

文章编号:0258-7106(2002)03-0213-10

驼路沟喷气沉积型钴(金)矿床的地质-地球化学*

张德全¹ 王彦² 丰成友¹ 李大新¹ 阎升好¹ 崔艳合¹

(1 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2 青海地质调查院, 青海 西宁 810001)

摘 要 驼路沟矿床是容矿于震旦—寒武纪富钠火山-沉积岩系中的钴(金)矿床。矿床地质-地球化学特征、矿体的产态、矿石结构构造以及金属矿物的标型表明,驼路沟钴(金)矿床主要与震旦—寒武纪海底喷气沉积成矿作用有关,在加里东和晚华力西—印支碰撞造山过程中,喷气沉积型矿体被构造改造,并导致金在局部地段进一步富集。元素地球化学研究揭示, Au、As、Pb、Cu、Zn、Mo、Co 是圈定含矿层的化探异常元素组合,而 Co-Ni-Au-Pb-Mo-As 组合异常可以指示矿体。建议在矿床勘查的初期注意可能出现于喷气沉积成矿中心附近的铜钴矿。

关键词 钴矿床 喷气沉积矿床 驼路沟 东昆仑

中图分类号: P618.62; P618.51

文献标识码: A

钴通常作为伴生矿种产于岩浆矿床(容矿于镁铁-超镁铁岩中)、夕卡岩矿床、块状硫化物矿床和喷气沉积矿床中,独立的钴矿床极其少见。随着对金属钴需求的增加,独立钴矿的勘查正受到广泛的关注。近年来,我国已在吉林的大横路、江西的五宝山等地相继发现了独立钴矿(万丛礼等,1999;傅大捷,1997)。元古宙是世界上含钴矿床的最重要成矿时代,如扎伊尔和赞比亚的铜(钴)矿带,美国西北部的爱达荷钴矿带(Annels et al., 1984; Fleischer, 1984),中国华北地台北缘的大横路及南缘的中条山(孙海田等, 1990; 万丛礼等,1999),扬子地台西南缘的东川、易门、拉拉厂等(薛步高等,1996)。上述含钴矿床大多数与海底喷气沉积成矿作用有关。

东昆仑地区是我国重要的钴矿资源远景区,其东侧有著名的德尔尼铜钴矿床,近几年在其西段和中段又相继发现了肯德可克和驼路沟钴矿(王玉往等,1997;徐勇等,1999;李厚民等,2000)。驼路沟钴(金)矿床是容矿于震旦—寒武纪火山-沉积岩中的喷气沉积型钴(金)矿床,目前的勘查工作主要限于地表,已控制的钴资源量已达中型矿床规模。该矿床位于东昆仑南造山带的中段,该造山带是在元古宙结晶基底上形成的,主要经历了加里东和晚华力西—印支期的复合造山作用(徐文艺等,2001;张德全等,2001),其早古生代裂解包括震旦—寒武纪和

奥陶纪两个旋回,驼路沟钴(金)矿床的海底喷气沉积成矿作用形成于震旦—寒武纪裂陷海盆中。

1 含矿岩系

1.1 层序

驼路沟矿区范围内未见侵入体,含矿岩系是一套浅变质的(绿片岩相)火山-沉积岩系。笔者沿龙泉沟实测了一条地质-地球化学剖面(图1、图2),确定本矿区内含矿岩系由4个岩段、15个岩性层组成(图2中,第7和第10岩性层是同一层),自下而上分别为:

变碳硅泥岩(黑色页岩)段(Z-E^a):于矿区中部的九七沟一带的复背斜核部作东西向展布(图1),出露宽200~700 m,由灰黑色含碳菱铁绢云石英片岩或千枚岩、斑点状绢云石英千枚岩夹灰岩和硅质岩透镜体组成(图2)。灰黑色含碳菱铁绢云石英片岩或千枚岩与斑点状绢云石英千枚岩除岩石构造上略有差别之外,其矿物组合大致相同,为石英+绢云母+碳酸盐矿物(菱铁矿、铁白云石、方解石)+钠长石+炭质或石墨+电气石。斑点常由具筛状结构的菱铁矿或炭质组成。岩石中含碳1%~4%(镜下目估,下同),碳酸盐3%~10%,钠长石1%~10%,电气石1%左右,石英20%~50%及绢云母55%~

