

金矿床中毒砂标型特征及金的赋存状态 ——以湖南金矿床为例

陈明辉¹, 高利军¹, 杨洪超¹, 鲍振襄², 包觉敏²

(1. 湖南省有色地质勘查局二四五队, 湖南 吉首 416007;

2. 湘西矿产资源综合研究发展中心, 湖南 乾州 416007)

摘要: 湖南含砷金矿资源储量大, 分布广, 类型多。矿床中的砷矿物主要为毒砂, 几乎所有金矿床中的毒砂都含 Au (一般 $120 \times 10^{-6} \sim 250 \times 10^{-6}$), 且比共生的黄铁矿含 Au 量高 2~5 倍, 甚至 1 个数量级以上。毒砂中金分布率高达 64.3%~94.05%。毒砂的生成期有早、晚 2 期。化学成分为富 S 亏 As 型, 并以富含微量元素 Sb(Se)、Ni、Co 而贫 Mn 及晶胞参数 a_0 值增大等为标型特征。大多数含 Au 毒砂均含有相当数量的“不可见金”, 即使利用电子探针也难以发现。初步认为毒砂中的“不可见金”多呈纳米级微细粒状存在。

关键词: 金矿床; 毒砂; 标型特征; 纳米金; 湖南

湖南金矿床中, 含砷的金矿资源储量大, 分布广, 类型较多, 是该省金矿资源的一个极重要组成部分。含砷金矿床金的储量占全省储量的 68.2%, 占全省脉金矿床 (包括伴生金及氧化金矿) 金储量的 78.9%。这类矿床中砷资源非常丰富, 砷金属量有 25 万吨左右^①。资料表明, 矿床中含 Au 的砷矿物主要是毒砂, 属难选的一类金矿石。因此, 研究毒砂的含 Au 性及金在毒砂中的赋存状态, 对于地质勘查和选矿工艺流程的制定都具有重要的现实意义和理论意义。

1 区域成矿地质背景

湖南金矿床位于扬子与华南板块边缘接合部位及其毗邻地区, 形成沿雪峰弧形韧性剪切构造带分布的湘西钨锡砷金成矿带和沿湘中白马山-龙山-醴陵 E-W 向构造-岩浆岩带展布的锡砷金成矿带^[1,2]。从湖南深部构造看, 主要金矿床大都产在上地幔次级隆起的边缘, 即幔隆与幔凹的过渡地带。这些地带之所以对金矿成矿有利, 是因其常有深断裂通过。赋矿地层主要为中、新元古界含基性火山碎屑物的变质火山、沉积岩系和浅变质的含火山碎屑物的浊流沉积岩系, 其次为震旦系下统具重力流沉积特征的含火山碎屑物的含砾砂质板岩建造。故本文所称的湖南金矿主要是指与前寒武系浅变质岩系有关的金矿床, 也是含砷的

金矿床分布最广、类型最多、储量较大的一类金矿床。

湘西钨锡砷金矿床大多远离岩浆岩体, 与岩浆岩关系不明显, 但部分矿床 (区) 出现的成群成带分布的长英质脉岩, 则与成矿有一定的时空关系。湘中一带的锡砷金矿床多产于花岗岩体外接触带的热变质带 (晕) 内以及隐伏岩体上方, 其成矿作用、矿床成因与岩浆岩有一定关系。前者属变质热液型金矿床, 后者属于热接触变质热液型金矿床。

区域含砷的金矿床, 按矿石中矿物 (元素) 组合的不同可划分为锡砷金矿床、砷金矿床和铅锌砷多金属金矿床 3 种主要类型, 前 2 类矿床常见于前寒武系, 后者仅见于晚古生代碳酸盐岩的岩浆热液型金矿床。如水口山铅锌矿区康家湾金矿床等。

2 毒砂的标型特征

2.1 毒砂的产状和共生组合

毒砂主要有 2 种产状。其一为早期沉积-变质期形成的, 呈浸染状、密集浸染状或团块状分布于近矿蚀变围岩与石英脉边缘及其所夹的蚀变岩中, 大致与岩石劈 (片) 理平行或微斜交; 常单独出现, 少数与黄铁矿毗连, 形成毒砂-金和毒砂-黄铁矿-金组合。其二为晚期热液期形成的毒砂, 产于构造岩及石英脉中, 呈浸染状、脉状或团块状集合出现, 形成毒砂-黄铁矿-

收稿日期: 2006-11-29; 修回日期: 2006-12-24。李兰英编辑。

①余光明. 湖南含砷金矿资源及其利用. 湖南黄金, 1991, (1).

