云南某铜矿床的地球化学特征

王可南

云南某铜矿床经过多年勘探，积累了较多资料。作者根据国内外有关论述，结合本区的实际情况，曾提出本矿床为沉积变质成因的见解〔1〕。

最近几年，在开展伴生有益元素的查定工作中，了解到与铜矿床有关元素的地球化学性状，从而进一步阐明了上述见解。兹将本矿床沉积和变质作用的地球化学特征及其找矿方向，分述如后。

铜矿床的地质简况

本区出露地层以昆阳群为主。面积约占70%；其余则为震旦系及部分古生代地层。区内断裂构造发育，大的断层走向为南北向及东西向；小的断裂走向为北东向及北西向。火成岩分为前震旦纪与华力西期，分别为辉长辉绿岩及辉长岩。

铜矿床严格受地层控制。主要矿体均与昆阳群中的紫色板岩夹砂质白云岩（简称紫色层）、泥砂质白云岩（简称过渡层）和过渡层上盘的白云岩有关；其中尤以过渡层对铜矿化的控制作用最为明显。

矿体多呈层状，少数小矿体呈似层状、脉状、囊状或不规则状。矿体倾角一般为60～80°。铜的硫化矿物主要为斑铜矿及黄铜矿，次为辉铜矿、铜兰及硫砷铜矿。氧化矿物主要为孔雀石，次为硅孔雀石、黑铜矿、兰铜矿和赤铜矿；自然铜及砷酸盐铜矿物颇为少见。脉石矿物主要为白云石、方解石和石英，次为黄铁矿、绿泥石、绢云母、磷灰石、磁铁矿、斜长石及电气石；滑石与透闪石一般仅出现在与火成岩接触受热变质影响的岩石中。

铜矿石的构造多为沿层分布的条带状、竹叶状、星点状、浸染状和马尾丝状，并有沿微裂隙充填的角砾状或网脉状。

铜矿的伴生有益元素主要为锗、钴、银和金。银与金在所有铜矿物中均有一定含量；锗主要富集在脉状硫砷铜矿和脉状黄铜矿中；钴主要在自形晶的黄铁矿及次生的锰土中。

铜矿床的矿物分带规律明显，垂直分带从上到下分四大带：辉铜矿带、斑铜矿带、黄铜矿带和黄铁矿带。

第一部份：沉积作用的地球化学

（一）矿床中有益元素的平均含量

铜量测定：根据勘探工作中大量化学分析数据对本区地层中各种岩石进行了铜量测定；整理时对大于0.1%的数据（可见铜矿化的经验数据）一律剔除，以便尽量排除铜矿化的干扰。再按不同岩性分别求得其算术平均值或众数值（表1）。

表1

岩石名称	黑色板岩	紫色层	无矿的过渡层	红色白云岩	石英岩	前震旦纪火山岩	前震旦纪长辉绿岩	华力西期辉长岩
铜含量（%）	0.015	*0.023	*0.059	*0.024	0.013	0.014	0.02	0.03

有*号者为1972年测得的众数值，其余为1965年测得的算术平均值。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

从表1可以看出：

（1）全区各岩层中铜的平均含量均高于铜在地壳中的克拉克值0.01%。

（2）每一沉积岩的平均含量均高于地壳中各相应沉积岩的平均含量〔3〕。其中尤以无矿过渡层含铜量最高，达0.059%，为地壳铜克拉克值的5～6倍。

（3）火成岩以华力西期辉长岩含铜量最高，达0.03%。这种情况与二叠纪玄武岩中偶含囊状或鸡窝状自然铜的事实是吻合的。在前震旦纪火山岩中则含铜量有所降低。

以上资料说明本区在地球化学特征上为一铜的集中地区。

锗量测定：锗在不同岩石中的含量主要是用光谱分析测定的；仅对含矿围岩和铜矿物进行了岩石或单矿物化学分析。得出如下资料：

（1）经光谱分析，一般紫色板岩和白云岩，均未发现锗的存在。

（2）经化学分析，过渡层中的泥砂质白云岩和所夹薄层板岩（一般均有一定程度铜矿化），锗的含量在0.2ppm至3ppm之间。

（3）锗只富集在过渡层上盘白云岩中的脉状黄铜矿和硫砷铜矿中；而在过渡层沿层分布的辉铜矿、斑铜矿或黄铜矿中，含锗量均甚低，甚至有的不含锗（表2）。

铜矿物中锗含量化学分析统计表　表2

矿物种类及构造	辉铜矿（沿层分布）	斑铜矿（沿层分布）	黄铜矿（沿层分布）	黄铜矿（脉状）	硫砷铜矿（脉状）	孔雀石
锗的含量（ppm）	0－11	0－12	0－12	12－322	42－365	0－15

（4）当脉状黄铜矿或硫砷铜矿不发育时，即使过渡层的铜矿石含锗，在精矿中锗也不富集（表3）。

以上资料说明：

（1）并非所有铜矿物均含锗。锗仅存在于部分铜矿物中，另一部分则存在于围岩中。

（2）作为同生沉积的锗，主要赋存于过渡层及其上下毗邻的岩层中，与泥砂质同时沉淀。

（3）锗在变质过程中，迁移富集于脉状铜矿物之中。

钴量测定：根据钴矿化地段的化学分析资料，有关各岩层钴的平均含量如表4。

某矿段铜的原矿、精矿、尾矿含锗量统计表　表3

矿石 / 锗品位 / 编号	原矿（ppm）	精矿（ppm）	尾矿（ppm）	备注
石稀－42	3.04	3.90	3.40	尾矿品位大于原矿品位属化学分析允许误差范围
石稀－46	2.02	3.60	1.90	尾矿品位与原矿品位相接近

