第16卷第2期
2010年6月
地质力学学报
JOURNAL OF GEOMECHANICS
Vol. 16 No. 2
Jun. 2010

文章编号：1006-6616（2010）02-0189-14

中亚巴尔喀什成矿带萨亚克大型铜矿田矿床地质特征与成矿模式

陈宣华[1,2]，王志宏[2]，杨　农[1,2]，陈正乐[1,2]，韩淑琴[2]
（1. 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室，北京　100081；
2. 中国地质科学院地质力学研究所，北京　100081）

摘　要：综述了哈萨克斯坦巴尔喀什成矿带萨亚克大型铜矿田地质特征、矿田构造与成矿模式。萨亚克铜矿田是中亚成矿域巴尔喀什成矿带唯一的以矽卡岩型铜矿化为主的大型铜矿床，产在萨亚克地堑复向斜内。该矿田包括几个在空间上相对独立的矽卡岩型铜矿床、斑岩型铜钼网状脉矿床和一系列石英脉型矿脉，构成了斑岩型和矽卡岩型两个端元形成的成矿系列，但以矽卡岩型为主。矿床主要位于中石炭世灰岩与晚石炭世花岗岩类的接触带上，具有独特的矽卡岩型Cu-Au-Mo矿化组合，成矿时代为海西中晚期，根据本研究进行的锆石SHRIMP定年结果，主要与次要成矿期年龄分别为335±2Ma和308±10Ma。金属矿床主要赋存在地堑复向斜内局部发育的鞍状背斜顶部，部分富矿体的产出严格受断裂构造-岩浆活动的控制。闪长岩与铜矿化作用的关系最为密切，铜含量可高达1%以上；其次，花岗闪长岩与铜矿化的关系也较为密切，铜含量可达0.2%以上。萨亚克矽卡岩型铜矿田铜保有储量约为57.5万吨。

关键词：矿床地质；构造-岩浆活动；成矿模式；萨亚克矿田；巴尔喀什成矿带
中图分类号：P618.41　　　**文献标识码**：A

中亚成矿域（或称为古亚洲成矿构造体系）[1]因其巨量的金属和非金属矿产而闻名于世，成矿作用极其复杂多样[2~3]。除了科翁腊德、阿克斗卡等超大型斑岩铜矿之外[4~5]，中亚成矿域矽卡岩型铜矿床主要分布于中天山恰特卡尔山一带，矿床规模以中小型为主，个别达到大型，如哈萨克斯坦巴尔喀什成矿带萨亚克（Sayak，Saiak）矿田（图1）和吉尔吉斯斯坦库鲁捷格列克矿田。矽卡岩型铜矿床出现在中亚成矿域4类构造-成矿带内，即优地槽的早期和晚期，冒地槽晚期（回返期）、造山期（原为冒地槽）和构造岩浆活化期构造-成矿带内，工业铜矿床的围岩主要是碳酸盐岩类岩石，除产于加里东优地槽内矿床围岩的时代为寒武-奥陶纪外，其余矿床围岩时代多为早、中石炭世，部分为泥盆纪[2~3]。成矿一般与花岗岩-花岗闪长岩建造有关，个别矿床与碱性辉长岩有关[2~3]。侵入岩及成矿时代以早-晚石炭世或石炭纪-早二叠世为主，少数矿床为晚奥陶世[2~3]。

收稿日期：2010-04-26
基金项目：国家科技支撑计划重点项目（编号：2007BAB25B02）资助。
作者简介：陈宣华（1967-），男，浙江乐清人，博士，研究员，主要从事构造地质学（地质力学）和矿产资源科学研究工作。E-mail：xhchen@cags.ac.cn。

尽管哈萨克斯坦矽卡岩型铜矿床分布较少，但是，矽卡岩型铜矿床无疑是哈萨克斯坦工业铜和与铜有关金属的重要来源。哈萨克斯坦矽卡岩型铜矿床均产出在有关的斑岩铜矿带内，其中萨亚克矿田就是最典型的矽卡岩型为主的铜矿床，产出在巴尔喀什斑岩铜矿带内，它是哈萨克斯坦最大的矽卡岩型为主的铜矿田，其它还有南哈萨克塔拉斯-阿拉套山区的伊里苏矿床等[6]。

1 萨亚克矿田地质概况

萨亚克矿田位于卡拉干达州杰兹卡兹甘（Zhezkazgan）省东部 Prioziorny 区，在巴尔喀什市以东 200km 处，距巴尔喀什湖 40km。矿田地理坐标大致为东经 77°13′~77°26′，北纬 46°57′~47°01′。矿田有铁路和公路至巴尔喀什市、萨亚克村和阿克斗卡村，交通比较方便。

1930 年根据史前开采和冶炼的证据发现该矿之后就开始了阶段性的勘探，并在未开发区域和新发现区进行了继续的勘探，20 世纪 70 年代以来开始开采。该矿田包括几个在空间上相对独立的矽卡岩型铜矿床、斑岩型网状脉铜钼矿床和一系列石英脉型矿脉，如地堑（向斜）北部的萨亚克Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ，塔斯陶（Tastau），墨德拜（Moldybai），向斜南部的西、中、东詹巴斯（Zhambas，也称为扎姆巴斯）、别尔卡拉（Berkara）、珠巴克（Zhumbak，也称为茹母巴克）、乌米特（Umit）和沃尔拉斯托维（向斜东部）等 10 余个矿床，构成斑岩-矽卡岩成矿体系[8]，但是以矽卡岩型为主，故称为矽卡岩型铜矿田。不过，由于萨亚克矿田在储量上不具有优势，因此，巴尔喀什成矿带仍然被称为斑岩铜矿带，而不是斑岩-矽卡岩铜矿带。

萨亚克矿田处在巴尔喀什泥盆纪-石炭纪火山-岩浆弧内[9]，是巴尔喀什巨大复背斜的两个分支（NNW 向 Kentarlauskaya 和纬向 Tyulkulan-萨亚克分支）的交叉部位。由于奥陶纪期间形成的成吉思火山弧伸展弧后盆地 Kazyksky 盆地洋壳在晚古生代（并可能局部持续到三叠纪）的俯冲，在北巴尔喀什大陆边缘形成了与洋壳俯冲有关的火山-深成岩带，同时形成萨亚克矿田[7]。巴尔喀什巨大复背斜主要由奥陶纪-早志留世蛇绿岩、碧玉岩类和火山-陆源沉积岩类组成。奥陶系主要为中奥陶统 Itmurundinskaya 组拉斑玄武岩和上奥陶统 Kazykskaya 细碧角斑岩组。萨亚克地堑复向斜，沿 WNW 向延伸 60km，宽 40km，主要由早石炭统（上半部分）-中石炭统（下半部分）4000m 厚（萨亚克统）的海相火山-碳酸盐-陆源磨拉石和 400m 厚的莫斯科阶含大量次火山建造的安山岩组成[10]。萨亚克统主要岩石类型有复矿碎屑砂岩、凝灰质砂岩、粉砂岩、层凝灰岩、酸性和中性凝灰岩、粗砂岩、砾岩和灰岩等，可分为 Burultas 组、Tastykuduk 组和 Kungisayk 组[7,10]。其中，Tastykuduk 组厚 200m，为礁灰岩和生物碎屑灰岩岩层夹凝灰质粉砂岩砂岩[7,10~11]。萨亚克统之上不整合覆盖上石炭统安山岩和玄武岩。

萨亚克盆地是一个不对称的地堑或复向斜，其南翼和南西翼产状较陡，北翼较缓。萨亚克地堑复向斜的褶皱构造被各种方向、规模和类型的断裂网切割。由于 NW 向次级褶皱作用，以及经向、NE 和 NW 向断裂及复合形成的多级平行或分支断裂的作用，复向斜变得十分复杂。其中，NW 和 NE 向断裂最为发育，近 SN 向和近 EW 向断裂占次要地位。沿断裂的走滑位移量各不相同，从几十米到几千米不等。断裂形成于成矿作用之前，但经历了成矿后的再活动。地堑复向斜内广泛发育次火山岩岩床和侵入岩岩枝造成的层间断裂。

