

西南地区分散元素伴生成矿的主要类型及伴生富集规律

陶琰, 胡瑞忠, 唐永永, 叶霖, 戚华文, 樊海峰

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

内容提要:西南地区分散元素资源丰富, 主要以伴生元素矿床产出, 寄主矿床类型主要为沉积岩容矿型铅锌矿(伴生 Cd、Ge、Ga、Tl)、锡石硫化物矿床(伴生 In、Cd)和沉积型铝土矿(伴生 Ga)及含锆煤等。这些矿床往往集中产出, 主要分布在三江铅锌铜银多金属成矿域、川滇黔铅锌多金属成矿域、滇东南锡多金属成矿域、黔西北铝土矿含矿带及滇西第三系含煤盆地。本文以滇东南锡石硫化物矿床(个旧、都龙、白牛场)及沉积岩容矿型铅锌矿(包括兰坪金顶铅锌矿和川滇黔铅锌银多金属成矿域中的会泽、大梁子、天宝山和富乐铅锌矿等)等为主要对象, 开展了不同金属硫化物中分散元素含量及电子探针面扫描分析, 查定了分散元素伴生富集的赋存状态, 并在矿床地球化学研究基础上, 综合分析了这些分散元素的伴生富集规律。研究结果进一步表明, 分散元素(In、Cd、Ge、Ga、Tl)伴生富集都具有明确的载体矿物专属性: 热液矿床中 In、Cd、Ge、Ga 主要富集在闪锌矿中, Tl 主要富集在黄铁矿中; 沉积铝土矿中 Ga 的载体矿物主要是一水铝石, 含锆煤中 Ge 主要以有机质结合态赋存在腐殖体中。在伴生富集规律上, In 主要伴生富集在锡石硫化物矿床中, 滇东南三大锡石硫化物矿床(个旧、都龙、白牛场)具有相似的地质地球化学特征, 成因上与燕山晚期花岗岩侵入密切相关。沉积岩容矿型铅锌矿普遍含有 Cd、Ge、Ga、Tl, 但不同矿床在不同分散金属富集程度上存在明显差异, 其中, 金顶矿床中的闪锌矿高度富 Cd, 平均含量达 1.23%, 其成因可能与生物有机作用有关。临沧盆地西缘含锆煤产出在以花岗岩为基底的帮卖陆相含煤碎屑岩盆地中, 具有工业意义的 Ge 只集中在第一含煤段的煤层中, 其含煤段有硅质岩和薄层含碳硅质灰岩, 在上部缺乏硅质岩的两个含煤段的煤中无 Ge 矿化。Ga 在铝土矿中的伴生富集具有全球性特点, 不同成矿时代和不同工业类型铝土矿中都具有镓的伴生富集, 含量一般在 $50 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$, 贵州铝土矿床主要形成于石炭纪, 其矿石以硬水铝石及少量黏土等为主, Ga 含量在 $70 \times 10^{-6} \sim 143 \times 10^{-6}$, 略高于中国和世界铝土矿中镓的平均值。

关键词:西南地区; 分散元素; 伴生富集; 成矿规律

西南地区分散元素资源丰富, 如: 云南占全国铊总储量的 94%、镉总储量的 45.7%、锗总储量的 40%, 云南保有锆金属储量 1112 t, 居全国第 2 位, 贵州占全国镓矿总储量的 13%。其中, 部分以独立矿床产出, 如贵州滥木厂和云南南华的 Tl 矿、四川大水沟的 Te 矿、四川拉尔玛的 Se 矿, 等; 部分以伴生矿床或伴生富集的形式产出。分散元素伴生矿床或伴生富集具有重要的资源意义, 特别是 In、Ga、Ge、Cd 基本上都是以伴生形式产出。西南地区分散元素的伴生在区域分布和寄主矿床类型上都有

相对集中的特点(图 1), 大部分资源量赋存在大型、超大型矿床中, 伴生分散元素本身也具有大型、超大型规模。主要的寄主矿床类型主要为沉积岩容矿型铅锌矿(Ge、Ga、Cd、Tl)、锡石硫化物矿床(In、Cd)和沉积型铝土矿(Ga)及含锆煤(Ge), 这些矿床主要分布在兰坪盆地包括金顶铅锌矿在内的三江铅锌铜银多金属成矿域、川滇黔铅锌多金属成矿域、滇东南锡多金属成矿域、黔西北铝土矿含矿带。另外, 西南地区的锆主要集中在分布于临沧盆地西缘含煤地层中和少数铅锌矿(如云南会泽、富乐和四川会东大梁

注: 本文为中国地质调查局地质大调查项目“大宗急缺矿产和战略性新兴产业矿产调查”工程“我国三稀资源战略调查”(编号 12120113078200)、“稀有稀土稀散矿产调查”(编号 1212011220804)、国家重点研发计划重点专项(编号 2017YFC0602503)和国家自然科学基金项目(编号 41703047)资助成果。

收稿日期: 2019-04-23; 改回日期: 2019-05-23; 网络发表日期: 2019-05-27; 责任编辑: 周健。

作者简介: 陶琰, 男, 1963 年生。博士, 研究员, 矿床地球化学专业。Email: taoyan@vip.gyig.ac.cn。

引用本文: 陶琰, 胡瑞忠, 唐永永, 叶霖, 戚华文, 樊海峰. 2019. 西南地区分散元素伴生成矿的主要类型及伴生富集规律. 地质学报, 93(6): 1210~1230. doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019084.

Tao Yan, Hu Ruizhong, Tang Yongyong, Ye Lin, Qi Huawen, Fan Haifeng. 2019. Types of dispersed elements bearing ore-deposits and their enrichment regularity in Southwest China. Acta Geologica Sinica, 93(6): 1210~1230.

子)中,临沧盆地西缘含煤地层中产出的临沧锗矿具有超大型规模。本文将综合介绍、分析西南地区稀散元素伴生成矿的主要类型及伴生富集规律。虽然临沧锗矿在资源经济意义上可视为独立矿床,考虑其赋存方式,本文仍作为共伴生富集类型一并予以介绍。

西南地区对稀散元素成矿规律的研究程度相对较高,前人总结过“南锗北碲”等特点(Wang Denghong et al., 2002a, 2005),曾经受到涂光炽等老一辈专家的高度重视。随着战略性新兴产业的发展,国家对稀散金属的需求将日益增大,继续开展成矿规律尤其是大型、特大型、高品位稀散金属矿床成矿规律的研究,具有重要的理论意义和现实意义,对西藏拉诺玛、扎西康等新发现的铅锌银矿中稀散金属的综合利用也具有参考意义。

1 锡石硫化物矿床(伴生 In、Cd)

1.1 西南地区锡石硫化物矿床概况

西南地区的锡石硫化物矿床集中分布在滇东南

锡多金属成矿带和滇西锡成矿带。其中,滇东南锡多金属成矿带成矿条件优越,与锡多金属成矿关系密切的侵入岩广泛发育,分布着个旧、都龙锡锌多金属矿等世界著名的超大型锡石硫化物矿床,与桂西锡矿带组成我国最重要的锡多金属资源产地(图 2)。该区同时也是 In 伴生成矿的最有利地区,成为我国最重要的富铟矿床密集区(Zhang Qian et al., 2005; Li Xiaofeng et al., 2007, 2010)。据初步估算,个旧、都龙锡锌多金属矿床分别拥有 In 资源量 4000 t 以上(Zhang Qian et al., 2005),占西南 In 资源量的 90% 以上,同时也占有全国资源储量的 40% 左右。另外,镉是都龙锡锌多金属矿的主要伴生组分之一,仅铜街、曼家寨两矿段探明的镉储量就有 9 千余吨,达到大型规模。

1.2 锡石硫化物矿床中铟赋存形态

In 的载体矿物:对个旧锡矿矿石硫化物单矿物(包括黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、富铁闪锌矿、方铅矿以及毒砂)进行微量元素 ICP-MS 分析检测,结果(表 1)显示,个旧锡矿中 In 的最主要载体矿物为含

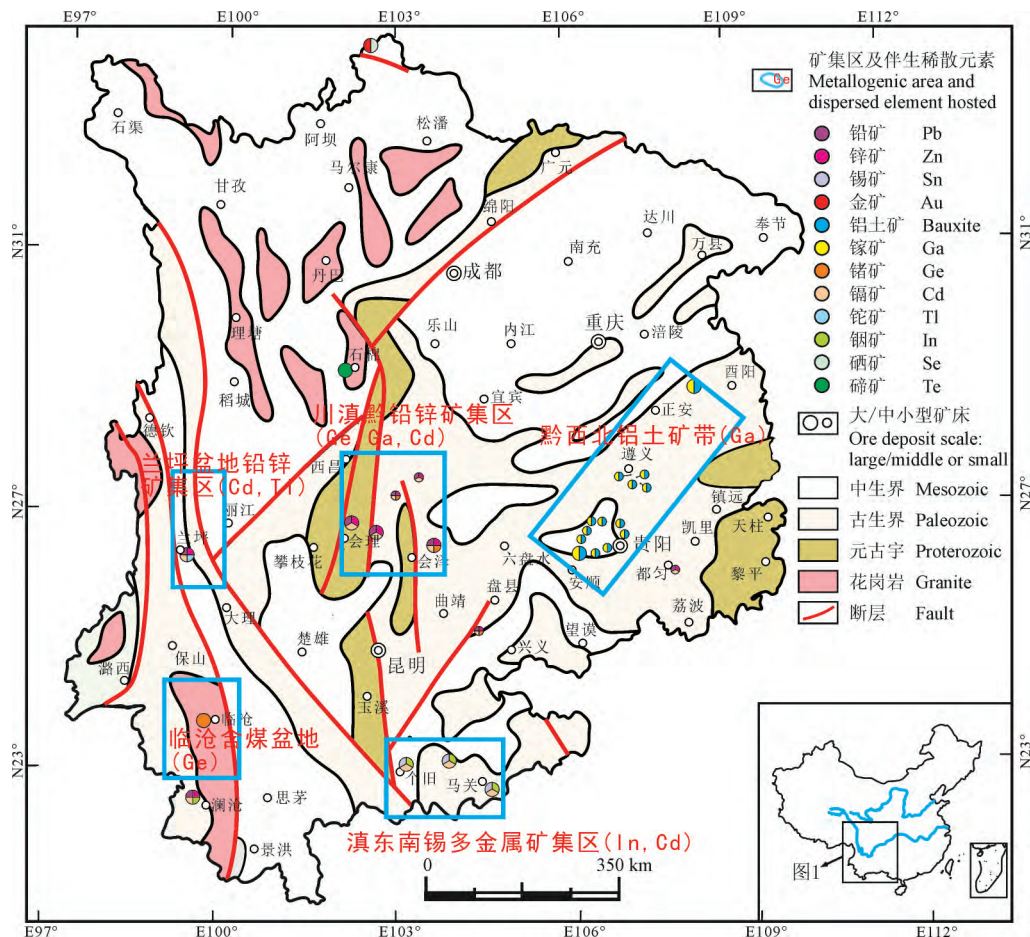


图 1 西南地区稀散元素主要伴生矿床分布图

Fig 1 Distribution of the dispersed elements bearing ore deposits in Southwest China

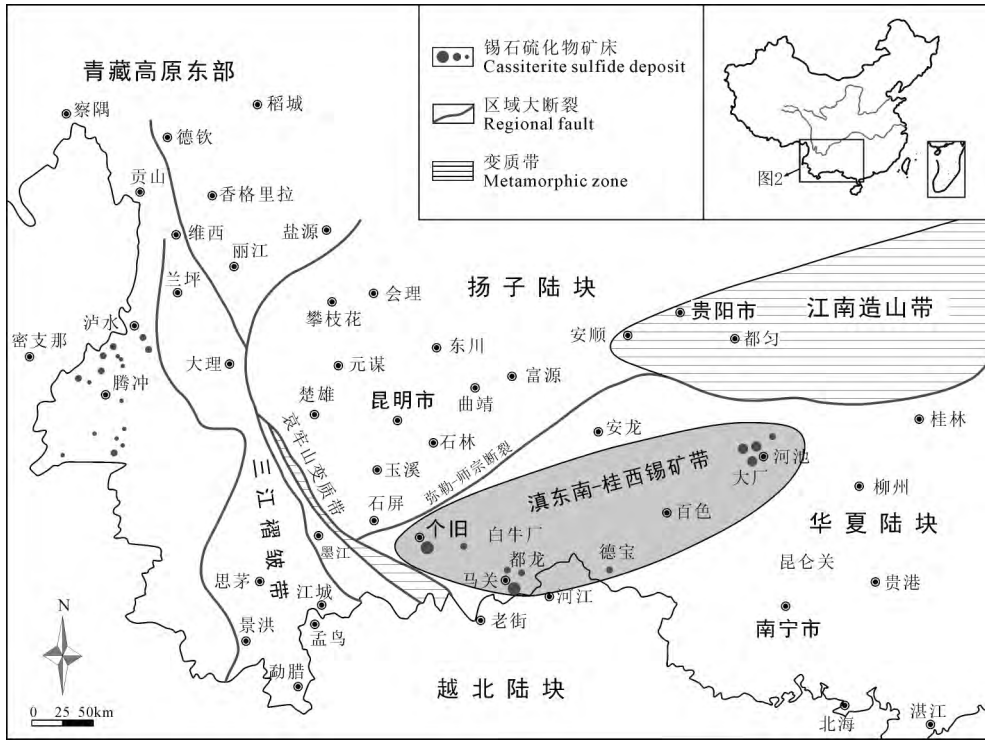


图2 西南地区锡石硫化物矿床空间分布示意图(据 Li Yubang, 2015^①)

Fig. 2 A sketch map of spatial distribution of cassiterite sulfide deposits in SW China (after Li Yubang, 2015^①)

铁的闪锌矿,其次是黄铜矿和锡石,而在其他硫化物矿物中含量普遍较低。In 在闪锌矿中的含量存在一定的差异,从 $300 \times 10^{-6} \sim 830 \times 10^{-6}$ 不等,含量最高的深色闪锌矿产自松矿矿区,In 含量高达 4700×10^{-6} 。在矿区内的原生硫化物矿石中未发现 In 的独立矿物。

In 赋存状态:借助 SEM 和 EPMA 测试,扫描分析单颗粒闪锌矿矿物内 In 含量密度分布情况,结果表明闪锌矿中 S、Zn、Fe 等主量元素含量分布均匀没有环带,In 与 Cd 含量密度图也没有集中富集和贫化点出现,整体呈现均一分布特征(图 3)。已有的研究(Zhang Qian et al., 2003; Ye et al., 2011)表明,Cd 在闪锌矿中多以类质同象形式取代 Fe 进入闪锌矿晶体格架,因此在个旧闪锌矿 Cd 呈现均匀分布特征。此外,上述研究表明,闪锌矿中 In 分布与 Cd 一致,同时闪锌矿晶体无环带和蚀变边现象,认为 In 和 Cd 以类质同象形式赋存于闪锌矿晶格中。

个旧松树脚矿田的闪锌矿 In-Cu, In-(In+Cu), Zn-(In+Cu) 及 Fe-(In+Cu) 二元相关性如图 4。二元图解显示 In 与 Cu 散点落于 1:1 比例线上,且 In 与 In+Cu 二元相关图的强烈正相关也验证了二者在闪锌矿中存在的比例接近 1:1。Zn 与 In+Cu

的负相关关系,表明 In+Cu 二者进入闪锌矿方式为置换 Zn 离子,Fe 与 In+Cu 的相关图说明 Fe 与 In+Cu 没有明显的相关性,表明铁闪锌矿中 In+Cu 置换 Zn,而没有 Fe 参与到该置换体系,分析认为铁闪锌矿中的置换方式为 $In^{3+} + Cu^{+} \leftrightarrow 2Zn^{2+}$ (Li et al., 2015)。

1.3 锡石硫化物矿床中 In 伴生富集规律

矿床类型专属性:In 的富集有明显的矿床类型专属性。已有的研究表明,In 主要富集在锡石硫化物矿床中(Zhang Qian et al., 2003; Zhu Xiaoqing et al., 2006; Xu Jing et al., 2018),西南地区锡石硫化物矿床同时也是富铜矿床。

载体矿物专属性:锡石硫化物矿床的 In 主要富集在闪锌矿中(Zhang et al., 1998; Ishihara et al., 2006)。世界范围内富铜矿床中 In 所赋存的闪锌矿多为铁闪锌矿。个旧锡矿中闪锌矿以富铁为特征,Fe 含量变化范围为 7.8%~12.3%,属于铁闪锌矿类型,这可能是 Fe 进入闪锌矿中造成闪锌矿晶体结构和晶胞参数改变为有利于 In 进入。铁闪锌矿中也同时伴随着 Cd 的富集,Dill (2013)在研究 San Roque 矿床中,提出“Indium window”的概念,也就是闪锌矿中 Cd 的浓度在 0.2%~0.6% 范围内时,In 在闪锌矿中的含量最大,个旧闪锌矿中 Cd 浓度

