

黄金科技丛书

金银矿产选集

第十集

冶金工业部黄金情报网
冶金工业部长春黄金研究所

一九八八年七月

89·2·25

目 录

1、原生金矿的若干找矿标志·····	张维根 (1)
2、黄铁矿中晶格金的萃取实验及其问题的初步研究·····	陈 伟 张振儒 (11)
✓3、我国银矿床的元素建造系列及其找矿意义·····	洪全益 王大伟 张术根 (17)
4、试论中国环太平洋金矿成矿带的特征及找矿方向和方法问题·····	徐光荣 (24)
5、试论黄金与货币的关系·····	郭贤才 (36)
6、当代中国的黄金地质科学研究·····	王先儒 (45)
7、金矿的重要找矿、评价指标—因子计量·····	吴 军 (55)
8、物化探在金矿普查中的应用·····	周永峰 (62)
9、黄铁矿可以提供找金信息·····	季文明 (67)
10、黄铁矿的热电性及其找矿意义·····	崔艳合 (73)
11、从金矿床发现看其发现方法·····	孙培基 (86)
12、吉林夹皮沟地区地球化学场的特征及成矿预测·····	叶胜勇 (92)
13、河北峪耳崖金矿矿床地质特征和成因探讨·····	魏 军 (103)
14、河北赤城金家庄金矿地质特征及找矿标志·····	彭 岚 谢家平 (108)
15、山东焦家金矿的矿床地球化学·····	王鹤年 汪 耀 (115)
16、小秦岭金矿床成因矿物学的研究及其实际意义·····	方耀奎 (122)
17、潼关小秦岭自然金和金的互化物标型特征及对脉体含金性的评价意义 ·····	叶 芳 李映琴 (130)
18、陕西秦巴地区金矿主要类型及成矿控制因素·····	陈代忠 朱松彬 (138)
19、安徽怀宁白岭金矿物质组分及金的赋存状态·····	周文雅 许德明 (145)
20、湖南益阳南郊“狗头金”形成的地质地球化学背景及可能途径·····	罗献林 (156)
21、黔西南地区不同成矿系列中金的地球化学特征·····	车 忠 (167)
22、再论黔西南微细浸染型金矿特征·····	刘觉生 (178)
23、广东河台金矿床主要矿物组合及金的赋存状态····· ·····	邓 璟 杜金龄 姚德贤 郭一曲 (195)
24、广东河台金矿黄铁矿中微量元素的初步研究·····	陈 伟 张振儒 (200)
25、云开变质带与金矿带的板块构造成因初探·····	朱义年 (207)
26、浙江冶岭头金矿床矿物标型特征及成矿机理·····	陈天虎 林文通 (214)
27、地球化学土壤测量在苗龙金矿上的应用效果·····	汪修经 粟玉龙 (232)
28、内蒙白云鄂博金矿成矿地质特征与富集规律·····	郭砚田 吴禄祥 (238)
✓29、斑岩型银矿床的控矿地质条件·····	B. B. 波塔皮叶夫 (257)
30、火山岩区的银矿建造·····	M. M. 康斯坦季诺夫 A. A 西多罗夫 (265)
31、青海省伴生金矿的成矿类型及特征·····	田耀亭 (272)
32、附：《金银矿产选集》1984—1988年总目录 (一一十集)·····	(279)

原生金矿的若干找矿标志

张 维 根

(冶金部山西地质勘探公司)

原生金矿中的自然金颗粒一般极细,含量又少,肉眼不易察觉,但是,由于金具有特殊的地球化学性质,并由这种地球化学性质所决定的特有的矿物组合、围岩蚀变、载金矿物的标型特征及成矿富集规律,使我们有可能利用这些特征和规律判断金矿化的存在,从而指导找矿。这些特征与规律可以统称为找矿标志。现将原生金矿的若干找矿标志综合整理如下。

一、矿源层标志

一般认为,金矿形成有三个因素,即有无有利成矿的矿源层(或矿源岩)、有无有利成矿的热源体和有无容矿的构造条件。

由于金元素比重大,亲铁亲硫,绝大部分集中于铁硫为主要成分的地核内,在地壳中含量极微且又分散,其克拉克值为 3.5ppb ,要使它在地壳中成为一个具有最低工业品位的矿床,必须要富集一千倍以上。这是很不容易的。所以,金矿的形成除了其它条件外,还要有含金较高(几十至几百 ppb)的母体,即矿源层。不同地质时代有不同的矿源层,但最有意义的是太古代绿岩带。太古代绿岩带中的原生金矿及由其产生的古砂金矿与现代砂金矿占了世界金矿储量的三分之二以上,所以有人把太古绿岩带称为“金矿带”不是没有道理的。

所谓绿岩带是指一套普遍变质为绿色片岩了的超基性、基性—中酸性(长英质)火山岩与沉积岩组成的岩系。其特征可概括如下:

1、时代老—大于26亿年,属太古代。其中可分为两个时代,一是年龄为38—35亿年左右的绿岩带(南非津巴布韦),一是年龄为27—26亿年的绿岩带(加拿大苏必利尔、西澳伊尔岗)。也有人认为存在早元古代的绿岩带。

2、分布特点—主要分布于古老地盾(克拉通)区,呈短而窄的带状,一般长100—300Km,宽10—50Km,地层厚度达10—20Km。

3、变质程度—典型地区,如南非巴伯顿、加拿大阿比提比和澳大利亚诺斯曼—威尔逊等地区的绿岩带变质程度很浅,原岩产状基本保持,大致相当于绿片岩相到绿帘角闪岩相。但是,也有高级变质的麻粒岩相绿岩带,如芬兰格普兰地区。实际上,就变质程度而言,不论是变质程度较低的绿片岩相绿岩带,还是变质程度较高的麻粒岩相绿岩带,都比较少见。一般是,在一个绿岩区,由中心到边缘出现从低级到中级甚至高级的变质分带。如津巴布韦绿岩带,其中心为绿片岩相,向外逐渐变为角闪岩相,靠近花岗岩

区其变质程度达到麻粒岩相。所以，变质程度深浅不是判别绿岩带存在的主要因素，重要的是要看它所处的大地构造环境以及一套特定的原岩岩石组合。

4、岩性特征——一般包括绿岩和花岗岩组合，因而也称花岗岩—绿岩带，绿岩带的四周为花岗岩体。根据绿岩带的岩石类型与组合，有人将绿岩带分为三种类型：1）巴伯顿型，以科马提岩和拉斑玄武岩组合广泛分布为特征，其中安山岩很不发育；2）苏必利尔型，为富安山质的双模式镁铁质—长英质的岩石组合；3）达瓦型，以广泛发育沉积岩组合为主，盖层和基底具明显的不整合。概而言之，其剖面是：下部主要由超基性岩组成，中部为钙碱性—镁铁质—长英质火山岩系，上部为沉积碎屑岩系。剖面下部常含具海底喷发性质的科马提岩。科马提岩是绿岩带的典型岩性，但不是不可缺少的岩性。