* 本文系国土资源部“九五”科技发展计划项目(95-02-005)和国家地质调查项目(K1.1.3.1及200110000001)的部分成果

第一作者简介 张德全,男,1946年生,研究员,博士生导师,长期从事矿产勘查及矿床学研究。

收稿日期 2001-08-15; 改回日期 2002-02-20。张绮玲编辑。

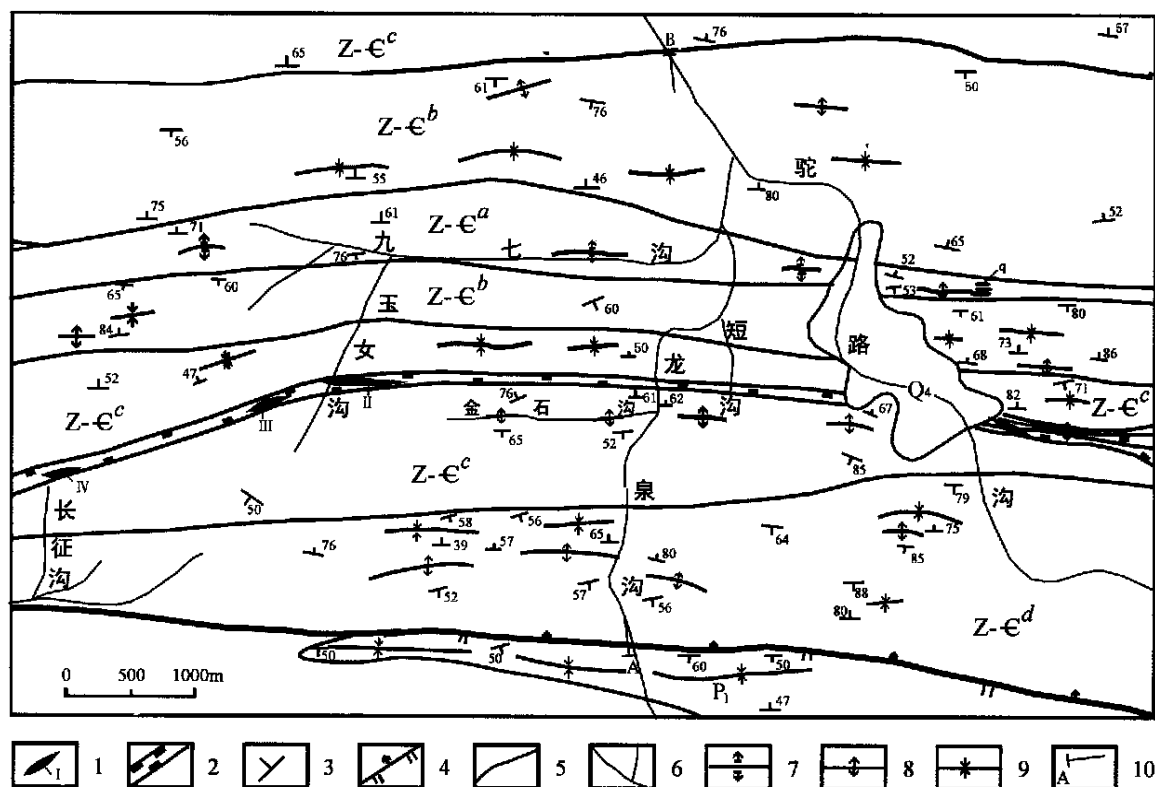


图1 驼路沟矿区地质略图

(据青海省柴达木综合地质大队资料修编)

1—Co(Au)矿体及编号; 2—钴(金)矿化层; 3—岩层产状; 4—逆断层; 5—地质界线; 6—水系; 7—复式背斜; 8—背斜轴线; 9—向斜轴线; 10—实测剖面起始位置。Q₄—第四系松散堆积物; P₁—大理岩; Z-ε^d—变砂岩段; Z-ε^c—变火山-沉积岩段; Z-ε^b—变凝灰岩-砂岩段; Z-ε^a—变碳硅泥岩段; q—石英脉