表 1 个旧锡矿硫化物矿物中 In 含量分析结果

Table 1 Analysis of indium content in sulfide minerals of Gejiu tin deposit

单矿物类型	样号	矿石类型	In($\times 10^{-6}$)	Cd($\times 10^{-6}$)
黄铁矿	ZYS-4	块状黄铁矿矿石	0.658	1.927
	ZYS-5	块状黄铁矿矿石	10.97	88.16
	ZYS8J	块状黄铁矿矿石	0.314	0.742
	ZYS8-3	块状黄铁矿矿石	40.83	205.5
	ZYS8-4	块状黄铁矿矿石	25.7	143.7
	ZYS8-6	似层状矿石(Py 早期,Gn 晚期)	5.094	40.4
	TZW-3	交代残余黄铁矿矿石	0.065	0.243
	TZW-5	鲕状黄铁矿矿石	0.09	0.247
磁黄铁矿	1-10-3	致密块状的磁黄铁矿矿石	0.522	0.451
	KF003	块状的磁黄铁矿、铁闪锌矿矿石	142.7	80.62
	1820-1-3	玄武岩型铜矿矿石	0.867	1.064
	1820-3-2	玄武岩型铜矿矿石	19.58	17.69
	1820-5-1	玄武岩型铜矿矿石	2.03	4.002
	1820-5-2	玄武岩型铜矿矿石	1.998	3.897
	KF001	铁闪锌矿矿石	0.113	0.219
	MK-1	纹层状的硫化物矿石	2.781	22.47
	SK-2	铁闪锌矿矿石中伴生的磁黄铁矿	0.119	0.316
	SK-11	致密块状的磁黄铁矿矿石	10.73	3.104
	黄铜矿	1820-1-1	玄武岩型黄铜矿矿石	52.63
1820-3-2		玄武岩型黄铜矿矿石	95.81	42.12
1820-4-1		玄武岩型黄铜矿矿石	130.8	32.53
1820-4-3		玄武岩型黄铜矿矿石	148.1	42.54
1820-5-1		玄武岩型黄铜矿矿石	113.6	94.86
MK-1		层状硫化物矿石	266.3	27.2
KF003		与铁闪锌矿伴生的铁闪锌矿矿石	159.6	188.8
方铅矿	ZYS8-6	似层状矿石(Py 早期,Gn 晚期)	13.66	109.1
	SK-2	铁闪锌矿矿石伴生的方铅矿	15.37	68.36
富铁闪锌矿	KF001	铁闪锌矿矿石	434	3521
	KF002	铁闪锌矿矿石	496.7	3970
	ZYS8-3	块状黄铁矿矿石(含 Fe-Spl)	296.9	1404
	ZYS8-5	块状黄铁矿矿石(含 Fe-Spl)	535.9	3371
	ZYS8-6	块状黄铁矿矿石(含 Fe-Spl)	833.4	3820
	SK-1	铁闪锌矿矿石	4781	2677
	SK-2	铁闪锌矿矿石	3165	2935
	毒砂	MK-1	层状的含毒砂硫化物矿石	3.787
MK-2		层状的含毒砂硫化物矿石	6.499	1.005

0.25%~0.41%,恰好属于“Indium window”范围之内,有利于 In 富集。

滇东南三大锡石硫化物矿床具有相似的地质地球化学特征(Wang Denghong et al., 2014; Chen Zhenghui et al., 2015),且均富集 In(Cd)等多种稀散元素,暗示它们的成矿作用具有相似性。滇东南地区个旧、白牛厂和都龙三个超大型矿床的形成都与燕山晚期花岗岩侵入密切相关,都龙锡锌多金属矿床 LA-MC-ICP-MS 锡石 U-Pb 年龄为 72.4~96.6Ma(Ye Lin et al., 2017),接近于矿区隐伏花岗岩锆石 SHRIMP 法 U-Pb 年龄 92.9±1.9Ma 和花岗岩斑岩锆石 SHRIMP 法 U-Pb 年龄 86.9±1.4Ma(Liu Yuping et al., 2007)。白牛厂锡锌多金属矿床成矿时代(87.4~88.4 Ma, Li Kaiwen et al., 2013)

与薄竹山花岗岩形成时代 86.51~87.83Ma(Cheng Yanbo et al., 2010)基本一致。个旧锡石硫化物矿床辉钼矿 Re-Os 同位素模式年龄及等时线年龄分别为 82.95±1.16Ma 和 83.54±1.31 Ma(Yang Zongxi et al., 2008),与个旧花岗岩体锆石 SHRIMP 法 U-Pb 年龄 85±0.85Ma 一致(Cheng Yanbo et al., 2008)。

个旧矿区内硫化物 $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ 值主体区间为 -3‰~+4‰,呈显著塔式分布,峰值集中在 0 值左右(图 5),与矿区花岗岩一致。世界范围内包括 Sn-多金属及贱金属类型在内的富钨矿床中富钨硫化物的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值变化区间为 -3‰~+3‰,支持 In 岩浆来源的观点(Seifert and Sandmann, 2006; Schwarz-Schampera and Herzig, 2002)。

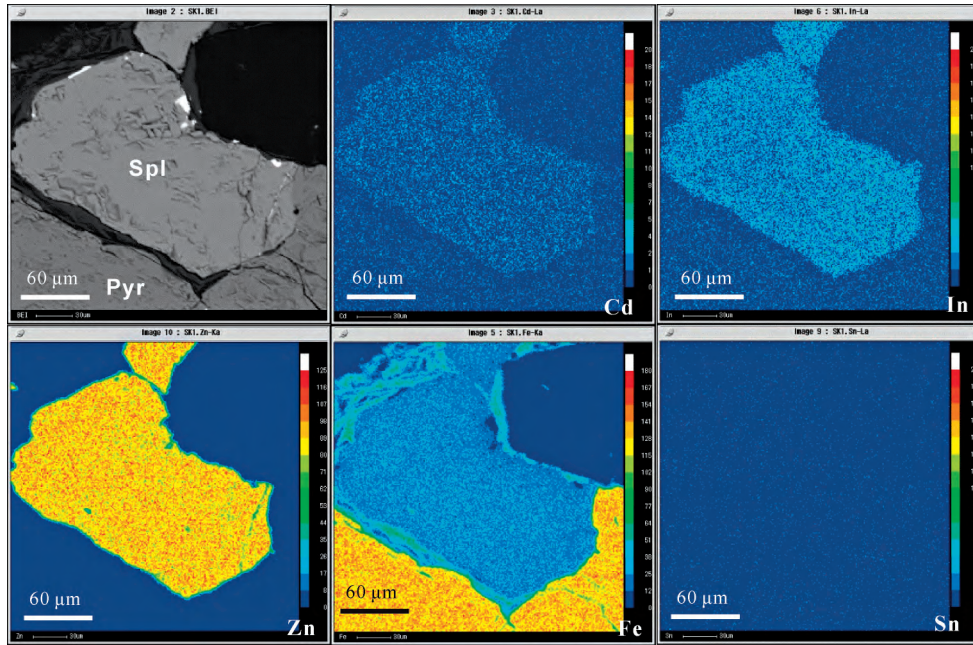


图 3 个旧锡矿闪锌矿 EPMA 面扫描元素分布图

Fig 3 EPMA Surface Scanning of element distribution in sphalerite from Gejiu tin deposit
Spl—闪锌矿;Pyr—黄铁矿
Spl—Sphalerite; Pyr—pyrite

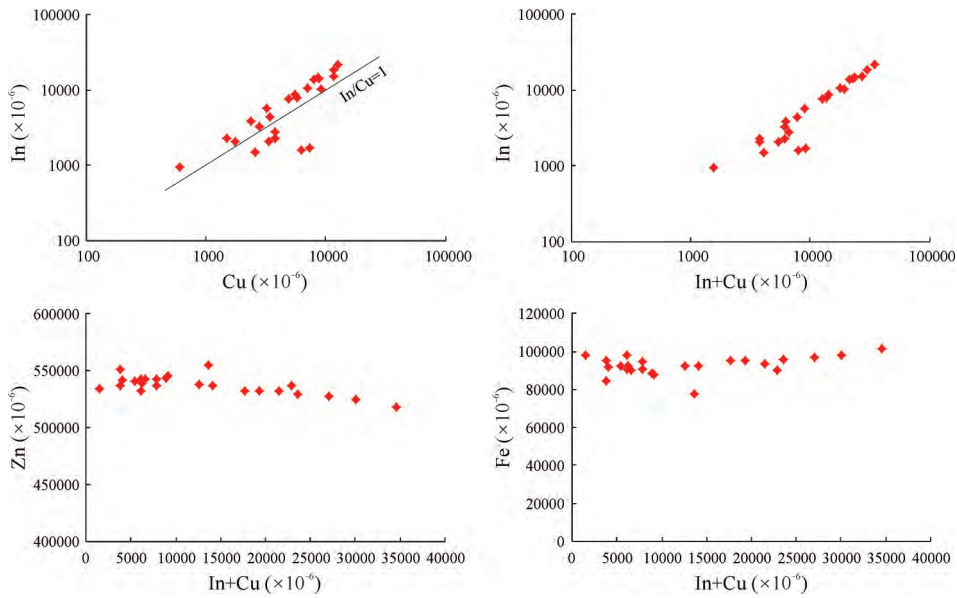


图 4 个旧松树脚矿田铁闪锌矿 In、Cu、Zn、Fe 相关性图

Fig 4 Correlation of In, Cu, Zn and Fe in Fe-bearing sphalerite from ores in Songshujiao orefield, Gejiu Sn deposit

2 沉积岩容矿型铅锌矿(伴生微量元素 Cd、Tl、Ge、Ga)

2.1 西南地区沉积岩容矿型铅锌矿微量元素伴生富集概况

西南地区沉积岩容矿型铅锌矿主要集中分布在三江铅锌铜银多金属矿成矿域和川滇黔铅锌多金属

成矿域,这些铅锌矿普遍含有可综合利用的伴生 Cd、Tl、Ge、Ga 资源,因此,西南地区铅锌多金属成矿域同时也是微量元素 Cd、Tl、Ge、Ga 的重要成矿富集区。如:兰坪金顶铅锌矿伴生镉 187900 t、铊 9702 t,四川会东大梁子铅锌矿伴生镉 21416 t、铊 274 t,云南会泽铅锌矿伴生镉 4713 t、铊 525 t,构成了微量元素的大型、超大型矿床。西南地区沉积岩

容矿型铅锌矿作为伴生稀散元素 Cd、Tl、Ge、Ga 资源最重要的载体,其所占镉、铊资源估计占西南地区镉、铊资源量的 80% 以上^②。

2.1.1 兰坪金顶铅锌多金属矿(伴生 Cd、Tl)

兰坪盆地是驰名中外的铅锌多金属成矿区(图

6),其中,金顶铅锌矿床是目前中国、乃至亚洲最大的铅锌矿床,也是世界上铅锌金属储量超过 1000 万 t 的十几个超大型矿床之一(Xue Chunji et al., 2002a; Wang Denghong et al., 2002b, 2014; Deng Jun et al., 2010, 2016; Tang et al., 2014, 2017)。金

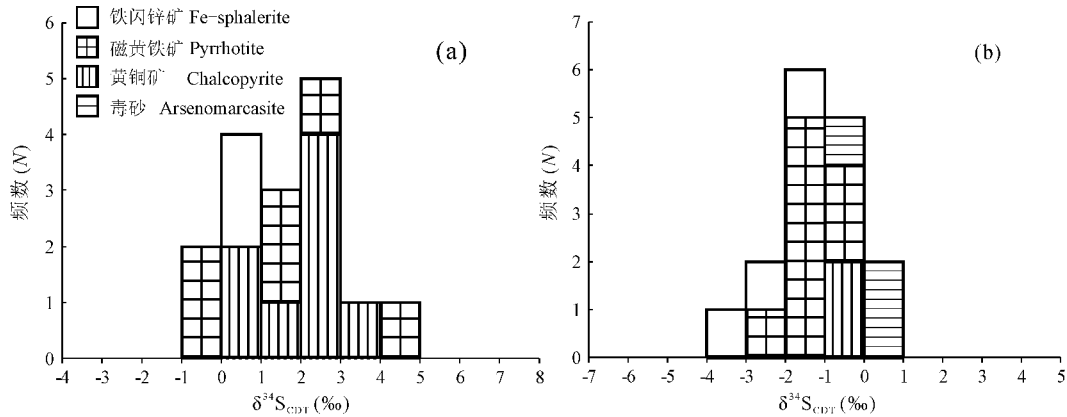


图 5 个旧卡房(a)和老厂(b)矿田硫化物硫同位素直方图

Fig 5 Sulfur isotope histograms of sulfides in Kafang (a) and Laochang (b) ore fields, Gejiu Sn deposits

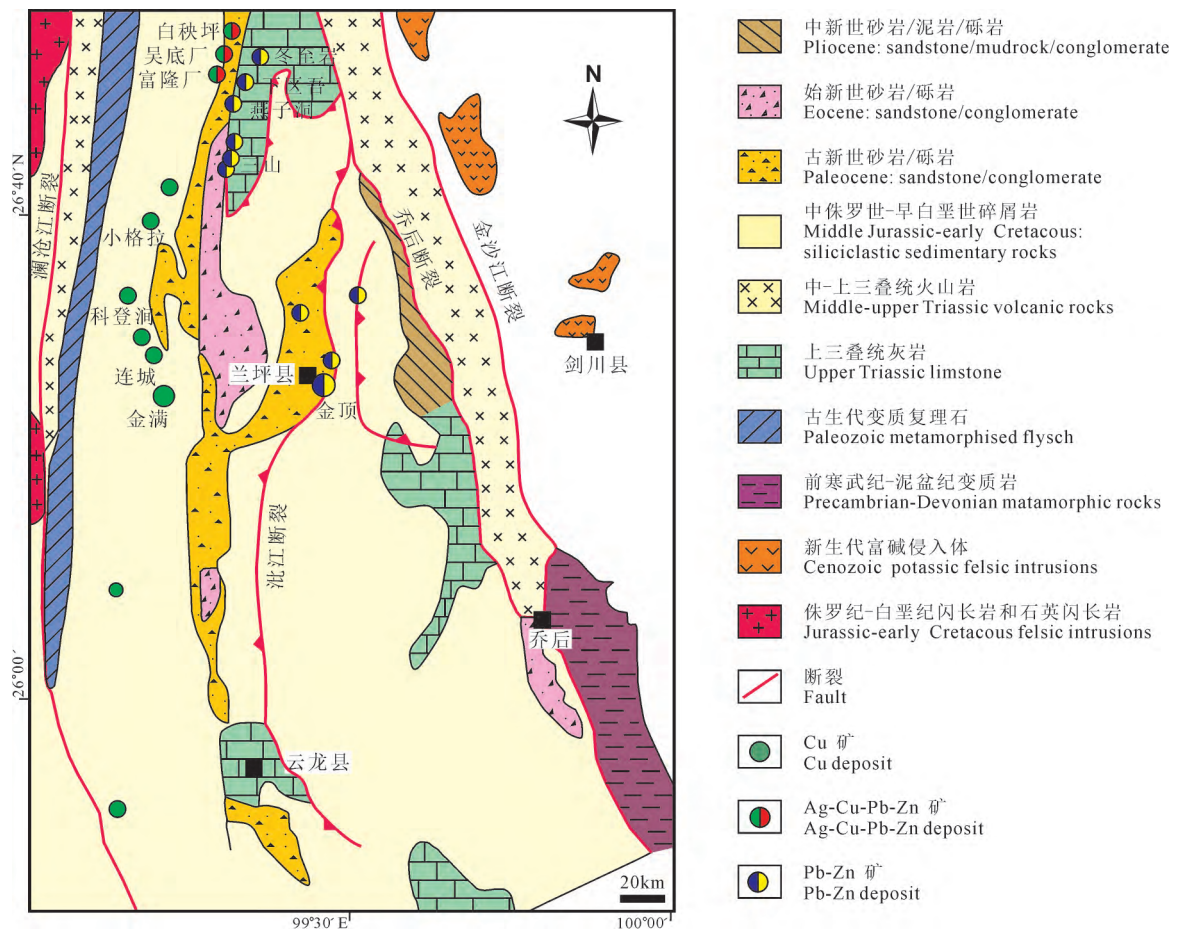


图 6 兰坪盆地北段地质简图及主要贱金属矿床分布(据 Bi Xianwu et al., 2019)