不同岩石中钴的化学分析统计表（ppm）　表4

岩石名称	白云岩 A区	白云岩 B区	黑色板岩	含矿过渡层	前震旦纪基性火成岩 A区	前震旦纪基性火成岩 B区	为火成岩的前震旦纪角砾岩胶结	铜精矿	含铜变质铁沉积矿
钴的平均含量	0	1	2	15	10	30	6	30	35
样品个数	19	7	14	25	29	10	7	25	12

由表4可以看出：

（1）白云岩不含钴或含微量钴，其余各岩层也都仅含微量钴。黑色页岩钴低，为2ppm。过渡层钴量相对较高，为15ppm，虽比地壳中钴的克拉克值为低，但与主要沉积岩钴量相比（页岩19ppm、砂岩0.3ppm、碳酸岩0.1ppm）〔3〕仍不算低。

（2）火成岩含钴量以B区最高，为30ppm。但并未超过地壳中基性岩的平均含钴量45ppm〔2〕。

（3）过渡层的铜精矿中含钴30ppm，而整个过渡层平均含钴量为15ppm，说明过渡层的钴可能和铜的沉积有关。

（4）沉积变质的含铜磁铁矿中钴量较高。此外变成的自形晶黄铁矿中钴量也高（>3000ppm）。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

总之，本区沉积作用中钴量甚微，而以过渡层较高。可能与铜的沉积有关；经过变质作用，钴才富集在含铁矿物中。

银量测定：对铜矿石、铜精矿和铜矿物进行了化学分析；对其他岩石进行了光谱分析。根据分析资料，发现银与铜之间存在正相关关系。据几个矿段的资料统计：Cu/Ag≅2000(图1)。

根据这一比值计算，有关各沉积岩层，也以过渡层的平均含银量最高。

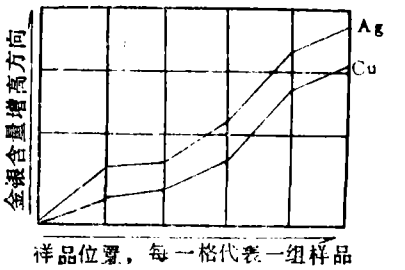

图1　某矿段银铜曲线
(Ag放大2000倍表示)

由于银主要富集在铜矿物中并随铜量增高而增高，故银量与本区硫化物分带顺序〔1〕颇为一致，即在各硫化物带的含量由高到低的顺序为：辉铜矿带＞斑铜矿带＞黄铜矿带＞黄铁矿带。

总的看来，本区沉积岩中无论铜、锗、钴、银，均以过渡层的平均含量最高。而过渡层对本区铜矿化又起着主导的控制作用，因而有理由认为它就是铜、锗、银等元素的有利沉积场所，即所谓“矿源层”。

(二) 常量元素与铜矿化的关系

根据岩石化学分析，将紫色层、过渡层和白云岩的主要组份列为表5。

由表5可以看出：

(1)随着由碎屑岩到碳酸盐岩的海侵式沉积，SiO_2和Al_2O_3的含量表现了明显的由高到低的变化。而过渡层正位于其转折部位。

(2)随着由机械沉积作用到化学沉积作用的加强，CaO与MgO的含量表现了明显的由

岩石化学分析统计表　(%)　　表5

岩层及岩性 / 化学组分	紫色层 (板岩夹白云岩)	过渡层 (泥砂质白云岩)	白云岩 (红色白云岩)
CaO	6.74	21.37	24.60
MgO	6.24	15.78	17.08
SiO_2	46.76	22.22	17.43
Al_2O_3	12.49	3.89	0.64
Fe^{+++}	4.73	0.55	0.63
Fe^{++}	0.68	1.03	0.37
K_2O	4.66	2.51	0.36
Na_2O	0.015	0.02	0.03
TiO_2	0.58	0.22	0.06
P_2O_5	0.14	0.11	0.05
MnO	0.34	0.56	0.67
Cu	0.023	0.059	0.024
Fe^{+++}/Fe^{++}	7	0.53	1.70

注：表中钾、钠数字系根据少数分析结果平均而得。

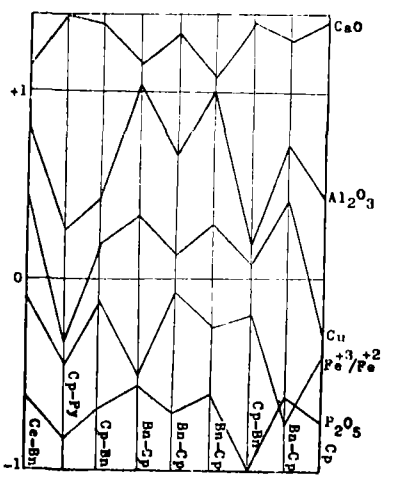

图2　常量元素与铜矿化关系对数曲线图

纵座标代表用对数值表示的含量

横座标中每一格代表一种样品及其位置

Cc代表辉铜矿带　　Bn代表斑铜矿带

Cp代表黄铜矿带　　Py代表黄铁矿带

(因MgO、SiO_2、TiO_2分别与CaO、Al_2O_3、P_2O_5等曲线相似，故将其抽掉)

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

低到高的变化。

（3）随着由氧化环境到还原环境的变化，Fe^{+++}/Fe^{++} 在过渡层表现了明显的转折。

（4）TiO_2与P_2O_5随泥砂质含量增高而增高，而在白云岩中含量大降。这是由于碎屑岩中存在着金红石、磁铁矿和磷灰石所致。

（5）MnO_2在白云岩中较高，而在泥砂质岩石中含量较低。这是由于白云岩沉积时"Ca^{++}、Mg^{++}与Mn^{++}之间，易于发生等价替换作用"〔4〕所致。

