

·综述与进展·

脉状铅锌(铜、银)多金属热液矿床研究进展

贾敬伍^{1,2}, 张洪瑞¹, 胡茂德^{1,2}

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质矿业公司, 北京 100029)

摘要:目前在矿床学分类研究中对沉积岩容贱金属矿床的命名和分类尚未统一,其中一类赋矿围岩为沉积岩、矿体受构造(断层、褶皱等)控制呈脉状产出的、成矿金属为铅锌铜银多金属的矿床成为缺失环节,缺少系统的归纳总结。但该类矿床是造山作用的产物,对其进行归纳综合分析,有助于了解造山作用中的矿质迁移和沉淀过程。本文将该类矿床资料收集,对其成矿特征、控矿构造、成矿流体、矿质来源等进行分析总结。研究表明,此类矿床与造山作用或造山带有着紧密的联系。成矿物质表现为多源性,包括基底围岩、岩浆来源以及幔源贡献。成矿流体具有岩浆流体、变质流体、盆地卤水等多种来源,部分矿床的成矿流体受大气水影响。该类型矿床与MVT铅锌矿床有相似之处,但在成矿环境、控矿因素、金属来源以及成矿流体来源等方面有较大差异。

关键词:贱金属; 沉积岩容; 造山运动; 成矿物质; 成矿流体

中图分类号: P618.4; P611

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)04-0726-21

The progress in the study of vein Pb-Zn-Cu-Ag polymetallic epithermal deposits

JIA Jing-wu^{1,2}, ZHANG Hong-ru¹ and HU Mao-de^{1,2}

(1. Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China; 2. China National Geological & Mining Corporation, Beijing 100029, China)

Abstract: In the study of metallogeny, there isn't a unified nomenclature or classification for the sediment-hosted base-metal deposits. Among these deposits, one type of deposits, which is hosted by sediments and controlled by structure and characterized by vein orebody that contains Pb-Zn-Cu-Ag polymetals, lacks systematic summary. However, this type of deposits is a product of orogeny, and its study can provide information concerning the process of mineral migration and precipitation. The authors collected many data of this deposit type, in order to find out its metallogenic characteristics, ore-controlling structures, ore-forming fluids and sources of ore-forming material. Researches show that deposits of this type are mainly located in orogenic belts, and the mineralization is mostly related to orogeny or orogenic belt. The metallogenic materials of these deposits were mainly derived from basement rocks, probably with the contribution of magma and mantle source. The ore-forming fluids were mainly originated from basin brine, magmatic fluid and metamorphic fluid, and were partly affected by the meteoric water. Deposits of this type have some similarities to MVT deposits, but there are still many apparent differences between them in metallogenic environment, ore-bearing rock, ore-controlling structure type, source of ore-forming fluid and ore-forming material.

Key words: base metal; sediment-hosted; orogeny; metallogenic materials; ore-forming fluids

收稿日期: 2013-12-16; 修订日期: 2014-06-09

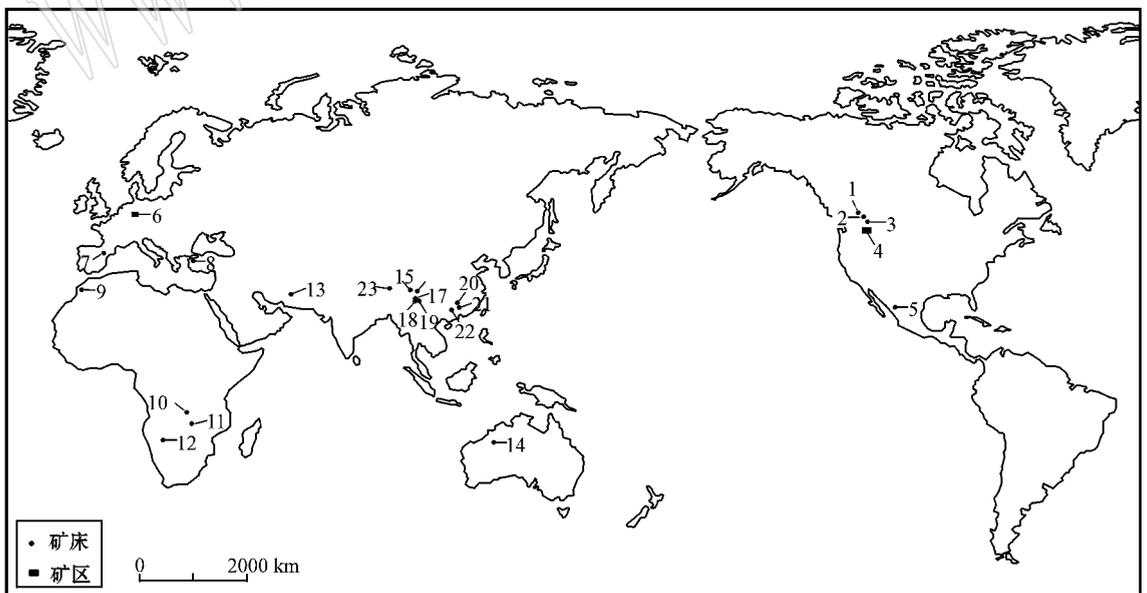
基金项目: 国家自然科学基金项目(41102040, U09336051); 地质调查资助项目(1212011220908); 国际地学对比计划(IGCP/SIDA-600)

作者简介: 贾敬伍(1987-), 男, 硕士研究生, 矿产普查与勘探专业; 通讯作者: 张洪瑞(1982-), 男, 副研究员, 主要从事矿床学研究, E-mail: hongui-1982@126.com。

2005年,经济地质学会组织出版了一套矿床地质百年专辑,系统总结回顾了当今矿床学中重要矿床类型、重要成矿区带、地球动力学与成矿等方面的研究进展(Hedenquist *et al.*, 2005)。其中与沉积岩有关的铅锌矿床由Leach等(2005)执笔,认为该类矿床可划分出SEDEX和MVT两类,同时承认这两类划分方案并不能涵盖所有此类矿床,如爱尔兰型矿床的独立存在。2008年,侯增谦等(2008)在青藏高原东缘识别出一套这两类矿床类型不能涵盖的成矿带,将其命之为“造山型”。2010年,Leach应邀在Economic Geology发表的此类矿床回顾中,又将该类型矿床命名为CD型(Leach *et al.*, 2010)。之所以研究进展中出现这些命名上的添加或调整,主要是因为沉积岩型铅锌矿床范围很宽,不能统一地装入一个“口袋”。比如还存在一种与该类矿床有关的脉状矿床,Beaudoin等(1992)最早将其单独划分一类,称“Ag-Pb-Zn veins in metasedimentary terranes”,美国地调局将其划分成“Polymetallic Vein Deposits”(Cox, 1986),加拿大地调局将其划分成“Polymetallic veins Ag-Pb-Zn ± Au”或者“Clastic metasediment-hosted silver-lead-zinc veins, silver/base metal epithermal deposits”(Lefebvre and Church, 1996)。由于此

类脉状矿床分布零散、品位不稳定,矿床研究和勘查过程中被忽视,目前仍缺少系统的总结和研究。但是,这类脉状矿床是在造山作用中形成的,是造山过程与成矿耦合的极佳载体,对其研究有助于理解造山过程中矿质的运移沉淀过程。

本文以赋矿围岩为沉积岩,矿体受构造(断层、褶皱等)控制脉状产出,成矿金属为铅锌铜银多金属等三条标准,在世界范围内公开发表(出版)的矿床资料中,筛选出23个矿床(矿区),如图1所示。按照加拿大地调局的分类,将这些矿床统称为“脉状铅锌(铜、银)多金属热液矿床”,本文较全面地收集了这些矿床的地质背景、矿床地质、矿床地球化学等资料,并对这些资料进行综合分析,力图归纳概括出脉状多金属热液矿床的成矿过程,以更好的理解造山作用与成矿耦合关系。资料显示(表1)脉状铅锌(铜、银)多金属热液矿床并不像前人认识的那样规模小、品位差。比如,Kipushi矿床的矿石储量在7000万吨以上,含锌8.8%,铜4.8%,铅0.5%,银150 g/t(Schneider *et al.*, 2007)。这类矿床的总金属量在10~1000万吨不等,品位主要为铅2%~10%,锌1%~10%,铜1%~5%,银150~500 g/t。



1—Silver Cup; 2—Silvana; 3—St. Eugene; 4—Coeur d'Alene; 5—Granadeha; 6—Taurus; 7—Cierco; 8—Arapucan; 9—Assif El Mal; 10—Kipushi; 11—Kabwe; 12—Tsumeb; 13—Chehelkureh; 14—Nifty; 15—拉诺玛; 16—夏塞; 17—连城; 18—金满; 19—白秧坪; 20—康家湾; 21—枫树板; 22—老厂; 23—尤卡朗

图1 脉状铅锌(铜、银)多金属热液矿床(矿区)分布图

Fig. 1 Distribution of vein Pb-Zn-Cu-Ag epithermal deposits/ore districts

表 1 脉状铅锌(铜、银)多金属热液矿床金属量及品位

Table 1 Metal amount and grade of base metal epithermal deposits

矿床(矿区)	金属组合	金属量				品位			
		Pb/万吨	Zn/万吨	Cu/万吨	Ag/吨	Pb/%	Zn/%	Cu/%	Ag/g·t ⁻¹
Silvana	Ag-Pb-Zn-Cu(Cd)	2.87	2.63		243	3.40	4.70		290
Silver Cup	Ag-Pb-Zn-Cu(Au)	0.27	0.02	<0.01	45.28	1.70	1.50		229.67
St. Eugene	Ag-Pb-Zn(Au)	11.30	1.45		182				
Coeur d'Alene	Ag-Pb-Zn	800	300	17	28 300	7~14	4~8		283.50~708.75
Granadeha	Zn-Pb-Cu				1 300	5	8	0.60	150
Ramsbeck	Pb-Zn	35.07	73.48			2.1	4.4		
Cierco	Cu-Zn-Pb(Ag)	5.60	4.20			4	3		
Kipushi	Pb-Zn-Cu/Pb-Zn	35	616	336	7 350	0.50	8.80	4.80	150
Kabwe	Cu-Zn-Pb-Ag	80	180	<0.01	79	10.70	25.20		
Tsumeb	Pb-Zn-Ag	30	95	129		10	3.50	4.30	
Arapucan	Pb-Zn-Cu-Ag	65.60	48.40	8.92	1 050	16.4	12.1	2.23	260
Assif El Mal	Pb-Zn-Cu	2	8	<1	500~2 300	2.00	8	<1	500~2 300
Nifty	Pb-Zn(Cu-Ag)			168.30				1.70	
Chehelkureh	Pb-Zn-Ag-Cu	88	25.34	21	308	0.88	1.81	1.50	22
金满	Cu(Pb-Zn)							2.58	21.90
尤卡郎	Pb-Ag					18.47	2.93		434
康家湾	Pb-Zn					3.92	4.5		85.8
枞树板	Pb-Zn-Ag					0.16~38.6	0.05~10.49		4.9~1 547.03
夏塞	Pb-Zn-Ag					2.87~6.85	1.23~2.85		339.01~465.57

1 成矿背景与时代

脉状铅锌(铜、银)多金属热液矿床的区域背景可以主要归纳为 4 类(表 2):

(1) 大陆裂谷: Taunus 矿区位于德国中西部, 矿体赋存在低变质程度的古生界硅质碎屑沉积岩、古生界碳酸盐岩和三叠系砂岩的压性断层中, 成矿于海西期之后(270~130 Ma), 与北大西洋的最初开裂有关, 属于裂谷环境(Kirnbauer *et al.*, 2012)。Assif El Mal 矿位于摩洛哥马拉喀什附近, 矿体赋存在寒武-奥陶系复杂岩性地层的近直立断层和张性断裂处, 成矿时代介于 208~65 Ma, 与海西后期潘吉亚大陆(Pangea)开裂有关, 属于裂谷环境(Bouabdellah *et al.*, 2009)。

(2) 俯冲带: Silvana 矿床位于加拿大西南部的 Kootenay 湖东侧, 赋存在晚三叠统 Slocan 群的剪性断层中, 成矿于中侏罗世(169±3 Ma), 是与东太平洋俯冲有关的科迪勒拉陆缘造山作用的产物(Beaudoin and Sangster, 1992)。而 Granadeha 矿床位于墨西哥奇瓦瓦州南部, 赋存在主要为白垩系页岩的断层和背斜枢纽处, 成矿与两次岩浆热液活动有关, 分别是大约 32 Ma 和 28~26 Ma, 是与俯冲有关的科

迪勒拉陆缘造山作用的产物(Grant and Ruiz, 1988)。Arapucan 矿位于土耳其西部的恰纳卡莱省(Canakkale Province), 矿体赋存在变质砂岩断层中, 可能是与特提斯洋(Tethys)向北俯冲有关的第三纪钙碱性岩浆活动的产物(Orgün *et al.*, 2005; Moix *et al.*, 2008)。

(3) 碰撞带: Kabwe 矿床位于赞比亚中部的卡布韦市(Kabwe), 赋存在新元古界白云岩的 NE-SW 走向断层中, 成矿于 680 Ma, 是与安哥拉微板块-刚果板块碰撞有关的 Lufilian 造山作用(约 650~600 Ma)早期阶段的产物(Kamona *et al.*, 1999)。Chehelkureh 矿床位于伊朗东南部, 矿体赋存在始新统杂砂岩、砂岩、页岩互层的右行走滑断层系统内, 成矿于渐新世(34~23 Ma), 晚于锡斯坦缝合带形成之后, 其成矿与岩浆岩侵入事件有着密切联系(Maanijou *et al.*, 2012)。拉诺玛矿床位于西藏昌都盆地, 矿体赋存在三叠系上统波里拉组灰岩的构造破碎带中, 成矿时代为 38~36.4 Ma, 是与印度-欧亚板块碰撞有关的喜马拉雅造山作用的产物(陶琰等, 2011; 陈实等, 2013)。尤卡郎矿床位于西藏那曲县境内, 冈底斯-喜马拉雅构造区中段北部, 古新世-始新世成矿, 与印度-欧亚板块碰撞有关(冯志兴等, 2011; 唐菊兴等, 2012)。