Fig 6 Geological map of the northern Lanping basin and distribution of major sediment-hosted base metal deposits (after Bi Xianwu et al., 2019)

顶矿床围岩地层以白垩系和第三系陆相碎屑岩为主岩(图7),铅-锌控制储量1500万t,平均品位Zn 6.08%、Pb 1.29%;同时,微量元素Cd、Tl也已分别达到超大型床规模,伴生镉187900t、铊9702t。区域内还有白秧坪大型Ag-Cu-Co多金属矿床(Liu Jiajun et al., 2004, 2010; Zou Zhichao et al., 2012)、白洋厂Cu-Ag多金属矿田、金满Cu矿床(Liu Jiajun et al., 2000; He Mingqin et al., 2006; Zhang Jinrang et al., 2017),等(图6),构成一个巨型铅锌多金属矿集区,该区同时也是微量元素Cd、Tl的重要富集成矿区,其所占镉、铊资源估计占西南地区镉、铊资源量的70%以上。

金顶铅锌硫化物矿石的容矿岩石为白垩系砂岩和古新统灰岩角砾岩或含砾砂岩(图7)。在白垩系砂岩中硫化物矿化呈浸染状和斑杂状,在古新统角砾岩或含砾砂岩中硫化物矿化呈浸染状出现在角砾之间的砂岩填隙物中,或呈团块、脉状出现在角砾间。矿石结构主要为胶结结构,充填交代结构。早矿化阶段主要包括产在砂岩型矿石中的微细浸染状矿化和产在灰岩角砾岩型矿石中的块状矿化。矿物组合为闪锌矿+方铅矿+黄铁矿+方解石。晚矿化阶段主要包括产在灰岩角砾岩型矿石中的粗结晶的

大脉状或团块状方铅矿和少量的胶状闪锌矿等。晚矿化阶段典型矿物组合为方铅矿+闪锌矿+黄铁矿(少)+方解石+重晶石+天青石。

矿床地球化学研究表明(Xue Chunji et al., 2007; Xue et al., 2007; Tang Yongyong, 2013; Bi Xianwu et al., 2017),金顶铅锌矿成矿流体具有中-低温、中-低盐度盆地卤水与大气降水混合的特征,早阶段成矿流体以盆地热卤水为主,晚阶段成矿流体以古大气降水为主。成矿金属主要来自于盆地中的围岩地层和变质基底。含金属的流体与富H₂S的流体的混合是导致金属硫化物沉淀的主要方式。

2.1.2 川滇黔铅锌银多金属成矿域铅锌矿(伴生Ge、Cd、Ga)

扬子板块西缘的川滇黔铅锌银多金属矿集区是中国重要的铅、锌、银、锗生产基地(Han Runsheng et al., 2012; Wang Denghong et al., 2013; Zhang Changqing et al., 2014),有会泽铅锌矿、会东大梁子铅锌矿、会理天宝山铅锌矿等大型、超大型铅锌矿床产出(图8),这些铅锌矿床普遍伴生微量元素Ge、Cd、Ga,会泽铅锌矿、会东大梁子铅锌矿、会理天宝山铅锌矿等大型超大型铅锌矿床中

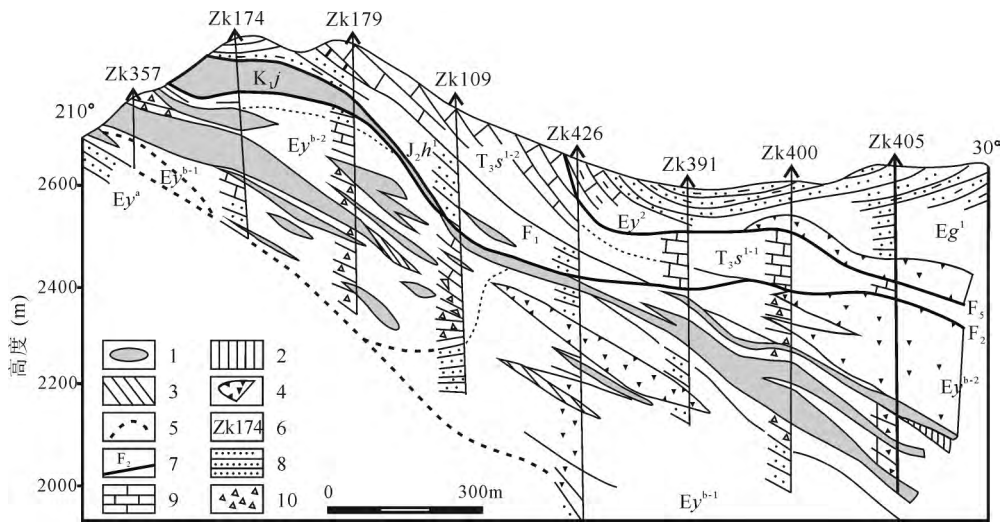


图7 金顶铅锌矿北厂—跑马坪矿段地质剖面图(据 Tang Yongyong, 2013^①)

Fig 7 Geological profile of Beichang-Paomaping section of Jinding Pb-Zn deposit(after Tang Yongyong, 2013^①)

1—铅锌矿体;2—硫铁矿体;3—天青石矿体;4—石膏矿体;5—地质界线;6—钻孔编号;7—断层及编号;8—粉砂岩;9—灰岩;10—灰岩角砾岩;T_{3s}—上三叠统三合洞组;J_{2h}—中侏罗统花开佐组;K_{1j}—下白垩统景星组;E_{y^a}—古新统云龙组下段;E_{y^b}—相当于E_{y²},古新统云龙组上段;E_g—古新统果郎组

1—Lead-zinc ore; 2—sulfide iron ore; 3—celestine ore; 4—gypsum ore; 5—geological boundary; 6—drilling hole and numbering; 7—fault and numbering; 8—siltstone; 9—limestone; 10—limestone breccia; T_{3s}—upper Triassic Sanhedong Formation; J_{2h}—middle Jurassic Hukaizuo Formation; K_{1j}—lower Cretaceous Jingxing Formation; E_{y^a}—lower section of Paleogene Yunlong Formation; E_{y^b}—an equivalent of E_{y²}, upper section of Paleogene Yunlong Formation; E_g—Paleogene Guolang Formation

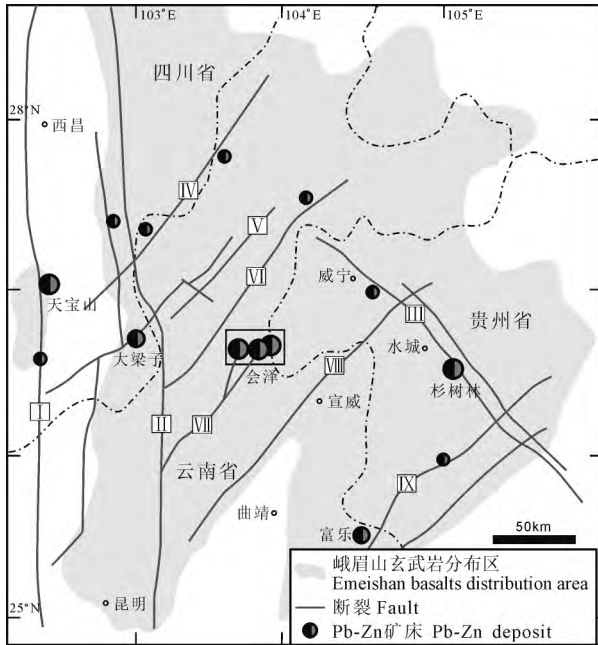


图 8 川滇黔铅锌多金属成矿域主要铅锌矿床分布图

(据 Han et al., 2007)

Fig 8 Distribution of Pb-Zn Deposits in Sichuan-Yunnan-Guizhou Pb-Zn

metallogenic region (after Han et al., 2007)

I—安宁河断裂带; II—甘洛-小江断裂带; III—威宁-水城断裂带; IV—永善-绥靖断裂带; V—昭通-曲靖断裂带; VI—会泽-宜良断裂带; VII—东川-镇雄断裂带; VIII—寻甸-宣威断裂带; IX—弥勒-师宗断裂带

I—Anninghe fault; II—Ganluo-Xiaojiang fault; III—Weining-Shuicheng fault; IV—Yongshan-Suijing fault; V—Zhaotong-Qujing fault; VI—Huize-Yiliang fault; VII—Dongchuan-Zhenxiang fault; VIII—Xundian-Xuanwei fault; IX—Mile-Shizong fault

的伴生 Ge、Cd 均达到大型矿床规模。

2.2 沉积岩容矿型铅锌矿稀散元素伴生赋存状况

本文选取西南地区典型沉积岩容矿型铅锌矿包括兰坪金顶铅锌矿和川滇黔铅锌银多金属成矿域中的会泽、大梁子、天宝山和富乐铅锌矿为主要研究对象,对这些典型矿床开展了不同金属硫化物中稀散元素含量和电子探针分析,调查了稀散元素伴生赋存状况。

金顶矿床:伴生富集 Cd 和 Tl。Cd 主要富集在闪锌矿中(图 9a),其含量变化为 0.06%~4.49%,平均为 1.23%;电子探针分析(胶状闪锌矿)结果表明,Cd 元素在闪锌矿中均匀分布(图 10),指示 Cd 主要以类质同象替换($Cd^{2+} \rightarrow Zn^{2+}$)存在于闪锌矿中。Tl 主要富集在黄铁矿中,含量介于 $13 \times 10^{-6} \sim 1440 \times 10^{-6}$,平均为 384×10^{-6} (图 9b)。面扫描分析(图 11)显示,黄铁矿中的 Tl 和 As 元素分布模式

不一致,As 主要集中在黄铁矿边部或者裂隙中,指示 As 富集主要与晚期流体的沉淀有关;而 Tl 分布相对均匀,核部出现明显富集,指示了黄铁矿中的 Tl 主要还是以固溶体的形式存在(如 $2Tl^{+} \rightarrow Fe^{2+}$)。

会泽矿床:伴生富集 Ge,而 Ga 和 Cd 含量较低。Ge 主要富集在闪锌矿中(图 12-1A),其含量变化大($0.49 \times 10^{-6} \sim 533 \times 10^{-6}$),平均 33×10^{-6} 。Cd 主要富集在闪锌矿中(图 12-1C),其含量变化于 $662 \times 10^{-6} \sim 1162 \times 10^{-6}$,平均值为 944×10^{-6} ;Ga 主要的富集矿物为闪锌矿(图 12-1B),其含量为 $0.4 \times 10^{-6} \sim 24.5 \times 10^{-6}$,平均值为 4.3×10^{-6} 。LA-ICPMS 面扫描结果显示(图 13),Cd、Ga 和 Ge 在闪锌矿中的分布很不均匀,呈现出递变规律。Cd 与 Zn 的分布模式较为一致,指示 Cd 主要以类质同象替换 Zn 的形式存在于闪锌矿中。Ga 和 Ge 分布模式一致,主要分布在闪锌矿边部,指示以固溶体形式存在于闪锌矿中,晚期成矿流体有利于 Ga 和 Ge 的富集。In 在闪锌矿中的分布模式不同于 Cd、Ga 和 Ge,在核部相对集中,分布较均匀,表明 In 主要以固溶体形式存在。Cd、Ga、Ge 和 In 在闪锌矿中的分布显示环带或补丁结构,指示矿物沉淀过程中流体成分可能存在波动,可能指示了两种不同成分流体的混合。

大梁子矿床:伴生富集 Ge、Cd、Ga,主要寄存在闪锌矿中(图 12-2)。大梁子矿床中闪锌矿的 Ge 含量为 $26 \times 10^{-6} \sim 107 \times 10^{-6}$,平均 72×10^{-6} (图 12-2A);大梁子矿床中的闪锌矿的 Cd 含量变化为 0.24%~3.18%,平均为 1.04%(图 12-2C)。闪锌矿的 Ga 含量变化 $6 \times 10^{-6} \sim 100 \times 10^{-6}$,平均为 31×10^{-6} (图 12-2B)。Cd 元素在闪锌矿中均匀分布,表明 Cd 主要以 Zn 的类质同象替换形式存在,闪锌矿核部 Cd 含量高,边部含量明显降低。Ga 和 Ge 分布模式与 Cd 相反,Ga 和 Ge 主要集中在闪锌矿边部,尽管分布不均匀,局部显示高度富集,可能指示 Ga 和 Ge 主要以矿物包体形式存在(图 14-A-2, A-3)。

天宝山矿床:闪锌矿中伴生富集 Ga(图 12-3B),Ge、Cd 富集程度相对较低(图 12-3A,3C)。天宝山矿床的闪锌矿中 Ga 含量为 $18 \times 10^{-6} \sim 77 \times 10^{-6}$,平均为 47×10^{-6} 。Ge 主要寄存在闪锌矿中($0.56 \times 10^{-6} \sim 342 \times 10^{-6}$,平均 20×10^{-6})。闪锌矿 Cd 变化为 0.24%~1.74%,平均为 0.62%。Cd 在闪锌矿中分布均匀,表明主要以 Zn 的类质同象

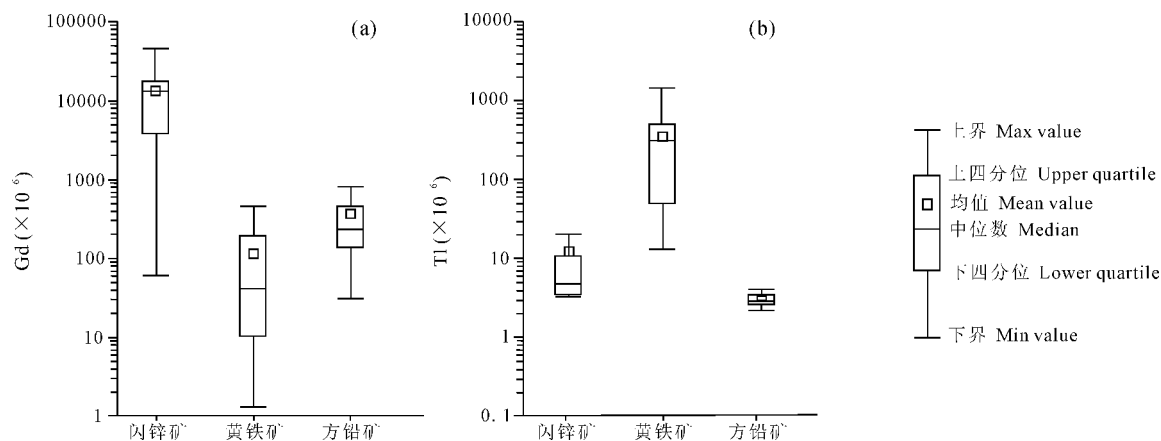


图 9 金顶矿床中 Cd 和 Tl 元素含量及分布(闪锌矿的 Cd 元素含量来自电子探针数据,其他数据均来自 ICP-MS 分析)
Fig 9 Content of Cd and Tl in ore sulfides from Jinding Pb-Zn deposit
(Sphalerites are analysed by EPMA, the others are analyzed by ICP-MS)

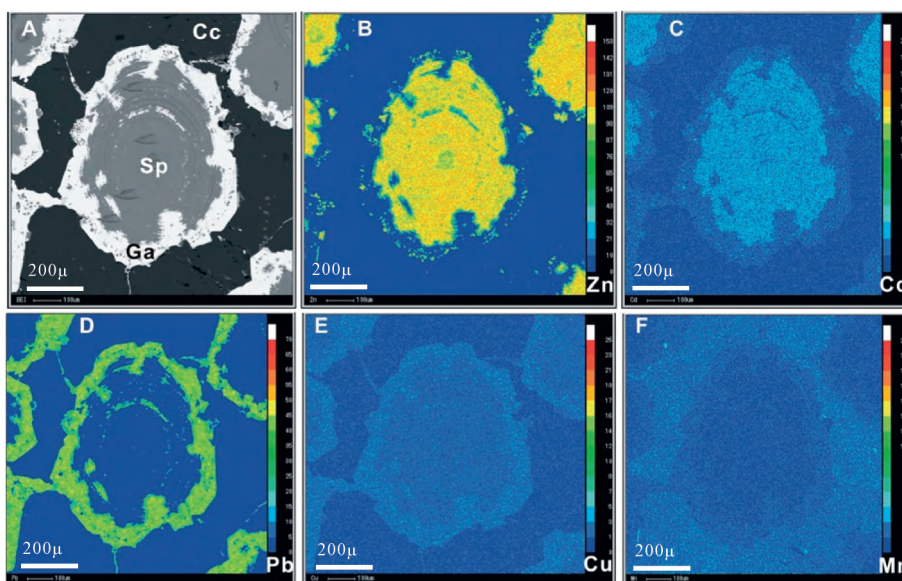


图 10 金顶铅锌矿胶状闪锌矿电子探针面扫描图像(Zn, Cd, Pb, Cu, Mn)