在萨亚克地堑复向斜（冒地槽）中，所有火山-沉积层被中-晚古生代（晚石炭世-早二

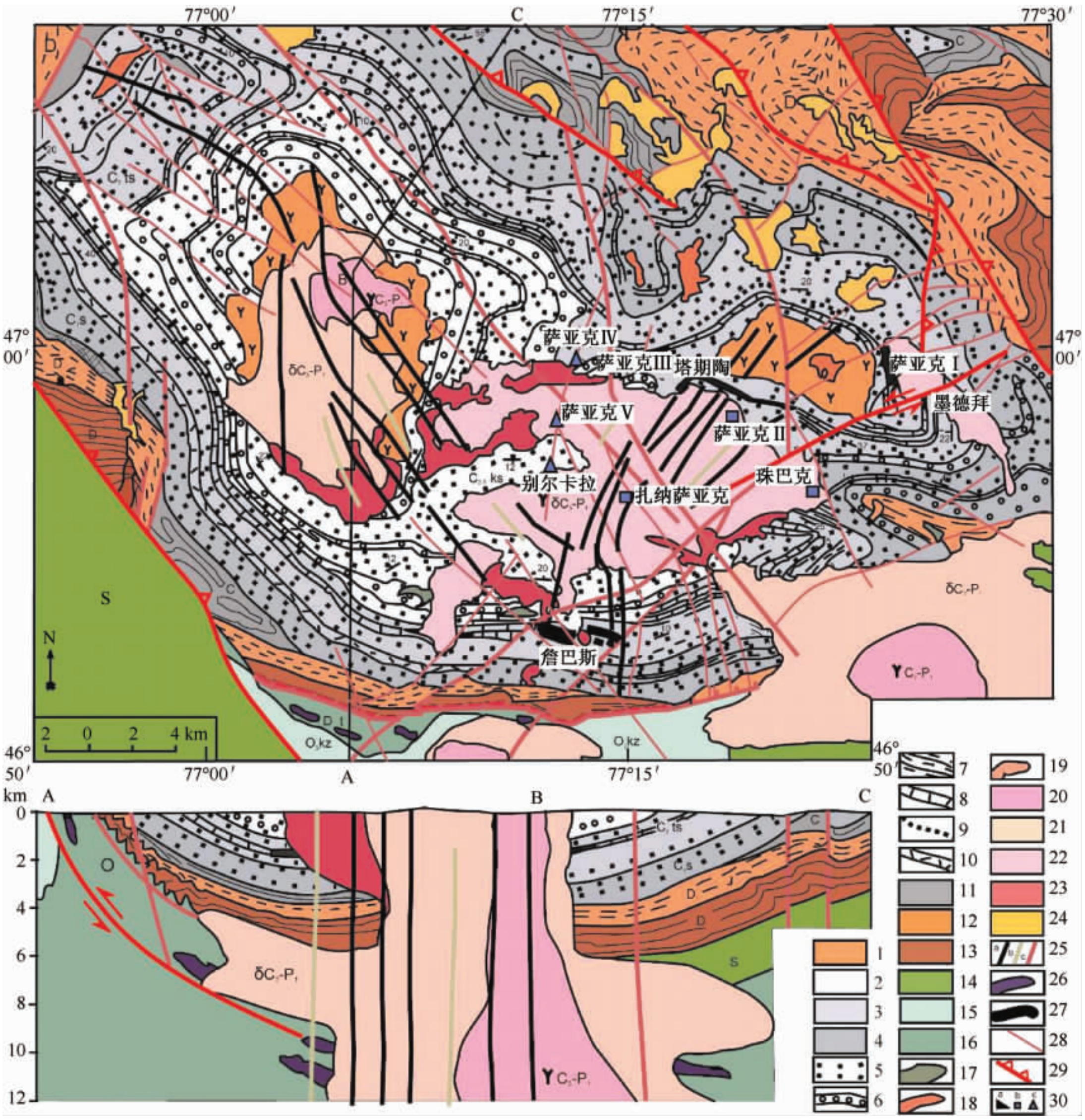

图 1　萨亚克矿田区域地质简图与剖面图（据文献[7]并有所修改）

Fig. 1　Geological position of the Sayak group deposits and geological section on ABC line (modified after[7])

1. Ushmalinskaya 组（C_3u）安山质和安山玄武质斑岩；2～10. 萨亚克统凝灰质陆源沉积物：2. Kungisayakskaya 组（C_2ks）；3. Tastykudukskaya 组（C_2ts）；4. Burultasskaya 组（C_1b）；5. 砂岩；6. 砾岩和粗砂岩；7. 凝灰质粉砂岩；8. 灰岩；9. 砂岩中含钛磁铁矿夹层；10. 酸性成分凝灰岩和熔结凝灰岩；11. 下石炭统凝灰质陆源沉积物；12～13. 上泥盆统（12）和中-下泥盆统（13）火山-陆源沉积物；14. 志留系细粒陆源碎屑沉积物；15. 上奥陶统 Kazykskaya 组（O_3kz）细碧角斑岩建造；16. 中奥陶统 Itmurundinskaya 组（O_3it）拉斑玄武岩建造；17～19. 次火山侵入体：17. 辉绿岩；18. 闪长玢岩；19. 流纹斑岩；20～24. 晚石炭世花岗岩类：20. 斜长花岗岩和黑云母角闪石花岗岩；21. 英云闪长岩和石英闪长岩；22. 花岗闪长岩和二长花岗闪长岩；23. 闪长岩，二长闪长岩和辉长岩；24. 闪长岩；25. 岩墙：a-花岗斑岩和斜长花岗斑岩，b-花岗闪长斑岩，c-闪长玢岩和辉绿岩；26. 超基性岩；27. 矽卡岩;28. 破碎带；29. 逆冲断层；30. 矽卡岩型（a）、斑岩型（b）和石英脉型（c）Cu-Mo-Au 矿床

叠世）萨亚克杂岩体所侵入。萨亚克杂岩体由乌米特（Umit）、昆吉萨亚克（Kungisayak）、列巴依（Lebai）、Barak 和 Akshoki 等一系列独立岩体组成[10]，它们分布在地堑复向斜的中

心轴部位和盆地的南、北两个边缘部位，具有陡立的接触带，有时是直立的，有时指向岩体的内部。列巴依和乌米特两个岩体均同时具有矽卡岩型和浸染状低品位斑岩型 Cu-Mo 矿化[10]。在复向斜的边缘也形成一些小岩体。按侵入顺序排列的侵入岩成分为：主要分布在岩体边缘的早期辉长岩、辉长闪长岩和闪长岩，分布最广的中期大量石英闪长岩和花岗闪长岩，以及晚期黑云母-角闪石花岗岩，侵入岩的碱性不断增加[11]。具有石英核心的伟晶岩类也有发育。中酸性侵入岩时代相当于中石炭世末期-晚石炭世中期。

萨亚克矿田典型的特征是，密集的岩墙群横切大岩体，并延伸到围岩中 2 ~3km。萨亚克盆地发育两期伸展岩墙群：早期系列为盆地东北部与昆吉萨亚克花岗闪长岩杂岩体相伴生的岩墙，为北东走向，具有高品位的 Cu ~ Mo 矿化作用；晚期系列为盆地西北部与乌米特花岗岩杂岩体相伴生的岩墙，为北西走向，具有低品位的稀有金属和铜矿化[12]。岩墙厚度从几厘米到 3 ~4m 不等，出现在矿田 10% ~15% 到 20% ~30% 的面积内，包括斜长花岗岩岩墙和花岗闪长玢岩岩墙，以及石英闪长玢岩和不含石英的闪长玢岩、辉长玢岩和微辉长岩岩墙。