(4) 陆内造山带:这类矿床所在地区已经经历过大规模俯冲、碰撞过程,进入到陆内演化阶段,但受后期邻区碰撞作用影响,开始出现陆内造山成矿事件。如:Tsumeb矿床位于纳米比亚东北部,赋存在新元古界白云岩的大型向斜北翼,成矿于530 Ma,是与达马拉陆内造山作用早期阶段有关的产物(Martin and Eder, 1983; Kamona *et al.*, 1999; Melcher, 2003; Batumike *et al.*, 2007; Kampunzu *et al.*, 2009)。Cierco矿床位于西班牙东北部的比利牛斯山区,矿体赋存在二叠-三叠系变质岩、花岗岩以及三叠系红层的张性断层系统中,成矿时代为251~99.6 Ma,晚于海西造山运动,可能属陆内造山环境(Johnson *et al.*, 1996)。Nifty矿床位于澳大利亚西北部的大沙地沙漠(Great Sandy Desert),矿体赋存在古元古界-新元古界细粒碳质页岩、砂岩地层的褶皱、断裂中,成矿时代为717±5 Ma,是Miles陆内造山作用的产物(Anderson *et al.*, 2001; Carver, 2004)。金满铜多金属矿、连城铜钼多金属矿、白秧坪铅锌铜多金属矿(即西矿带)均位于青藏高原东缘的兰坪盆地(王光辉, 2010; 张锦让等, 2012),金满和连城矿床赋存在侏罗纪-白垩纪红色碎屑岩,矿体产于倒转背斜-翼 NNE 走向切层破碎带,成矿发生在古新世-始新世(65~41 Ma)(王光辉, 2010; 张锦让等, 2012)。尽管兰坪盆地所在的兰坪-思茅地块早在三叠纪-侏罗纪就已经拼合到扬子地块上,进入陆内演化阶段。但新生代以来,该区受印度-欧亚大陆的碰撞影响,开始发育大规模造山作用,铜钼的成矿即对应于青藏汇聚造山的主碰撞阶段(侯增谦等 2006a)。白秧坪矿床赋存在上三叠统三合洞组碳酸盐岩、第三系始新统保相寺组碎屑岩和白垩统景星组碎屑岩的断裂中,铅锌成矿时代为40~26 Ma,对应于青藏高原晚碰撞转换阶段(侯增谦等, 2006b; 王晓虎等, 2011)。夏塞矿床位于四川西部的巴塘县义敦海子山北侧,赋存在上三叠统图姆沟组的浅变质岩断层破碎带中,成矿于66.5~53.8 Ma,与喜马拉雅期陆内造山作用(65~15 Ma)有关(侯增谦等, 2001; 邹光富等, 2002; 刘权, 2003)。康家湾矿床位于湖南省常宁市,地处扬子板块与华夏板块的交汇边缘,赋存在二叠系下统当冲组泥岩和栖霞组炭质灰岩间的层间挤压破碎硅化角砾岩和褶皱、断层中,成矿于132.2 Ma,与燕山期岩浆作用有关(杨传益, 1985; 刘清双, 1996; 公凡影等, 2011)。老厂铅锌矿位于阳朔县和恭城县交界处,地

处江南古陆南缘外侧的南华准地台桂东北凹陷,主要赋存在寒武系(砂岩和白云岩)的断层破碎带,成矿年龄为265±5 Ma,与古生代末期的海西-印支运动形成的张性裂隙系统有关(陆孝赞等 2004)。枞树板矿床位于湖南郴县境内,赋存在震旦系碎屑岩层的多种构造中,成矿于燕山早期(189~151 Ma),与后造山构造环境的伸展构造体制有关(张怡军, 1996; 陈柏林等, 1999; 柏道远等, 2007)。

脉状铅锌(铜、银)多金属热液矿床成矿时代范围广泛(表2),包括:中元古代、震旦纪、寒武纪-渐新世,主要形成于新元古代-晚寒武世和早三叠世-渐新世两个阶段。由于有些矿床的研究程度不高、研究方法有限,其成矿时代只能用其他方式限定,如:Cierco矿的成矿时代根据穿切关系和热液活动时期限定为中、晚侏罗世-早侏罗世,或者是早白垩世(Johnson *et al.*, 1996); Assif El Mal矿的成矿时代根据穿切关系限定为中、晚侏罗世(Bouabdellah *et al.*, 2009); Taurus矿缺乏直接的年代学数据,其成矿年代通过地质关系和间接的地球年代学限定在270~130 Ma之间(Kirnbauer *et al.*, 2012)。

2 矿床地质特征

脉状铅锌(铜、银)多金属热液矿床的基本地质特征具有一定的规律,根据前人的资料,本文进行以下归纳总结,如表3所示。

2.1 赋矿围岩

赋存该类型矿床的围岩主要为沉积岩、变质沉积岩。沉积岩围岩的岩性主要包括灰岩、白云岩、页岩、砂岩、泥岩等。变质沉积岩围岩的岩性主要包括石英岩、千枚岩等。一些矿床受到岩浆作用影响,矿区范围内发育少量侵入岩或火山岩分布。赋矿地层的年代范围相对广泛,从元古宙到始新世均有分布。

2.2 控矿构造

与多种构造背景(裂谷、俯冲、碰撞和陆内造山)相对应,脉状多金属热液矿床控矿构造可分为挤压构造、伸展构造和走滑构造三种。

挤压构造主要是挤压过程中形成的裂隙,包括褶皱轴面、枢纽、褶脊及其伴生的裂隙等,符合这种控矿构造的矿床有 Silver Cup 矿床、St. Eugene 矿床、Coeur d'Alene 矿床、Granadeha 矿床、Taurus 矿床、Tsumeb 矿床、Nifty 矿床、金满矿床、连城矿床、康家湾矿床、枞树板矿床等。如:Kipushi矿床受控

表 2 脉状铅锌(铜、银)多金属热液矿床的成矿背景、时代及岩浆岩
 Table 2 Background, epochs and magmatite of vein Pb-Zn-Cu-Ag epithermal deposits

矿床(矿区)	区域背景	岩浆岩及其时代	成矿时代	参考文献
Silver Cup	位于 Omineca 结晶带(属科迪勒拉褶皱带五个分带之一)	岩体侵入(侏罗纪)	未知	Davis, 2009
Silvana	位于加拿大西南部的 Kootenay 湖东侧, 属 Omineca 结晶带(科迪勒拉褶皱带五个分带之一)	中侏罗世 Nelson 岩体侵入(165 Ma)	169 ± 3 Ma	Beaudoin <i>et al.</i> , 1989, 1992
St. Eugene	位于 Omineca 结晶带(属科迪勒拉褶皱带五个分带之一)	Moyie tholeiitic 岩体侵入(1 468 ± 2 Ma) St. Eugene 岩体侵入(年代未知)	1 468 ~ 1 300	MaBeaudoin, 1997; Joncsz <i>et al.</i> , 2002
Coeur d'Alene	位于 Belt Supergroup 盆地	与造山运动同期的岩浆热液事件; 岩基侵入(中生代到古近纪)	< 1 370 Ma 或 850 ~ 750 Ma(?)	Fleck, 2002; Mauk <i>et al.</i> , 2004
Granadaha	位于墨西哥奇瓦瓦州南部, 属科迪勒拉褶皱带	安第斯岩(32 ~ 34 Ma); 流纹岩(26 Ma); 玄武岩(7 Ma)	< 32 Ma	Grant <i>et al.</i> , 1988
Tatum	位于德国中西部, 属海西造山带	泥盆纪火山活动; 早石炭世火山活动 (355 ~ 335 Ma)	270 ~ 130 Ma	Kirnbauer <i>et al.</i> , 2012
Cierco	位于西班牙东北部的比利牛斯山区, 海西造山带大型地体 Pyrenees 的中部	Maladet Ma assifit 花岗岩侵入(277 ± 7 Ma)	中晚侏罗世—早侏罗世, 或早白垩世	Johnson <i>et al.</i> , 1996
Arapucan	位于土耳其西部的恰纳卡莱省(Canakkale province), 海西造山期的 Sakarya 微陆块残片内	安山岩、角砾状英安岩、辉绿岩(29 ~ 20 Ma); 蛇绿岩侵入(始新世); 花岗岩侵入(稍早于矿化)	< 65 Ma	Ongun <i>et al.</i> , 2005
Assif El Mal	位于非洲大陆北缘的摩洛哥马拉喀什附近	海西期及其后期(347 ~ 270 Ma)花岗岩浆侵入; 辉长岩侵入(145 ~ 165 Ma)	中晚侏罗世	Bonabdelilah <i>et al.</i> , 2009
Kipushi	位于泛非达马拉-卢夫里安褶皱带	Lufilian 造山运动后期侵入岩(455 Ma)	455 ~ 450 Ma	Kamona <i>et al.</i> , 1999; Batumike <i>et al.</i> , 2007; Schneider <i>et al.</i> , 2007
Kabwe	位于赞比亚中部的卡布韦市(Kabwe)	古元古代岩浆侵入(2 050 ~ 1 865 Ma); Mwashya Group 火山作用(765 ~ 735 Ma)	680 Ma	Kamona <i>et al.</i> , 1999, 2007; Kampunzu <i>et al.</i> , 2009
Tsumeb	位于纳米比亚东北部, 属泛非达马拉-卢夫里安褶皱带	Nosib 火山岩(> 750 Ma)	530 Ma	Kamona <i>et al.</i> , 1999; Melcher, 2003; Kampunzu <i>et al.</i> , 2009
Chehekkueh	位于伊朗东部的锡斯坦缝合带(代表着 88.5 ~ 55 Ma 期间消亡的洋壳, 始新世大陆碰撞时部分发生俯冲)	渐新世—中新世花岗岩闪长岩、石英—二长闪长岩和花岗岩侵入	34 ~ 23 Ma	Maanijou <i>et al.</i> , 2012
Nifty	位于澳大利亚西北部的大沙地沙漠(Great Sandy Desert), 属 Paterson 造山带	伟晶岩脉侵入(1 132 ± 21 Ma); 铁镁质岩体侵入(816 ± 6 Ma)	717 ± 5 Ma	Anderson <i>et al.</i> , 2001; Carver, 2004

续表 2
Continued Table 2

矿床(带)区)	区域背景	岩浆岩及其时代	成矿时代	参考文献
拉诺玛	位于青藏高原的昌都盆地	二叠纪—早中三叠世期间发育有岛弧型火山岩;喜马拉雅期花岗岩斑岩带产出	38~36.4 Ma(推测)	陶琰等,2011
夏塞	位于四川西部的巴塘县义敦海子山北侧,义敦岛弧造山带中段的弧后盆地内	花岗岩(燕山晚期—喜马拉雅期)	66.5~53.8 Ma	邹光富等,2002;刘权,2003
连城	位于青藏高原东缘的兰坪盆地	新生代岩浆岩活动	49~48 Ma	王光辉,2010;张锦让等,2012
金满	位于青藏高原东缘的兰坪盆地	燕山晚期岩浆岩活动;喜马拉雅早期浅成侵入岩和火山岩,新生代富碱钾质岩浆岩活动	58 Ma	刘家军等,2003
白秋坪	位于青藏高原东缘的兰坪盆地	火山岩(古生代、印支期、燕山期火山活动)和新生代碱性岩浆岩活动	30~29 Ma	李志明等,2005;王晓虎等,2011
康家湾	位于湖南省常宁市,扬子板块与华夏板块的交汇边缘,衡阳盆地南缘	燕山期花岗岩类岩浆岩活动(102~143 Ma);燕山期新、老磊山岩体活动(128 Ma)	132.2 Ma	杨传益,1985;刘清双,1996;张庆华,1999;李永胜等,2011
枫树板	位于杨子古陆与华夏古陆之间的华南褶皱系北缘,湘东南加里东褶皱带和湘中、湘南印支褶皱带交接部位	花岗岩岩脉(燕山晚期),叶山、高垄山花岗岩体和千里山岩体(燕山早期)	189~151 Ma	张怡军,1996 陈柏林等,1998, 1999
老厂	位于位于阳朔县和恭城县交界处,江南古陆南缘外侧的南华准地台桂东北凹陷	加里东期新寨花岗岩株(439±2 Ma),也有闪长玢岩和石英闪长岩脉分布	265±5 Ma	陆孝赞等,2004
尤卡朗	位于西藏那曲县境内,冈底斯—喜马拉雅构造区中段北部	燕山晚期花岗岩	古新世—始新世	付少英等,2009;王涛等,2011;唐菊兴等,2012

