

金 银 铂 族 元 素 专 题 报 告 研 讨 会 论 文 集

江苏工业学院图书馆

藏书章

中国有色金属工业总公司贵金属情报网
中国选矿科技情报网 贵 金 属 网
中国有色金属学会采矿学术委员会
中国有色金属学会选矿学术委员会
中 国 选 矿 科 技 情 报 网
中国有色金属工业总公司选矿情报网

一九八八年

目 录

1. 中国金矿床稳定同位素地球化学研究.....
中国有色金属工业总公司吉林矿产地质研究所 王义文 (1)
2. 有色金属矿区伴 (共) 生金银地质找矿综合开发的若干问题.....
中国有色金属工业总公司吉林地质勘探公司 程玉明 (11)
3. 关于我国有色矿山伴生金银资源与利用回收的若干问题.....
中国有色金属工业总公司矿产地质研究院 许文渊 丁俊华 (15)
4. 世界银及伴生银矿资源概况.....
中国有色金属工业总公司吉林矿产地质研究所 都学圣 (23)
5. 世界金矿地质资源综述.....吴尚全 (28)
6. 黄金地下矿山采矿技术的发展与成就.....北京矿冶研究总院 陈隆金 (32)
7. 我国黄金矿山采矿方法综述.....招远县黄金公司 姚志远 (39)
8. 矿山工程可行性研究评价方法.....沈阳黄金学院 葛鹏图 (47)
9. 辽西黄金矿山极薄矿脉采矿方法的初步探讨.....
辽宁省朝阳市黄金公司 崔俊卿 (56)
10. 砂矿床推土机开采新工艺.....长沙有色冶金设计研究院 杨培章 (61)
11. 苏联黄金矿山留矿采矿法的使用.....长沙有色冶金设计研究院 杨培章 (64)
12. 大直径深孔采矿技术在金厂岭金矿的应用研究.....
北京矿冶研究总院 刘庆林 孙忠铭 (69)
13. 浅孔留矿法三级矿量探讨.....沈阳黄金学院 陈永生 李朝栋 (76)
14. 高砷金矿石的处理和决策.....北京矿冶研究总院 宣道中 (79)
15. 金工艺矿物学.....广州有色金属研究院 许志华 (83)
16. 黄金选冶技术综述.....昆明工学院 钱鑫 朱申红 (92)
17. 我国黄金选矿生产自动化概况.....北京矿冶研究总院 张秉实 (96)
18. 从浸出渣中浮选回收贵金属.....北京有色金属研究总院 张秀华 (99)
19. 北美黄金选冶技术的新进展.....北京矿冶研究总院 张立诚 (102)
20. 提高弋阳铜矿伴生银回收率的探讨.....
北京有色金属研究总院 高洪山执笔 (105)
21. 冷水坑矿田银露岭银矿选矿工艺流程的分析.....
北京有色金属研究总院 王志江 (109)
22. 贵金属市场与展望.....昆明贵金属研究所 田广荣 蒋鹤麟 (113)
23. 高砷硫精矿处理的研究和生产现状.....北京矿冶研究总院 陈庚源 (122)
24. 氯盐浸出法处理含金多金属黄铁矿的研究.....
北京有色金属研究总院 邓化华 赵丽馨 李显光 (130)
25. 国外铀和金银湿法冶金展望.....核工业部北京五所 孙宇 (135)
26. 外国内金提取工艺进展述评.....核工业部北京五所 蔡存 关自斌等 (142)

28. 堆浸法提金在国内的应用及展望.....沈阳矿冶研究所 赵清文(154)
27. 金银废料回收技术的进展.....沈阳黄金学院 严以发 李喜伯(159)
29. 从锌渣中回收银及其它有价金属的研究.....
北京有色金属研究总院 周洪武 邓孝耕(164)
30. 从铅阳极泥中回收贵金属的进展.....株洲冶炼厂 陈孝绪(166)
31. 溶剂萃取法在黄金提取分离中的应用研究.....杭州大学 龚钰秋(173)
32. 溶剂萃取在贵金属精炼中的应用.....昆明贵金属研究所 田广荣 蒋鹤麟(176)
33. 金的非氰化浸出.....中南工业大学 杨天足 卢宜源(185)
34. AuNi₅-CuNi₄₄异型复合线材的研制
宝鸡稀有金属加工研究所 孙艳华(189)
35. Hf-Ir, Zr-Os二元系金属玻璃的形成及其变温结晶行为.....
昆明贵金属研究所 毛 勇 高逸群(194)
36. 低熔点 Cu-Sn-P 系钎料的研究.....昆明贵金属研究所 刘雅洲 杨汝森(197)
37. 复合弹性接点材料的应力松弛.....昆明贵金属研究所 林天华(203)
38. 高精度铂铑13-铂定碳偶丝的研制及其钎点分度.....
昆明贵金属研究所 刘永佳 匡伯菊(208)
39. 840纤维型触头材料的研究...沈阳有色金属加工厂 李文雄 李连香 朴成奎(211)
40. 新型830触头材料的研究.....沈阳有色金属加工厂 李文雄(217)
41. KJJ开关用异型复合丝结构与性能的关系.....
宝鸡稀有金属加工研究所 毛忠汉(222)
42. 制备超细银粉的研究.....沈阳黄金学院 王玉兴 储建华 李德俊(224)
43. 矿石中微量银的ICP-AFS测定.....苗华伦(231)
44. 金的分离富集与测定进展.....北京有色金属研究总院 陈富珍(237)
45. 双指示剂容量法测定钯银金钯合金中钯...宝鸡稀有金属加工研究所 刘振华(249)
46. 银铈合金中铈的测定.....宝鸡稀有金属加工研究所 陈学源(254)
47. 金的原子吸收测定.....北京矿冶研究总院 吴顺来 赵熹南(259)
48. 封管溶样-分光光度法测定高纯金中的痕量锗.....
昆明贵金属研究所 吴瑞林 洪 英(264)
49. 金铈箔带的研制.....沈阳黄金学院贵金属材料厂 张丕承 曲荫田(267)

中国金矿床稳定同位素地球化学研究

中国有色金属工业总公司吉林矿产地质研究所 王义文

金是地球上最早成矿的少数元素之一。金矿化与太古代绿岩带的密切关系,明显的层控特征,成矿物质的来源和成矿作用的多元、多期性,以及特有的继承再生性等构成了金有别于其它元素的独特的成矿特征。对金矿床成矿作用的认识是随着金矿找矿勘探工作的深入而逐渐深化的,而现代矿床地球化学理论和测试技术,特别是同位素、成岩成矿实验、包裹体温压和成分测定、金的微量区分析等的发展则起着积极的推动作用。

根据同位素地球化学原理,利用同位素提供的信息研究金矿床成矿作用主要包括:

(1) 利用硫、碳同位素组成和变异规律,确定矿化剂的来源和成矿作用发生的物理化学条件;

(2) 利用铅同位素组成和演化模式,追索金属的来源和成矿作用的演化历史;