金、毒砂—黄铁矿—辉锑矿—金组合

2.2 毒砂的形成环境

(1) 形成温度:变质热液形成的毒砂,爆裂温度为 305 ~ 160℃, 平均 212℃ (11 件), 均一温度在 260 ~ 140℃ 之间, 系中低温条件下的产物。由热接触变质热液形成的毒砂,爆裂温度为 335 ~ 237℃, 平均 265℃, 磁黄铁矿 366 ~ 323℃, 平均 345℃, 相当于中偏高温条件下的产物。

(2) 晶出顺序:在矿床所有硫(砷)矿物中,一般毒砂的晶出时间最早,其晶出顺序大致是,毒砂(FeAsS) → 二硫化物(黄铁矿 FeS_2 、黄铜矿 CuFeS_2) → 多硫化物(辉锑矿 Sb_2S_3 、砷黝铜矿 CuAsS 、黝铜矿 Cu_3SbS_3) → 晚结晶的硫化物(闪锌矿 ZnS 、方铅矿 PbS)。这个演化系列表明,矿床经历了还原—氧化作用的复杂过程。但在 $\text{Pb}-\text{Zn}-\text{As}-\text{Au}$ 多金属矿床中,黄铁矿生成最早,延续时间较长,毒砂随其后,常被方铅矿、闪锌矿交代,呈骸晶结构、交代结构。由于毒砂在硫(砷)化物中晶出较早,又由于其结晶作用的机械攫取——成矿溶液中金的分散质点被正在结晶的毒砂矿物所包裹,加之因受多次构造应力作用影响,有的毒砂被碎成细粒晶粒,充填于细粒石英粒间,因而硫化物—自然金常沿毒砂的节理及裂隙进行充填交代,从而使其成为主要的载金矿物之一。

(3) 形态标型:早期形成的毒砂晶形完整,多为柱状、板柱状,横切面为菱形、楔形,颗粒较大,一般大于 0.2 mm,多数为 0.5 ~ 2 mm,大者达 1 cm 以上。早期的金矿化与变质作用形成的毒砂密切相关,并形成区内广泛分布的蚀变板岩型矿石。晚期毒砂颗粒较细且均匀,一般 0.02 ~ 0.3 mm。在该期成矿作用中, $\text{Au}-\text{As}$ 发生分离, As 以细粒毒砂先期结晶, Au 则在成矿晚期以裂隙金或粒间金析出。

2.3 毒砂的成分标型

(1) 主元素的分配:毒砂中主元素值及化学式列于表 1,从表中看出,同一矿床不同产状的毒砂成分比较稳定, Fe 、 S 、 As 的质量百分比变化都不超出其平均值的 $\pm 0.7\% \sim \pm 0.9\%$, 对应的 S/As 原子百分比变化为 $1.06 \pm 0.04 \sim 1.27 \pm 0.04$, $\text{Fe}/(\text{As} + \text{S})$ 值为 $0.49 \sim 0.52$ 。其成分 ($\text{FeAs}_{0.85}\text{S}_{1.08} \sim \text{FeAs}_{0.98}\text{S}_{1.04}$) 明显地偏离毒砂的理论值成分 ($\text{FeAs}_{1.12}\text{S}_{1-x} \leq 0.131$), 表现出富 S 亏 As 的特点,说明成矿时处于硫逸度较高的环境,以此可作为含 Au 毒砂的化学成分标型特征。