特别值得注意的是：在过渡层中，铜矿化与上述元素之间存在着一些同消长或反消长的关系(图2)。

（1）SiO_2、Al_2O_3含量与铜量存在着共振曲线关系。这说明了泥砂质沉积与铜矿化之间有密切关系。由于SiO_2和泥质质点带负电荷，而铜离子带正电荷，故可能因胶体吸附导致铜的沉积。

（2）CaO、MgO含量与铜量存在着反比曲线关系。说明纯质白云岩的化学沉积条件，不利于铜的沉积。

（3）Fe^{+++}/Fe^{++}与铜量存在着互相排斥的关系。这种关系只适用于沿层分布的斑铜矿带和黄铜矿带。而当辉铜矿含量增多，或黄铁矿大量出现时，这种关系就要改变。由于辉铜矿常与赤铁矿共生，Fe^{+++}与铜含量均高；黄铁矿高Fe^{++}缺铜，故这时的Fe^{+++}/Fe^{++}与铜量之间的关系则变为正比关系。据现有资料统计：本区含矿过渡层$Fe^{+++}/Fe^{++}\approx0.53\pm$，一般不超过1。这说明铜量变化与氧化还原条件的改变有关，而铜的主要沉积条件则为还原环境。

总的看来，铜的沉积主要与由碎屑岩到化学岩、由机械堆积到化学沉积、由氧化环境到还原环境的转折时期与转折部位，即过渡层形成的地球化学条件密切相关。

矿石与火成岩微量元素统计表　　表6

元素 \ 含量ppm \ 地区	甲矿矿石	乙矿矿石	丙矿矿石	前震旦纪火成岩(1)	前震旦纪火成岩(2)	二迭纪辉长岩
Ag	5	6	2	0	0	0
Ge	4	1	<1	0	0—痕	0—痕
Mo	0—10	0—10	3	0	0	0—13
Ga	3	1	2	4	6	5
Pb	16	5	4	<10	<15	36
Ni	7	5	5	46	66	57
V	7	3	5	148	212	291
Ti	735	520	750	>4500	>5000	12000
B	37	7	12	6	13	0—5
Be	0	痕	痕	0—痕	0—痕	0—痕
Bi	0	4	3	0	0	0
Sb	40	0	0	0	0	0

注：表中所列数字系根据近两年的资料整理而成，故与1965年所整理的数据(1)略有出入。

（三）微量元素对成因的指示意义

根据大量光谱分析资料，将铜矿石和火成岩中的微量元素含量列为表6，对比如下。

从表6可以看出：

（1）Ga、Pb、Ni、V、Ti、B在火成岩及铜矿石中均存在。其中因Ga、Pb含量较低，对比不明显，故难以判断其成因联系。Ni、V在基性岩中含量高，沉积岩中含量低，是各该元素在岩浆作用和沉积作用中的正常地球化学行为〔2〕〔3〕。Ti在火成岩中的含量高于沉积岩的含量，主要因为在岩体中含有钛磁铁矿。而在沉积岩中只有含钛矿物的碎屑，分布也不均匀，故含量低而不稳定。B在火成岩和沉积岩含量相似，在沉积岩中的含量主要由电气石碎屑引起，

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

部分电气石微晶则因变质作用而形成。基性岩中硼的赋存状态尚待研究。

（2）Bi、Sb、Be主要在沉积铜矿石及铜的硫化矿物中存在。在火成岩中未分析出Bi、Sb，仅偶见痕量的Be。这些元素不可能与基性火成岩有成因上的联系，很可能是沉积时铜的伴生元素。

（3）Ag、Ge、Mo多存在于铜矿石中，在火成岩中很少出现，和基性岩没有成因联系，它们可能作为沉积作用中铜的伴生元素而存在。

由于微迹元素的地球化学性状是鉴别物质来源和矿床成因的一项标志，根据以上资料，与铜有关的元素在火成岩中或未发现或仅见痕量，因而没有理由认为前震旦纪辉长辉绿岩是成矿母岩。

同时根据对无矿沉积岩的光谱分析，某些微量伴生元素在过渡层中含量最高，紫色层次之（少数元素相反），而在较纯的白云岩中，含量显著降低（图3）。这就再次说明了作为铜矿石或铜矿物中的某些伴生元素，是由于沉积作用而存在于围岩之中的。

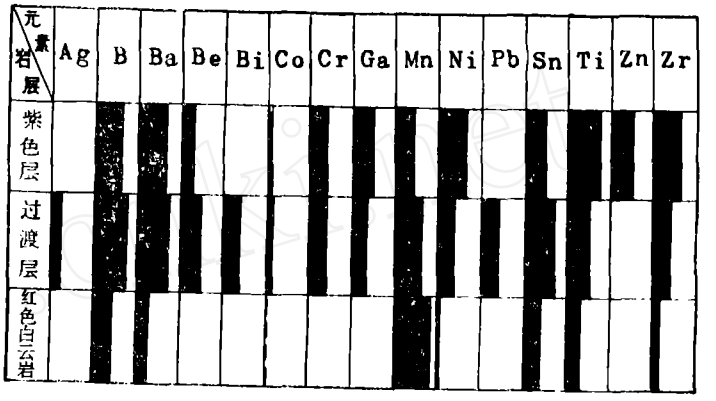

图3　某矿段中无矿沉积岩光谱分析相对含量对比

注：因各元素光谱分析数据相差悬殊，难以按统一比例尺绘制，故仅示其相对含量，宽度大者含量高，断线代表时有时无，空白者含量为零。

（四）同位素年龄资料的成因指示

本区同位素年龄资料系中国科学院地质研究所用铅法测定的（表7）。由于昆阳群层状铜矿中很少找到与铜矿物共生的方铅矿，故缺乏层状铜矿的同位素年龄资料。但根据昆阳群中脉状铜矿的年龄测定，仍可说明问题：