表 3 脉状铅(铜、银)多金属热液矿床基本特征
Table 3 Features of vein Pb-Zn-Cu-Ag epithermal deposits

矿床	赋矿围岩	控矿构造	矿体形态	矿物组合	矿石结构构造	热液蚀变	参考文献
Silver Cup	寒武系 Lardreau 群千枚岩、硅质千枚岩	沿背斜轴向平行或近平行的断层和裂隙	圆柱状	<p>矿石矿物: 方铅矿、闪锌矿、黝铜矿、黄铜矿、银、黄铁矿、砷黄铁矿、硫砷银矿、金</p> <p>脉石矿物: 方铅矿、闪锌矿、黝铜矿、黄铁矿、砷黄铁矿、银、硫砷银矿、脆银矿、银黄铁矿、脉石矿物: 方解石、石英、正长石、菱铁矿、电气石、绿泥石、粘土矿物、沸石</p>	细脉状、豆荚状构造	碳酸盐化、硅化、石英英碳酸盐化	Davis, 2009
Silvana	上三叠统 Slovan 群黑色粘土岩, 中到深灰色石英岩和泥质石英岩互层	剪性断层	圆柱状	<p>矿石矿物: 方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、黄铜矿、银、磁黄铁矿、磁铁矿为主, 银黝铜矿、砷铜矿、硫砷银矿次之; 脉石矿物: 方解石、石英、石榴子石、阳起石</p>	脉状、角砾状构造	硅化、泥质化	Beaudoin <i>et al.</i> , 1989, 1990
St. Eugene	中元古界 Purcell 超群石英、泥岩、浊积岩	断层, 沿起伏背斜褶皱的张性裂隙	板状	<p>矿石矿物: 方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、黄铜矿、银、磁黄铁矿、磁铁矿为主, 银黝铜矿、砷铜矿、硫砷银矿次之; 脉石矿物: 方解石、石英、石榴子石、阳起石</p>	不规则透镜状构造	四个蚀变相包, 括硅化和石榴子石-绿泥石化	Beaudoin, 1997; Jones <i>et al.</i> , 2002
Coeur d'Alene	中元古界 lower Belt 群玻璃质石英岩和 Ravalli 群粉砂岩、薄层泥岩、玻璃石英岩	地壳尺度的断层、等轴褶皱轴面的具剪切性质的密集劈理带	脉状	<p>矿石矿物: 方铅矿、闪锌矿、黝铜矿、黄铜矿、银、硫砷银矿; 脉石矿物: 菱铁矿、石英</p>	脉状、浸染状构造	热液淋滤、碳酸盐化	Fleck <i>et al.</i> , 2002; Meuk <i>et al.</i> , 2004
Granadeha	主要为白垩系页岩, 其次为渐新统安山岩	断层、非对称背斜的枢纽	脉状	<p>矿石矿物: 一期脉, 主要是方铅矿、闪锌矿、银、少量黄铜矿; 二期脉, 主要为黄铜矿、砷黄铁矿、闪锌矿, 少量金、银、方铅矿; 脉石矿物: 一期脉, 以石英、方解石、萤石为主, 白钨矿、钙铁榴石、斧石、绿帘石次之; 二期脉, 以石英、方解石、萤石为主</p>	块状、脉状构造	钙质硅酸盐化、绿帘石化、绿泥石化	Scott, 1958; Dreyes, 1978; Grant <i>et al.</i> , 1988
Taunus	低变质程度的古生界硅质碎屑沉积岩, 古生界碳酸盐岩和三叠系砂岩	压性断层	脉状	<p>矿石矿物: 方铅矿、闪锌矿为主, 黄铁矿、黄铜矿、砷铜矿、银次之; 脉石矿物: 方解石、石英、白云石、针铁矿、白铁矿、重晶石</p>	脉状构造		Kimbauer <i>et al.</i> , 2012
Cierco	二叠-三叠系变质岩、花岗岩, 三叠系红层	张性断层系统	脉状	<p>矿石矿物: 方铅矿、闪锌矿为主, 黄铁矿、黄铜矿次之, 还有微量的车轮矿、黝铜矿、砷硫镍矿、砷黄铁矿、红砷镍矿、磁铁矿、自然银; 脉石矿物: 方解石、白云石、石英、重晶石</p>	透镜状、网脉状、块状构造; 细粒结构		Johnson <i>et al.</i> , 1996
Arapucan	变质砂岩、辉绿岩	断层(岩体侵入产生)	透镜状	<p>矿石矿物: 主要为方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、砷铜矿、辉银矿、磁铁矿次之; 脉石矿物: 石英、方解石、黄铁矿为主, 金红石、白钨矿、铁锰氧化物等次之</p>	块状、浸染状、脉状构造; 他形、细粒结构	硅化、绢云母化、泥质化	Orgün <i>et al.</i> , 2005

续表 3-1
Continued Table 3-1

矿床	赋矿围岩	控矿构造	矿体形态	矿物组合	矿石结构构造	热液蚀变	参考文献
Assif El Mal	寒武-奥陶系杂砂岩、粉砂岩、变质泥岩和夹泥岩、凝灰岩的页岩	近垂直断层、沿张性断裂	脉状	方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、黄铜矿、黝铜矿(辉砷镍矿); 脉石矿物: 石英、白云石、菱铁矿、铁白云石	脉状、角砾状、浸染状构造; 自形晶、半自形晶, 细粒、球粒、斑状结构	脉体周边围岩蚀变强烈, 发育热水碳酸盐、石英、云母、绿泥石和钠长石	Bouabdellah <i>et al.</i> , 2009
Kipushi	新元古界白云岩、白云质页岩	直立断层、以断层为轴心的背斜一侧、地层接触带	脉状、块状	方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿为主, 方铅矿、神黄铁矿、神黝铜矿、硫铜锗矿及硫盐矿物次之	脉状、块状构造		Kamona <i>et al.</i> , 1999; Schneider <i>et al.</i> , 2007; Hejilten <i>et al.</i> , 2008; Kampunzu <i>et al.</i> , 2009
Kabwe	新元古界白云岩	剪切带内 NE-SW 走向断层	管状	方铅矿、闪锌矿、黄铁矿为主, 黄铜矿、斑铜矿、硫铜锗矿、铜蓝、辉铜矿、硅铈矿、硅酸盐等次之脉石矿物: 菱铁矿、石英、白铅矿、针铁矿	块状构造		Kamona <i>et al.</i> , 1999; Greyling <i>et al.</i> , 2005; Kamona <i>et al.</i> , 2007
Tsumeb	新元古界白云岩	大型向斜北翼	不规则管状	方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、黝铜矿、斑铜矿、辉铜矿、硫铜锗矿、蓝辉铜矿为主, 黄铜矿次之	矿体内部呈浸染状, 外围为块状构造	白云石化	Kamona <i>et al.</i> , 1999; Chetty <i>et al.</i> , 2000; Meldner, 2003; Kampunzu <i>et al.</i> , 2009
Chehelkureh	始新统杂砂岩、砂岩、页岩互层	NS 和 NW-SE 向右行走滑断层系统	狭长层状	方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、黄铜矿、雌黄铁矿为主, 辉钼矿、神黄铁矿次之; 脉石矿物: 石英、碳酸盐岩、绿泥石为主, 高岭土、绢云母次之	透镜状、脉状构造; 细粒结构	白云石化	Maaajjou <i>et al.</i> , 2012
Nifty	古元古界-新元古界细粒碳质页岩、砂岩	褶皱、劈理	脉状	黄铜矿、黄铁矿为主, 方铅矿、闪锌矿次之; 脉石矿物: 石英、白云石	脉状、细粒、自形、半自形结构	石英-白云岩化、硅化	Anderson <i>et al.</i> , 2001; Carver, 2004
拉诺玛	三叠系碳酸盐岩	断裂破碎带	条带状、似层状	主要为纤硫锑铅矿、闪锌矿、黄铁矿、雌黄、辰砂等; 脉石矿物: 方解石为主, 石膏、重晶石、石英等次之	脉状、角砾状和团块状构造	方解石化、黄铁矿化、硅化、雌黄矿化等	陶跃等, 2011
夏塞	上三叠统图姆沟组的浅变质砂岩、粉砂岩和板岩	北-北西-南北向断层破碎带	脉状、透视镜状和浸染状	主要有黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、银矿物和硫酸盐矿物等; 脉石矿物: 石英、方解石、绢云母、绿泥石等	块状、浸染状、细网脉状、条带状、团块状、碎裂-角砾状构造为主; 结晶结构和交代结构为主, 固溶体分离、应力作用结构次之	硅化、绢云母化、绿泥石化、阳起石化-绿帘石化、碳酸盐化	邹光富等, 2002; 刘权, 2003
连城	中侏罗统花开组砂岩、泥质板岩、泥岩	倒转背斜一翼 NNE 走向切层破碎带	脉状、透视镜状	黝铜矿、神黝铜矿、黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿、辉钼矿; 脉石矿物: 石英、方解石、白云石、黄铁矿、菱铁矿, 少量重晶石	脉状、浸染状和块状构造、角砾状构造; 主要为粒状、交代和溶蚀结构	硅化、碳酸盐化、重晶石化、黄铁矿化	李峰等, 1997; 王光辉, 2010

续表 3-2
Continued Table 3-2

矿床	赋矿围岩	控矿构造	矿体形态	矿物组合	矿石结构构造	热液蚀变	参考文献
金满	中侏罗统花开组砂岩、粉砂岩、泥岩	倒转背斜—翼 NNE 走向切层破碎带	脉状、网脉状、透视镜状	矿石矿物: 黄铜矿、神鹞铜矿、黝铜矿和斑铜矿为主, 黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、蓝铜矿、辉铜矿、毒砂、自然银; 脉石矿物: 石英、方解石为主, 也见重晶石、铁白云石、菱铁矿、绢云母和绿泥石	脉状、网脉状、浸染状、块状和角砾状构造; 主要为粒状、交代和溶蚀结构	硅化、碳酸盐化、重晶石化、黄铁矿化	刘家军等, 2003; 王光辉, 2010
白秋坪	上三叠统三合洞组碳酸盐岩、第三系始新统保相寺组碎屑岩和白垩统景星组碎屑岩	北东—南西向断裂(早期右行压扭, 晚期左行张扭)	脉状、透视镜状、似层状、浸染状	矿石矿物: 白秋坪矿段以神鹞铜矿、黄铜矿、黄铁矿、辉神铅矿、硫铜钼矿等为主; 富隆厂矿段以神鹞铜矿、闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、黄铁矿、辉铜矿、辉铜矿等; 脉石矿物: 菱铁矿、铁白云石、方解石为主, 次为重晶石、少量石英	脉状、块状、角砾状、浸染状等构造; 自形—半自形和他形粒状、镶边、交代和交代残余结构等	主要有硅化、碳酸盐化、重晶石化、黄铁矿化等, 以充填和交代为主	陈开旭等, 2004; 刘家军等, 2010; 邹志超等, 2010, 2011; 宋玉财等, 2011
康家湾	下二叠统当冲组泥岩和栖霞组炭质灰岩间的层间挤压破碎硅化角砾岩中	褶皱、断层	透视镜状、囊状、层状、似层状、扁豆状及其它不规则形态	矿石矿物: 方铅矿、闪锌矿、黄铁矿, 次为毒砂、黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿、深红银矿、淡红银矿、神鹞铜矿、自然金、自然银等; 脉石矿物主要有石英、玉髓, 次为方解石、层解石、迪开石、绢云母、绿帘石、磷灰石、蒙脱石及少量长石、萤石、重晶石等	构造以块状、网脉状、角砾状、幔染状构造为主; 交代残余、固溶体分离结构	主要为硅化, 其次为碳酸盐化, 少量冰长石化、萤石化、绢云母化等, 局部角岩化或砂卡岩化	吴永芳, 1995; 公凡影等, 2011
枫树板	震旦系碎屑岩层(以浅变质砂岩和砂质板岩夹层或互层为主)	NE 向压扭性断裂	多呈脉状, 个别呈透视镜状、扁豆状等	矿石矿物: 以方铅矿、闪锌矿和铁闪锌矿为主, 另有黄铜矿、黄铁矿、硫锑铜银矿、磁黄铁矿、磁铁矿、斑铜矿、锡石、毒砂等; 脉石矿物: 石英、绿泥石、粘土矿物、绢云母、萤石、透闪石、白云母等	块状、细脉状、浸染状、团块状、角砾状构造; 结晶结构为主, 交代结构次之, 此外有固溶体分离和压碎结构等	硅化、绿泥石化、绢云母化	张怡军, 1996; 陈柏林等, 1998; 刘友勋等, 2002
老厂	主要为寒武系的砂岩和白云岩, 也有下泥盆统底部砾岩	断裂(张性裂隙)	脉状、透视镜状	矿石矿物: 闪锌矿、方铅矿、少量黄铁矿、黄铜矿为主; 脉石矿物: 石英、白云石、少量方解石、铁白云石、高岭石、重晶石为主	浸染状、角砾状、脉状穿插、块状构造等; 半自形—他形晶、自形晶、包含、交代、压碎结构等	主要有碳酸盐化、硅化、黄铁矿化、绢云母化	陆孝赞等, 2004
尤卡朗	中上侏罗统拉贡塘组滨浅海相复理石建造	NE 向多级断裂破碎带内; 雁列式的裂隙系统	似层状、大脉状	矿石矿物: 主要有方铅矿、闪锌矿、辉银矿、黄铁矿、黄铜矿等; 脉石矿物: 主要有石英、方解石、绿泥石等	角砾状、浸染状、网脉状构造等; 中细粒自形—半自形粒状、碎裂和交代溶蚀结构等	主要有硅化、铁白云石化、绢云母化、钠长石化、黄铁矿化、碳酸盐化、绿泥石化等	付少英等, 2009; 冯志兴等, 2010, 2011

于直立断层及与之相关的地层分界面，以 NW-SE 走向错断为轴面的背斜(Kampunzu *et al.*, 2009)。受伸展构造控制的有 Cierco 矿床、Assif El Mal 矿床、白秧坪矿床、尤卡朗矿床、老厂矿床等，伸展构造以张性断裂为主。如雁列式的裂隙系统(冯志兴等, 2010)。受走滑构造控制的有 Chehelkureh 矿床、Kabwe 矿床等，分别受控于 NS 和 NW-SE 向右行走滑断层系统、剪切带内 NE-SW 走向断层(Kamona and Friedrich, 2007; Maanijou *et al.*, 2012)。