绿岩带代表原始地壳和地幔过渡带的产物，金的背景值比较高。如南非绿岩带金丰度值在5—20ppb，最高达75ppb；乌克兰地质绿岩带金丰度值为48ppb。我国一些重要的金矿成矿区或远景区的岩层，经过研究也认为属于绿岩带，并作过含金性测定，如胶东群金丰度值比其克拉克值高1—3个数量级，平均为160ppb；大华群各类岩石金丰度值比克拉克值高2—10倍；鞍山群三道沟组岩石含金丰度为10—70ppb，最高达200—300ppb；五台群岩石的含金性经山西冶金地质研究所测定为10—190ppb，平均为47ppb（共测10种岩石249件样品）。这种含金丰度较高的岩层，在后来漫长历史过程中，经过反复的成矿地质作用，金反复地发生活化、溶解、迁移、沉淀与富集，形成工业矿床。

可以估算一下，含金为160ppb的胶东群岩层和含金为47ppb的五台群岩层，如果发生混合花岗岩化或碳酸盐化及水化，一平方公里分别能析出400吨和117.5吨金（体重取 2.5g/cm^3 ），当然不可能全部析出，即使析出50%，也分别有200吨及59吨，这个数字也是很可观的。因此，绿岩在活化或花岗岩化过程中，是有足够数量的金，在其它有利成矿地质条件配合下形成工业矿床。

褶皱带及板块缝合线处残留的古洋壳碎片（蛇绿岩），其含金量也普遍较高。

我国前寒武纪绿岩带具有时代新、厚度薄、分布范围小、变程度高以及在岩性上至今未发现公认的科马提岩等特点。这些特点是否是我国没有特大型金矿的原因，还是没有找到，值得深入研究。

应当指出，一些资料表明，岩层中金的丰度值并不是形成金矿的决定因素，而是取决于其中是否有“过剩”的或可活化的金含量。

二、岩性（或建造）标志

尽管对金矿成矿来说，无论是那一种变质岩、火山岩、沉积岩或岩浆岩，都可作为容矿岩石，不象某些其它矿种那样表现出固定的岩石成矿专属性，但是，有些类型岩石对金矿成矿仍表现出比较明显的有利性。

1、太古代绿岩带中，较为重要的容矿岩石是镁铁质火山岩、长英质侵入岩、碳酸盐岩及含炭沉积岩，而镁铁质火山岩中对金矿最有利的是高镁系列玄武岩、含硅高镁系列玄武岩、科马提岩及其中的纯杆栏岩透镜体。

2、太古代绿岩带硅铁建造内或其上、下层位，特别是磁黄铁矿、毒砂、黄铁矿、辉钴矿、红砷镍矿等硫化物较发育时，是找霍姆斯塔克型金矿的重要标志。

3、含有机质或炭质较高的沉积岩与变质岩对金富集有利。美国卡林型金矿容矿岩石的一个显著特点就是含炭相当高；苏联穆龙套金矿是一个赋存在前寒武纪变质程度相当于绿片岩相的黑色页岩系内的金矿，几乎整个黑色页岩系都是金矿；巴西莫洛韦洛金矿、加拿大爱迪生金矿、奥米加金矿都是产在炭质岩石中的大型和特大型矿床。我国一些产在沉积岩或浅变质岩中的金矿，其容矿岩石含炭也较高，如辽宁白云、河南银洞坡和吉林夹皮沟等金矿。有人指出，含炭在0.1—1%的岩石有利于金的富集。炭在金矿成矿作用中起吸附和还原作用。

4、绿岩带中脉型金矿的形成，不仅与进变质作用有关，而且常与退变质作用密切相关，因此，在其高变质带地区中的较低变质带地段，有利于脉型金矿的产出。

三、岩浆岩标志

金除了具有稳定性一面外，还具有不稳定性一面，即是说，在一定条件下金可活化迁移。实验证明，当温度 $>400^{\circ}\text{C}$ 时，特别在有水参与的情况下，可以使分散在岩石中的金活化，溶解到热液中。实验还证明，酸性岩浆温度在 $700-800^{\circ}\text{C}$ 以上，这对于活化岩石中的金是足够的。所以，岩浆在某些类型金矿成矿作用中不仅提供了热源，而且还带来了成矿物质。实际上，国内外许多金矿床在成因上和空间上同岩浆岩关系非常密切。现分述如下：

1、在太古代绿岩带或其它金矿矿源层分布区，广泛发育的花岗岩类岩体，是金矿成矿的重要前提。如果一个地区有多期多阶段岩浆活动，首先要区分它们形成的期次与阶段，然后要区分含矿岩体与非含矿岩体。

2、太古代绿岩带中，富含钠长石的长英质岩浆岩对金成矿有利，如澳大利亚库尔加迪和卡尔古利金矿。

3、分异充分的侵入岩体是金矿化岩体的特征。岩浆后期分异体（脉岩）发育地段是有利矿化的地段。特别是含金丰度较高，离散大，且有热液蚀变的岩脉更应注意找矿。

4、富含挥发分，且 $\text{CL}>\text{F}$ ，含金丰度又高的侵入岩体是有利金矿化的岩体。

5、古老的中基性、基性或超基性火山岩发育区是寻找变质热液、混合热液成因金矿床或多成因复合金矿床的地区。中基性、基性次火岩或火山喷发岩发育区是寻找低温热液浅成或超浅成金矿、火山热液金矿或金银矿床的有利地区。

6、由于超镁铁质岩浆岩含金丰度高，特别当其发生蚀变（纤维蛇纹岩化、叶蛇纹岩化）时，有可能形成金矿床。

7、花岗岩类岩石的磁性和碱性指数是金矿化标志。业已发现，含金区域（甚至某些金矿区）总的范围与磁性花岗岩类岩石分布区相一致。金矿化赋存于钠质（ $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}<1$ ）花岗岩类岩石中，矿化种类随岩浆演化程度而变化：单一金矿化与早期钠质花岗岩类岩石共生；含金—稀有金属矿化和部分金—银矿化与晚期钾质花岗岩类岩石共生。多数磁性花岗岩类岩石属于铁氧系数大于0.25的钠质花岗岩。

8、岩浆岩中铁组元素之间关系密切，钍、铀含量不高，Th/U 比值也低，可能有利于金矿化。

9、含金花岗岩类岩石，其副矿物的含金量一般要比无矿的略高，且分离度大。

10、中基性脉岩是玲珑金矿的重要找矿标志。这种脉岩含金丰度高，在硫同位素组成、微量元素成分及含量上与矿石相似，都具有Ni、Co、V、Ti、Mn等深源元素组合的特点。

对于金矿成矿来说，岩浆岩总的有利于矿化的特征是，在具有金矿矿源层基础上产出，发生过明显的结晶分异作用，相带清楚，碱质和挥发分含量高，结晶水丰富，岩体规模不大（零点几平方公里到几十平方公里）或岩基上的分枝体，剥蚀程度低，同源同期岩浆活动的中、晚阶段岩体。