萨亚克矿田具有独特的矽卡岩型 Cu-Au-Mo 组合[7]，背斜构造是矽卡岩型矿床的主要控矿构造。最大的矽卡岩型金属矿床赋存在地堑复向斜的鞍状背斜顶部，位于花岗岩类侵入体接触作用晕的范围内。铜-金-钼矿化作用构成萨亚克矿区的主要价值，主要储量集中在萨亚克Ⅰ、萨亚克Ⅱ、塔斯陶、萨亚克Ⅲ和萨亚克Ⅳ矿床最大的侵入体接触作用晕（矽卡岩类）范围内。矿化多产于中酸性侵入岩与灰岩的接触带，其接触交代作用形成的矽卡岩分布十分普遍。

2 围岩蚀变、成矿作用与矿石矿物

萨亚克矿田围岩蚀变主要为硅化、绢母化、钾长石化、绿帘石化和赤铁矿化，有时出现电气石化。其中，近矿蚀变为绿帘石化、硅化和赤铁矿化。

矿田位于中石炭世灰岩与晚石炭世花岗岩类的接触带上，最突出的特点是普遍发育接触交代作用，矽卡岩分布较广。交代作用和成矿作用的发生是岩浆活动的延续。岩浆阶段之后的交代岩，包括凝灰质粉砂岩和火山岩中的辉石、黑云母和斜长石角岩矿物晕，灰岩中的大理岩晕，以及局部产出的硅灰石、硅灰石石榴子石（钙铝榴石）、辉石（透辉石）矽卡岩（含符山石）。它们通常具有早期的长石化和绿帘石化。

萨亚克矿田铜矽卡岩矿体周围交代成因的接触晕，是其它铜矽卡岩矿床的找矿标志。接触晕一般产在中石炭统灰岩和凝灰岩中，具两种类型：一种为区域交代接触晕，具有矿田的地球化学特征；另一种为与矿体的形成直接相关的接触晕，可以用来预测隐伏铜矽卡岩矿床[13]。

早期的硅灰石-透辉石-钙铝榴石矽卡岩不具有矿化作用。矿化主要出现在晚期的石榴子石矽卡岩或灰岩-石榴子石矽卡岩中，晚期矽卡岩分布最广。火山-沉积岩中大量发育交代岩的地方是侵入体接触带与萨亚克地堑复向斜褶皱地层相吻合的地段，特别是地堑复向斜中央部位的地垒背斜隆起的鞍部和大断裂及岩脉穿插的地段。裂隙对矿化分布起着控制作用。裂隙倾角陡的，往往以垂直脉为主，脉厚很少超过 1cm。

矽卡岩通常是由碳酸盐岩层的灰岩变成。在岩浆期后阶段，沿着侵入体接触带形成了宽约 2 ~2.5km 的层状接触交代矽卡岩带，沿接触带延伸几百米至 4 ~6km 以上。接触交代矽

卡岩包括：晚期辉石（gedenbergite）和主期石榴子石（钙铁榴石）矽卡岩，叠加有阳起石、绿帘石、晚期长石化、绿泥石、方解石和不同类型矿化作用；同时在花岗岩类岩石中形成电气石，在凝灰质粉砂岩砂岩中形成萨亚克石，在矽卡岩中形成硼镁铁矿-硅钙硼石-赛黄晶[11]。晚期的矽卡岩分布最广。

硫化物矿化作用发生在晚期矽卡岩、磁铁矿和硼酸盐-硼硅酸盐矿石和侵入岩中，而低硫化物工业石英脉-金矿化作用发生在凝灰质粉砂岩砂岩的角岩和花岗岩类岩石中。

产于侵入岩和矽卡岩中的细脉浸染状钼-铜矿化具有密切的空间-时间关系。含金-钴的钼-铜矿化集中在矽卡岩中，矿石聚集在与细脉浸染状矿化带（产于花岗闪长岩中）相连的地段内，也可聚集在火山-沉积岩中，呈含辉钼矿和黄铜矿的石英脉、石英-电气石脉、绿帘石-绿泥石-石英脉或者硅化带出现[6]。

哈萨克斯坦大多数专家研究认为，萨亚克矿田含磁铁矿矽卡岩的形成与花岗闪长岩-花岗岩建造有关，而含铜钼矿化的矽卡岩则与花岗闪长岩-花岗岩后期侵入的斜长花岗斑岩岩株或岩墙有关。

矿体在矽卡岩带、侵入体和未蚀变灰岩之间呈透镜体和板状体产出，单个矿体长度范围为 0.5 ~ 12km，一般可达 1000 ~ 1500m，宽 600 ~ 700m，厚度通常为 10 ~ 15m。大多数情况下，矿体与矽卡岩相吻合，在总体上重复矽卡岩的外形轮廓，其内部硫化物矿化呈细小透镜体、不规则形状的透镜体、细脉、脉、大型堆积和浸染状矿体等，品位变化较大。

矿石呈块状、细脉状和浸染状构造。细脉浸染状矿石含铜较富，它们往往产出在地表至超过 350 ~ 400m 的深度，且常伴有硅化、绢云母化及钾长石化，多产出于花岗岩类脉壁上。

矿石矿物成分很复杂，据统计约有 150 种矿物，其中主要矿物是磁铁矿、黄铁矿、黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿、辉钴矿、辉钼矿等。工业矿石有硼酸盐-硼硅酸盐矿石（硅硼钙石、赛黄晶、硼镁铁矿），磁铁矿矿石，砷-金-钴矿石，钼矿石，金-钼-铜矿石，含金石英脉矿石；主要工业矿石组合为矽卡岩、磁铁矿矿石和花岗岩类岩石中的金-钼-铜矿物组合，主要有三种矿石矿物组合类型：（1）斑铜矿（+黄铜矿），（2）黄铜矿，（3）磁黄铁矿-黄铜矿。其中，第一类斑铜矿（+黄铜矿）类矿石铜品位最高可达 10% ~ 15%（平均为 2.5% ~ 3% Cu），矿石中经常含有辉钼矿，使得钼品位和伴生铼的品位得到很大提高（0.01% ~ 0.02% Mo；整个矿床钼品位平均为 0.005% Mo）。在斑铜矿和一些黄铜矿（第二类）矿石中，还发现有自然金、银金矿、针碲矿、碲金矿、碲金银矿、多铋硒铅矿、碲银矿、铅泡铋矿、硒铜银矿、块状硫砷铜矿、脆硫锑铜矿、硫锑铅矿、硫铋铜矿、针硫铋铅矿、claprotolite、辉碲砷矿、辉铋矿、retsbanite、wittenchenite、斜方辉铅铋矿、方铅泡铋矿等。金、银、铋、硒、碲和钼的金属品位与金属铜品位直接相关。同时，在氧化带和矿石胶结带中同样含有大量表生金颗粒[11]。第三类磁黄铁矿-黄铜矿矿石中也含有较高品位的铜、金、银、铋、硒、碲。与第一类矿石不同的是，第三类矿石中砷以毒砂的形式存在，钴以辉钴矿、硫砷钴矿的形式存在。这类矿石在萨亚克 III 和 IV 矿床及塔斯陶（Tastau）矿床北部较为突出[11]。

伴生钼金属含在富铼的辉钼矿矿石中，含有不纯黄铜矿。辉钼矿矿石主要孤立地处在矽卡岩矿床的下部和下伏的石英长石砂岩中（如萨亚克 I 矿床和 Zhambas 东部），包括 Zhambas 中部的低铁矽卡岩和矽卡岩类，以及 Umit（Berkara，Zhambas，Umit）和 Lebai（萨亚克 I 矿床）的花岗岩类岩体。在萨亚克 I 矿床，矿石中钼品位可达 1%（平均为 0.253%）；在 Zhambas 东部为 0.2%；在 Berkara、Zhana-Sayak 及 Zhambas 中部为 0.15% ~