Fig 10 EPMA surface scanning images of colloidal sphalerite from Jinding Pb-Zn deposit for elements Zn, Cd, Pb, Cu, Mn
Cc—方解石;Ga—方铅矿;Sp—闪锌矿
Cc—Calcite; Ga—galena; Sp—sphalerite

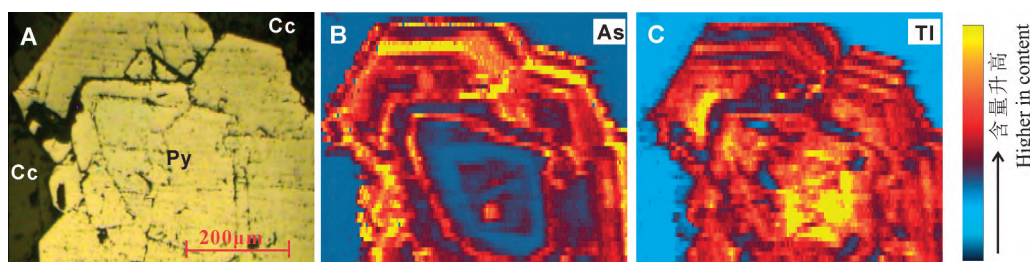


图 11 金顶矿床黄铁矿中 As 和 Tl 元素分布 LA-ICPMS 面扫面图像

Fig 11 LA-ICPMS mapping of As and Tl in pyrite from the Jinding deposit
Cc—方解石;Py—黄铁矿
Cc—Calcite; Py—pyrite

形式存在;Ga 和 Ge 主要分布在闪锌矿的核部,边部 Ga 和 Ge 含量降低(图 14-B-2, B-3),分析认为 Ga 和 Ge 以固溶体形式存在于闪锌矿中。

富乐矿床:伴生富集 Ge、Ga、Cd(图 12-4)。Ge、Ga、Cd 主要富集在闪锌矿中,Cd 在闪锌矿中的含量变化为 0.30%~3.36%,平均为 1.36%。Ga 在闪锌矿中的含量为 $10 \times 10^{-6} \sim 109 \times 10^{-6}$,平均为 85×10^{-6} 。Ge 在闪锌矿中含量为 $3.8 \times 10^{-6} \sim 650 \times 10^{-6}$,平均值为 169×10^{-6} 。据报道 Se 也在闪锌矿中富集,其含量变化为 $127 \times 10^{-6} \sim 177 \times 10^{-6}$,平均为 163×10^{-6} (Si Rongjun et al., 2006)。富乐矿床闪锌矿中的 Ge、Ga 和 Cd 分布比较均匀(图 14-C),尽管,在闪锌矿边部和裂隙中显示 Cd 的异常富集(图 14-C-1),指示这些元素主要以固溶体形式存在于闪锌矿中,Cd 富集与晚期流体有关。

2.3 铅锌矿中 Cd、Ge、Ga、Tl 的伴生富集规律

西南地区铅锌矿普遍伴生富集 Cd、Ge、Ga、Tl,其伴生富集具有载体矿物专属性,Cd、Ga、Ge 都主要富集在闪锌矿中,Tl 主要富集在黄铁矿中(Zhang

Qian et al., 2005; Ye et al., 2010, 2011)。另外,不同矿床在不同稀散金属富集程度上存在明显差异:①兰坪金顶铅锌矿富 Tl,但 Ge、Ga 含量低(不具备资源意义上的伴生富集),川滇黔铅锌银多金属成矿域包括会泽、大梁子、天宝山和富乐铅锌矿等普遍富 Ge、Ga,但没有 Tl 矿化富集;②兰坪金顶铅锌矿和川滇黔铅锌银多金属成矿域中的铅锌矿都富 Cd,但在富集程度有差异:金顶>富乐>大梁子一天宝山>会泽;③在川滇黔铅锌银多金属成矿域中富乐铅锌矿和天宝山 Ga 比较富集、大梁子次之、会泽 Ga 的富集程度很低。

稀散元素在不同铅锌矿床中的差异性富集可能受多方面的地质因素的控制,如成矿构造背景、成矿流体的性质、成矿环境等(Gu Xuexiang et al., 2004; Leng Chengbiao et al., 2017)。川滇黔铅锌多金属成矿域产出的铅锌矿特别是会泽铅锌矿富 Ge、与兰坪盆地金顶铅锌矿明显不同,反映出在矿床成因上有所不同,它们在成矿作用方面的差异可以从矿石硫化物 S 同位素的组成上可以明显的体现

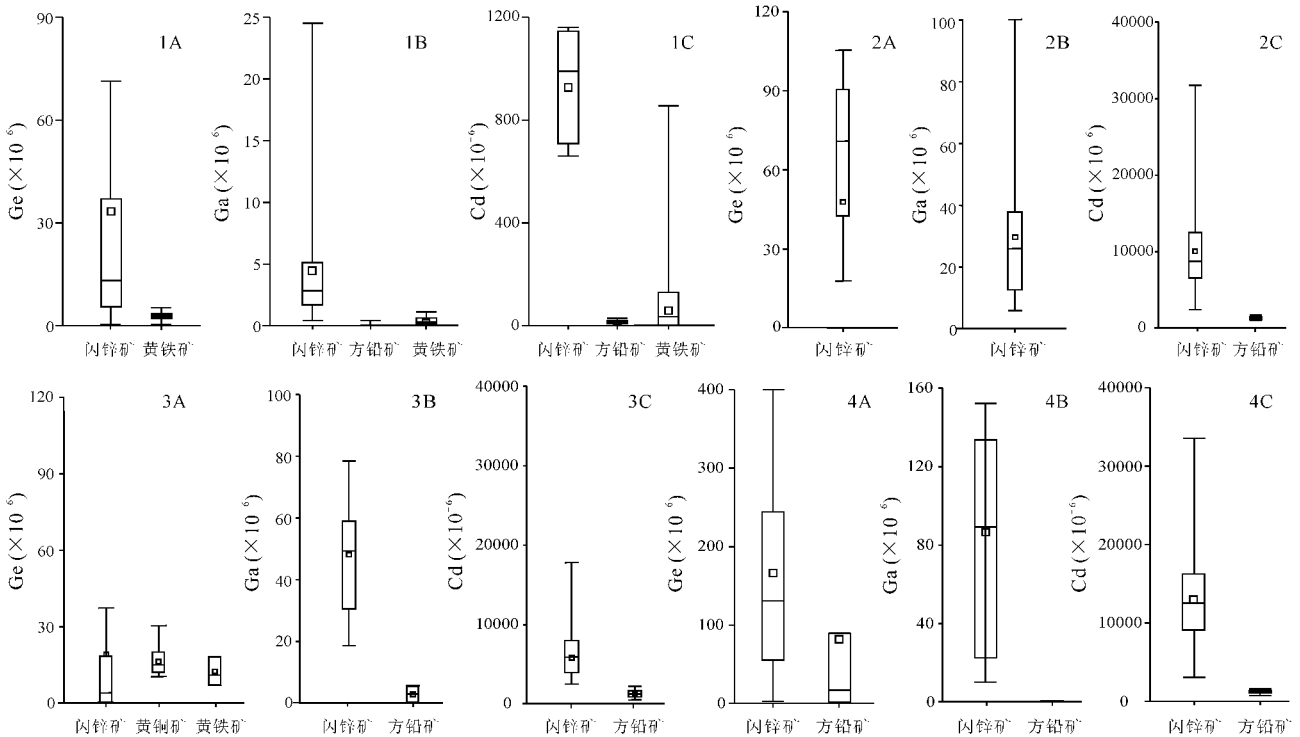


图 12 川滇黔铅锌银多金属成矿域主要铅锌矿床硫化物单矿物中 Ge、Ga、Cd 含量及分布(图例同图 9)

Fig. 12 Content of Ge, Ga and Cd in sulfides from typical Pb-Zn deposits in Sichuan-Yunnan-Guizhou Pb-Zn metallogenic region (legends are same as fig. 9)

1—会泽;2—大梁子;3—天宝山;4—富乐;Cd 含量数据来自电子探针,Ga 来自 ICP-MS,

Ge 数据来自 LA-ICPMS,会泽矿部分 Ga 数据引自 Wang Qian et al. (2008)

1—Huize; 2—Dalaingzi; 3—Tianbaoshan; 4—Fule. The data of Cd concentrations are measured by electronic probe microanalysis, Ga by ICP-MS. Ge by LA-ICPMS and part of Ga data for Huize deposit are from Wang Qian et al. (2008)

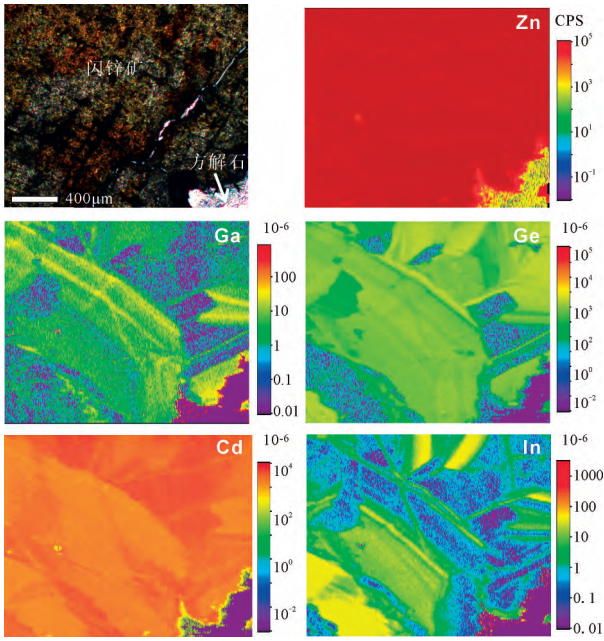


图 13 会泽矿床闪锌矿中微量元素 Ga, Ge, Cd, In 含量 LA-ICPMS 扫描
 Fig. 13 LA-ICPMS mapping of Zn, Ga, Ge, Cd and In in sphalerite from the Huize Pb-Zn deposit

出来(图 15),金顶矿床的 S 同位素组成以富轻 S 为特征,表现了生物作用的影响,而川滇黔铅锌多金属成矿域产出的铅锌矿床 S 同位素组成相对比较集中,并且富重 S, $\delta^{34}S$ 值主要集中在 10‰~17‰,推测主要是通过硫酸盐热化学还原作用形成的(Li Wenbo et al., 2004)。

Pb 同位素资料表明,川滇黔地区 Pb-Zn 矿床的成矿金属主要来自基底岩石(如:昆阳群)和碳酸盐地层、峨眉山玄武岩可能也有一定贡献(Huang Zhilong et al., 2001; Li Wenbo et al., 2006)。峨眉山玄武岩有较高的 Ge($1.0 \times 10^{-6} \sim 2.3 \times 10^{-6}$)和 Ga($20 \times 10^{-6} \sim 25 \times 10^{-6}$)含量(Xu et al., 2001; Li et al., 2012),可能是区内 Pb-Zn 矿床普遍富集 Ge 和 Ga 的重要原因。

Ge 是最典型的分散元素,Ge 和 Si 原子半径和地球化学性质相似,在内生地质作用中,Ge 的地球化学行为为最明显的趋势是替代硅酸盐矿物晶格中的硅,在岩浆作用中,不能产生有工业价值的富集,但 Ge 具有相当的热液活动性,在热液蚀变体系中,热液 Ge/Si 值随温度的升高而增大,Amorson (1984)

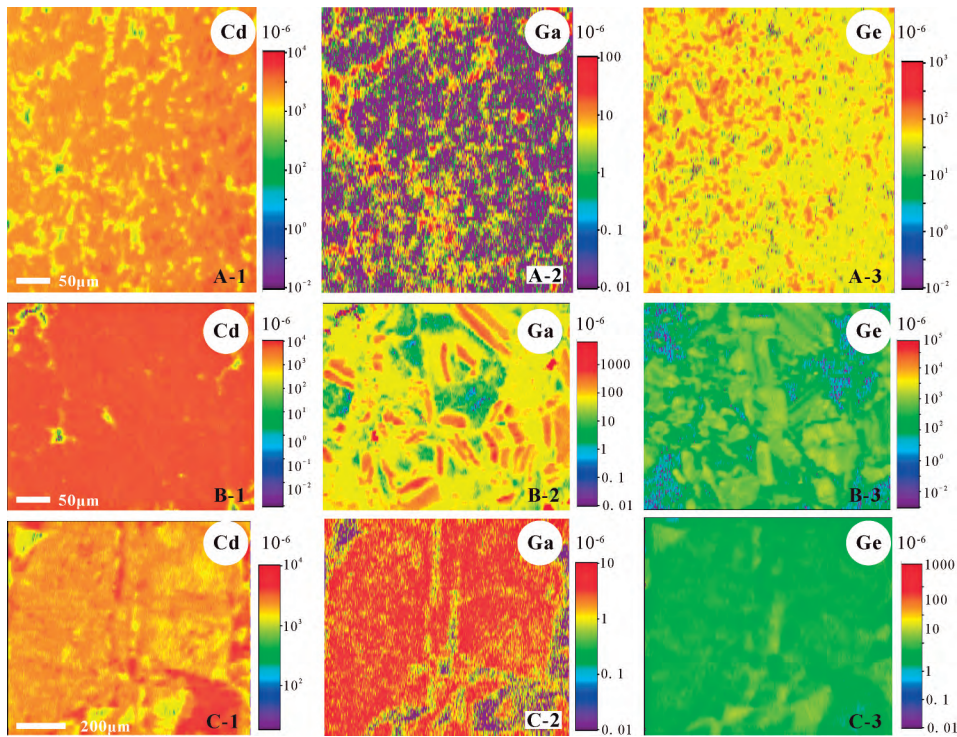


图 14 川滇黔地区典型 Pb-Zn 矿床闪锌矿的稀散元素含量 LA-ICPMS 扫描
 Fig. 14 LA-ICPMS mapping of dispersed elements in sphalerite from typical Pb-Zn deposits in the Sichuan-Yunnan-Guizhou Pb-Zn metallogenic province
 A—大梁子; B—天宝山; C—富乐
 A—Daliangzi; B—Tianbaoshan; C—Fule

发现冰岛活动的地热系统蚀变玄武岩中 Ge 含量的降低。晚二叠世峨眉山地幔柱岩浆活动形成了大面积分布厚达数百至数千米的溢流玄武岩以及大量滞留于地壳深部的基性岩浆堆积物 (Xu et al., 2001; Tao et al., 2015), 作为川滇黔铅锌多金属成矿物质的可能来源之一 (Hu Ruizhong et al., 2005), 这些玄武岩及地壳深部基性岩浆堆积物中的 Ge、Ga 可在变质、蚀变过程中被热液/热水活动浸出, 造成川滇黔铅锌矿普遍富 Ge、Ga, 而区域内不同矿床中分散元素富集程度的差异可能主要受具体成矿条件的约束。

兰坪金顶铅锌矿富 Tl (主要赋存在黄铁矿中), 可能与金顶铅锌矿有机成因有关。

Tl 在地球化学行为上, 除了亲石和亲硫性外, 也具有强烈的亲有机质性质, 对云南南华铀矿床的研究表明, 硫同位素组成 $\delta^{34}\text{S}$ 变化在 $-21.04\text{‰} \sim -33.38\text{‰}$ 范围, 硫同位素组成明显富轻硫, 反映了生物作用与成矿有密切关系, 南华铀矿矿石中含丰富的生物化石, 矿石中铀含量高低与生物化石多少密切相关, 生物越多, 铀含量越高, 化石中铀含量一般比周围岩石高出二个数量级。

研究表明, 金顶矿床存在广泛的有机成矿作用, 在围岩和矿石中存在大量的有机质 (如液态重油、沥青、干酪根等), 流体包裹体也以发育有机包裹体为特色 (Xue Chunji et al., 2002b, 2007)。在 S 同位素组成上, 金顶矿床显著富集轻 S 同位素 (图 15), 表现出细菌微生物作用的影响 (Tang et al., 2014), 显著区别于盆地内的其他贱金属矿床。C、O、S 同位素也指示生物有机质对于成矿具有重要意义 (Tang et al., 2014, 2017; Bi Xianwu et al., 2019)。