四、构造标志

1、深断裂（一般为硅铝壳型深断裂）、两大构造单元交接处或两大板块缝合处，是金矿成矿带的主要控矿构造部位。例如，我国70%的金矿集中在华北地块的周边。其北缘金矿成矿带与蒙古海洋板块向华北地块俯冲消亡所造成的岩浆热事件有关，产生了张家口、夹皮沟、小西南岔等金矿。华北地块南缘的小秦岭金矿成矿带受扬子地块与华北地块相撞所造成的岩浆热事件影响。胶东金矿带受沂沭深断裂控制，等等。

金矿床的原始成矿物质主要来源于上地幔或深部地壳。这些金矿成矿物质向近地表迁移、富集，必须要有反复活动的深成构造作用配合。这种深成构造作用不仅可以诱发岩浆热事件，使成矿物质活化，而且还为这些活动了的成矿物质上侵提供了通道和聚集空间。所以，上述构造是找金的区域构造标志。

2、含石英脉群的断裂带是找大型、特大型金矿的重要标志。这种断裂带规模一般较大。如河南小秦岭老鸦岔脑含金脉带长50Km，山东焦家含金脉带宽50—200m，长12Km，吉林夹皮沟含金脉带宽5Km，长50Km。

3、前寒武系组成的隆起区，特别是隆起与拗陷交界处且靠近隆起一侧的砂金分布区，是找原生金矿的有利构造部位。尤其是隆起区内有以中生代火山岩为主组成的凹陷边缘，即“隆中凹”的边缘，是找原生金矿最适宜的构造部位。

4、靠近中性侵入体的，具有硅化、黄铁矿化、粘土化的断裂带或断裂破碎带（长数百米至数公里），是很好的找金构造标志。

5、一条大而长的断裂带或断裂破碎带，并不是整个部位都含工业矿体，往往只是在减压扩容段含矿，因为该处压力骤然降低、容矿空间骤然增大，有利于含矿溶液中成矿物质的沉淀富集。断裂带中的减压扩容段包括断裂在走向上由窄变宽处、倾向上由陡变缓处或倾向出现反向的地段，几组断裂交叉处，断裂带的封闭部位，等等。

6、背斜构造的鞍部、转折端，向斜的槽部及由褶皱构造引起的层间破碎带和轴部裂隙化地段，不整合面和层间剥离。

7、破火山口、火山颈、火山角砾筒及其附近的不规则裂隙是中、新生代火山岩型和次火山岩型金（银）矿的主要容矿构造。

8、由侵入作用引起的隐蔽爆破角砾岩筒，往往含多金属金银矿床或矿化。如山西

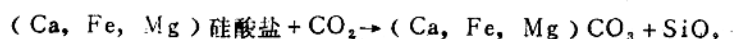
十余处爆破角砾岩筒几乎都有金银矿化或矿床；河南祁雨沟金矿是赋存在爆破角砾岩筒内的典型矿床。

9、规模较大的挤压片理化带，特别含硫化物石英细脉时，应注意找金。

五、热液蚀变标志

原生金矿除与铜镍或铂矿伴生的以外，其余金矿床均与热液活动有关，因而围岩热液蚀变现象明显而普遍。最常见的有硅化（石英化）、黄铁矿化、绢云母化、钠长石化、钾长石化、粘土化、碳酸盐化、重晶石化、绿泥石化及青盘岩化等。不同成因类型的金矿及其热液蚀变的种类与组合是不同的。金矿的所有热液蚀变均表现为中低温性质。除了要研究热液蚀变的种类与组合外，还要研究热液蚀变的多期性与分带性。现分析如下：

1、当矿源层或矿源岩受到花岗岩化或碳酸盐化、水化时，除了析出金矿物质外，还会析出大量 SiO_2 ，如：



矿源岩矿物

铁白云石

石英

这些 SiO_2 与金一起迁移，又由于金的沉淀条件与 SiO_2 的沉淀条件基本相同，所以，金矿化总是伴随有硅化或石英脉。

2、硫常是金的溶解剂、搬运剂和沉淀剂。因为金常形成可溶性的硫化物络合物，溶解于溶液中，并被搬运，在适当条件下金产生沉淀时，硫也形成黄铁矿而沉淀，所以黄铁矿是金矿床中最常见的矿物和金的载体矿物。同时，由于黄铁矿可以形成于金矿的各个成矿阶段，所以黄铁矿化是金矿床中最常见的热液蚀变，是良好的找矿标志。

3、对于绿岩带中硅铁建造型金矿来说，最发育的是黄铁矿化、磁黄铁矿化、硅化和绿泥石化。

4、对于太古代绿岩带中石英脉型金矿来说，以碳酸盐化、硅化、黄铁矿化、绢云母化、绿泥石化和滑石化为主。我国吉林夹皮沟金矿以绢云母化、硅化、绿泥石化及花岗岩的钾长石化为特征。

5、对于太古代绿岩带细脉浸染型（赫姆洛金矿）金矿来说，绢云母化、硅化及黄铁矿化较普遍，特点是绢云母呈浅绿色，含Cr、V和Ba。

6、卡林型金矿热液蚀变以硅化、黄铁矿化、碳酸盐化和重晶石化为特点，其中硅化和黄铁矿化最重要。

7、穆龙套金矿热液蚀变以硅化、钾长石化和钠长石化为特征，它们迭加在接触变质的角岩化之上。

8、与中生代次火山岩有关的斑岩金矿（团结沟式）的热液蚀变有青盘岩化、似千枚岩化、泥岩化及硅化。

9、与中、新生代火山岩有关的金矿，其热液蚀变除黄铁矿化、硅化、绿泥石化、碳酸盐化外，还出现冰长石化、叶腊石化及蔷薇辉石化。

10、对于焦家式金矿来说，主要为黄铁矿化、绢云母化、硅化、钾化和钠化。

11、按接触交代型金矿，其热液蚀变迭加在砂卡岩地段，主要为钠长石化、钾长石化、碳酸盐化和硅化。

12. 钠长石化是深成中高热液成因金矿床的重要标志, 而钾长石化是近地表或浅成低温热液成因金矿床的重要蚀变。

13. 多种热液蚀变叠加有利于金矿化。

六、矿物标志

金的载体矿物或共生矿物的某些物理特征、化学特征、矿物组合、数量关系及生成世代, 常可作为找金的标志。

(一) 黄铁矿

1. 在各种形态的黄铁矿中, 一般以微细粒五角十二面体黄铁矿及胶状、偏胶状黄铁矿含金最高, 而立方体自形晶及致密块状粗大晶体黄铁矿含金最低。

2. 不同金矿床中的黄铁矿, 其颜色大都暗淡, 呈灰绿、浅黄, 反射率比正常黄铁矿略低, 其硬度、比重也比不含金的低。

3. 黄铁矿中砷的含量与金的含量呈明显的正相关关系。同一地区、同一成矿阶段的黄铁矿中微量元素的总含量及Cu、Pb、Zn含量与黄铁矿中金含量呈正相关关系。

4. 某些金矿区黄铁矿中 $Ag > 15g/t$, $Cu > 0.1\%$, 可作为找金标志, 另外, 黄铁矿中的As、Te含量较高时可能表明含金。一般地说, 含金黄铁矿中的微量元素种类较复杂, 其总量也较高。

