
	河梅沟	/	/	中侏罗世花开佐组紫红色砂岩、泥岩	黄铜矿、黄铁矿、白云石、菱铁矿
松坪子	Cu	/	/	中侏罗世花开佐组紫红色砂岩、泥岩	黄铜矿、砷铜矿、黄铁矿、菱铁矿、重晶石

续表 1
Continued Table 1

矿床/矿点	金属组合	储量	平均品位	围岩	主要矿物
金满	Cu	Cu: 0.2 Mt ^c	Cu: 0.65%~12.0% ^c	中侏罗世花开佐组紫红色砂岩、泥岩、砂板岩	黝铜矿、黄铜矿、黄铜矿、辉铜矿、石英、方解石
连城	Cu-(Mo)	/	1.45%~2.07% ^d	中侏罗世花开佐组紫红色砂岩、泥岩、砂板岩	黝铜矿、黄铜矿、黄铜矿、辉铜矿、石英、方解石
小格拉	Cu	/	/	石炭纪石炭群板岩	辉铜矿、黝铜矿、石英、方解石
科登洞	Cu	/	Cu: 1.3%~5.5% ^d	石炭纪石炭群中性火山岩、中侏罗世花开佐组紫红色砂岩、泥岩	黄铜矿、黝铜矿、石英、方解石
玉树地区 (仅介绍 笔者的 考察的)	赵发涌	Pb-Zn Zn+Pb: 0.56 Mt (远景)	Pb: 10.76%~12.56% Zn: 10.98%~12.35%	二叠纪甲不拉组灰岩, 二叠系里查组厚层灰岩	方铅矿、菱锌矿、黄铁矿、白铁矿、方解石、重晶石、沥青
	加藤山	Pb-Zn /	Pb: 15.7%~18.6% Zn: 10.4%~13.4%	三叠纪波里拉组灰岩	方铅矿、菱锌矿、黄铁矿、自然硫、方解石、重晶石
	拉脱拉	Pb-Zn /	/	三叠纪甲不拉组灰岩、砂质灰岩	菱锌矿、方铅矿、黄铁矿、硫磺、萤石、重晶石、菱铁矿、方解石、沥青
	堆拉	Cu /	/	石炭纪卡黄组变质砂岩, 千枚岩夹结晶灰岩 (大理岩)	黄铜矿、黄铁矿、黝铜矿、镜铁矿、石英、方解石、绢云母
	东莫扎抓	Pb-Zn Zn+Pb: >0.8 Mt(远景) ^e	Zn: 2.10%~2.62% ^e Pb: 0.76%~1.49% ^e	晚三叠世波里拉组碳酸盐岩, 局部晚二叠世九道班组碳酸盐岩	闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、白云石、重晶石、方解石、沥青
玉树地区	莫海拉亨	Pb-Zn /	/	早石炭世杂多群碳酸盐岩	闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、萤石、方解石
	吉龙	Cu /	/	早石炭世杂多群碳酸盐岩	黄铜矿、黝铜矿、黄铁矿、方解石、石英
	茶曲帕查	Pb(-Zn) Pb+Zn: 0.996 Mt (远景) ^f	Pb: 0.7%~1.0% ^f	主体晚二叠世九道班组碳酸盐岩; 局部中新世五道梁组泥灰岩	方铅矿、黄铁矿、方解石、少量闪锌矿和沥青
沱沱河地区	纳保扎陇	Pb /	/	晚三叠世甲不拉组灰岩	方铅矿、黄铁矿、方解石

注: “/”表示没有相关信息; a 据刘增乾等(2003); b 据陈开旭(2006); c 据赵海滨(2006); d 据云南省地质局, 1974, 1:20 万兰坪幅区域地质调查报告(矿产部分), 1~76, 内部资料; e 据青海省地质调查院, 2007, 青海省杂多县东莫扎抓铅锌银矿普查设计书, 1~78, 内部资料; f 据青海省第五地质调查西藏那曲安多县多才玛多金属矿普查 2009 年年报, 1~8, 内部资料。

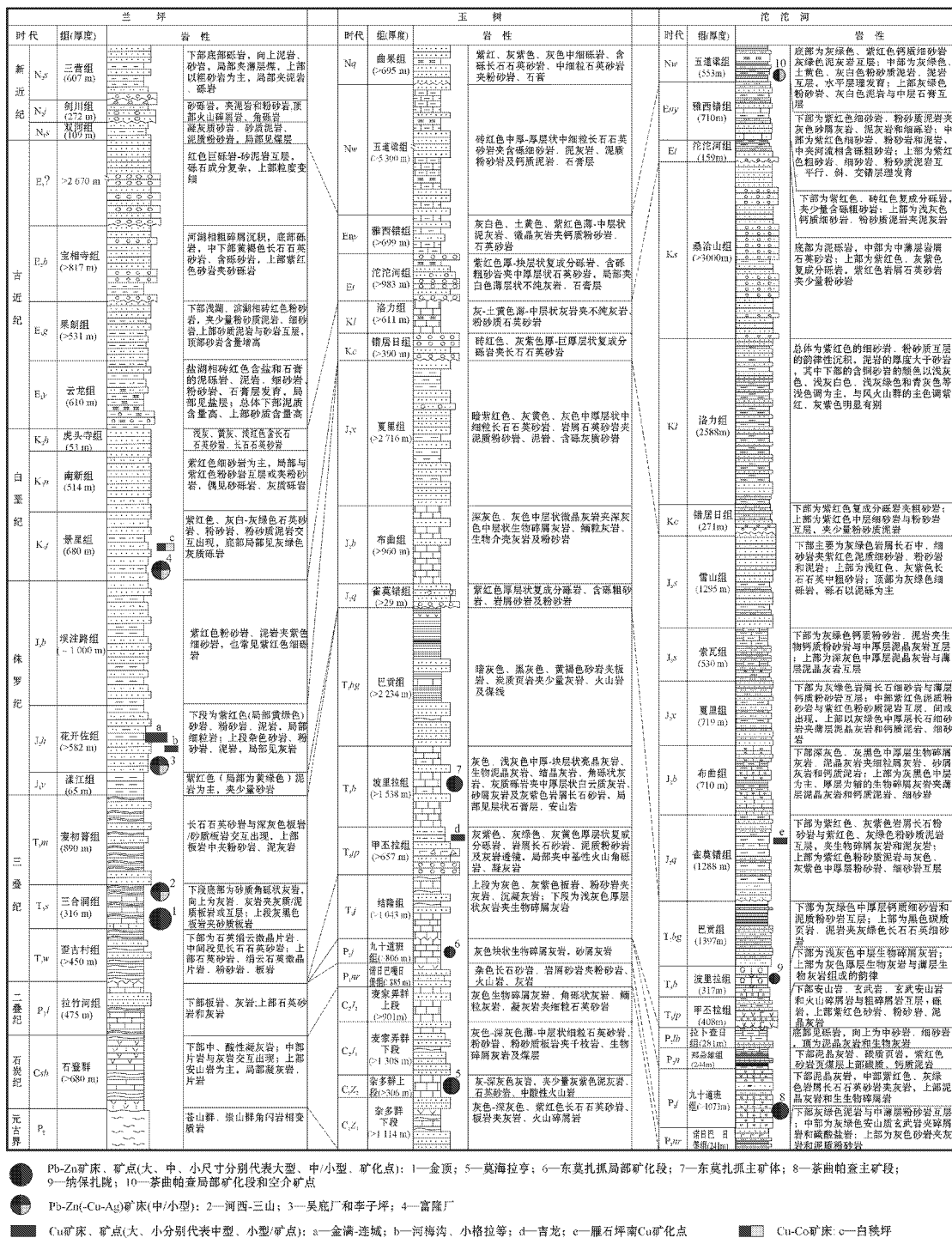


图 2 兰坪盆地、玉树地区、沱沱河地区地层柱状图 (据 1:20 万兰坪幅区域地质调查报告^①、1:25 万治多县幅^②和杂多县幅^③区域地质调查报告及 1:25 万温泉兵站幅地质调查报告^④修改)

Fig. 2 Stratigraphic columns of Lanping basin, Yushu and Tuotuohe areas (after geological surveying reports of 1:200 000 Lanping sheet^① and 1:250 000 Zhiduo^②, Zaduo^③ and Wenquanbingzhan^④ sheets)

① 云南省地质局. 1974. 1:20 万兰坪幅区域地质调查报告 (G-47-X VI).

② 青海地质调查院. 2006. 1:25 万治多县幅区域地质调查报告 (I46C003004).

③ 青海地质调查院. 2006. 1:25 万杂多县幅区域地质调查报告 (I46C004004).

④ 成都理工大学. 2004. 1:25 万温泉兵站幅区域地质调查报告 (I46C003002).

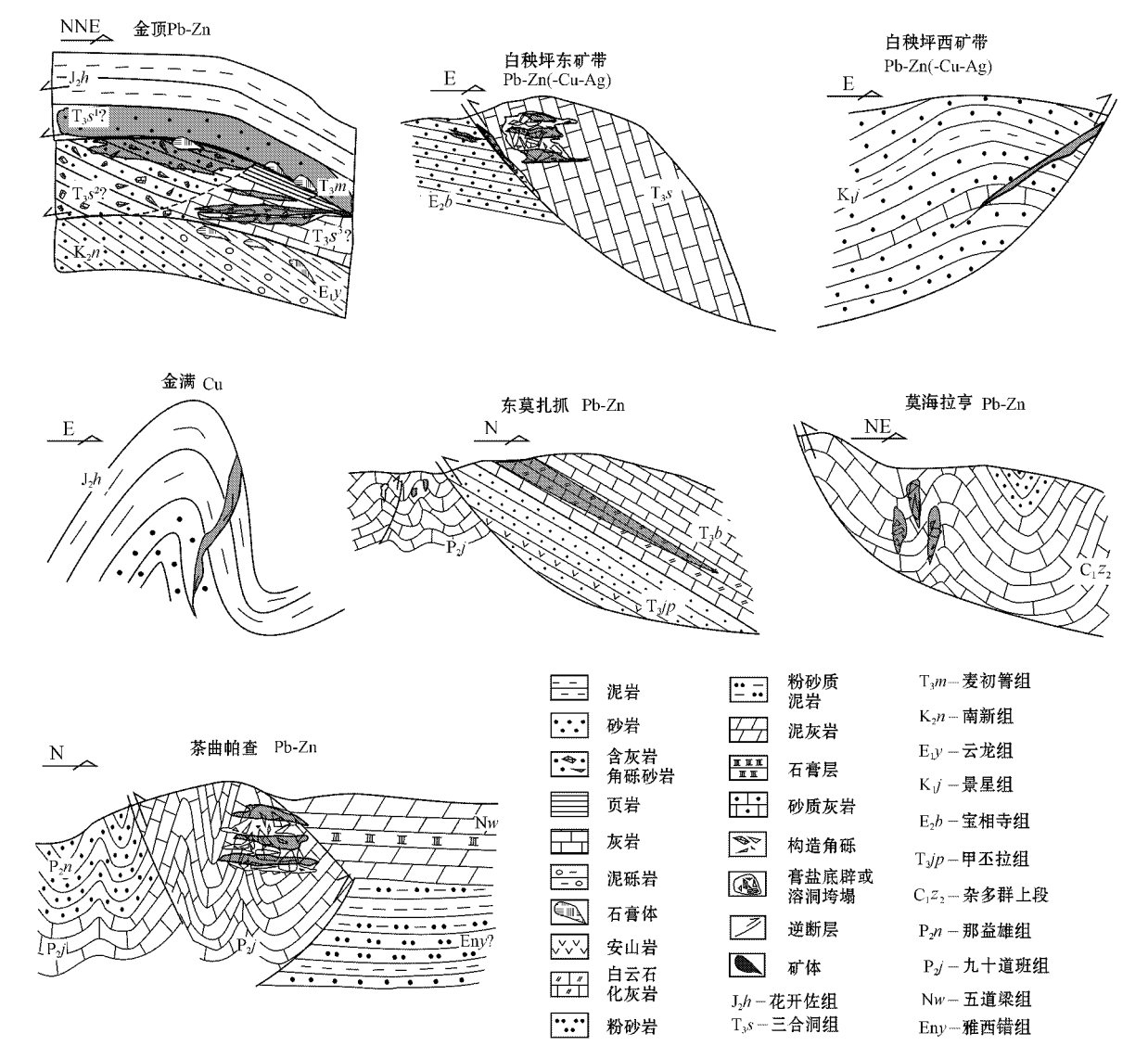


图 3 “三江”喜马拉雅期主要沉积岩容矿贱金属矿床的容矿围岩和控矿构造示意图

Fig. 3 Sketch maps showing host rocks and ore-control structures of major sediment-hosted Himalayan base metal deposits in Sanjiang region

白秧坪西矿带矿床出现在四十里箐逆冲断裂上盘(图 3),东矿带河西—三山矿床主要出现在华昌山逆冲断裂上盘(图 3),赵发涌一带矿床/点就分布在一 条区域性逆冲断裂的上盘和下盘,莫海拉亨、东莫扎 抓、茶曲帕查矿床均出现逆冲断裂的上盘(图 3)。然 而,矿体很少直接赋存在逆冲断裂内,而是直接容矿 于其他一些构造中。对于金顶矿床,矿体边界以逆 冲断裂为界,但矿化与逆冲推覆引起的盐底辟构造 密切相关,宏观来看,矿区穹窿是逆冲推覆引起的盐 底辟的结果,局部来看,底辟角砾或底辟后盐溶角砾 是矿化的重要部位(图 3、图 4a)。对于白秧坪西矿 带的矿床,矿体呈脉状赋存在逆冲断裂伴生的次级

断裂或伴随逆冲的“平推”断裂中(图 3、图 4b),容矿 断裂往往陡倾。对于白秧坪东矿带的矿床,矿化主 要受热液溶洞构造控制,可见天青石伴生方铅矿呈 近水平层状与泥质交互“沉积”在溶洞中(图 3、图 4c),或见闪锌矿伴生泥质作为胶结物胶结灰岩角 砾。赵发涌一带矿床/点赋存于成矿期热液垮塌角砾 岩中,东莫扎抓矿床矿体主要赋存在白云岩化灰岩 段,局部矿化出现在褶皱或逆冲有关的构造裂隙中, 莫海拉亨矿床出现在灰岩中的构造破碎带内(图 3), 茶曲帕查矿床受矿前溶洞垮塌构造控制(图 3、图 4d)。