Fig. 1 Simplified geologic map of the Tuolugou Co (Au) ore district

1—Cobalt (gold) orebody and its serial number; 2—Cobalt (gold) mineralizing bed; 3—Attitude; 4—Reversed fault; 5—Geological boundary; 6—Drainage; 7—Anticlinorium; 8—Anticlinal axis; 9—Synclinal axis; 10—Location of the measured geological section. Q₄—Alluvium; P₁—Marble; Z-ε^d—Meta morphosed sandstone; Z-ε^c—Meta morphosed volcanic-sedimentary rocks; Z-ε^b—Meta morphosed tuff and sandstone; Z-ε^a—Meta morphosed carbargillite; q—Quartz vein

20%。它们是一套浅变质的碳硅泥岩(黑色页岩)。

变凝灰岩-砂岩段(Z-ε^b):呈东西向展布于九七沟复背斜的两翼(图1),由绢云石英千枚状板岩、黄铁矿化含砾千枚状粉砂质板岩、灰绿色绿泥绢云石英千枚岩夹钙质板岩、含碳菱铁绢云石英千枚岩组成(图2)。在镜下偶见板岩中的变余粉砂质结构,显示前两者的原岩为泥质粉砂岩。野外剖面上,尚可见到其粒序上的韵律:泥→粉砂→砂→含砾;镜下发现石英+绢云母是主要的矿物,且含钠长石(20%左右)、碳酸盐矿物(0~10%)及电气石(1%左右)。灰绿色绿泥绢云石英千枚岩也是本岩段中的主要岩石,具典型的鳞片粒状变晶结构、千枚状构造,矿物

组合为:石英+绢云母+绿泥石+钠长石+碳酸盐+电气石±炭质。岩石含绿泥石5%~20%,钠长石变化于2%~8%,电气石1%左右,偶见含炭质,但个别岩石中含碳高达20%。个别薄片见钠长石或石英呈变余晶屑。该岩石的原岩应为凝灰岩。

变火山-沉积岩段(Z-ε^c):主要出露于矿区中部、呈东西向展布于九七沟复背斜的翼部,因褶皱而重复出露,导致宽大于1km(图1),是驼路沟矿床钴(金)的含矿层,由绿泥绢云千枚岩(原岩为中酸性凝灰岩)绢云石英片岩(原岩为粉砂岩,强烈变形)组成(图2),夹变质的碳硅泥岩(含碳菱铁绢云石英千枚岩)和喷气沉积岩(石英钠长岩)。

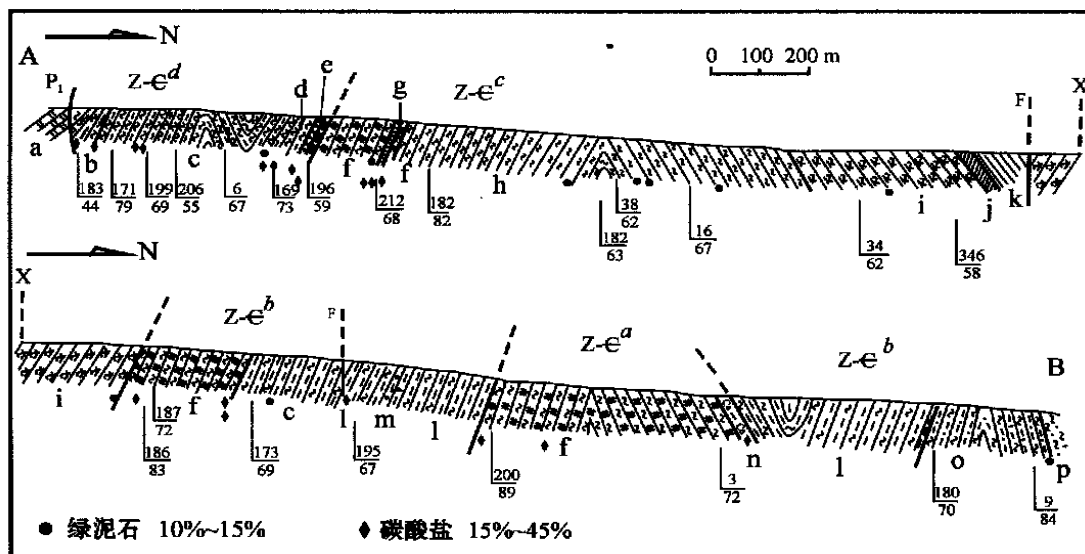


图2 驼路沟矿区实测剖面图(剖面位置参见图1)