5. 金矿床中的黄铁矿与其它矿床中黄铁矿比较, 其Au、Ag含量及Au/Ag比值有显著区别。金矿床中黄铁矿的含金量高出其克拉克值1500倍以上, Au+Ag总量也高, 而其它金属矿床中黄铁矿含金量仅高出数十至数百倍。其Au/Ag比值也很悬殊, 金矿床中黄铁矿Au/Ag比值较大, 为0.1, 而其它金属矿床黄铁矿的Au/Ag比值也很悬殊, 金矿床中黄铁矿Au/Ag比值较大, 为0.1, 而其它金属矿床黄铁矿的Au/Ag比值要小1—2个数量级, 即为0.01—0.001。

6. 黄铁矿的金含量是最直接的找矿标志, 一般黄铁矿含金几十g/t或更多时, 表明有可能形成独立金矿床; 黄铁矿的金含量为ng/t时, 可能只会形成伴生金矿; 黄铁矿含金量在0.1g/t时, 找金希望不大。

7. 金含量与黄铁矿的破碎程度成正比。这是因为处于破碎晶体表面的原子、离子化合价往往没有满足, 而显示一定的余价, 可吸附其它原子或分子。破碎程度越高, 表面积越大, 吸附作用越强, 对金沉淀越有利。

8. 与金共生的常见的矿物共生组合为黄铁矿、毒砂、磁黄铁矿及黄铜矿。

9. 硫化物含量高时, 金品位一般较富; 硫化物单一的矿石金品位多数不如金属矿物复杂的矿石品位富, 硫化物组合中出现一定的金属氧化物似乎是一种含金的信息。

10. 含金黄铁矿的晶胞参数增大, 这可能是因为其中含有较多的As、Co、Ni元素所致。

11. 含金黄铁矿的漫反射有所增强, 低、中角度衍射线有不同程度的宽化, 锐度降低; 不含金黄铁矿漫散射弱, 衍射线宽化不明显, 锐度较好。因此, 利用黄铁矿粉末德拜图案有可能区分含金与不含金的黄铁矿, 作为找矿参考。

12. 某些金矿区, 黄铁矿晶体聚形越复杂, 晶面附着子晶, 嵌镶与环带构造越复

杂，越有利于金矿成矿。

13、黄铁矿的不同世代，其含金量不一样，一般是中、晚世代含金较高。因此，不同阶段不同世代黄铁矿含金量的研究，对找金十分重要。有些阶段或某一世代的黄铁矿就不含金或含金极微。

(二) 闪锌矿

对某些火山岩型次火山岩型金矿来说，其闪锌矿的矿物标型是，化学成分上含铁、锰、镉较高（铁锰之和 $>6\%$ ，镉 $>155\text{ppm}$ ），有的就是铁闪锌矿，镉、汞含量低，锗、铋、铊含量更低，并有一定数量的 Au、Ag、Bi、Sn；单位晶胞棱长数值较大，比重低，反射率较高。

(三) 毒砂

毒砂与金关系十分密切，大多数金矿都含有毒砂。毒砂粒度大小可以指示金矿石品位的贫富，一般粒度越小，金品位越高。毒砂含量越多，晶形越复杂，双晶类型越多，镶嵌构造越发育，金矿化也越好。

(四) 石英

石英是金矿石中最重要、最多的脉石矿物，有许多是金的载体矿物。含金石英的物理化学性质及结构构造有许多特征，在找金时可以加以利用。

1、呈乳白色，致密块状，颗粒粗大，玻璃光泽的脉石英含金甚微或不含金；呈灰白、烟灰、灰黑色，油脂光泽并与硫化物共生的脉石英含金性好。脉石英颜色变深是由于其中混入微粒有色矿物所改。

2、含金脉石英中的金属杂质元素（Fe、Cu、Pb、Zn、As、Hg）含量，远较无脉石英的含量高。当Pb、Ag达到一定含量时，可作为找金标志。

3、石英中铝的含量在评价石英的含金性时有很大的参考意义。无脉石英一般 Al_2O_3 含量为 $0.001-0.01\%$ ，含金时则 Al_2O_3 含量大增，能提高一至两个数量级。由于石英晶格中 Al^{3+} 进入四面体代替 Si^{4+} ，必须有 K^+ 、 Na^+ 、 Li^+ 等金属阳离子进入石英晶格的架状空隙使电价平衡，因此，其碱金属含量也相应增加。

4、由于含金石英中的微量元素较多，故其晶胞参数比无脉石英的大。脉石英的压电系数与含金量呈正相关关系。

5、含金石英脉体内，石英压碎结构愈发育含金量愈高，波状消光、变形纹和交错滑动发育的石英脉中应注意找金。

6、同不含金石英脉比较，含金石英脉以缺乏条带状构造为特征，也不存在原生环带（混浊环带与非混浊环带相间）。

7、充填有黄褐色粉末（硫化物的氧化物）的蜂巢状构造和梳状构造的脉石英，可能含金。

8、成群成带出现的石英脉，一般比单脉的金矿化好；含金石英网脉带常比复脉或单脉的金品位高。

9、一般认为石英脉规模太小或太大不宜于工业矿床形成。据胶东、燕山及小秦岭等地区统计，含金石英脉一般厚数米，长数十至数百米。

10、含金石英脉各构造部位矿化程度明显不同，对于矿化程度较强的石英脉来说，

一般下部比上部、宽缓地段比狭窄地段、凹陷部位比凸起部位、转折部位比平直部位更富、含金的石英脉中段纵横裂隙发育部位比两端分支和尖灭部位矿化更好。

11、金矿床中，如有几个阶段或世代的石英产出，往往是中、晚世代（或阶段）石英矿化较好。

七、地球化学标志

地球化学异常是找金的重要标志，尤其是在化学分析、痕量分析已解决的今天，用化探方法获得的化探异常在金矿勘查中起着巨大的作用。河南上宫大型金矿就是根据1/5万分散流测量获得金、银并伴有铅、锌、砷、汞、锰等异常而发现的，山东苍上金矿床根据汞气测量发现的，美国卡林金矿中的铋、汞、砷元素异常给该矿的确定起了显著的作用。