对于 Cu 矿床,从兰坪盆地看,主要分布在澜沧 江断裂带附近,因此其一级构造控制可能是深大断

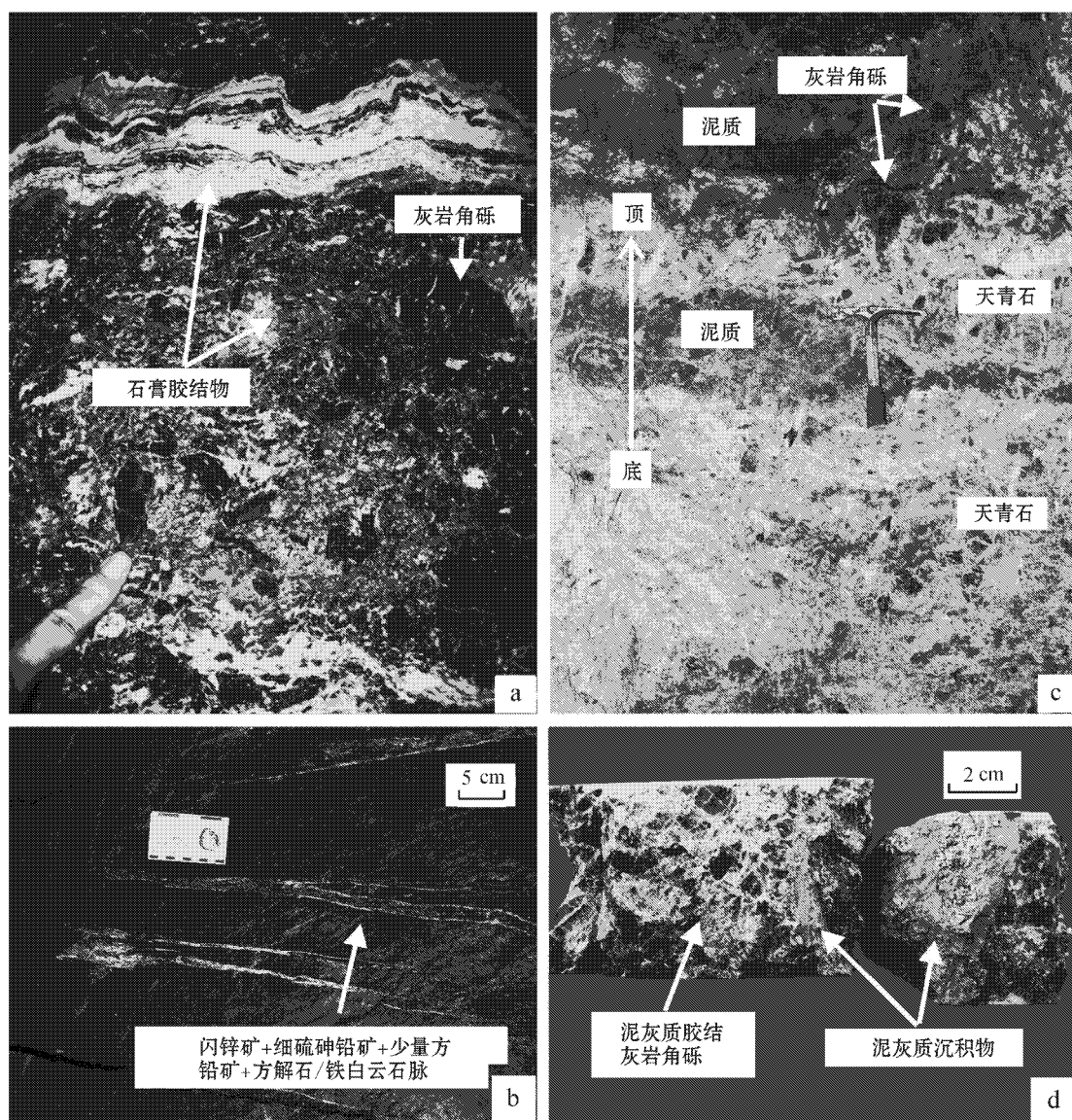


图4 “三江”喜马拉雅期沉积岩容矿贱金属矿床的几种容矿构造

Fig. 4 Some ore-hosting structures for the base metal deposits in Sanjiang region

a—膏盐底辟构造,见石膏胶结灰岩角砾,金顶矿床跑马坪矿段; b—断裂构造,白秧坪西矿带李子坪矿床; c—热液溶洞垮塌构造,见近水平层状的泥质、热液天青石、灰岩角砾堆积在灰岩溶洞中,白秧坪东矿带河西矿床; d—矿前溶洞垮塌构造,见泥灰岩胶结灰岩角砾并与具沉积层理的泥灰岩伴生,茶曲帕查矿床

a—gypsum cementing limestone fragments, indicating a salt-diapir structure, Paomaping ore block, Jinding; b—fault, Liziping, western Baiyangping ore belt; c—argillaceous materials, hydrothermal celestine, and limestone fragments filled in a cave within limestone, indicating a hydrothermal karst, Hexi, eastern Baiyangping ore belt; d—marl cementing limestone fragments which coexists with sedimentary marl, denoting a pre-ore karst, Chaqupacha

裂,但发育在紧密褶皱一翼(一般为倒转翼)的密集劈理带或断裂控制着矿体就位,即逆冲早期的褶皱变形导致的劈理/断裂是容矿构造(王光辉等, 2009)。

3 矿石矿化

在贱金属矿化带内,构成Pb-Zn矿床矿石的原

生热液矿物相对简单,以方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、方解石、白云石为主,几乎所有矿床中见有干沥青。此外,许多矿床会出现少量白铁矿、石英及粘土矿物,个别矿床发育天青石、重晶石、萤石、石膏。通常,热液矿化早期出现石英、黄铁矿、±白云石,中期出现闪锌矿+方铅矿±方解石±黄铁矿±天青石±重晶石±萤石,为主矿化期,晚期可能再次出现方解石和黄铁矿。沥青往往单独出现在围岩内,与其他热液矿物的世代关系不明,或出现在主矿化期的晚阶段。在 Pb-Zn 矿床中,以灰岩为容矿岩石的,多呈交代灰岩角砾胶结物或胶结灰岩角砾矿化形式,这些角砾可以是膏盐底辟或盐溶形成、也可以是热液溶解、溶洞垮塌、断裂破碎所致,但在金顶的砂岩和东莫扎抓的白云岩化灰岩中,矿化呈浸染状。除此之外,细脉状的矿化几乎在每个矿床都有出现,但不是主要矿化形式,对矿量的贡献有限。

其中,金顶矿床主要出现两种矿化,一是在石英砂岩和含灰岩角砾砂岩内,闪锌矿、方铅矿、黄铁矿呈浸染状出现在砂岩的钙质胶结物中,矿化强烈时呈稠密浸染状(图 5a),以致形成对钙质胶结物的完全交代(Xue *et al.*, 2007),同时,镜下观察显示一些方铅矿是充填在石英和早期黄铁矿颗粒之间的热膨胀裂隙中(Liu *et al.*, 2010);二是在灰岩角砾岩中,方铅矿、闪锌矿、黄铁矿与天青石交代原来胶结灰岩角砾的石膏+砖红色泥质物质+方解石(图 5b),当交代强烈以致完全溶解胶结物便形成开放空间充填形式矿化,形成胶状结构(图 5c),这类矿石内见有沥青和热液石膏伴生,充填在热液天青石留下的孔洞内,为矿化的最晚阶段形成(图 5c)。昌都赵发涌矿床原生硫化物以方铅矿为主(锌主要以菱锌矿形式出现),伴有黄铁矿、白铁矿、方解石、重晶石、沥青,和拉拢拉和加膜山矿床的矿物组成相似,但后者不发育白铁矿,而出现硫磺、萤石、菱铁矿等矿物,目前对其矿化的具体形式还不清楚。在东莫扎抓矿床主矿体(MI 矿体),白云岩化灰岩出现斑点状的褐铁矿矿化(图 5d),镜下观察显示,褐铁矿矿化的原生矿物为黄铁矿,闪锌矿和方铅矿围绕黄铁矿生长在白云石间的孔隙内,在该矿床内,另外一种矿化是粗晶的闪锌矿和方铅矿胶结白云石化灰岩角砾(图 5e)或粗晶的闪锌矿、方铅矿、黄铁矿与重晶石伴生呈脉状出现在构造裂隙中。在莫海拉亨矿床,矿化形式为闪锌矿+方铅矿+方解石+萤石胶结灰岩角砾(图 5f)。东莫扎抓和莫海拉亨两个矿床都发育有沥青,

但出现在围岩地层中,与矿化的关系不清楚。在茶曲帕查矿床,矿化主要为方铅矿+方解石±少量重晶石交代灰岩角砾间的泥灰质胶结物(图 5g、5h)或出现在完整的灰岩内,热液矿物有时形成未被物质充填的孔洞(图 5h),另外也见脉状方铅矿±黄铁矿和浸染状方铅矿出现在灰岩和上覆于灰岩之上的泥灰岩地层中,沥青出现在和黄铁矿±闪锌矿伴生的方解石脉中,该期脉和主要的方铅矿矿化关系不清楚。

Pb-Zn(-Cu-Ag)矿床和 Cu-Co 矿床原生金属矿物种类复杂多样(见下述),一般热液矿化早期出现无矿方解石±石英,中期为各种金属硫化物+方解石/铁白云石组合,晚期出现无矿方解石。矿石类型相对简单,白秧坪矿床西矿带的 Pb-Zn(-Cu-Ag)和 Cu-Co 矿床矿体均呈脉状,典型如图 4b 所示,在手标本尺度,矿石呈胶结围岩角砾状(图 5i)、块状等特点,白秧坪矿床东矿带的 Pb-Zn(-Cu-Ag)矿床,手标本尺度的原生矿石常呈块状(图 5j)。

其中,在白秧坪西矿带,吴底厂和李子坪矿床以闪锌矿、细/灰硫砷铅矿、方解石/铁白云石为主,见少量方铅矿、雄黄、雌黄、黄铁矿、石英;富隆厂矿床也以闪锌矿、细硫砷铅矿、方解石/铁白云石为主,同时伴有黝铜矿、砷黝铜矿、黄铁矿、方铅矿、少量石英,陈开旭等(2004a)还鉴定有辉银矿、汞银矿,认为其为主要载 Ag 矿物;白秧坪 Cu-Co 矿床则以黝铜矿、砷黝铜矿、辉铜矿、辉砷钴矿、硫钴镍矿、含钴毒砂为主,前两者为主要含 Cu 矿物,陈开旭等(2004a)认为后三者为主要含 Co 矿物,热液脉石矿物主要是石英、天青石、方解石、重晶石(薛春纪等, 2003)。在东矿带,河西矿床主要矿物为方铅矿、天青石;燕子洞矿床 Pb-Zn 矿石主要由闪锌矿、细/灰硫砷铅矿、天青石构成,Cu 矿石一般为含铜氧化物,田洪亮(1998)报道其原生矿物为砷黝铜矿、辉铜矿、黄铜矿等,并伴有方解石、白云石、重晶石、石英等热液脉石矿物;灰山、黑山、华昌山等矿床矿石主要由闪锌矿、细/灰硫砷铅矿、方解石构成,伴有黄铁矿,在灰山见有萤石,陈开旭等(2004a)报道了未定名的铅、锑、砷硫盐矿物,认为其是主要的载银矿物。此外,在整个白秧坪矿集区内,刘家军等(2010)还鉴定有其他一些富含 As、Ni、Sb、Bi 的原生矿物。

Cu 矿床矿物组合相对简单,包括石英、方解石、铁白云石、绢云母、黄铜矿、黝铜矿、辉铜矿、斑铜矿。其矿体和矿石均呈脉状,一般矿化前为无矿石英脉

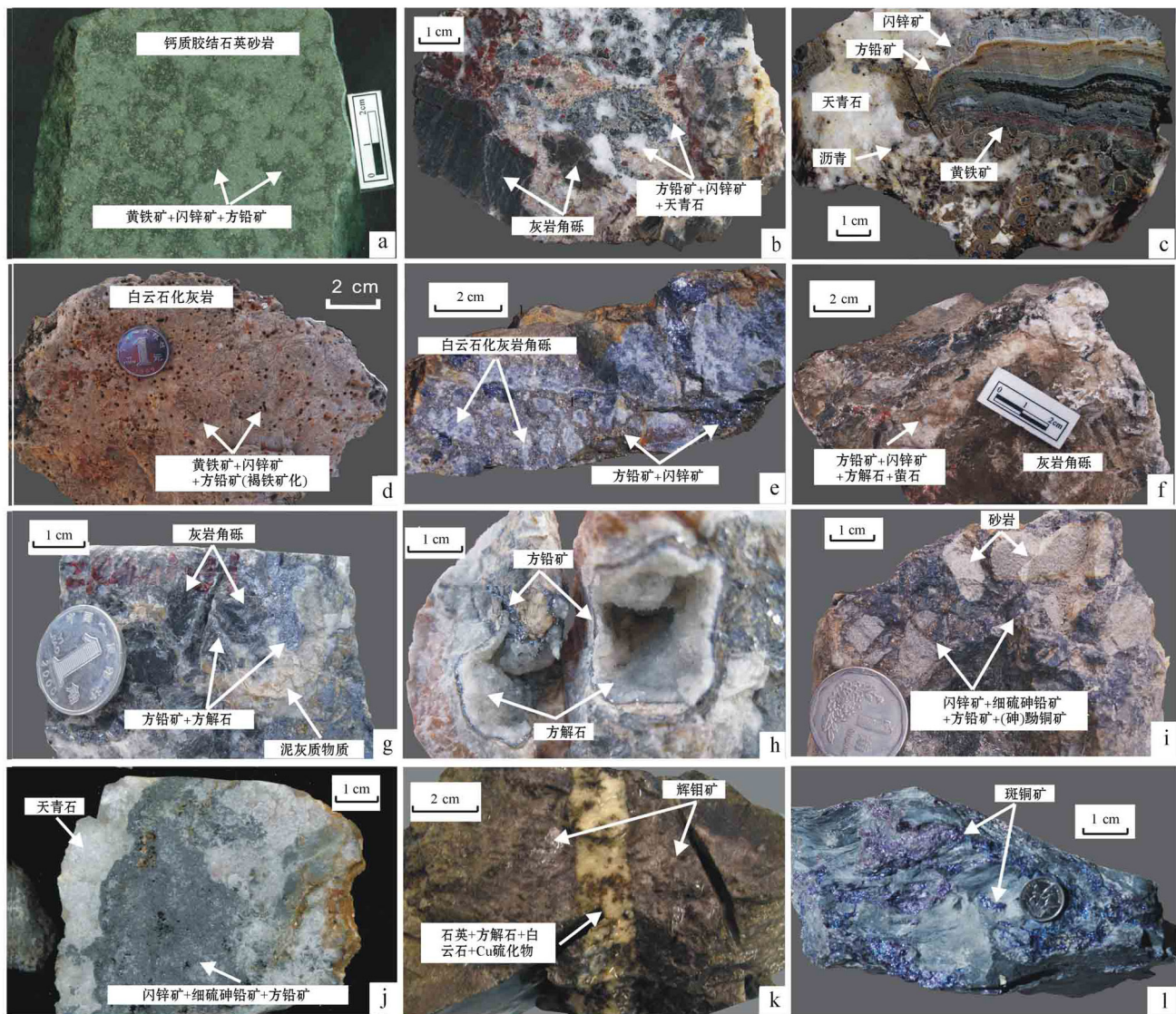


图 5 “三江”喜马拉雅期沉积岩容矿贱金属矿床的一些典型矿石

Fig. 5 Some typical ores from the base metal deposits in Sanjiang region

a—石英砂岩发生稠密浸染状矿化, 金顶北厂矿段; b—热液矿物不完全交代灰岩角砾胶结物, 金顶架崖山矿段; c—胶状矿化, 金顶架崖山矿段; d—白云岩化灰岩内的浸染状矿化; e—硫化物胶结白云岩化灰岩角砾, 东莫扎抓; f—热液矿物胶结灰岩角砾, 莫海拉亨; g—热液矿物不完全交代灰岩角砾间的泥灰质胶结物, 茶曲帕查; h—方铅矿和方解石形成孔洞构造, 茶曲帕查; i—断裂破碎带内硫化物胶结砂岩角砾, 白秧坪西矿带富隆厂; j—热液溶洞内的块状矿化, 白秧坪东矿带燕子洞; k—含铜硫化物脉切穿早期弥漫状辉钼矿, 连城; l—泥岩中近“纯”的斑铜矿矿化, 金满