2.3 矿体形态

该类型的矿床的矿体形态有脉状、圆柱状、狭长层状、板状、管状，主要呈脉状产出。矿体主要受构造控制，而不受地层控制。矿体形态主要与控矿构造有关，矿体一般沿断层或褶皱的裂隙内就位，多个矿体可平行或近平行分布。

2.4 矿物组合特征

矿石矿物组合主要为方铅矿 + 闪锌矿 ± 铜硫化物矿(包括：黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿等) ± 硫酸盐矿物(如：黝铜矿、细硫砷铅矿、硫锑银矿、银黝铜矿等) ± 黄铁矿 ± 砷黄铁矿 ± 磁黄铁矿 ± 磁铁矿等，有时含自然银、自然金，个别矿床含硫酸盐矿物。脉石矿物主要为石英、方解石、白云石，有时含菱铁矿、绿帘石、绿泥石、萤石等。

2.5 矿石结构构造

矿石结构主要有自形、半自形粒状结构，细粒结构

等。矿石构造有脉状、块状、浸染状、角砾状、透镜状构造等多种，个别为网状状、豆荚状、斑点状构造等。

2.6 围岩蚀变

围岩蚀变多为硅化、碳酸盐化，少量为绿泥石化、绿帘石化、高岭土化、绢云母化等。

3 地球化学特征

3.1 流体包裹体温度和盐度

脉状铅锌(铜、银)多金属热液矿床的流体包裹体温度、盐度如表 4 所示：均一温度范围为 80 ~ 480℃，主要介于 90~370℃ 之间。盐度范围为 0~43% (质量分数, NaCl_{eq} , 下同)，主要介于 1%~30% 之间。根据各矿床的温度、盐度平均值可以得到流体包裹体均一温度-盐度关系，如图 2 所示。笔者将这些矿床划分为 A、B 两组范围，A 组以中低温(均值范围 120~270℃)、中高盐度(均值范围 10%~30%)为特征，典型的包括 Kipushi 矿床、Taurus 矿床、Assif El Mal 矿床、Cierco 矿床、Kabwe 矿床、Tsumeb 矿床、Nifty 矿床、白秧坪矿床等。B 组以中温(均值范围 200~300℃)、低盐度(均值范围 3%~10%)为特征，典型的有 Chehelkureh 矿床、Granadeh 矿床、Arapucan 矿床、金满矿床、连城矿床、康家湾矿床、尤卡朗矿床、老厂矿床等。两组代表的成因意义将在以下讨论中予以说明。

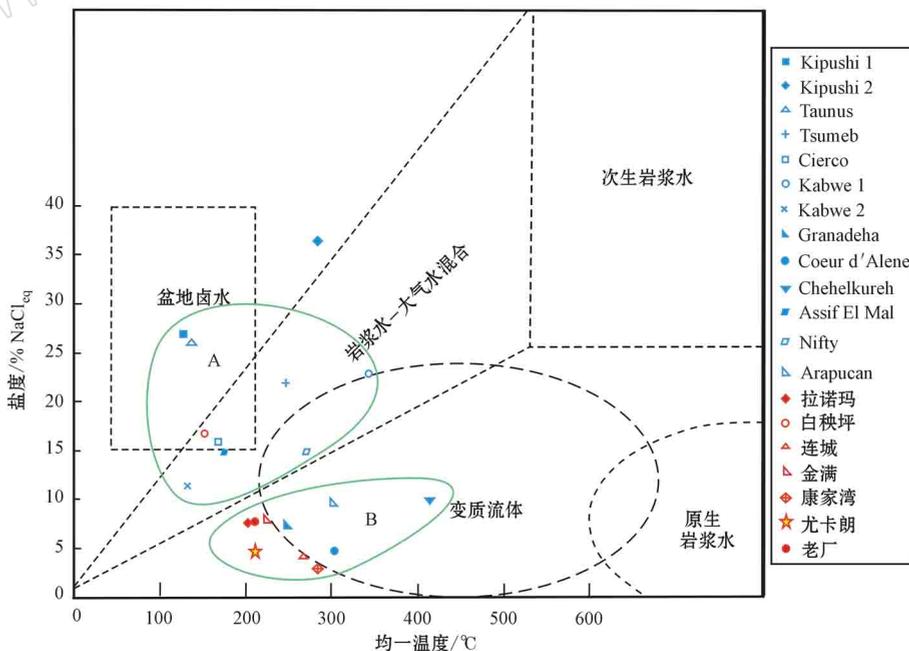


图 2 脉状铅锌(铜、银)多金属热液矿床流体包裹体均一温度-盐度组成图解(底图据 Beane, 1983)

Fig. 2 Homogenization temperature-salinity diagram of vein Pb-Zn-Cu-Ag epithermal deposits(modified after Beane, 1983)

表 4 脉状铅锌(铜、银)多金属热液矿床的温度、盐度

Table 4 Homogenization temperature and salinity of vein Pb-Zn-Cu-Ag epithermal deposits

矿床	均一温度/℃		盐度/%NaCl _{eq}		参考文献
	范围	均值	范围	均值	
Assif El Mal	104~197	173	12~17	15	Bouabdellah <i>et al.</i> , 2009
Chehelkureh	330~480	410	5~15	10	Maanjou <i>et al.</i> , 2012
Cierco	112~198	165	3~29	16	Johnson <i>et al.</i> , 1996
Coeur d'Alene	250~350	300	0~10	5	Mauk <i>et al.</i> , 2004
Granadeh	180~310	245	1~14	7.5	Grant <i>et al.</i> , 1988
Kabwe	1 257~385	340	15~31	23	Kamona <i>et al.</i> , 2007
	2 98~178	130	11.5	11.5	
Kipushi	1 80~170	125	23~31	27	Heijlen <i>et al.</i> , 2008
	2 221~339	280	30~43	36.5	
Tsumeb	212~275	243.5	19~25	22	Kampunzu <i>et al.</i> , 2009
Nifty	200~367	268	8~27	15	Anderson <i>et al.</i> , 2001
Taunus	90~180	135	20~32	26	Kirnbauer <i>et al.</i> , 2012
Arapucan	229~438	300	1.7~18.5	9.8	Orgün <i>et al.</i> , 2005
白秧坪	120~180	150	0.35~24.73	16.9	王晓虎等, 2011
金满	180~273	221	5.5~10.8	8.23	王光辉, 2010
连城	170~332	264	0.02~10.5	4.2	王光辉, 2010
拉诺玛	140~350	200	2~13	7.77	陶琰等, 2011
康家湾	180~390(爆裂温度)	约 280	2.15~5.58	3.78	杨传益, 1985
尤卡朗	160~250	208	1.65~12.29	4.94	王涛等, 2011
老厂	180~230	205	5.22~16	8	陆孝赞等, 2004
夏塞	95~230	162.5	-	-	邹光富等, 2002

3.2 C-O-S 同位素特征

脉石矿物的 C、O 稳定同位素特征可以指示流体的来源, 以及不同流体发生混合。根据图 3 和表 5 所示, 该类型矿床(矿区)的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 主要介于 -10%

$\sim 5\%$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 主要范围是 12% $\sim 25\%$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 范围 -10.54% $\sim 10.6\%$ 。碳质的来源多样, 包括碳酸盐岩溶解作用、地幔射气或岩浆。

不同矿床(矿区)的 $\delta^{34}\text{S}$ 值反映了不同来源硫的

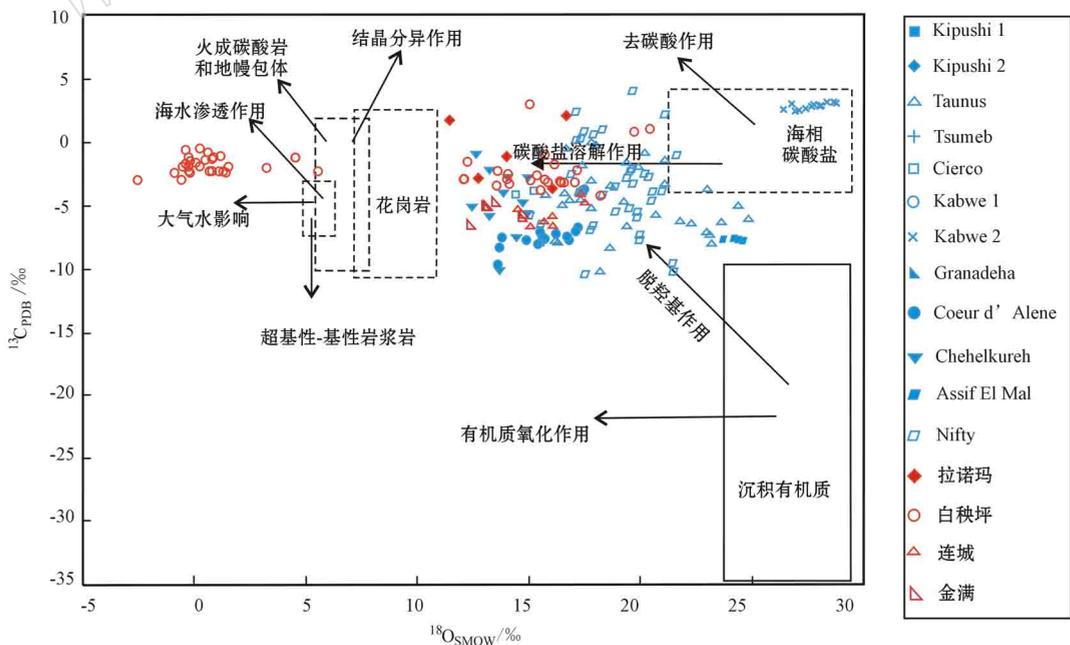


图 3 脉状铅锌(铜、银)多金属热液矿 C、O 同位素图(据刘家军等, 2004 改编)

Fig. 3 C-O isotope diagram of vein Pb-Zn-Cu-Ag epithermal deposits (modified after Liu Jiajun *et al.*, 2004)

表 5 碳、氧同位素数据

‰

Table 5 Carbon and oxygen isotope data

$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$
Assif El Mal		19.66	-2.07	21.8	-6.2	0.86	-1.2
25.4	-7.64	17.8	-6.88	21.1	-3.3	1.07	-2.3
24.7	-7.61	17.34	0.28	18	-0.3	1.17	-1.1
25.2	-7.54	19.85	-5.92	24.4	-5.1	0.24	-1.9
25.63	-7.73	21.62	-1	16.5	-5	0.24	-0.5
Chehelkureh		17.83	-6.57	20.7	-5.7	0.04	-1.67
13.8	-3.9	17.52	-10.41	17.8	-5.2	-0.38	-1.7
13.2	-5.7	20.55	-3.92	17.8	-3.1	0.6	-0.8
14	-2.7	16.91	-2.54	18.2	-10.1	-0.2	-1.5
14.7	-4.7	15.38	-0.71	17.4	-1.9	0.8	-2.2
14.4	-7.4	15.54	-6.46	16.7	-0.6	0.5	-1.4
14.9	-5.5	15.63	-7.87	21.1	-1.5	-0.3	-1.2
12.6	-0.9	19.55	-2.31	23.1	-7.3	-0.4	-0.6
13.7	-10.1	17.88	0.59	23	-3.7	5.5	-2.3
14.9	-2.7	20	-7.24	19.3	-4.7	-0.3	-1.9
13.2	-2.1	19.68	-3.26	16.3	-7.9	-0.9	-2.4
Cierc		21.1	2.2	16.2	-7.7	-0.2	-2.4
12.4	-5	20.5	-4.67	19.4	-6.6	-0.3	-2.3
17.4	-3.8	17.47	0.82	18.6	-8.3	-0.3	-2.3
Coeur d'Alene		20.2	-2.53	22.3	-6.4	-0.3	-1.9
14.4	-4.1	21.44	-9.52	20.2	-0.9	4.5	-1.2
15.2	-3.8	17.13	2.39	23.2	-8	-0.5	-1.9
17.5	-3.7	20.96	-3.93	19.9	-2	-0.2	-2.4
16.2	-7.2	17.28	-3.87			-0.3	-2.3
16.8	-7.7	18.9	-5.45	12.2	-1.5	-0.6	-3
17.2	-6.7	17.4	-3.75	20.4	1	-2.5	-3
15.5	-7.1	19.9	-5.46	15.7	-1	15.5	-3.8
13.7	-8.3	18.87	-3.48	13.5	-3.4	14	-2.9
13.6	-9.6	19.52	-5.23	1.38	-2.4	1.4	-2
13.8	-7.5	19.65	4.01	14.06	-3.3	0.8	-1.3
15.4	-8	19.96	-7.69	15	3		金满
16.1	-8.6	21.48	-10.21	17	-3.1	13.5	-4.8
16.7	-7.4	18.33	0.98	17.1	-2.2	13.1	-5.1
17.1	-7	20.34	2.7	3.2	-2	13	-5
14.9	-7.7	19.41	-2.84	1.3	-2.3	14.7	-5.9
15.6	-7.4	18.31	-4.13	12	-2.9	14.8	-5.7
15.7	-7.6		Taunus	1.48	-1.9	12.4	-6.5
15.7	-7.6	16.5	-4.3	14	-2.5		连城
Kabwe		17.3	-4.5	19.7	0.8	14.5	-5.2
27.68	2.89	16.4	-4.4	16.1	-1.8	15.7	-6.2
26.41	2.64	19.4	-1.7	15.7	-3	16.1	-5.8
26.81	3.08	17.8	-0.1	15.3	-2.6	17.5	-4.7
26.95	2.5	16.4	-4.7	13.54	-2.31	17.3	-4.1
27.1	2.58	16.5	-4.5	16.32	-3.1	15.1	-6.6
27.44	2.7	15.8	-4.2	16.43	-3.2	16.1	-6.6
27.79	2.97	23.7	-6.3	12.1	-2.9		拉诺玛
28.03	2.88	17.3	-4.6	16.32	-3.11	13.92	-1
28.11	2.93	16.9	-4.6	17.36	-2.78	11.43	1.8
28.35	3.16	18.7	-3.5	15.81	-3.08	12.67	-2.7
28.68	3.18	16.5	-4.6	0.66	-2.3	15.99	-3.5
28.81	3.15	24.9	-6.1	16.8	-3.9	16.61	2.2
Nifty		16.5	-4.1	16.5	-3.1		康家湾
17.14	0.13	16.6	-4.1	15.09	-2.95	-3.88~-0.41	-
15.05	-5.77	23	-7.1	18.18	-4.16		

