

试论岩浆流体成矿作用

肖庆华^{1,2} 惠卫东^{1,3}

(1 新疆有色地质勘查局 704 队 哈密 839000;

2 中国科学院矿产资源重点试验室,中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029;

3 中国地质大学(武汉)研究院 430074)

摘要 以斑岩型铜矿和浅成低温热液型金矿为例,说明了岩浆流体对成矿的贡献。斑岩型矿床早期以岩浆流体为主导,晚期大气普遍存在并与岩浆流体混合,对于成矿起了重要作用。当强反应性、含金属的岩浆流体从侵入体往外运移、渗透、冷却并且与围岩反应,就形成了斑岩体由内到外,由高温到低温带分布的蚀变矿物组合。在浅成低温热液成矿系统中,由于大气降水的强烈混合,掩盖了深源含矿岩浆流体在矿床形成中的作用,但矿床中硫碳同位素组成仍然反映出形成该类矿床的中深源含矿流体的存在。斑岩热液系统和浅成低温热液系统,可以视为一个统一的构造-岩浆-流体成矿系统。

关键词 岩浆流体 斑岩型铜矿 浅成低温热液 成矿作用

1 前言

斑岩型矿床、浅成低温热液型矿床由于其不言而喻的经济价值一直是研究及勘查、开发的重要矿床类型。目前在北京、南美、菲律宾和我国银山、紫金山等世界许多成矿区均发现这两类矿床常伴生于统一的地质构造环境中,空间关系密切。该两类矿床的形成无疑与侵入体关系密切,但关于岩浆在多大程度上向热液系统贡献水、金属、硫及其它组分,尚未取得一致看法。例如,早期对于热液矿床稳定同位素研究表明:大气水在各种类型的热液系统中均占据主导地位,这导致人们忽视了岩浆流体对于形成热液型矿床的作用。

然而,随着同位素、流体包裹体等研究的深入,尤其是近些年来矿床学研究通过微区原位分析技术的运用,在大量大气水标志的掩盖下,仍旧发现了岩浆流体的片段,它们的活动时间虽短,但对于成矿却起到了关键作用。本文拟以斑岩铜矿和浅成低温热液型金矿为例,来讨论岩浆流体成矿作用。

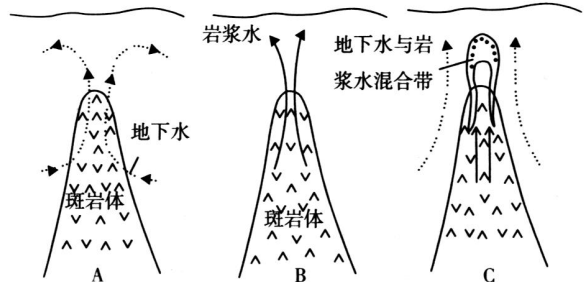
2 岩浆热液与斑岩型铜矿成矿作用

斑岩型铜矿主要形成于大洋板片俯冲产生的岛弧和陆缘弧环境,近年来有中国学者提出在碰撞造山带内也具有产出斑岩型矿床的巨大潜力(如藏东玉龙斑岩铜矿带和冈底斯斑岩铜矿带是其典型代表)。矿床就位于斑岩及其围岩中呈浸染状和网脉状,并常见

热液角砾及明显的热液蚀变分带等特点。该类型矿床多与钙碱性系列为主的中酸性岩浆活动关系密切,也有部分斑岩矿床与富钾的钙碱性侵入体有关。

2.1 成矿流体稳定同位素特征

关于斑岩型矿床成矿流体和成矿物质来源,早期存在两种不同看法。一种认为成矿流体来源于天水 and 地下水,成矿物质来自于加热的天水为主的对流流体对于围岩的汲取,岩浆只起热源作用,称为对流模式。另一种认为斑岩成矿流体是岩浆流体,成矿流体和成矿物质均来自于深部岩浆,矿液是由岩浆结晶过程中演化出来的,称为正岩浆模式,见图 1。但实际上绝大多数矿床往往显示出非单一成因,多年来积累的世界范围内大量的斑岩铜矿同位素及流体包裹体资料即提出了这方面的证据。