(3) 利用氢、氧同位素资料,确定对金矿成矿作用具有头等重要意义的成矿介质——水的来源和演化。

除卤族元素和硒、碲外,硫、碳化合物是金的重要矿化剂。金的迁移、沉淀与某些含硫、含碳原子团的行为密切相关。硫、碳同位素分馏试验研究表明,地质体中不同含硫、含碳矿物的同位素组成($\delta S^{34} - \delta C^{13}$)是成矿溶液总硫、碳同位素组成($\delta S_{\Sigma}^{34}、\delta C_{\Sigma}^{13}$)和它们的形成条件:温度、氧逸度、硫逸度、酸碱度和离子活度等的函数。因此,结合矿床形成条件,综合分析矿床 $\delta S^{34}、\delta C^{13}$ 的统计资料,有可能定量估计成矿溶液的硫、碳同位素组成,从而推断硫、碳等矿化剂的来源,一般情况下,通过对比不同地质体的硫、碳同位素组成和区域硫、碳同位素背景值,亦能定性地确定硫、碳的来源。共生含硫矿物之间硫同位素的平衡状态和根据硫同位素平衡理论计算的硫同位素平衡温度,以及根据大本模式计算的成矿溶液的氧逸度、硫逸度和酸碱度等则为探索成矿环境提供了重要依据。

由于金在自然界只有一个同位素 Au^{197} ,故只能将铅作为金的示踪剂。铅矿物是金矿床中的常见组分,方铅矿、碲铅矿、硫碲铅矿、脆硫锑铅矿及铜银铅铋矿等经常与金矿物伴生。自然金、黄铁矿及钾长石等矿物中亦往往含有可供质谱测定的铅。金多金属成矿阶段是内生金矿床共同的、最主要的成矿阶段。此外,金的成矿时代早,成矿历史长,成因类型繁多,成矿过程中后来的改造作用占有重要地位。这一切给有效地利用矿石铅同位素提供的信息,解决金矿床金属物质来源、成矿时代、改造作用的历史和性质,从而为解决金矿床复杂的成因机制和成矿作用的演化历史提供了可能。

几乎所有重要内生金矿床皆为在不同温度下形成的热液矿床。水是含金络合物迁移和沉淀的最重要的介质。石英、绢云母、方解石和菱铁矿等是大多数金矿床中常见的脉石矿物。因此测定包裹体水和某些羟基矿物的氢、氧同位素组成,测定石英、方解石及某些硅酸盐矿物的氧同位素组成,并根据同位素平衡理论计算成矿水溶液的同位素组成($\delta O_{H_2O}^{18}、\delta D_{H_2O}$),据此可以有效地判断成矿溶液的性质和来源。

除此之外,锶同位素地质学研究为解决与金矿化有密切关系的花岗岩类岩石的成因问题

提供了有力手段,而 $Ar^{39}-Ar^{40}$ 中子活化技术可以有效地追索热事件历史这一特点,则为探讨金的活化、迁移和富集历史创造了条件。

本文系根据作者积累的200多个金矿床,2500多个硫同位素数据,近100个矿床,400多个矿石铅同位素数据,30多个矿床二百多个氢、氧、硫同位素数据及某些重要金矿区的大量同位素年龄数据,简要地讨论了我国金矿床的硫、铅、氢、氧和碳等稳定同位素特征,强调指出了金矿床稳定同位素研究重要的理论意义和实用价值。

一、中国金矿床硫同位素组成特征

我国主要金矿床矿石硫同位素组成示于图1中。由图1可见:

中国金矿床稳定同位素地球化学研究插图及说明

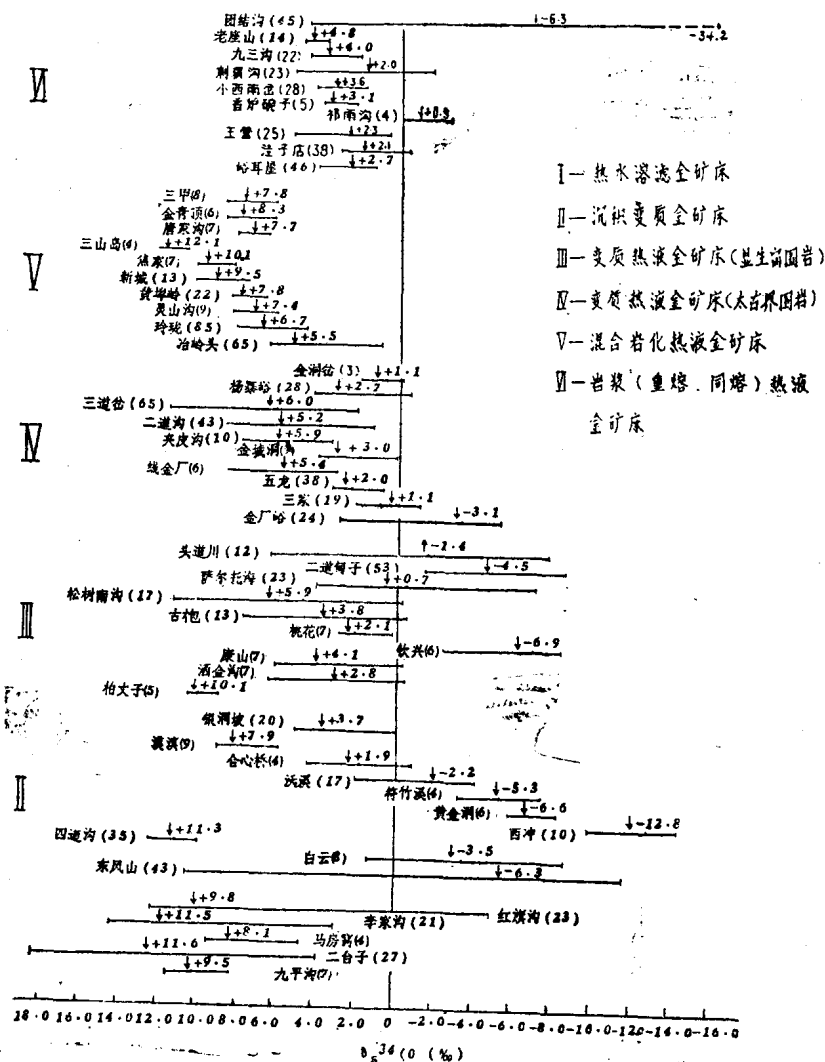


图1 中国金矿床硫同位素组成图解

(箭头所指系矿床 δS^{34} 的算术平均值,括号里的数字为样品数)

3. 与太古代绿岩带有关的变质热液金矿床的硫同位素组成受矿源层硫同位素背景值和变质相带制约。硫同位素均一化程度与矿源层变质深度呈正相关关系, 共生硫化物基本上达到硫同位素平衡状态, 由于太古宙岩石的硫同位素背景值以接近陨石值为特征, 故绝大多数矿床 $\bar{X} = -2.1 \sim +7.4\%$, $R < 10\%$, 与矿源层硫同位素背景值比较, 硫石硫往往稍富 S^{34} (图2)。

