

# 矿床地球化学类型及其在地质勘查中的意义\*

李赋屏, 李毅, 苏亚汝\*\*, 谭运金

(广西有色金属集团有限公司, 广西南宁 530022)

**摘要** 根据文献报导及作者的研究, 分别对 Sedex 型铅锌矿床、浅成低温热液金矿床、岩浆期后高温热液型石英脉状黑钨矿矿床和沉积岩为主岩的微细浸染型(卡林型)金矿床进行了矿床地球化学分类: Sedex 型铅锌矿床分为 Selwyn 型矿床和 McArthur 型矿床, 前者的成矿热卤水产生于开阔海盆或大陆斜坡的浊积岩建造, 后者的成矿热卤水产生于氧化的海底裂谷沉积建造, 浅成低温热液型金矿床分为酸性-硫酸盐型(明矾石-高岭石型)金矿床和冰长石-绢云母型金矿床, 前一类金矿床的成矿流体,  $f(S_2)$  和  $f(O_2)$  较高, pH 值较低, 后一类金矿床的成矿流体,  $f(S_2)$  和  $f(O_2)$  较低, pH 值较高。岩浆期后高温热液型石英脉状黑钨矿矿床分为钨-铍-钼-铋型黑钨矿矿床和钨-锡-硫化物型黑钨矿矿床, 钨-铍-钼-铋型黑钨矿矿床的成矿作用是在 pH 值较高的弱碱性、 $E_h$  值较高的环境中进行的, 钨-锡-硫化物型黑钨矿矿床的成矿作用是在 pH 值较低的弱酸性的,  $E_h$  值较低的环境中进行的。沉积岩为主岩的微细浸染型(卡林型)金矿床分为金-砷-(锑)型金矿床、金-汞-(铊)型金矿床和金-锑-黄铁矿型金矿床。金-砷-(锑)型金矿床的成矿流体是地层建造水(为主)与改造后的大气降水混合形成的热液, 其 pH 值为 3.6~5.2, 且  $E_h$  值较低; 金-汞-(铊)型金矿床的成矿流体是大气降水与地层建造水混合形成的热液, 其 pH 值为 5.0~7.5,  $E_h$  值较高; 金-锑-黄铁矿型金矿床的成矿流体是改造后的大气降水与岩浆演化成的流体混合形成的热液, 其 pH 值为 5.4~6.77,  $E_h$  值较高。

**关键词** 地球化学; 铅锌矿; 金矿; 钨矿; 矿床地球化学类型; 综述

**中图分类号**: P618.41; P61843; P618.51; P618.67

**文献标志码**: A

## Geochemical types of ore deposits and their significance in geological exploration

LI FuPing, LI Yi, SU YaRu and TAN YunJin

(Guangxi Nonferrous Metals Group Co. Ltd., Nanning 530022, Guangxi, China)

### Abstract

According to geological and geochemical features of ore deposits reflecting geochemical characteristics of the ore-forming process, the authors conducted geochemical classification of ore deposits. Based on literatures and the authors' researches, the authors put forward geochemical classifications for Sedex-type lead-zinc deposits, epithermal gold deposits, post-magmatic hydrothermal quartz vein-type wolframite deposits and sedimentary host-rock (Carlin-type) gold deposits. The Sedex-type lead-zinc deposits are divided into Selwyn-type deposits and McArthur-type deposits, with the ore-forming hot brine of the former type produced in the open basin or continental slope turbidite formation, and the latter ore-forming hot brine arising from oxidation of the submarine rift sedimentary formation. The epithermal gold deposits are divided into acid-sulfate type (alunite-kaolinite type) gold deposits and adularia-sericite type gold deposits, with the ore-forming fluids of the former type having higher  $f(S_2)$  and  $f(O_2)$  and lower pH values, and the ore-forming fluids of the latter type having lower  $f(S_2)$

\* 第一作者简介 李赋屏, 男, 1963 年生, 博士, 教授级高级工程师, 长期从事矿床地球化学研究和管理。Email: lifuping3@sina.com