同位素年龄资料统计表　　表7

地质情况＼地点	A	B	C
地　层	昆阳群红色白云岩	昆阳群钙板岩	灯影组顶部白云岩
矿体形态	脉状	脉状	脉状
矿脉长度	>200公尺	60～120公尺	40～90公尺
主要矿物	黄铜矿、方铅矿、重晶石	闪锌矿、方铅矿	闪锌矿、方铅矿、少量黄铜矿
同位素年龄（亿年）	10.39	11.63	3.12

（1）昆阳群中所测定的两个方铅矿样品，其同位素年龄均在10亿年以上。如果将与方铅矿共生的黄铜矿，看做生成时间大体相同，则可以说明沉积铜矿床的形成至少在10.39亿年以上，二叠纪辉长岩不可能为其矿源。

（2）震旦系灯影组顶部采集的方铅矿，其同位素年龄在3亿年以上，大致相当于华力西期。该脉中共生的黄铜矿，其铜的来源究系来自围岩或二迭纪辉长岩的期后热液，目前尚无资料具体说明。但华力西期岩浆活动对本区陡山沱组底部沉积铜矿床的改造，则是有影响的。对作为本区主体的昆阳群层状沉积铜矿床的改造作用也有待于进一步研究。

总之，根据矿床中有益元素的测定、常量元素与铜量的关系、微量元素测定和同位素年龄测定的资料来综合分析，本区昆阳群层状铜矿床具有明显的同生沉积特征。其后又经变质作用的改造，发生了铜的迁移和再沉淀。

以上引用的化学分析资料，很多是在1970年至1972年间作者与王春生、张仕明二同志共同收集的。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

第二部份：变质作用的地球化学

本文将同生沉积后所受的改造（表生作用除外），统称之为变质作用。主要指区域变质作用，也包括热变质及动力变质作用。本区铜矿床在变质过程中所受的改造作用是多方面的，本文只研究脉状铜矿形成过程中有关各元素受变质而发生的迁移与再沉淀的现象。

（一）铜的迁移与再沉淀

层状铜矿床在变质过程中发生了铜的迁移，突出表现为含铜石英脉、含铜方解石脉、含铜白云石脉和含铜硫化物脉的形成。这些矿脉一般受张断裂的控制。其中以硫化物脉含铜量最高。有时为层状铜矿平均品位的10倍以上。当这种情况出现时，其附近的层状铜矿就发生明显的贫化，甚至缺失或尖灭。这种铜量的互为补偿，是铜在变质过程发生迁移再沉淀的事实证明。以过渡层的顶面为基准，铜的迁移距离可由几厘米直至二百公尺以上。

辉铜矿脉：具不等粒镶嵌结构，辉铜矿成粗大片状连晶，解理清楚，常交代斑铜矿。辉铜矿中常包有密集的片状赤铁矿。辉铜矿与赤铁矿的共生，主要与变质副热液较同生沉积介质的碱性和氧化程度增高有关。"介质碱性愈强，Fe^{++}就愈容易氧化为Fe^{+++}，而Fe^{+++}的氧化物将愈完全地从溶液中析出。"[10] "铁全部从铜铁硫化物中分离出来，贫铁的斑铜矿为无铁的辉铜矿所代替。此时全部铁氧化为赤铁矿，形成赤铁矿与辉铜矿的组合。"[8] 同样原因在变质过程中可以形成如下分带：

$$\text{PH值和氧化程度增高} \longrightarrow \underset{(Cu^{++}Fe^{++}S_2)}{\text{黄铜矿}} \longrightarrow \underset{(2Cu^{+}{}_2S^{--}\cdot Cu^{++}Fe^{--}S_2^{--})}{\text{斑铜矿}} \longrightarrow \underset{(Cu^{+}{}_2S)+(Fe^{+++}{}_2O_3)}{\text{辉铜矿+赤铁矿}}$$

故本区在变质过程中铜的迁移，反映了铜的硫化物中铁贫化和铜富化的过程。至于相反的情况如何尚待进一步研究。这种铜矿物的变质分带与沉积分带的区别在于前者沿断裂分布，后者则沿某固定层位的层理分布；前者矿体一般均超出了矿源层的范围而达于其上(下)盘的岩层，后者则常局限于矿源层中。当然本区普遍经受轻微变质后，矿源层中也或多或少地有变质脉形成，不过其迁移距离较短，表现不如脉状铜矿那样明显突出。矿源层受变质后也发生了矿石结构构造的变化，如在过渡层中沿节理裂隙或局部断裂带出现的角砾状构造或斑点状构造，都表现了变质作用的特征。

硫砷铜矿脉：硫砷铜矿（可能包括少量砷黝铜矿）多沿裂隙充填成脉状或块状构造。内部结构为他形粒状镶嵌，有时与少量黄铜矿、斑铜矿共生，并交代黄铜矿。

由于硫砷铜矿有As^{5+}存在，其形成条件应为变质过程中较强的氧化环境。根据Lewis B·Gustafson[14]对Cu-As-S系中相平衡的研究，它是在半开放系统中，砷、硫的有效分压（fAS_2、fS_2）增高的情况下生成的。其反应式为：

$$\underset{(\text{斑铜矿})}{3Cu_5FeS_4}+5S_2+2As_2 \longrightarrow \underset{(\text{黄铜矿})}{3CuFeS_2}+\underset{(\text{硫砷铜矿})}{4Cu_3AsS_4}$$

综上所述，在浅变质过程中，铜的迁移可以形成一些小铜矿体。其基本特点是：（1）铜的金属储量较大规模的层状铜矿要少，但有时品位高。（2）铜矿体均位于断裂构造发育的地段，呈囊状、平行或穿插层理的脉状。（3）铜矿体一般离开矿源层而到达上(下)盘的岩层中，有时位于构造角砾岩中。