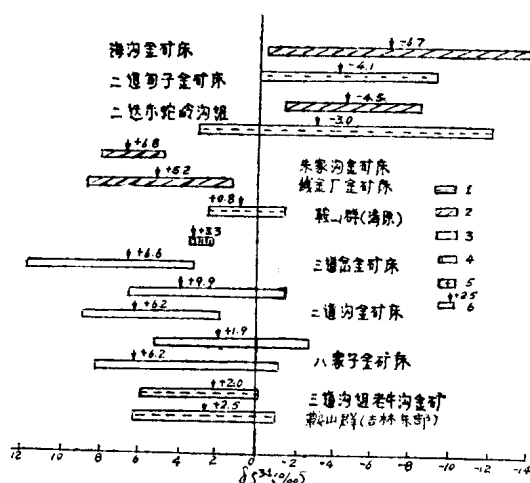


图2 地层、火成岩及矿石的硫同位素组成图解

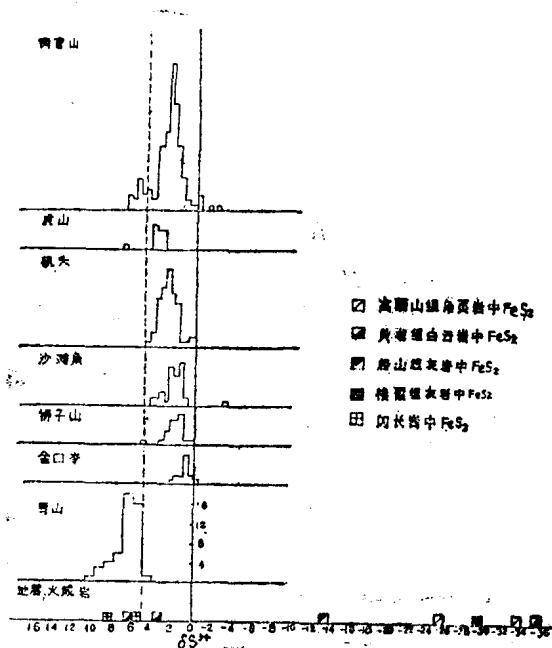
1.变质岩付矿物硫化物; 2.矿石硫化物; 3.黄铁矿; 4.方铅矿; 5.混合花岗岩中付矿物硫化物; 6. $-8S^*$ 算术平均值

与显生宙某些特定层位的热变质作用有关的变质热液金矿床其硫同位素组成与容矿地层的原岩岩性有密切关系,由含碳泥质岩→火山碎屑岩→泥砂质岩→碳酸盐岩,矿石富集 S^{34} 的程度依次增高。与矿源层的硫同位素背景值比较,矿石硫稍富集 S^{32} (图2)。上述结果表明,在区域变质成矿过程中硫同位素分馏以同位素交换效应为主,而在热变质成矿过程中以扩散分馏效应为主[2]。

4. 主要发育于山东胶东半岛上的混合岩化热液金矿床的硫同位素组成受矿源层原始硫同位素组成的影响可以远离陨石值, 又具有岩浆硫变异小, 共生硫化物间同位素分配受热力学定律支配的双重特征。绝大多数矿床 $\bar{X} = +4.9 \sim +12.1\%$, $R < 5\%$ 。利用大本模式计算的 $\delta S_{34}^{34} = +10\%$ 左右, 与实测结果一致 (图3)。矿体、混合花岗岩 (成矿母岩) 和前寒武纪变质岩系 (矿源层) 三者硫同位素组成的一致性表明了它们之间的亲缘关系。矿石硫同位素组成与金矿床类型和矿化强度之间的密切关系, 有可能将 δS^{34} 作为金矿床评价和预测的重要指标。例如胶东地区, 石英脉型金矿床 $\bar{X} = +5 \sim +7\%$; 蚀变岩型金矿床, $\bar{X} = +8 \sim +$

[illegible]

一、 $\delta S_{\Sigma S}^{34} = 0\%$ 时，黄铁矿的 δS^{34} 等值线；
 一、 $\Sigma S \approx 0.01$ 克分子/公斤水时，Fe--S—O₂矿物界线；
 …………： $\Sigma C = 1$ 克分子/公斤水时，方解石和石墨稳定范围；
 阴影区I： ΣKCl 为 $0.5 \sim 0.3$ 克分子/公斤水时，与钾长石-白云母-石英相平衡时溶液的pH值范围；
 阴影区II：与方解石-硅灰石-碱长石相平衡时溶液的pH值范围；
 左边界线： $KCl = 0.1$ 克分子/公斤水时，高岭土-白云母界限；
 右边界线：pH = 8.3



5. 重熔、同熔岩浆热液金矿床, 不论其与中酸性小侵入体有关, 还是与火山岩、次火山岩有关, 其矿石硫同位素组成具有岩浆硫特点。绝大多数矿床 $X = +1.1 \sim +4.6\%$, $R < 5\%$ 。利用共生矿物对计算的硫同位素平衡温度与其它测温法获得的温度值基本一致。矿石硫与成矿母岩的硫同位素组成一致, 而与容矿地层的硫同位素背景值可相差很远 (图4)。随着成矿作用接近地表, δS^{34} 的变异增大, 当有大气降水参与成矿作用时, 矿石硫同位素组成可发生巨大变化, 以高度富集 S^{32} 和离散极大为特征。例如, 团结沟金矿, 根据45个样品统计, δS^{34} 为 $-34.2 \sim +5.0\%$, $\bar{X} = -6.3\%$, 极差达40%。但根据大本模式计算的 $\delta S_{\Sigma S}^{34}$ 仍接近于零 (图5)。

• 4 •

[illegible]

二、中国金矿床铅同位素组成特征

Figure 1 is a scatter plot showing the relationship between the Pb^{207}/Pb^{204} ratio (Y-axis) and the Pb^{206}/Pb^{204} ratio (X-axis). The Y-axis ranges from 14.00 to 16.00, and the X-axis ranges from 15.00 to 19.00. Data points are categorized by rock type: 1 (metamorphic gold ore), 2 (metamorphic gold ore), 3 (sedimentary gold ore), 4 (sedimentary gold ore), 5 (sedimentary gold ore), and 6 (sedimentary gold ore). Two linear regression lines are shown: one for Ga (Ga = 9.58) and one for 2Ga (2Ga = 8.50). The intercepts are labeled $a_0 = 9.307$ and $b_0 = 10.294$. The age $t_0 = 44.5$ billion years (Ga) is indicated.