(2) 微量元素的分配:资料表明,含 Au 毒砂明显地富含 Sb 和 Ni 、 Se 等,而贫 Co 和 Ag 、 Cu 等元素,尤其是 Sb 的含量普遍较高 ($125 \times 10^{-6} \sim 246 \times 10^{-6}$), 包古图金矿毒砂中 (12 件) 平均含 Sb 高达 1.27%, 平均含 Au 高达 0.12%^[3], 实属罕见。究其原因,可能是 Sb 的地球化学性质与 As 有某些相似之处,故富 Sb 毒砂是含 Au 毒砂的重要标型之一。

2.4 毒砂的物理标型

(1) 显微硬度:据新疆齐求 I 金矿毒砂的显微硬度测定结果,含 Au 毒砂显微硬度皆低于 $950 \text{ kg}/\text{mm}^2$ ^[5], 这可能是由于阴离子亏损,使共价键力减弱所造成的。此外,毒砂中较多的裂隙金及显微包裹金的存在,也使其显微硬度偏低,而具有找矿的指示意义。

(2) 晶胞参数:利用 X 射线分析黄金洞矿床毒砂的晶胞参数,毒砂的 b_0 (0.56600 nm)、 c_0 (0.57515 nm)、 β (113.382°) 等晶胞参数较理论毒砂的小,而 a_0 (0.57522 nm) 则较大^[4]。这可能是由于 As 的共价半径较 S 大,毒砂的晶胞参数相对富 S 而贫 As ,致使 b_0 、 c_0 及 β 等的晶胞参数偏小,而 a_0 的增大可能是含 Au 毒砂的标型特征。

(3) 热电性:齐求 I 金矿毒砂热电性测量结果表

表 1 毒砂的电子探针分析结果

Table 1 Microprobe analysis result for arsenopyrite

矿床	样品数	地层代号	Fe	S	As	合计	$\text{Fe}/(\text{As} + \text{S})$	S/As	计算分子式	资料来源
湖南泥潭冲	5	Pt hnw	34.300	20.509	45.072	99.879	0.49	1.06	$\text{FeAs}_{0.98}\text{S}_{1.04}$	本文
湖南江溪垄	1	Pt hnw	33.66	20.74	45.69	100.09	0.51	1.05	$\text{FeAs}_{1.01}\text{S}_{1.66}$	本文
湖南黄金洞	5	Pt hn ₁	36.11	22.49	41.21	99.72	0.52	1.27	$\text{FeAs}_{0.85}\text{S}_{1.08}$	刘英俊等
湖南杏枫山	1	Pt bnw	35.38	21.59	41.68	98.45	0.50	1.21	$\text{FeAs}_{0.88}\text{S}_{1.09}$	00515 队
湖南康家湾	4	P ₂ d	34.82	20.79	44.39	100.00	0.50	1.10	$\text{FeAs}_{0.95}\text{S}_{1.04}$	217 队
广东新洲	1	Z ₂	38.201	21.766	39.403	99.37	0.57	1.30	$\text{FeAs}_{0.12}\text{S}_{0.99}$	
云南祥云	5	O ₁ x	36.220	19.150	44.594	99.964	0.50	1.08	$\text{FeAs}_{0.92}\text{S}_{0.92}$	普传杰等
黑龙江老柞山	20	Pt ₁ d	33.49	20.38	46.58	99.45	0.499	1.03	$\text{FeAs}_{1.06}\text{S}_{1.03}$	赵海鹏等

含量单位: 10^{-2} 。

明,其热电系数与 Au 矿化关系尚不十分清楚^[5],这可能是因为毒砂系半导体矿物,当受到热扰动后,可以产生热电动势。但是在同一粒级的毒砂中,存在着热电系数愈大,含 Au 性愈好的趋势。故当毒砂粒度差别不大时,热电系数值大,有可能指示矿体之存在。

(4) 电子顺磁共振 (EPR) 波谱:据泥潭冲金矿含 Au 毒砂与香花岭锡矿不含 Au 毒砂的电子顺磁共振波谱测量结果^①,发现除某些样品在 3400 GS 附近出现 g 因子约为 2 的吸收峰外,还有一些样品并无此峰出现,且此峰的强度与 Au 含量无关。