a—大理岩; b—绿泥碳酸盐千枚岩; c—碳酸盐绢云石英千枚岩夹绿泥碳酸盐石英片岩; d—碳酸盐化变角斑岩; e—碳酸盐石英片岩; f—含碳菱铁绢云石英片岩/千枚岩; g—钴(金)矿化层; h—绿泥绢云千枚岩; i—绿泥碳酸盐绢云石英片岩; j—糜棱岩化钴(金)矿化层; k—强糜棱岩化绢云石英片岩夹石英钠长岩; l—碳酸盐绢云石英千枚状板岩; m—黄铁矿化含砾千枚状粉砂质板岩; n—钙质板岩; o—含碳酸盐千枚状砂质板岩; p—砂质绢云绿泥千枚状片岩

Fig. 2 Measured geological section in the Tuolugou ore district

a—Marble; b—Chlorite-carbonate phyllite; c—Carbonate-sericite-quartz phyllite interbedded with chlorite-carbonate-quartz schist; d—Metamorphosed keratophyre; e—Carbonate-quartz schist; f—Carbonaceous siderite-sericite-quartz schist; g—Co(Au) mineralizing bed; h—Chlorite-sericite phyllite; i—Chlorite-carbonate-sericite-quartz schist; j—Mylonitized Co(Au) mineralizing bed; k—Mylonitized sericite-quartz schist interbedded with quartz albitite (exhalite); l—Carbonate-sericite-quartz phyllite; m—Pyritized pebbly sandstone; n—Calcareous slate; o—Carbonate-bearing sandy slate; p—Sericite-quartz schist

变砂岩段($Z-e^d$): 出露于矿区南部, 出露宽大于1 km(图1)。主要由绢云石英片岩或千枚岩、绿泥碳酸盐千枚岩构成, 其底部见一薄层变角斑岩或石英角斑岩(图2)。镜下偶见千枚岩或片岩呈变余砂-粉砂质结构, 显示其原岩为砂岩、粉砂岩或凝灰质砂岩。变角斑岩具鳞片粒状变晶结构, 其变余斑状结构和变余流动构造在镜下尚清晰, 斑晶由钠长石、石英组成, 绢云母呈细鳞片状带状分布, 碳酸盐矿物呈它形粒状或细网脉状穿插岩石。其矿物组合为石英+绢云母+碳酸盐矿物+钠长石+磁铁矿±炭质。显然, 碳酸盐矿物和炭质是变质产物。

该岩段之上为一套厚的碳酸盐岩(大理岩), 两者之间呈断层接触。前人(1:20万区调及矿区普查资料)将含矿岩系及其上的大理岩全部划入下二叠统, 主要是依据大理岩层中的化石, 而在第1至第4岩段中并未发现化石。根据已获得的 $Z-e^c$ 岩段中喷气沉积岩(石英钠长岩)的锆石 U-Pb 年龄(570 Ma, 谐和曲线年龄, 另文发表)及初步的区域地层对比,

认为第1至第4岩段可能属震旦—寒武系, 其上的大理岩仍属下二叠统, 它们之间应以断裂划界。

1.2 主岩

有3种岩石类型: 一是绢云石英片岩或千枚岩; 二是绿泥绢云石英片岩或千枚岩; 三是石英钠长岩。它们均产于第3岩段($Z-e^c$)中, 且常呈互层, 尤其在矿化层中的互层构造最明显, 一般常由绢云石英千枚岩或片岩(厚1 cm左右)—石英钠长岩或片岩(厚1~5 mm)—绿泥绢云石英千枚岩或片岩(厚1 cm左右)构成多个重复的韵律出现在矿化层中, 这3种岩石均含矿。