A - 地下水对流模型 B - 正岩浆模型 C - 地下水与岩浆混合模型

图 1 斑岩型矿床成矿流体运动示意图

对大量斑岩型矿床的氢氧同位素系统研究表明,较早形成的,产于斑岩体系核部钾化带内的黑云母

氢氧同位素组成相当稳定, $^{18}\text{O}\%$ 主要介于 $+2.5\sim+7$, $\text{D}\%$ 主要介于 $-65\sim90$,这个同位素组成与岩浆水基本一致,且不同矿区斑岩铜矿核部钾化带内氢氧同位素组成变化不大,显示成矿流体主要为岩浆流体;恰恰相反,产于斑岩成矿体系外部的绢英岩化带、泥化带、青盘岩化带以及较晚形成的、叠加在钾化带上的晚期蚀变带的含水矿物的氢氧同位素组成因矿区不同而有很大的变化, $^{18}\text{O}\%$ 变化于 $-9\sim+16$, $\text{D}\%$ 变化于 $-45\sim180$,这种变化与雨水的氢氧同位素组成随地区不同而产生的系统变化大致吻合,显示流体为天水。因此,成矿流体可能既有岩浆流体也有天水。

另外,斑岩铜矿的硫化物的 $^{34}\text{S}\%$ 主要变化于 $-3\sim+1$,硫酸盐的 $^{34}\text{S}\%$ 变化于 $+8\sim+15$,利用硫化物-硫酸盐矿物对的硫同位素计算的矿物形成温度一般为 $450\sim650$,与流体包裹体指示的流体温度基本一致,说明矿物与流体之间及氧化硫与还原硫之间的硫同位素基本达到平衡,据此估计流体的 $^{34}\text{S}\%$ 主要介于 $-3\sim+9$,这说明硫主要来自岩浆。

2.2 流体包裹体特征

圈闭于矿物中的流体包裹体(斑岩体系中的流体包裹体大多数为次生流体包裹体)也证明了斑岩成矿体系中存在岩浆热液活动。多年来对于斑岩型矿床的热液蚀变、矿化以及流体包裹体、稳定同位素的详细研究表明:由于斑岩铜矿的形成普遍经历多次的围岩破碎和相应的多次流体活动,因此有相当多的次生包裹体代表了成矿流体。在斑岩铜矿的主矿化带和钾化带内,发现许多高盐度流体包裹体,主要属 $\text{KCl}-\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$ 体系,含少量 Ca^{2+} 离子及其他阳离子,盐度一般为 $50\%\sim60\%$,有时达 70% 以上。这类包裹体普遍含子矿物,最常见的是石盐,其次是钾盐、赤铁矿、石膏、黄铜矿等子矿物。高盐度流体具有很强的携带成矿元素的能力,这类高盐度流体包裹体的分布与铜矿化范围有密切关系。例如,bingharm斑岩铜矿的矿体外界与盐度高于 40% 的包裹体分布的外界相吻合。许多高盐度的流体包裹体均一温度显示,包裹体形成于接近岩浆的温度条件下($700\sim800$),高盐度流体包裹体实际上代表一种含水的“岩浆”;另外,与高盐度流体包裹体共同产出的,被圈闭不混溶蒸汽的包裹体具有低盐度和高 CO_2 含量,这种气象和液相流体包裹体共存且以液相包裹体为主,反映成矿流体应发生过沸腾。

斑岩铜矿流体包裹体研究表明,斑岩型铜矿床成

矿流体为高温、高盐度流体,成矿流体在运移过程中经历过沸腾,另外黄铜矿、赤铁矿等子矿物的存在说明成矿流体中成矿金属含量很高。因此,这种成矿流体应是高温、高盐度、高成矿金属含量的岩浆热液,这与成矿流体稳定同位素特征相吻合。

2.3 斑岩铜矿蚀变分带特征

世界范围的斑岩铜矿,不论形成于弧造山环境还是碰撞造山环境,均发育类似的热液蚀变系统和典型的蚀变分带,这可以用成矿流体运移过程中与围岩发生水/岩反应来解释。

当强反应性、含金属的岩浆流体从侵入体往外运移、渗透、冷却并且与围岩反应,就形成了斑岩体由内到外,由高温到低温带状分布的蚀变矿物组合。蚀变系统一般包括早期的钾硅酸盐化,随后的石英绢云母化和晚期的高级泥化。蚀变分带通常呈环带状围绕含矿岩体分布,自内而外,依次为钾硅酸盐化带-石英绢云母化带-高级泥化带-青盘岩化带。钾硅酸盐化通常发育于斑岩体内部,系高温、高盐度流体与斑岩发生水/岩反应的产物,而稍晚形成的石英绢云母化则是温度和盐度较低的岩浆水和天水混合流体形成的,由内带到外带流体温度、盐度、密度、压力依次降低,成矿流体中天水比例增大。