图6 中国金矿床矿石铅同位素组成

1. 与太古代绿岩带有关的变质热液金矿床其矿石铅多为古老异常铅（多阶段铅）。同一矿带中铅同位素组成往往有明显变化，位于矿带中心的大型矿床多为正常铅，而矿带边缘的中、小矿床则异常铅增加。同一矿床中不同部位的矿脉也有这种变化趋势。按单阶段模式计算的 ϕ 年龄为7~22亿年，小于容矿地层的年龄，而大大高于与矿体相伴生的显生宙花岗质岩脉、岩墙的年龄。利用二次等时线可估计铅源年龄 t_1 （或壳幔分离的年龄）和铅矿化年龄 t_2 （铅与铀、钍系分离的年龄）的变化范围（图7）。当利用其它同位素年代学方法测得矿源

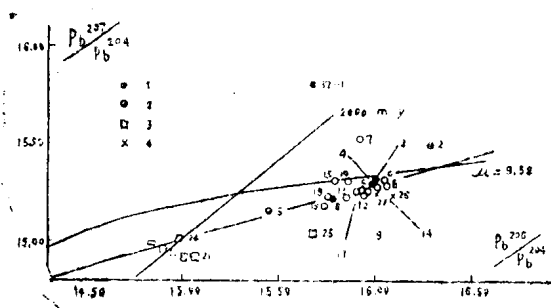


图7 金厂峪金矿铅同位素特征（主要根据郭裕嘉的资料绘制）

1—矿石方铅矿；2—矿石黄铁矿；3—变质岩岩石铅；
4—火成岩岩石铅。

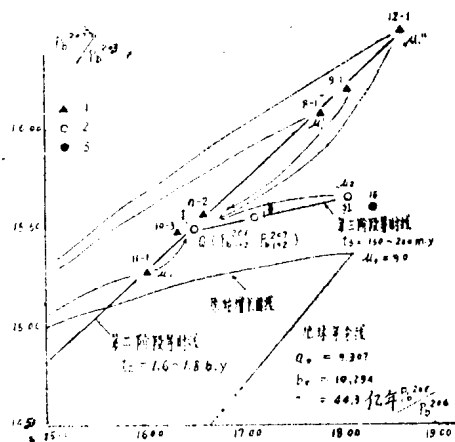


图8 夹皮沟金矿区铅同位素三阶段演化图

1—太古宙变质岩系中的金矿床；2—不同类型矿床平均值；3—二道甸子金矿床平均值。

岩的年龄后，据此可定量计算铅矿化年龄。反之亦然。利用三次等时线除能估计铅源年龄（ t_1 ）和铅矿化年龄（ t_2 ）外，尚可求得一迭加成矿作用年龄（ t_3 ）。例如夹皮沟金矿带，根据大量的同位素年龄资料确定该区前寒武纪有五期地质事件^[2]。利用三次等时线模拟铅的演化（图8），得 $t_1 = 31 \sim 33$ 亿年（相当于鞍山群的形成年龄）， $t_2 = 16 \sim 19$ 亿年（相当于第二期混合岩化和北西弧形混合花岗岩带形成年龄）， $t_3 = 1.5 \sim 2$ 亿年（相当于显生宙花岗岩侵入年龄）^[4]。

2. 赋存于古生代某些特定层位，与热变质作用有关的变质热液金矿床，其矿石铅为年轻异常铅，单阶段年龄多为负值，而区域上海西、燕山花岗岩中的热液方铅矿却为年轻正常铅，其模式年龄与岩体的钾—氩年龄吻合，表明金矿床中矿石铅并非来自花岗岩体，而是来自特定的矿源层。但花岗岩为成矿物质的迁移提供了必要的热能和部分溶液。

3. 沉积—变质金矿床以具有同位素组成稳定的正常铅为特征，单阶段模式年龄多为4~11亿年，反映了与金矿成矿作用有关的沉积成岩或变质作用年龄（图9）。某些矿床中出现的特别低的模式年龄值可能与后期迭加改造作用有关。

4. 发育于胶东半岛和东南沿海一带的中生代混合岩化热液金矿床，其矿石铅大多数为古老正常铅。以胶东半岛为例，产于混合花岗岩中的金矿床，不论是石英脉型，还是蚀变岩型，铅同位素组成都很一致，模式年龄多为6~9亿年。产于胶东群变质岩系中的变质热液石英脉，矿石铅同位素组成变化范围增大，且呈线性排列。单阶段模式年龄为10~13亿年。胶东群地层中的方铅矿，单阶段模式年龄为8亿年。上述三种产状的矿石铅近似落在同一条等

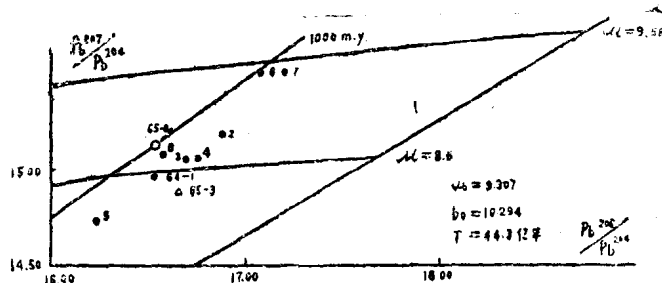


图9 围山城金银矿床矿石铅同位素组成 (根据河南地调三队资料)

1—银洞坡金矿床; 2—破山银矿床; 3—大理岩。

时线上 (图10)。以玲珑花岗岩的钾-氩年龄 (130m, y) 和锆石、磷灰石、榍石的 铀-铅年龄 (150~290m, y) 作为 t_2 计算得 t_1 为33亿年 (图10)。上述结果表明, 胶东地区的金矿化, 其矿源为前寒武纪古老变质岩石, 而成矿作用可能经历了几个时期, 最后一次 (亦是最主要的一次) 金矿化发生于中生代, 而且晚期金矿化对早期金矿化具有明显的继承性。

5. 我国华北地台边缘一些与中生代中一酸性小侵入体、次火山岩有关的重熔岩 浆 热液金矿床其矿石铅同位素组成与所在地区古老变质岩中的变质热液金矿床相似, 皆落在早前寒武纪变质岩岩石铅范围内 (图11), 单阶段模式年龄为6~21亿年。而这些矿床的成矿母岩