进一步研究本区铜矿床变质作用中铜的迁移，不仅可以逐步建立铜的硫化物变质分带的详细标志，而且对于确立富铜矿体的找矿方向也是很重要的。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

（二）锗的迁移与再沉淀

根据少量电子探针的分析资料，本区铜矿物中锗的存在状态有二：（1）锗在铜的硫化物中呈类质同象，这种状态所占比例最大。（2）在硫砷铜矿中呈少量显微锗矿物，可能为锗石，尚待进一步鉴定。根据某矿段矿石分析资料，锗量与砷、锑的含量呈正比关系（图4）。

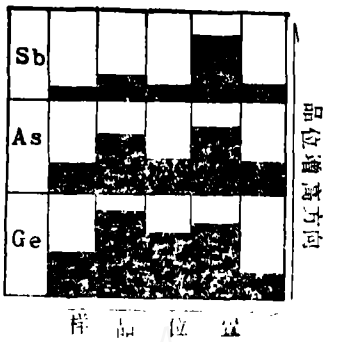

图4 某矿段中锗、砷、锑含量对比

锗在变质过程中的迁移性能如下：

（1）强还原条件下，锗呈二价，有明显的亲铁性，离子半径为0.72Å，与Fe^{++}离子半径0.74Å近似〔7〕，故Ge^{++}等价置换黄铜矿中的Fe^{++}而呈类质同象。

（2）氧化条件下，Ge^{4+}具亲铜性，在硫砷铜矿中以异价类质同象置换砷，其电价补偿如下〔5〕〔11〕：

$$2Ge^{4+} \longrightarrow As^{3+} + As^{5+}$$

故硫砷铜矿可作为本区锗的指示矿物。

（3）对照楚梅伯锗矿床的规律："形成锗的最有利条件是围岩应为不吸收锗的石灰岩"〔11〕，本区白云岩也是促使变质副热液中锗富集的有利围岩。

由此可见本区白云岩中硫砷铜矿脉和部分黄铜矿脉中锗的富集，乃是变质作用的结果。

（三）钴的迁移与再沉淀

钴矿化的基本特征

（1）本区钴矿化明显地受断裂构造控制，分布于断裂发育地段。含钴矿物或为构造角砾岩的胶结物质，或沿断裂在围岩中呈星点状分布。

（2）原生含钴矿物为含钴黄铁矿及含钴磁黄铁矿，伴生矿物常为绿泥石、石英、方解石及黄铜矿。含钴黄铁矿均具立方体、五角十二面体等完好晶形。

（3）经电子探针分析，在含钴黄铁矿中未发现显微钴矿物。由于Co^{++}离子半径0.72Å〔7〕与Fe^{++}离子半径0.74Å相近，两者负电性（Co1.7、Fe1.6）也相近，钴在黄铁矿中应为类质同象状态。

（4）钴矿化与火成岩在空间上关系密切，有时紧邻火成岩体。围岩蚀变为绿泥石化，但绿泥石中一般并不含钴，少数仅含微量钴。

（5）本区目前未发现独立的钴矿床，所有钴矿均与局部分布的变质铜矿化紧密伴随。层状沉积铜矿床中并无钴矿化现象（陡山沱组底部铜矿床例外）。

（6）所有含钴样品中，钴的含量均大于镍的含量。Co/Ni一般在2—14之间。而在含钴黄铁矿中Co/Ni高达33。

钴矿化的成因

本区层状沉积铜矿床中绿泥石化不普遍，更无磁黄铁矿的存在。而含钴黄铁矿则与绿泥石和磁铁矿共生，显然非沉积成因而是变质副热液影响所致。根据文献〔3〕，磁黄铁矿生成温度为325～429℃；绿泥石的生成温度约350℃；推测钴矿化的温度应在325℃以上，比脉状铜矿的生成温度要高。由于钴矿化与局部的变质铜矿体在空间上紧密伴生，可能钴、铜二元素在热变质和动力变质的条件下，先后同在某些局部地段迁移沉淀。但含铜与含钴的变质副热液性质是有差异的：（1）后者较前者温度高而所含离子的浓度低，不能形成独立的钴矿

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

物，钴只能类质同象地存在于黄铁矿、磁黄铁矿晶格中。(2)后者较前者介质偏于还原条件，溶液中多Fe^{++}和硫，故而形成黄铁矿$Fe^{++}[S-S]^{--}$和磁黄铁矿$Fe^{++}_{1-x}S^{--}$的组合。这与本区变质脉状铜矿在偏氧化条件下形成富铜少硫矿物的情况截然不同。

Co/Ni是鉴定矿化来源的地球化学标志。Co/Ni对本区钴矿化来源的判断有两方面的意义：

(1)据戈尔德施密特等人的资料[13]：在各种不同酸度的火成岩中，当硅酸含量<55%时，Co/Ni<1；硅酸含量>60%的酸性火成岩，Co/Ni>1。本区辉长辉绿岩中SiO_2一般为45%，Co/Ni<1；而钴矿化围岩Co/Ni>1，区内又无酸性火成岩出现，因而可以认为本区钴矿化与辉长辉绿岩没有矿源方面的成因联系。事实也是如此，例如本区与某钴矿化点仅距20～30公尺的火成岩体中，钴量仅25ppm，说明了两者间的非矿源关系。

(2)据C.M.Wright的资料[15]：热液黄铁矿中S/Se=10000～20000，Co/Ni>1。哈格曼[12]指出热液黄铁矿中Co/Ni>1者为较高温生成。本区两个含钴黄铁矿样品中S/Se=17000，Co/Ni=30～33，与上述资料相合。故可认为本区含钴黄铁矿可能为较高温"热液"成因。

这样一方面钴并非来源于火成岩，另一方面又属较高温"热液"成因，故本区含钴黄铁矿最可能为变质副热液的产物。至于其热的来源则可能为火成岩所提供，这与在空间上钴矿化与火成岩密切相关的事实是吻合的。