Cd 在低温成因的闪锌矿中富集是一个普遍的现象, 在所有研究过的闪锌矿中几乎无例外地都有镉富集, 但是对于金顶矿床而言, Cd 在闪锌矿中的平均含量达 1.23% , 是中国发现的几个闪锌矿超富 Cd 的铅锌矿床之一, 其他闪锌矿超富 Cd 的铅锌矿床如富乐为 1.15% , 牛角塘为 1.35% 。分析认为, 与生物有机质紧密相关是这些矿床成矿特征的一个共性。如金顶矿区大量产出液态重油、沥青、有机包裹体等。牛角塘镉矿产于震旦系—下寒武统黑色岩系中, 闪锌矿和黄铁矿形成大量的草莓状和结核状集合体等, 指示了成矿过程中有生物的参与 (Ye Lin et al., 2005)。Cd 具有亲有机质的特性, Cd 在地球各圈层中的丰度很低, 地壳克拉克值为 0.2×10^{-6} , 在岩石中的丰度一般为 $70 \times 10^{-9} \sim 500 \times$

10^{-9} , 但在菌藻等有机质体中的含量普遍高于地壳克拉克值, 并在煤和黑色页岩中相对富集, 表现出容易被有机质吸附的特点。所以, 生物有机质参与成矿可能是低温热液铅锌矿床特别是金顶中 Cd 超常富集重要原因。

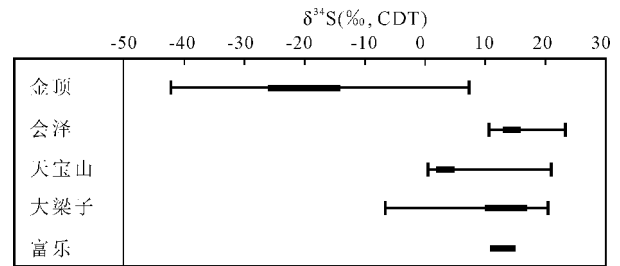


图 15 川滇黔铅锌多金属成矿床产出的铅锌矿与兰坪盆地金顶铅锌矿矿石硫化物硫同位素组成

(数据引自 Li Wenbo et al., 2004; Tang et al., 2014)

Fig. 15 Composition of sulfur isotope from sulfides of different Pb-Zn deposits in SW China (data from Li Wenbo et al., 2004; Tang et al., 2014)

有机质对分散元素成矿的意义可能主要体现在两个方面: 一是有机质对分散元素富集起到吸附作用; 二是有机质降解产生的腐殖酸能与分散元素金属阳离子形成有机络合物, 这有利于分散元素在溶液中进行搬运 (Lu Jialan, 1991)。在许多富集分散元素 (如 Cd、Ga、Ge、Tl) 的 Pb-Zn 矿床中都能够看到生物有机质活动的迹象: 比如, 贵州牛角塘镉矿产于震旦系—下寒武统黑色岩系中, 而成矿期形成大量的草莓状和结核状金属硫化物, 表明生物有机质参与了成矿 (Ye Lin et al., 2005); 云南富乐富 Cd 的铅锌矿床的角砾岩中发现大量沥青, 暗示了曾经存在古油气藏, 受热液温度的影响造成石油裂解变成沥青 (Si Rongjun et al., 2006); 在 MVT 型铅锌矿床中, 成矿流体往往具有油田卤水的性质, 在矿石和围岩中也常见到沥青等有机质 (Gize et al., 1987; Arne et al., 1991)。这些现象表明有机质对分散元素特别是 Cd、Tl 的活化、迁移和富集具有重要意义。

3 临沧盆地西缘含锆煤

3.1 临沧锆矿

西南地区的锆资源主要赋存于滇西临沧盆地西缘含煤地层中和少数铅锌矿 (云南会泽、罗平富乐、巧家茂租和四川会东大梁子) 中, 临沧盆地西缘含煤地层中产出的临沧锆矿具有超大型规模, 探明资源量 1620 t, 占有西南 Ge 资源量的 68%。

临沧锆矿床(包括大寨和中寨两个矿区)产在临沧县境内、以富锆的印支期花岗岩为基底的帮卖陆相含煤碎屑岩盆地中(图16)。帮卖盆地为一阶梯状半地堑式断陷盆地,长10 km,宽4.5 km,面积约16 km²,轴向NNW(北西330°),受NNW和近EW向同沉积断裂控制。盆地地层为晚第三纪中新世“帮卖组”,主要由下部的洪积、冲积相的含岩块、花岗质碎屑岩和上部的泥炭沼泽相、湖泊相、河流-湖泊相的砂岩、粉砂岩夹煤层及硅藻土等组成。由于受同沉积构造的控制,帮卖盆地东翼地层出露地层较全,厚度大,煤层少而薄,岩层产状平缓,未见锆矿化;西翼地层出露不全,煤层多而厚,岩层产状较陡,倾角达50°,为锆主要的矿化区。盆地共有三个含煤段(N₁b²、N₁b⁴和N₁b⁶),其中所含煤层的煤岩类型基本相似,主要由褐煤组成(Hu Ruizhong et al., 1996, 1997; Li Yuhua, 2000; Hu et al., 2009)。

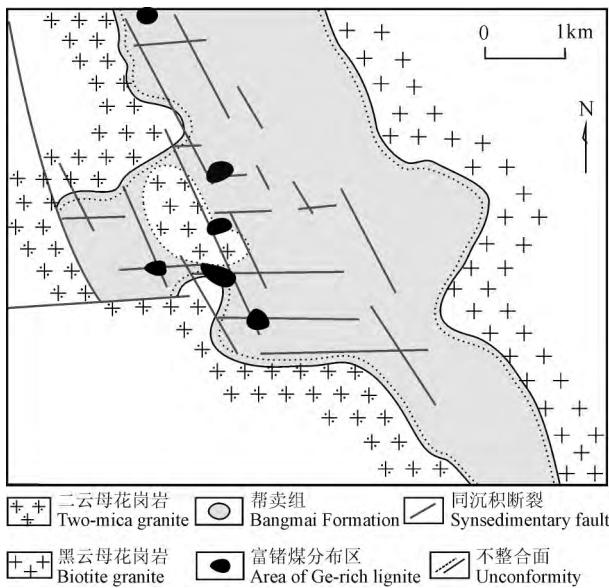


图16 临沧锆矿区域地质简图(据 Hu et al., 2009)

Fig. 16 Simplified geological map of the Lincang Ge deposit (after Hu et al., 2009)

勘探资料表明,临沧锆矿床中的锆无论在纵向还是横向上都非均匀分布。具有工业意义的锆基本上集中在帮卖盆地西部、靠近盆地基底的第一含煤段(N₁b²)的煤层中(图17)。该含煤段主要由砂岩、煤层、层状硅质岩和薄层含碳硅质灰岩组成。在上部缺乏硅质岩的两个含煤段的煤中无锆矿化。这些硅质岩和硅质灰岩的主量元素、微量元素、氧同位素和碳同位素组成与热水沉积物类似,属热水沉积成因(Qi Huawen, 2002; Qi et al., 2004)。锆矿体主要呈等轴状或拉长状分布在断裂交汇部位。大寨锆

矿化区长约600 m,宽400余米,面积约0.25 km²。大寨主矿体走向长约472 m,倾向北东,倾斜长约400~800 m,倾角浅部25°,中部为60°~75°,矿体平均厚4 m,最大厚14.25 m (Li Yuhua, 2000)。中寨锆矿体厚度变化较大,岩相变化频繁,常含硅质岩、砂岩和黏土岩等夹层。矿体中含锆 $20 \times 10^{-6} \sim 2520 \times 10^{-6}$,平均 852×10^{-6} 。锆在主矿体内部主要分布在煤层的底部、顶部或热水沉积成因硅质岩和硅质灰岩附近(Hu et al., 2009)。

含锆煤的煤岩类型以半亮煤、半暗煤为主,灰黑色,具线理状、条带状、均匀块状构造;显微组分以团块状腐殖体为主,含少量半腐殖体,二者含量为60%~80%,以半丝质体为主的半丝炭组的含量为2%~10%,稳定组含量为2%~3%,常见角质体、树脂体、小孢子体、藻类体和菌类体等;无机成分中黏土含量一般为2%~10%,并含少量黄铁矿等。无锆煤以半暗煤为主,具条带状构造;腐殖体含量小于70%,一般为40%~65%,腐殖体类型包括均匀凝胶体、鞣质体、木质结构体等,腐殖体呈条带状与无机矿物相间排列,并可见植物嫩芽组织(Han Yanrong et al., 1994; Zhong Hanping et al., 1997)。无锆煤呈黑色,条带状构造为主,夹亮煤、无机矿物条带。元素分析结果表明,与含锆煤相比,无锆煤具较低的碳含量和较高的硫含量。

3.2 临沧含锆煤中Ge的赋存状态

矿区未发现锆的独立矿物(Qi et al., 2011)。电子探针、能谱扫描电镜,逐级化学提取和重液分离研究结果表明,临沧含锆煤中90%~98%的锆富集在有机相中,其中主要赋存在团块腐殖体中(86%~89%左右),轻质组份如藻类体中也含有少量的锆(2%~10%) (Zhang Shuling et al., 1987, 1988; Zhong Hanping et al., 1997, 1998)。因此,临沧锆矿含锆煤中的锆主要呈有机质结合态。

3.3 临沧含锆煤中Ge富集规律

临沧锆矿在矿化特征上,含锆矿体的产出明显受断裂控制,矿体在平面分布上往往产出的断裂交汇部位(图16),这些断裂从花岗岩岩基切穿盆地含煤地层,并被认为是煤系地层形成时期的同期活动构造。另外,锆往往富集于含锆煤层与硅质岩或硅质灰岩接触的顶部和底部,研究表明,这些硅质岩、硅质灰岩属热水沉积成因(Qi Huawen, 2002; Qi et al., 2004)。

与无锆煤相比,含锆煤明显富集Ge、Li、Sb、Bi和U等热液活动元素,并且随着锆含量的升高,含

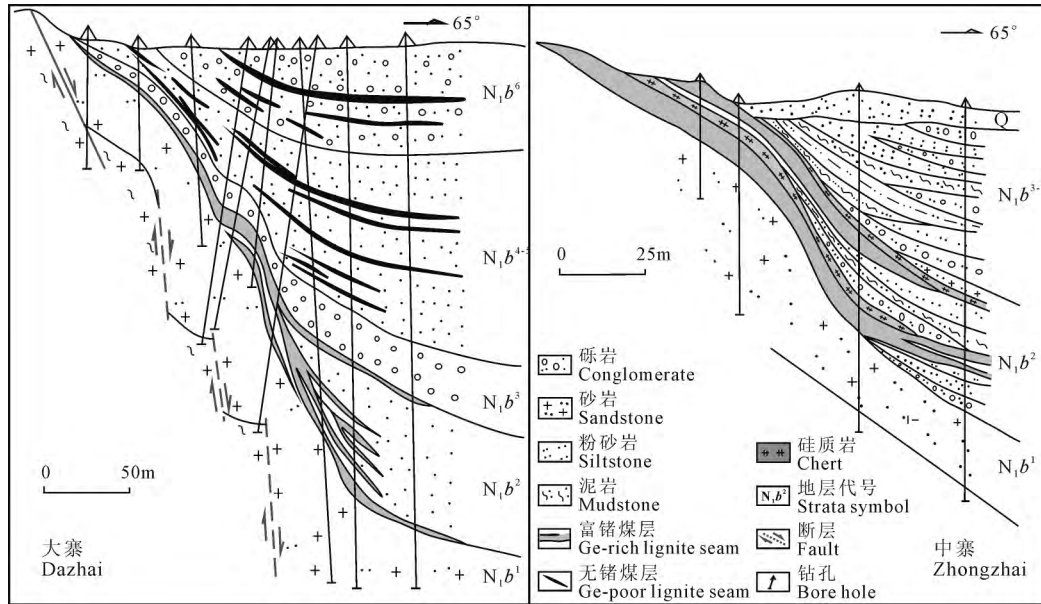


图 17 临沧锗矿勘探剖面图(据 Hu et al. ,2009)

Fig. 17 Geological cross-sections of the Lincang germanium deposit (after Hu et al. , 2009)

锗煤中 HREE 富集程度增加。含锗煤中两种不同产状的黄铁矿具有不同的硫同位素组成,其中浸染状黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围为 17.2‰~51.4‰(与无锗煤中的黄铁矿硫同位素组成类似),细脉状黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围为 -5.4‰~1.9‰(与区域石英脉中黄铁矿硫同位素组成类似)(Hu et al. , 2009),表明含锗煤受到热液活动的影响。

对含锗煤的稀土元素地球化学组成研究表明,临沧超大型锗矿床含锗煤中存在明显的稀土元素四分组效应(Hu Ruizhong et al. ,2005^⑨),也显示临沧超大型锗矿床含锗煤经历了强烈的水岩相互作用。分析认为,高锗煤稀土元素四分组效应来源于开放体系中煤在成岩期与低温含锗溶液的相互作用,在水岩相互作用过程中,锗因其亲有机性被富集在煤中。

通过对临沧超大型锗矿床中硅质岩、含碳硅质灰岩、含锗煤的地质地球化学特征的研究,结合低温含锗溶液与泥炭和褐煤相互作用实验研究,分析认为,矿化煤层中的锗主要是由成煤期形成热水沉积硅质岩(燧石)和硅质灰岩的热水带入,在水岩相互作用过程中,锗因其亲有机性被富集在煤中(Hu Ruizhong et al. ,1996,1997;Hu et al. ,2009)。主要依据概括为以下几点:① 热水体系中锗、硅地球化学行为相似(Mortlock et al. ,1993);② 锗的溶解度随温度的升高而增加(Pokrovski and Schott, 1998);③ 临沧盆地含煤岩系硅质岩、硅质灰岩属热

水沉积成因(Hu Ruizhong et al. , 2000; Qi Huawen,2002;Qi et al. ,2004);④ 靠近硅质岩的煤中锗含量明显增加(Qi et al. ,2004;Hu et al. , 2009);⑤ 低温条件下泥炭和褐煤对溶液中锗的富集效率与温度呈正相关(Qi et al. ,2005);⑥ 含锗煤的镜质体反射率略高于无锗煤的镜质体反射率(Hu Ruizhong et al. ,1996;Qi et al. ,2011)。

4 沉积铝土矿(伴生 Ga)

4.1 西南地区铝土矿概况

镓尚未发现独立矿床,主要来自铝土矿床,部分来源于锌冶炼回收。目前技术经济条件下,工业提取镓的资源 90%以上在铝土矿中。

西南地区铝土矿床主要集中在贵州省黔西北地区(或称黔中-渝南铝土矿含矿带),是中国重要的铝土矿产地之一,按铝土矿床(点)相对集中的片区,自南而北可分为修文、息烽、遵义、正安和道真 5 个铝土矿带(图 18),分布有上百个铝土矿床(点),矿带间为无矿带所间隔。铝土矿中矿石矿物主要为一水硬铝石,次要矿物是一水软铝石。常见的少量矿物有水云母、伊利石、埃洛石、绿泥石等。副矿物有金红石、磷灰石、锆石、石英、赤铁矿、黄铁矿等。

含矿岩系为一套产于下古生代侵蚀面上含铝土矿沉积岩系(含少量铁矿、硫铁矿、耐火黏土和煤矿),矿体产于下伏地层(寒武系高台组和娄山关群白云岩、桐梓组黏土岩、白云岩)的侵蚀面上,矿体的

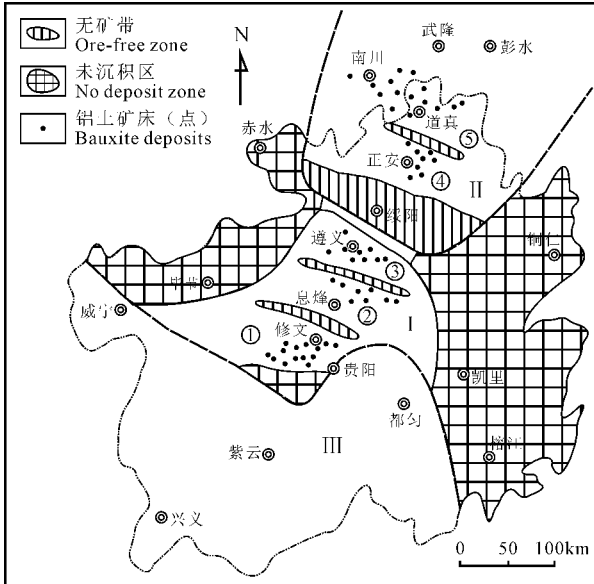


图 18 贵州铝土矿分布地质简图(据涂光炽等,2003)

Fig. 18 Distribution and simplified geological map of bauxite in Guizhou

(after Tu Guangchi et al., 2003)

I—早石炭世铝土矿含矿岩系沉积区; II—晚石炭世铝土矿含矿岩系沉积区; III—石炭世无铝土矿的海相地层沉积区; ①—修文铝土矿带; ②—息烽铝土矿带; ③—遵义铝土矿带; ④—正安铝土矿带; ⑤—道真铝土矿带