在应用地球化学标志时，一定要研究异常元素组合、强度、各种元素异常重迭情况、浓集中心是否一致，还要研究异常形态与规模。一般地说，元素异常组合比较复杂、重迭吻合较好，浓集中心一致，异常强度高，形态规整圆滑，规模较大是矿异常的重要标志。有人认为，大型金矿可以形成数百平方公里的化探异常（分散流异常，下同），中型金矿形成的化探异常仅为数十平方公里，金矿点形成的化探异常只有数平方公里或更小。

不同成因类型金矿床各有其特征性的矿化指示元素，这是因为不同成因类型金矿床金矿石的化学成分、成矿特征、元素组合、矿石建造和风化特点等均不相同所致。现分述如下：

1、Au、Cr、Ni、Fe、Cu、Pt族元素组合或Au、Cu、Zn、Pt族元素组合，是岩浆型金矿床的矿化指示元素。

2、Au、Co、Ni、Fe、V组合是黑色页岩型金矿床的矿化指示元素。

3、Au、Hg、Sb、As(W)是卡林型金矿最重要的矿化指示元素。

4、Au、Cu、Pb、Zn、Cd组合是岩浆热液、沉积—岩浆热液改造型、接触交代型和斑岩型金矿的矿化指示元素。

5、近地表火山一次火山热液金矿的矿化指示元素比较复杂，主要为重金属元素，如Ag、Cu、Zn、Pb、Sb、Bi、Hg、W、Mo、Sn、Se、Te、As等。

6、由于多数金矿中，Au、与As、Sb关系极为密切，并且具有越近矿体含量越高的特点，因此，Au、As、Sb是找金的主要指示元素。

7、Cu、Ag、Au为同族元素，对许多矿床，特别是时代较新的金矿来说，Au、Ag、Cu含量呈正相关关系，因而是重要的找矿元素组合。

8、F、Cl等挥发组分是金矿化的指示元素，而且深成金矿比浅成金矿更富F和Cl。

9、波伊尔（1979）认为原生晕找金的最佳指示元素为Au、Ag、As、Sb、Hg、Te，一旦发现Sb的丰度值 $>0.7\text{ppm}$ ，Te $>0.05\text{ppm}$ ，就意味着有金（银）矿化存在。

八、金的成色及金矿物找矿标志

金的成色是指一千份自然金或合金中化学纯金所占重量的份数（即 $\frac{\text{Au}}{\text{Au} + \text{Ag}} \times$

1000）。因为Au与Ag在周期表中处于同一副族，具有相似的物理化学性质和相近的品格参数。所以，Au和Ag可以形成任何比例的固溶体。但是，由于 Ag^+ 在水溶液中比 Au^+ 活泼，也就是说， Ag^+ 的迁移性能比 Au^+ 大。当Au—Ag系列发生热变质作用时，银的扩散速度比金的扩散速度大，约为2.5倍。所以，金的成色是变化的，与其成矿温度、深度、成矿时代及成因类型等等因素有关，研究金的成色可以获得许多找矿信息。

1、在内生条件下，金的成色是敏感的地质温度计，一般为600—800，高温成色高，低温成色低。

2、金的成色可以判断成矿深度，深成和中深成金矿成色高，浅成金矿成色低。据世界149个矿床统计资料，其中101个中深和深成金矿床金的成色平均为875.5，48个浅成金矿床金的成色平均为644.3。

在同一矿床中，矿体所处深度不同，金的成色也不一样，矿体上部金的成色低，而下部成色较高。

3、成矿时代较老的金矿，其成色往往比成矿时代较晚的金矿高。如据资料，1700—2000 Ma前形成的金成色为717—949；245—Ma前形成的金成色为622—949；10—15 Ma前形成的金成色657—750。

4、赋矿地层的时代新老对金成色也有影响，时代较老地层中形成的金矿床，其成色较高，而时代较新地层中的成色较低。

5、金成色与矿物组合中硫化物种类的多少有关，一般多硫化物型矿石金的成色高，低硫化物型矿石次之，而贫硫化物型矿石成色最低。这是因为银易进入硫化物晶格代替其中阳离子，使多硫化物型矿石金成色增高。

6、金成色最高的矿石往往为毒砂—黄铁矿组合，随着黄铁矿含量增加，金成色降低，而以方铅矿和银矿物占主要地位的矿石的成色最低。

7、由强碱性热液形成的金矿床，其成色高，而弱碱性溶液形成的矿床成色低。这是由于金和银在硫化物中赋存方式不同所致，即银主要呈 AgHs 转移，而金呈 $[\text{AuS}_3]^{3-}$ 或 $[\text{AuS}]^-$ 离子转移。

8、砂金搬运越远，金的成色越高。利用砂金的成色分析可以判断矿源远近或原生金矿产地。

如水系沉积物中存在各种成色的金，而且上游与下游成色差不多，则说明金矿化广泛，远景较大。

若砂金的成色普遍高而差异小，则说明矿床剥蚀深度可能较深。

9、围岩对矿石金成色也有影响，产在绿岩（基性岩）中的许多金矿，其成色往往高于产在石英—长石斑岩、花岗岩和正长岩中类似金矿的成色，而不管其时代如何。

金矿物的找矿标型也是值得研究的。例如，不同自然金的晶形、晶面上阶梯的高低晶粒大小等，可作为矿床成因及找矿标志。据研究资料，深成矿床中自然金晶形以简单八面体或立方体与八面体的聚形为主；中深矿床金矿物晶形较复杂，常为延长菱形十二

面体歪晶形态更复杂,除菱形十二面体、八面体外,还有四角三八面体、四六面体、三角三八面体和其他更复杂的晶形;近地表矿床出现细片状、条带状及树枝状形态。自然金的形态还是一种矿化好坏的标志,因为矿液浓度不同,自然金晶体形态不一样,金浓度大时形成八面体,浓度中等常形成菱形十二面体或菱形十二面体、立方体、八面体组成的聚形,浓度低时常形成立方体、菱形十二面体及四角三八面体。

自然金形态可以指示距离岩体的远近。岩体中的自然金多呈浑圆状,表面光滑,粒度细小;近接触带的自然金呈板状、团粒状、棱角状,表面常有黄铁矿、石英、毒砂的印痕,常为单晶,无聚片双晶,颗粒较粗($>0.2\text{mm}$)。远离岩体(100—200m)的自然金,有复杂的外形,表面常有小坑,多为海绵状、晶簇状、变形虫状等不规则形态,粒度 $<0.2\text{mm}$,常具聚片双晶。

自然金的显微硬度反映出矿床的成因类型。岩浆矿床自然金为 $60\text{--}80\text{kg/mm}^2$,热液矿床为 $70\text{--}87\text{kg/mm}^2$ 。这是因为自然金中随银含量增加,显微硬度增大所致。

自然金的粒度与矿床形成深度及形成温度有关。在深成、高温条件下形成的自然金,一般粒度较粗较圆滑;在中深中温条件下形成的自然金,颗粒一般较细,呈浑圆状及不规则状;在浅成低温热液金矿中,金颗粒细小而不规则,呈树枝状、锯齿状,90%以上为次显微金,还有胶体金,明金极少。即使在同一矿床的同一水平上,金的粒度也随从早期高中温到晚期中低温而变细。