\*\* 通讯作者 苏亚汝, 男, 1965 年生, 高级工程师, 地质工程专业。Email: yarusu3659@126.com

收稿日期 2009-10-28; 改回日期 2010-02-10。李德先编辑。

and  $f(\text{O}_2)$  and higher pH values. Post magmatic hydrothermal quartz vein-type wolframite deposits are divided into W-Be-Mo-Bi type wolframite deposits and W-Sn-sulfide type wolframite deposits, with the ore-forming process of W-Be-Mo-Bi type wolframite deposits produced in the alkaline environments with higher pH and  $E_h$  values, and the W-Sn-sulfide type wolframite deposits produced in a weak acid environment with lower  $E_h$  and pH values. The sedimentary host rocks of micro-disseminated type (Carlin type) gold deposits are divided into gold-arsenic-(Sb) type gold deposits, gold-mercury-(Tl) type gold deposits and gold-antimony-pyrite type gold deposits, with the ore-forming fluids of the first type gold deposits being the mixed fluids of formation water and minor post-transformation meteoric water, whose pH values are 3.6~5.2, and  $E_h$  values are low; the ore-forming fluids of the second type gold deposits are meteoric water mixed with strata water, whose pH values are 5.0~7.5, and  $E_h$  values are higher; the ore-forming fluids of the third type gold deposits are mixed fluids of transformed atmospheric precipitation and magma-evolved fluids, whose pH values are 5.4~6.77, and  $E_h$  values are higher.

**Key words:** geochemistry, Pb-Zn deposit, gold deposit, tungsten, geochemical types of ore deposits, review

在矿床勘查及其成因研究中,人们发现,属于同一成因类型的矿床,其地质、地球化学特征经常表现出明显区别。许多研究者提出,在矿床成因类型的范围内应注入地球化学表征,以反映它们之间的差别。例如: Sedex 型铅锌矿床以地球化学表征可分为 McArthur 型矿床和 Selwyn 型矿床 (Cook et al., 2000); 浅成低温热液金矿床则划分为明矾石-高岭石型金矿床和冰长石-绢云母型金矿床 (Heald et al., 1987); 岩浆期后高温热液型石英脉状黑钨矿矿床可分为钨-铍-钼-铋型黑钨矿矿床和钨-锡-硫化物型黑钨矿矿床 (谭运金, 1982), 沉积岩为主岩的微细浸染型 (卡林型) 金矿床分为金-砷-(锑) 型金矿床、金-汞-(铊) 型金矿床和金-锑-黄铁矿型金矿床 (谭运金, 1994) 等等。因此,笔者认为应对矿床地球化学类型进行深入研究,探讨不同成因类型矿床中各地球化学类型的表征,从而指导矿床勘查与评价。本文在介绍华南某些矿床的地球化学类型的基础上,初步探讨了矿床地球化学类型的有关问题及其在勘查中的作用,作引玉之砖,为推动矿床地球化学研究尽微薄之力。

1 浅成低温热液型金矿床的矿床地球化学类型

浅成低温 (epithermal) 热液型矿床是一组涉及矿种繁多,类型复杂的矿床总称。Heald 等 (1987) 通过对 16 个典型矿床的系统研究,根据反映成矿作用地球化学特征的标志,将火山岩为主岩的浅成低温热液型金矿床,划分为两个亚类:酸性-硫酸盐型 (也称为明矾石-高岭石型) 金矿床和冰长石-绢云母型金矿床。

作为同一矿床成因类型,这两类矿床具有共同的成因标志,主要表现在:

(1) 两类矿床产出的区域地质构造环境相同,矿床产出的具体控矿构造类似。从全球范围看,这两类矿床主要分布在板块边缘,与俯冲带之间存在密切的空间联系,在矿床内最常见的控矿构造是破火山口。

(2) 两类矿床形成的温压条件接近。流体包裹体的均一温度为 140~325℃,其中金属矿物的形成温度为 200~300℃,晚阶段脉石矿物的形成温度为 140~200℃。矿床形成的深度在地表以下 300~600 m。

两类矿床的区别主要表现为反映成矿作用地球化学特征的各种标志:

(1) 矿石的矿物组成 (表 1)。

酸性-硫酸盐型金矿床以普遍出现内生明矾石和硫砷铜矿为特点,还可以见及重晶石和较多的贱金属硫化物。冰长石-绢云母型金矿床则以冰长石、绢云母为特征,在矿床中,有时见到明矾石,但这种明矾石是表生作用形成的或是与金矿化无关的后期热液作用形成的。当冰长石-绢云母型金矿床内

表 1 酸性-硫酸盐型金矿床与冰长石-绢云母型金矿床的矿物组成 (据 Heald et al., 1987)

Table 1 Mineral composition of acid-sulfide type gold deposits and adularia-sericite type gold deposits (after Heald et al., 1987)	
酸性-硫酸盐型金矿床	冰长石-绢云母型金矿床
硫砷铜矿 + 黄铁矿 ± 铜蓝	无硫砷铜矿
内生明矾石	绢云母普遍
内生高岭石	有时见到高岭石
缺失冰长石	冰长石
缺失硒化物	常见硒化物
锰矿物极少	存在含 Mn 的脉石矿物
绿泥石也很少	常见绿泥石
有时可见辉铋矿	缺失辉铋矿