a—intense disseminated mineralization in sandstone, Beichang ore block, Jinding; b—partial replacement of cements between limestone gravel fragments, Jiayashan ore block, Jinding; c—colloform texture, Jiayashan ore block, Jinding; d—disseminated mineralization in dolomitized limestone; e—sulfides cementing dolomitized limestone gravel, Dongmohazhua; f—hydrothermal minerals cementing limestone gravel fragments, Mohailaheng; g—partial replacement of marl cementing limestone gravel fragments, Chaqupacha; h—vug-filling galena and calcite, Chaqupacha; i—sulfides cementing sandstone fragments in a fault, Fulongchang, western Baiyangping ore belt; j—massive mineralization in hydrothermal karst, Yanzidong, eastern Baiyangping ore belt; k—Cu sulfides-bearing vein penetrating dusty molybdenite, Liancheng; l—nearly pure bornite in mudstone, Jinman

±黄铁矿, 成矿期为石英+方解石/铁白云石+Cu硫化物脉(图 5k), 晚期为无矿方解石脉。矿脉宽从几厘米到几十厘米不等, 通常脉越宽, Cu 硫化物的含量越低。此外, 在富有机质的泥岩中, Cu 硫化物

往往少有热液脉石矿物伴生而独立出现(图 5l)。在连城矿床, Cu 矿化之前, 还见发育有 Mo 矿化, 见弥漫状辉钼矿被含 Cu 硫化物脉切穿(图 5k), 但 Mo 矿体的形态不清楚。

“三江”沉积岩容矿贱金属矿床,除脉状 Cu 矿床外,其他矿床的围岩蚀变不强,主要是碳酸盐化和黄铁矿化,有时出现弱的硅化,有些矿区出现粘土化和较强的天青石、重晶石、萤石化,蚀变分带不明显。对于脉状 Cu 矿,蚀变主要是绢云母化,导致紫红色的围岩发生“褪色”。

4 成矿流体

根据流体组分划分,“三江”沉积岩容矿贱金属

矿床主要发育两种类型流体包裹体,一类为盐水包裹体,室温下由液相水溶液相(L_{H_2O})和气相水溶液相(V_{H_2O})构成(图 6a、6b),另一类为富 CO_2 盐水包裹体,室温下由液相水溶液相(L_{H_2O})和 CO_2 相($V_{CO_2} \pm L_{CO_2}$)构成(图 6c、6d)。其中 Pb-Zn 矿床基本均以盐水包裹体为主,但在金顶矿床(Xue *et al.*, 2007)和莫海拉亨矿床(图 6c)还出现有富 CO_2 盐水包裹体;Pb-Zn(-Cu-Ag)矿床也以盐水包裹体为主;脉状 Cu 矿床则为典型的富 CO_2 盐水包裹体(图 6d)。

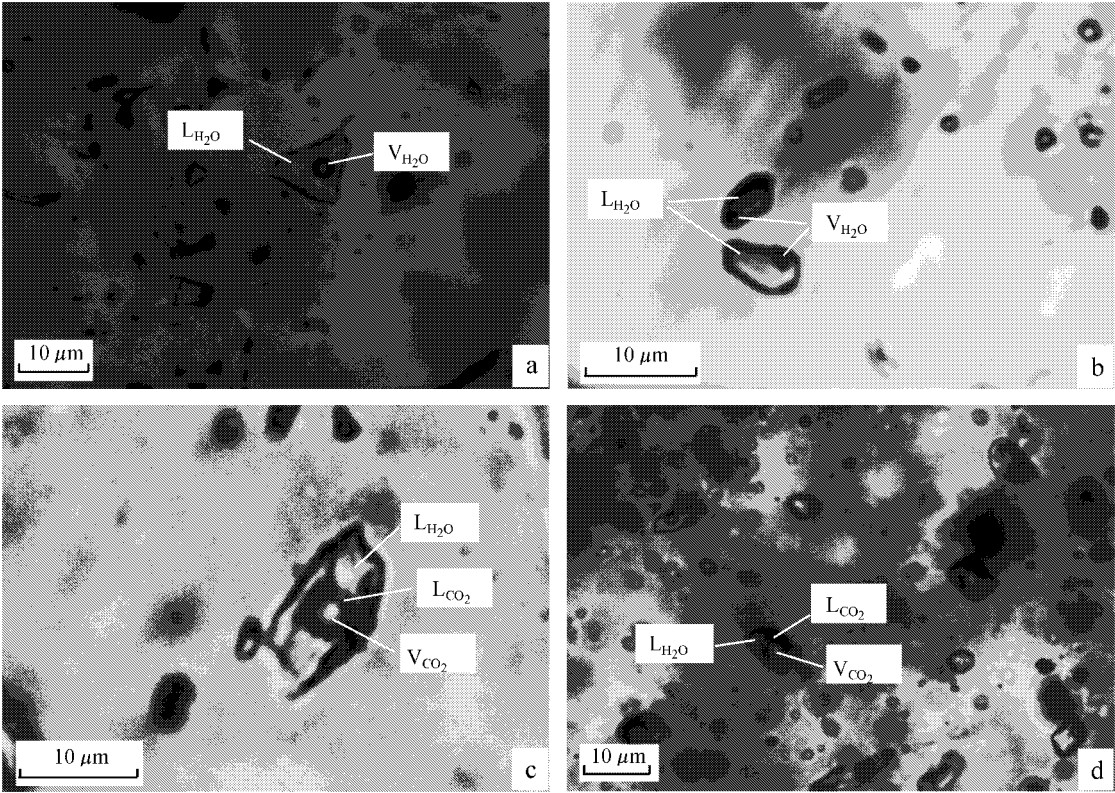


图 6 “三江”喜马拉雅期沉积岩容矿贱金属矿床发育的主要流体包裹体类型

Fig. 6 Major fluid inclusion types in the base metal deposits of Sanjiang region

a—盐水包裹体,茶曲帕查;b—盐水包裹体,白秧坪西矿带吴底厂;c—含 CO_2 盐水包裹体,莫海拉亨;d—不同 CO_2 相比例的含 CO_2 盐水包裹体共生,显示不混溶捕获,连城
a— H_2O -NaCl inclusion, Chaqupacha;b— H_2O -NaCl inclusion, Wudichang, western Baiyangping ore belt;c— H_2O -NaCl- CO_2 inclusion, Mohailaheng;d—Coexistence of fluid inclusions having variable CO_2 volumetric fraction, indicative of immiscible trapping of fluids, Liancheng

考虑到对成矿流体的代表性,这里只总结已发表的 Pb-Zn 及 Pb-Zn(-Cu-Ag)矿床中闪锌矿内的流体包裹体测温数据(陈开旭等,2004b;Xue *et al.*, 2007;刘英超等,2010;薛伟等,2010),并实测了莫海拉亨 Pb-Zn 矿床闪锌矿内、金满和连城 Cu 矿床伴生

Cu 硫化物的石英内的流体包裹体,获得的温度和盐度数据显示在图 7 中。其中,金满和连城矿床成矿流体由于出现沸腾现象,包裹体数据复杂,详细的解释在他文中给出,本文只给出计算最终获得的包裹体捕获的温度和盐度范围。

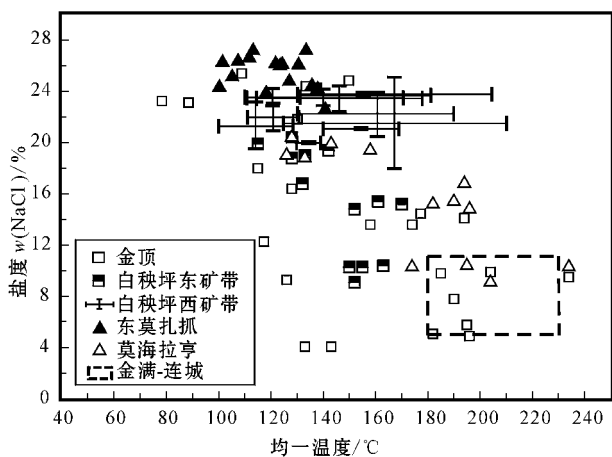


图 7 流体包裹体的盐度-温度图解(除金满-连城矿床数据来自石英中的包裹体外,其他矿床数据均来自闪锌矿中的包裹体。其中,金顶矿床数据引自 Xue *et al.*, 2007; 白秧坪东矿带数据引自陈开旭等, 2004b; 白秧坪西矿带数据引自薛伟等, 2010; 东莫扎扎数据引自刘英超等, 2010; 莫海拉亨和金满-连城数据来自本文)

Fig. 7 Diagram of salinity versus homogenization temperature (data obtained from fluid inclusions in quartz intergrowing with Cu-bearing sulfides for the Jinman-Liancheng deposit and data derived from fluid inclusions in sphalerite for other deposits. Jinding data from Xue *et al.*, 2007; data of eastern Baiyangping ore belt from Chen *et al.*, 2004b; data of western Baiyangping ore belt from Xue *et al.*, 2010; Dongmozhazha data from Liu *et al.*, 2010; data of Mohailaheng and Jinman-Liancheng from this study)

图 7 所示,所有矿床流体包裹体均一温度处于 70~240℃,盐度 [$w(\text{NaCl})/\%$, 下同] 变化于 4%~28%, 均具有低温成矿特点。其中, Pb-Zn 矿床包裹体均一温度主体处于 100~210℃, 盐度为 4%~28%; Pb-Zn(-Cu-Ag) 矿床包裹体均一温度主体处于 110~200℃, 盐度为 8%~26%; 脉状 Cu 矿床温度在 180~230℃, 盐度为 5%~11%。比较来看, Pb-Zn 矿床和 Pb-Zn(-Cu-Ag) 矿床包裹体均一温度和盐度相一致, 但两者和脉状 Cu 矿床形成显著差别, 后者温度相对高、盐度相对低(图 7)。

5 S、Pb 同位素

5.1 S 同位素

统计已有的各矿床闪锌矿、方铅矿/细硫砷铅矿、Cu 硫化物的 S 同位素比值在图 8a、8b 中(肖荣

阁, 1989; 周维全等, 1992; 叶庆同等, 1992; 季宏兵等, 1998; 刘家军等, 2001; 吴南平等, 2003; 赵海滨, 2006; 刘英超, 2009; 宋玉财, 2009)。如图所示, 所有矿床硫化物的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值变化于 -31‰~+8‰, 其中 Pb-Zn 矿床的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值为 -31‰~+8‰, Pb-Zn(-Cu-Ag) 矿床为 -21‰~+8‰, 脉状 Cu 矿床为 -22‰~+7‰。总体看来, “三江” 沉积岩容矿贱金属矿床金属硫化物相对贫 ^{34}S 。

具体而言, 在 Pb-Zn 矿床中, 金顶矿床闪锌矿和方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值变化于 -31‰~-1‰, 集中在 -25‰~-2‰(图 8a), 东莫扎扎闪锌矿和方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值为 -9‰~+6‰(图 8b), 莫海拉亨的为 -14‰~+8‰(图 8b), 茶曲帕查方铅矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值为 -27‰~0‰(图 8b)。在 Pb-Zn(-Cu-Ag) 矿床中, 白秧坪西矿带矿床的硫化物硫同位素组成十分均一, 分布在 +1‰~+8‰, 集中于 +4‰~+7‰(图 8a); 白秧坪东矿带矿床硫化物硫同位素组成为 -21‰~-6‰, 集中于 -12‰~-6‰(图 8a); 以金满代表的脉状 Cu 矿床各种铜硫化物的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值为 -22‰~+7‰, 但主要集中在 -10‰~+1‰(图 8a)。

5.2 Pb 同位素

兰坪盆地内的矿床发表了大量铅同位素数据(白嘉芬等, 1985; 周维全等, 1992; 叶庆同等, 1992; 张乾, 1993; 魏君奇, 2001; 王峰等, 2003; 吴南平等, 2003; 何明勤等, 2004; 徐启东等, 2004; 李志明等, 2005; 修群业等, 2006; 赵海滨, 2006), 这些数据总结在 He 等(2009)的文章中, 同时我们也分析了很多数据(宋玉财, 2009), 包括“三江”北段茶曲帕查矿床的数据, 将所有这些数据都投影在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解中(图 8c)。如图 8c 所示, 研究区大量数据点在图解中呈线性分布, 那么首要就要考虑是否存在系统的分析误差。Franklin 等(1983)指出, 引起 Pb 同位素分析误差主要有两个原因: ① ^{204}Pb 本身含量低导致的测量误差; ② 质谱测试过程中同位素质量分馏引起的误差。当出现误差时, 数据点在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解中呈线性分布, 前者控制的斜率值 R 为所有样品 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 平均值和 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 平均值的比值 m , 后者控制的斜率值 R 为 1.5 m , 当两种误差都存在时, 分析数据点拟合成直线的斜率值 R 处于 m 和 1.5 m 之间。