I—Early Carboniferous depositional zone of bauxite-bearing rock series; II—Late Carboniferous depositional zone of bauxite-bearing rock series; III—Carboniferous marine stratigraphic depositional zone without bauxite; ①—Xiuwen bauxite mineralization zone; ②—Xifeng bauxite mineralization zone; ③—Zunyi bauxite mineralization zone; ④—Zheng'an bauxite mineralization zone; ⑤—Daozhen bauxite mineralization zone

形态和产状明显受底板古岩溶地貌的控制,呈层状、似层状、透镜状及漏斗状等(涂光炽等,2003)。

4.2 铝土矿中 Ga 的赋存状态

铝土矿中镓的载体矿物主要是一水铝石,主要以类质同象置换的形式进入矿物晶格中(置换矿物中的铝和部分三价铁)(涂光炽等,2003)。Ga 与铝的地球化学参数相近,因此二者之间可以表现为类质同象置换(Liu Yingjun,1965)。务川瓦厂坪矿区矿石一水铝石单矿物选矿样品 ICP-MS 分析 Ga 含量 758×10^{-6} ,电子探针面扫描结果显示 Ga 在一水铝石中分布均匀,没有明显富集区,说明 Ga 在一水铝石中以类质同象形式存在(Lu Fangkang et al., 2009)。

4.3 铝土矿层中 Ga 的伴生富集规律

研究表明,铝土矿富镓具有全球性特点、是世界镓资源的最主要来源(涂光炽等,2003),因此,世界

产铝大国如巴西、加拿大、法国等都是产镓大国。铝土矿中镓的载体矿物主要是一水铝石,一水铝石中镓的含量一般在 $50 \times 10^{-6} \sim 500 \times 10^{-6}$ 之间(Gordon et al., 1952; Wolfenden, 1965; Liu Yingjun et al., 1965)。

贵州铝土矿床主要形成于石炭纪,其矿石以硬水铝石(一水铝石)及少量黏土等为主(Wang Denghong et al., 2014; Gao Lan et al., 2014; Yang Ruidong et al., 2018),属水铝石-高岭石型,矿石按自然类型可分为土状一半土状、碎屑状、豆状—豆鲕状和致密状。Ga 含量一般在 $60 \times 10^{-6} \sim 143 \times 10^{-6}$ (图 19),其中,修文矿带铝土矿中 Ga 的平均品位相对较低(63×10^{-6}),略低于中国和世界铝土矿中 Ga 平均值,而修文矿带以北的 4 个矿带,铝土矿 Ga 的平均品位皆大于 100×10^{-6} ,其中息烽: 129×10^{-6} ;遵义: 115×10^{-6} ;正安: 127×10^{-6} ;道真: 114×10^{-6} ,高于中国和世界铝土矿中镓的平均值(图 14)。

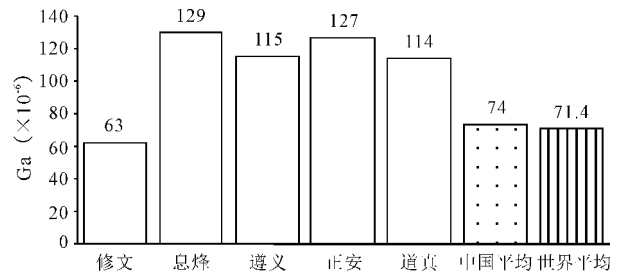


图 19 贵州铝土矿带中镓平均品位对比

(数据来源于 Liu Ping, 2007)

Fig. 19 Comparison of average content of Ga in Guizhou bauxites (data from Liu Ping, 2007)

修文小山坝铝土矿伴生元素相关分析表明, Ga 与 Al_2O_3 正相关(图 20)(Ye Lin et al., 2007, 2008)。但在表生条件下镓比铝更活动,二者除共同迁移、堆积之外,还发生一定程度的分离,因而可以造成矿床中某些矿石中铝含量高而镓含量较低。

在贵州修文小山坝铝土矿含矿岩系中, Ga 在铝土矿石中含量最高,一般为 $21.88 \times 10^{-6} \sim 72.59 \times 10^{-6}$,平均 35.46×10^{-6} ,各种类型铝土矿石中 Ga 含量由高至低依次为高铁富铝矿石→鲕状铝土矿石→土状铝土矿石→碎屑型铝土矿石;高岭土黏土岩中 Ga 含量相对较高,为 $11.74 \times 10^{-6} \sim 33.96 \times 10^{-6}$,平均 24.04×10^{-6} ,其中铝土矿层上部高岭石黏土岩中 Ga 含量略高于下部高岭石黏土岩;铝土矿含矿岩系底部紫红色铁质黏土岩中也含有一定 Ga(21.03×10^{-6})。

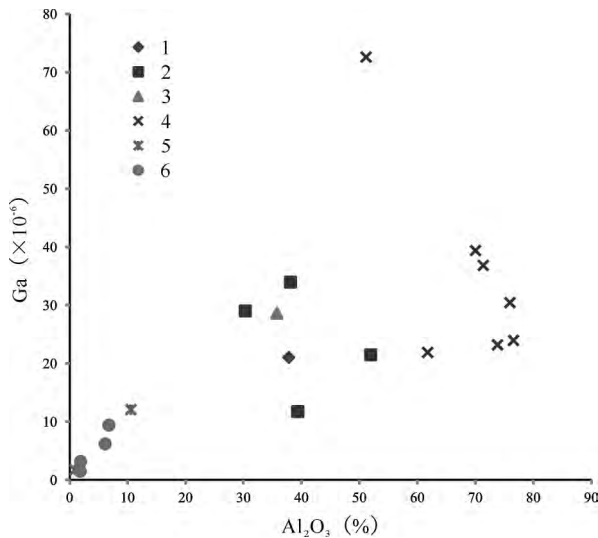


图 20 修文小山坝铝土矿区岩(矿)石中 Ga-Al₂O₃ 关系图
Fig. 20 Ga-Al₂O₃ diagram of rocks and ores in Xiaoshanba bauxite deposit, Xiuwen, Guizhou

1—紫红色铁质黏土岩(矿体底板);2—高岭土黏土岩;3—绿泥石化页岩;4—土状铝土矿石;5—硅质岩;6—摆佐组灰岩

1—Claret-color ferruginous clay rock; 2—kaolin clay rock; 3—chloritization shale; 4—earthy bauxite ore; 5—siliceous rock;

6—Baizuo Formation limestone

5 结论

(1)西南地区稀散元素伴生富集的寄主矿床类型主要为沉积岩容矿型铅锌矿(伴生 Cd、Ge、Ga、Tl)、锡石硫化物矿床(伴生 In、Cd)、沉积铝土矿(伴生 Ga)及含锆煤等。

(2)稀散元素伴生矿床集中产出在三江铅锌铜银多金属矿成矿域、川滇黔铅锌多金属成矿域、滇东南锡多金属矿成矿域,沉积型铝土矿伴生 Ga,集中在黔西北铝土矿含矿带,含锆煤产出在滇西临沧盆地西缘。

(3)稀散元素伴生富集具有明确的载体矿物专属性。热液矿床中 In、Cd、Ge、Ga 主要富集在闪锌矿中,Tl 主要富集在黄铁矿中;沉积铝土矿中 Ga 的载体矿物主要是一水铝石;含锆煤中 Ge 主要以有机质结合态赋存在腐殖体中。

(4)低温热液铅锌矿普遍含有 Cd、Ge、Ga、Tl,但不同矿床在不同稀散金属富集程度上存在明显差异。兰坪金顶铅锌矿富 Tl、Cd,但 Ge、Ga 不具备资源意义上的伴生富集,川滇黔铅锌银多金属成矿域包括会泽、大梁子、天宝山和富乐铅锌矿等普遍富 Ge、Ga、Cd,但没有 Tl 矿化富集。

(5)In 主要伴生富集在锡石硫化物矿床中,滇

东南三大锡石硫化物矿床具有相似的地质地球化学特征,In 的富集与燕山晚期花岗岩侵入密切相关。

(6)临沧盆地西缘含锆煤产出在以花岗岩为基底的帮卖陆相含煤碎屑岩盆地中,盆地基底为花岗岩、含锆煤段发育硅质岩是临沧锆矿显著的地质特征。锆主要是由成煤期形成热水沉积硅质岩的热水带入,在水岩相互作用过程中,锆因其亲有机性被富集在煤中。

(7)镓在铝土矿中的伴生富集具有全球性特点,贵州铝土矿床 Ga 含量在 $70 \times 10^{-6} \sim 143 \times 10^{-6}$,高于中国和世界铝土矿中镓的平均值,矿层下部高铁富铝矿体是 Ga 最富集的部位。

致谢:李玉帮博士参加了部分研究工作;刘家军教授和张乾研究员对文章初稿进行了审阅并提出了宝贵的修改意见;王登红研究员对本文相关的项目研究工作给予了大力支持;在此表示衷心感谢!

注释

- ① 李玉帮. 2015. 个旧锡铜多金属矿床镓富集成矿特征及地球化学研究. 中国科学院大学(博士学位论文),1~102.
- ② 胡瑞忠,陶琰,戚华文,叶霖,樊海峰,唐永永. 2005. “我国典型三稀金属矿床研究与靶区优选(西南地区)”成果报告. 中国科学院地球化学研究所,1~274.
- ③ 唐永永. 2013. 云南金顶铅锌矿床成矿元素超常富集机制研究. 中国科学院大学(博士学位论文),1~118.

References

- Arne D C. 1991. Regional thermal history of the Pine Point area, Northwest Territories, Canada, from fission track analysis. *Geology*, 86: 428~435.
- Bi Xianwu, Tang Yongyong, Tao Yan, Wang Changming, Wen Hanjie, Xu Leiluo, Qi Huawen, Xiao Jiafei, Lan Qing, Sheng Xiangyuan, Mu Lan, Li Juan, Liu Yuefu. 2019. Composite metallogenesis of sediment-hosted Pb-Zn-Ag-Cu base metal deposits in the Sanjiang collisional orogen, SW China, and its deep driving mechanisms. *Acta Petrologica Sinica*, 35(5):1341~1371(in press) (in Chinese with English abstract).
- Chen Zhenghui, Wang Denghong, Sheng Jifu, Ying Lijuan, Liang Ting, Wang Chenghui, Liu Lijun, Wang Yonglei. 2015. The metallogenic regularity of tin deposits in China. *Acta Geologica Sinica*, 89(6): 1026~1037 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Yanbo, Mao Jingwen, Xie Guiqing, Chen Maohong, Zhao Caisheng, Yang Zongxi, Zhao Haijie, Li Xiangqian. 2008. Petrogenesis of the Laochang-Kafang granite in the Gejiu area, Yunnan Province: Constraints from geochemistry and zircon U-Pb dating. *Acta Geologica Sinica*, 82(11): 1478~1493 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Yanbo, Mao Jingwen, Chen Xiaolin, Li Wei. 2010. LA-ICP-MS Zircon U-Pb dating of the Bozhushan granite insoutheastern Yunnan Province and its significance. *Journal of Jilin Unviersity: Earth Science Edition*, 40(4): 869~878 (in Chinese with English abstract).
- Deng Jun, Hou Zengqian, Mo Xuanxue, Yang Liqiang, Wang Qingfei, Wang Changming. 2010. Superimposed orogenesis and metallogenesis in Sanjiang Tethys. *Mineral Deposits*, 29(1):37

- ~42 (in Chinese with English abstract).
- Deng Jun, Wang Qingfei, Li Gongjian. 2016. Superimposed orogeny and composite metallogenic system: Case study from the Sanjiang Tethyan belt, SW China. *Acta Petrologica Sinica*, 32 (8): 2225~2247 (in Chinese with English abstract).
- Dill H G, Garrido M M, Melcher F, Gomez M C, Weber B, Luna L I, Bahr A. 2013. Sulfidic and non-sulfidic indium mineralization of the epithermal Au-Cu-Zn-Pb-Ag deposit San Roque (Provincia Rio Negro, SE Argentina) — with special reference to the “indium window” in zinc sulfide. *Ore Geology Reviews*, 51: 103~128.
- Gao Lan, Wang Denghong, Xiong Xiaoyun, Yi Chengwei. 2014. Summary on aluminum ore deposits minerogenetic regulation in China. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2284~2295 (in Chinese with English abstract).
- Gize A P, Barnes H L. 1987. The organic geochemistry of two Mississippi valley-type lead-zinc deposits. *Economic Geology*, 82: 457~470.
- Gordon J M, Murata K J. 1952. Minor elements in Arkansas Bauxite. *Economic Geology*, 47: 169~179.
- Gu Xuexiang, Wang Qian, Fu Shaohong, Tang Juxing. 2004. Resources and environmental effects of abnormal enrichment of dispersed elements: Research situation and tendency. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 31(1): 15~21 (in Chinese with English abstract).
- Han R S, Liu C Q, Huang Z L, Chen J, Ma D Y, Lei L, Ma G S. 2007. Geological features and origin of the Huize carbonate-hosted Zn-Pb-(Ag) district, Yunnan, South China. *Ore Geology Reviews*, 31: 360~383.
- Han Runsheng, Hu Yuzhao, Wang Xuekun, Hou Baohong, Huang Zhilong, Chen Jin, Wang Feng, Wu Peng, Li Bo, Wang Hongjiang, Dong Ying, Lei Li. 2012. Mineralization model of rich Ge-Ag-bearing Zn-Pb polymetallic deposit concentrated district innortheastern Yunnan, China. *Acta Geologica Sinica*, 86(2): 280~294 (in Chinese with English abstract).
- Han Yanrong, Yuan Qingbang, Li Yonghua, Zhang Ling, Dai Jiemin. 1994. Dazhai superlarge Uranium-bearing Germanium Deposit in Western Yunnan region: Metallogenic geological conditions and prospect. *China Nuclear Science and Technology Report*, 1~17 (in Chinese with English abstract).
- He Mingqin, Liu Jiajun, Li Chaoyang, Li Zhiming, Liu Yuping, Yang Aiping, Sang Haiqing. 2006. ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of quartz from ore in the Baiyangping Cu-Co polymetallic ore-concentrated area, Lanping basin, Yunnan. *Chinese Journal of Geology*, 41: 688~693 (in Chinese with English abstract).
- Hu R Z, Qi H W, Zhou M F, Su W C, Bi X W, Peng J T, Zhong H. 2009. Geological and geochemical constraints on the origin of the giant Lincang coal seam-hosted germanium deposit, Yunnan, SW China: A review. *Ore Geology Reviews*, 36: 221~234.
- Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Ye Zaojun, Su Wenchao, Qi Liang. 1996. The genesis of Lincang germanium deposit—A preliminary investigation. *Acta Mineralogica Sinica*, 16 (2): 97~102 (in Chinese with English abstract).
- Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Su Wenchao, Ye Zaojun. 1997. Some considerations on Germanium mineralization in coal—as exemplified by Lincang germanium deposit. *Acta Mineralogica Sinica*, 17 (4): 364~368 (in Chinese with English abstract).
- Hu Ruizhong, Su Wenchao, Qi Huawen, Bi Xianwu. 2000. Geochemistry, occurrence and mineralization of Germanium. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 19 (4): 215~217 (in Chinese with English abstract).
- Hu Ruizhong, Tao Yan, Zhong Hong, Huang Zhilong, Zhang Zhengwei. 2005. Mineralization system of mantle plume: a case study on Emeishan mantle plume. *Geoscience Frontiers*, 12 (1): 42~54 (in Chinese with English abstract).
- Huang Zhilong, Chen Jin, Liu Congqiang, Hang Runsheng, Li Wenbo, Zhao Deshun, Gao Derong, Feng Zhihong. 2001. Preliminary discussion on the genetic relations between Emeishan Basalts and Pb-Zn deposit as example by the Huize Pb-Zn Deposit, Yunnan Province. *Acta Mineralogica Sinica*, 21 (4): 681~688 (in Chinese with English abstract).
- Ishihara S, Hoshino K, Murakami H, Endo Y. 2006. Resource evaluation and some genetic aspects of indium in the Japanese ore deposits. *Resource Geology*, 56(3): 347~364.
- Leng Chengbiao, Qi Youqiang. 2017. Genetic constraints of Lengshuikeng Ag-Pb-Zn orefield in Jiangxi: constraint from LA-ICPMS analyses of miner and trace element in sphalerite and galena. *Acta Geologica Sinica*, 91(10): 2256~2272 (in Chinese with English abstract).
- Li C, Tao Y, Qi L, Repley E M. 2012. Controls on PGE fractionation in the Emeishan picrites and basalts: Constraints from integrated lithophile-siderophile elements and Sr-Nd isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 90: 12~32.
- Li Kaiwen, Zhang Qian, Wang Dapeng, Cai Yi, Liu Yuping. 2013. LA-MC-ICP-MS U-Pb geochronology of cassiterite from the Bainiuchang polymetallic deposit, Yunnan Province, China. *Acta Mineralogica Sinica*, 33(2): 203~209 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenbo, Huang Zhilong, Chen Jin, Xu Cheng, Guan Tao, Yin Mudan. 2004. Sulfur isotopes and rare-earth elements geochemistry of the giant Huize Zn-Pb deposit in Yunnan Province. *Acta Geologica Sinica*, 78(4): 507~518 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaofeng, Yang Feng, Chen Zhenyu, Bu Guoji, Wang Yitian. 2010. A tentative discussion on geochemistry and genesis of indium in Dachang tin ore district, Guangxi. *Mineral Deposits*, 29(5): 903~914 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaofeng, Yasushi Watanabe, Mao Jingwen. 2007. Research situation and economic value of indium deposits. *Mineral Deposits*, 26 (4): 475~480 (in Chinese with English abstract).
- Li Y B, Tao Y, Zhu F L, Liao M Y, Xiong F, Deng X Z. 2015. Distribution and existing state of indium in the Gejiu tin polymetallic deposit, Yunnan, SW China. *Chinese Journal of Geochemistry*, 34(4): 469~483.
- Li Yuhua. 2000. The geological characteristics of Lincang Ge deposit. *Yunnan Geology*, 19(3): 263~269 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jiajun, He Mingqin, Li Zhiming, Liu Yuping, Li Chaoyang, Zhang Qian, Yang Weiguang, Yang Aiping. 2004. Oxygen and carbon isotopic geochemistry of Baiyangping silver-copper polymetallic ore concentration area in Lanping basin of Yunnan province and its significance. *Mineral Deposits*, 23 (01): 1~10 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jiajun, Li Chaoyang, Pan Jiayong, Liu Xianfan, Liu Yuping. 2000. Metallogenic mechanism of copper deposits from sandstone and shale in Lanping Simaobasin, western Yunnan. *Contributions to Geology and Mineral Resources*, 15(3): 216~223 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jiajun, Zhai Degao, Li Zhiming, He Mingqin, Liu Yuping, Li Chaoyang. 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. *Acta Petrologica Sinica*, 26(6): 1646~1660 (in Chinese with English abstract).
- Liu Ping. 2007. Characteristics of associate Gallium distributed in the bauxite in Guizhou and its prospects for comprehensive utilization: Nine treatments of bauxite ores. *Guizhou Geology*, 24(2): 90~96 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yingjun. 1965. Some geochemical characteristics of gallium in certain bauxite deposits of China. *Geological Review*, 23 (1) 42~49 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yuping, Li Zhengxiang, Li Huiming, Guo Liguang, Xu Wei, Ye Lin, Li Chaoyang, Pi Daohui. 2007. U-Pb chronology of cassiterite and zircon from Dulong Sn-Zn deposit: Evidence for cretaceous large-scale granitic magmatism and mineralization events in Southeast Yunnan province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 27(1): 1~10 (in Chinese with English abstract).