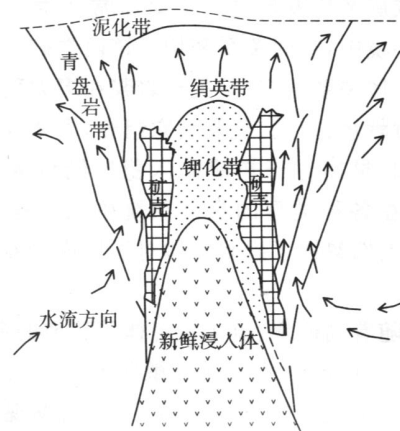


图2 典型斑岩铜矿蚀变分带模式

2.4 岩浆流体成矿作用分析

斑岩型铜矿成矿作用的早期阶段以岩浆流体为主导。在俯冲带或碰撞带,由于板块俯冲、碰撞,引起板块边界地壳加厚,同时诱发深部 adakitic 岩浆侵入活动。岩浆在向上运移过程中,势必与上覆的地幔橄榄岩发生相互反应,这将大幅度提高埃达克质熔体的 Mg 值和 Fe 、 Cr 、 Ni 含量,从而增大硫在熔体中的溶解度。另外,这种相互反应也将提高幔岩的 $f(\text{O}_2)$,导致幔岩中的金属氧化并进入岩浆系统。在碰撞造

山环境,地壳重熔形成的岩浆与上升的埃达克质熔体混合,将为埃达克质熔体提供大量的铜和其他金属以及硫。含矿岩浆在浅部就位后,由于温度、压力降低及岩浆结晶分异会形成大量挥发份及含矿热液。斑岩形成的早期阶段,在侵入体最外层形成一个结晶相,使侵入体内部与围岩隔离。岩体内部分为两层,内层为水不饱和熔体,外层为水过饱和熔体。水过饱和熔体层结晶作用的结果是产生结晶相和流体相,因此成矿的热液系统一开始是热的(500~600℃),且以岩浆流体为主,由超盐度液体及其共存的低密度蒸汽构成。随着结晶作用的持续,如果围岩的渗透率较低,不断分异出的超临界流体势必增大压力,当压力增大到超过静岩压力+岩石的张性强度时,岩浆流体将冲破岩体外壳往外运动,同时产生大量的水力断裂和裂隙(也可以产生角砾岩筒),形成斑岩和围岩中的各种破裂裂隙,为流体交代蚀变和金属沉淀提供了开放性的网状通道。成矿物质受岩浆流体的携带发生运移,在此过程中成矿流体降温、降压并与围岩发生水/岩反应及后期的流体混合,在适当的条件下沉淀成矿,同时形成斑岩矿床特有的蚀变分带。

综合世界范围内不同成矿区的研究成果,斑岩型矿床形成深度一般在1~4 km,早期蚀变和铜矿化的形成温度范围为400~600℃,成矿流体以岩浆水为主体,盐度在40%~60% NaCl,晚期蚀变及成矿流体中出现部分天水,温度降低至200~400℃,盐度降低至15%以下。

需要注意的是,晚期大气水的普遍存在并与岩浆流体的混合,可能对成矿也起了重要作用。氢氧同位素研究表明,金属硫化物矿石堆积带正好是岩浆水与地下水相混合的地带,两者混合可导致成矿流体温度下降,盐度降低,pH值升高,从而促进矿质沉淀,对于提高斑岩系统含矿金属浓度可能起了关键作用。

2.5 构造-岩浆流体控矿作用

众所周知,斑岩型成矿系统多形成于挤压的构造体系中,而火山成因块状硫化物矿床(VMS型矿床)产出的张性岛弧环境,通常不发育斑岩型矿床。例如日本第三纪岛弧,大量发育黑矿型块状硫化物矿床,但却一直没发现工业规模的斑岩型矿床。关于上述挤压的构造体系有利于形成斑岩型矿床,笔者总结可能存在以下几方面有利因素。