(四)銀和金的迁移再沉淀

电子探针资料说明，银在铜矿物中分布颇均匀，未发现银的独立矿物，推测银可能在铜矿物中呈类质同象。而在散点状的黄铜矿中却发现了显微含金矿物。这说明银与金地球化学性质上的差异。故在铜的硫化物中Ag/Au各异：

斑铜矿　Ag/Au=2543；黄铜矿Ag/Au=2464；

黄铁矿　Ag/Au=2350；硫砷铜矿Ag/Au=500。

本区变质脉中，银的含量因硫化物种类而异：脉状斑铜矿和黄铜矿中银量均大于硫砷铜矿。但金却与银相反，主要富集在硫砷铜矿中；根据少数分析资料，硫砷铜矿中金量为斑铜矿中金量的2.5倍。银、金在这些矿物中互相消长的原因，可能与二元素的地球化学性质的差异有关，即金较银亲铁、亲砷；而银则较金亲铜；当然两者及与铜之间，也常进行类质同象代替。

(五)硅的迁移与再沉淀

硅的迁移与再沉淀在本区铜矿床中主要表现为围岩的"硅化"[1]。本区"硅化"有两种形式：(1)铜矿床中有含铜石英脉或石英脉出现，但并不普遍。(2)石英有交代白云石的现象，甚至有时石英强烈地交代白云岩，形成"猪板油"状的硅化白云岩，此时SiO_2的含量高达40～65%。

根据已有资料，本区硅化作用中的硅，并非来自岩浆期后热液，而主要来自围岩。其理由如下：

(1)"硅化"主要局限在过渡层铜矿化附近的范围内，这种含矿围岩均含泥砂质碎屑，SiO_2含量一般为15～30%。

(2)硅化作用以石英交代白云石为主，含铜石英脉为辅。全区看不到有哪些大断裂与硅质来源有关。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

（3）本区仅出露基性火成岩，难以为硅化提供大量的SiO_2。事实上在本区基性岩的接触带也未看到白云岩的强烈硅化现象。

（4）对纯净的石英脉进行光谱分析后，没有发现与火成岩有明显的联系；恰恰相反，石英脉中所出现的元素都是围岩中常见的元素。

根据以上事实，硅化是变质阶段发生的，变质过程中含矿围岩的硅质发生迁移再沉淀，在节理、裂隙发育地段出现石英脉或含铜石英脉，而在节理、裂隙不发育地段，则表现为石英交代白云石的特点。

关于"硅化"与铜矿化之间的关系，有人认为："当岩石受一定程度的硅化作用时，铜矿化比较富集。但当硅化过于强烈，铜矿化就反而减弱了"。看来这是将含矿围岩的石英碎屑或硅质沉积物和变质作用发生的硅质迁移与再沉淀混为一谈了。作者认为需要明确几个问题：

（1）本区层状铜矿床系由同生沉积形成，其围岩中富石英碎屑和硅铝质沉积物，这种富硅并非变质过程中的硅化所引起的。

（2）在本区仅有的几条大型含铜石英脉（脉宽几十厘米至一公尺左右，脉长一百至二百公尺）中，没有看到铜特别富集的现象。这种石英脉的含铜品位一般均低于层状铜矿床，最高也仅及层状铜矿床的平均品位。

（3）关于硅的迁移与沉淀条件，A.Г.别捷赫琴〔10〕指出："在富碱金属K、Na的水介质中，SiO_2可以碱金属易溶硅酸盐形式被搬运。""在CO_3^{--}随温度降低而出现于这些溶液中时（藉助于碳酸气的加入），可发生下列反应导致SiO_2从溶液中析出。"

$$Na_2SiO_3 + CO_2 \longrightarrow Na_2CO_3 + SiO_2\downarrow$$

本区围岩均含有一定量的K、Na（参见表5），变质后形成的副热液当为碱性，有利于形成Na_2SiO_3，使硅质迁移；而当变质副热液通过碳酸盐岩时，又因CO_2的大量供应，而有利于SiO_2的再沉淀。

（4）关于铜的硫化物沉淀的条件，依赖于"在溶液中作为H_2S分子的电解产物S^{--}离子浓度的增加"〔10〕；"碱性溶液有利于S^{--}浓度的增高，为重金属硫化物的沉淀造成有利条件。"〔6〕因此溶液碱性减低将使铜的硫化物沉淀数量减少。本区变质溶液在层状铜矿附近碱性较高，S^{--}浓度较高，故先成硫化物矿脉。随着溶液流经白云岩，碱性减弱，S^{--}浓度减低而CO_3^{--}浓度增高，含铜石英脉及石英脉相继形成或石英交代白云石。这种硫化物减少、石英增多的现象，就是"硅化强烈，铜矿化反而减弱"的实质。

总之，同生沉积中泥砂质和铜矿化之间的密切关系是一回事，变质作用中含铜矿脉硫化物减少、石英增多和石英交代白云石的现象又是一回事，两者不能混淆。硅在同生沉积和变质作用中的地球化学行为是各不相同的。

综上所述，无论是铜、锗、钴、银、金或硅，在变质过程中均发生了迁移和再沉淀，并形成了局部的富集，叠加在原来沉积矿床之上，或不同距离地进入围岩，形成了现在本矿区既具有同生沉积特征、又具有变质副热液特征的一整套复杂的地球化学现象。

第三部份：找矿方向和找矿方法

根据本矿区上述沉积和变质作用的地球化学特征，提出对本类型铜矿床的找矿方向和方法。其中尤对老矿区特别重要的盲矿体为主要对象。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