这里以金顶矿床为例(图 8d), 来检验数据是否存在分析误差。过去不同学者分别对金顶矿床的硫

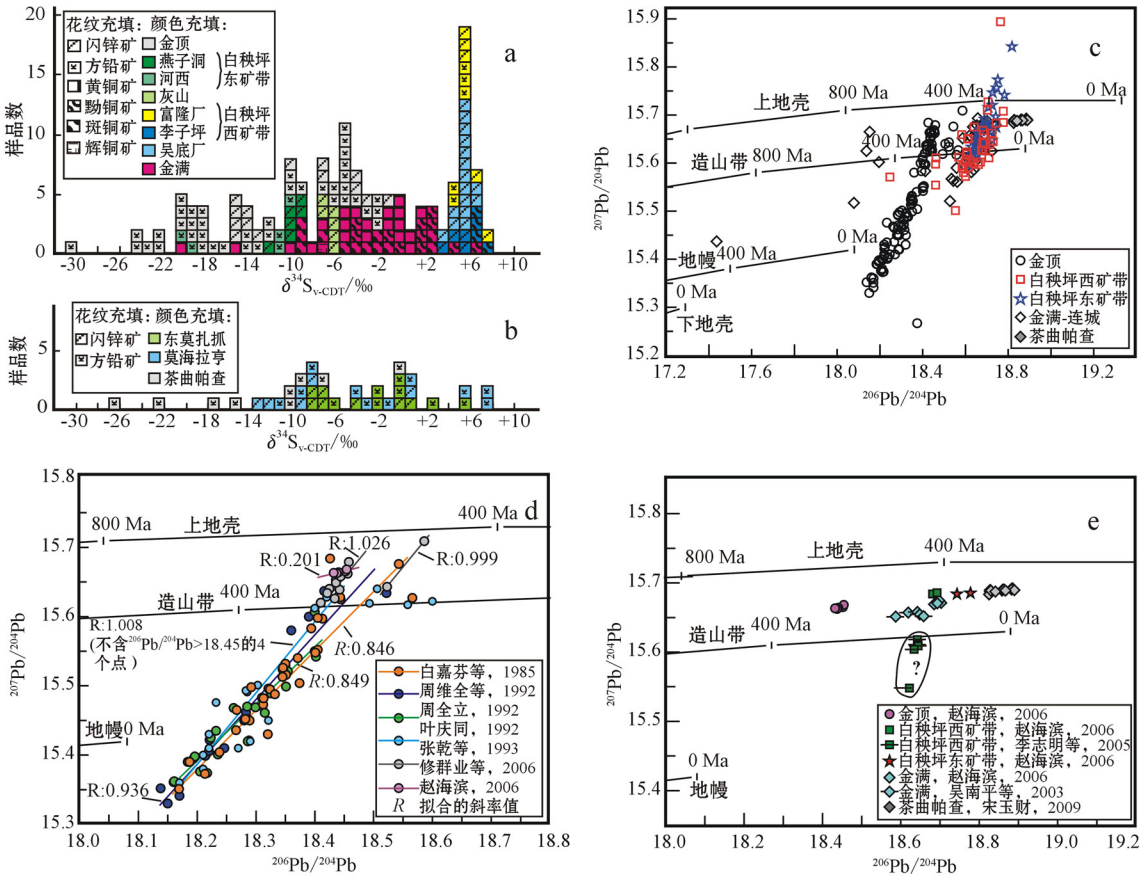


图 8 “三江”喜马拉雅期沉积岩容矿贱金属矿床硫化物硫、铅同位素组成

Fig. 8 Sulfur and lead isotope composition of sulfides from base metal deposits in Sanjiang region

a、b—矿床硫化物硫同位素组成,其中,金顶数据引自周维全等(1992)、叶庆同等(1992);白秧坪东矿带和西矿带矿床及茶曲帕查数据引自宋玉财(2009);金满数据引自肖荣阁(1989)、季宏兵等(1998)、刘家军等(2001)、吴南平等(2003)、赵海滨(2006);东莫扎抓和莫海拉亨数据引自刘英超(2009);c—矿床硫化物铅同位素 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解,其中,金顶数据源见图8d;白秧坪西矿带矿床数据引自魏君奇(2001)、王峰等(2003)、徐启东等(2004)、李志明等(2005)、赵海滨(2006)、宋玉财(2009);白秧坪东矿带矿床数据引自魏君奇(2001)、何明勤等(2004)、徐启东等(2004)、赵海滨(2006)、宋玉财(2009);金满和连城矿床数据引自吴南平等(2003)、徐启东等(2004)、赵海滨(2006)、宋玉财(2009);茶曲帕查数据引自宋玉财(2009);d—金顶矿床硫化物Pb同位素组成误差分析;e—筛选后的硫化物铅同位素 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解;c、d、e底图据Doe和Zartman(1979)

a, b—sulfur isotopes of sulfides, Jinding data from Zhou Wei-quan *et al.* (1992) and Ye Qing-tong *et al.* (1992); data of eastern Baiyangping and western Baiyangping ore belts and Chaqupacha from Song Yu-cai (2009); Jinman data from Xiao Rong-ge (1989), Ji Hong-bing *et al.* (1998), Liu Jia-jun *et al.* (2001), Wu Nan-ping *et al.* (2003) and Zhao Hai-bing (2006); data of Dongmohazhua and Mohailaheng from Liu Ying-chao (2009); c— $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram of sulfide Pb isotopes, for Jinding data, refer to Fig. 8d; data of western Baiyangping ore belt from Wei Jun-qi (2001), Wang Feng *et al.* (2003), Xu Qidong *et al.* (2004), Li Zhiming *et al.* (2005), Zhao Haibing *et al.* (2006) and Song Yu-cai (2009); data of eastern Baiyangping ore belt from Wei Jun-qi (2001), He Ming-qin *et al.* (2004), Xu Qidong *et al.* (2004), Zhao Haibing *et al.* (2006) and Song Yu-cai (2009); data of Jinman and Liancheng from Wu Nan-ping *et al.* (2003), Xu Qidong *et al.* (2004), Zhao Haibing *et al.* (2006) and Song Yu-cai (2009); Chaqupacha data from Song Yu-cai (2009); d—error analysis for Pb isotopic data of sulfides; e—selected Pb isotopic data of sulfides plotted in the $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram; base diagrams of Figs. c, d and e from Doe and Zartman (1979)

化物进行了Pb同位素分析(白嘉芬等, 1985; 周维全等, 1992; 叶庆同, 1992; 张乾, 1993; 修群业等, 2006; 赵海滨, 2006), 本文中, 白嘉芬等(1985)数据转引自Xue等(2007)。图8d所示, 1993年及之前发表的数据普遍分布范围大, 从“上地壳”和“造山带”演化线之间向左下方一直延伸到“地幔”演化线右下方, 而2006年以来发表的数据分布相对有限,

仅处于“上地壳”和“造山带”演化线之间, 如果说选择的都是金顶矿床样品, 并且也不存在样品选择上的差别, 不同发表数据之间存在如此大的差别是难以理解的。拟合不同作者的数据发现, 除赵海滨(2006)的数据外, 其他作者(白嘉芬等, 1985; 周维全等, 1992; 叶庆同, 1992; 修群业等, 2006)发表的数据及张乾(1993)发表的大部分数据的R值均

在其各自的 m 和 $1.5 m$ 值之间,尽管不能肯定这些数据都是由于分析误差所引起的,但至少是有很大疑问的,应加以剔除。对于金顶矿床而言,只有赵海滨(2006)发表的数据可以用于讨论。同理,我们对兰坪盆地其他矿床已发表的数据(张乾, 1993; 魏君奇, 2001; 王峰等, 2003; 吴南平等, 2003; 何明勤等, 2004; 徐启东等, 2004; 李志明等, 2005; 修群业等, 2006; 赵海滨, 2006)和我们自己分析的数据(宋玉财, 2009)进行了检验,最后筛选剩下的数据点投影在图 8e 中,其中李志明等(2005)的数据点拟合出的直线斜率 R 不在其 m 值和 $1.5 m$ 值之间,但其数据点和其他数据点分布模式和分布范围有明显差别,是否存在分析误差不清楚。

如图 8e 所示,如不考虑李志明等(2005)的数据,其他所有数据的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化于 15.662 和 15.692 之间, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化于 18.432 和 18.890 之间,其中,金顶矿床硫化物的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.6625 \sim 15.6682$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.4323 \sim 18.4541$ (赵海滨, 2006); 金满矿床硫化物的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.6514 \sim 15.6748$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.5866 \sim 18.7013$ (吴南平等, 2003; 赵海滨, 2006); 白秧坪西矿带矿床(李子坪)硫化物 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.6831 \sim 15.6848$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.6816 \sim 18.6924$ (赵海滨, 2006); 白秧坪东矿带矿床(灰山)硫化物 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.6828 \sim 15.6844$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.7430 \sim 18.7772$ (赵海滨, 2006); 三江北段茶曲帕查矿床硫化物 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.6833 \sim 15.6923$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.8253 \sim 18.8895$ (宋玉财, 2009)。在图 8e 中,这些数据点处于全球平均‘上地壳’和‘造山带’铅同位素演化曲线之间,同时,从金顶依次到金满、白秧坪西矿带矿床、白秧坪东矿带矿床、茶曲帕查矿床,总体显示越来越富集放射性成因 Pb 的特点。

6 讨论

6.1 成矿时代

沉积岩容矿贱金属矿床(如 MVT 矿床)的直接定年,一直是研究该类矿床的难题。近来,通过闪锌矿 Rb-Sr、萤石和方解石 Sm-Nd (田世洪等, 2009)、辉钼矿 Re-Os (王光辉等, 2009) 等定年手段,同时依靠地质条件限定,“三江”带内大多沉积岩容矿矿床的成矿时代逐渐明晰。

在兰坪盆地金顶矿床,尽管我们最新填图认为

含矿的砂岩和含灰岩角砾砂岩可能是晚三叠世的地层(图 3),但成矿时代仍然可能是新生代。原因在于赋矿的砂岩和含灰岩角砾砂岩之间及‘真正’的云龙组中均见到底辟成因的石膏(图 3),显示这些石膏形成于云龙组沉积之后。野外观察发现,砂岩和含灰岩角砾砂岩之间的底辟石膏发生强烈的黄铁矿化(比铅锌矿化早),故矿化晚于石膏,也就是一定晚于云龙组沉积。考虑到古新世果朗组沉积与下伏云龙组呈整合接触(图 2),而与上覆始新世宝相寺组呈不整合接触,因此推测矿床形成于古新世果朗组沉积结束的 $\sim 56 \text{ Ma}$ 左右,也即是区域性的逆冲推覆构造发育期间。该推测与 Pb 同位素反映的‘金顶形成时代早于区带内其他贱金属矿床形成时代’的认识相一致(见后文)。白秧坪矿床东矿带矿床受华昌山断裂控制,而华昌山断裂下盘卷入最新地层为始新世宝相寺组 (He *et al.*, 2009),并且其中出现矿化(田洪亮, 1998),因此推测河西-三山矿床矿化时代应等于或晚于 $\sim 34 \text{ Ma}$ 。白秧坪矿床西矿带矿床受逆冲构造相伴的次级断裂控制,最近,通过闪锌矿 Rb-Sr 等时线和成矿阶段方解石 Sm-Nd 等时法,获得富隆厂、李子坪、吴底厂等矿床的成矿年龄均为 $30 \sim 29 \text{ Ma}$ (王晓虎等未发表数据)。在连城矿床,早于 Cu 矿化的辉钼矿 Re-Os 定年显示脉状 Cu 矿床矿化晚于 $49 \sim 48 \text{ Ma}$ (王光辉等, 2009),考虑到王彦斌等(2005)在金满通过热液蚀变绢云母 Ar-Ar 法获得年龄为 37 Ma ,故后者可能代表真实的成矿时代。在玉树地区,闪锌矿 Rb-Sr 等时线法获得东莫扎抓矿床成矿年龄为 35 Ma ,闪锌矿 Rb-Sr 等时线法和萤石 Sm-Nd 等时线法获得莫海拉亨矿床成矿时代为 $31 \sim 32 \text{ Ma}$ (田世洪等, 2009)。在沱沱河地区的茶曲帕查矿床,方铅矿局部出现在中新世五道梁组泥灰岩中,并且见到胶结灰岩角砾岩的五道梁组泥灰质物质被方铅矿所交代(图 5g、5h),反映矿床形成晚于或近等于中新世五道梁组沉积期,也就是晚于或近等于古地磁方法确定的五道梁组沉积时代—— $23 \sim 20 \text{ Ma}$ (Zhao *et al.*, 2000; Liu *et al.*, 2003)。昌都地区的 Pb-Zn 矿床尚未开展深入研究,但从与北西走向逆冲断裂关系密切上看,也应属新生代成矿。

另外,由于这些矿床都发育在一个盆地内或演化历史相似的地质体中,又有大致相同的物源(经历了‘造山’的上地壳岩石),故它们的铅同位素组成一定程度反映了它们形成的相对年龄,也就是说整体上越富集放射性成因 Pb,表明其形成越晚,反之越

早。如图 8e 所示,茶曲帕查矿床明显比其他矿床富集放射性成因 Pb,因此形成应最晚,然后依次是白秧坪东矿带矿床、白秧坪西矿带矿床、金满矿床、金顶矿床,这些矿床形成的相对时代与地质的观察和定年的结果是吻合的。

总之,研究区沉积岩容矿矿床形成于新生代,为印度-亚洲大陆碰撞的背景。根据 Hou 和 Cook (2009)对印-亚大陆碰撞造山阶段的划分,该区矿床多形成于晚碰撞阶段(40~26 Ma),即区域整体由碰撞挤压转换为区域走滑的应力背景。金顶超大型 Pb-Zn 矿床可能形成于主碰撞阶段(65~41 Ma),区域经历强烈的碰撞挤压缩短,沱沱河地区茶曲帕查 Pb-Zn 矿床明确形成于后碰撞阶段(25~0 Ma),是岩石圈整体处于挤压背景而地壳局部出现伸展的应力环境。

6.2 成矿流体与成矿物质来源

在该带矿床中,东莫扎抓矿床和白秧坪西矿带矿床成矿流体均显示低温(主体 $<200^{\circ}\text{C}$)、高盐度[主体 $>20\%$]特点,反映成矿流体为盆地卤水来源;金顶、莫海拉亨矿床成矿流体显示为低温,但既有高盐度又有低盐度的特点,考虑到两者出现了富 CO_2 流体包裹体,因此推测这两个矿床可能存在着较低温度、较高盐度的盆地卤水和较高温度、较低盐度并富 CO_2 流体的混合;白秧坪东矿带矿床成矿流体显示为低温、中-高盐度特征,可以解释为单一的盆地卤水源,也可以解释为盆地卤水与深循环大气降水的混合;以金满-连城代表的脉状 Cu 矿床,除这里显示的流体包裹体温度-盐度和其他矿床有显著差别外,其热液碳酸盐矿物的 C-Sr 同位素组成、流体 O 同位素组成和其他矿床也有显著差别(宋玉财, 2009),如果说矿床成因与岩浆作用无关(见后文讨论),其富 CO_2 、低盐度、中等温度的特点指示其成矿流体可能为变质流体来源。归纳起来 Pb-Zn 和 Pb-Zn(-Cu-Ag)矿床成矿流体以盆地卤水为主,一些矿床可能存在富 CO_2 流体的混合,脉状 Cu 矿床成矿流体主要来自富 CO_2 的变质流体。