- Sinica, 23(5): 967~976 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yuping, Ye Lin, Li Chaoyang, Sogn Biao, Li Tiesheng, Guo Ligu, Pi Daohui. 2006. Discovery of the Neoproterozoic magmatites in southeastern Yunnan; Evidence from SHRIMP zircon U-Pb dating and lithochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 916~926 (in Chinese with English abstract).
- Lu Fangkang, Huang Zhilong, Jin Zhongguo, Zhou Jiayi, Ding Wei, Gu Jing. 2009. A primary study on the content features and occurrence states of gallium in bauxite from the Wuchuan-Zhengan-Doazhen area, northern Guizhou province, China. *Acta Mineralogica Sinica*, 29(3): 373~379 (in Chinese with English abstract).
- Lu Jialan, Fu Jiamo. 1991. Several problems of organic geochemistry in the forming of some sediment-reformed deposits. *Acta Sedimentologica Sinica*, 9(S): 171~177 (in Chinese with English abstract).
- Mortlock R A, Froelich P N, Feely R A, Massoth G J, Butterfield D A, Lupton J E. 1993. Silica and germanium in Pacific Ocean hydrothermal vents and plumes. *Earth and Planetary Science Letters*, 119: 365~378.
- Pokrovski G S, Schott J. 1998. Thermodynamic properties of aqueous Ge (IV) hydroxide complexes from 25 to 350°C; Implications for behavior of germanium and the Ge/Si ratio in hydrothermal fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(9): 1631~1642.
- Qi H W, Hu R Z, Qi L. 2005. Experimental study on the interaction between peat, lignite and germanium-bearing solution at low temperature. *Science in China (Ser. D Earth Sciences)*, 48(9): 1411~1417.
- Qi H W, Hu R Z, Su W C, Qi L, Feng J Y. 2004. Continental hydrothermal sedimentary siliceous rock and superlarge germanium deposit: A study on the Lincang germanium deposit, Yunnan Province, China. *Science in China (Ser. D Earth Sciences)*, 47(11): 973~984.
- Qi H W, Rouxel O, Hu R Z, Bi X W, Wen H J. 2011. Germanium isotopic systematics in Ge-rich coal from the Lincang Ge deposit, Yunnan, Southwestern China. *Chemical Geology*, 286: 252~265.
- Qi Huawen, Hu Ruizhong, Su Wenchao, Qi Liang. 2002. Genesis of carboniferous siliceous limestone in the Lincang germanium deposit and its relation with germanium mineralization. *Geochimica*, 31(2): 161~168 (in Chinese with English abstract).
- Schwarz-Schampera U, Herzig P M. 2002. Indium: Geology, Mineralogy, and Economics. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1~257.
- Seifert T, Sandmann D. 2006. Mineralogy and geochemistry of indium-bearing polymetallic vein-type deposits: Implications for host minerals from the Freiberg district, eastern Erzgebirge, Germany. *Ore Geology Reviews*, 28(1): 1~31.
- Si Rongjun, Gu Xuexiang, Pang Xucheng, Fu Shaohong, Li Fayuan, Zhang Ming, Li Yunhong, Li Xiongyao, Li Jian. 2006. Geochemical character of dispersed element in sphalerite from Fule Pb-Zn polymetal deposit, Yunnan province. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 26(1): 75~80 (in Chinese with English abstract).
- Tang Y, Bi X, Fayek M, Hu R, Wu L, Zou Z, Feng C, Wang X. 2014. Microscale sulfur isotopic compositions of sulfide minerals from the Jinding Zn-Pb deposit, Yunnan Province, Southwest China. *Gondwana Research*, 26: 594~607.
- Tang Y, Bi X, Fayek M, Stuart F M, Wu L, Jiang G, Xu L, Liang F. 2017. Genesis of the Jinding Zn-Pb deposit, northwest Yunnan Province, China; Constraints from rare earth elements and noble gas isotopes. *Ore Geology Reviews*, 90: 970~986.
- Tang Yongyong, Bi Xianwu, Wu Liyan, Zou Zhichao, He Liping. 2013. Carbon, oxygen, strontium and lead isotopic geochemistry in the Jinding super-large Zn-Pb deposit, Yunnan Province. *Geochimica*, 42(5): 467~480 (in Chinese with English abstract).
- Tao Y, Putirka K, Hu R Z, Li C. 2015. The magma plumbing system of the Emeishan large igneous province and its role in basaltic magma differentiation in a continental setting. *American Mineralogist*, 100(11/12): 2509~2517.
- Tu Guangchi, Gao Zhenmin, Hu Ruizhong, Zhang Qian, Li Chaoyang, Zhao Zhenhua, Zhang Baogui. 2003. Geochemistry and metallogenic mechanism of dispersed elements. Beijing: Geological Publishing House, 1~422 (in Chinese).
- Wang Denghong, Yang Jianmin, Yan Shenghao, Xu Jue, Chen Yuchuan, Xue Chunji, Luo Yaonan, Yin Hanlong. 2002a. Cenozoic ore concentration areas in the Sanjiang region, SW China: Tectonic setting and exploration. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(2): 135~140 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Chen Yuchuan, Luo Yaonan, Yin Hanlong, Li Zhiwei, Fu Xiaofang, Yang Jianmin, Yan Shenghao. 2002b. Primary comparison between Cenozoic mineralization in Sichuan and Yunnan. *Mineral Deposits*, 21(S1): 237~240 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Chen Yuchuan, Xu Jue, Zou Tianren, Xue Chunji, Luo Junlie, Luo Yaonan, Wu Guangyu, Li Zhiwei, Fu Xiaofang, Fu Deming, Chu Yingshi, Wei Lin, Li Xiaoyan. 2005. Cenozoic Ore-forming Process in China. Beijing: Geological Publishing House, 1~853 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Wang Ruijiang, Li Jiankang, Zhao Zhi, Yu Yang, Dai Jingjing, Chen Zhenhui, Li Dexian, Qu Wenjun, Deng Maochun, Fu Xiaofang, Sun Yan, Zhen Guodong. 2013. The progress in the strategic research and survey of rare earth, rare metal and rare-scattered elements mineral resources. *Chinese Geology*, 40(2): 361~370 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Xu Zhigang, Shen Jifu, Zhu Mingyu, Xu Jue, Yuan Zhongxin, Bai Ge, Qu Wenjun, Li Huaqin, Chen Zhenhui, Wang Chenhui, Huang Fan, Zhang Changqin, Wang Yonglei, Ying Lijuan, Li Houmin, Gao Lan, Sun Tao, Fu Yong, Li Jiankang, Wu Guang, Tang Juxing, Feng Chengyou, Zhao Zheng, Zhang Daquan. 2014. Progress on the study of regularity of major mineral resources and regional metallogenic regularity in China: A review. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2176~2191 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qian, Gu Xuexiang, Fu Shaohong, Zhang Ming, Li Fayuan. 2008. Enrichment of the dispersed elements Cd, Ge and Ga in the Huize leadzinc deposit, Yunnan. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 28(4): 69~73 (in Chinese with English abstract).
- Wolfenden E B. 1965. Geochemical behaviour of trace elements during bauxite formation in Sarawak (Malaysia). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 29: 1051~1062.
- Xu Jing, Li Xiaofeng. 2018. Spatial and temporal distributions, metallogenic backgrounds and processes of indium deposits. *Acta Petrologica Sinica*, 34(12): 3611~3626 (in Chinese with English abstract).
- Xu Y G, Chung S L, Jahn B M, Wu G Y. 2001. Petrological and geochemical constraints on the petrogenesis of the Permian-Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China. *Lithos*, 58: 145~168.
- Xue C J, Zeng R, Liu S W, Chi G X, Qing H R, Chen Y C, Yang J M, Wang D H. 2007. Geologic, fluid inclusion and isotopic characteristics of the Jinding Zn-Pb deposit, western Yunnan, South China: A review. *Ore Geology Reviews*, 31: 337~359.
- Xue Chunji, Chen Yuchuan, Yang Jianmin, Wang Denghong, Yang Weiguang, Yang Qingbiao. 2002a. Jinding Pb-Zn deposit: Geology and geochemistry. *Mineral Deposits*, 21(3): 270~277 (in Chinese with English abstract).
- Xue Chunji, Chen Yuchuan, Yang Jianmin, Wang Denghong, Xu Jue. 2002b. The CO₂-rich and hydrocarbon-bearing ore-forming fluid and their metallogenic role in Lanping Pb-Zn-Ag-Cu orefield, Northwest Yunnan. *Acta Geologica Sinica*, 76(2):

- 244~253 (in Chinese with English abstract).
- Xue Chunji, Chen Yuchuan, Zeng Rong, Gao Yongbao. 2007. Fluid dynamic processes of large-scale mineralization in the Lanping Basin, Yunnan, SW-China: evidence from fluid inclusions and basin fluid modeling. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 147~157 (in Chinese with English abstract).
- Yang Ruidong, Gao Junbo, Zhao Kui, Yu Jiala, Zhu Chenglin, Gao Lei, Chen Jiyan, Zhou Ruxian. 2018. Roof and floor characteristics of bauxite in Qingzhen Guizhou and their implication for bauxite mineralization. *Acta Geologica Sinica*, 92(10): 2155~2165 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zongxi, Mao Jingwen, Chen Maohong, Tong Xiang, Wu Junde, Cheng Yanbo, Zhao Haijie. 2008. Re-Os dating of molybdenite from the Kafang skarn copper-tin deposit in the Gejiu tin polymetallic ore district and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1937~1944 (in Chinese with English abstract).
- Ye L., Cheng Z T., Pan Z P., Liu T G., Gao W. 2010. A study on the distribution characteristics and existing states of cadmium in the Jinding Pb-Zn deposit, Yunnan Province, China. *Chinese Journal of Geochemistry*, 29(3): 319~325.
- Ye L., Cook N J., Ciobanu C L., Liu Y P., Zhang Q., Liu T G., Gao W., Yang Y L., Danyushevskiy L. 2011. Trace and minor elements in sphalerite from base metal deposits in South China: a LA-ICPMS study. *Ore Geology Review*, 39: 188~217.
- Ye Lin, Liu Yuping, Zhang Qian, Bao Tan, He Fang, Wang Xiaojuan, Wang Dapeng, Lan Jiangbo. 2017. Trace and rare earth elements characteristics of sphalerite in Dulong super large Sn-Zn polymetallic ore deposit, Yunnan Province. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 47(3): 734~750 (in Chinese with English abstract).
- Ye Lin, Pan Ziping, Cheng Zengtao. 2007. Prospect of comprehensive utilization of associated elements in bauxite from Guizhou. *Acta Mineralogica Sinica*, 27(3/4): 388~392 (in Chinese with English abstract).
- Ye Lin, Pan Ziping, Cheng Zengtao. 2008. The regularities of distribution of associated elements in Xiaoshanba bauxite deposit, Guizhou. *Acta Mineralogica Sinica*, 28(2): 105~111 (in Chinese with English abstract).
- Ye Lin, Pan Ziping, Li Chaoyang, Liu Tiegeng, Xia Bin. 2005. Isotope geochemical characters in Niujiaotang Cd rich zinc deposit, Duyun, Guizhou. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 25(2): 70~74 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Changqing, Wu Yue, Wang Denghong, Chen Yuchuan, Rui Zongyao, Lou Debo, Chen Zhenghui. 2014. Brief introduction on metallogeny of Pb-Zn deposits in China. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2252~2268 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinrang, Wen Hanjie, Zou Zhichao. 2017. Ore-forming fluid characteristics of the Jinman vein-type copper deposits in the western Lanping basin and its metallogenic significance. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 47(3): 706~718 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Q., Zhan X., Pan J., Shao S. 1998. Geochemical enrichment and mineralization of indium. *Chinese Journal of Geochemistry*, 17(3): 221~225.
- Zhang Qian, Liu Zhihao, Zhan Xinzhi, Shao Shuxun. 2003. Specialization of ore deposit types and minerals for enrichment of Indium. *Mineral Deposits*, 22(3): 309~316 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qian, Zhu Xiaoqing, Gao Zhenmin, Pan Jiayong. 2005. A review of enrichment and mineralization of the dispersed elements in China. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 24(4): 342~349 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shuling, Wang Shuying, Yin Jinshuang. 1987. The study of germanium ore in uranium-bearing coal of the Bangmai Basin, Lincang region, Yunnan Province. *Uranium Geology*, 3(5): 267~275 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shuling, Yin Jinshuang, Wang Shuying. 1988. Study on the existence forms of germanium in coal in Bangmai Basin, Yunnan. *Acta Sedimentologica Sinica*, 6(3): 29~40 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xiaoqing, Zhang Qian, He Yuliang, Zhu Chaohui. 2006. Relationships between indium and tin, zinc and lead in ore-forming fluid from the indium-rich and-poor deposits in China. *Geochimica*, 35(1): 1~5 (in Chinese with English abstract).
- Zhuang Hanping, Lu Jialan, Fu Jiamo, Liu Jinzhong, Ren Chigang, Zou Degang. 1998. Germanium occurrence in Lincang superlarge deposit in Yunnan, China. *Science in China (series D)*, 41(supplement): 21~27 (in Chinese with English abstract).
- Zhuang Hanping, Liu Jinzhong, Fu Jiamo, Lu Jialan. 1997. Some characteristics of organic matter and mineralization of Lincang super large germanium deposit in Yunnan Province, China. *Geochimica*, 26(4): 44~51 (in Chinese with English abstract).
- Zou Zhichao, Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Wu Liyan, Feng Caixia, Tang Yongyong. 2012. Study on isotope geochemistry compositions of the Baiyangping silver-copper polymetallic ore deposit area, Yunnan Province. *Geochimica*, 41(6): 515~529 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