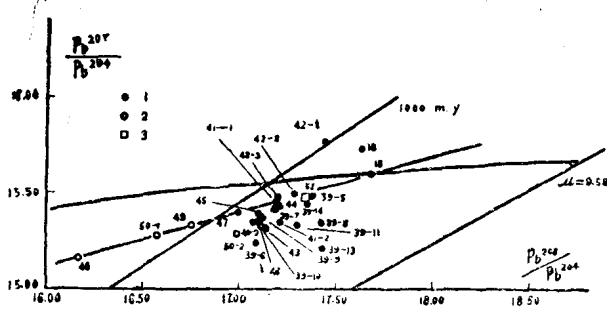


图10 胶东金矿区铅同位素组成

1—混合花岗岩中金矿床; 2—变质岩中金矿床; 3—胶东群地层中方铅矿。

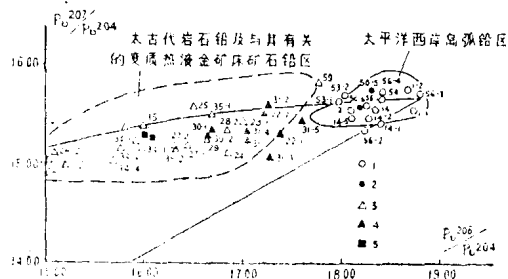


图11 重熔和同熔岩浆热液金矿床的铅同位素组成

1—同熔岩浆热液金矿床; 2—同熔花岗岩岩石铅; 3—重熔岩浆热液金矿床 (太古界围岩); 4—重熔岩浆热液金矿床 (元古界围岩); 5—重熔花岗岩岩石铅。

却几乎无例外地为燕山期产物。例如: 峪耳崖金矿, 含矿花岗岩侵入于震旦系白云质大理岩中, 岩体钾-氩年龄为146~169百万年, 而矿石铅单阶段模式年龄却为15~16亿年, 与其南侧遵化台凸上的金厂峪、三家等矿床的矿石铅 (模式年龄15~22亿年) 同位素特征相似。金厂沟梁、柏文子、洼子店和王家店等矿区都有这种情况。不仅如此, 与这些矿床有关的花岗岩侵入体, 其岩石铅同位素组成也与古老变质岩岩石铅及变质热液金矿床矿石铅一致。上述特征表明, 在这类矿床中, 其矿石铅或来自深部重熔的低值麻粒岩类岩石, 或者在重熔过程中有古老矿石铅的加入。这两种可能性都指出这些矿床的成矿母岩系重熔产物, 即中生代地台活化作用使矿源岩重熔的结果。由此解释了我我国北方某些燕山期花岗岩含金专属性这一客观事实。

6. 与中生代同熔岩浆作用有关的新金银矿床 (例如, 刺猬沟小西南岔、八宝山 和 马

山等)，其矿石铅多为现代正常铅，与其有关的花岗岩侵入体其岩石铅也为正常铅，且二者皆落在太平洋西岸岛弧铅范围内（图11）。单阶段模式年龄为0~3亿年，与其成矿母岩的钾—氩年龄一致。

花岗岩的含金性往往与继承古老变质岩石中的成矿物质有关。矿石铅同位素组成特征可用作判断显生宙岩浆岩是否继承了古老矿源层中成矿物质的标志。从而为我们研究金矿化的继承、再生性提供了有力武器。

三、我国某些金矿床的氢、氧同位素组成特征

我国某些金矿床成矿热液的氢、氧同位素组成表示于图12中。图中引用了张理刚、罗献林、王时琪、姚凤良、郑明华等的部分资料。由图12可以明显地看出：

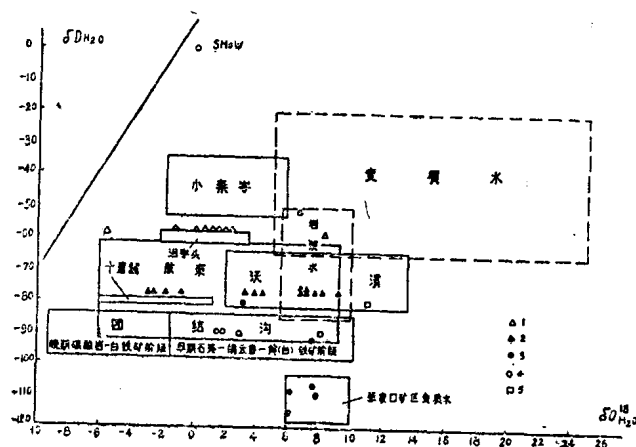


图12 我国某些金矿床成矿溶液的氢、氧同位素组成

1—围山城；2—珑玲；3—张家口；4—夹皮沟；5—下营坊。

1. 已测定的我国大多数金矿床其成矿溶液的 $\delta O_{H_2O}^{18}$ 值变化较大，而 δD_{H_2O} 值变化较小，其投影点在图12中平行横坐标向雨水线延伸。造成这种氧同位素“漂移”的可能原因有两个，一是成矿溶液主要来自大气降水，它们在渗入地下环流的过程中被加热，这些被加热的地下水与硅酸盐和碳酸盐岩石（富 O^{18} ）发生同位素交换反应而使其 $\delta O_{H_2O}^{18}$ 增大，温度越高，矿物水体系的分馏系数越小，地下热水的 δO^{18} 值就越接近岩石值。例如，根据罗才让的资料换算，李家沟金矿不同成矿阶段成矿溶液的 δO^{18} 值为 $+6.1 \sim +11.3\%$ ，较其它矿床明显偏高，而且由硅化体（平衡温度 $310^\circ C$ ）到含金硫化物石英脉（平衡温度 $210^\circ C$ ），再到含金黄铁矿方解石脉（平衡温度 $170^\circ C$ ）， $\delta O_{H_2O}^{18}$ 由 $+11.3\%$ 逐渐降低到 $+8.0 \sim +10.4\%$ ，最后降低到 $+6.1 \sim +6.7\%$ ， $\delta O_{H_2O}^{18}$ 随平衡温度降低而降低，这一点表明，环流地下热水与矿体围岩（硅化白云岩）发生了明显的同位素交换^[5]。由于白云岩相对富集 O^{18} ，故使成矿溶液的 δO^{18} 明显增高。又例如，冶岑头金矿由蚀变片麻岩到含金石英脉，随着平衡温度的降低（由 $345^\circ C$ 降低到 $248^\circ C$ ）成矿溶液的 δO^{18} 值由 $+3.4\%$ 降低到 -2.3% ^[6]。

造成氧同位素漂移的第2个原因是不同成因水的混合。例如，团结沟金矿，早期石英—绢云母—黄铁矿阶段（平衡温度 $350 \sim 420^\circ C$ ），其 $\delta O_{H_2O}^{18}$ 为 $+10.2\%$ ，接近岩浆水 δO^{18} 值，中期玉髓状石英—白铁矿阶段（平衡温度 $178 \sim 230^\circ C$ ） $\delta O_{H_2O}^{18}$ 为 $-1.3 \sim +2.5\%$ ，明显向雨

水线靠近;至晚期方解石—白铁矿阶段和白云石—白铁矿阶段, $\delta O_{H_2O}^{18}$ 为 $-9.4 \sim -3.6\%$, 已接近当地现代大气降水值。 $\delta O_{H_2O}^{18}$ 的上述变化趋势表明, 随着成矿热液温度和压力的降低, 大气降水的混入愈来愈多。矿石硫、铅同位素研究支持这一结论[3]。被加热的大气降水在循环过程中从围岩(黑龙江群变质岩白垩纪火山岩)中吸取了部分生物成因硫(富集 S^{32}) 并从基底岩石中吸取了部分古老矿石铅。迭加作用的结果使晚期成矿阶段矿石 δS^{34} 远离陨石值, 向负方向偏移, 同时使晚期硫化物的铅同位素组成“老化”, 模式年龄为 $18 \sim 19$ 亿年[4]。