出现较多的贱金属硫化物时,可见到菱锰矿和萤石与之共生。

(2) 近矿热液蚀变作用产物及其分带特征是区别两类金矿床的判别标志。

酸性-硫酸盐型金矿床的近矿热液蚀变作用以内生泥化作用为特征,由明矾石、高岭石组成的泥化与硅化共生,它们与矿脉紧密相伴产出。蚀变岩石的分带性表现为:紧靠矿脉的内带蚀变形成的粘土矿物主要是高岭石,远离矿脉的外带蚀变形成的粘土矿物是蒙脱石。泥化带的外侧是青磐岩化带。

发育于冰长石-绢云母型金矿床内的蚀变作用包括硅化、绢云母化和青磐岩化。紧靠矿脉的蚀变是含有浸染状细粒钾长石和绿泥石的硅化,向外是绢云母化,然后,渐变为最外带的青磐岩化。这类矿床有时也发育泥化,但是这种泥化的形成环境不同于酸性-硫酸盐型金矿床的泥化,它们是在低温和酸度较低条件下形成的,交代过程按斜长石-蒙脱石-高岭石进行。

因此,高岭石出现在离脉体较远的部位。酸性-硫酸盐型金矿床的泥化一般是在酸性条件下形成的,而且,随着酸度增大,依次形成钾长石、绢云母、高岭石、明矾石。

(3) 两类金矿床的成矿流体在化学性质上的不同是决定两类金矿床在矿物共生组合和蚀变作用及其分带性出现差别的决定性因素。酸性-硫酸盐型金矿床的成矿流体,  $f(S_2)$  和  $f(O_2)$  较高, pH 值较低,冰长石-绢云母型金矿床的成矿流体,  $f(S_2)$  和  $f(O_2)$  较低, pH 值较高。

## 2 岩浆期后高温热液型石英脉状钨矿床的矿床地球化学类型

通过对华南地区石英脉状黑钨矿矿床地质地球化学特征的研究,笔者得出,这些矿床的成因类型相同,属于与燕山期壳源型岩浆花岗岩有关的岩浆期后高温热液型石英脉状黑钨矿矿床(谭运金, 1982)。但是,从矿床地球化学表征特征的各项标志判断,可以划分为两种矿床地球化学类型,即钨-铍-钼-铋型黑钨矿矿床和钨-锡-硫化物型黑钨矿矿床。

作为同一矿床成因类型,两类钨矿床具有类似的矿床成因判别标志。主要表现在:

(1) 两类钨矿床产出的区域地质构造环境一致,都属于华南后加里东期褶皱带。控矿构造主要是发育于成矿母岩内外接触带的断裂构造;成矿方

式相同,即以含矿流体充填断裂构造为主,其次为交代作用。

(2) 稳定同位素资料显示,两类钨矿床的成矿物质来自壳源型岩浆花岗岩类;成矿流体来自花岗岩浆分异演化成的高温流体;成矿作用的温度、围压条件接近。

(3) 同位素年龄资料表明,两类钨矿床及其成矿母岩的形成时代相近,均属于燕山期。

两类钨矿床的区别主要表现在反映矿床地球化学特征的各类判定标志。

(1) 两类钨矿床的矿物共生组合和成矿元素组合特征不同。

钨-铍-钼-铋型黑钨矿矿床的矿物共生组合特征表现为:①矿石矿物主要由黑钨矿、绿柱石、辉钼矿、辉铋矿(或自然铋)组成,反映成矿流体富含钨、铍、钼、铋等成矿元素;②矿脉内特征矿物是硅铍石、似晶石、白云母和钾长石;③近矿蚀变岩中出现黑云母、白云母、钾长石和锰铝榴石(谭运金, 1986);④矿脉内出现较多的黄铁矿,很少见磁黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿和方铅矿。

钨-锡-硫化物型黑钨矿矿床的矿物共生组合特征表现为:①矿石矿物主要由黑钨矿、锡石和(铜、铅、锌)硫化物组成,反映成矿流体富含钨、锡、铜、铅、锌等成矿元素;②特征的共生矿物是氟磷酸铁锰矿、磷灰石、菱锰矿、自然砷、毒砂和黄玉;③矿床内的云母类矿物是含锂的黑磷云母、黑磷铁锂云母和铁锂云母;④常见磁黄铁矿,少见黄铁矿。

(2) 两类钨矿床的标型矿物成分特征不同。

钨-铍-钼-铋型黑钨矿矿床的黑钨矿是富铁贫锰的钨锰铁矿床,其  $w(FeO)/w(MnO)$  比值为 1.20~1.89(平均 1.43),云母类矿物是富铝(29.88%~30.53%),贫铁[ $w(FeO)$  3.76%~4.52%]、锂(0.41%~0.46%)的白云母;钨-锡-硫化物型黑钨矿矿床的黑钨矿是富锰贫铁的钨锰铁矿,其  $w(FeO)/w(MnO)$  比值为 0.49~1.14(平均 0.90),云母类矿物是贫铝(23.28%~24.26%),富铁[ $w(FeO)$  10.69%~14.99%]、锂(1.12%~1.74%)的黑磷铁锂云母。