九、植物标志

1939年捷克化学家曾从1000Kg玉米灰中提炼出10克左右的黄金,这说明玉米根系能吸收土壤中非常分散的金元素。

徐邦栋等对江苏句容县某金矿区植物群落作了含金性研究,认为对植物群落进行金量测量,可提供找金信息。含金矿区的海州香薷、松枝是找金的植物标志。

一些金矿区的木贼含较丰富的As、Sb,由于Au与As、Sb密切共生,所以,研究木贼的As、Sb含量及其变化,对找金是有意义的。

还可以列举一些找金标志。例如:

铁帽也是很好的找金标志。因为金矿床含有许多硫化物,它们有些是金的载体矿物,有些是共生矿物,在氧化带它们会氧化成Fe、Mn、Cu、Pb、Zn、Ni、Bi、As、Mo等等元素的氧化物,构成醒目的铁帽。金矿区的铁帽往往还含有自然金、银,其品位甚高,金品位一般可几十到百余克/吨,有些就构成了铁帽型金矿床,我国安徽、湖北、江西、江苏等省都有铁帽型金矿存在。任何类型金矿在氧化带都有可能形成不同程度的铁帽,所以,研究铁帽的矿物成分、含金性、形成条件、分布形态及厚度大小等等,能提供重要的找金信息。

旧采坑的研究 also 具有重要意义,金是人类开采利用的最早金属之一。一些金矿区多多少少都有一些旧采坑。研究旧采坑的大小、形态及分布特点,可以获得有关金矿矿化特点及沿走向和倾向的延伸情况、矿化规模等方面的资料。

应当指出,上述各种找矿标志是从一定数量矿床中总结出来的,具有一定的代表性,但是,在漫长的地质历史过程中,影响成矿的因素繁多。成矿地质条件、地球物理化学环境和矿质浓度千差万别,并且受到多期多阶段多成因成矿的制约,同时在成矿后又受

黄铁矿中晶格金的萃取实验及其问题的初步研究

陈 伟 张振儒

(中南工业大学地质系)

摘要: 本文对前人关于黄铁矿中晶格金的研究资料进行了综合评述。作者发现, 尽管黄铁矿中的晶格金确实存在, 但以前的研究都没有得到直接而充分的证据, 说明其存在。为此, 作者做了晶格金的萃取实验, 使黄铁矿中的晶格金(离子金)形成 $[\text{AuCl}_4]^-$ 络合物, 然后利用紫外—可见光谱证实了 $[\text{AuCl}_4]^-$ 的存在, 从而取得了晶格金存在较为直接而充分的证据, 作者以为, 象黄铁矿中 Fe^{2+} 与 Au^+ 的取代关系的理论解释不应局限在类质同象的传统理论上, 而应用现代的配位场理论解释, 通过计算表明, 只要温度足够高, Au^+ 是可以取代 Fe^{2+} 形成晶格金的。作者还通过穆斯鲍尔谱学的研究, 探讨了晶格金的形成机理。

黄铁矿中晶格金的问题是地质界一个争论较大的问题, 作者在前人研究的基础上做了晶格金的萃取实验, 并就有关问题展开了讨论。

一、对前人晶格金资料的评述

1、最早提出晶格金的是苏联学者 B·N 沃依策霍夫斯基^①, 他研究发现, 毒砂和黄铁矿中的金在加热时并不产生归并, 且分布均匀, 从而认为不可见金进入了黄铁矿、毒砂的晶格, 形成晶格金。为了证实他的观点, 他用电子顺磁共振谱(EPR)研究了含金和不含金的毒砂和黄铁矿, 结果表明, 含金的毒砂和黄铁矿都出现了共振吸收峰的信息, 而不含金的没有吸收信息, 从而得出了晶格金存在的结论。

1983~1985年, 张振儒教授^②在国内第一次应用顺磁共振谱对湘西金矿的黄铁矿中到后来地质作用的改造与迭加, 结果使这些找矿标志带有很大的局限性。例如, 对于大多数金矿床来说, 硫化物是主要的载金矿物, 而对于山东七宝山金矿床来说, 主要的载金矿物是铁的氧化物(细粒镜铁矿)和碳酸盐矿物(菱铁矿)而不是硫化物。山西耿庄金矿主要载金矿物是闪锌矿和黄铜矿, 而不是黄铁矿和毒砂。凡此种种, 说明在运用上述标志进行找矿评价时, 应根据不同地质条件和成矿类型进行全面综合考虑, 既要注意宏观的又要注意微观的, 不能抓住一点定乾坤。只有这样, 才能使我们在这一难找矿种的普查、评价和勘探等阶段中, “投入”较少而“产出”较多, 取得较好的地质效果。

文中利用了许多作者公开的或未公开的资料, 均未列举出处, 敬请见谅并致谢忱。

晶格金进行了研究, 研究结果与苏联学者的相类似。

此外, 国内还有不少学者用 Mo 谱, x -射线辐射分析研究了黄铁矿中的晶格金, 与不含金黄铁矿相比, 认为含金黄铁矿的化学位移和四极矩分裂值的改变、晶胞参数 (a_0) 的增大, 是由于金取代铁引起的从而得出晶格金存在的结论。

作者认为, 通过谱学研究得出晶格金存在的结论不是直接的。其不充分性在于: ①引起共振吸收的因素很多, 晶格中的点缺陷、杂质、电子空穴等, 因此含金黄铁矿出现共振吸收光谱的信息, 不能肯定是由于 Au^+ 取代 Fe^{2+} 而造成, 因为其他元素, 如 Cu^+ 、 Ag^+ 等的取代, 也会出现共振吸收光谱的信息。Mo 谱中的化学位移、四极矩分裂值改变的情况类似, ②黄铁矿晶胞参数 (a_0) 的增大, 也不能肯定是由于 Au^+ 取代 Fe^{2+} 引起, 尽管 Au^+ 的半径 (1.37) 比 Fe^{2+} 的半径 ($0.74\text{\AA}$) 大得多, 因为 Cu^+ ($0.96\text{\AA}$)、 Ag^+ ($1.26\text{\AA}$) 的取代照样会引起晶胞参数 (a_0) 的增大。

由此可见, 利用谱学研究晶格金, 应谨慎, 要多方面考虑。

2、1978年姚敬勉做了一个实验, 并从此实验得出晶格金存在的证据, 现将其实验及结果摘录如下:

“我们在查定某矿区黄铁矿中金的赋存状态时, 几次用某种溶剂 (只溶黄铁矿, 不溶自然金) 将黄铁矿选择溶解后金也就进入了溶液。开始用 $30\% \text{H}_2\text{O}_2 - 3\% \text{HCl}$ 作浸取剂, 在 55°C 水浴浸取 2 小时, 结果金基本上在溶液中 (可惜过滤时未使用不能通过胶体微粒的超滤器)。后来对另一黄铁矿样进一步做了铁和金的浸取曲线。选用 $1\% \text{HCl} - 30\% \text{H}_2\text{O}_2$ 作为浸取剂, 结果如图 1 所示 (注: 原文为图 3)。