绢云石英片岩或千枚岩的矿物组合为: 石英+绢云母+碳酸盐矿物(±绿泥石±钠长石±碳酸盐矿物)+电气石+磁铁矿+炭质(痕量), 镜下偶见变余砂状结构。绿泥绢云石英片岩或千枚岩的矿物组合是石英+绿泥石+绢云母+钠长石+磁铁矿+电气石, 镜下偶见变余砂状结构或变余凝灰质结构, 后者是中-酸性凝灰岩的浅变质产物。石英钠长岩常

见的矿物组合为:石英+钠长石+碳酸盐矿物+绢云母+磁铁矿+电气石,其中石英和钠长石共生,并构成典型的粒状变晶结构,偶见方解石细-网脉穿插岩石,其应属被变质的喷气沉积岩(钠长硅质岩)。

驼路沟钴(金)矿床的主岩是一套含热液沉积岩和少量凝灰岩的泥质粉砂岩。

1.3 喷气沉积岩(热液沉积岩)

喷气沉积岩(热液沉积岩)是喷气沉积型矿床的重要鉴别标志之一,了解这类岩石的特征和成因对于认识本矿床的成矿作用十分重要。石英钠长岩是驼路沟矿区最常见的一种变质喷气沉积岩,其常与矿体相伴(也是矿石的直接围岩之一),是本矿床的找矿标志之一。

驼路沟矿区中的石英钠长岩呈层状、似层状、透镜状产于第3岩段(Z₃E₃)中,规模大者仅有一层,层厚数米至十几米、长数十米至数百米,较稳定地产于距钴(金)矿体80 m之外的地层中;规模小者有多层,长数米、厚数厘米,但最常见者仅厚数毫米,与绢云石英千枚岩和绿泥绢云石英千枚岩构成纹层,并形成多个重复的韵律,出现在钴(金)矿体两侧0~30 m范围内。有的微层只有在显微镜下才能分辨得出来。无论规模大小,它们都与围岩整合产出,且大多数与千枚岩或片岩一起被揉皱。较厚的石英钠长岩作为夹于较软的千枚岩中之坚硬岩石,在受到后期构造作用影响时,显示出两者不协调现象,甚至在岩性界面上形成断层,其在走向上则因构造作用而变成断续分布的石英香肠或透镜体。因构造变形导致石英钠长岩与围岩之间的这种不协调,容易将石英钠长岩误认为“脉岩”(李厚民等,2001)。

岩石外观呈淡肉红色—黄褐色,块状或条纹条带状构造,主要由石英(30%~55%)、钠长石(45%~20%)、碳酸盐矿物(25%~10%,包括铁白云石、菱铁矿、方解石)组成,少量绢云母、绿泥石定向排列或呈条带状分布。副矿物有电气石、磷灰石、锆石等,以电气石最普遍,含量1%~2%。并出现含量不等的黄铁矿(多已氧化成褐铁矿)。岩石中普遍出现钠长石和石英碎屑(含量5%~35%),多属粉砂级(粒径小于0.1 mm),个别细砂级(>0.1 mm)。碎屑外形多呈浑圆状,以石英碎屑为主,长石碎屑次之,它们可能是正常沉积的碎屑。

变晶石英和钠长石广泛见于薄片,它们以他形粒状变晶结构区别于碎屑石英和钠长石,有时拉长定向排列,在标本中大致可见3组粒级:①<0.03

mm粒级,常含有较多杂质,如绢云母、炭质等,因而显混浊。在岩石中常呈弧岛状分布,形成最早,系由硅酸盐胶体重结晶,后经变形形成如今的结构;②0.03~0.2 mm粒级,典型粒状变晶结构,并略有拉长定向排列,常比较干净透明,与其共生的绢云母有时变成白云母,常伴有铁白云石或菱铁矿,是前一期石英和钠长石变质重结晶的产物;③>0.2 mm粒级,呈团块状、脉状,有时还呈梳状构造,与粗晶方解石共生,见波状消光,是变质-变形后期热液改造的产物,与地层中偶见的石英或方解石脉成因相似。无论是碎屑长石还是变晶长石,都是非常纯净的钠长石,电子探针分析表明它们的 $w(\text{CaO})$ 0%, $w(\text{K}_2\text{O})$ 0~0.3%, $w(\text{Na}_2\text{O})$ 10.23%~11.78%。