(3) 两类钨矿床的近矿热液蚀变岩石的微量元素含量和石英的杂质元素含量不同。

钨-铍-钼-铋型黑钨矿矿床,其近矿热液蚀变岩石富含钼、钨,贫锡、锂,  $w(Mo)$  一般为 0.005%,  $w(Sn)$  平均为 0.016%,  $w(Sn)/w(Mo)$  比值 1.03~

12.5。 $w(\text{Li}_2\text{O})$ 平均为0.119%,石英的杂质元素特征表现为富钨,贫锂、铝。

钨-锡-硫化物型黑钨矿矿床,其近矿热液蚀变岩石以富锡、锂为特征, $w(\text{Sn})$ 平均为0.0347%, $w(\text{Mo})$ 一般小于0.001%, $w(\text{Sn})/w(\text{Mo})$ 比值为25.8~121, $w(\text{Li}_2\text{O})$ 平均为0.197%。

(4) 两类钨矿床的近矿热液蚀变作用不同。钨-铍-钼-铋型黑钨矿矿床的近矿热液蚀变作用是黑云母化,由白云母与石英组成的云英岩化(有时富含辉钼矿),钾长石(红长石)化和锰铝榴石化(谭运金,1994);钨-锡-硫化物型黑钨矿矿床的近矿热液蚀变作用是黄玉化,由黄玉,含锂云母、石英组成的云英岩(有时富含锡石和毒砂)。

(5) 两类钨矿床成矿作用的物理化学条件不同。钨-锡-硫化物型黑钨矿矿床的成矿作用是在pH值较低的弱酸性、 $E_h$ 值较低的环境中进行的;钨-铍-钼-铋型黑钨矿矿床的成矿作用是在pH值较高的弱碱性、 $E_h$ 值较高的环境中进行的。

(6) 两类钨矿床的成矿母岩虽然都属于壳源型岩浆花岗岩类,但是,它们的云母类矿物成分和微量元素含量特征不同。钨-铍-钼-铋型黑钨矿矿床的成矿母岩,其云母类矿物及其演化序列为:富镁的黑云母[ $w(\text{MgO})$ 为7.5%~8.6%, $w(\text{FeO})$ 为17%~18%)]→铁白云母→白云母(指含Ta、Nb矿化的花岗岩),其 $w(\text{F})(300 \times 10^{-6})$ 、 $w(\text{W})(140 \times 10^{-6})$ 、 $w(\text{Ta})(15 \times 10^{-6})$ 、 $w(\text{Nb})(52 \times 10^{-6})$ 、 $w(\text{Be})(51 \times 10^{-6})$ 较高; $w(\text{Sn})$ 、 $w(\text{Li})$ 低于测试的灵敏度;钨-锡-硫化物型黑钨矿矿床的成矿母岩,其云母类矿物成分及其演化序列为:富铁的黑云母[ $w(\text{MgO})$ 为1.77%, $w(\text{FeO})$ 为29.29%)]→锂黑云母→黑鳞云母→绿鳞云母→锂云母,其(含Ta、Nb矿化花岗岩) $w(\text{F})(3700 \times 10^{-6})$ 、 $w(\text{Ta})(27 \times 10^{-6})$ 、 $w(\text{Sn})(121 \times 10^{-6})$ 、 $w(\text{Li})(293 \times 10^{-6})$ 较高, $w(\text{Nb})(34 \times 10^{-6})$ 、 $w(\text{W})(67 \times 10^{-6})$ 和 $w(\text{Be})(5.7 \times 10^{-6})$ 较低。这些资料表明,与钨矿化有关的Ta、Nb矿化花岗岩在微量元素含量等地球化学特征上与石英脉状黑钨矿矿床具亲源关系。

### 3 沉积岩为主岩的微细浸染型(卡林型)金矿床的地球化学类型

沉积岩为主岩的微细浸染型(卡林型)金矿床的成因类型属沉积改造(或层控)型低温热液金矿床。

这类矿床在中国扬子地块西南缘和西北缘广泛分布,取得了丰硕的找矿效益。笔者根据对扬子地块西南缘(滇黔桂接壤区)卡林型金矿床的系统研究,将它们划分为3种矿床地球化学类型,即金-锑-黄铁矿型金矿床,金-汞-(铊)型金矿床和金-砷-(锑)型金矿床。