团结沟金矿晚期碳酸盐矿物的 δC^{13} 值为 $3.01 \sim +0.99\%$, 靠近海相碳酸盐岩的相应值, 而与岩浆和火山热液金矿床的 δC^{13} 有明显区别(图13)。表明晚期碳酸盐矿物中的碳也来自围岩。

又例如, 玲珑金矿区主要成矿阶段 $\delta O_{H_2O}^{18}$ 为 $+3.0 \sim +9.2\%$, 但晚期石英—碳酸盐阶段 $\delta O_{H_2O}^{18}$ 明显向雨水线靠近 ($-1.9 \sim -0.8\%$), 表明成矿作用晚期有大量大气降水加入成矿溶液中[7]。

2. 根据王时琪等的资料, 张家口金矿区成矿溶液的 δO^{18} 值变化范围很小 ($+6.1 \sim +8.1\%$), 但 δD 的变化范围较大 ($-115 \sim -51\%$), 矿区变质水的 δO^{18} 值为 $+5.3 \sim +6.4\%$, δD 为 $-117 \sim -105\%$ 。成矿液的氢、氧同位素组成与矿区变质水的氢、氧同位素组成基本一致。从另一侧面证实了该矿床的变质热液成因。大气降水加入成矿溶液使 δO^{18} 降低。例如, $300^\circ C$ 以上结晶的乳云色石英 δO^{18} 为 $+6.1 \sim +8.1\%$, $300^\circ C$ 以下结晶的烟灰色石英的 δO^{18} 值却为 $+3.1\%$ [8]。

3. 根据现有的氢、氧同位素资料, 我国金矿床和国外大多数金矿床相似, 其成矿溶液具有明显的多来源、多成因特征。小西南岔金铜矿、下营坊金—多金属矿、胶东金矿区早期成矿阶段和团结沟金矿主成矿阶段的成矿溶液具有岩浆水(再平衡岩浆水)特征; 而小秦岭、夹皮沟、张家口和沃溪金矿区的成矿溶液却主要来自氢、氧同位素组成变化范围较大的变质水; 围山、十里铺银矿和冶岑头、李家沟金矿其成矿溶液主体都是与围岩平衡的大气降水。上述不同类型金矿床成矿作用晚期都有大气降水不同程度地参加, 例如团结沟和胶东金矿区。

在矿源层(岩)存在的前提下, 金矿化主要取决于一个长期活动的热水循环系统的存在。而氢、氧同位素研究则是判断成矿水溶液性质, 进而探求其来源的最直接、最有效的方法, 可以期待, 随着包裹体水氢、氧同位素测试技术的提高, 氢、氧同位素在金矿床上的应用将超过其它稳定同位素而发挥愈来愈大的作用。

我国金矿床碳同位素数据积累较少, 从现有资料(主要是金矿床石英—碳酸盐阶段矿物的测定结果)看, 除与中生代火山岩有关的同熔岩浆热液金矿床(例如刺猬沟、五凤)为幔源碳外, 其它一些矿床碳的来源都与碳酸盐岩有不同程度的联系(图13)。

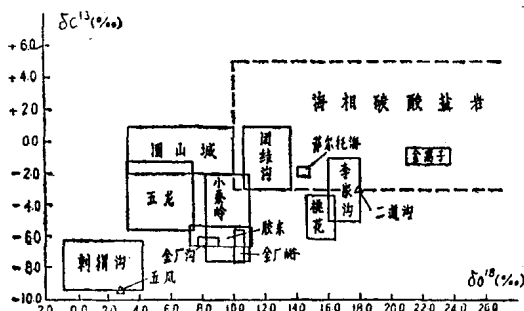


图13 我国某些金矿床碳酸盐矿物碳氧同位素组成

四、金矿床稳定同位素研究的重要意义

金矿化与花岗岩的关系问题是一个重要而又有严重分歧的问题。鲍温、林格伦等在本世纪早期所做的试验研究和热液矿床工作使人们确信, 含矿热液中的金来源于冷却着的侵入

体, 因此将绝大部分热液金矿床划为岩浆期后热液矿床中。W.H. 爰孟斯的金矿床成因分类表就是根据花岗岩侵入体深度(或温度)而划分出从岩浆分凝金矿床至低温热液金矿床六大类。

氢、氧同位素研究表明, 内生金矿床的成矿溶液既可来自与花岗岩侵入体有关的岩浆水(再平衡岩浆水), 也可以来自变质(混合岩化)水、各种成因的热卤水及同生水, 但更多的是直接来源于大气降水。因此, 今日所谓的“热液”一词系指不同成因不同来源的含矿热液水的总和, 今日的热液金矿床应包括: 岩浆(重熔、同熔)热液金矿床、混合岩化热液金矿床、变质(区域变质、热变质和动力变质)热液金矿床和热水溶滤金矿床等多种成因热液矿床。不仅如此, 同一矿床的成矿溶液也往往是多源和多期的。

例如, 与辽东半岛大多数赋存于元古宙地层中的层控金矿一样, 白云金矿带亦受辽河群大石桥组或盖县组某些特定层位控制, 但工业矿体却受硅钾蚀带控制。硫同位素测定结果表明, 组成矿带的蚀变云母片岩和蚀变黑云变粒岩的硫同位素组成以富集 S^{34} 为特征, $\bar{X} = +15.0\%$, 与辽河群的硫同位素背景值一致。而硅钾蚀变带的硫同位素组成却以富集 S^{32} 为特征, $\bar{X} = -3.5\%$, 钾-氩年龄测定发现, 云母片岩和伟晶岩的年龄为1571~1670百万年, 而硅钾蚀变带的年龄却为192百万年(甲永治资料), 二者的形成时代相差很远。脉石英包裹体水 $\delta D = -142\%$ 。上述结果表明, 该矿床经历了两次成矿作用。早期成矿作用与区域变质作用有关, 成矿溶液来自变质水, 成矿物质来自辽河群某些层位, 晚期成矿作用系由海西花岗岩侵入所引起, 成矿溶液系被花岗岩加热的地下水。

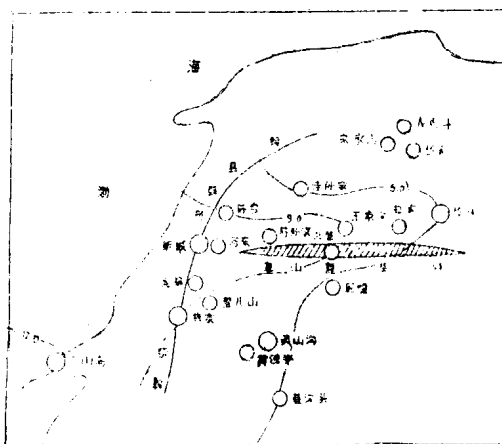
花岗岩含金专带性问题对金矿找矿评价具有十分重要的意义, 但对这一问题的看法向来分歧很大。铅同位素研究表明, 花岗岩的含金性与继承古老含金岩石中的金有关, 即在一个金矿地球化学区中, 只要具备了地层潜在含金性这一前提, 在该地区发育的后期花岗岩侵入体都可能含金。因此沿华北地台边缘变质热液金矿和混合岩化热液金矿发育区, 同时也是重熔岩浆热液金矿发育区。这些不同类型金矿床在同一地区迭加的结果即形成了金矿化集中区。矿石铅同位素特征可作为花岗岩侵入体是否继承了古老矿源层中成矿物质的标志, 从而为我们研究与金矿有关的花岗岩的形成机制和金矿化的再生特性提供了有力手段。上述实例表明, 金矿床稳定同位素研究可以为解决复杂的矿床成因和成矿机理问题提供重要信息。稳定同位素资料是建立金矿床成矿模式的不可缺少的重要依据。不仅如此, 查明稳定同位素的时间、空间分布规律, 可以为成矿预测和矿点评价提供重要资料。