混合、同位素分馏过程和化学环境等(Leach *et al.*, 2010)。根据该类型不同矿床的硫化物的 S 同位素数据总结得出,硫化物的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ 范围为主要介于 $-27\text{‰} \sim 25\text{‰}$ 之间(表 6),并得到相应的 S 同位素范围分布图(图 4)。

表 6 S 同位素数据
Table 6 Sulfur isotope data

矿床	硫化物 $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}/\text{‰}$	参考文献
Assif El Mal	13.7~24.9	Bouabdellah <i>et al.</i> , 2009
Chehelkureh	1~5	Maanijou <i>et al.</i> , 2012
Cierco	-4.3~-0.8	Johnson <i>et al.</i> , 1996
Kabwe	-17.75~-11.7	Kamona <i>et al.</i> , 2007
Kipushi	-2.6~19.2	Heijlen <i>et al.</i> , 2008
Tsumeb	13.1~22.6	Kampunzu <i>et al.</i> , 2009
Nifty	-27~16	Anderson <i>et al.</i> , 2001
Taurus	-10.9~3.8	Kirnbauer <i>et al.</i> , 2012
Arapucan	-5.2~-1.2	Orgün <i>et al.</i> , 2005
白秧坪	4~8	王晓虎等, 2011
金满	-17.9~-16.3	张锦让等, 2012
连城	6.1~12.2; -9.6~-1.5	张锦让等, 2012
拉诺玛	-1.6~2.6	陶琰等, 2011
枫树板	-6.87~2.35	陈柏林等, 1998
康家湾	-6.2~3	杨志益, 1985
尤卡朗	-9.47~-3.62	冯志兴等, 2011
老厂	-7.9~4.3	陆孝赞等, 2004
夏塞	-7.5~-6.56	刘权, 2003

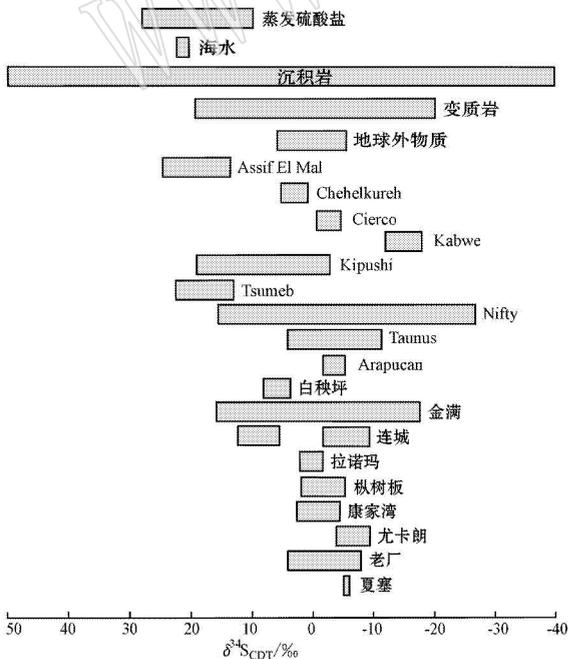


图 4 脉状铅锌(铜、银)多金属热液矿床 S 同位素范围分布图

Fig. 4 Sulfur isotope distribution of vein Pb-Zn-Cu-Ag epithermal deposits

3.3 Pb 同位素特征

Pb 同位素常用于示踪,判断成矿物质的来源。该类型各矿床(矿区)的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值如表 7 所示,测试矿物主要为方铅矿。

将各矿床的 Pb 同位素数据投影到铅构造模式图(图 5)中,在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图上,数据主要落在造山带线和上地壳线附近。在 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图上,数据主要落在造山带线附近。从图 5 可以看出,数据主要落在上地壳曲线和造山带曲线附近,说明 Pb 主要来源于上地壳和造山带。另外,也有部分矿床的投点位于上地幔曲线附近,显示出幔源物质参与成矿的信息。

4 讨论

4.1 成矿物质来源

成矿物质是成矿的主要物质基础,包括地幔、地

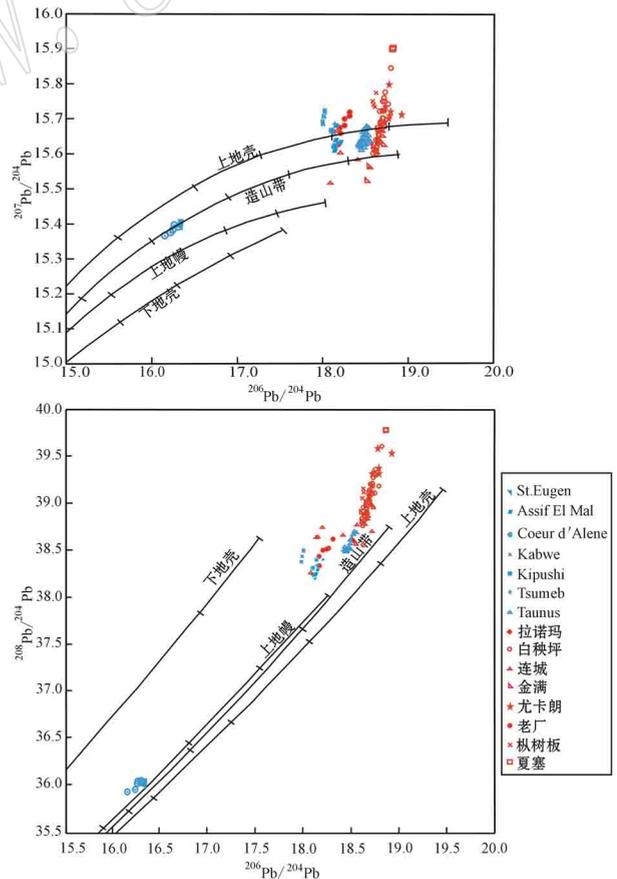


图 5 脉状铅锌(铜、银)多金属热液矿床铅同位素构造模式图(底图据 Zartman and Doe, 1981)

Fig. 5 Pb isotope diagram of vein Pb-Zn-Cu-Ag epithermal deposits (base map after Zartman and Doe, 1981)

表 7 Pb 同位素数据

Table 7 Pb isotope data

$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
	Assif El Mal		18.495	15.641	38.557	18.626	15.610	38.787
18.203	15.636	38.351	18.512	15.6480	38.571	18.68	15.709	39.068
18.129	15.612	38.154	18.487	15.630	38.522	18.644	15.610	38.781
18.131	15.625	38.204	18.534	15.680	38.685	18.612	15.605	38.789
18.141	15.642	38.246	18.483	15.619	38.483	18.747	15.754	39.245
18.156	15.641	38.245		白秧坪			金满	
18.151	15.641	38.243	18.670	15.667	38.975	18.527	15.521	38.552
18.134	15.621	38.182	18.650	15.618	38.889	18.653	15.632	38.916
	Kabwe		18.725	15.720	39.135	18.724	15.625	38.910
17.992	15.707	38.393	18.609	15.597	38.740	18.601	15.619	38.846
17.978	15.688	38.329	18.645	15.64	38.906	18.611	15.610	38.750
17.983	15.694	38.338	18.643	15.618	38.811	18.543	15.563	38.522
18.000	15.719	38.428	18.634	15.604	38.768		连城	
18.006	15.726	38.453	18.622	15.548	38.514	17.436	15.437	37.567
18.007	15.728	38.458	18.690	15.685	39.018	17.155	15.339	37.249
18.003	15.723	38.441	18.644	15.638	38.874	18.561	15.561	38.726
18.003	15.720	38.433	18.648	15.637	38.906	18.412	15.583	38.616
18.008	15.723	38.448	18.687	15.679	39.092	18.196	15.602	38.701
18.007	15.723	38.441	18.651	15.650	38.919	18.137	15.625	38.587
17.983	15.692	38.343	18.656	15.662	38.973	18.152	15.665	38.597
	Kipushi		18.686	15.677	39.008	18.078	15.517	38.213
18.104	15.669	38.257	18.673	15.655	38.943	18.677	15.635	38.813
18.094	15.671	38.248	18.672	15.652	38.927	18.702	15.677	38.939
18.144	15.688	38.345	18.680	15.663	38.963	18.670	15.630	38.789
18.104	15.667	38.255	18.654	15.667	38.968	18.716	15.650	38.932
	夏塞		18.654	15.634	38.862	18.718	15.663	38.656
18.874	15.906	39.737	18.644	15.61	38.786	18.646	15.603	38.731
18.687	15.675	38.972	18.722	15.666	39.051		St. Eugene	
18.86	15.902	39.725	18.745	15.674	39.062	16.341	15.407	36.003
	Taurus		18.620	15.597	38.716	16.339	15.401	35.98
18.466	15.621	38.483	18.697	15.675	39.007	16.333	15.391	35.95
18.449	15.613	38.445	18.692	15.685	39.037	16.343	15.401	35.986
18.460	15.61	38.469	18.751	15.773	39.312		Tsumeb	
18.467	15.625	38.483	18.818	15.842	39.556	18.104	15.669	38.257
18.427	15.625	38.493	18.708	15.716	39.159	18.094	15.671	38.248
18.448	15.615	38.442	18.671	15.670	38.975	18.144	15.688	38.345
18.446	15.622	38.477	18.682	15.683	39.027	18.104	15.667	38.255
18.468	15.624	38.492	18.720	15.698	39.169		枫树板	
18.426	15.624	38.46	18.710	15.695	39.054	18.629	15.735	38.976
18.469	15.620	38.491	18.707	15.696	39.079	18.605	15.752	38.911
18.471	15.640	38.530	18.629	15.633	38.911	18.607	15.741	38.911
18.482	15.634	38.556	18.629	15.614	38.871	18.639	15.775	38.958
18.454	15.623	38.471	18.633	15.618	38.822	18.67	15.739	38.885
18.491	15.612	38.471	18.626	15.609	38.791		尤卡朗	
18.478	15.629	38.538	18.641	15.609	38.794	18.692	15.689	39.196
18.452	15.616	38.445	18.704	15.677	39.087	18.762	15.707	39.317
18.506	15.656	38.585	18.668	15.647	38.849	18.792	15.720	39.369
18.530	15.638	38.559	18.665	15.628	38.897	18.733	15.736	39.313
18.516	15.666	38.622	18.783	15.741	39.140	18.725	15.688	39.202
18.532	15.671	38.654	18.669	15.644	38.947	18.786	15.705	39.317
18.475	15.630	38.505	18.673	15.668	38.986	18.923	15.713	39.526
18.508	15.653	38.567	18.689	15.691	39.080	18.768	15.719	39.318
18.547	15.674	38.638	18.728	15.746	39.223	18.718	15.728	39.312
18.506	15.648	38.558	18.685	15.659	38.960	18.683	15.684	39.09
18.519	15.642	38.567	18.700	15.684	39.151	18.787	15.709	39.345
18.497	15.648	38.564	18.746	15.756	39.269	18.712	15.691	39.178
18.539	15.635	38.571	18.669	15.661	38.948	18.776	15.800	39.581

壳和水圈提供的金属元素、非金属元素、有机质和它们的化合物(杨永强等,2006)。本文所研究的成矿物质主要包括硫和贱金属,其来源分析主要通过稳定、放射性同位素数据结合矿床地质特征进行。根据前人的研究数据可知,成矿物质主要来源于基底围岩,岩浆来源次之。

(1) 基底围岩:如 St. Eugene 矿,由于硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值与该地区其他地层和矿床中同生硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围相似,说明 St. Eugene 矿的硫来自于围岩(Joncas and Beaudoin,2002)。虽然 Nifty 矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值范围符合岩浆来源的特征,但围岩地层并没有岩浆岩存在,从而可以排除这一可能;同矿化期硫化物与草莓状黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 中值相似,说明硫很可能来源于地层;Cu 的沉淀与 pH 值和氧逸度升高有关,Nifty 矿的 Cu 来自酸性热液流体携带(Ander-son *et al.*,2001)。Kabwe 矿的硫同位素比值为 $-18.73\text{‰} \sim -10.80\text{‰}$ (Kampunzu *et al.*,2009),Kamona 等(2007)实验得出相似的结果($-18.7\text{‰} \sim -10.2\text{‰}$)。这种结果被认为是典型的海水硫酸盐生物还原成因;同时,这也说明硫来自沉积岩,源岩可能是千枚岩地层,铅同位素具有明显的上地壳特征,说明铅来自陆壳上部,源岩可能是基底岩石(Kamona and Friedrich,2007);而 Kampunzu 等(2009)认为,铅来源于硅质地壳中的盆地沉积物和基岩。对于 Assif El Mal 矿,铅同位素数据的投点与上地壳和造山带曲线接近,这与水岩反应的结果一致,铅是从最相近的寒武-奥陶火山碎屑岩和变质碎屑岩序列或者下层的古元古代-新元古代壳源基底淋滤得到的(Bouabdellah *et al.*,2009)。