考虑硫的来源,首先要考虑金属在流体中的迁移特点。对于 Pb-Zn 矿床而言,在较低温度下($<200^{\circ}\text{C}$)迁移 Pb、Zn 需要氧逸度较高的条件(Cooke *et al.*, 2000; Leach *et al.*, 2005),也就是说迁移 Pb、Zn 的流体中还原 S 相对氧化 S 的含量要低,从而保持金属不被沉淀而迁移至成矿部位,那么形成硫化物的还原硫的来源为迁移金属溶液中的硫酸根在成矿部位被还原,或者为成矿部位提供还原硫。在金

顶矿区,热液天青石的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $+12\text{‰} \sim +19\text{‰}$,地层中石膏的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $+15\text{‰}$ 左右(赵兴元, 1989),因此,要形成金顶硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-31\text{‰} \sim -1\text{‰}$,需要有细菌还原硫的出现,因为细菌还原硫酸盐(BSR)形成硫化物可以形成 $2\text{‰} \sim 42\text{‰}$ 的硫同位素动力学分馏(Detmers *et al.*, 2001),而有机和无机热还原硫酸盐(TSR)一般分别使硫酸盐和硫化物之间的分馏在 $<0\text{‰} \sim 15\text{‰}$ (Leach *et al.*, 2005)和 $10\text{‰} \sim 25\text{‰}$ (Chang *et al.*, 2008),故在金顶矿床只有细菌还原 S 的加入才能解释 $\delta^{34}\text{S}$ 值低于 -10‰ 的硫化物的出现,也可解释 $\delta^{34}\text{S}$ 值在 $-10\text{‰} \sim -1\text{‰}$ 的硫化物的出现(相对封闭体系下的 BSR 作用)。但同时,有机热还原硫酸盐提供还原 S 是不能排除的,因为金顶矿床围岩中十分富有机质,甚至形成古油气藏(薛春纪等, 2007),通过有机质热还原硫酸盐形成的还原硫与细菌还原提供的硫混合同样可以解释观察到的硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值范围。总之,金顶矿床硫化物硫同位素组成反映细菌还原 S $\pm$ 有机热还原 S 提供了硫化物中硫的来源。相似的解释也适用于东莫扎抓、莫海拉亨、茶曲帕查等 Pb-Zn 矿床及白秧坪东矿带的 Pb-Zn(-Cu-Ag)矿床,这些矿床的围岩都是富有机质的碳酸盐岩。白秧坪西矿带的 Pb-Zn(-Cu-Ag)矿床硫化物 S 同位素组成十分均一,由于新生代云龙组中硫酸盐矿物 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $+13.5\text{‰} \sim +15.8\text{‰}$ (覃功炯等, 1991),因此携带 Pb、Zn 等金属的富硫酸根的高盐度卤水在开放体系下通过 TSR 作用,可能提供了还原硫。

较低温度($<250 \sim 150^{\circ}\text{C}$)时,在低盐度条件下, Cu 能够以和硫氢根形成络合物的形式迁移,而不是像在高盐度条件下是和氯形成络合物迁移(Mountain and Seward, 2003; Etschmann *et al.*, 2010)。因此,成矿流体处于此温度和盐度范围的金满等脉状 Cu 矿床,金属可能是伴随还原 S 迁移的,因此沉淀出硫化物的 S 同位素组成大致反映了迁移金属的成矿流体的 S 同位素组成。金满矿床的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化较大(图 8a),同时矿床又未发现与金属硫化物伴生的硫酸盐矿物,故单一的岩浆硫在封闭条件下还原硫酸盐(平衡分馏或动力学分馏)无法产生此 $\delta^{34}\text{S}$ 值范围。我们注意到,在整个“三江”带发育有大量火山块状硫化物(VMS 型)矿床,它们主要形成于二叠纪、三叠纪,也有一些被认为形成更早(王立全等, 2002; 杨岳清等, 2006; Hou *et al.*, 2007),表明整个“三江”在长期演化过程中经历强烈的海底热液活

动。现有的 S 同位素资料表明,呷村 Ag-Pb-Zn-Cu-羊拉 Cu、大平掌 Cu-Pb-Zn 矿床等 VMS 型矿床 Zn、Pb、Cu 硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值十分一致,均分布范围在 $-3.5\text{‰} \sim +3.5\text{‰}$ (叶庆同等, 1992; 潘家永等, 2000; 钟宏等, 2000; 朱维光等, 2001; 戴宝章等, 2004; 杨岳清等, 2006), 与金满脉状 Cu 矿床的 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布的富 ^{34}S 端员一致(图 8a)。区域 1:20 万^①和 1:5 万^②地质图表明,兰坪盆地西缘脉状 Cu 矿发育区恰恰也是 C、P、T 基性-酸性火山岩发育区,尽管其中还没有发现 VMS 型矿床,但其绿泥石化、绿帘石化、黄铁矿化十分发育,铜蓝、孔雀石化普遍,表明曾经历强烈的海底热液活动,一定程度富集了金属硫化物,脉状 Cu 矿床中的硫很可能是在喜马拉雅期的热液活动背景下,从这些火山岩中(先存的硫化物)获得了一部分硫。同时,金满矿床一部分硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值低于 -3.5‰ ,甚至低于 -15‰ (图 8a),表明除来自火山岩的硫外,还需要有贫 ^{34}S 来源硫的贡献。刘家军等(2001)研究表明,在金满矿床围岩中发现有富生物、富有机质部位,同时考虑到侏罗系红层本身是一套含膏盐建造(曲一华等, 1998),因此,贫 ^{34}S 来源硫很可能由侏罗系中的硫酸盐被细菌还原所产生,在成矿期间与来自火山岩的硫混合,形成了目前观察到的 ^{34}S 值。总之,脉状 Cu 矿床 Cu 硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值显示其硫可能来自下伏火山岩和赋矿沉积地层中硫的混合。

该带矿床筛选后的 Pb 同位素组成在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解中处于全球平均“上地壳”和“造山带”铅同位素演化曲线之间,显示矿床铅没有明显的地幔铅和下地壳铅的贡献,考虑到“三江”复合造山的地质演化历史(邓军等, 2010),铅应来自经历了“造山”作用的上地壳岩石。其中,以金满代表的脉状 Cu 矿床 Pb 同位素组成略靠近“造山带”演化线,反映这类矿床可能比 Pb-Zn 和 Pb-Zn(-Cu-Ag)矿床有更多来自偏基性岩石(相对贫放射性成因铅)铅的贡献,考虑到前面对 S 同位素的讨论,脉状 Cu 矿的铅可能是来自中、基性火山岩与沉积岩围岩内铅的混合(图 8e)。

6.3 矿床成因类型

首先,要判断“三江”沉积岩容矿贱金属矿床的形成是否与岩浆活动有关。在世界范围,以沉积岩

为容矿岩石又与岩浆活动有关的矿床包括:矽卡岩型矿床、与岩浆活动有关的碳酸盐岩交代型(Carbonate-replacement)矿床、出现在侵入体外围的脉状多金属矿床(Meinert *et al.*, 2005; Camprubí *et al.*, 2006; Baumgartner *et al.*, 2008; Voudouris *et al.*, 2008)。其中,矽卡岩型矿床以出现矽卡岩矿物为特征,显著地区别于“三江”沉积岩容矿贱金属矿床(Meinert *et al.*, 2005)。对于后两类矿床,有如下特点:①矿床分布区常见岩浆岩分布,通常能见到矿化出现在岩浆岩内;②围岩为硅质岩石时,矿化以开放空间充填和胶结角砾为主,为碳酸盐岩时,矿化以交代为主;③金属呈现 Cu-Pb-Zn(-Au-Ag-Bi)多金属组合,Cu 以黄铜矿形式为主,石英为主要脉石矿物;④成矿流体为盐水体系,盐度一般低于 15%,温度通常在 $100 \sim 350^\circ\text{C}$,为大气降水和岩浆水的混合,硫来自岩浆±围岩,金属主要来自岩浆或/和围岩(Dejonghe *et al.*, 2002; Camprubí *et al.*, 2006; Baumgartner *et al.*, 2008; Bendežú *et al.*, 2008; Voudouris *et al.*, 2008)。

在“三江”贱金属矿带内,Pb-Zn 和 Pb-Zn(-Cu-Ag)矿床与上述矿床相比:①矿区范围内,未发现有成矿期的岩浆岩发育,未见一例矿床赋存在侵入岩或火山岩中(表 1);②成矿金属均以 Pb、Zn 为主,白秧坪矿集区出现有少量 Cu,但含 Cu 矿物以黝铜矿而不是黄铜矿为主,没有矿床发育 Au;③热液脉石矿物以方解石/白云石为主,一些矿区见硫酸盐矿物和萤石,而石英很少发育;④成矿流体虽以盐水体系为主,但大量盐度数据高于 15%,温度低于 210°C (图 7);⑤除白秧坪西矿带矿床外,其他矿床硫化物均出现非常负值的 $\delta^{34}\text{S}$ 值,表明细菌还原硫参与成矿。这些特征显著地区别于碳酸盐岩交代型和出现在侵入体外围的脉状矿床,没有呈现出与岩浆活动有关的特点,故成矿作用与岩浆活动无关。

对于脉状 Cu 矿,其成矿温度为 $180 \sim 230^\circ\text{C}$ 、盐度低于 11%、出现黄铜矿、具有绢云母化、发育热液石英等特征,和出现在侵入体外围的脉状矿床特征相似(Bendežú *et al.*, 2008),也和世界范围变质岩容矿的多金属脉状矿床(polymetallic veins)相似(Leach *et al.*, 1988; Beaudoin and Sangster, 1992; Rosenberg and

① 云南省地质局. 1974. 1:20 万兰坪幅区域地质调查报告(G-47-X VI).

② 云南省地质矿产局区域地质调查队. 1984. 1:20 万维西幅区域地质调查报告(G-47-X).

③ 云南省地质矿产开发局第三地质大队测. 1999. 1:5 万小格拉幅地质图(G47E009013).

Larson, 2000)。对于后者,有学者认为与岩浆活动有关,有学者认为是深大断裂沟通的深源流体或变质流体活动的产物(Beaudoin and Sangster, 1992; 陈衍景, 2006; 姚军明等, 2008)。在已知的脉状 Cu 矿床、矿点中,除兰坪科登洞矿点赋存在火山岩内外(表 1),其他脉状 Cu 矿床矿区内未发现有成矿期的岩浆岩,矿床主要沿澜沧江深大断裂近南北向带状分布,而不是围绕某一中心呈环状分布,成矿流体富 CO_2 。因此,尽管矿床不是赋存在变质岩中,但我们倾向于脉状 Cu 矿床和世界上变质岩容矿的脉状多金属矿床成因类似,是一套受深大断裂控制的、与变质流体活动有关的矿床,成矿作用与岩浆活动无关。

在“三江”贱金属成矿带内,不同矿床成矿作用与岩浆活动无关,是它们共同的特点。除此之外,这些矿床还有其他一些共同特点,但也存在明显的差别,包括:①金属组合以贱金属为主,但又可分为 Pb-Zn、Pb-Zn(-Cu-Ag)、Cu、Cu-Co 等不同金属组合,相应存在不同矿物组合;②均以沉积岩容矿,但白秧坪西矿带矿床、脉状 Cu 矿床主要是碎屑岩容矿,白秧坪东矿带、东莫扎抓、莫海拉亨、茶曲帕查是碳酸盐岩容矿,金顶既有砂岩容矿(主体),又有碳酸盐岩容矿;③矿床矿体与逆冲推覆构造密切相关,但控制矿体定位的因素又有不同,包括盐底辟构造、逆冲断裂的次级断裂、热液垮塌溶洞、灰岩的白云岩化段、灰岩破碎带、矿前垮塌溶洞构造、密集劈理带或断裂等;④成矿流体均具有低温特点,但组分和来源不同,特别是脉状 Cu 矿床成矿流体为 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 体系,低盐度,可能来自变质流体,与其他矿床明显不同;⑤它们虽然均形成于大陆碰撞环境,但处于青藏高原碰撞造山的不同演化阶段。

如果以它们的共性来认识这套矿床,矿床被认为是大陆碰撞环境逆冲推覆构造控制下的一套沉积岩容矿贱金属矿床(侯增谦等, 2008b)。如果考虑这些矿床的差异,并借用世界上已知的矿床类型来理解,不同矿床至少可被归为两种已知的矿床类型:一是(类)MVT 矿床,二是(可能与岩浆活动无关的)多金属脉状矿床,下面详细论述。

MVT 矿床的主要特征包括:①后生;②与岩浆活动无关;③主要是碳酸盐岩(以白云岩为主)容矿;④断裂、岩性过渡、层间破碎、溶洞垮塌(矿前、成矿期)构造控矿;⑤金属为铅、锌组合,闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、白云石、方解石为主要热液矿物,交代和开放空间充填式矿化为主;⑥成矿流体低温(主

体 $75\sim 200^\circ\text{C}$)、高盐度($10\%\sim 30\%$),主要来自盆地卤水(Leach *et al.*, 2005; Paradis *et al.*, 2007)。与 MVT 矿床相比,白秧坪东矿带矿床、赵发涌、东莫扎抓、莫海拉亨、茶曲帕查矿床与其特征基本一致,可划为 MVT 矿床。金顶矿床主要矿体的容矿围岩不是碳酸盐岩与典型 MVT 矿床形成差别外,其他特征与 MVT 矿床基本一致,与北非突尼斯境内大量受控于盐底辟构造的 Pb-Zn 矿床特征一致(Rouvier *et al.*, 1985),它们在大类范畴可以归为 MVT 矿床,称类 MVT 或 MVT 的亚类。同时要指出的是,一些富萤石的矿床,如白秧坪东矿带的灰山矿床和莫海拉亨矿床以及裂隙构造控制的矿点,如东莫扎抓矿床的 IV 号矿带矿化点,国外一些学者往往不将其划分为 MVT 矿床,主要原因是其成矿规模有限,一般只形成矿化(Leach *et al.*, 2005; 与 Leach 私人交流)。