引起我们注意的是金与铁的浸取率曲线碰本吻合, 这与方铅矿中与金的浸出率曲线迥然相异 (图 2,

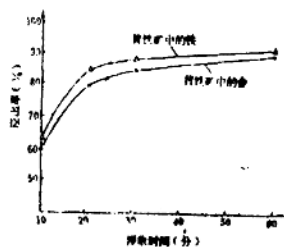


图 1—1

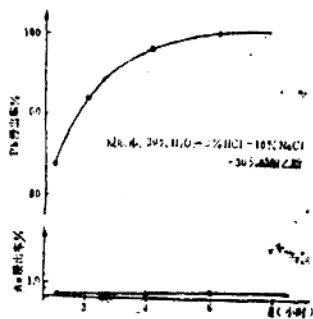


图 2—2

(图一 1、图一 2 分别引自《地质与勘探》1978 年第 31 和 32 页) 图 2 (注原文为图 4)。很明显, 方铅矿中的金以细小矿物包裹体的形式存在, 当方铅矿被溶解后其中包裹体的金都解放出来, 并落入残渣。因此, 铅的浸出率随浸出时间按一般规律上升, 直至完全溶解, 而金的浸出率始终接近于零, 经过这样的对比, 我们认为金有可能在黄铁矿中呈固溶体状态分散。”③

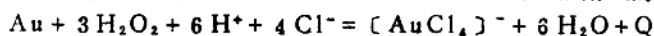
似乎这个实验为黄铁矿中晶格金存在提供了较为直接的证据, 但这里有一较大的问题, 即这里所谓“只溶解黄铁矿, 不溶解自然金”的溶剂 $\text{H}_2\text{O}_2 - \text{HCl}$ 其实是可以溶解

自然金的。

首先，我们联想到王水 $\text{HNO}_3 - \text{HCl}$ 能溶解自然金，这主要是① $\text{HNO}_3 - \text{HCl}$ 混合物有强的氧化能力，② Cl^- 的存在降低了 Au/Au^{3+} 的氧化还原电位（因为 $E^\circ \text{Au}/\text{Au}^{3+} = 1.5\text{V}$ ，而 $E^\circ \text{AuCl}/\text{Au} + \text{Cl}^- = 1.00\text{V}$ ）。酸性条件下 $\text{H}_2\text{O}_2 - \text{HCl}$ 与王水有相似的性质，其 $E^\circ \text{H}_2\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = 1.77\text{V}$ ，可见 $\text{H}_2\text{O}_2 - \text{HCl}$ 足以使自然金氧化而溶解，不过在碱性条件下 H_2O_2 不能溶解自然金。因为 $E^\circ = 0.88\text{V}$ ，小于 $E^\circ = 1.5\text{V}$ ），这就是 $\text{H}_2\text{O}_2 - \text{HCl}$ 能溶解自然金的理论依据。“实践是检验真理的唯一标准”，为了验证 $\text{H}_2\text{O}_2 - \text{HCl}$ 能否溶解自然金，我们于1987.10.7日上午做了 $\text{H}_2\text{O}_2 - \text{HCl}$ 溶解自然金的实验。

我们量取10ml 34.02%的 H_2O_2 ，与10ml稀盐酸 HCl （浓度<10%），配成 $\text{H}_2\text{O}_2 - \text{HCl}$ 溶液。然后加入25mg的金粒（金从本校药品库领取），发现强烈反应，金粒被溶解，并产生大量的热。

为了验证反应产物是不是 $[\text{AuCl}_4]^-$ ，我们做了 Au^{3+} 的显色实验，向反应后的溶液中加入少量的尿素及缓冲液（ $\text{NaAc} + \text{HAc}$ ），然后微加热5分钟（使反应过剩的 H_2O_2 及 HCl 挥发掉），再加入显色剂 TMK（硫化米芘酮，即4，4—双（2—甲胺）二苯甲硫酮），出现红色液体，说明有 Au^{3+} 的络合物 $[\text{AuCl}_4]^-$ 存在。最后加入还原剂锌粒， Au 又被还原出来。由此可见， $\text{H}_2\text{O}_2 - \text{HCl}$ 是可以溶解金的，其反应式为：



$$(e^\circ = E_+ - E_- = 0.77\text{伏})$$

这样，姚敬勉实验的结论就值得再考虑了。最起码其实验不能作为晶格金存在的充分依据，随着浸取时间的增加， Au 和 Fe 的浸出率同步增加，这是很自然的，因为 $\text{H}_2\text{O}_2 - \text{HCl}$ 既溶解黄铁矿，也溶解自然金；而方铅矿中 Pb 与 Au 的浸出率不成比例，很可能与方铅矿本身含金很低有关，亦并非不可理解。

二、作者萃取晶格金的实验

样品来源：黄铁矿取自广东河台特大型金矿床，含金达50g/T，黄铁矿单矿物经过摇床、磁选、重液分选后，在双目镜下人工挑纯，纯度达98%以上，黄铁矿的微量元素见表1。

黄铁矿中微量元素（半定量光谱分析）（表—1）

元素含量%	Ba	Cr	Bi	Al	Ti	Mg	Sn	Mn	Ni
样品号									
云-13py	0.01	0.001	0.04	0.3	0.005	0.007	0.002	0.001	0.07
云-11py	0.01	0.001	—	0.3	0.005	0.07	—	0.05	0.05

Cu	Zn	Co	Ag	Ga	Y	Zr	Au
0.8	0.04	0.07	0.04	0.0003	0.003	—	0.05
0.5	0.03	0.05	0.05	0.0003	0.0015	0.015	0.03

(分析者, 湖南省地质实验研究中心, 李建秀)

实验程序及结果

①黄铁矿中晶格金的萃取及 $[AuCl_4]^-$ 的生成

称2克含金黄铁矿于烧杯中, 用50ml的浓硝酸(浓度为65~68%)溶解, 待反应完毕后, 静置片刻, 待残渣沉淀后, 慢慢将所得的溶液倒入另一烧杯(注意: 切勿将残渣倒入, 因黄铁矿中的自然金沉淀在残渣中), 加入过量的NaCl水溶液, 这时要是黄铁矿中有晶格金存在, 则便有 $[AuCl_4]^-$ 形成, (反之, 若液体中有 $[AuCl_4]^-$ 存在, 说明黄铁矿中有晶格金存在), 其反应式如下:

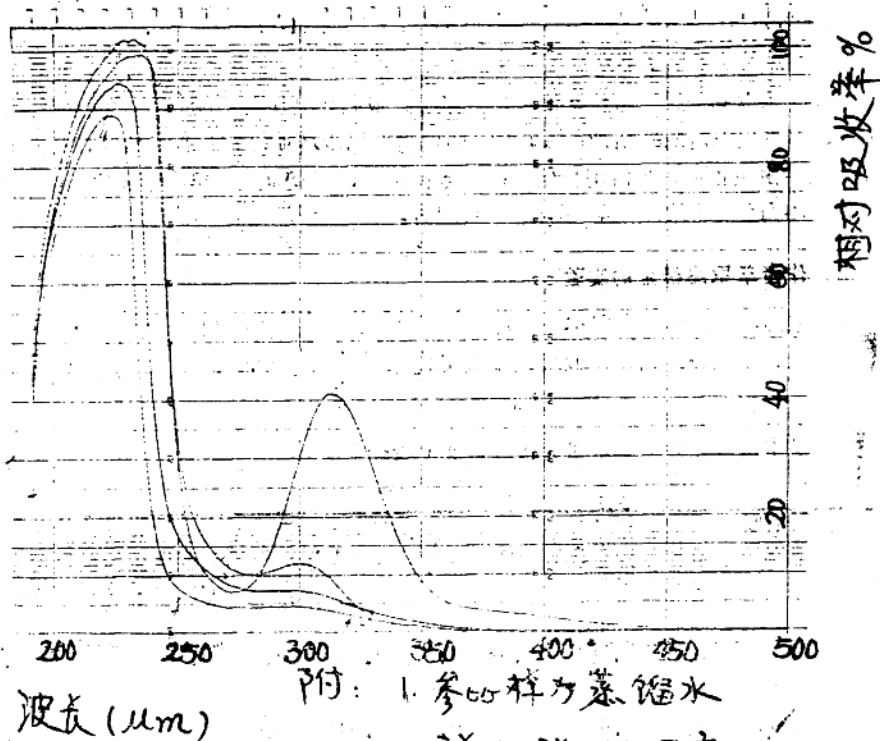
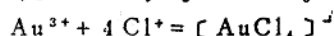
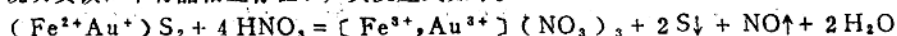


图-3 标准 $[AuCl_4]^-$ 液体和黄铁矿中晶格金萃取液的紫外-可见光谱

② $[\text{AuCl}_4]^-$ 的鉴定：由于黄铁矿中金含量较低，晶格金的含量更低，把晶格金萃取出来形成 $[\text{AuCl}_4]^-$ 后，要验证液体中是否真有 $[\text{AuCl}_4]^-$ 存在较为困难，一般的传统分析是无能为力的。好在 $[\text{AuCl}_4]^-$ 这络合物在紫外—可见光区的吸收特别强，因此作者利用紫外—可见光谱来检验 $[\text{AuCl}_4]^-$ 的存在。首先，由王水溶解纯自然金，得标准的 $[\text{AuCl}_4]^-$ 液体，稀释后做 $[\text{AuCl}_4]^-$ 溶液的标准紫外—可见光谱图（如图—3的线—1，参比样为蒸馏水，下同），其有两个吸收峰，峰位分别为 233.2nm、314.2nm，前者为 $[\text{AuCl}_4]^-$ 的特征吸收峰。线—2、线—4 为黄铁矿样品云—13py 溶解萃取晶格金形成 $[\text{AuCl}_4]^-$ 络合物溶液的谱线，不过线—4 液体的浓度更低；线—3 为样品云—11py 萃取液的谱线。

从图—3 对比可见，两个含金黄铁矿样品萃取晶格金所得的液体的紫外—可见光谱均出现了 $[\text{AuCl}_4]^-$ 的特征吸收峰，线—2，线—3 还出现了 314.2nm 这个吸收峰，说明所得的液体确实有 $[\text{AuCl}_4]^-$ 生成，亦即证明了这个样品中的黄铁矿有晶格金存在，金以离子 (Au^+) 的形式取代了黄铁矿中的 Fe^{2+} 而进入黄铁矿的晶格。

三、讨论

1、从图—3 我们发现，从黄铁矿萃取晶格金形成的 $[\text{AuCl}_4]^-$ 液体的谱线与标准 $[\text{AuCl}_4]^-$ 的谱线并不完全相同，而有微小的差异，但这并不影响我们的结论，从黄铁矿的成分，我们可以看出，它除了含 Au 外，还有 Ag、Cu、Co、Ni 等元素，当然还有 Fe，但只有 Au 和 Ag 能与 Cl^- 生成较为稳定的络合物 $[\text{AuCl}_4]^-$ 和 $[\text{AgCl}_4]^-$ ，其稳定常数的对数值分别为 $\lg k_1 = 12.6$ ， $\lg k_2 = 5.3$ ，可见 $[\text{AuCl}_4]^-$ 比 $[\text{AgCl}_4]^-$ 稳定得多，并且从整个矿体来看，Au 亦比 Ag 高，因此溶液以 $[\text{AuCl}_4]^-$ 为主，所以能得出来，但有 $[\text{AgCl}_4]^-$ 存在，肯定对其谱线有所影响，使其峰值产生微小的变化，而与标准 $[\text{AuCl}_4]^-$ 的谱线有所差异，除以上之外，我们从图—3 还可看出浓度对谱线亦有一定的影响，这很可能是由于二者浓度发生相对变化而造成。

2、黄铁矿中晶格金之所以一直被人们怀疑，是因为它不符合类质同象的基本原则，类质同象的第一个条件就指出，当 $(r_1 - r_2)/r_2$ 大于 25—40% 时，即使在高温下也只能形成不完全类质同象，在温低下更不能形成类质同象。而 Au^+ 的半径为 $1.37 \text{ \AA}$ ， Fe^{2+} 的半径为 $0.4 \text{ \AA}$ ， $(r_1 - r_2)/r_1 = 85.4\%$ ，因此， Au^+ 取代 Fe^{2+} 似乎难以想象。

作者认为，类质同象是否能实现，主要取决于能量是否有利或可能，而不是取决于几何半径的相对大小。对类质同象的解释，不能仅局限于单从几何半径大小出发得出的半径比这一点上。对于 Au^+ 取代 Fe^{2+} 这个问题，应该用现代的量子理论—配位场理论，才能得到比较完满的解。

黄铁矿 (FeS_2) 为八面体构型， Fe^{2+} 位于 S_2^{2-} 构成的八面体场的中心。在这配位场的作用下， Fe^{2+} 的 3d 轨道发生分裂，由于 $[\text{S}_2^{2-}]_6$ 产生的是一个强场，Fe 的 3d⁶ 电子为低自旋排布，可见配位场的稳定能为：

$$E_{\text{稳}} = 6 \times \frac{2}{5} \Delta_0 = \frac{12}{5} \Delta_0 \quad (\Delta_0 \text{ 为 } [\text{S}_2^{2-}]_6 \text{ 八面体场作用下, } \text{Fe}^{2+} 3d$$