挤压抑制了火山作用,阻止了深部岩浆直接喷出地表;

挤压的构造背景有利于上升的岩浆更大量地

聚集于深部岩浆房,因而有利于岩浆房内岩浆的充分分异,产生大量的挥发份及含矿热液;

挤压体制限制了岩浆房上部形成张性构造断裂,因而使岩浆流体不能呈岩枝状分散侵入,而大量汇聚于单个岩体中;

后期迅速的抬升和剥蚀作用造成深部突然减压,有利于已分异岩浆热液流体的运移和沉淀。

3 岩浆流体与浅成低温热液型金矿成矿作用

“浅成低温热液矿床”是指形成于较低的温度范围(通常在100~320℃间,以170~280℃为主)和较浅深度(从地表到12 km以下)且具特征热液蚀变和特征结构的热液矿床。这类低温热液金矿床与区域岩浆活动存在密切的时空关系。常产于破火山口或其它类型火山机构中,与成分上从流纹质、英安质、安山质的钙碱性、高钾钙碱性火山岩、次火山岩等有关。

浅成低温热液矿床一般按矿物组合或化学成分又可分为两大类:一类是由酸性呈氧化态的流体形成,称高硫型(酸性硫酸盐型);另一类是由近中性呈还原态的流体形成,称低硫型(冰长石-绢云母型)。多年的研究所积累的成果资料表明,虽然“浅成低温热液”矿床的形成深度浅,仍然有证据说明成矿流体中有岩浆组分加入。

3.1 高硫型

高硫型矿床埋藏深度比低硫型大,主要成矿元素为铜、金(银),一般与浅成含矿斑岩特别是富金斑岩有紧密时空联系,这种联系在东南亚成熟岛弧发育较为典型,常见浅成低温热液矿床发育于斑岩铜矿系统之上。大量研究表明,与斑岩型矿床叠加的浅成低温热液型矿化皆为高硫型的,形成温度介于90~480℃,集中在230~260℃。成矿流体为低温、低盐度、氧化型流体,成矿过程中天水混入程度较高。高硫型矿床的早期以流体对主岩的广泛淋滤为特征,这种流体的pH值小于2,氢和氧同位素组成与混合了大气水的岩浆蒸汽相似。硫化物和硫酸盐矿物的硫同位素组成也显示热液流体是氧化性的,大部分硫的种类来源于岩浆中SO₂,从而形成H₂SO₄。暗示着成矿流体至少部分来源于岩浆。

另外,高硫型矿床中与矿化有关的矿物中流体包裹体的分析研究表明,成矿流体为低盐度,含盐度介

于 2%~5% NaCl,且流体包裹体单一,主要为液相。但是,随着深度增加,含盐度显著增加,在矿石带以下,含盐度可以高达 20%~30%。上述情况反映高硫型浅热液环境下,成矿与低温、低盐度氧化型流体有关,并与下部高盐度流体存在相分异。而在斑岩型矿床中,成矿与超盐度流体有关,超盐度流体与低盐度高 CO₂ 蒸汽共存,两类矿床都形成于相对氧化的环境下,Cu 和 Au 都是密切组合的,且高硫型矿化与许多斑岩型 Cu 矿床顶部泥化蚀变带前锋的矿物学和稳定同位素特征相似,这些特征似都反映两者系同源岩浆演化的产物。含矿流体来自岩浆分异演化及岩浆脱气作用,而高硫型矿床由于其定位更浅,晚期大量天水及地下水混合,使得热液流体以天水为主,但仍有部分岩浆水贡献。更重要的是斑岩体系可能对热液成矿系统起“热引擎”作用,释放出的热能驱动大气降水加热,驱动热液系统循环运动,并使热液流体汲取所流经围岩中的矿质。因此,斑岩型热液系统与浅成低温热液系统的相隔时限通常是比较短暂的,同位素测年显示某些矿区两套热液系统年龄时差不足 1 Ma。

一些研究者发现,在许多斑岩矿床的热液蚀变系统中并不发育高级泥化带,因此认为高级泥化与斑岩系统无关。前已述及高硫型矿化与许多斑岩型 Cu 矿床顶部泥化蚀变带前锋的矿物学和稳定同位素特征相似,而且高级泥化蚀变常常是浅成低温热液系统的典型产物,两类成矿系统经常存在空间上叠加的现象。因此,有理由认为传统的斑岩系统蚀变分带中的高级泥化蚀变可能更多地标志着浅成低温热液系统的发育。