另一类(可能与岩浆活动无关的)多金属脉状矿床主要产于变质岩系中,在欧洲的海西期造山带最为发育(法国的 Massif Central、德国的 Freiberg 和 Harz Mountains、捷克的 Příbram 和 Bohemian Massif 地区等)。此外,在北美科迪勒拉造山带(加拿大的 Kokanee Range 和 Keno Hill 地区)、我国的秦岭造山带、非洲的 Lufilian 造山带(刚果境内的 Katanga 地区)也有出现。其特点有:①产于地壳尺度的深大断裂带附近,受控于陡倾的断裂,矿体呈脉状,长几十米到超过一公里,宽通常几十厘米到几米,深可达两千米;②赋矿围岩一般为至少是绿片岩相的变质岩,原岩通常为碎屑岩;③围岩蚀变包括硅化、绢云母化、黄铁矿化、碳酸盐化;④主要金属组合为 Pb-Zn-Ag,也见 Cu,主要金属矿物为方铅矿和闪锌矿,有少量黄铁矿、黄铜矿、黝铜矿和含银矿物(自然银、银黝铜矿等),主要热液脉石矿物为石英和菱铁矿,次之为白云石、方解石,个别矿床见萤石和重晶石;⑤成矿流体为 $\text{H}_2\text{O} \pm \text{CO}_2 \pm \text{CH}_4 \pm \text{N}_2-\text{NaCl}$ 体系,盐度变化大,一般 $< 10\%\sim 15\%$,流体可能包含多种来源:深循环的壳源流体、大气降水、地幔流体、变质流体等,温度通常 $> 250\sim 300^\circ\text{C}$,成矿物质来自浅部和深部地壳(Leach *et al.*, 1988; Beaudoin and Sangster, 1992; 陈衍景, 2006; 祁进平等, 2007; 姚军明等, 2008)。与该类矿床相比,“三江”带内脉状 Cu 矿床和白秧坪西矿带矿床(李子坪、吴底厂、富隆厂、白秧坪等)的矿体特征和金属组合与其相似,本文倾向于将这些矿床划为此类多金属脉状矿床。但要注

意到,这些矿床是沉积岩容矿而不是变质岩容矿,成矿温度要低,可能代表着成矿系统的上部。另外,白秧坪西矿带矿床的成矿流体是来自盆地卤水,与欧洲捷克境内海西期碰撞造山带内的一些脉状矿床类似(Slobodnik, 2008),而与世界范围多数多金属脉状矿床的成矿流体有很大差别,但总体都是地壳流体在浅部地壳活动的产物。

6.4 成矿特色

尽管“三江”这条贱金属成矿带内的金顶、白秧坪东矿带矿床、赵发涌、东莫扎抓、莫海拉亨、茶曲帕查矿床可以归为(类)MVT矿床,但以下特征显示,已建立的MVT矿床成矿模型不能解释这些矿床的成矿作用。

已建立的MVT矿床成矿模型认为,矿床主要形成于造山带的前陆盆地环境,包括周缘前陆盆地、弧后前陆盆地、陆-陆碰撞带两侧前陆盆地,成矿流体来自造山带前缘下渗的盆地卤水,在重力驱动下由造山带一侧向前陆盆地方向长距离迁移,一路萃取流经地层的铅锌成矿物质,向岩石圈挠曲形成的正断层系统和前陆隆起部位汇聚,最后在台地相碳酸盐岩内就位成矿(Bradley and Leach, 2003)。

与其相比,从成矿环境上看,“三江”带内上述矿床形成于青藏高原碰撞造山带内部(Yin and Harrison, 2000),空间上与断续展布的古新世-中新世盆地和褶皱-逆冲构造相伴(图1)。尽管有学者称这些盆地为前陆盆地(Wang *et al.*, 2001),但更多学者认为其为走滑拉分盆地(牟传龙等, 1999; 王世锋等, 2002),或前陆盆地和走滑拉分盆地都有出现(陶晓风等, 2002; Zhu *et al.*, 2006),一些学者则直接称其为逆冲挤压和走滑拉分控制的盆地(Horton *et al.*, 2002; 周江羽等, 2011)。即使称之为前陆盆地,这些盆地位于碰撞造山带内部而非外围,盆地的规模较小、变形强,还受走滑拉分构造控制,明显区别于典型的前陆盆地,矿床不是形成在典型的前陆盆地环境中。从矿床的构造控制看,“三江”带内上述矿床发育于褶皱逆冲带内,区内逆冲、推覆构造十分发育,且非单一地由造山带向盆地方向推进,而是形成了非常复杂的对冲、反冲系统(Yin and Harrison, 2000; Spurlin *et al.*, 2005; 李亚林等, 2006; He *et al.*, 2009),与构造变形相对弱的前陆盆地环境形成了明显的差异。在矿区尺度,逆冲断层发育,矿体主要就位于逆冲断裂上盘和推覆构造相关的穹隆体内,矿床明显受逆冲推覆构造控制(徐

启东等, 2003, 2004; 侯增谦等, 2008a; He *et al.*, 2009),而不是受前陆隆起控制。因此,“三江”带内的(类)MVT矿床成矿作用不能用已建立的MVT矿床成矿模型解释,具有独具特色的成矿作用。但要指出的是,已建立的MVT成矿模型中也提到MVT矿床可形成在褶皱-逆冲带内,可是一些矿床是形成在前陆盆地内,后被卷入褶皱-逆冲带中,而少数矿床形成于褶皱-逆冲带内且发生在褶皱、逆冲之后,但模型并未给予解释,只是简单提到“非常不同的水动力学条件”(Bradley and Leach, 2003),表明这类矿床的成矿作用目前还不是很清楚。

“三江”带内金满等脉状Cu矿床和白秧坪西矿带矿床可划为(可能与岩浆活动无关的)多金属脉状矿床。前人对脉状多金属矿床提出了不同的成因解释,除认为矿床与岩浆活动有关外(Beaudoin and Sangster, 1992; 毛景文等, 2009),一种观点认为成矿主要发生在造山的晚期,可能的地壳减薄、地幔上涌、热不平衡、深部断裂、岩浆及变质活动等因素作为驱动力,由深大断裂沟通深源流体(含C和Pb)和浅部壳源流体(含C、Pb、S)相互混合而成矿(Beaudoin and Sangster, 1992)。而我国学者则运用“造山型”矿床的概念来解释,即陆-陆碰撞导致A型俯冲,在碰撞造山由挤压向伸展转换阶段,俯冲的大陆板片由于温度和压力升高脱气脱水形成变质流体,同时萃取携带俯冲板片的金属元素,成矿流体向上运移并很可能与浅源大气降水混合,在仰冲板片内有利的部位成矿(陈衍景, 2006; 祁进平等, 2007; 姚军明等, 2008)。

与世界上的多金属脉状矿床相比,“三江”带内的脉状Cu矿床和白秧坪西矿带矿床明确形成在碰撞造山期,不是发生在造山的晚阶段,它们是沉积岩容矿而非变质岩容矿,成矿温度低,白秧坪西矿带矿床的成矿流体来自盆地卤水,没有变质流体或深源流体的参与,显示出一定的特色。此外,世界上的多金属脉状矿床中,多为Pb-Zn-Ag矿脉,独立的Cu矿脉比较少见,在美国Coeur d'Alène地区有出现(Eaton *et al.*, 1995),我国内蒙古白乃庙Cu矿床可能也是其中一例(陈衍景, 2006)。

7 结论

“三江”沉积岩容矿贱金属矿床形成于印-亚大陆碰撞环境,后生成矿,成矿作用与岩浆活动无关,

是一套受逆冲推覆构造控制的成矿系统。其中, Pb - Zn 和 Pb - Zn (- Cu - Ag) 矿床系主体来自盆地卤水的成矿流体在上地壳活动的产物, 脉状 Cu 矿床系由深大断裂沟通的变质流体在上地壳活动的产物。以世界上已知的矿床类型来划分, 金顶、赵发涌、东莫扎抓、莫海拉亨和茶曲帕查矿床等 Pb - Zn 矿床及白秧坪东矿带 Pb - Zn (- Cu - Ag) 矿床可归为类 MVT 矿床, 白秧坪西矿带脉状 Pb - Zn (- Cu - Ag) 矿床和脉状 Cu 矿床可归为(可能与岩浆活动无关的)多金属脉状矿床。“三江”带内类 MVT 矿床以其形成于大陆碰撞带内部、受控于逆冲推覆构造等特点不能被已建立的 MVT 成矿模型所涵盖, 成矿作用独特。

致谢 在青海沱沱河和玉树工作期间, 得到青海省地矿局、青海省地质调查院、青海省第五地质矿产勘查院领导和现场工作人员的大力支持, 表示衷心感谢。对在金顶矿床工作中, 给予帮助的公司领导和同仁表示感谢。

References

Bai Jiafen, Wang Changhuai and Na Rongxian. 1985. Geological characteristics of the Jinding lead-zinc deposit in Yunnan with a special discussion on its genesis [J]. *Mineral Deposits*, 4: 1~9 (in Chinese with English abstract).

Baumgartner R, Fontbote L and Vennemann T. 2008. Mineral zoning and geochemistry of epithermal polymetallic Zn-Pb-Ag-Cu-Bi mineralization at Cerro de Pasco, Peru [J]. *Economic Geology*, 103 (3): 493~537.

Beaudoin G and Sangster D F. 1992. A descriptive model for silver-lead-zinc veins in clastic metasedimentary terranes [J]. *Economic Geology*, 87 (4): 1 005~1 021.

Bendezú R, Page L, Spikings R, *et al.* 2008. New $^{40}Ar/^{39}Ar$ alunite ages from the Colquijirca district, Peru: evidence of a long period of magmatic SO_2 degassing during formation of epithermal Au-Ag and Cordilleran polymetallic ores [J]. *Mineralium Deposita*, 43 (7): 777~789.

Bradley D C and Leach D L. 2003. Tectonic controls of Mississippi Valley-type lead-zinc mineralization in orogenic forelands [J]. *Mineralium Deposita*, 38: 652~667.

Camprubi A, Gonzalez-Partida E and Torres-Tafolla E. 2006. Fluid inclusion and stable isotope study of the Cobre-Babilonia polymetallic epithermal vein system, Taxco district, Guerrero, Mexico [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 89: 33~38.

Chang Z, Large R R and Maslennikov V. 2008. Sulfur isotopes in sediment-hosted orogenic gold deposits: Evidence for an early timing and a seawater sulfur source [J]. *Geology*, 36 (12): 971~974.

Chen Kaixu. 2006. The forming mechanism of copper-silver polymetallic ore concentration area in the north of Lanping foreland basin in Yunnan province [D]. Ph. D Dissertation, China University of Geosciences, Wuhan, 1~128 (in Chinese with English abstract).

Chen Kaixu, He Longqing, Wei Junqi, *et al.* 2004a. Preliminary study on the characteristics of ore minerals and the occurrence states of silver and cobalt in the Baiyangping ore-concentrated field, Yunnan province [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 24 (1): 61~67 (in Chinese with English abstract).

Chen Kaixu, Yao Shuzhen, He Longqing, *et al.* 2004b. Ore-forming fluid in Baiyangping silver-polymetallic mineralization concentration field in Lanping, Yunnan province [J]. *Geological Science and Technology Information*, 23: 45~50 (in Chinese with English abstract).

Chen Yanjing. 2006. Orogenic-type deposits and their metallogenic model and exploration potential [J]. *Geology in China*, 33 (6): 1 181~1 196 (in Chinese with English abstract).

Chen Yanjing, Zhai Mingguo and Jiang Shaoyong. 2009. Significant achievements and open issues in study of orogenesis and metallogenesis surrounding the North China continent [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25 (11): 2 695~2 726.

Cooke D R, Bull S W, Large R R, *et al.* 2000. The importance of oxidized brines for the formation of Australian Proterozoic stratiform sediment-hosted Pb-Zn (Sedex) deposits [J]. *Economic Geology*, 95 (1): 1~18.

Dai Baozhang, Liao Qilin and Jiang Shaoyong. 2004. Isotope geochemistry and mineralization age of the Dapingzhang copper-polymetallic deposit in Lanping-Simao basin, Yunnan province [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 40 (6): 674~683 (in Chinese with English abstract).

Dejonghe L, Darras B, Hughes G, *et al.* 2002. Isotopic and fluid-inclusion constraints on the formation of polymetallic vein deposits in the central Argentinian Patagonia [J]. *Mineralium Deposita*, 37 (2): 158~172.

Deng Jun, Hou Zengqian, Mo Xuanxue, *et al.* 2010. Superimposed orogenesis and metallogenesis in Sanjiang Tethys [J]. *Mineral Deposits*, 29 (1): 37~42 (in Chinese with English abstract).

Detmers J, Bruchert V, Habicht K S, *et al.* 2001. Diversity of sulfur isotope fractionations by sulfate-reducing prokaryotes [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 67 (2): 888~894.

Doe B R and Zartman R E. 1979. Chapter 2. Plumbotectonics I, The Phanerozoic [A]. Barnes H L. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits* [C]. New York: Wiley Interscience, 22~70.

Eaton G F, Criss R E, Fleck R J, *et al.* 1995. Oxygen, carbon, and strontium isotope geochemistry of the Sunshine Mine, Coeur d'Alene mining district, Idaho [J]. *Economic Geology*, 90 (8): 2 274~2 286.

Etschmann B E, Liu W, Testemale D, *et al.* 2010. An in situ XAS study of copper (I) transport as hydrosulfide complexes in hydrothermal solutions (25~592°C, 180~600 bar): Speciation and solubility in vapor and liquid phases [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74 (16): 4 723~4 739.