另外,有一些矿床矿质来源存在争议,除基底围岩外,可能有深部幔源信息。如 Kipushi 矿,Schneider 等(2007)认为金属来源于上地壳,而 Kamona 等(1999)认为铅是壳幔混合来源,因为 U/Pb 落在上地壳和上地幔两个区域。金满矿的成矿的硫和金属元素,既有来自自赋矿岩石(包括火山岩)的,又有来自基底岩石的,同时还有深部物质的参与(刘家军等,2003)。硫的来源除盆地地层硫外,可能还有深源硫的加入,铅同位素大多位于盆地沉积层铅范围内,可能有部分深源铅的加入(张锦让等,2012)。连城铜钼多金属矿床硫主要来源于深源硫与盆地地层硫的混合,铅主要来自上地壳沉积岩,并与地幔铅不同程度地混合(张锦让等,2012)。对于白秧坪多金属矿,李志明等(2005)硫化物矿石矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化

范围的 $3.5\text{‰} \sim 11.2\text{‰}$,邹志超等(2010)测得 $\delta^{34}\text{S}$ 在 $2.45\text{‰} \sim 11.2\text{‰}$ 之间,与之相似,王晓虎等(2011)认为,成矿物质来自沉积地层或有盆地基底的贡献,其幔源的信息来自三叠系或二叠系的玄武岩;兰坪盆地受逆冲推覆构造系统控制,侯增谦等(2008)将这种现象解释为成矿流体长距离运移,淋滤围岩的金属物质,在浅部各式逆冲构造部位成矿的结果。老厂铅锌矿床的硫同位素相对集中于 0 值附近,具有深源硫特征,根据铅同位素构造模式图来看,铅源区以上地壳为主,同时有造山带铅的特征,代表一种壳幔混源特征,因此,其成矿物质来源于深部岩浆和基底地层(陆孝赞等,2004)。

(2) 岩浆贡献:如 Chehelkureh Cu-Zn-Pb(Ag) 矿,其硫化物矿石的 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 $2.0\text{‰} \sim 4.2\text{‰}$,主要为 3‰ ,表明硫来源于岩浆;同时,岩浆也是贱金属的来源,部分成矿物质还来源于始新世浊积流(Maanijou *et al.*,2012)。Cierco 矿硫化物的狭窄的 $\delta^{34}\text{S}$ 值范围接近 -1‰ ,硫可能有包括岩浆来源在内的多种来源(Johnson *et al.*,1996)。Kipushi 矿的硫同位素分布呈双峰式,可能是岩浆的硫与蒸发岩的硫酸盐混合(Kamona *et al.*,1999)。Coeur d'Alene 矿区,金属来源于岩浆或者沉积岩围岩中的浸染状矿石(Fleck,2002)。拉诺玛矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值集中在 0 值附近,反映了硫主要为深部来源(陶琰等,2011)。康家湾铅锌矿的硫化物矿石的 $\delta^{34}\text{S}$ 值靠近零值,为岩浆来源。其铅同位素测定结果说明,铅主要来源于燕山期岩浆岩(杨传益,1985)。硫和铅稳定同位素特征表明,尤卡郎铅锌矿的成矿物质主要来源于上地壳岩浆,或有下地壳物质的混入(冯志兴等,2011)。枞树板铅锌银矿的硫铅同位素与千里山岩体相似,成矿物质主要来源于燕山早期千里山花岗岩体(陈柏林等,1998)。

4.2 成矿流体来源

成矿流体可以萃取、溶解、搬运和沉淀、聚集成矿物质,是沟通矿源场、运移场和储矿场的纽带和媒介(杨永强等,2006)。对于成矿流体的研究,主要通过稳定、放射性同位素数据,流体包裹体的盐度、温度进行。本文总结了该类型矿床的几种成矿流体来源,内容如下:

(1) 盆地卤水:图 2 中 A 范围内矿床的流体来源主要为盆地卤水,有的受大气降水成分影响。如 Cierco 矿、Nifty 矿、Kabwe 矿、白秧坪矿等。Cierco 矿的 $\delta^{18}\text{O}$ 值高于岩浆流体,Johnson 等(1996)经研

究认为其成矿流体为热卤水从古生代基底上升的,在下陷盆地边缘与海水、封存水(原生水)、大气水混合而成。Nifty 矿的成矿流体为中高温、高盐度、中酸性流体,区域压力作用驱动卤水,在深部与侵入岩衍生沉积物、砂岩反应,通过基底滑脱或者蓄水层,经逆冲断裂上升(Anderson *et al.*, 2001)。根据稳定同位素、放射性同位素特征和流体包裹体数据, Kamona 等(2007)认为 Kabwe 矿的成矿流体来源是高温高盐度的地层水。白秧坪成矿流体为中低温、较高盐度的流体,主要为 $MgCl_2-NaCl-H_2O$ 和 $CaCl_2-NaCl-H_2O$ 三元体系,流体包裹体氢、氧同位素组成表明成矿流体主要为大气降水补给的地下水,具盆地卤水特征(陈开旭等 2004;王晓虎等 2011)。

(2) 岩浆、变质流体:图 2 中, B 范围内矿床的流体来源主要为岩浆流体、变质流体,可能有大气水混入。如 St. Eugene 矿、Coeur d'Alene 矿区、金满、连城等,这些矿床的成矿流体主要为变质流体。对于 St. Eugene 矿,由于没有同期的侵入体,所以排除了岩浆水来源的可能;且通过高 $\delta^{18}O$ 值判断成矿热液是变质流体来源(Joncas and Beaudoin, 2002)。Coeur d'Alene Ag-Pb-Zn 矿区的成矿流体主要来自区域尺度的变质热液系统,仅有少量岩浆流体(Fleck, 2002)。金满、连城矿床的成矿流体具有变质流体的特点(王光辉, 2010),张锦让等(2012)根据流体包裹体特征,认为这两个矿床都可能存在深部流体的混入。而对于 Granadeha 矿、Chehelkureh 矿、Arapucan 矿、拉诺玛、康家湾、尤卡郎、枞树板、老厂、夏塞等矿床,其成矿流体主要与岩浆流体有关。Granadeha Pb-Zn-Cu-Ag 矿的成矿流体与相隔 6 Ma 的两期岩浆热液有关(Grant and Ruiz, 1988)。Chehelkureh Cu-Zn-Pb(Ag)矿的石英包裹体的盐度是 5%~15% $NaCl_{eq}$,成矿与侵入岩有时空关系,并起到了热源的作用,岩浆水可能是流体主要来源(Maanijou *et al.*, 2012)。Arapucan Pb-Zn-Cu-Ag 矿的成矿流体来源于岩浆水和大气水的混合(Orgüen *et al.*, 2005)。拉诺玛矿的成矿流体可能与深部构造-岩浆活动来源的热液有关(陶琰等, 2011)。康家湾铅锌矿的形成与燕山期花岗岩类岩浆活动存在时空关系(刘清双, 1996;李永胜等, 2011),其成矿流体与岩浆热液有关(杨传益, 1985;刘清双, 1996)。王涛等(2011)认为尤卡郎铅锌矿的成矿流体为岩浆期后热液,冯志兴等(2011)认为流体来源与岩浆热液有关,岩浆期后可能有地下水混入。对于枞树板铅

锌银矿,陈柏林等(1999)认为成矿流体与岩浆流体有关。均一温度和盐度说明老厂铅锌矿床属中温热液成矿,另据氢氧同位素组成显示,成矿流体以岩浆水为主,并混有大气水(陆孝赞等, 2004)。对于夏塞铅锌银矿床,刘权(2003)根据硫、铅同位素及流体包裹体研究,认为其成矿流体是由岩浆水与大气水混合形成,而邹光富等(2002)认为其成矿流体是岩浆分异水溶液与围岩地层变质水溶液混合而成。

4.3 成矿过程总结

根据上述资料,本文认为脉状铅锌(铜、银)多金属热液矿床可分为三种主要类型(图 6):

(1) 直接受岩浆作用控制成矿。表现为成矿流体和成矿金属的来源多与岩浆有关,成矿与岩浆作用同期。在汇聚造山和陆内造山背景下,岩浆上侵,中高温岩浆流体经历一定距离的运移,在沉积岩中的断层、褶皱等构造位置沉淀成矿。这类型的典型矿床有 Granadeha 矿床、Chehelkureh 矿床、Arapucan 矿床、康家湾矿床、尤卡郎矿床、拉诺玛矿床、枞树板矿床、老厂矿床、夏塞矿床等。其中,部分矿床可以作为岩浆成矿系统的“远外带型”,如枞树板铅锌银矿是千里山岩浆成矿系列的外围型脉状矿床(陈柏林等, 1999),其成矿流体和成矿物质来源均与岩浆岩有关(陈柏林等, 1998, 1999)。同样,夏塞银多金属矿床产于燕山晚期绒依措花岗岩外接触带的围岩断裂带中(邹光富等, 2008),其成矿物质部分为岩浆来源,成矿流体与岩浆流体有关(邹光富等, 2002;刘权, 2003)。

(2) 间接受岩浆作用控制成矿。表现为金属来源或者成矿流体在一定程度上受岩浆作用影响,如: Coeur d'Alene 矿区的成矿与早第三世构造变形和侵入体有关,其成矿流体来源于变质流体,仅有少量岩浆流体,而金属来源于岩浆或者沉积岩围岩中的浸染状矿石(Fleck *et al.*, 2002)。Kabwe 矿床的铅来自上地壳,源岩可能是基底岩石,而成矿流体为高温卤水,岩浆岩仅起到“热机”的作用(Kamona and Friedrich, 2007)。

(3) 与岩浆作用无关。表现为成矿金属主要来源于基底围岩,成矿流体则为盆地卤水或变质流体。这类型的典型矿床有: Assif El Mal 矿床、Cierco 矿床、Tsumeb 矿床、Nifty 矿床、白秧坪矿床、金满矿床和连城矿床等。例如:白秧坪矿床的成矿金属中铅可能主要由赋矿地层下伏沉积岩和盆地基底岩石所提供(李志明等, 2005),成矿流体为大气水补给的地

下水,具盆地卤水特征(陈开旭等,2004; 王晓虎等,2011)。金满、连城矿床铅主要来自上地壳沉积岩(张锦让等,2012),成矿流体具有变质流体的特点,可能存在深部流体的混入(王光辉,2010; 张锦让等,2012)。

值得提及的是,上述三种类型成矿过程具有通性,即在区域变形、岩浆侵入或者断层活动等作用

下,与成矿有关的流体上升或运移,淋滤基底、围岩中的成矿物质,在近地表可能与浅层流体、大气水发生混合,形成成矿流体。当流体运移至温度、压力、pH 值及其他化学条件适宜的环境时,成矿物质析出和沉淀,形成脉状铅锌(铜、银)多金属矿床。另外,成矿可以发生在伸展、汇聚及陆内等三种主要造山背景下,是造山作用控制下流体迁移沉淀的结果。

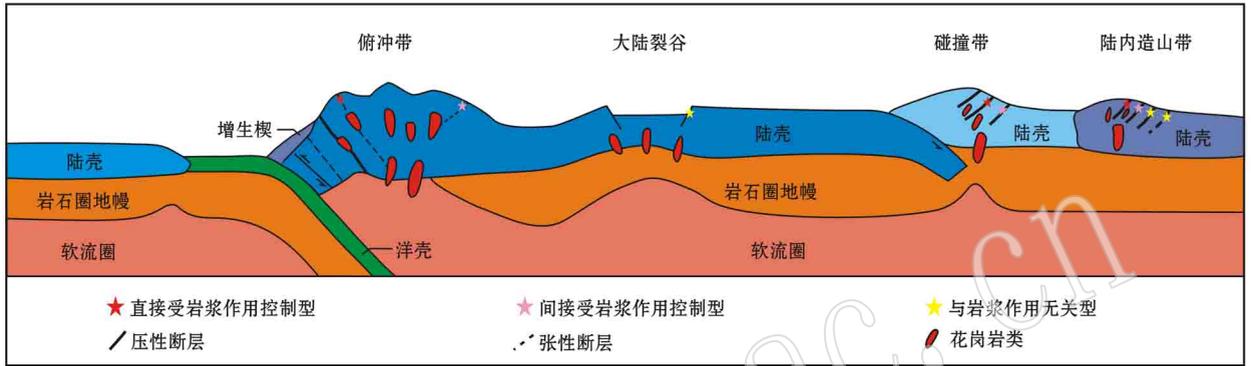


图 6 矿床脉状铅锌(铜、银)多金属热液矿床成矿示意图

Fig. 6 Genetic model for the formation of base metal epithermal deposits

4.4 与 MVT 型矿床的区别和联系

脉状铅锌(铜、银)多金属热液矿床与典型 MVT 铅锌矿床存在一定的异同之处,可以进行对比研究。两种类型矿床都具有赋矿围岩均与沉积岩有关,成矿受构造控制明显等特征(Leach *et al.*, 2005)。然而,这两类矿床又存在着较大差异:

(1) MVT 铅锌矿床产出在碳酸盐岩台地沉积序列,通常是盆地边缘或者前陆冲断带环境;脉状铅锌(铜、银)多金属热液矿床主要位于陆内造山带,在碰撞带、俯冲带和大陆裂谷等环境也有分布。