此外,在含 Au 与不含 Au 毒砂中均出现 $g \approx 4$ 的尖谱,从本区毒砂所含杂质离子种类及价态分析,很可能系 Co^{2+} 引起。

2.5 毒砂的硫同位素组成特征

区内含 Au 毒砂的硫同位素组成的一个显著而重要的特征是均较富集轻硫同位素, $\delta^{34}\text{S}$ 为 $-8.9 \times 10^{-3} \sim 3.20 \times 10^{-3}$, 平均 -2.24×10^{-3} (31 件), 极差 12.1×10^{-3} 。毒砂的含 Au 性与 $\delta^{34}\text{S}$ 值间存在一定的相关关系。原因是这种硫同位素组成的硫(砷)化物是在氧化程度较高的热液体系中,由氧化还原反应形成的,故其氧逸度升高,沉淀的硫(砷)化物必然富集 ^{32}S 。从而表明 Au 与毒砂是同时或稍晚时形成的,并可作为含 Au 毒砂硫同位素组成的标型特征。

2.6 载金毒砂形成机制

研究表明,砷化物矿物和含砷硫化物矿物与金的矿化沉淀具有极其密切的共生关系。实验证明,在含有 As 组分的硫化氢溶液中, Au 的溶解度随 As 含量的增加成正比增长,在弱酸性—近中性条件下形成 $\text{H}_2\text{Au}(\text{Sb}, \text{As})\text{S}_3^0$ 和 $\text{HAu}(\text{Sb}, \text{As})\text{S}_3^-$ 杂多核络合物进行迁移^[6]。在 Au、As 共沉淀过程中, Au 被氧化、As 被还原所构成的氧化—还原热力学机制,是砷化物矿物和含砷硫化物矿物捕获 Au 的有效途径。故 Au 优先富集于砷化物矿物(毒砂)和含砷硫化物矿物(如含砷黄铁矿)中。杨山庄金矿毒砂含 Au 高达 454.66×10^{-6} (1 件),砷黄铁矿含 Au 204.30×10^{-6} (3 件),黄铁矿含 Au 83.2×10^{-6} (4 件),就是实际例证。

3 毒砂的含金性与金的分布率

毒砂在金矿床中分布很广,且含 Au 量亦较高(表 2),同一矿床(区)毒砂中 Au 含量变化不大,如龙王江砷金矿区的泥潭冲、江东湾、江溪垄、白竹坪等矿床

毒砂中 Au 含量一般在 $122 \times 10^{-6} \sim 236 \times 10^{-6}$ 之间,最低 80.2×10^{-6} ,最高 332×10^{-6} ,平均 $155 \times 10^{-6} \sim 204 \times 10^{-6}$,矿区平均 168×10^{-6} (38 件),标准差 6.30,变异系数 36.6%。毒砂是矿区载金硫(砷)化矿物(包括黄铁矿、辉锑矿)中 Au 含量最高、亦是变化最稳定的载体矿物,显示了 Au 在毒砂中的分布是比较均匀的。同时,与共生的黄铁矿相比,毒砂的 Au 含量较黄铁矿的 Au 含量高 1 个甚至 2 个数量级。如广西金牙金矿毒砂含 Au $217 \times 10^{-6} \sim 1065 \times 10^{-6}$,共生的黄铁矿 Au 含量仅 $1.2 \times 10^{-6} \sim 35.8 \times 10^{-6}$ [7]。虽然黄铁矿和毒砂在晶体结构上非常相似,但 As 含量却有很大差别,从而导致其 Au 含量亦有较大差别,即 Au 优先富集于砷化矿物(包括含砷黄铁矿)中。

据矿石矿物中金的平衡配分计算结果,以毒砂为主要载金矿物的各类金矿的毒砂中, Au 的分布率为 64.3% ~ 94.05% (见表 2),这足以佐证毒砂为最重要的金的载体矿物。此外,龙王江砷金矿区金的平衡配分计算结果表明,0.1 个百分点的毒砂含量变化,可引起 3% ~ 6% 的金的配分率的变化。由此可见,砷金一类矿床决定金回收率的关键在于毒砂矿物的回收。