- Franklin J M, Roscoe S M, Loveridge W D, *et al.* 1983. Lead isotope studies in Superior and Southern provinces[J]. Geological Survey of Canada, Bulletin, 351 : 1~35.
- He Mingqin, Liu Jiajun, Li Chaoyang, *et al.* 2004. Mechanism of Ore-Forming Fluids of the Lanping Pb-Zn-Cu Polymetallic Mineralized Concentration Area ? An Example Study on the Baiyangping Ore District[M]. Beijing : Geological Publishing House, 1~117 (in Chinese).
- He L, Song Y, Chen K, *et al.* 2009. Thrust-controlled, sediment-hosted, Himalayan Zn-Pb-Cu-Ag deposits in the Lanping foreland fold belt, eastern margin of Tibetan Plateau [J]. Ore Geology Reviews, 36(1~3) : 106~132.
- Horton B K, Yin A, Spurlin M S, *et al.* 2002. Paleocene-Eocene syn-contractinal sedimentation in narrow, lacustrine-dominated basins of east-central Tibet [J]. Geological Society of America Bulletin, 114 : 771~786.
- Hou Zengqian and Cook N J. 2009. Metallogenesis of the Tibetan collisional orogen : A review and introduction to the special issue [J]. Ore Geology Reviews, 36 : 2~24.
- Hou Zengqian, Song Yucai, Li Zheng, *et al.* 2008b. Thrust-controlled, sediments-hosted Pb-Zn-Ag-Cu deposits in eastern and northern margins of Tibetan orogenic belt : Geological features and tectonic model [J]. Mineral Deposits, 27(2) : 123~144 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Wang Erqi, Mo Xuanxue, *et al.* 2008a. Collisional Orogeny and Metallogenesis of the Tibetan Plateau[M]. Beijing : Geological Publishing House, 1~980 (in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Zaw K, Pan G T, *et al.* 2007. Sanjiang Tethyan metallogenesis in SW China : Tectonic setting, metallogenic epochs and deposit types[J]. Ore Geology Reviews, 31 : 48~87.
- Ji Hongbing and Li Chaoyang. 1998. Geochemical characteristics and source of ore-forming fluid for Jinman copper deposit in western Yunnan province, China [J]. Acta Mineralogica Sinica, 18 : 28~37 (in Chinese with English abstract).
- Jian Ping, Wang Xiaofeng, He Longqing, *et al.* 1999. U-Pb zircon dating of anorthosite and plagiogranite from the Jinshajiang ophiolite belt [J]. Acta Petrologica Sinica, 15(4) : 590~593 (in Chinese with English abstract).
- Leach D L, Landis G P and Hofstra A H. 1988. Metamorphic origin of the Coeur d'Alene base-and precious-metal veins in the Belt basin, Idaho and Montana [J]. Geology, 16(2) : 122~125.
- Leach D L, Sangster D F, Kelley K D, *et al.* 2005. Sediment-hosted lead-zinc deposits : A global prospective [J]. Econ. Geol., 100th Anniversary Volume : 561~607.
- Li Yalin, Wang Chengshan, Yi Haisheng, *et al.* 2006. Cenozoic thrust system and uplifting of the Tanggula Mountain, Northern Tibet [J]. Acta Geologica Sinica, 80 : 1118~1131 (in Chinese with English abstract).
- Li Yong, Wang Chengshan and Yin Haisheng. 2002. Filled sequence and evolution of the Mesozoic Qiangtang composite foreland basin in the Qinghai-Tibet plateau [J]. Journal of Stratigraphy, 26(1) : 62~67 (in Chinese with English abstract).
- Li Yong, Wang Chengshan, Yin Haisheng, *et al.* 2001. Fill models of in the Qiangtang composite foreland basin in Qinghai-Xizang plateau, China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 19(1) : 20~26 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhiming, Liu Jiajun, Qin Jianzhong, *et al.* 2005. Ore-forming material source of the Baiyangping copper-cobalt-silver polymetallic deposit in Lanping basin, Western Yunnan [J]. Geology and Prospecting, 1 : 1~6 (in Chinese with English abstract).
- Liu J, Wang A, Xia H, *et al.* 2010. Cracking mechanisms during galeana mineralization in a sandstone-hosted lead-zinc ore deposit : case study of the Jinding giant sulfide deposit, Yunnan, SW China [J]. Mineralium Deposita, 45 : 567~582.
- Liu Jiajun, Li Chaoyang, Zhang Qian, *et al.* 2001. Wood textures in Jinman copper deposit in western Yunnan and their genetic implications [J]. Science in China Series D-Earth Sciences, 44(6) : 545~554.
- Liu Jiajun, Zhai Degao, Li Zhiming, *et al.* 2010. Occurrence of Ag, Co, Bi, and Ni elements and its genetic significance in the Baiyangping silver-copper polymetallic metallogenic concentration area, Lanping basin, southwestern China [J]. Acta Petrologica Sinica, 26(6) : 1646~1660 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yingchao. 2009. Mineralization of Pb-Zn in Dongmohazhuhua and Mohailaheng Pb-Zn deposits, Zaduo area, Qinghai province [D]. Dissertation for Master Degree, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 1~114 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yingchao, Hou Zengqian, Yang Zhusen, *et al.* 2010. Fluid inclusions constraints on the origin of Dongmohazhuhua Pb-Zn ore deposit, Yushu area, Qinghai province [J]. Acta Petrologica Sinica, 26(6) : 1805~1819 (in Chinese with English abstract).
- Liu Z, Zhao X, Wang C, *et al.* 2003. Magnetostratigraphy of Tertiary sediments from the Hoh Xil Basin : implications for the Cenozoic tectonic history of the Tibetan Plateau [J]. Geophysical Journal International, 154(2) : 233~252.
- Mao Jingwen, Ye Huishou, Wang Ruiting, *et al.* 2009. Mineral deposit model of Mesozoic porphyry Mo and vein-type Pb-Zn-Ag ore deposits in the eastern Qinling, Central China and its implication for prospecting [J]. Geological Bulletin of China, 28(1) : 72~79 (in Chinese with English abstract).
- Meinert L D, Dipple G M and Nicolescu S. 2005. World skarn deposits [J]. Economic Geology, 100 : 299~336.
- Mo Xuanxue, Lu Fengxiang, Shen Shangyue, *et al.* 1993. Volcanism and Metallogeny in the Sanjiang Tethys [M]. Beijing : Geol. Pub. House, 1~250 (in Chinese with English abstract).
- Mountain B W and Seward T M. 2003. Hydrosulfide/sulfide complexes of copper (I) : Experimental confirmation of the stoichiometry and stability of Cu(HS)₂ to elevated temperatures [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 67(16) : 3005~3014.
- Mu Chuanlong, Wang Jian, Yu Qian, *et al.* 1999. The evolution of the sedimentary basin in Lanping area during Mesozoic-Cenozoic [J].

- Mineral Petrology, 19 : 30~36 (in Chinese with English abstract).
- Pan Guitang, Xu Q, Hou Z Q, *et al.* 2003. The Ore-Forming System of the Orogenic Processing in the Western “Sangjiang” Ploy-Arc and the Resources Estimate [M]. Beijing : Geol. Pub. House, 1~420 (in Chinese).
- Pan Jiayong, Zhang Qian, Ma Dongsheng, *et al.* 2000. Stable isotope geochemical characteristics of the Yangla copper deposit in western Yunnan province [J]. Acta Mineralogica Sinica, 20 (4) : 385~389 (in Chinese with English abstract).
- Paradis S, Hannigan P and Dewing K. 2007. Mississippi Valley-type lead-zinc deposits [A]. Mineral Deposits of Canada : A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods [C]. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication, 5 : 185~203.
- Qi Jinping, Chen Yanjing, Ni Pei, *et al.* 2007. Fluid inclusion constraints on the origin of the Lengshuibegou Pb-Zn-Ag deposit, Henan province [J]. Acta Petrologica Sinica, 23 (9) : 2119~2130 (in Chinese with English abstract).
- Qin Gongjiong and Zhu Shangqing. 1991. Genetic model and prospecting prediction of Jinding Pb-Zn ore deposit [J]. Journal of Yunan Geology, 10 : 145~190 (in Chinese).
- Qu Yihua, Yuan Pinquan, Shuai Kaiye, *et al.* 1998. Metallogeny and Prediction of Sylvite in Lanping-Simaog Basin, Yunnan Province [M]. Beijing : Geological Publishing House, 1~120 (in Chinese).
- Rosenberg P E and Larson P B. 2000. Isotope geochemistry of ankerite-bearing veins associated with the Coeur d'Alene Mining District, Idaho [J]. Economic Geology, 95 (8) : 1689~1699.
- Rouvier H, Perthuisot V and Mansouri A. 1985. Pb-Zn deposits and salt-bearing diapirs in Southern Europe and North Africa [J]. Economic Geology, 80 (3) : 666~687.
- Slobodnik M, Jacher-šliwczynska K, Taylor M C, *et al.* 2008. Plumbotectonic aspects of polymetallic vein mineralization in Paleozoic sediments and Proterozoic basement of Moravia (Czech Republic) [J]. International Journal of Earth Sciences, 97 (1) : 1~18.
- Song Yucai. 2009. Characteristics and genetic model of sediment-hosted base metal deposits in Sanjiang area, southwest China [D]. Beijing : Postdoctoral Report, Chinese Academy of Geological Sciences, 1~120 (in Chinese with English abstract).
- Spurlin M S, Yin A, Horton B K, *et al.* 2005. Structural evolution of the Yushu-Nangqian region and its relationship to syncollisional igneous activity, east-central Tibet [J]. GSA Bulletin, 117 : 1293~1317.
- Tan Fuwen, Xu Xiaosong, Yin Fuguang, *et al.* 1999. Upper Carboniferous sediments in the Simao region, Yunnan and their tectonic settings [J]. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 19 (4) : 26~34 (in Chinese with English abstract).
- Tang Juxing, Zhong Kanghui, Liu Zhaochang, *et al.* 2006. Intracontinental orogen and metallogenesis in Himalayan epoch : Changdu large composite basin, eastern Tibet [J]. Acta Geologica Sinica, 80 (9) : 1364~1376 (in Chinese with English abstract).
- Tao Xiaofeng, Zhu Lidong, Liu Dengzhong, *et al.* 2002. The formation and evolution of the Lanping basin in western Yunnan [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 29 (5) : 521~525 (in Chinese with English abstract).
- Tian Hongliang. 1998. The geological features of Baiyangping Cu-Ag polymetallic deposit, Lanping [J]. Journal of Yunan Geology, 16 : 105~108 (in Chinese).
- Tian Shihong, Yang Zhusheng, Hou Zengqian, *et al.* 2009. Rb-Sr and Sm-Nd isochron ages of Dongmozhaohua and Mohailaheng Pb-Zn ore deposits in Yushu area, southern Qinghai and their geological implications [J]. Mineral Deposits, 28 (6) : 747~758 (in Chinese with English abstract).
- Voudouris P, Melfos V, Spry P G, *et al.* 2008. Mineralogical and fluid inclusion constraints on the evolution of the Plaka intrusion-related ore system, Lavrion, Greece [J]. Mineralogy and Petrology, 93 (1~2) : 79~110.
- Wang Anjian, Cao Dianhua, Gao Lan, *et al.* 2009. A probe into the genesis of Jinding super-large lead-zinc ore deposit [J]. Acta Geologica Sinica, 83 (1) : 43~54 (in Chinese with English abstract).
- Wang Feng and He Mingyou. 2003. Lead and sulfur isotopic tracing of the ore forming material from the Baiyangping copper-silver polymetallic deposit in Lanping, Yunnan [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 23 : 82~85 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guanghui, Song Yucai, Hou Zengqian, *et al.* 2009. Re-Os dating of molybdenite from Liancheng vein copper deposit in Lanping basin and its geological significance [J]. Mineral Deposits, 28 (4) : 413~424 (in Chinese with English abstract).
- Wang J H, Yin A, Harrison T M, *et al.* 2001. A tectonic model for Cenozoic igneous activities in the eastern Indo-Asian collision zone [J]. Earth and Planetary Science Letters, 188 : 123~133.
- Wang Liquan, Hou Zengqian, Mo Xuanxue, *et al.* 2002. The post-collisional crustal extension setting : An important mineralizing environment of volcanic massive sulfide deposits in Jinsha orogenic belt [J]. Acta Geologica Sinica, 76 (4) : 541~556 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shifeng, Yi Haisheng and Wang Chengshan. 2002. Sediments and structural features of Nangqian Tertiary basin in eastern of Tibet-Qingzang plateau [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 38 (1) : 109~114 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yizhi, Qi Shengsheng, An Shouwen, *et al.* 2007. Characteristics and Ar-Ar dating of ultramafic-mafic rocks in the Zadoi area, southern Qinghai, China [J]. Geological Bulletin of China, 26 (6) : 668~674 (in Chinese with English abstract).
- Wei Junqi. 2001. S-Pb Isotopic geochemistry of copper multi-metal deposits in Hexi, Yunnan province [J]. Geology and Mineral Resources of South China, 3 : 36~39 (in Chinese with English abstract).
- Wu Nanping, Jiang Shaoyong, Liao Qilin, *et al.* 2003. Lead and sulfur isotope geochemistry and the ore sources of the vein-type copper deposit in Lanping-Simaog Basin, Yunnan province [J]. Acta Petrologica Sinica, 19 : 799~807 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Rongge. 1989. Reservation of thermal brine with ore-forming ma-