3.2 低硫型

该类矿床埋藏浅,成矿热液可以喷出地表形成热泉型矿床,主要成矿元素为 Au、Ag、Hg,常伴生有 Cu、Pb、Zn。空间上常与斑岩型铜-金矿和矽卡岩型矿床伴生,例如在菲律宾地区的大多数浅成低温热液型金矿床形成于下伏斑岩体顶部,且成矿年龄与其基本一致。

一般来说,低硫化热液矿床在 200~300 温度下形成于远离侵入体的位置,因而其岩浆作用标志更加难以捕捉。流体包裹体研究显示成矿流体以低盐度高 CO₂ 含量为特征,但在不同阶段有所变化,流体包裹体类型多,汽液两相包裹体发育,沸腾是低硫化浅成热液系统的普遍现象。稳定同位素研究通常表明成矿热液系统中大气水占有优势,水和岩石的氧同

位素组成由于水岩相互作用发生了不同程度的改造,但仍有迹象显示岩浆热液的参与。例如 Nevada 著名的 Comstock 矿脉,¹⁸O‰和 D 值相对于当地大气水表现出了显著偏移,这被作为重要的岩浆水组分的证据。其次,硫和碳同位素证据则表明许多浅成热液矿床的硫和碳来自幔源,并有基底陆壳物质的参与。另外,在东南亚著名的 Citrotan 浅成低温热液型金矿区,研究表明不同成矿阶段中方铅矿的同位素组成非常相似,相对高放射成因比值(²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb = 18.741~18.789, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb = 1.657~15.702, ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb = 39.049~39.188)及高 μ 值(²⁰⁸U/²⁰⁴Pb = 9.92~10.04)显示成矿物质来源单一,并且与区内上新世火山岩非常接近,表明矿床与上新世爪哇火山岛弧中的钙碱性火山岩有关。在 Bau 金矿带,临近侵入体的矿体中的一些石英包裹体内的高温高盐度及含少量矿物晶体表明,成矿流体至少部分来自岩浆源。因此,在浅成热液系统中,大气水占有优势地位的现象也许是由于大规模的岩浆热源产生了大规模和长期的地下水对流循环系统,它抹去了大部分早期岩浆水组分的证据。

以上分析表明,在浅成低温热液成矿系统中,由于与大气降水的强烈混合作用,掩盖了深源含矿岩浆流体在矿床形成中的作用,但矿床中硫碳同位素组成仍然反映出形成该类矿床的中深源含矿流体的存在。

低硫型浅成低温热液矿床中普遍出现冰长石,发育玉髓质条带,多孔的矿脉和强烈角砾岩化,以及矿床中的流体包裹体研究均证实,这些矿床在形成过程中发生过减压沸腾作用。热泉型矿床泉华之下是强烈的硅化带(硅帽),会自动封闭热液通道,引起上升流体增压,产生强大的水头压力并发生隐爆,在近地表处压力释放导致流体发生沸腾并使周围岩石破碎,沸腾过程中温度压力的降低和挥发份的逸出改变流体的物理化学性质,使金及其它成矿元素沉淀。由此可见,温度降低,pH 值,CO₂ 条件的改变,介质中有效配位体浓度的降低,以及大气水的混合作用和沸腾过程都能有效地导致金矿沉淀。此外,热液流体上升过程中也可能从围岩中萃取部分成矿物质。

4 结 论

总之,斑岩热液系统和浅成低温热液系统,可以视为一个统一的构造-岩浆-流体成矿系统。随着远离侵入体,含矿的岩浆流体由高温相变为中低温相,在演化过程中发生大气降水混合及水岩相互作用等一系列复杂变化,导致流体性质发生变化,并形成

特征的矿床时空分带及蚀变分带,流体沸腾和流体混合可能是造成整个系统聚矿高效形成大矿的重要机制。这样由次火山斑岩出发就可形成一套相互关联的成矿系列,即斑岩型-矽卡岩型-过渡型-高硫型