4 毒砂中金的赋存状态

从前述可知,毒砂在湖南金矿床中分布甚广,几乎所有分析过的毒砂均含有相当数量的金。且金与毒砂的共生关系比金与黄铁矿的共生关系密切得多。然而,毒砂中的金大部分为“不可见金”,即金的质点为小于 $0.1 \mu\text{m}$ 的“不可见金”。这类金不仅在光学显微镜下无法找到,即使利用电子探针和高倍电镜下进行金的特征 X 射线扫描亦未发现独立金矿物富集区。例如,黄金洞砷金矿床,将含 Au 125×10^{-6} 的毒砂置于 JEM-2000EX 型电子显微镜下进行大面积扫描,在 Au-K α 特征 X 射线图像上未发现金的富集区。再经减薄制作,在该电镜透射系统下,放大 10 万倍进行观察,亦未发现金的微粒存在^[4]。由此引发了金在毒砂中赋存形式的不同认识。一种认为金呈超显微颗粒或机械混入物形式存在;一种认为金呈固溶体或固溶体分散金形式存在;还有一种认为 Au^+ 以类质同像置换 Fe^{2+} 或 Au 置换毒砂结构中 $[\text{Fe}^{3+}(\text{As}-\text{S})^{3-}]$ 的 As 而进入。针对以上认识,作者从多方面进行了分析和研究。

据杏枫山砷金矿石的光学显微镜观察及人工重砂

①中国有色金属工业总公司矿产地质研究院矿山室,湖南有色地质勘查局二四五队,湖南溆浦龙王江金矿田中金的赋存状态、富集规律、矿床成因及远景研究, 1990

表2 各类含金矿床中毒砂含 Au 量及金的分布率

Table 2 Au content and distribution rate in arsenopyrite from As-bearing gold deposits

矿床	样品数	含量范围/ 10^{-6}	平均值/ 10^{-6}	金的分布率/ 10^{-2}	资料来源
龙山锑金矿	7	106.23 ~ 513.4	320.18	5.7	湖南冶金研究所
泥潭冲砷金矿	18	96 ~ 225	161.95	79.26	本文
江溪垄锑金矿	3	102.6 ~ 191	152.9		本文
江东湾锑砷金矿	3	120 ~ 243	155.0	90.57	本文
白竹坪砷放	5	86.2 ~ 332	204.0	94.05	本文
杏枫山砷金矿	1		121.15	93.10*	湖南冶金研究所
黄金洞砷金矿	12	626	154.75	64.3	刘英俊等
广西金牙金矿			376	85.7	韦龙明等
云南祥云金矿			214.05	56.54	普传杰等
黑龙江老柞山	14	16.13 ~ 46.12	27.79(14)	< 32.98	