- terials and abrupt mineralization[D]. Postdoctoral Report. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 1~77 (in Chinese).
- Xiu Qunye, Wang Anjian, Gao Lan, *et al.* 2006. Discussion on the geologic time of host rocks of Jinding super large deposit and its geological implications[J]. Geological Survey and Research, 29: 293~302 (in Chinese with English abstract).
- Xu Qidong and Li Jianwei. 2003. Migration of ore-forming fluids and its relation to zoning of mineralization in northern Lanping Cu-polymetallic area, Yunnan province: Evidence from fluid inclusions and stable isotopes[J]. Mineral Deposits, 22(4): 366~376 (in Chinese with English abstract).
- Xu Qidong and Zhou Lian. 2004. Ore-forming fluid migration in relation to mineralization zoning in Cu-polymetallic mineralization district of northern Lanping, Yunnan: Evidence from Lead isotope and mineral chemistry of ores[J]. Mineral Deposits, 23: 452~463 (in Chinese with English abstract).
- Xue Chunji, Chen Yuchuan, Wang Denghong, *et al.* 2003. Geology and isotopic composition of helium, neon, xenon and metallogenic age of the Jinding and Baiyangping ore deposits, northwest Yunnan, China[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 46(8): 789~800 (in Chinese with English abstract).
- Xue Chunji, Gao Yongbao, Zeng Rong, *et al.* 2007. Organic petrography and geochemistry of the giant Jinding deposit, Lanping basin, northwestern Yunnan, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(11): 2 889~2 900.
- Xue Wei, Xue Chunji, Chi Guoxiang, *et al.* 2010. Study on the fluid inclusions of Baiyangping poly-metallic deposit in Lanping basin, northwestern Yunnan, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 26(6): 1 773~1 784 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yueqing, Yang Jianmin, Xu Decai, *et al.* 2006. Volcanic rock evolution and metallogenic features of copper-polymetallic deposits in southern Lancang River valley, Yunnan province[J]. Mineral Deposits, 25(4): 447~462 (in Chinese with English abstract).
- Yao Junming, Zhao Taiping, Wei Qingguo, *et al.* 2008. Fluid inclusions features and genetic type of the Wangpingxigou Pb-Zn deposit, Henan province[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(9): 2 113~2 123 (in Chinese with English abstract).
- Ye Qingtong, Hu Yunzhong and Yang Yueqing. 1992. Regional Geochemistry Background and the Gold-Silver-Lead-Zinc Mineralization in Sanjiang Area[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~264 (in Chinese with English abstract).
- Yin A and Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. J. Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 28: 211~280.
- Zhang Qian. 1993. Pb isotopic composition of Jinding super-large Pb-Zn in Yunnan province and discussion on the sources of lead[J]. Geology and Prospecting, 29: 21~28 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Haibin. 2006. Study on the characteristics and metallogenic condition of copper-polymetallic deposits in middle-northern Lanping basin, western Yunnan[D]. Beijing: Dissertation for PhD, China University of Geosciences, 1~123 (in Chinese with English abstract).
- Zhao X X, Liu Z F, Wang C S, *et al.* 2000. New magnetostratigraphic and sedimentologic results from Tertiary sediments of the Hoh Xil basin, northern Qinghai-Tibet Plateau: Implications for the Cenozoic tectonic history of the Tibetan plateau[J]. Earth Science Frontiers, 7(Supplement): 239~240.
- Zhao Xingyuan. 1989. Stable isotope geochemistry of the Jinding lead-zinc ore deposit, Yunnan[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 14(5): 495~502 (in Chinese with English abstract).
- Zhong Dalai. 1998. Plaeo-Tethyan Orogen in Western Yunnan Province [M]. Beijing: Science Press, 1~231 (in Chinese).
- Zhong Hong, Hu Ruizhong and Ye Zaojun. 2000. Sulfur, lead, hydrogen and oxygen isotopic geochemistry of the Dapingzhang copper-polymetallic deposit, Yunnan province[J]. Geochimica, 29(2): 136~142 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jianyu, Wang Jianghai, Horton B K, *et al.* 2011. The closure of Paleogene basins of east-central Tibet in response to tectonic, sedimentation, magmatism and paleoclimate[J]. Acta Geologica Sinica, 85(2): 172~178 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Weiquan and Zhou Quanli. 1992. A study on the isotopic composition of Pb and S in the Lanping Pb-Zn deposit, Yunnan province[J]. Geochimica, 20: 141~148 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Chuangye, Xia Wenjie, Yin Haisheng, *et al.* 1997. The tectonic nature and evolution of mesozoic Lanping-Simao basin[J]. Journal of Chendu University of Technology, 24(4): 23~30 (in Chinese with English abstract).
- Zhu L D, Wang C S, Zheng H B, *et al.* 2006. Tectonic and sedimentary evolution of basins in the northeast of Qinghai-Tibet Plateau and their implication for the northward growth of the plateau[J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 241(1): 49~60.
- Zhu Tongxing. 1999. Sedimentary evolution from back-arc to foreland basin: An example from the Qiangtang Mesozoic basin in Northern Xizang[J]. Tethyan Geology, 23: 1~15 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Weiguang, Li Chaoyang and Deng Hailin. 2001. Sulfur and lead isotope geochemistry of the Xiacun silver-polymetallic ore deposit in Sichuan province[J]. Acta Mineralogica Sinica, 21(2): 219~224 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xinyou, Wang Jingbin, Liu Zengren, *et al.* 2010. Geologic characteristics and the genesis of the Wulagen lead-zinc deposit, Xinjiang, China[J]. Acta Geologica Sinica, 84(5): 694~702 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Yingtang, Guo Tongzhen, Zhang Xueting, *et al.* 2003. Discovery of Triassic Norian strata in the Hoh Xil Lake area, western Qinghai, and its geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 22(7): 474~479 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Yingtang, Yi Haisheng, Wang Qiang, *et al.* 2004. The discovery and significance of the Middle Permian adakites along the Huandong River north of the Xijir Ulan Lake, Qinghai[J]. Sedimentary Geolo-

gy and Tethyan Geology, 24(2):30~34 (in Chinese with English abstract).

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[J]. 矿床地质, 4(1):1~10.
- 陈开旭. 2006. 云南兰坪前陆盆地北部铜、银多金属矿集区形成机制[D]. 武汉:中国地质大学(武汉)博士学位论文, 1~128.
- 陈开旭,何龙清,魏君奇,等. 2004a. 云南白秧坪矿化集中区矿石矿物特征及银、钼赋存状态的初步研究[J]. 矿物学报, 24(1):61~67.
- 陈开旭,姚书振,何龙清,等. 2004b. 云南兰坪白秧坪银多金属矿集区成矿流体研究[J]. 地质科技情报, 23:45~50.
- 陈衍景. 2006. 造山型矿床、成矿模式、及找矿潜力[J]. 中国地质, 33:1181~1196.
- 陈衍景,翟明国,蒋少涌. 2009. 华北大陆边缘造山过程与成矿研究的重要进展和问题[J]. 岩石学报, 25(11):2695~2726.
- 戴宝章,廖后林,蒋少涌. 2004. 云南兰坪-思茅盆地大平掌铜多金属矿床同位素地球化学与成矿年代学[J]. 南京大学学报(自然科学版), 40(6):674~683.
- 邓军,侯增谦,莫宣学,等. 2010. “三江”特提斯复合造山与成矿作用[J]. 矿床地质, 29(1):37~42.
- 何明勤,刘家军,李朝阳,等. 2004. 兰坪盆地铅锌铜大型矿集区的流体成矿作用机制——以白秧坪铜钴多金属地区为例[M]. 北京:地质出版社.
- 侯增谦,宋玉财,李政,等. 2008b. 青藏高原碰撞造山带 Pb-Zn-Ag 矿床新类型:成矿基本特征与构造控矿模型[J]. 矿床地质, 27:123~144.
- 侯增谦,王二七,莫宣学,等. 2008a. 青藏高原碰撞造山与成矿作用[M]. 北京:地质出版社, 1~980.
- 季宏兵,李朝阳. 1998. 滇西金满铜矿床成矿流体地球化学特征及来源[J]. 矿物学报, 3:28~37.
- 简平,汪啸风,何龙清,等. 1999. 金沙江蛇绿岩中斜长岩和斜长花岗岩的 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 岩石学报, 15(4):590~593.
- 李亚林,王成善,伊海生,等. 2006. 西藏北部新生代大型逆冲推覆构造与唐古拉山的隆起[J]. 地质学报, 80:1118~1130.
- 李勇,王成善,伊海生,等. 2001. 青藏高原中侏罗世-早白垩世羌塘复合型前陆盆地充填模式[J]. 沉积学报, 19(1):20~27.
- 李勇,王成善,伊海生. 2002. 中生代羌塘前陆盆地充填序列及演化过程[J]. 地层学杂志, 26(1):62~67.
- 李志明,刘家军,秦建中,等. 2005. 兰坪盆地白秧坪铜钴银多金属矿床成矿物质来源研究[J]. 地质与勘探, 1:1~6.
- 刘家军,李朝阳,张乾,等. 2001. 滇西金满铜矿床中木质结构及其成因意义[J]. 中国科学(D辑), 31(2):89~94.
- 刘家军,翟德高,李志明,等. 2010. 兰坪盆地白秧坪银铜多金属矿集中区中银、钴、铋、镍的赋存状态与成因意义[J]. 岩石学报, 26(6):1646~1660.
- 刘英超. 2009. 青海杂多东莫扎拉-莫海拉亨铅锌成矿作用[D]. 北京:中国地质科学院硕士论文, 1~114.

- 刘英超,侯增谦,杨竹森,等. 2010. 青海玉树东莫扎拉铅锌矿床流体包裹体研究[J]. 岩石学报, 26(6):1805~1819.
- 毛景文,叶会寿,王瑞廷,等. 2009. 东秦岭中生代钨铅锌银多金属矿床模型及其找矿评价[J]. 地质通报, 28(1):72~79.
- 莫宣学,路凤香,沈上越,等. 1993. “三江”特提斯火山作用与成矿[M]. 北京:地质出版社, 1~267.
- 牟传龙,王剑,余谦,等. 1999. 兰坪中新世代沉积盆地演化[J]. 矿物岩石, 19(3):30~36.
- 潘桂棠,徐强,侯增谦,等. 2003. 西南“三江”多岛弧造山过程成矿系统与资源评价[M]. 北京:地质出版社, 1~420.
- 潘家永,张乾,马东升,等. 2000. 滇西羊拉铜矿床稳定同位素地球化学研究[J]. 矿物学报, 20(4):385~389.
- 祁进平,陈衍景,倪培,等. 2007. 河南冷水北沟铅锌银矿床流体包裹体研究及矿床成因[J]. 岩石学报, 23(9):2119~2130.
- 覃功炯,朱上庆. 1991. 金顶铅锌矿床成因模式及找矿预测[J]. 云南地质, 10(2):145~190.
- 曲一华,袁品泉,帅开业,等. 1998. 兰坪-思茅盆地钾盐成矿规律及预测[M]. 北京:地质出版社, 1~120.
- 宋玉财. 2009. “三江”沉积岩容矿贱金属矿床:发育特点与成矿模型[D]. 北京:中国地质科学院博士后出站报告, 1~120.
- 谭富文,许效松,尹福光,等. 1999. 云南思茅地区上石炭统沉积特征及其构造背景[J]. 岩相古地理, 19(4):26~34.
- 唐菊兴,钟康惠,刘肇昌,等. 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[J]. 地质学报, 80(9):1364~1376.
- 陶晓风,朱利东,刘登忠,等. 2002. 滇西兰坪盆地的形成及演化[J]. 成都理工学院学报, 29(5):521~525.
- 田洪亮. 1998. 兰坪白秧坪铜银多金属矿床地质特征[J]. 云南地质, 16(1):105~108.
- 田世洪,杨竹森,侯增谦,等. 2009. 玉树地区东莫扎拉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[J]. 矿床地质, 28(6):747~758.
- 王安建,曹殿华,高兰,等. 2009. 论云南兰坪金顶超大型铅锌矿床的成因[J]. 地质学报, 83(1):43~54.
- 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[J]. 沉积与特提斯地质, 23(2):82~85.
- 王光辉,宋玉财,侯增谦,等. 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[J]. 矿床地质, 28(4):413~424.
- 王立全,侯增谦,莫宣学,等. 2002. 金沙江造山带碰撞后地壳伸展背景——火山成因块状硫化物矿床的重要成矿环境[J]. 地质学报, 76(4):541~556.
- 王世锋,伊海生,王成善. 2002. 青藏高原东部囊谦第三纪盆地沉积构造特征[J]. 北京大学学报:自然科学版, 38(1):109~114.
- 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⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄对成矿时代的约束[J]. 地质通报, 24(2):181~184.
- 王毅智,祁生胜,安守文,等. 2007. 青海南部杂多地区超镁铁质-镁铁质岩石的特征及 Ar-Ar 定年[J]. 地质通报, 26(06):668~674.
- 魏君奇. 2001. 云南河西铜多金属矿 S-Pb 同位素地球化学[J]. 华南地质与矿产, 3:36~39.

- 吴南平, 蒋少涌, 廖后林, 等. 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[J]. 岩石学报, 19(4): 799~795.
- 肖荣阁. 1989. 含矿热卤水储备与突发成矿作用[D]. 贵阳: 中国科学院博士后出站报告, 1~77.
- 修群业, 王安建, 高 兰, 等. 2006. 金顶超大型矿床容矿围岩时代探讨及地质意义[J]. 地质调查与研究, 12: 298~302.
- 徐启东, 李建威. 2003. 云南兰坪北部多金属矿化区区域流体流动与矿化分带—流体包裹体与稳定同位素依据[J]. 矿床地质, 22(4): 365~376.
- 徐启东, 周 炼. 2004. 云南兰坪北部铜多金属矿化区成矿流体流动与矿化分带—矿石铅同位素和特征元素组成依据[J]. 矿床地质, 23(4): 452~461.
- 薛春纪, 陈毓川, 王登红, 等. 2003. 滇西北金顶和白秧坪矿床: 地质和 He, Ne, Xe 同位素组成及成矿时代[J]. 中国科学 D 辑, 33(4): 315~322.
- 薛春纪, 高永宝, 曾 荣, 等. 2007. 滇西北兰坪盆地金顶超大型矿床有机岩相学和地球化学[J]. 岩石学报, 23(11): 2 889~2 900.
- 薛 伟, 薛春纪, 池国祥, 等. 2010. 滇西北兰坪盆地白秧坪多金属矿床流体包裹体研究[J]. 岩石学报, 26(6): 1 773~1 784.
- 杨岳清, 杨建民, 徐德才, 等. 2006. 云南澜沧江南段火山岩演化及其铜多金属矿床的成矿特点[J]. 矿床地质, 25(4): 447~462.
- 姚军明, 赵太平, 魏庆国, 等. 2008. 河南王坪西沟铅锌矿床流体包裹体特征和矿床成因类型[J]. 岩石学报, 24(9): 2 113~2 123.
- 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[M]. 北京: 地质出版社, 1~264.
- 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[J]. 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[D]. 北京: 中国地质大学博士论文, 1~123.
- 赵兴元. 1989. 云南金顶铅锌矿床稳定同位素地球化学研究[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 14(5): 495~502.
- 钟大赟. 1998. 滇川西部古特提斯造山带[M]. 北京: 科学出版社, 1~231.
- 钟 宏, 胡瑞忠, 叶造军. 2000. 云南太平掌铜多金属矿床硫、铅、氢、氧同位素地球化学[J]. 地球化学, 29(2): 136~142.
- 周江羽, 王江海, Horton B K, 等. 2011. 青藏高原中东部古近纪盆地封闭的构造—沉积—岩浆活动和古气候响应[J]. 沉积学报, 1: 85~91.
- 周维全, 周全立. 1992. 兰坪铅锌矿床铅和硫同位素组成研究[J]. 地球化学, (2): 141~148.
- 朱创业, 夏文杰, 伊海生, 等. 1997. 兰坪—思茅中生代盆地性质及构造演化[J]. 成都理工学院学报, 24(4): 23~30.
- 朱同兴. 1999. 从弧后盆地到前陆盆地的沉积演化—以西藏北部羌塘中生代盆地分析为例[J]. 特提斯地质, 23(2): 1~15.
- 朱维光, 李朝阳, 邓海琳. 2001. 四川西部呷村银多金属矿床硫铅同位素地球化学[J]. 矿物学报, 21(2): 219~224.
- 朱迎堂, 郭通珍, 张雪亭, 等. 2003. 青海西部可可西里湖地区晚三叠世诺利期地层的厘定及其意义[J]. 地质通报, 22(7): 474~479.
- 朱迎堂, 伊海生, 王 强, 等. 2004. 青海西金乌兰还东河中二叠世埃达克岩的发现及其意义[J]. 沉积与特提斯地质, 24(2): 30~35.
- 祝新友, 王京彬, 刘增仁, 等. 2010. 新疆乌拉根铅锌矿床地质特征与成因[J]. 地质学报, 84(5): 694~702.