0.25%。萨亚克Ⅰ矿床的这种矿石部分与磁铁矿和金-钼-铜型矿石共生，因此，复杂矿石中的钼和铼品位有所提高[11]。

砷-金-钴矿石组合主要为矽卡岩矿田周边绿帘石-绿泥石-阳起石变质岩中的块状、集合体矿石，处在距离侵入接触带最远的外围地区。矿石中的主要矿物有毒砂和硫砷钴矿，次要矿物有辉钴矿、黄铜矿和辉钼矿。在辉钴矿和硫砷钴矿颗粒之间均匀分布着极细的自然金包体；这些矿物的集合体中还发现有自然金细脉的存在。矿石中几乎见不到 hersdorffite、复砷镍矿、红砷镍矿和辉镍矿等矿物。矿石钴品位约为千分之几，平均为 0.151%；而金品位可达 20g/t，平均为 7.8g/t。在萨亚克Ⅰ矿床西部和萨亚克Ⅱ矿床中部，特别是在萨亚克Ⅲ矿床，可见少量砷-金-钴矿石组合[11]。

石英-金矿石组合主要分布在乌米特（Umit）岩体的西部（Kyzymchek，Sayak V，Berkara Zhilnaya）和 Kungisayak 岩体的西部外接触带中，处在萨亚克统上部的角岩、绿帘石化、绿泥石化和硅化的火山-陆源沉积岩之中。在侵入岩中形成含硫化物（黄铜矿、斑铜矿、辉钼矿）和金矿化的电气石-石英脉和石英脉网脉。电气石-石英脉中金的品位可达 7～10g/t，平均为 1g/t；而在 Kyzymchek 的石英网脉中，金品位高达 100g/t，平均为 20g/t。但是，所有这些矿床中金的储量并不大，仅适合于小规模矿山开采[11]。

在 Aktas 矿床，低硫化物石英脉金矿石形成呈线性分布的网状脉带，在火山-陆源沉积岩中断续延伸 1000m，厚 10～15m；金品位平均为 3.5g/t[11]。

硼酸盐-硼硅酸盐矿石组合有侵入岩中的电气石脉和电气石化带、外接触带中的角岩化凝灰质粉砂岩砂岩中的斧石矿化体。硼酸盐-硼硅酸盐矿石与砷-金-钴和金-钼-铜矿化体一起，构成了萨亚克Ⅳ矿床矽卡岩和与矽卡岩有关的交代岩中重要矿石。硼酸盐矿体由硅硼钙石、赛黄晶和硼镁铁矿组成，品位为 1%～1.5% 硼酸硫酸钙[11]。

以上各种矿石组合，有时可独立出现，但大多数情况下会同时出现。

此外，萨亚克盆地下石炭统沉积地层中含有钛磁铁矿矿层，由细粒磁铁矿、钛铁矿、石英、长石和暗色矿物集合体组成，并含有磷灰石、锆石、金红石、榍石和独居石等副矿物。钛磁铁矿矿层含有 5% TiO_2、48.7% Fe 和 0.35% V_2O_5[14]。钛磁铁矿矿层被认为是侵入体与围岩接触交代的结果，直接叠加在晚期石榴子石矽卡岩之上，仅具有辅助经济价值。

3 矿床成因模式

3.1 地球物理地球化学找矿模式

萨亚克矿田矽卡岩矿床，特别是含磁铁矿矽卡岩矿床，具有强的磁异常和正的重力异常（图 2A）。高精度重力测量在矿床预测方面的有效性，与石榴子石矽卡岩和铜-磁铁矿矿化作用的强度有关。花岗岩类中带状的斑岩型铜网状脉矿化作用，伴随有围岩中渗透性的热液蚀变和金属矿体的地球化学晕，反映为负的磁异常。在萨亚克矿田，Cu、Mo、W、As、Pb 和 Bi 分散晕普遍发育在花岗岩类侵入体及其外接触带中（图 2B）。矽卡岩矿床和斑岩型铜矿化作用的显示总是被最强的地球化学晕所包围。隐伏的、埋藏较深的矽卡岩矿体具有较小的、强度较弱的 Pb、As、Cu 地球化学晕[7]。

围绕隐伏矿体的上矿带，可以细分为如下一些地球化学亚带：下亚带（矿体之上 0～50 m）具有高浓度的 Sb、Ag 和 Bi，以及中等浓度的 As、Zn 和 Ba；上亚带具有显著增高的 Pb 含量[7]。

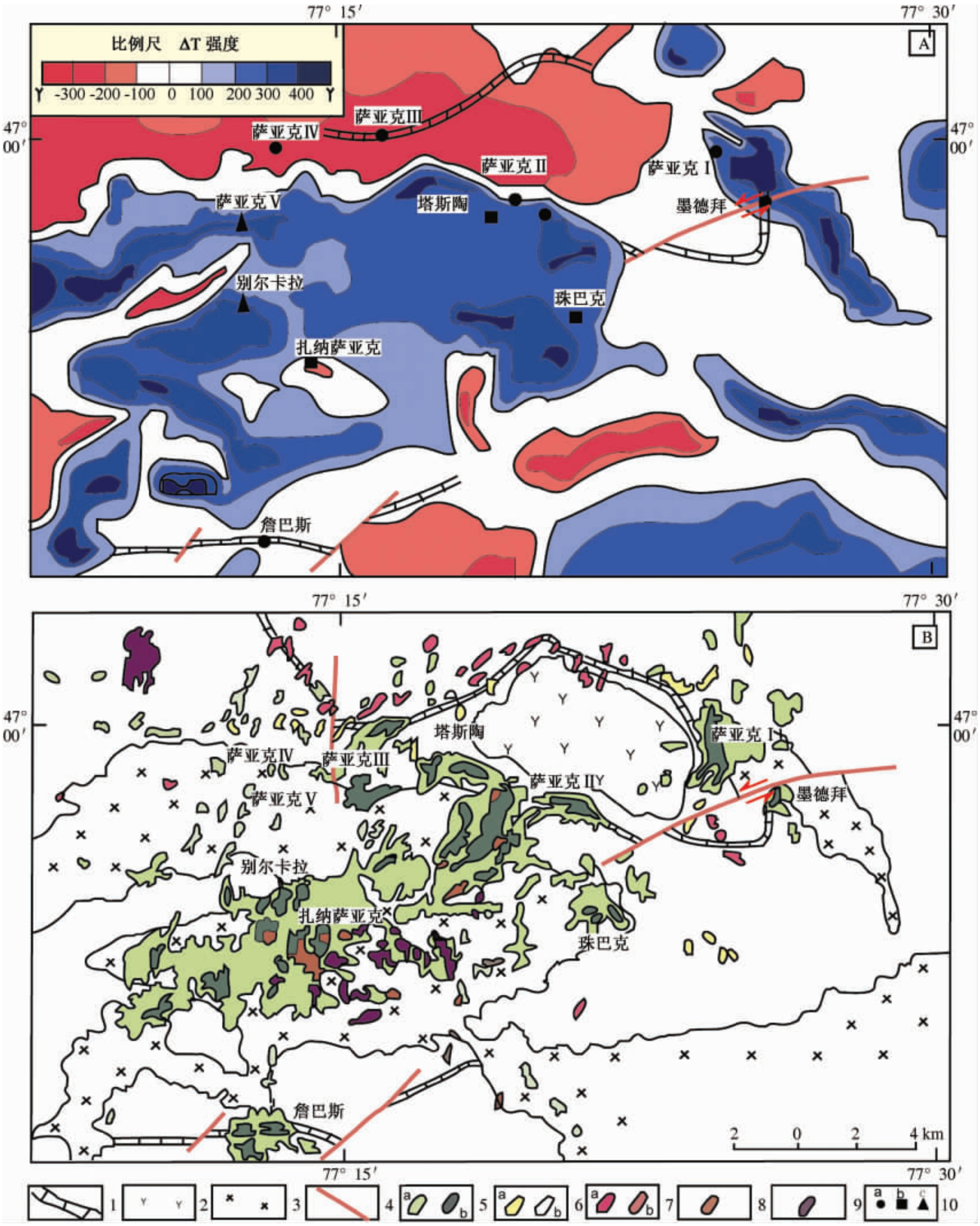

图 2　萨亚克矿田矿床产出部位与区域磁场（A）
和元素分散晕（B）的关系（据文献[7]并有所修改）

Fig. 2　Position of the Sayak group deposits relative to the magnetic field (A) and dispersion aureols of elements (B) (modified after [7])