作为同一矿床成因类型的矿床,他们具有类似的矿床成因标志:

(1) 3类金矿床的成矿区域地质构造环境相同,均属于被动大陆边缘。

(2) 矿体赋存在一定层位内,矿体的产状特征显示成矿作用晚于矿化主岩的成岩作用,同位素年龄资料也说明,这类矿床是后生矿床。因此,这类矿床具有明显的层控特征,属沉积改造型矿床。其成矿物质主要来自沉积作用形成的矿源层,成矿流体来自改造后的大气降水或建造水。

(3) 成矿作用具有相似的温度、压力条件。矿床都发育了一套代表低温环境形成的矿物共生组合,都遭受了近矿热液蚀变作用。金呈显微、次显微状赋存在黄铁矿、毒砂等载金矿物内。

不同矿床地球化学类型的金矿床之间的差别,主要表现在:

(1) 含金建造的岩性、岩性组合及其形成的沉积相不同。

金-锑-黄铁矿型金矿床的含金建造是在海陆交互相(滨岸潮坪相、滨海潮坪相)环境下形成的火山沉积建造,其岩性为火山-陆源碎屑岩和陆源碎屑岩;金-汞-(铊)型金矿床的含金建造是在局限-半局限台地浅海相环境下形成的碳酸盐岩-粘土岩建造,其岩性为不纯的碳酸盐岩和粘土岩;金-砷-(锑)型金矿床的含金建造是在广海盆地边缘斜坡(主要为下斜坡)相环境下形成的浊流沉积建造,其岩性为浊流沉积岩。

(2) 卡林型金矿床与锑、汞、砷矿床之间在空间上表现出密切的伴生关系,不同矿床地球化学类型的金矿床,其赋存的矿带不同。金-锑-黄铁矿型金矿床常出现在锑矿带(田)内;金-汞-(铊)型金矿床产于汞(铊)矿带(田)内;金-砷-(锑)型金矿床产于雄黄-(锑)矿带(田)内。

(3) 不同矿床地球化学类型的金矿床,其主要的载金矿物不同。金-锑-黄铁矿型金矿床的载金矿物主要为黄铁矿,其次是毒砂,且黄铁矿的金含量高,毒砂的金含量低;金-汞-(铊)型金矿床,其主要载

金矿物是黄铁矿,其次为方解石、白云石;金-砷-(锑)型金矿床的载金矿物主要是毒砂,其次是黄铁矿和粘土矿物,且毒砂的金含量高于黄铁矿的金含量。

(4) 不同矿床地球化学类型的金矿床,在矿物共生组合方面也有差别。金-锑-黄铁矿型金矿床的矿物共生组合特点表现为:① 除卡林型金矿床常见的矿物外,普遍见到萤石、磁铁矿和钛铁矿;② 矿床的辉锑矿含量高,往往可构成工业矿体;③ 含砷矿物主要是含砷黄铁矿和毒砂,极少发现雄黄、雌黄,至今未找到自然砷。金-汞-(铊)型金矿床的矿物共生组合特点是:① 碳酸盐类矿物(方解石、白云石)和黄铁矿含量较高;② 出现较多的辰砂,可能还存在红铊矿等含铊矿物;③ 雄黄、毒砂含量低,未发现自然砷。金-砷-(锑)型金矿床的矿物共生组合特征是:① 矿床内出现较多的雄黄、雌黄和自然砷,自然砷是这类矿床的标型矿物,其成分是  $w(\text{As})$  98.09%,  $w(\text{Sb})$  0.5%,  $w(\text{Fe})$  0.15%,  $w(\text{Ni})$  0.0015%,  $w(\text{Au})$   $0.22 \times 10^{-6}$ 。② 富含有机碳(0.11%~0.20%),它们多呈干酪根形式存在,干酪根的成分为:碳(质量分数,下同) 72.58%~83.60%,氢 0.71%~2.18%,氧 2.54%~9.11%,氮 0.39%~0.84%。③ 矿床中常常出现辉锑矿,但其含量低,未发现辰砂等含汞矿物。

(5) 不同矿床地球化学类型的金矿床,其成矿流体的物理化学性质及其来源不同。金-锑-黄铁矿型金矿床的成矿流体,其 pH 值为 5.4~6.77,  $E_h$  值较高,它们是改造后的大气降水与岩浆演化成的流体混合形成的热液。金-汞-(铊)型金矿床的成矿流体,其 pH 值为 5.0~7.5,  $E_h$  值较高,它们是改造后的大气降水与地层建造水混合形成的热液。金-砷-(锑)型金矿床的成矿流体,其 pH 值为 3.6~5.2,  $E_h$  值较低,它们是封存于地层内的建造水(为主)与改造后的大气降水(其次)混合形成的热液。