例如, 山东胶东一带的金矿床, 其矿床平均硫同位素组成与矿床所处的地质位置有关。呈现有规律地变化^[3]。以胶东西部为例, 最西边的三山岛金矿 $\bar{X} = 12.1\%$; 往东到玲珑花岗岩体与胶东群地层的接触带上, 沿黄县弧形断裂分布的焦家、新城等金矿床, $\bar{X} = 9.5 \sim 10.1\%$; 其东侧河东-望儿山断裂上的几个金矿床 $\bar{X} = 8.2 \sim 10.0\%$; 北截-灵山沟断裂上的金矿床, $\bar{X} = 6.8 \sim 9.2\%$; 处于玲珑花岗岩中心部位, 受招远-玲珑断裂控制的玲珑金矿床, $\bar{X} = 6.7\%$; 最东边的西林金矿床, $\bar{X} = 6.0\%$ 。矿石硫同位素组成这种系统变化表明, 矿带西部的剥蚀深度要比东部大得多, 从而指出在东部(玲珑)深部找矿和在西部沿海寻找金矿的巨大远景。根据胶东西部近30个金矿床200多个硫同位素数据绘制的 δS^{34} 等值线图呈东西走向, 与阜山复背斜轴向一致, 阜山复背斜轴部为一高 δS^{34} 带(图14)。这一结果表明, 胶东西部地区金矿带受矿源层展布和古老褶皱构造控制呈东西向延伸。而中生代混合花岗岩及控矿、容矿断裂受北东向深断裂控制, 二者的交切部位应是金矿成矿重要远景区, 这一原则

同样也适用于胶东东部地区[9]。

前已述及，在胶东地区可以利用矿石 δS^{34} 值预测金矿床类型及评价金矿化强度。

毫无疑问，随着金矿找矿勘探工作的进展，地质资料 and 同位素数据的积累将迅速增加，加之测试精度的提高及数据处理技术的现代化，利用同位素理论和方法解决金矿床成矿理论和找矿实践问题的研究工作将广泛开展起来，同位素资料在金矿成矿预测、找矿和评价工作中亦将起着愈来愈大的作用。



收,从技术上提高矿产品的综合回收率,改变长期以来的自流状态,对社会来说,是不增加基建投资而增加社会效益的大事。

从伴(共)生金银地质成矿规律研究程度观之,同样是处于“顺便”研究的状态。据Cu、Pb、Zn、Ni、Sn、Mo、Sb、Bi等九种有色金属297处大中型矿床的不完全统计,研究过金的仅占14.5%,研究过银的仅占27.3%。可见不少矿区,伴(共)生金、银的地质资源不清,赋存规律不明。

矿床技术经济的研究程度与研究方法,更显得十分薄弱,综合找矿,综合评价作为规定已倡导多年。近年来,综合找矿与综合评价经验教训生动地说明,综合找矿与综合评价工作有待从成矿系列的理论上、从矿床技术经济的研究程度上以及研究方法上进一步加强。

矿山名称	伴生金银产值 占年产总值 (%)	矿山名称	伴生金银产值 占年产总值 (%)
厚婆坳	Ag32.5	红透山	AuAg10.6
柿竹园	Ag27.0	柴河	Ag9.8
金子窝	Ag19.8	水口山	AuAg6.4
宝山	Ag13.8	桓仁	Ag6.0
大坊	Ag20.3	天宝山	Ag4.3
银山	AuAg15	大姚	Ag4
武山	AuAg14.2	永平	Ag3.6
青城子	AuAg16	大尖山	Ag12.2

正如大家所知,江西银山是铅锌矿,近年来江西有色地质勘探公司,对银山伴(共)生金银的赋存规律与评价方法加强研究,破除了过去勘探时“组合样”所得的结论,仅用少量的科研投资,在一个“铅锌”矿田里,发现了大型金铜矿,紧接着又发现了独立的金矿。可见,突出加强伴(共)生金、银赋存规律的研究,其经济效益与地质效果是十分明显的。

此外,金银不仅经济价值高,国家也十分急需。我国黄金的储备与西方国家相比差距很大,从经济建设要求观之,急需增加黄金的产量。银矿亦是如此,70年代末到80年代初,年耗银量为 $\times\times\times$ 吨,每年有 $\times\times\times$ 吨的亏空。由于产量不足,严重供不应求,所以国家严格控制银的使用。

从国家需求来看,突出加强伴生、共生乃至独立金、银矿床的研究工作是迫在眉睫的重要使命。

二、加强斑岩型、矽卡岩型、热液型等有色金属矿床中伴(共)生金、银赋存与富集规律的研究,扩大贵金属的资源远景。

对有色金属矿床中的伴共生金银的研究,常常是侧重于赋存状态的研究,这方面虽属重要,但要扩大金银的矿产资源,应把注意力与着眼点转到伴共生金银的赋存规律与富集因素上来。通过研究,有可能发现富集部位,从而提高矿床身价与矿山经济效益。比较重要的有以下几个方面,

1. 金、银的地球化学行为与成矿作用特点相似,既要研究各自的赋存规律,又要注意

二者演化的规律。

金、银、铜同属铜族元素，在元素周期表上金、银、汞、铜、铅、锌、铁、钴、镍等是近邻，故金与银的地球化学行为皆表现为亲硫的特点。所以，在以硫化物为主的有色金属矿床中，常有伴生金银的存在，并具有相似的矿化类型与成矿特点。

伴（共）生金与各种岩浆热液成因的铜矿密切相关，铜矿中的伴生金占其总量的90%以上，伴（共）生银主要与各种热液成因的铅锌矿密切相关，占伴生银总量的90%以上，其中重要的，斑岩型矿床中的伴生金，占伴生金总量的43%，伴生银占16%；矽卡岩型矿床中伴生金占32%，伴生银占26%；热液型矿床中伴生金占10%，伴生银占36%。

2. 斑岩型矿床伴（共）生金银的成矿特点。

含金的斑岩铜矿、铜钼矿、斑岩钨矿及含银的斑岩铅锌矿等，其矿化特点：在岩体内呈细脉浸染状，在岩体的接触带附近常构成富集带或呈接触交代矿化，远离斑岩体常有较富的脉状矿床与层状矿床。