（A）磁场强度 T（单位：10^2 伽马）等值线：a-正，b-零，c-负；（B）1. 萨亚克统（$C_1 \sim C_2$）凝灰质陆源沉积物，含灰岩条带；2. Ushmalinskaya 组安山质和安山玄武质斑岩喷出岩；3. 花岗岩类；4. 裂隙；5-9. 地球化学晕中金属元素含量等值线（B）：5. Cu0.005～0.01（a）和 0.03（b）；6. As0.01（a）和 0.03（b）；7. Pb0.005（a）和 0.01（b）；8. Mo0.0005～0.001；9. W0.005～0.01；10. 矽卡岩型（a）、斑岩型（b）和石英脉型（c）Cu-Mo-Au 矿床

3.2 构造控矿作用

巴尔喀什成矿带一系列斑岩型铜钼矿床（如科翁腊德、阿克斗卡和博尔雷），以及萨亚克矽卡岩型铜矿床和阿克沙套钨钼矿床等，均形成于晚古生代（晚石炭世）时期。前人认为，它们形成于类似于拉分盆地的构造环境下，与大陆弧及伴生的弧后裂解作用有关[15]。

萨亚克矿田的矽卡岩矿床在空间上与萨亚克地堑复向斜中的褶皱和断裂构造相伴生。例如，最大的萨亚克Ⅰ矿床位于Lebai背斜的鞍状弯曲部位（图3）。主要的矿体产在褶皱陡倾翼与花岗闪长岩接触的矽卡岩中。深度为5～20m的褶皱枢纽中央部位是最富铜的部位。萨亚克Ⅲ-塔斯陶矿田构成了塔斯陶背斜带与塔斯陶鞍状向斜相连接的构造结。萨亚克Ⅳ号Co-Au矿床处在向斜北翼的一个局部弯转部位，并被断层带所切割[7]。因此，褶皱构造控制了萨亚克矿田、矿床和矿体的产出：萨亚克复向斜控制了矿田的形成；复向斜构造中的局部背斜构造控制了矿床的产出；而最富的矿体总是产在背斜褶皱的弯转部位或者被断层切割的部位（即容矿构造），表现出断裂和褶皱构造对矿床和矿体定位的严格控制作用。

萨亚克矿田的褶皱构造，特别是控制矿床和矿体产出的背斜褶皱构造，在很大程度上受区域逆冲推覆构造的控制。区域上，倾向北东的逆冲断层构成了叠瓦状逆冲断层系，控制了萨亚克复向斜的总体形态，并在成矿作用过程中表现为封盖层的作用。而控制矿床和矿体产出的，是与局部背斜构造密切相关的反向逆冲断层，一般表现为倾向南西的盲逆冲断层。后者与局部的背斜构造（表现为断弯褶皱）构成了断层相关褶皱系统。因此，反向逆冲断层主要表现为导矿构造。

3.3 矿石矿物共生组合及分带模式

萨亚克铜矿田的形成，同酸性侵入岩与灰岩接触双交代形成的矽卡岩有关，具有典型的矽卡岩型铜矿床矿石矿物共生组合。此外，萨亚克铜矿田具有斑岩型铜钼矿化等，使得矿田的矿床类型和矿石矿物组合变得复杂多样。

萨亚克矿田西矽卡岩矿床具有四种矿石矿物共生组合：金-辉砷镍矿-毒砂-辉钴矿；金-硫铜铋矿-黄铜矿-磁黄铁矿；金-硅硼钙石-辉砷镍矿-毒砂-辉钴矿；方铅矿-闪锌矿。每一种矿石组合与特定类型的交代蚀变具有密切的空间相关性[7]。萨亚克矿田具有四种矿石-交代岩分带，分别为[6~7]：1-内带，为石榴子石带，矿石矿物组合为金-辉钼矿-斑铜矿-黄铜矿；2-中间带，为绿帘石-阳起石带，矿石矿物组合为金-硫铜铋矿-黄铜矿-磁黄铁矿；3-外带，为石英-方解石-绿泥石带，矿石矿物组合为金-硅硼钙石-辉砷镍矿-毒砂-辉钴矿；4-脉状外带，为方解石-绿泥石带，矿石矿物组合为方铅矿-闪锌矿（图4A）。在内带（萨亚克Ⅰ），大部分（25%）铜和铜-磁铁矿矿石富含Mo（0.01%）、Au（0.7g/t）、Ag（18g/t）和Bi（5g/t）。中带（萨亚克Ⅲ-塔斯陶）具有小规模的铜矿化（1.4%），而Au（1 g/t）和Co（0.02%）的含量增加。外带（萨亚克Ⅳ）富含Au（7.8g/t）、B（2.19%）和Co（0.12%～0.2%），以及As、Bi和Ni[7]。

3.4 成矿温度条件

早期的石榴子石矽卡岩形成于高温条件（670～600℃）下，然后是磁铁矿-绿帘石-阳起石组合（630～530℃）、钾长石-斧石组合（530～440℃）和石英-绿泥石-方解石组合（430～210℃）。金属成矿作用发生在矽卡岩形成之后。主要矿石矿物的沉淀发生在高温（590～350℃）下。在花岗岩类斑岩型铜矿床中，普遍发育葡萄石-绿帘石-钾长石碱性硅酸盐蚀变，含有黄铜矿和辉钼矿，形成于深处640～400℃温度条件下，并在500～370℃温度范围内发生水解石英-绢云母蚀变。矿石矿物和硅酸盐蚀变组合均发生在具有相似的水、CO_2浓度和