浅成低温热液矿床-低硫型浅成低温热液矿床-热泉矿床,因此在野外找矿过程中应注意找矿类型的空间转换,见图3。

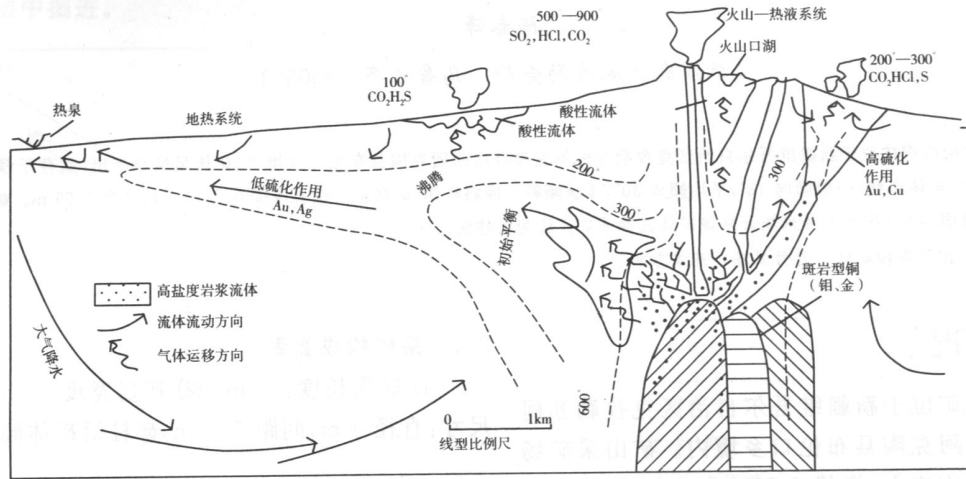


图3 斑岩-浅成低温热液铜金(钼)成矿系统示意图

参考文献

[1] 卢焕章等. 流体包裹体. 北京:科学出版社,2004.
 [2] 卢焕章. 成矿流体. 北京:科学出版社,1997.
 [3] 翟裕生等. 区域成矿学. 北京:地质出版社,1999.
 [4] 李人澍. 成矿系统分析的理论与实践. 北京:地质出版社,1996.
 [5] 刘伟. 岩浆流体在热液矿床形成中的作用. 地学前缘. 中国地质大学. 2001,8(3).
 [6] 杨牧等. 东南亚大型-超大型浅成低温热液型金矿成矿地质特征研究. 大地构造与成矿学. 2000,24(3).
 [7] 侯增谦. 斑岩型铜钼金矿床:新认识与新进展. 地学前缘(中国地质大学. 北京) 2004,11(1).
 [8] 肖荣阁. 地质流体自然类型及成矿类型 地学前缘(中国地质大学. 北京) 2001,8(4).
 [9] 翟裕生. 成矿系统研究与找矿. 北京:地质调查与研究 2003,26(2).
 [10] DAVID R. COOKE. Giant Porphyry Deposits: Characteristics, Distribution, and Tectonic Controls American: Economic Geology August 2005.

收稿:2006-12-20

(上接 12 页)

表3 克兰泥盆纪火山盆地构造演化阶段及相关成矿作用

构造演化阶段	与成矿的关系及成矿作用	
基底构造	1、北西向区域深大断裂控制盆地的展布; 2、基底格状构造格架控制盆地内火山活动及与喷流沉积密切相关的火山岩相(间接控制喷流沉积矿床的分布)。	
火山活动阶段	火山活动中	1、形成“黑矿型”喷流多金属矿床
	火山活动间隙期	1、形成喷流沉积多金属矿床; 2、形成喷流沉积多金属矿源层;
	火山活动后期	1、形成喷流沉积多金属矿床; 2、形成喷流沉积多金属矿源层;
隆升造山阶段	造山早期区域变质作用	1、对喷流沉积矿床改造富集; 2、变质热液活化矿源层中有用组分
	造山后期岩浆侵位	1、形成接触交代变质矿床
	造山后期断裂活动	1、构造热或构造热液活动活化含矿层中有用组分; 2、热液活动通道和场所; 3、形成充填脉状金属矿化; 4、改造其它矿床
表生作用阶段	1、风化、淋滤改造矿床浅表; 2、剥蚀、冲积形成砂矿	

参考文献

[1] 王京彬,李博泉等. 额尔齐斯聚矿带金铜成矿条件及找矿预测. 地质出版社,1999.
 [2] 王京彬,丁汝福,张进红等. 可可塔勒铅锌多金属矿带隐伏矿定位预测研究. 1999.

收稿:2007-01-15