## 4 Sedex 型铅锌矿床的矿床地球化学类型

Sedex 型铅锌矿床是以沉积岩为围岩主岩的层状铅锌矿床,其储量超过全球铅锌储量的 50% (Cook et al., 2000),这类矿床的成因类型属喷流沉积型矿床。根据其成矿流体的化学性质,可以将它们划分为两种矿床地球化学类型,即 McArthur 型矿床和 Selwyn 型矿床。

作为同一成因类型的矿床,它们具有共同的成

因标志。主要表现为:

(1) 矿体产状特征相同。矿体主要呈层状、似层状产于沉积岩系中,元古界和古生界沉积岩是矿化主岩。

(2) 矿床的成矿流体是赋存在矿化主岩内的热卤水,成矿物质来自沉积作用形成的矿源层。因此,它们具有典型的层控型(沉积改造型)矿床的特征。

(3) 矿石的矿物共生组合特征类似。矿石的矿物组成简单,主要为闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、少量的黄铜矿和硫酸盐类矿物。闪锌矿含量明显高于方铅矿。

(4) 矿物流体包裹体测温资料表明,两类矿床的成矿温度接近,具中低温热液矿床的成矿温度(150~250℃);成矿流体的盐度相同,  $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  为 10%~25%。

McArthur 型矿床和 Selwyn 型矿床在反映成矿作用的地球化学属性的某些地质特征上,存在着明显的差别。

① 虽然两类矿床的成矿流体均为产于沉积盆地内的热卤水,但形成热卤水的沉积建造不同。Selwyn 型矿床的成矿热卤水产于开阔海盆或大陆斜坡的浊积岩建造,其主要的岩性和岩石组合为含黄铁矿和碳质的硅铝质碎屑岩和页岩,可能含有碎屑状或新生的云母和粘土;McArthur 型矿床的成矿热卤水为产于氧化的海底裂谷沉积建造,其岩性及岩性组合主要是碳酸盐岩、蒸发岩、赤铁矿砂岩和页岩。

② 两类矿床蚀变矿物和微量元素含量特征不同。Selwyn 型矿床都含有重晶石、磁黄铁矿和白铁矿,只在某些矿床中见到少量的菱铁矿和含铁的碳酸盐类矿物;McArthur 型矿床则普遍出现菱铁矿和含铁的碳酸盐类矿物,它们产于矿体上盘和下盘的沉积岩内,构成矿体的蚀变晕。

Selwyn 型矿床往往出现 Au、Sn 和 Ba 的高含量,有时可能出现矿石级的金,在磁黄铁矿富集部位,出现锡的高含量;McArthur 型矿床不存在 Au、Sn 和 Ba 的高含量。

③ Selwyn 型矿床常常发育喷流孔和指状脉,喷流孔附近堆积了与喷流作用有关的生物群,表明这类矿床普遍存在硫化物的供给系统;McArthur 型矿床没有喷流孔和指状脉,缺失硫化物的供给系统。

④ 两类矿床的成矿热卤水的化学性质不同。Selwyn 型矿床的成矿流体是酸性的还原型(以  $\text{H}_2\text{S}$  为主)热卤水;McArthur 型矿床的成矿流体是弱酸

性至弱碱性的氧化型(以  $\text{SO}_4^{2-}$  为主)热卤水。

⑤ 两类矿床的规模和矿石品位有区别。由于 Pb、Zn 等成矿元素容易在氧化型热卤水中进行搬运, Ba 容易在酸性的还原型热卤水中进行搬运。因此, Selwyn 型矿床普遍含有重晶石, McArthur 型矿床可以形成大吨位高品位矿床。据 Cooke 等(2000)统计,大部分的 McArthur 型矿床是大吨位( $30 \times 10^6 \sim 500 \times 10^6$  吨)的矿床, Selwyn 型矿床的规模较小,一般为  $5 \times 10^6 \sim 80 \times 10^6$  吨。

## 5 讨 论

(1) 矿床地球化学类型研究对成矿物质和成矿流体来源和性质的认识,将深化和提高矿床成因类型研究程度。

① 成矿物质来源是矿床成因类型研究的主要内容,是矿床成因分类的重要依据之一。按照矿床成因类型的研究,浅成低温热液型金矿床,其成矿物质来自矿床深部与火山活动有关的岩浆岩。岩浆期后高温热液型石英脉状黑钨矿矿床,其成矿物质来自壳源重熔岩浆形成的花岗岩。沉积岩为主岩的微细浸染型(卡林型)金矿床,其成矿物质来自沉积作用形成的含金沉积建造(矿源层)。Sedex 型铅锌矿床,其成矿物质来自矿源层。