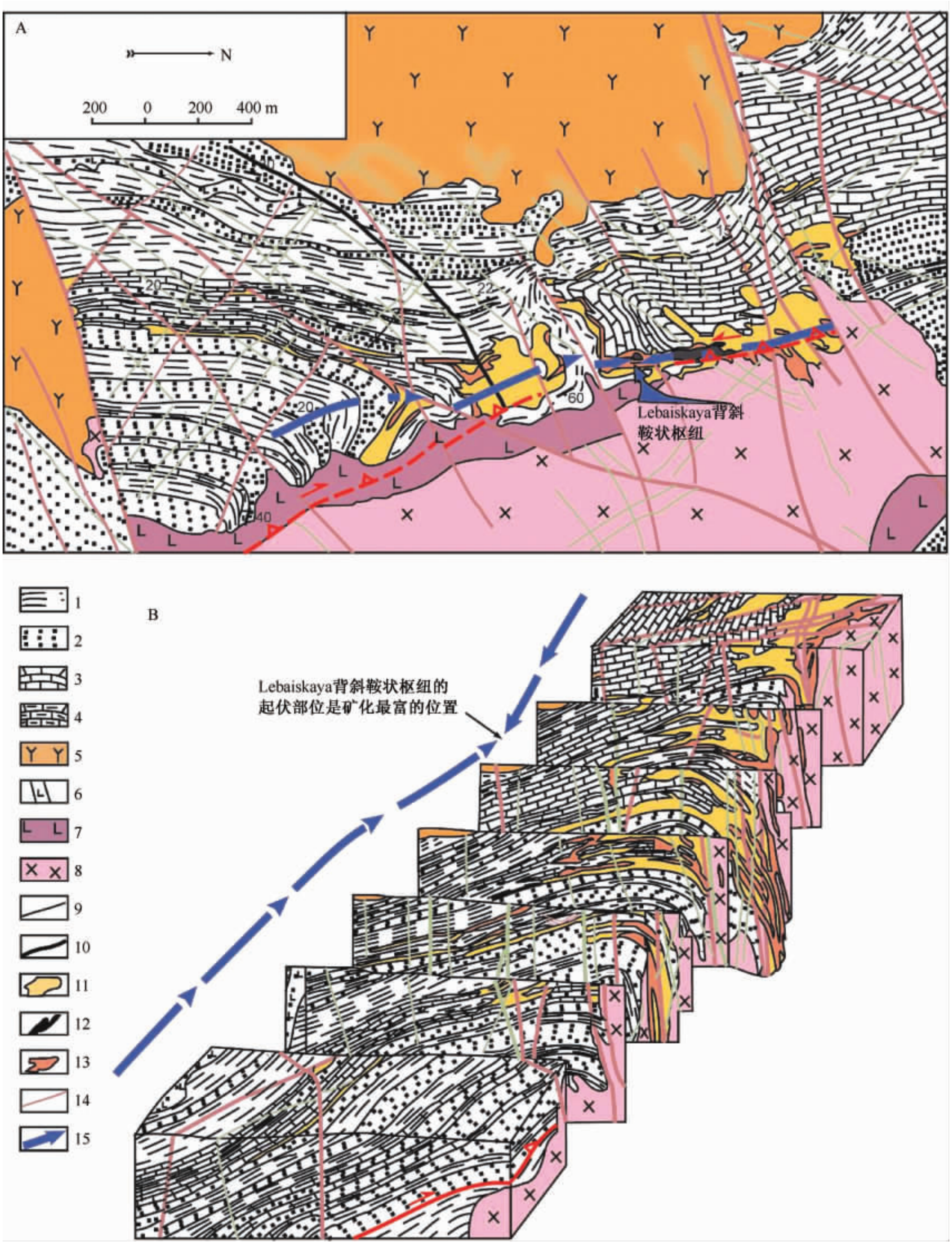

图 3　萨亚克矿田矿床分布与 Lebaiskaya 背斜鞍状枢纽的关系（A–平面图，B–联立剖面）（据文献[7]并有所修改）

Fig. 3　Relationship of the Sayak deposit to saddle-shaped hingle of the Lebaiskaya anticline (A–plan, B–block diagram) (modified after[7])

1–4. Tastykudukskaya 组（C_2ts）凝灰质碳酸盐岩陆源沉积物：1. 凝灰质粉砂岩；2. 复矿碎屑岩砂岩；3. 灰岩；4. 钙质砂岩（a）和凝灰质粉砂岩（b）；5. Ushmalinskaya 组安山质和安山玄武质斑岩；6. 次火山闪长玢岩和辉绿岩；7. 闪长岩和石英闪长岩；8. 花岗闪长岩；9–10. 岩墙：9. 闪长玢岩和辉绿岩岩墙；10. 斜长花岗斑岩；11. 石榴子石矽卡岩；12–13. 矿石：12. Au-Cu-磁铁矿；13. Au-Mo-Cu；14. 断裂和裂隙；15. Lebaiskaya 背斜鞍状枢纽和投影方向

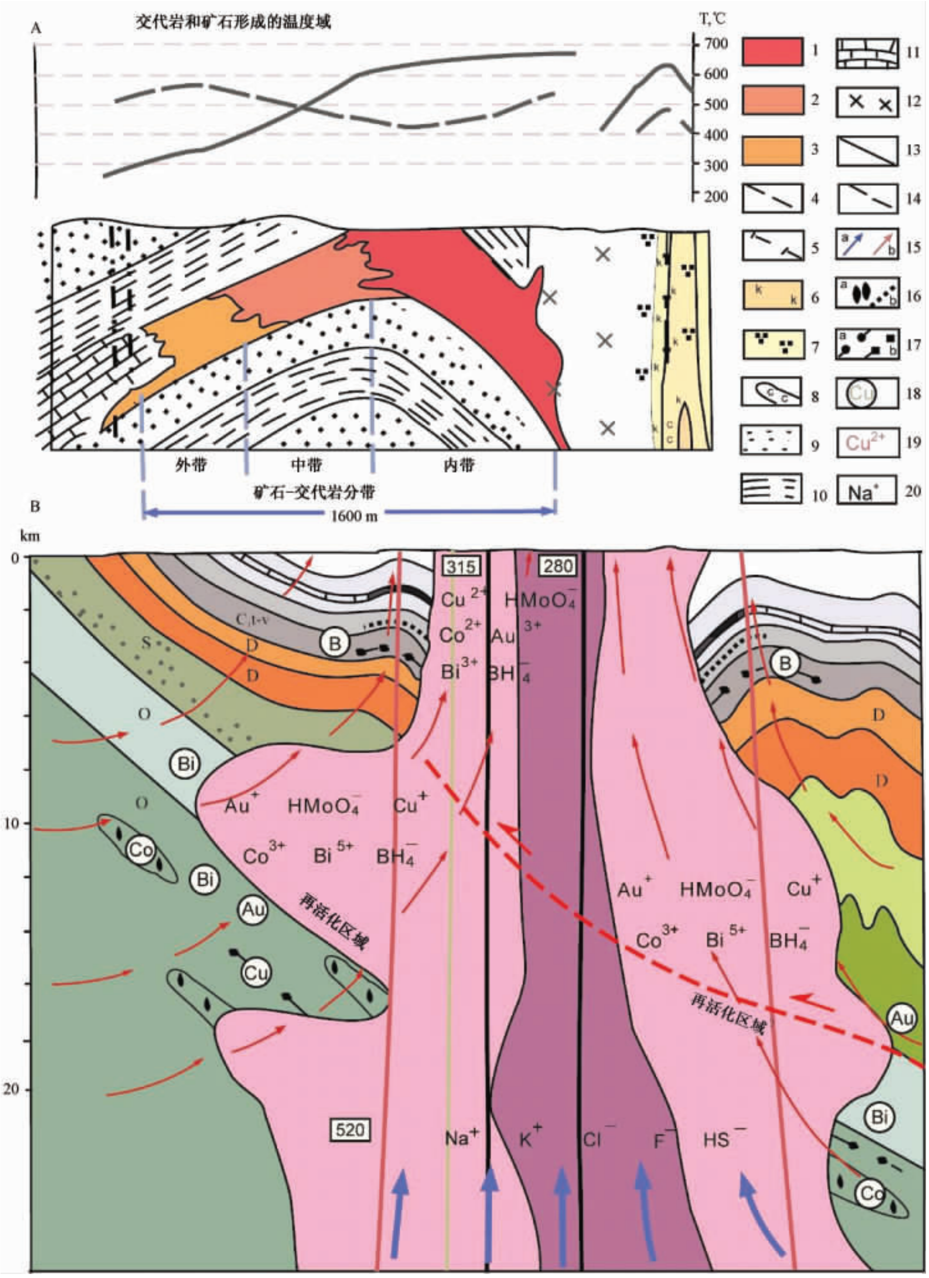

图 4 萨亚克矿田矿石交代分带（A）和矿床成因模式（B）
（据文献[7]并有所修改）

Fig. 4 Ore-metasomatic zoning (A) and formation model of the Sayak deposits (B) (modified after[7])