(2) MVT 铅锌矿床与岩浆活动无关,而脉状铅锌(铜、银)多金属热液矿床与岩浆作用关系密切,尤其是直接受岩浆作用控制成矿型。

(3) MVT 铅锌矿床容矿围岩是台地碳酸盐岩,其岩性主要为白云岩、灰岩,很少为砂岩;而脉状铅锌(铜、银)多金属热液矿床的容矿围岩岩性主要为沉积岩(灰岩、白云岩、页岩、砂岩、泥岩等)和变质沉积岩(石英岩、千枚岩等)。

(4) MVT 铅锌矿床矿体主要为层状,一般为层控,也受断层控制;脉状铅锌(铜、银)多金属热液矿床主要呈脉状产出,矿体以构造控制为主,基本不受地层控制。

(5) MVT 铅锌矿床矿物组合、结构和构造相对

简单,而脉状铅锌(铜、银)多金属热液矿床的较为复杂。

(6) MVT 铅锌矿床的成矿物质主要来自地壳,而脉状铅锌(铜、银)多金属热液矿床成矿物质表现为多源性,包括基底围岩、岩浆来源以及幔源贡献。

(7) MVT 铅锌矿床成矿流体主要来源是盆地流体,而脉状铅锌(铜、银)多金属热液矿床成矿流体为岩浆流体、变质流体、盆地卤水多种来源,部分矿床的成矿流体受大气水影响。

5 总结

(1) 脉状铅锌(铜、银)多金属热液矿床与造山作用或造山带有着紧密的联系,主要形成于陆内造山带背景,在碰撞带、俯冲带和大陆裂谷等环境也有分布。

(2) 脉状铅锌(铜、银)多金属热液矿床可分为直接受岩浆作用控制成矿、间接受岩浆作用控制成矿和与岩浆作用无关三种基本类型,三者成矿背景、矿体形态、控矿构造、矿物组合等方面特征明显。

(3) 脉状铅锌(铜、银)多金属热液矿床成矿流体与岩浆作用的关系明显,尤其是其中直接受岩浆作用控制成矿的一类。

(4)脉状铅锌(铜、银)多金属热液矿床与MVT型铅锌在赋矿围岩、构造控制等方面存在较多相似性,但二者在成矿环境、控矿因素、金属来源以及成矿流体来源等方面仍具有较大差异。

致谢 感谢审稿专家的建设性意见。成文过程中,笔者与张翀、庄天明、郝宏达、程杨等进行过有益探讨,在此一并感谢!

References

Anderson B R, Gemmell J B and Berry R. 2001. The geology of the Nifty copper deposit, Throssell Group, Western Australia: Implications for ore genesis[J]. *Economic Geology*, 96: 1535~1565.

Bai Daoyuan, Jia Baohua, Li Jindong, *et al.* 2007. Important significance of regional tectonic regime to metallogenic capacity of Indosinian and Early Yanshanian granites in southeastern Hunan: A case study of Qianlishan and Wangxianling plutons[J]. *Mineral Deposits*, 26(5): 487~500 (in Chinese with English abstract).

Batumike M J, Cailteux J L H and Kampunzu A B. 2007. Lithostratigraphy, basin development, base metal deposits, and regional correlations of the Neoproterozoic Nguba and Kundelungu rock successions, central African Copperbelt[J]. *Gondwana Research*, 11: 432~447.

Beane R E. 1983. The magmatic-hydrothermal transition[C]. *Geothermal Resources Council Special Report 13*, 245~253.

Beaudoin G and Sangster D F. 1989. Preliminary report on the Silvana mine and other Ag-Pb-Zn vein deposits, Northern Kokanee Range, British Columbia[J]. *Geological Fieldwork*, 1990(1): 251~255.

Beaudoin G and Sangster D F. 1990. The use of production data as an exploration guideline for Ag-Pb-Zn-Au vein and replacement deposits, northern Kokanee Range, Southeastern British Columbia[J]. *Geological Fieldwork*, 1991(1): 171~178.

Beaudoin G and Sangster D F. 1992. A descriptive Model for Silver-Lead-Zinc veins in clastic metasedimentary terranes[J]. *Economic Geology*, 87: 1005~1021.

Beaudoin G. 1997. Proterozoic Pb isotope evolution in the Belt-Purcell Basin: Constraints from syngenetic and epigenetic sulfide deposits[J]. *Economic Geology*, 92: 343~350.

Bouabdellah M, Beaudoin G, Leach D L, *et al.* 2009. Genesis of the Assif El Mal Zn-Pb (Cu, Ag) vein deposit. An extension-related Mesozoic vein system in the High Atlas of Morocco. Structural, mineralogical, and geochemical evidence[J]. *Miner Deposita*, 44: 689~704.

Carver R N. 2004. Nifty Copper deposit, Great Sandy Desert[J]. *Western Australia. CRC LEME*: 1~3.

Chen Bailin, Li Yusheng, Dong Faxian, *et al.* 1998. Study on the structure of Zongshuban area, Chenxian, Hunan province and ore-controlling conditions[J]. *Journal of Geomechanics*, 4(2): 75~82 (in Chinese with English abstract).

Chen Bailin and Liu Jianmin. 1999. Study on the genesis and geochemical of the Zongshuban lead-zinc deposit, Chen county, Hunan[J]. *Mineral Resources and Geology*, 13(4): 39~43 (in Chinese with English abstract).

Chen Kaixu, Yao Shuzhen, He Longqing, *et al.* 2004. Ore-forming fluid in Baiyangping silver-polymetallic mineralization concentration field in Lanping Yunnan province[J]. *Geological Science and Technology Information*, 23(2): 45~50 (in Chinese with English abstract).

Chen Shishi, Zhang Chengjiang, Li Zeqin, *et al.* 2013. Correlation of the Lanuoma Pb-Zn deposit in Tibet with the Jinding Pb-Zn deposit[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 32(4): 437~440 (in Chinese with English abstract).

Chetty D and Frimmel H E. 2000. The role of evaporites in the genesis of base metal sulphide mineralisation in the Northern Platform of the Pan-African Damara Belt, Namibia: geochemical and fluid inclusion evidence from carbonate wall rock alteration[J]. *Mineralium Deposita*, 35(4): 364~376.

Cox D P. 1986. Descriptive model of polymetallic veins[R]. *Mineral Deposit Models: US Geological Survey Bulletin*, 1693: 125.

Davis J W. 2009. Technical report on the Silvercup property[J]. *Silvercup Property*, BC: 1~28.

Drewes H. 1978. The Cordilleran orogenic belt between Nevada and Chihuahua[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 89(5): 641~657.

Feng Zhixing, Lü Xinbiao and Wang Tao. 2010. A preliminary study on mineralization of the Youqialang lead-silver deposit in Tibet[J]. *Geology and Exploration*, (4): 628~633 (in Chinese with English abstract).

Feng Zhixing, Lü Xinbiao and Wang Tao. 2011. A preliminary study of metallogenesis of Youqialang lead-silver deposit, Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 30(3): 469~476 (in Chinese with English abstract).

Fleck R J. 2002. Age and origin of base and precious metal veins of the Coeur d'Alene mining district, Idaho[J]. *Economic Geology*, 97: 23~42.

Fu Shaoying, Jin Yonghu, Zhang Shaobo, *et al.* 2009. Geological characteristics of the Youkalang Pb-Ag deposit with its genesis research, Naqu County in Tibet[J]. *Mineral Resources and Geology*, 22(5): 412~417 (in Chinese with English abstract).

Gong Fanying, Li Yongsheng, Zhen Shimin, *et al.* 2011. Geological characteristics of the Kangjiawan Pb-Zn deposit[J]. *Acta Mechanica Sinica, Supplement*: 477~478 (in Chinese with English abstract).

Grant G J and Ruiz J. 1988. The Pb-Zn-Cu-Ag deposits of the Grande-

- na mine , San Francisco del Oro-Santa Barbara district , Chihuahua , Mexico [J]. *Economic Geology* , 83 : 1 683 ~ 1 702 .
- Greyling L N , Robb L J , Master S , *et al.* 2005. The nature of early basinal fluids in the Zambian Copperbelt : A case study from the Chambishi deposit [J]. *Journal of African Earth Sciences* , 42 : 159 ~ 172 .
- Hedenquist J W , Thompson J F , Goldfarb R J , *et al.* 2005. Perforce [J]. *Economic Geology* , 100th Anniversary Volume , Vii ~ Xii .
- Heijlen W , Bsnks D A , Muchez P , *et al.* 2008. The nature of mineralizing fluids of the Kipushi Zn-Cu deposit , Katanga , Democratic Republic of Congo : Quantitative fluid inclusion analysis using Laser Ablation ICP-MS and Bulk Crush-Leach Methods [J]. *Economic Geology* , 103 : 1 459 ~ 1 482 .
- Hou Zengqian , Pan Guitang , Wang Anjian , *et al.* 2006b. Metallogenesis in Tibetan collision orogenic belt : II . Mineralization in late-collisional transformation setting [J]. *Mineral Deposits* , 25 (5) : 521 ~ 543 (in Chinese with English abstract) .
- Hou Zengqia , Song Yucai , Li Zheng , *et al.* 2008. Thrust-controlled , sediments-hosted Pb-Zn-Ag-Cu deposits in eastern and northern margins of Tibetan orogenic belt : Geological features and tectonic model [J]. *Mineral Deposits* , 27 (2) : 123 ~ 144 (in Chinese with English abstract) .
- Hou Zengqian , Yang Zhusen , Xu Wenyi , *et al.* 2006a. Metallogenesis in Tibetan collision orogenic belt : I . Mineralization in main collisional orogenic setting [J]. *Mineral Deposits* , 25 (4) : 337 ~ 358 (in Chinese with English abstract) .
- Hou Zengqian and Zhou Jirong. 2001. Collision-orogenic progresses of the Yidun arc in the Sanjiang region : record of granites [J]. *Acta Geologica Sinica* , 75 (4) : 484 ~ 497 (in Chinese with English abstract) .
- Johnson C A , Cardellach E , Tritlla J , *et al.* 1996. Cierco Pb-Zn-Ag vein deposits : Isotopic and fluid inclusion evidence for formation during the Mesozoic Extension in the Pyrenees of Spain [J]. *Economic Geology* , 91 : 497 ~ 506 .
- Joncas I and Beaudoin G. 2002. The St. Eugene deposit , British Columbia : A metamorphosed Ag-Pb-Zn vein in Proterozoic belt-Purcell rock [J]. *Economic Geology* , 97 : 11 ~ 22 .
- Kamona A F , Leveque J , Friedrich G , *et al.* 1999. Lead isotopes of the carbonate-hosted Kabwe , Tsumeb , and Kipushi Pb-Zn-Cu sulphide deposits in relation to Pan African orogenesis in the Damaran-Lufilian Fold Belt of Central Africa [J]. *Mineralium Deposita* , 34 : 273 ~ 283 .
- Kamona A F and Friedrich G H. 2007. Geology , mineralogy and stable isotope geochemistry of the Kabwe carbonate-hosted Pb-Zn deposit , Central Zambia [J]. *Ore Geology Reviews* , 30 : 217 ~ 243 .
- Kampunzu A B , Cailteux J L H , Kamona A F , *et al.* 2009. Sediment-hosted Zn-Pb-Cu deposits in the Central African Copperbelt [J]. *Ore Geology Reviews* , 35 : 263 ~ 297 .
- Kimbauer T , Wagner T , Taubald H , *et al.* 2012. Post-Variscan hydrothermal vein mineralization , Taunus , Rhenish Massif (Germany) : Constraints from stable and radiogenic isotope data [J]. *Ore Geology Reviews* , 48 : 239 ~ 257 .
- Leach D L , Sangster D F , Kelley D K , *et al.* 2005. Sediment-hosted Lead-Zinc deposits : A global perspective. *Economic Geology* [J]. 100th Anniversary Volume : 561 ~ 607 .
- Leach D L , Bradley D C , Huston D , *et al.* 2010. Sediment-hosted lead-zinc deposits in earth history [J]. *Economic Geology* , 105 : 593 ~ 625 .
- Lefebure D V and Church B N. 1996. Polymetallic veins Ag-Pb-Zn ± Au [J]. *British Columbia Ministry of Energy of Employment and Investment* , 1996 (13) : 67 ~ 70 .
- Li Feng , Fu Weimin and Li Lei. 1997. The material origin of the regional metallogenesis of Cu deposits in red beds of west Yunnan [J]. *Yunnan Geology* , 16 (3) : 233 ~ 244 (in Chinese with English abstract) .
- Li Yongsheng , Gong Fanying , Zhen Shimin , *et al.* 2011. The judgement of the geologic body and its significant of the Kangjiawan Pb-Zn-Au-Ag deposit in Hunan province [J]. *Acta Mechanica Sinica* , Supplement : 964 ~ 965 (in Chinese with English abstract) .
- Liu Jiajun , Li Zhiming , Liu Yuping , *et al.* 2003. The metallogenic age of Jinman vein copper deposit , western Yunnan [J]. *Geoscience* , 17 (1) : 34 ~ 39 (in Chinese with English abstract) .
- Liu Jiajun , He Minqin , Li Zhiming , *et al.* 2004. Oxygen and carbon isotopic geochemistry of Baiyangping silver-copper polymetallic ore concentration area in Lanping Basin of Yunnan Province and its significance [J]. *Mineral Deposits* , 23 (1) : 1 ~ 10 (in Chinese with English abstract) .
- 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 , south western China [J]. *Acta Petrologica Sinica* , 26 (06) : 1 646 ~ 1 660 (in Chinese with English abstract) .
- Liu Quan. 2003. Geological characteristics and genesis of Xiasai Silver-polymetallic deposit in western Sichuan province [J]. *Mineral Deposits* , 22 (2) : 121 ~ 128 (in Chinese with English abstract) .
- Liu Qingshuang. 1996. The metallogenic geologic conditions and metallogenesis of the Kangjiawan Pb-Zn deposit of the Shuikoushan polymetallic field in Hunan province [J]. *Geological Exploration for Non-Ferrous Metals* , 5 (6) : 340 ~ 346 (in Chinese with English abstract) .
- Liu Youxun , Liu Yaxin and Huang Gefei. 2002. Geological characteristics of Ag-Pb-Zn-deposit and its prospecting foreground at Xishan district , Chenzhou [J]. *Hunan Geology* , 21 (4) : 281 ~ 286 (in Chinese with English abstract) .
- Lu Xiaozan , Huang Weihong , Wei Xiaoyan , *et al.* 2004. Genes of Lead and Zinc deposit of Laochang type , Guangxi [J]. *Mineral Resources and Geology* , 18 (102) : 139 ~ 142 (in Chinese with English ab-