通过对成矿作用地球化学表征特征的各种标志研究,矿床地球化学研究获得了新的、更深刻的认识:酸性-硫酸盐型金矿床的成矿母岩是产于破火山口及其附近断裂内的次火山岩;冰长石-绢云母型金矿床的成矿母岩是隐伏于矿床深部的侵入岩;钨-铍-钼-铋型石英脉状黑钨矿矿床的成矿母岩是黑云母-白云母演化序列的花岗岩;钨-锡-硫化物型石英脉状黑钨矿矿床的成矿母岩是黑云母-锂云母演化序列的花岗岩;金-锑-黄铁矿型金矿床的成矿物质来自裂谷带发展的裂陷初期,于海陆交互相形成的火山沉积建造;金-汞-(铊)型金矿床的成矿物质来自裂谷带发展的扩张沉陷时期,于局限-半局限台地浅海相形成的碳酸盐岩-粘土岩建造;金-砷-(锑)型金矿床的成矿物质来自裂谷带发展强烈沉陷时期,形成于广海盆地边缘斜坡相的浊流沉积建造;Selwyn 型铅锌矿床的成矿物质来自广海盆地或大陆斜坡相带沉积的浊积岩建造;McArthur 型铅锌矿床的成矿物质来自海底裂谷的沉积建造。

(2) 对成矿流体性质的认识也不局限在其来源

上,如认为是岩浆分异演化产生的高温热液(石英脉状黑钨矿矿床)、低温热液(浅成低温金矿床)、赋存于沉积岩内的建造水(微细浸染型金矿床)和热卤水(Sedex 型铅锌矿床)等等。

矿床地球化学类型研究表明,酸性-硫酸盐型金矿床的成矿流体是  $f(\text{S}_2)$  和  $f(\text{O}_2)$  较高的酸性低温热液;冰长石-绢云母型金矿床的成矿流体是  $f(\text{S}_2)$  和  $f(\text{O}_2)$  较低的弱碱性低温热液;钨-铍-钼-铋型黑钨矿矿床的成矿流体是  $f(\text{S}_2)$  较低,  $f(\text{O}_2)$  较高的弱碱性高温热液;钨-锡-硫化物型黑钨矿矿床的成矿流体是  $f(\text{O}_2)$  较低,  $f(\text{S}_2)$  较高的高温热液;金-锑-黄铁矿型金矿床的成矿流体是改造后的大气降水与岩浆活动演化成的流体混合成的低温热液,其 pH 值为 5.4~6.77,  $f(\text{O}_2)$  较高;金-汞-(铊)型金矿床的成矿流体是改造后的大气降水与地层建造水混合成的低温热液,其 pH 值为 5.0~7.5,  $f(\text{O}_2)$  较高;金-砷-(锑)型金矿床的成矿流体是以地层建造水为主,大气降水为辅的混合型低温热液,其 pH 值为 3.6~5.2,  $f(\text{O}_2)$  较低;Selwyn 型铅锌矿床的成矿流体是酸性还原型(以  $\text{H}_2\text{S}$  为主)热卤水;McArthur 型铅锌矿床的成矿流体是弱酸性至弱碱性氧化型(以  $\text{SO}_4^{2-}$  为主)热卤水。

(3) 矿床地球化学类型研究在地质勘查评价中的意义

根据矿床或矿化的原生分带规律或成矿序列理论开展找矿预测是一项重要的地质工作。笔者认为,由于不同矿床地球化学类型的矿床具有独自の矿化原生分带和矿化共生组合规律。因此,矿床地球化学类型的确定是运用矿床原生分带或成矿序列开展找矿预测的基础和前提。

据 Heald 等(1987)的研究,不仅在酸性-硫酸盐型金矿床中含有较高的铜,出现硫砷铜矿和铜蓝等铜矿物,在矿床的深部,常常隐伏着斑岩型铜矿床,形成“上金下铜”的矿化原生分带。冰长石-绢云母型金矿床的深部不存在斑岩型铜矿床。因此,在浅成低温热液型金矿区开展找矿预测时,只有确定其矿床地球化学类型属于酸性-硫酸盐型金矿床,才能预测其深部具备形成斑岩型铜矿床的条件,有望找到隐伏矿床。

二十世纪六十年代中期,中国钨矿地质人员总结的地表标志带(“五层楼”)和隐状花岗岩顶突是判别脉状黑钨矿矿床的“顶”与“底”,据此开展找矿预测与评价工作。通过矿床地球化学类型研究,笔者

发现,只有钨-锡-硫化物型石英脉状黑钨矿矿床才具备“五层楼”演变规律,适合运用地表标志带进行找矿预测。钨-铍-钼-铋型石英脉状黑钨矿矿床不发育“五层楼”演变规律,不能根据标志带进行找矿预测。目前,运用标志带进行找矿预测取得成效的矿区无一不是钨-锡-硫化物型的黑钨矿矿床(漂塘、锯板坑、梅子窝、新安子、黄沙、上坪和石雷等)。