1-8. 侵入岩外接触带（1-4，矽卡岩型）和花岗岩类内部（5-8，斑岩型铜矿）的矿石交代分带现象：1. 石榴子石-金-脆硫铜铋矿-辉钼矿-斑铜矿-黄铜矿；2. 绿帘石-阳起石-Au-Bi-黄铜矿-pyrrotite；3. 石英-方解石-绿泥石-斧石-硅硼钙石-含金辉砷镍矿-砷黄铁矿-辉钴矿；4. 石英-方解石-绿泥石-方铅矿-闪锌矿矿脉；5. 石英-电气石-含金辉钼矿-斑铜矿-黄铜矿矿脉；6. 石英-钾长石蚀变；7. 葡萄石-绿帘石-绿泥石蚀变；8. 石英-绢云母-黄铁矿-辉钼矿-黄铜矿矿物组合；9. 砂岩；10. 凝灰质粉砂岩；11. 灰岩；12. 花岗闪长岩、闪长岩；13-14. 各种类型热液蚀变（13）和成矿作用（14）的形成温度；15. 岩浆成因流体（a）和加热大气降水（b）的迁移路线；16-17. 含有同生成矿作用的岩石夹层和建造：Co（16a），Fe（16b），Cu（17a），B（17b）；18. 具有显著增加的成矿金属元素背景含量（$K_k = 2.5 - 40$）的岩石组合；19. 受岩浆再生作用和岩石的热液变质交代作用（红色）活化的成矿金属元素；20. 岩浆成因流体（蓝色）导入的组分。矩形内数字为 Kungisayak 和 Umit 杂岩等花岗岩类侵入体的锆石 U-Pb 年龄（Ma）。

盐度的流体之中。成矿流体的主要特征是具有较高浓度的 H_2S[7]。

流体包裹体研究表明，矽卡岩和矿石矿物具有反序温度分带。最早期最高温阶段（590 ~ 540℃）形成的辉砷镍矿-毒砂-钴矿物组合，出现在相对低温（430 ~ 210℃）的外带石英-方解石-绿泥石岩石中。中温（540 ~ 470℃）硫铜铋矿-黄铜矿-磁黄铁矿矿物组合，主要出现在中带绿帘石-阳起石带内（630 ~ 440℃），而相对低温的硫铋铜矿-辉钼矿-黄铜矿成矿作用却出现在高温（670 ~ 600℃）近侧矽卡岩之中[10]。

3.5　岩浆活动与成矿时代

萨亚克大型矽卡岩型铜矿田发育的铜矿化与岩浆活动具有非常密切的关系。其中，闪长岩与铜矿化作用的关系最为密切，铜含量可高达 1% 以上；其次，花岗闪长岩与铜矿化的关系也较为密切，铜含量可达 0.2% 以上。

萨亚克地区与矽卡岩型铜矿床有关的花岗岩类侵入体中黑云母样品的 K-Ar 年龄为 304 ~ 329Ma[7,16]，锆石 U-Pb 年龄为 280 ± 5 Ma 和 315 ± 6Ma[7]。也有的作者给出与矽卡岩型铜矿床有关的花岗闪长岩年龄为 330Ma，并认为矽卡岩型铜矿床的年龄与同一岩浆弧内超大型斑岩铜矿的年龄相一致[17]。另外，昆吉萨亚克岩体中，英云闪长岩的年龄范围为 347 ~ 307Ma，斜长花岗岩的年龄为 314 ~ 310Ma；乌米特岩体花岗闪长岩的年龄为 335 ~ 304Ma[10]。继承锆石的年龄有 420 ± 5Ma 和 520Ma[7]。由此估计，萨亚克矿田铜矽卡岩的成矿时代在 347Ma 至 304Ma 之间，属于海西中晚期。

本课题组对萨亚克矿田有关侵入岩进行了锆石 SHRIMP 定年，其中，含铜达 1.06% 的主成矿期闪长岩结晶年龄为 335 ± 2Ma，局部含铜达 0.21% 的次成矿期花岗闪长岩结晶年龄为 308 ± 10Ma，反映了萨亚克矿田矽卡岩型铜成矿作用的主成矿期和次成矿期年龄分别为 335 ± 2Ma 和 308 ± 10Ma。

3.6　成矿物质来源

矿石金属元素 Cu、Au、Mo、B、Bi 等可能来源于奥陶纪 Itmurundin 组和 Kazyk 组玄武岩和细碧角斑岩建造；而 Co、Ni 等可能来源于超基性岩，在俯冲过程中重熔而进入岩浆。特别地，奥陶纪玄武岩和碧玉岩含有 Tesiktassky 型铜矿石夹层和同生富集的 Co 矿化作用，显著富集 Au、Mo、Bi、B 等（高出克拉克值 5 ~ 40 倍）。超基性岩和玄武岩-燧石建造重熔进入花岗岩类岩浆之中，导致了 Cr、Ni、Co 等高出克拉克值 10 ~ 50 倍。磁铁矿矿石中的 Fe 可能来自于萨亚克统砂岩层（含有含钛磁铁矿沉积物）。斑岩铜矿硫化物和矽卡岩硫同位素组成（$\delta^{34}S$ 平均）分别为约 4.1‰和约 3.2‰，说明元素硫来源于深部岩浆成因流体。矽卡岩矿石中重硫有小的增加，可能与沉积岩中硫通过大气降水而加入到热液系统有关[7]。根据闪长岩和花岗闪长岩中经常会含有较高的铜含量（可高达 1% 以上），推测有相当一部分铜等金属元素来源于地幔深部，与斑岩铜矿的来源类似。

萨亚克矿田富矽卡岩矿床产出在花岗岩类与围岩接触的还原条件和碱性地球化学障之中，并形成了铁矽卡岩。其中，具有与热液反应起地球化学障作用的围岩包括凝灰质粉砂岩、石英-阳起石-绿泥石蚀变和灰岩[7]。

4　矿床储量、开发现状与前景

萨亚克矽卡岩型铜矿床群铜矿保有储量约为 57.5 万吨，中萨亚克 I 矿床为 30 万吨、墨尔德拜（Moldybai）矿床为 12.5 万吨、新塔斯套（Novy Tastau）和萨亚克Ⅳ矿床为 15 万

吨。也有的资料显示，萨亚克矿田含有100万吨以上的金属铜和30多吨金[10,17]。

萨亚克矿田目前开采的露天采坑金属储量可以开采到2015年。如果低品位的铜-钼-斑岩型矿石也开始开采，则矿山寿命还可延长。保有储量主要分布于地下250～300m深处，今后只能采用地下方式开采开发。

铜是萨亚克矿田矿石的主要工业组份，其次是钼、钴和金，它们有时伴生，有时单独出现在铜矿体工业边界内、外。萨亚克矿田矽卡岩型铜矿床的铜含量比较高（1.1%～3.2%），还伴生有钼和钴（0.01%）、金（0.2～2.1 g/t）、银、铋、硒、碲及铁矿石。有些地方，钼矿石含钼达0.1%～0.2%，金钴矿石含金5～10g/t、钴0.1%～0.2%，硼酸盐（氧化硼10%～12%）矿石也具有工业意义。

5　结论

中亚成矿域巴尔喀什成矿带内以矽卡岩型铜矿床为主的萨亚克矿田，具有优越的构造位置和成矿条件，成矿作用类型多样，矿物资源丰富，是一个聚宝盆。萨亚克矿田最大的矽卡岩金属矿床赋存在鞍状背斜的顶部，位于花岗岩类侵入体接触交代晕范围内，并受断裂和褶皱构造的控制。铜-钼-金矿化构成萨亚克矿田的主要价值，主要储量集中在萨亚克Ⅰ、萨亚克Ⅲ、塔斯陶矿床中。矿化主要出现在晚期的石榴子石矽卡岩或灰岩-石榴子石矽卡岩中。萨亚克矿田主要矿床的形成时代应为海西中晚期。主要与次要成矿期年龄分别为335±2Ma和308±10Ma。萨亚克铜矿田铜保有储量约为57.5万吨。

野外工作得到新疆维吾尔自治区国家305项目办公室和哈萨克斯坦萨特巴耶夫地质科学研究所别斯帕耶夫博士、埃里诺拉·西姆拉托娃博士和西尔班·佳克巴娃等的支持与协助，在此表示感谢。

参　考　文　献

[1] 陈宣华,陈正乐，杨农. 区域成矿与矿田构造研究：构建成矿构造体系 [J]. 地质力学学报，2009，15（1）：1～15.