其成矿时代多为燕山期，燕山期的构造作用形成巨大的多旋回的火山-岩浆活动带。由于燕辽、内蒙东部、大兴安岭，山东及浙闽粤等东南沿海一带燕山晚期的火山-岩浆活动频繁，加强有色金属成矿带或有利的构造带中伴生与共生金银的地质找矿有发展远景。

含金斑岩铜（钼）矿中伴生金含量一般比较低，多在0.5克/吨以下，如果含金在0.5~1克/吨或更高的则称为富金的斑岩型矿床，由于斑岩铜（钼）矿往往规模大，含有0.1克/吨的金，其经济效益就十分可观。含金斑岩型铜钼矿中伴生金的富集与钾化、硅化、黄铁矿化带密切相关。在钼铜比值低的地段，伴生金的含量往往增高，在某些斑岩型铜（钼）矿床中伴生金的富集与黄铜矿、斑铜矿、磁铁矿带等密切相关，在有些偏酸性的斑岩接触带，常形成共生的铜金矿。

斑岩型铅锌银矿是很有发展远景的类型。我国近些年来发现的河北蔡家营子、江西冷水坑、浙江大岭口、五部等均属之。有远景的斑岩型银铅锌矿多产在陆相火山岩分布区。

斑岩型铅锌银矿，矿化呈细脉浸染状赋存在岩体内及岩体接触带中，如冷水坑铅锌银矿富集在花岗斑岩与火山岩接触带附近的破碎带与隐爆带中。晚期的碳酸盐硫化物阶段为主要成矿阶段，多种蚀变类型叠加的地段常常是矿化强、工业矿体类型多的地段。又如河北蔡家营子铅锌银矿，成矿与石英斑岩密切相关，银的品位为135克/吨，储量达××××吨，而地表呈散状的、不起眼的褐铁矿化确是其重要的找矿标志；由于绢云母与矿化密切相关，绢云母化蚀变岩风化呈白土，因此，在破火山口附近或破火山口与区域性断裂交汇处出现白色土化带时，则是寻找蔡家营式铅锌银矿的另一重要找矿标志。

3. 矽卡岩型有色金属矿床中伴共生金的赋存规律。

加强矽卡岩型矿床伴共生金的研究十分重要。据我国东部41处矽卡岩型铁铜铅锌矿床的统计，矽卡岩型矿床含金的多，尤其是含金高的多，在含金矽卡岩型矿床中 ≥ 1 克/吨的比例高。据统计金1~1.5克/吨的占14%，大于1.5克/吨占22%，二者合计为36%，对大于1.5克/吨者可称为富金的矽卡岩型矿床。事实说明，加强矽卡岩型伴生金的研究，对增加金矿资源的潜力很大。

含金矽卡岩型矿床的空间分布具有相对的集中性。我国主要分布于江西、湖北、湖南、安徽、江苏和山东等省，集中分布在长江中下游成矿带上。

含金矽卡岩型矿床，金的赋存规律主要为：

(1) 伴生金富集程度常与其矿化类型密切相关, 据多数矽卡岩型矿床的统计, 伴生金的富集程度依次为矽卡岩型铜矿、铜硫矿、铜铅锌矿及铜铁矿床等。

(2) 伴生金的富集部位, 主要是在侵入岩的接触带上。当接触带有构造迭加, 或岩体的外侧构造条件有利时, 常形成富金的矽卡岩型矿床。如封山洞铜矿岩体的两侧, 发现了鸡笼山共生的矽卡岩型金铜矿; 又如湖南水口山主接触带为含铜黄铁矿, 最外侧为铅、锌、银、金矿床。

(3) 含金矽卡岩与侵入体的关系;

一般含金矽卡岩多为中酸性侵入岩, 而含金富的矽卡岩型矿床, $K_2O + Na_2O$ 多为6-8%, 而 $Na_2O > K_2O$, SiO_2 波动在60%左右, 如新桥的石英闪长岩 SiO_2 为57.41%, $Na_2O + K_2O$ 为6.63%, 鸡笼山的花岗闪长斑岩 SiO_2 为61.01%, $K_2O + Na_2O$ 为6.10%。

(4) 伴生金与主金属元素的关系;

由于自然金常以硫化物为载体, 尤其是常与铜、硫、铁等元素组成的矿物为载体, 故矽卡岩型矿床中伴生金的赋存规律常与主金属元素一致, 如水口山康家湾, 伴生金、银的富集部位与主金属元素一致, 金分布于铅锌、黄铁矿体中, 一般不超出铅锌黄铁矿矿体范围, 其载体矿物以黄铁矿、闪锌矿为主, 黄铁矿与闪锌矿中的自然金分别为43.68%, 40.32%。

含金矽卡岩型矿床, 金与主金属元素有时呈负向的金属分带, 如华铜铜矿, 铜在近接触带的围岩中, 而金矿化则在铜品位显著变贫的外带中。

4. 伴共生银的赋存规律

伴共生银主要与矽卡岩型铅锌矿、块状硫化物型铅锌矿、岩浆期后热液型铅锌矿及火山岩-次火山岩浅成低温热液型铅锌矿等密切相关, 独立的银矿床比较少见, 百分九十以上的银矿与铅锌为主的多金属矿床相伴。

银矿的主要矿物以辉银矿、自然银、金银矿等为主, 银形成的独立矿物有五、六十种之多, 在有色金属矿床中银多以独立矿物存在, 又多以方铅矿为载体, 但不能忽视其矿物组合规律的研究。如湖北银洞沟, 自然银、辉银矿、银金矿等以独立矿物与硫化物伴生, 而黄铁矿中普遍含银。河北小扣花营子银赋存于硬锰矿中, 是从锰矿中发现的银多金属矿床。湖南七宝山矽卡岩型多金属矿床, 地表黑土有金矿和银矿, 金:银为1:3~1:300, 称之为黑土型金银矿。这种黑土型金银矿, 别的省亦有发现, 由于出露地表, 工业生产成本低, 是很值得重视的。

三、加强伴生、共生、独立金、银矿成矿演化规律的研究, 是迅速扩大金、银矿产资源的新途径。

广泛深入地开展伴生、共生、独立金、银矿床的演化规律的研究, 在伴生金银矿田内寻找金、银矿的富集体、富集地段或独立的金银矿, 对迅速增加金银矿产资源具有战略意义, 是一条重要的金、银矿的找矿新途径。

伴生金银与共生金、银矿, 从工业利用的角度观之, 前者一般达不到工业品位, 在开采上形不成独立开采对象, 通常作为副产品, 在选冶过程中顺便回收。而共生的金银矿则不然, 能构成独立开采与分别选冶的条件, 由于矿山生产能直接形成产值, 所以对共生金、银矿床的研究与利用皆比较重视, 而对伴生金银的回收利用则比较忽视。

但是从地质成矿条件、矿化特点观之, 伴生金银与共生金银除了含量的多少以外, 在地质成矿上有许多共同之处, 有不少矿床二者呈有规律的演化。