石英脉状黑钨矿矿床附近或深部存在花岗岩型钽铌矿床,它们构成花岗岩成矿序列。根据笔者研究,只有钨-锡-硫化物型石英脉状黑钨矿矿床的附近或深部,才可能存在花岗岩型钽铌矿床(湖南邓阜仙、香花铺、江西葛园、新坊、广西栗木等矿区),可以开展隐状的花岗岩型钽铌矿床找矿预测。

如前所述,大部分的 McArthur 型铅锌矿床是大吨位高品位矿床, Selwyn 型矿床的规模较小。中国的微细浸染型金矿床找矿实践表明,达到大型或超大型矿床规模的矿床,其矿床地球化学类型属于金-砷-(锑)型金矿床(烂泥沟、东北寨等)。金-汞-(铊)型金矿床和金-锑-黄铁矿型金矿床的规模较小。

矿物共生组合、标型矿物和微量元素含量特征是划分矿床地球化学类型的重要依据,也是重要的找矿标志和评价准则。

华南地区石英脉状黑钨矿矿床地表标志带内的锡石、黄玉、毒砂及含锂的云母类矿物是钨-锡-硫化物型黑钨矿矿床的标型矿物,也是重要的找矿标志。江西大龙山、湘南瑶岗仙等钨-铍-钼-铋型矿床的地表出现含黄玉、锡石和毒砂等矿物,这些矿床深部存在钨-锡-硫化物型黑钨矿脉,经矿山坑道揭露,瑶岗仙钨矿床深部发现达大型规模的钨锡矿床(501 脉带和 510 脉带),大龙山矿区的深部(280 中段以下)也找到含钨锡矿化的石英脉。

福建紫金山金矿区存在内生明矾石,据此,确定该金矿床的矿床地球化学类型属于酸性-硫酸盐型金矿床。根据酸性-硫酸盐型金矿床的找矿模式,预测深部存在斑岩型铜矿床。找矿实践表明,紫金山矿区已成为闻名全国的金铜矿床。

中国扬子地块西南缘和西北缘的沉积岩为主岩的微细浸染状金矿床,分别是根据地表的锑(戈塘、

马雄、革挡、高龙)、汞(铊)(紫木冲、水银洞等)和砷(锑)(金牙、烂泥沟、东北寨等)矿点开展找矿预测,实现找矿的重大突破。Cooke 等(2000)提出,发育于矿体周边的菱铁矿和铁碳酸盐蚀变晕圈,是 McArthur 型铅锌矿床的良好勘查标志。普遍出现于 Selwyn 型铅锌矿床内的重晶石则是这类矿床的找矿标志和评价准则。

多年来,笔者从事矿床地球化学研究,实践使笔者相信,矿床地球化学类型是客观存在的现实,在矿床成因研究和地质找矿预测中具有重要的意义。当然,本次研究还很不完善,也不够深入,有待于进一步深化和完善。但只要认识到矿床地球化学类型是客观存在,并不断使之完善和充实,使之成为一种新的理论,自会水到渠成。

## References

- Cook D R, Bull S W, Larce R R and McGoldrick P J. 2000. The importance of oxidized brines for formation of Australian proterozoic stratiform sediment-hosted Pb-Zn (Sedex) deposits [J]. *Econ. Geol.*, 95(1):1-17.
- Heald P, Fbley N K and Hayba D O. 1987. Comparative anatomy of volcanic-hosted epithermal deposits: Acid-sulfate and adularia-hosted type [J]. *Econ. Geol.*, 82(1):1-23.
- Tan Y J. 1982. Geochemical type of vein-type wolframite deposits in NanLing region[J]. *Geochemical*, (2):155-161 (in Chinese with English abstract).
- Tan Y J. 1986. The garnetization of quartz-vein type wolframite deposits [J]. *Science Bulletin*, (10): 616-619 (in Chinese)
- Tan Y J. 1994. Geochemical types of the micro-and fine-grained disseminated gold deposits in Yunnan-Guizhou-Guangxi region[J]. *Mineral Deposits*, 13(4): 308-314 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 谭运金. 1982. 南岭地区脉状黑钨矿床的地球化学类型[J]. *地球化学*, (2): 155-161.
- 谭运金. 1986. 石英脉型黑钨矿床的石榴石化[J]. *科学通报*, (10): 616-619.
- 谭运金. 1994. 滇黔桂地区微细浸染型金矿床的矿床地球化学类型[J]. *矿床地质*, 13(4):308-314.