电气石常呈短柱状星散于岩石中,电子探针分析表明它是富Mg的种属[$w(\text{MgO})$ 8.82%, $w(\text{FeO})$ 5.61%, $w(\text{MnO})$ 0.07%]。

上述特征表明,这些石英钠长岩是富钠的硅质岩之变质产物,是典型的喷气沉积岩。

2 变质及构造变形

驼路沟矿区含矿岩系中的所有岩石均经受了绿片岩相变质作用,这是加里东和晚华力西—印支造山作用的结果(张德全等,2001;徐文艺等,2001)。其常见的变质矿物组合为:石英+绢云母±绿泥石±碳酸盐矿物(原岩为砂泥质沉积岩)、石英+绿泥石+绢云母+钠长石(原岩为中酸性火山岩)和钠长石+石英+碳酸盐矿物+绢云母(原岩为喷气沉积岩)。岩石多呈粒状变晶结构(石英及钠长石)及鳞片变晶结构(多由绢云母和绿泥石构成)。它们是3类不同原岩在绿片岩相条件下的变质产物。

驼路沟矿床的构造主要为褶皱和断裂。在矿区范围内,由4个岩段构成了一个轴向近EW的紧闭复式背斜(图1、图2)。第1岩段的黑色岩系(变碳硅泥岩)是这一复式背斜的轴部岩石,在龙泉沟的东侧出露完好。其它岩段对称地出现于其翼部。而在其翼部地层中,尚发育一系列的次级褶皱。在不少冲沟(如龙泉沟、短沟、玉女沟等)中,均可观测到由变质条带构成的小褶皱,从而表明区域变质作用与褶皱变形基本是同步的。而且,很多小褶曲本身就是由面理(S_1)所构成的。

矿区内主要发育两类断裂:其一是与地层走向或褶皱轴向近于平行的(近EW向)逆冲断裂,它们

一般走向延长大、陡倾斜,可能是在褶皱基础上、沿褶皱轴部或两翼层间滑移形成的;其二是短小的切层断裂,一般具有右行滑移特点。

另外,该矿区内常发育较强烈的塑性变形构造。在短沟一带的含矿层中,出露宽 > 200 m、近 EW 向的韧性剪切带,带内片理变形,发育 S-C 面理、糜棱岩、拉伸线理、石香肠以及鞘褶皱,这里的钴(金)矿体亦被强烈变形。

需要特别指出的是,上述变质和变形作用明显地改造了本矿床的钴矿体。这种改造作用不仅表现在矿石强烈地发育变形构造(参见后述),而且也表现在矿体被挤压变形呈透镜体,受倾伏褶皱控制的矿体在空间上常向特定的方向倾斜延长,被断裂破坏的矿体常在走向上或倾向上不连续,矿化层被褶皱重复出现等等。因此,在今后的勘查中,必须加强对成矿后构造的研究,以提高探矿工程的命中率,减少盲目性。

3 矿体

3.1 矿化层

由蚀变和矿化的绢云石英片岩(或千枚岩)、绿泥绢云石英片岩(或千枚岩)、石英钠长岩以及钴(金)矿石构成的矿化层宽 1 ~ 50 m,呈近 EW 向顺层展布于第 3 岩段中。其地表西起长征沟,向东一直延伸至驼路沟以东,已控制的长度大于 7 km。根据地表矿化质量的评价结果,目前已发现的 15 个矿体主要集中在短沟、玉女沟、长征沟 3 个矿段(图 1)。