- 毕献武, 唐永永, 陶琰, 王长明, 温汉捷, 胥磊落, 戚华文, 肖加飞, 兰青, 盛响元, 木兰, 李娟, 刘跃福. 2019. 西南三江碰撞造山带沉积岩容矿 Pb-Zn-Ag-Cu 贱金属复合成矿与深部过程. *岩石学报*, 35(5): 1341~1371.
- 陈郑辉, 王登红, 盛继福, 应立娟, 梁婷, 王成辉, 刘丽君, 王永磊. 2015. 中国锡矿成矿规律概要. *地质学报*, 89(6): 1026~1037.
- 程彦博, 毛景文, 谢桂青, 陈懋弘, 赵财胜, 杨宗喜, 赵海杰, 李向前. 2008. 云南个旧老厂-卡房花岗岩体成因: 锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学约束. *地质学报*, 82(11): 1478~1493.
- 程彦博, 毛景文, 陈小林, 李伟. 2010. 滇东南薄竹山花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地质意义. *吉林大学学报(地球科学报)*, 40(4): 869~878.
- 邓军, 侯增谦, 莫宣学, 杨立强, 王庆飞, 王长明. 2010. 三江特提斯复合造山与成矿作用. *矿床地质*, 29(1): 37~42.
- 邓军, 王庆飞, 李龚健. 2016. 复合造山和复合成矿系统: 三江特提斯例析. *岩石学报*, 32: 2225~2247.
- 高兰, 王登红, 熊晓云, 易承伟. 2014. 中国铝矿成矿规律概要. *地质学报*, 88(12): 2284~2295.
- 顾雪祥, 王乾, 付绍洪, 唐菊兴. 2004. 分散元素超常富集的资源与环境效应: 研究现状与发展趋势. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 31(1): 15~21.
- 韩润生, 胡煜昭, 王学琨, 侯宝洪, 黄智龙, 陈进, 王峰, 吴鹏, 李波, 王洪江, 董英, 雷丽. 2012. 滇东北富锆银铅锌多金属矿集区矿床模型. *地质学报*, 86(2): 280~294.
- 韩延荣, 袁庆邦, 李永华, 张琳, 戴杰敏. 1994. 滇西大寨超大型含铀锆矿床成矿地质条件及远景预测. *中国核科技报告*, 1~17.
- 何明勤, 刘家军, 李朝阳, 李志明, 刘玉平, 杨爱平, 桑海清. 2006. 云南兰坪白秧坪铜钴多金属矿集区矿石中石英的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄. *地质科学*, 41: 688~693.
- 胡瑞忠, 毕献武, 苏文超, 叶造军. 1997. 对煤中锆矿化若干问题的思考——以临沧锆矿为例. *矿物学报*, 17(4): 364~368.
- 胡瑞忠, 毕献武, 叶造军, 苏文超, 漆亮. 1996. 临沧锆矿床成因初探. *矿物学报*, 16(2): 97~102.
- 胡瑞忠, 苏文超, 戚华文, 毕献武. 2000. 锆的地球化学、赋存状态和成矿作用. *矿物岩石地球化学通报*, 19(4): 215~217.
- 胡瑞忠, 陶琰, 钟宏, 黄智龙, 张正伟. 2005. 地幔柱成矿系统: 以峨眉山地幔柱为例. *地学前缘*, 12(1): 42~54.
- 黄智龙, 陈进, 刘丛强, 韩润生, 李文博, 赵德顺, 高德荣, 冯志宏. 2001. 峨眉山玄武岩与铅锌矿床成矿关系初探——以云南会泽铅锌矿床为例. *矿物学报*, 21(4): 681~688.

- 冷成彪, 齐有强. 2017. 闪锌矿与方铅矿的 LA-ICPMS 微量元素地球化学对江西冷水坑银铅锌矿田的成因制约. 地质学报, 91(10): 2256~2272.
- 李开文, 张乾, 王大鹏, 蔡伊, 刘玉平. 2013. 云南蒙自白牛厂多金属矿床锡石原位 LA-MC-ICP-MS U-Pb 年代学. 矿物学报, 33(2): 203~209.
- 李文博, 黄智龙, 陈进, 许成, 管涛, 尹牡丹. 2004. 云南会泽超大型铅锌矿床硫同位素和稀土元素地球化学研究. 地质学报, 78(4): 507~518.
- 李晓峰, Yasushi Watanabe, 毛景文. 2007. 铟矿床研究现状及展望. 矿床地质, 26(4): 475~480.
- 李晓峰, 杨锋, 陈振宇, 卜国基, 王义天. 2010. 广西大厂锡矿铟的地球化学特征及成因机制初探. 矿床地质, 29(5): 903~914.
- 李余华. 2000. 临沧锗矿床地质特征. 云南地质, 19(3): 263~269.
- 刘家军, 何明勤, 李志明, 刘玉平, 李朝阳, 张乾, 杨伟光, 杨爱平. 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. 矿床地质, 23(01): 1~10.
- 刘家军, 李朝阳, 潘家永, 刘显凡, 刘玉平. 2000. 兰坪-思茅盆地砂页岩中脉状铜矿床的特征及成因. 地质找矿论丛, 15(3): 216~223.
- 刘家军, 翟德高, 李志明, 何明勤, 刘玉平, 李朝阳. 2010. 兰坪盆地白秧坪银铜多金属矿集中银、钴、铋、镍的赋存状态与成因意义. 岩石学报, 26(06): 1646~1660.
- 刘平. 2007. 贵州铝土矿床伴生铪的分布特征及综合利用前景—论贵州之铝土矿. 贵州地质, 24(2): 90~96.
- 刘英俊. 1965. 我国某些铝土矿中铪的若干地球化学特征. 地质论评, 23(1): 42~49.
- 刘玉平, 李正祥, 李惠民, 郭利果, 徐伟, 叶霖, 李朝阳, 皮道会. 2007. 都龙锡矿床锡石和锗石 U-Pb 年代学: 滇东南白垩纪大规模花岗岩成岩成矿事件. 岩石学报, 23(5): 967~976.
- 刘玉平, 叶霖, 李朝阳, 宋彪, 李铁胜, 郭利果, 皮道会. 2006. 滇东南发现新元古代岩浆岩: SHRIMP 锗石 U-Pb 年代学和岩石地球化学证据. 岩石学报, 22(4): 916~926.
- 卢家烂, 傅家谟. 1991. 沉积改造矿床形成中的若干有机地球化学问题. 沉积学报, 9(增刊): 171~177.
- 鲁方康, 黄智龙, 金中国, 周家喜, 丁伟, 顾静. 2009. 黔北务-正-道地区铝土矿含量特征与赋存状态初探. 矿物学报, 29(3): 373~379.
- 戚华文, 胡瑞忠, 苏文超, 漆亮. 2002. 临沧锗矿含碳硅质灰岩的成因及其与锗成矿的关系. 地球化学, 31(2): 161~168.
- 司荣军, 顾雪祥, 庞绪成, 付绍洪, 李发源, 章明, 李云洪, 李雄耀, 李键. 2006. 云南省富乐铅锌多金属矿床闪锌矿中分散元素地球化学特征. 矿物岩石, 26(1): 75~80.
- 唐永永, 毕献武, 武丽艳, 邹志超, 和利平. 2013. 云南金顶超大型铅锌矿床碳、氧、铋、铅同位素地球化学. 地球化学, 42(5): 467~480.
- 涂光焯, 高振敏, 胡瑞忠, 张乾, 李朝阳, 赵振华, 张宝贵. 2003. 分散元素地球化学及成矿机制. 北京: 地质出版社, 1~422.
- 王登红, 陈毓川, 徐珏, 邹天人, 薛春纪, 罗君烈, 骆耀南, 伍广宇, 李志伟, 余金杰, 闫升好, 杨建民, 傅旭杰, 付小方, 傅德明, 楚莹石, 魏琳, 李晓焰. 2005. 中国新生代成矿作用. 北京: 地质出版社, 1~853.
- 王登红, 王瑞江, 李建康, 赵芝, 于扬, 代晶晶, 陈郑辉, 李德先, 屈文俊, 邓茂春, 付小方, 孙艳, 郑国栋. 2013. 中国三稀矿产资源战略调查研究进展综述. 中国地质, 40(2): 361~370.
- 王登红, 徐志刚, 盛继福, 朱明玉, 徐珏, 袁忠信, 白鸽, 屈文俊, 李华芹, 陈郑辉, 王成辉, 黄凡, 张长青, 王永磊, 应立娟, 李厚民, 高兰, 孙涛, 付勇, 李建康, 武广, 唐菊兴, 丰成友, 赵正, 张大权. 2014. 全国重要矿产和区域成矿规律研究进展综述. 地质学报, 88(12): 2176~2191.
- 王登红, 杨建民, 闫升好, 徐珏, 陈毓川, 薛春纪, 骆耀南, 应汉龙. 2002a. 西南三江新生代矿集区的分布格局及找矿前景. 地球学报, 23(2): 135~140.
- 王登红, 陈毓川, 骆耀南, 应汉龙, 李志伟, 付小方, 杨建民, 闫升好. 2002b. 四川与云南新生代成矿作用的初步对比. 矿床地质, 21(增刊): 237~240.
- 王乾, 顾雪祥, 付绍洪, 章明, 李发源. 2008. 云南会泽铅锌矿床分散元素镉、铊的富集规律. 沉积与特提斯地质, 28(4): 69~73.
- 徐净, 李晓峰. 2018. 铟矿床时空分布、成矿背景及其成矿过程. 岩石学报, 34(12): 3611~3626.
- 薛春纪, 陈毓川, 曾荣, 高永宝. 2007. 西南三江兰坪盆地大规模成矿的流体动力学过程——流体包裹体和盆地流体模拟证据. 地学前缘, 14(5): 147~157.
- 薛春纪, 陈毓川, 杨建民, 王登红, 杨伟光, 杨清标. 2002a. 金顶铅锌矿床地质-地球化学. 矿床地质, 21(3): 270~277.
- 薛春纪, 陈毓川, 杨建民, 王登红; 徐珏. 2002b. 滇西北兰坪铅锌铜银矿田含烃富 CO₂ 成矿流体及其地质意义. 地质学报, 76(2): 244~253.
- 杨瑞东, 高军波, 赵奎, 余家腊, 竺成林, 高磊, 陈吉艳, 周汝贤. 2018. 贵州清镇林歹铝土矿顶、底板特征及其对铝土矿成矿的影响. 地质学报, 92(10): 2155~2165.
- 杨宗喜, 毛景文, 陈懋弘, 童祥, 武俊德, 程彦博, 赵海杰. 2008. 云南两个旧卡房砂卡岩型铜(锡)矿 Re-Os 年龄及其地质意义. 岩石学报, 24(8): 1937~1944.
- 叶霖, 刘玉平, 张乾, 鲍谈, 何芳, 王小娟, 王大鹏, 蓝江波. 2017. 云南都龙超大型锡锌多金属矿床中闪锌矿微量元素及稀土元素地球化学特征. 吉林大学学报(地球科学版), 47(3): 734~750.
- 叶霖, 潘自平, 程增涛. 2007. 贵州铝土矿中伴生元素综合利用前景. 矿物学报, 27(3/4): 388~392.
- 叶霖, 潘自平, 程增涛. 2008. 贵州小山坝铝土矿中铪等伴生元素分布规律研究. 矿物学报, 28(2): 105~111.
- 叶霖, 潘自平, 李朝阳, 刘铁庚, 夏斌. 2005. 贵州都匀牛角塘富镉矿同位素地球化学研究. 矿物岩石, 25(2): 70~74.
- 张锦让, 温汉捷, 邹志超. 2017. 滇西北兰坪盆地地满脉状铜矿床成矿流体特征及其成矿意义. 吉林大学学报(地球科学版), 47(3): 706~718.
- 张乾, 刘志浩, 战新志, 邵树勋. 2003. 分散元素铟富集的矿床类型和矿物专属性. 矿床地质, 22(3): 309~316.
- 张乾, 朱笑青, 高振敏, 潘家永. 2005. 中国分散元素富集与成矿研究新进展. 矿物岩石地球化学通报, 24(4): 342~349.
- 张淑苓, 王淑英, 尹金双. 1987. 云南临沧地区帮卖盆地含铀煤中锗矿的研究. 铀矿地质, 3(5): 267~275.
- 张淑苓, 尹金双, 王淑英. 1988. 云南帮卖盆地煤中锗存在形式的研究. 沉积学报, 6(3): 29~40.
- 张长青, 吴越, 王登红, 陈毓川, 芮宗瑶, 姜德波, 陈郑辉. 2014. 中国铅锌矿床成矿规律概要. 地质学报, 88(12): 2252~2268.
- 朱笑青, 张乾, 何玉良, 祝朝辉. 2006. 富铟及贫铟矿床成矿流体中铟与锡铅锌的关系研究. 地球化学, 35(1): 1~5.
- 庄汉平, 刘金钟, 傅家谟, 卢家烂. 1997. 临沧超大型锗矿床有机质与锗矿化的地球化学特征. 地球化学, 26(4): 44~51.
- 庄汉平, 卢家烂, 傅家谟, 刘金钟, 任刚刚, 邹德刚. 1998. 临沧超大型锗矿床铋赋存状态研究. 中国科学(D 辑), 28(增刊): 37~42.
- 邹志超, 胡瑞忠, 毕献武, 武丽艳, 冯彩霞, 唐永永. 2012. 云南白秧坪银铜多金属矿集区成矿流体的稳定同位素地球化学研究. 地球化学, 41(6): 515~529.

Types of dispersed elements bearing ore-deposits and their enrichment regularity in Southwest China

TAO Yan*, HU Ruizhong, TANG Yongyong, YE Lin, QI Huawen, FAN Haifeng

The State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry,

Chinese Academy of Sciences, Guiyang, 550081

** Corresponding author: taoyan@vip.gyig.ac.cn*

Abstract

Dispersed elements resources is rich in SW China and the most occur in trace and minor amounts in various ore deposits, few in their own independent deposits. The host ore deposits include sediment-hosted Pb-Zn deposits (associated Cd, Ge, Ga, Tl), Cassiterite sulfide deposits (associated In, Cd) of magmatic hydrothermal origin, Bauxite (associated Ga) and Ge-rich coal, etc. These deposits are distributed in the metallogenic area such as Sanjiang Pb-Zn metallogenic region, Sichuan-Yunnan-Guizhou Pb-Zn metallogenic region, Sn metallogenic region in SE Yunnan, bauxite zone in NW Guizhou province and Tertiary coal-bearing basin in Western Yunnan. In this paper, taking the typical dispersed elements bearing ore-deposits as example, the analysis of dispersed elements contents in various metal sulfides and surface scanning by electron probe were carried out to determine the enrichment and occurrence state of dispersed elements in host minerals in the ores. Combined with metallogeny analyses of the host ore-deposits, the regularity of the dispersed element enrichment are discussed.

The study shows that the enrichment of the dispersed elements such as In, Cd, Ge, Ga, Tl has their carrier mineral specificity: In, Cd, Ge and Ga are enriched in sphalerite while Tl is enriched in pyrite in hydrothermal ore-deposits; otherwise, Ga is enriched in aluminium oxyhydroxide in bauxite, and Ge is enriched in huminite in Ge-rich coal seam.

Indium is associated with cassiterite sulfide deposits. The three cassiterite sulfide deposits in SE Yunnan (Gejiu, Dulong and Bainiuchang) have similar geological and geochemical characteristics, and their geneses are related to the granite intrusion of late Yanshanian period. Sediment-hosted Pb-Zn deposits generally contain Cd, Ge, Ga and Tl, but it is quite different in enrichment levels of these dispersed elements among them. Sphalerite in Pb-Zn deposits of Sichuan-Yunnan-Guizhou Pb-Zn metallogenic region are rich in Ge, Ga; while sphalerite in Jinding deposit have the highest Cd content in average of 1.23%, which may be related to the metallogenesis of bio-organic matter. Ge-rich coal seams occur in Bangmai coal-bearing basin, characterized with granite basement, in Lincang, SW Yunnan. Ge-rich coal seam shows variation both in plane and in vertical, Ge enrichment in industrial significance only occurred in the first coal seam, in which there are siliceous rocks or siliceous limestone in the layer, while there is no Ge enrichment in the upper two coal seams which are lack of siliceous rocks. It suggests that hot water play a key role in the enrichment of Ge in coal, which leached Ge from granites and discharged into the basin, and then, absorbed by organic matters in coal seams. The enrichment of Ga in bauxite are common in global, Ga enriched in all bauxites worldwide with average contents of $50 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$ in various metallogenic epochs and different industrial types. Bauxite deposits in Guizhou is formed in the Carboniferous, and Ga contents in the ores are $70 \times 10^{-6} \sim 143 \times 10^{-6}$, slightly higher than the average contents of Ga in bauxite as in China and in the world.

Key words: Southwest China; dispersed elements; host ore deposits; metallogenic regularity