- stract).
- Maanjou M, Rasa I and Lentz D R. 2012. Petrology, Geochemistry, and stable isotope Studies of the Chehelkureh Cu-Zn-Pb deposit, Zahedan, Iran[J]. *Economic Geology*, 107(4): 683~712.
- Martin H and Eder F W. 1983. Intracontinental Fold Belts: Case Studies in the Variscan Belt of Europe and the Damara Belt in Namibia [M]. Springer Verlag.
- Mauk J L and White B G. 2004. Stratigraphy of the Proterozoic Revett Formation and its control on Ag-Pb-Zn vein mineralization in the Coeur d'Alene district, Idaho[J]. *Economic Geology*, 99: 295~312.
- Melcher F. 2003. The Otavi Mountain Land in Namibia: Tsumeb, Germanium and Snowball Earth[J]. *Mittösterr Mineralog Ges*, 148: 413~435.
- Moix P, Beccalotto L, Kozur H W, et al. 2008. A new classification of the Turkish terranes and sutures and its implication for the paleotectonic history of the region[J]. *Tectonophysics*, 451(1): 7~39.
- Orgün Y, Gültekin A H and Onal A. 2005. Geology, mineralogy and fluid inclusion data from the Arapucan Pb-Zn-Cu-Ag deposit, Canakkale, Turkey[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 25(4): 629~642.
- Scott J B. 1958. Structure of the ore deposits at Santa Barbara, Chihuahua, Mexico[J]. *Economic Geology*, 53: 1004~1037.
- Schneider J, Melcher F and Brauns M. 2007. Concordant ages for the giant Kipushi base metal deposit (D R Congo) from direct Rb-Sr and Re-Os dating of sulfides[J]. *Miner Deposita*, 42: 791~797.
- Song Yucai, Hou Zengqian, Yang Tiannan, et al. 2011. Sediment-hosted Himalayan base metal deposits in Sanjiang region: characteristics and genetic types[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(3): 355~380(in Chinese with English abstract).
- Tang Juxing, Dor Ji, Liu Hongfei, et al. 2012. Minerogenetic series of ore deposits in the East Part of the Gangdise metallogenic Belt[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 33(4): 393~410(in Chinese with English abstract).
- Tao Yan, Bi Xianwu, Xin Zhonglei, et al. 2010. Geology, geochemistry and origin of Lanuoma Pb-Zn-Sb deposit in Changdu area, Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 30(4): 599~615(in Chinese with English abstract).
- Taylor R D, Leach D L, Bradley D C, et al. 2009. Compilation of mineral resource data for Mississippi Valley-Type and Clastic-Dominated Sediment-Hosted Lead-Zinc Deposits[R]. Open-File Report, 1297: 1~42.
- Wagner T and Schneider J. 2002. Lead isotope systematics of vein-type antimony mineralization, Rheinisches Schiefergebirge, Germany: a case history of complex reaction and remobilization processes[J]. *Mineralium Deposita*, 37(2): 185~197.
- Wang Guanghui. 2010. Genes of Jinman-Liancheng vein copper deposit of Lanping basin, western Yunnan[D]. Kunming University of Science and Technology: 1~84(in Chinese with English abstract).
- Wang Tao, Lai Jianqing, Feng Zhixing, et al. 2011. Fluid inclusions of Youqialang lead-silver deposit in Tibet[J]. *Chinese Journal of Geology*, 46(2): 549~558(in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaohu, Song Yucai, Hou Zengqian, et al. 2011. Geological characteristics of the Baiyangping Pb-Zn-Cu-Ag polymetallic deposit in northern Lanping basin[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(3): 507~518.
- Wu Yongfang. 1995. Geological and geochemical features of the concealed Kangjiawan Pb-Zn-Au-Ag deposit, Hunan[J]. *Geological Exploration for Non-Ferrous Metals*, 4(2): 96~99(in Chinese with English abstract).
- Yang Chuanyi. 1985. The finding and genesis of Kangjiawan Pb-Zn deposit[J]. *Geology and Prospecting*, 21(5): 1~7(in Chinese with English abstract).
- Yang Yongqiang, Zhai Yusheng, Hou Yushu, et al. 2006. Study of metallogenic systems of sediment-hosted lead and zinc deposits[J]. *Earth Science Frontiers*, 13(3): 200~205(in Chinese with English abstract).
- Zartman R E and Doe B R. 1981. Plumbotectonics? the model[J]. *Tectonophysics*, 75(1): 135~162.
- Zhang Changqing, Yu Jinjie, Mao Jingwen, et al. 2009. Advances in the study of Mississippi Valley-type deposits[J]. *Mineral Deposits*, 28(2): 195~210(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinrang and Wen Hanjie. 2012. Sulfur and lead compositions and tracing of copper deposits on the western border of the Lanping Basin, Yunnan Province[J]. *Geochimica*, 2: 7(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qinghua. 1999. The geological characteristics of the Shuikoushan Lead-Zinc ore field in Hunan and the prospecting thought clues[J]. *Geological Exploration for Non-Ferrous Metals*, 8(3): 141~146(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yijun. 1996. Geology of Pb-Zn-Ag deposit of Zongshuban, Chengzhou county[J]. *Hunan Geology*, 15(4): 199~203(in Chinese with English abstract).
- Zou Guangfu, Hu Shihua, Shuai Dequan, et al. 2002. Geological Features and Origin of Xiasai Silver-Polymetallic Deposit, West Sichuan[J]. *Mineral Deposits, Supplement*: 804~807(in Chinese with English abstract).
- Zou Zhichao, Hu Ruizong and Bi Xianwu. 2010. Sulfur isotope geochemical survey of Baiyangping silver-polymetallic mineralization concentration field in Lanping Yunnan province[J]. *Mineral Deposits*, 29(Supplement): 561~562(in Chinese with English abstract).
- Zou Zhichao, Hu Ruizong and Bi Xianwu. 2011. Geological and carbon isotope geochemical survey of Baiyangping silver-polymetallic mineralization concentration field in Lanping Yunnan province[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 682~683(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 柏道远, 贾宝华, 李金冬, 等. 2007. 区域构造体制对湘东南印支期与燕山早期花岗岩成矿能力的重要意义——以千里山岩体和王仙岭岩体为例[J]. 矿床地质, 26(5): 487~500.
- 陈柏林, 李玉生, 董法先, 等. 1998. 湖南枞树板铅锌矿区构造特征及控矿条件研究[J]. 地质力学学报, 4(2): 75~82.
- 陈柏林, 刘建民, 李玉生. 1999. 枞树板铅锌矿床地球化学特征及成因探讨[J]. 矿产与地质, 13(4): 39~43.
- 陈开旭, 姚书振, 何龙清, 等. 2004. 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(2): 45~50.
- 陈实识, 张成江, 李泽琴, 等. 2013. 西藏拉诺玛铅锌矿与云南金顶铅锌矿对比研究[J]. 四川地质学报, 33(4): 437~440.
- 冯志兴, 吕新彪, 王涛. 2010. 西藏尤卡朗铅银矿成矿构造初步研究[J]. 地质与勘探, (4): 628~633.
- 冯志兴, 吕新彪, 王涛. 2011. 西藏尤卡朗铅银矿床成矿作用初步研究[J]. 矿床地质, 30(3): 469~476.
- 付少英, 靳拥护, 张哨波, 等. 2009. 西藏那曲县尤卡朗铅银矿床地质特征及成因分析[J]. 矿产与地质, 23(5): 412~417.
- 公凡影, 李永胜, 甄世民, 等. 2011. 康家湾铅锌金银矿床地质特征[J]. 矿物学报, 增刊: 477~478.
- 侯增谦, 潘桂棠, 王安建, 等. 2006b. 青藏高原碰撞造山带: II. 晚碰撞转换成矿作用[J]. 矿床地质, 25(5): 521~543.
- 侯增谦, 宋玉财, 李政, 等. 2008. 青藏高原碰撞造山带 Pb-Zn-Ag-Cu 矿床新类型成矿基本特征与构造控矿模型[J]. 矿床地质, 27(2): 123~144.
- 侯增谦, 杨竹森, 徐文艺, 等. 2006a. 青藏高原碰撞造山带: I. 主碰撞造山成矿作用[J]. 矿床地质, 25(4): 337~358.
- 侯增谦, 周继荣. 2001. 三江地区义敦岛弧碰撞造山过程: 花岗岩记录[J]. 地质学报, 75(4): 484~497.
- 李峰, 甫为民, 李雷. 1997. 滇西红层铜矿区域成矿物质来源[J]. 云南地质, 16(3): 233~244.
- 李永胜, 甄世民, 公凡影, 等. 2011. 湖南省康家湾铅锌金银矿床成矿地质体的判定及其意义[J]. 矿物学报: 964~965.
- 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, 41(1): 1~6.
- 刘家军, 李志明, 刘玉平, 等. 2003. 滇西金满脉状铜矿床成矿年龄讨论[J]. 现代地质, 17(1): 34~39.
- 刘家军, 何明勤, 李志明, 等. 2004. 云南白秧坪银铜多金属矿集区碳氧同位素组成及其意义[J]. 矿床地质, 23(1): 1~10.
- 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区中银、钴、铋、镍的赋存状态与成因意义[J]. 岩石学报, 26(06): 1646~1660.
- 刘权. 2003. 四川夏塞银多金属矿床地质特征及成因[J]. 矿床地质, 22(2): 121~128.
- 刘清双. 1996. 康家湾铅锌矿床成矿地质条件及矿床成因探讨[J]. 有色金属矿产与勘查, (6): 340~346.
- 刘友勋, 刘亚新, 黄革非. 2002. 郴州西山地区银铅锌矿床地质特征及找矿方向[J]. 湖南地质, 21(4): 281~286.
- 陆孝赞, 黄位鸿, 卫小彦, 等. 2004. 广西老厂式铅锌矿床成因研究[J]. 矿产与地质, 18(102): 139~142.
- 宋玉财, 侯增谦, 杨天南, 等. 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[J]. 岩石矿物学杂志, 30(3): 355~380.
- 唐菊兴, 多吉, 刘鸿飞, 等. 2012. 冈底斯成矿带东段矿床成矿系列及找矿突破的关键问题研究[J]. 地球学报, 33(4): 393~410.
- 陶琰, 毕献武, 辛忠雷, 等. 2011. 西藏昌都地区拉诺玛铅锌银多金属矿床地质地球化学特征及成因分析[J]. 矿床地质, 30(4): 599~615.
- 王光辉. 2010. 滇西兰坪盆地金满-连城脉状铜矿床成因研究[D]. 昆明理工大学: 1~84.
- 王涛, 赖健清, 冯志兴, 等. 2011. 西藏尤卡朗铅银矿床流体包裹体研究[J]. 地质科学, 46(2): 549~558.
- 王晓虎, 宋玉财, 侯增谦, 等. 2011. 兰坪盆地北部白秧坪铅锌铜银多金属矿床地质特征[J]. 岩石矿物学杂志, 3: 507~518.
- 吴永芳. 1995. 湖南康家湾隐伏铅锌金银矿床地质地球化学特征[J]. 有色金属矿产与勘查, 4(2): 96~99.
- 杨传益. 1985. 康家湾铅锌矿床的发现及成因[J]. 地质与勘探, 21(5): 1~7.
- 杨永强, 翟裕生, 侯玉树, 等. 2006. 沉积岩型铅锌矿床的成矿系统研究[J]. 地学前缘, 13(3): 200~205.
- 张长青, 余金杰, 毛景文, 等. 2009. 密西西比型(MVT)铅锌矿床研究进展[J]. 矿床地质, 28(2): 195~210.
- 张锦让, 温捷捷. 2012. 云南兰坪盆地西缘脉状铜多金属矿床硫、铅同位素组成及成矿示踪[J]. 地球化学, 2: 7.
- 张庆华. 1999. 湖南水口山铅锌矿田地质特征及找矿思路[J]. 有色金属矿产与勘查, (3): 141~146.
- 张怡军. 1996. 郴州市枞树板铅锌银矿床地质特征[J]. 湖南地质, 15(4): 199~203.
- 邹光富, 胡世华, 帅德权, 等. 2002. 川西义敦夏塞银多金属矿床地质特征及成因探讨[J]. 矿床地质, 21(增刊): 804~807.
- 邹光富, 郑荣才, 胡世华, 等. 2008. 四川巴塘县夏塞银多金属矿床特征[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 35(1): 93~102.
- 邹志超, 胡瑞忠, 毕献武. 2010. 云南白秧坪银多金属矿集区硫同位素地球化学及其成矿意义[J]. 矿床地质, 29(增刊): 561~562.
- 邹志超, 胡瑞忠, 毕献武. 2011. 云南白秧坪银铜多金属矿集区地质及碳同位素地球化学研究[J]. 矿物学报, 682~683.