金的分布率据主要矿石矿物中金分配的平衡计算结果; * 据矿石选矿试验结果计算

电子探针分析, 均未见到金矿物^①。后将矿石 (含 Au 2.56×10^{-6}) 磨至 -400 目进行化学物相分析, 其游离 Au 为 1.00×10^{-6} , 毒砂包裹 Au 为 10.8×10^{-6} , 磁黄铁矿中的 Au 为 0.30×10^{-6} , 硅酸盐中的 Au 为 0.19×10^{-6} , 这表明金的嵌布粒度是微细的, 且多包裹于毒砂中。对泥潭冲等砷金矿床矿石组合样磨至 -200 目, 用溶剂 (KI-I) 浸出样品中的单体金及连生体金, 发现金的单体解离度仅为 0.4% ~ 13.3%, 说明仅有少部分金呈易解离的裂隙金和粒间金存在。在这样低的单体解离度下, 金的回收不可能以单体金为对象, 而只能随载金矿物一起回收。继而对泥潭冲砷金矿床含 Au 166.67×10^{-6} 的毒砂, 以 25 mL HNO_3 (65%) + 75 mL H_2O 为溶剂, 在 100℃ 水温条件下, 溶解 1g 样品, 待完全溶解后, 滤出溶渣, 结果可见溶解度近于 100%。且随毒砂的溶解进入溶液的分散金 (晶格金) 的比例是极低的。在光学显微镜下检验溶液未发现金粒, 说明金以极细的颗粒存在。贵州三都砷金矿对大量毒砂黄铁矿进行的成分分像与 X 射线强度分布轮廓图分析 (共测 1000 余点), 亦未发现小于 1 μm 的独立金矿物。但从中可以看出, 毒砂中微量 Au 含量比黄铁矿多^②, 且在这 2 种矿物中的分布都是不均匀的。这种不均匀性说明金是呈超微粒状态的金粒而不是以类质同像存在的。对来自泥潭冲、广西平桂和湖南香花岭 3 个不同矿床的 6 件含 Au 与不含 Au 毒砂进行的 X 射线对比研究表明, 含 Au 毒砂与不含 Au 毒砂的 d_{131} 值并无明显差异, 其 d_{131} 值与 Au 含量亦无明显关系。这一方面说明毒砂的 X 射线衍射难以反映其 Au 含量, 也说明

毒砂中可能没有或很少晶格金。上述矿床 10 余件含 Au 与不含 Au 毒砂所作电子顺磁共振 (EPR) 波谱研究结果, 发现某些样品出现 EPR 谱的吸收波峰, 还有一些样品并无此峰出现, 且此峰的强度与 Au 含量无关。表明其晶格金的含量是很低的, 这与毒砂中金溶解度很低的事实相符。

近年来, 张振儒等人利用 H-800 型透射电镜 (附 EDA 能谱仪) 对泰国某锑金矿和我国龙山锑金矿毒砂中金的赋存状态进行的研究^[8], 发现毒砂中金主要为次显微金, 呈小的圆球链状充填在毒砂微裂隙中, 或沉淀在毒砂的晶面上, 金粒度为 $0.00083 \sim 0.027 \mu\text{m}$ 。康家湾大型铅锌砷金矿, 矿石中 77.62% 的金分布在黄铁矿和毒砂中, 在常温、常压条件下, 这部分金用氢化物溶液或碘化钾溶液很难浸出, 推测可能是呈显微金和次显微金的形式存在^[9]。

此外, 晶体化学和地球化学研究表明: ①依据类质同像条件, 毒砂矿物中的 Fe-Au、As-Au 替代是完全不可能的; ②从金的电子构型 ($5d^{10}6s^1$) 来看, 由于 Au 对最外层电子吸引力强, 具有较高的电离势, 这就决定了 Au 在自然界多以自然金的形式存在的基本性质; ③Au 的氧化还原电位很高, 表明 Au 是一种很强的氧化剂, 容易获得电子形成自然金; ④含不可见金的砷硫化物主要产于低温或中低温矿床这一事实也说明, Au 呈固溶体存在于该类型矿床是不可能的。据此推论, 毒砂中的不可见金主要是以机械分散或包裹以及次显微金形式存在, 排除了 Au 的固溶体 (类质同像) 存在的可能性。

①冶金工业部长沙矿冶研究所。湖南隆回金矿杏枫山矿区矿石选矿试验报告。1987

②魏富有。从黄铁矿中金的存在形式谈纳米科技。黑龙江地质情报 (内部刊物), 1996。

对于毒砂中金赋存形式,除上述从理论上进行探讨外,作者还试图尝试用纳米科技的观点进行探讨。纳米科技是专门研究微观状态(原子、离子)与宏观状态(体相物质)及其应用的科学。纳米科技研究物质大小范围是 0.1~100 nm 之间,这种尺寸大小的物质称超微粒子或纳米粒子。上述砷金类型矿床毒砂中金的粒径大都小于 10~15 μm ,正是纳米微粒研究范围。据此,结合金在毒砂中的分布特点推测,这种在毒砂中既不呈微观状态的类质同像也不呈宏观状态(非结构金)的次显微金存在的纳米级微粒,很可能是呈颗粒与原子、离子金之间的超微粒状态,即纳米金存在^{[10]①}。可以认为,湖南砷金类型的矿床毒砂中的“不可见金”,主要是呈纳米金(矿物金)而非“晶格金”形式存在。