近矿围岩蚀变主要是硅化、钠长石化、黄铁矿化、碳酸盐化和绢云母化,远矿围岩蚀变为青磐岩化。金的富集与硅化有关,在石英细脉中发现有自然金。黄铁矿化表现为黄铁矿稀疏浸染状分布在围岩中,其强度与 Co 的含量呈正消长关系,强黄铁矿化的岩石即矿石。因此,矿体与围岩间为渐变关系,两者的界线需靠化学分析才能圈定。由于成矿后的区域变质作用,在一般情况下,想要严格区别热液蚀变矿物组合和区域变质矿物组合,是比较困难的。

3.2 矿体及矿石

钴(金)矿体呈似层状和透镜状体,产于矿化层中(图 3)。地表发育黄钾铁矾、钴华和褐铁矿。单个矿体一般长 100 ~ 1 000 m,平均厚 0.86 ~ 4.45 m,平均品位 w_{Co} 0.024 % ~ 0.108 %、 w_{Au} 0.3 g/t ~ 0.78 g/t,局部 w_{Au} 大于 1 g/t。矿体倾向 NNE(亦有

SSW),倾角陡立(70 ~ 86°)。空间上,透镜状钴(金)矿体在矿化层中呈斜列式展布。在短沟一带的矿体,产于面理褶皱的轴部(图 3),以 28 ~ 35°左右的角度向东深部侧伏,该侧伏方向及侧伏角,与矿体旁侧层间滑动面上擦沟的倾伏方向和倾伏角基本一致(图 3 之插图 2)。

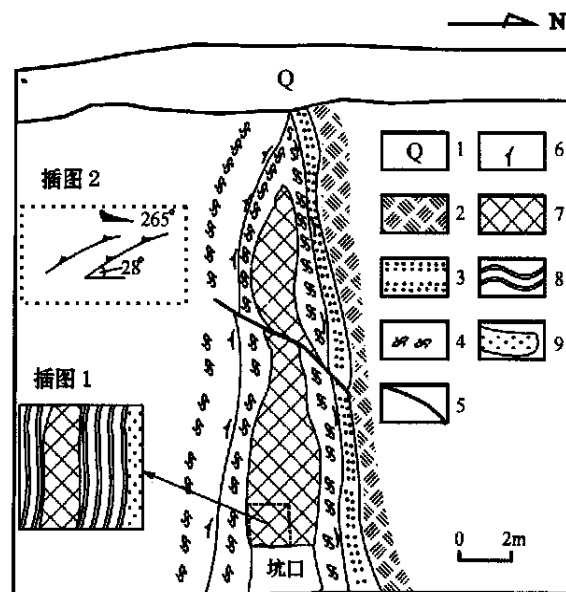


图 3 驼路沟矿区 YMI 坑口矿体露头素描图

1—浮土;2—绢云石英片岩;3—石英钠长片岩;4—绿泥绢云石英片岩;5—后期断裂;6—面理产状;7—钴(金)矿体,块状矿石(仅适用于插图 1);8—纹层状矿石(仅适用于插图 1);9—浸染状矿石(仅适用于插图 1)

插图 1: 位于坑口上方虚线圈定的位置,表示不同构造的矿石在矿体中的分布;插图 2: 位于坑内之南壁,表示矿体南盘界面上的断层擦沟向东倾伏,倾伏角 26°

Fig. 3 Sketch of YMI pit mouth in the Tuolugou ore district

1—Alluvium; 2—Sericite-quartz schist; 3—Quartz-albite schist; 4—Chlorite-sericite-quartz schist; 5—Post-mineralization fault; 6—Attitude of foliation; 7—Co(Au) orebody, Massive ore (only suitable for inset 1); 8—Laminated ore (only suitable for inset 1); 9—Disseminated ore (only suitable for inset 1)

根据构造,可将矿石分为浸染状矿石、条带状矿石和块状矿石 3 种类型。石英、钠长石、碳酸盐、绢云母和绿泥石是常见的脉石矿物,其含量变化则取决于主岩的类型和矿石矿物的变化。矿石的主要金属矿物为黄铁矿(> 30 %),其中,浸染状矿石、条带状矿石和块状矿石分别含黄铁矿 30 %、30 % ~ 50 % 和 80 % 左右。此外,还有少量毒砂、黄铜矿、闪锌矿、磁黄铁矿、斑铜矿、痕量钴镍黄铁矿、含钴黄铁