（一）沿地层找矿

本类型的同生沉积层状铜矿床，均与紫色层、过渡层和白云岩有关，因此首先必需找出这一套地层、特别是其中的过渡层来。

紫色层为铜的沉积准备了物质条件，这是因为在强氧化环境下，沉降盆地中的水体可以聚集较多的铜离子。因之紫色层愈厚，在过渡层中可能沉积的铜量愈多，反之则铜量愈少。过渡层处于由氧化到还原，由机械堆积到化学沉积的转折时期与转折部位，因此为铜沉积的最有利场所。当然同生沉积是逐渐在长时期内形成的，是量变到质变的过程。因而事实上从紫色层顶部所夹的一些厚一、二公尺的泥砂质白云岩及浅色白云质砂岩开始，到过渡层之上的白云岩底部所夹的厚几十厘米至三公尺的三层泥砂质白云岩止，都属于同生含矿层。但其主要的沉积场所则为过渡层。这已为本区大量铜矿床赋存层位为过渡层的事实所证明。白云岩是沉积铜矿床经受改造后形成的变质副热液迁移和再沉淀的适宜场所，并可在其中局部裂隙发育地段形成脉状富矿。

因此，在这三个层位中首先要注意过渡层及其毗邻岩层中的不同含矿情况，以预测深部盲矿的情况或确定下一步的找矿方向：

（1）当发现过渡层中赋存矿体时，可根据铜的硫化物分带规律〔1〕，进行深部予测。如地表出现多量斑铜矿时，深部可能尚有斑铜矿—黄铜矿带及黄铜矿带的存在。

在运用带状分布规律时，应注意排除那种在变质过程中所形成的自形晶黄铁矿的干扰。这种黄铁矿不能作为沉积分带的依据。而真正能作为沉积分带的黄铁矿，其标志是沿层分布的条带状构造，当其与黄铜矿共生时呈乳浊状结构；含钴量很低，一般均<100ppm，$CO/Ni\approx1$；据少量分析资料，其中硒的含量也低，$S/Se\approx60000$。

（2）当发现过渡层内无矿体而仅有矿化或退色现象（此时一般铜的品位在0.1～0.3%之间），必须镜下鉴定其铜矿物的种类和结构构造。这时又要区别两种情况：

如过渡层附近断裂构造不发育，则仍可按铜矿物分带规律进行深部预测。只要地表发现有利的铜矿物，纵然在过渡层内未形成矿体，深部仍有可能找到盲矿体。如果附近断裂构造发育，此时在地下一定深度内，因铜质可能已发生了迁移，过渡层内可能已无矿体存在。因此一般应转向过渡层上盘的白云岩中去找矿。

（3）当发现地表过渡层中不仅无矿，而且其岩石也大多呈红色，且其上盘白云岩中也未见明显矿化，断裂构造又不发育，这可能是盲矿尚未剥露的现象。按照铜矿物分带规律，在深部过渡层中，可能有辉铜矿或斑铜矿盲矿带存在。

（4）当发现过渡层附近断裂构造发育，过渡层中矿化又很不均匀，浅色岩石与红色岩石交互出现；此时要特别注意在过渡层上盘白云岩中找寻与层理交切的裂隙中的矿体；有时可能找到辉铜矿、斑铜矿富矿体。

（5）当发现紫色层底部或其附近有铁矿层（主要为磁铁矿）出现时，无论该铁矿属沉积变质或热液成因，都应注意在其中找寻富铜矿体。这是因为变质热液也可以迁移到铁矿层才发生再沉淀，如铁矿层附近断裂发育，其中可能形成由斑铜矿、辉铜矿和黄铜矿构成的铜矿体。

在进行上述找矿预测中，同时开展原生晕找矿，测定水平及垂直方向上铜、银等元素含量的变化，对判断深部盲矿的可能性，将更有帮助。

（二）沿构造找矿

（1）小型断裂构造既有间接找矿又有直接找矿的意义。当发现上述三层位的断裂中有矿

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

化现象，意味着其附近的过渡层中可能有铜矿体或矿化存在。同时断裂本身又可能充填着铜矿物而形成铜矿脉，有时还可能找到富矿。

沿构造找矿需要注意找寻张力裂隙。钱荣耀同志曾总结本区某矿段张裂隙对成矿的控制作用：当张裂隙切穿含矿层与非矿层时，一般可在含矿层的裂隙中找到矿或富矿，非矿层的裂隙中则无矿或少矿。张裂隙与层间裂隙大多延深、延长不大，断续出现。因而它一般在含矿层中才有矿。张裂隙与层间裂隙发育地段矿化富集，不发育地段矿贫，但含矿层中仍可有沉积矿体存在。沿构造找矿实质是沿变质溶液迁移活动的通道和方向来找寻可能再沉淀的地段。因此需要结合溶液在迁移途中经过不同围岩时，介质中各种元素成分、浓度的变化和酸碱度、氧化还原性质的转化来考虑。

（2）当过渡层或其邻近岩层发生局部挠曲或转折形成小型褶曲时，铜矿体有时有加富或加厚现象。但褶曲构造不如断裂构造对铜矿床的改造作用那样明显。

（三）火成岩对找矿的意义

本区火成岩与铜矿化在空间分布上的关系表现在两个方面：（1）火成岩体以岩脉、岩墙、小的不规则体或小岩株等形式切割铜矿体，因而在一般情况下破坏了铜矿体的完整性，这对找矿是不利的因素。（2）火成岩以岩床的形式与铜矿体平行、或斜切铜矿体、或有时侵入于铜矿体之中。这种情况下由于热力的影响可使已形成的铜矿体中的铜发生迁移和在侵入岩体的附近局部富集。因此偶而在其附近可找到富矿体。这时对找矿和找富矿又成为有利因素。

为此要仔细观察火成岩的形态、规模和产状，以及与已有矿化或矿体之间的关系，以判断其有利或不利的作用，是破坏矿体还是促使局部加富。同时对火成岩附近偶见的矿化现象，又可以作为间接找矿标志：预示其附近可能有沉积变质铜矿体的存在。