5 结语

综合上述,金矿床中具自形、半自形柱状、板(柱)状及他形粒状等晶体形态的毒砂,其化学成分为富 S 亏 As 型,并含微量元素 Sb (Se) 及 Ni 而贫 Mn,晶胞参数 a_0 增大,以及较富集轻硫同位素等特点,为载金毒砂的主要标型特征。

毒砂在湖南的金矿床中分布甚广, Au 的含量和分布率也相当高。在同一矿区(床),不同产状的毒砂含 Au 性比较均一,且明显地比与之共生的黄铁矿含 Au 量高,表明 Au 优生富集于毒砂中。毒砂中的金主要为“纳米粒子”的“矿物金”(纳米金),而非晶格金。由于毒砂中的不可见金为非类质同像产出的自然金(纳米金),这十分有利于 Au 的提取。

总之,毒砂中金赋存状态的研究,不仅是对矿石中 Au 含量高低和存在形式的研究,更重要的是通过赋存形式的研究,为选矿工艺流程找出更为有效的方法提供可靠的依据。

限于野外队工作条件和作者理论水平,文中错误与不妥之处尚请专家、学者和地质界广大同仁不吝赐教。

参考文献:

- [1] 鲍振襄,万榕江,包觉敏. 湘西浅变质岩系中锑砷金矿床成矿系列[J]. 黄金地质,1999,3(3): 41-47.
- [2] 鲍振襄. 湘中白马山-龙山-醴陵金矿床地质特征、成矿作用及成因[J]. 黄金地质科技,1994,2(4): 29-35.
- [3] 齐进英,熊义大. 新疆包古图金矿床特征及其成因[J]. 矿床地质,1992,11(2): 154-164.
- [4] 刘英俊,马东升. 湖南黄金洞金矿床中的赋存状态研究[J]. 地质找矿论丛,1989,4(1): 42-49.
- [5] 胡大千. 新疆齐求 1 金矿床毒砂找矿矿物学研究[J]. 矿物学报,1991,(1): 70-78.
- [6] 涂光炽. 金矿地质若干问题[A]. 见:涂光炽,霍明远,编. 金的经济地质学[C]. 北京:科学出版社,1991: 62.
- [7] 钱定福,李玉衡,李志生,等. 金牙金矿床金的赋存状态研究[J]. 地质论评,1988,34(4): 361-368.
- [8] 张振儒,王卿铎,廖凤先,等. 次显微金在毒砂中的赋存状态[J]. 桂林冶金地质学院学报,1991,11(2): 150-153.
- [9] 红钢. 康家湾铅锌矿中伴生金银的性质对选矿工艺的影响[J]. 有色金属(选矿部分),2001,(1): 1-5.
- [10] 鲍珏敏,万榕江,鲍振襄. 湘西泥潭冲锑砷金矿地质特征及成因机制新探[J]. 湖北地矿,1999,13(1): 20-27.

TYPOMORPHIC CHARACTERISTICS OF ARSENOPYRITE IN GOLD DEPOSIT AND OCCURRENCE OF GOLD: A case study of gold deposits in Hunan Province

CHEN Ming-hui¹, GAO Li-jun¹, YANG Hong-chao¹, BAO Zhen-xiang², BAO Jue-min²

(1. No. 245 Team, Hunan Bureau of Geology Exploration for Nonferrous Metals, Jishou 416007, Hunan Province, China; 2. Western Hunan Research and Development Center for Mineral Resources, Qianzhou 416007, Hunan Province, China)

Abstract: As-bearing gold deposits in Hunan Province are broadly distributed, with large reserves and multiple types. The main As mineral is arsenopyrite, which in most of gold deposits contains Au (generally 120×10^{-6} to 250×10^{-6}). The Au content in arsenopyrite is two to five times higher than that in the coexisting pyrite or more. The Au distribution rate in arsenopyrite is up to 64.3% - 94.05%. The arsenopyrite was formed in two stages. It is chemically enriched in S and depleted in As, with rich Sb(Se), Ni and Co, poor Mn, and increased of unit cell parameter (a_0). Most of the Au-bearing

(Continued on Page 119)

①魏富有. 从黄铁矿中金的存在形式谈纳米科技. 黑龙江地质情报(内部刊物),1996.