Chen Xuanhua，Chen Zhengle，Yang Nong. Study on regional mineralizations and ore-field structures：bring on the building of mineralizing tectonic systems [J]. Journal of Geomechanics，2009，15（1）：1～15（in Chinese with English abstract）.

[2] 何国琦，朱永峰. 中国新疆及其邻区地质矿产对比研究 [J]. 中国地质，2006，33（3）：451～460.

He Guoqi，Zhu Yongfeng. Comparative study of the geology and mineral resources in Xinjiang，China，and its adjacent regions [J]. Geology in China，2006，33（3）：451～460（in Chinese with English abstract）.

[3] 朱永峰，何国琦，安芳. 中亚成矿域核心地区地质演化与成矿规律 [J]. 地质通报，2007，26（9）：1167～1177.

Zhu Yongfeng，He Guoqi，An Fang. Geological evolution and metallogeny in the core part of the Central Asian metallogenic domain [J]. Geological Bulletin of China，2007，26（9）：1167～1177（in Chinese with English abstract）.

[4] 韩淑琴，陈宣华，杨农，等. 哈萨克斯坦科翁腊德斑岩型铜矿地质特征与成矿模式 [J]. 地质力学学报，2010，16（2）：203～212.

Han Shuqin，Chen Xuanhua，Yang Nong，Geological characteristics and metallogenic model of super-large Kounrad porphyry copper deposit，Kazakhstan [J]. Journal of Geomechanics，2010，16（2）：203～212（in Chinese with English abstract）.

[5] 王志宏，陈宣华，杨农，等. 巴尔喀什成矿带奎干-玛依布拉克斑岩型铜矿区矿床地质特征与开发前景分析 [J].

地质力学学报，2010，16 (2)：213 ~ 222.

Wang Zhihong, Chen Xuanhua, Yang Nong, et al. The geological characteristics and development prospects of deposits in Kuigan-Maibulak copper ore region in Balkhash metallogenic belt [J]. Journal of Geomechanics, 2010, 16 (2): 213 ~ 222 (in Chinese with English abstract).

[6] **刘春涌. 哈萨克斯坦萨亚克大型矽卡岩型铜矿床** [J]. **中亚信息**，2005，(11)：20 ~ 22.

Liu Chunyong. Sayak large skarn copper deposit in Kazakhstan [J]. Central Asian Information, 2005, (11): 20 ~ 22 (in Chinese).

[7] Bespaev Kh A, Miroshnichenko L A. Atlas of Mineral Deposit Models. Almaty, Kazakhstan: K. I. Satpaev Institute of Geological Sciences, 2004, 1 ~ 141.

[8] **李光明，秦克章，李金祥. 哈萨克斯坦环巴尔喀什斑岩铜矿地质与成矿背景研究** [J]. **岩石学报**，2008，24 (12)：2679 ~ 2700.

Li Guangming, Qin Kezhang, Li Jinxiang. Geological features and tectonic setting of porphyry copper deposits rounding the Balkhash region, Central Kazakhstan, Central Asia [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24 (12): 2679 ~ 2700 (in Chinese with English abstract).

[9] Kröner A, Hegner E, Lehmann B, et al. Palaeozoic arc magmatism in the Central Asian Orogenic Belt of Kazakhstan: SHRIMP zircon ages and whole-rock Nd isotopic systematics. Journal of Asian Earth Sciences, 2008, 32: 118 ~ 130.

[10] Kudryavtsev Yu K. The Cu-Mo deposits of Central Kazakhstan. In: Shatov, Seltmann, Kremenetsky, Lehmann, Popov and Ermolov. Eds. Granite-Related Ore Deposits of Central Kazakhstan and Adjacent Areas. INTAS-93-1783 Project, St. Petersburg, 1996, 119 ~ 145.

[11] Abdulin A A, Bespaev H A, Daukeev C Zh, et al. Copper deposits of Kazakhstan, reference book. Almaty, Kazakhstan: Ministry of Ecology and Natural Resources of the Republic of Kazakhstan, 1998, 1 ~ 136.

[12] Miroshnichenko L A, Rusanov B I. The dikes of the Sayak basin, central Kazakhstan. Sovetskaya Geologiya, 1967, 2: 98 ~ 110.

[13] Miroshnichenko L A, Il'yushchenko N P. Pervichnyye oreoly kak indikatory mednogo orudeneniya v skarnakh. Geologiya Rudnykh Mestorozhdeniy, 1967, 9 (1): 66 ~ 73.

[14] Rusakov M P, Burdukov G P. Rudnyi titanomagnetitovyi gorizont v nizhnekarbonovoi osadochnoi tolshche Sayakskoi muldy v severo-vostochnom Pribalkhashe, Akad. Nauk Kazakh. SSR, Izv., s. Geol., 1957, 26 (1): 46 ~ 55.

[15] Yakubchuk A. Architecture and mineral deposit settings of the Altaid orogenic collage: a revised model. Journal of Asian Earth Sciences, 2004, 23: 761 ~ 779.

[16] Monich V K, Ivanov A I, Kulkashev N T. Problem of the age of the intrusive rocks of the Sayak region. Akad. Nauk SSSR, Kom. Opred. Absol. Vozrasta Geol. Form., Tr., 1966, 13: 245 ~ 248.

[17] Seltmann R, Porter T M. The porphyry Cu-Au/Mo deposits of Central Eurasia: 1. Tectonic, geologic and metallogenic setting and significant deposits. In: Porter T M. Ed. Super Porphyry Copper and Gold Deposits: A Global Perspective. v2. PGC Publishing, Adelaide, 2005, 467 ~ 512.

GEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF AND METALLOGENIC MODEL FOR LARGE-SCALE SAYAK COPPER ORE FIELD IN BALKHASH METALLOGENIC BELT, CENTRAL ASIA

CHEN Xuan-hua[1,2], WANG Zhi-hong[2], YANG Nong[1,2],
CHEN Zheng-le[1,2], HAN Shu-qin[2]

(1. *Key Laboratory of Neotectonic Movement & Geohazard, Ministry of Land and Resources, Beijijng* 100081, *China*;
2. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijijng* 100081, *China*)

Abstract: The Sayak ore field is the only area with the occurrence of large-scale skarn-type copper deposit in Balkhash metallogenic belt, Kazakhstan, Central Asia. In this paper the geological characteristics, ore-field structures and metallogenic model of Sayak ore field are described in detail. Sayak ore field is located in the Sayak graben-synclinorium, including several spatially isolated skarn copper deposits, porphyry Cu (Mo) deposits, Cu-Mo veins and a series quartz vein deposits, which consist of a metallogenic series with skarn-type and porphyry deposits as the two end deposits. The deposits in the ore-field are mainly located in the contact zone between the Middle Carboniferous limestones and the Late Carboniferous granitoids, with a special assemblage of skarn-type Cu-Au-Mo mineralizations. The metallogenic time of main copper deposits in Sayak ore-field is in the Middle to Late Hercynian, with the main and secondary metallogenic ages of 335 ± 2 Ma and 308 ± 10Ma, respectively. The ore bodies are mainly located in the saddle-top segments of locally developed anticlines in the graben-synclinorium, strongly controlled by the tectono-magmatism activities. The most relative granitoids with the copper metallogenesis in Sayak ore field are diorite with Cu content up to > 1% and granodiorite up to > 0.2%. The copper reserve in the Sayak ore field is estimated to be ~575 kt Cu.

Key words: ore deposit geology; tectonic-magmatic activity; metallogenic model; Sayak ore field; Balkhash metallogenic belt