（四）地球化学找矿标志

本区系统运用地球化学方法找矿、特别是原生晕找矿还很少。但根据上述第一、二部份的叙述，对本区矿床形成规律的揭示和找矿方向的确定，无疑地必须加强地球化学的找矿和研究。

根据前述资料，将可作为铜矿床的地球化学找矿标志列举如下：

（1）当SiO_2、Al_2O_3的含量与铜含量成正比，CaO、MgO和Fe^{+++}/Fe^{++}与铜含量成反比关系时，即使在采样部位的过渡层中目前已无矿体存在，但仍说明深部可能有盲矿，而且其铜矿物应以斑铜矿和黄铜矿为主。

（2）如SiO_2、Al_2O_3、CaO、MgO的含量与铜量之间符合上述规律，但Fe^{+++}/Fe^{++}与铜量成正比，则应结合具体地质情况和Fe^{+++}、Fe^{++}的各自含量以判断究竟为辉铜矿（部分为斑铜矿）所引起、或因黄铁矿所引起、或其他如氧化作用引起；再进行深部预测。

（3）当发现银（和金）的含量逐渐增高，预示附近或下部有铜矿体或铜矿化存在。银的含量愈高，其附近或下部愈可能有辉铜矿或斑铜矿一类的富铜矿物或矿体的存在。如能测定Ag/Au，则可能预测铜矿石矿物的种类，但必须是原生晕样品。

（4）当发现有Ge、Co、As、Bi等元素，一方面说明这些采样位置靠近裂隙，附近可能有变质矿脉出现，另一方面也预示其附近可能有层状铜矿体出现。

（5）Ge，As的高含量预示附近可能有硫砷铜矿脉存在。Co的增高一般指示变成黄铁矿或磁黄铁矿的存在。这时应结合Co/Ni和S/Se的资料，以判断黄铁矿的可能成因，对预

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

测铜矿是有帮助的。测定这些元素时应与铜量测定同时进行，则可综合评价以减少错误。

当然这些标志尚待更多资料统计与找矿实践来检验。

以上沿地层、构造的找矿方向，火成岩的找矿意义和初步的地球化学找矿标志，是根据本区铜矿床的具体情况和沉积变质地球化学特征，在作者个人理解基础上提出的。是否能适用于本区或本类型铜矿床的找矿，均需不断检验、修正与补充。

本文脱稿后，承曹添同志审阅，特此致謝。

参 考 文 献

(1) 王可南，"云南某铜矿床的地质特征及其成因"，《地质与勘探》，1972，第四期，1—5页。
(2) 南京大学地质系编，《地球化学》，科学出版社，1961，223页。
(3) K.K.土尔肯、K.H.魏德波尔，《成矿规律资料专辑》（国外部分），1962，108—112页。
(4) 《地球化学专辑》（第一辑），地质出版社，1956，179页。
(5) 吕孟超，《中国地质学会论文选集》，地球化学部分，1964，26页。
(6) 曹添等，《地球化学》，中国工业出版社，1963，113—114页。
(7) B.马逊，《地球化学原理》，中国工业出版社，1963。
(8) K.K.拉欧、比哈尔，"辛波休姆区穆徹布霍尼铜矿床硫化矿物地质温度的测定"，《地质快报》，1965，第3期。
(9) T.S.罗佛林，《作为找矿标志的围岩蚀变》，地质出版社，1957。
(10) A.Г.别捷赫琴，《岩浆金属矿床基本问题》（上册），地质出版社，1957，128、176和183页。
(11) A.И.金兹堡等，《稀有元素矿床地质》（第五辑）。
(12) B.П.费多尔丘克等，《综合普查勘探方法资料专辑》（国外部分），1961，66页。
(13) Г.A.克鲁托夫，《钴矿床》，中国工业出版社，1965，172页。
(14) Gustafson, L.B., Phase Equilibria in the System Cu—Fe— As—S, Econ. Ge-ol., Vol.58, 1963, No.5, p.678.
(15) Wright, C.M., Syngenitic Association with a Pre—cambrian Iron Deposit, Econ. Geol., Vol.60, 1965, pp.998—1019.

（上接第21页）

矿体沿走向仍应为连续的。为此，我们修改了设计。施工以后，一连六个钻孔全都见矿，初步证实了上述认识大体上反映了矿床地质的实际情况。

可是，在进一步施工的时候，十一号钻孔又落空了（图2）。这又使我们感到：客观情况是十分复杂的。由于工作程度的限制，我们对地质规律的认识还很不够。只有通过反复实践，才能使工作不断前进。通过探井的揭露和进一步分析发现：钻孔所在位置的千枚岩，原来认为是南北两侧出露矿层之间的夹层，其实是由于断层的错动而出露的同一矿体下盘的围岩。再次吸取教训之后，又做了反复的调查研究，取得了地质认识上的一次新的飞跃。更重要的是，我们还体会到，今后必须边勘探、边调查、边总结、边综合分析，才能不断掌握工作的主动权。由于坚持了这点，以后施工的10个钻孔全部按设计要求见了矿，取得了较好的成果。在这当中，我们根据物探和地质资料做了综合分析以后，在Ⅲ号矿体以西800米处大胆地布置了26号钻孔，也于196米处见矿200多米，显著地扩大了矿区远景。

钻孔落空的情况，往往说明我们对客观地质规律的认识不够。但落空与见矿又是对立的统一。只要我们在毛主席光辉哲学思想的指引下，坚持唯物论的反映论，批判刘少奇一类骗子的唯心论的先验论，反复实践，反复认识，就能不断掌握矿床地质规律，使钻孔由落空向见矿方面转化，勘探工作就能沿着多快好省的道路胜利前进。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net