出,自 1975~2004 年,该地区降雨量呈缓慢下降趋势,而该地区平均蒸发量却呈上升的趋势,因此,气候、水文等自然因素的影响,导致湖水亏损量累计值保持递增的趋势,也是导致湖水水位下降的根本原因。

(3) 卧龙湖流域多年平均地表径流资源为 $7.5 \times 10^7 \text{ m}^3$,湖泊降水量 $5.8 \times 10^7 \text{ m}^3$,地下水入湖补给量为 $1.7 \times 10^7 \text{ m}^3$,湖体水面蒸发量为 $18.5 \times 10^7 \text{ m}^3$,卧龙湖每年亏水量约为 $3.5 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。

(4) 人类大量的活动导致卧龙湖周边的生态环境的破坏是湖水水位下降另一个主要原因。

参考文献:

- [1] 杨志峰,等. 生态环境需水量理论、方法与实践[M]. 北京: 科学技术出版社,2003.
- [2] 于得水. 卧龙湖湿地生态系统恢复与保护对策[J]. 中南林业调查规划,2004,(1).
- [3] 刘昌明. 西北地区水资源配置生态环境建设和可持续发展战略研究·生态环境卷[M]. 北京: 科学出版社,2004.
- [4] 燕华云. 青海湖水量平衡分析与水资源优化配置研究[J]. 湖泊科学,2003(1).
- [5] Vepraskas M J, Huffman R L, Kreiser G S. Hydrologic models for altered landscapes[J]. Geoderma, 2005.

ENVIRONMENTAL EVOLUTION AND GENETIC ANALYSIS OF THE WOLONG LAKE WETLAND IN LIAONING, CHINA

ZHANG Fu-qun^{1,2,3}, SUN Li-na², JIN Cheng-zhu¹, LIU Bing-xin³, NI Qing-wei⁴

(1. Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. Shenyang University, Shenyang 113001, China; 3. Shenyang Institute of Chemical Technology, Shenyang 110042, China; 4. Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning Province, China)

Abstract: Based on the study on the data from observing and measuring between 1975 and 2004 for the Wolong Lake, the historical evolution of the wetland is analyzed. The water table changing trend of the Wolong Lake in the 29 years and the causes of the drop-off are studies. The water balance in the lake area is calculated according to the fundamental situation and monitoring data of the Wolong Lake wetland and its catchments area. It is proved that the water table drop-off and the water volume reducing in the lake for approximately three decades are resulted from the natural factors and man-induced factors such as climate, hydrology and so on.

Key words: the Wolong Lake wetland; environmental evolution; genetic analysis; calculation of water balance

作者简介: 张福群(1973—),男,满族,讲师,博士研究生,2004 至今在东北大学资源与土木工程学院矿产普查与勘探专业攻读博士学位,主要研究方向生态环境、地质灾害方面等。

通讯作者: 孙丽娜,女,教授,E-mail//zhangfuqun_11@163.com

(Continued from Page 106)

arsenopyrite contains invisible gold, which cannot be found even by electron microprobe. The invisible Au in arsenopyrite mostly occurs as nanometer fine grains.

Key word: gold deposit; arsenopyrite; typomorphic characteristics; nanometet gold; Hunan Province

作者简介: 陈明辉(1973—),男,湖南龙山人,工程师,1991 年毕业于湖南有色金属工业学校,2002 年毕业于湘潭大学,从事矿产地质勘查工作,通信地址 湖南省吉首市乾州新建路 1 号,邮政编码 416007.