矿、硫钴矿、硫铜钴矿、自然金、自然铜、自然锡(表 1)、方硫镍钴矿(李厚民等, 2001)等。矿石中独立的钴矿物(包括钴镍黄铁矿、硫钴矿、硫铜钴矿、方硫镍钴矿等)含量甚微, 反光镜下观测及电子探针测定显示, 矿石中的钴主要赋存于黄铁矿中。对各类矿石中黄铁矿的电子探针能谱扫描发现, Co 含量 0.06% ~ 2.73%, 且他形细粒状黄铁矿(喷气沉积期形成的)含 Co 明显高于重结晶的自形粗晶黄铁矿(变质期, 参见后述), 显示独立的钴矿物可能析出于变质重结晶过程。

最常见的矿石构造为条带状-层纹状构造、浸染状构造和块状构造。矿石发育典型的同生沉积构造, 如条带状-层纹状构造(即条带状矿石), 偶见同生角砾状构造。矿石主要呈碎裂结构、包含结构、穿切交代结构、他形粒状结构。黄铁矿至少有 2 个世代。早世代的黄铁矿呈他形、粒径较细、常发育碎裂现象, 微裂隙中不但被石英和方解石充填而且偶见自然金充填。有时镜下还可观察到黄铁矿被定向拉长或呈纺锤形变晶。晚世代的黄铁矿在矿石中含量较少, 多呈半自形-自形粒状, 粒径较粗, 碎裂结构不发育。电子探针分析早世代黄铁矿含 Co、Ni 较高(4 件样品的平均值为 w_{Co} 2.44%, w_{Ni} 0.49%), Au 低(4 件样品的平均含 w_{Au} 0.01%)。钴镍黄铁矿(反光镜下显黄白带绿的色调)则呈薄边镶于含钴黄铁矿的外缘或呈不规则状分布于含钴黄铁矿的粒间; 晚世代黄铁矿含 Co、Ni 低, Au 高(3 件样品平均 w_{Co} 0.1%, w_{Ni} 0.1%, w_{Au} 0.14%)。上述现象表

明, 早世代黄铁矿是区域变形-变质作用之前(喷气沉积成矿期)的产物, 钴镍黄铁矿是含钴黄铁矿出溶的产物, 少部分黄铁矿(指晚世代者)与变形-变质过程有关; 钴主要形成于喷气沉积成矿作用, 而自然金应属于后生成因(可能与造山过程中的构造作用有关)。

矿石 w_{Co} 0.02% ~ 0.2%、 w_{Ag} 0.1 g/t ~ 3.7 g/t, 尚伴生 Ni、Pb, 其它组分含量很低(表 2)。

4 含矿岩系的地层地球化学

在沿龙泉沟穿切含矿岩系的地质-地球化学剖面上大致等间距地采集岩石样品 73 件(无露头地段间距放大)。含矿岩系各岩段 19 种元素的平均(算术平均)值列于表 2。19 种元素的相关矩阵见表 3。

总体而言, 驼路沟矿床含矿岩系有较高的成矿元素和成矿指示元素含量。与地壳克拉克值相比, 4 个岩段全部都富集(即高于克拉克值)的元素有 Au、As、Sb、Bi、Hg、Ni、W、Cr、V、B、Ag、Pb、Mo 和 Co。第 3 岩段(本矿床的含矿岩段)的大多数组分在 4 个岩段中都是最高的(表 2), 尤其是 Au、As、Sb、Ni、Co、Ag、Pb、Cu、Zn、Mn、Mo。如果将高出全矿区平均值 5 倍的元素称为异常富集元素的话, 则含矿层(第 3 岩段)的异常富集元素为 Au、As、Pb、Cu、Zn、Mo、Co。数据表明, 成矿元素和成矿指示元素在含矿岩系的各岩段中是不均匀的, 其中以含矿层的元素含量最高、很显然, 这与该岩段频繁出现的喷气-沉积成

表 1 驼路沟矿床金属矿物电子探针分析结果 ($w_{\text{B}}/\%$)

Table 1 Microprobe analyses of ore minerals in the Tuolugou Co(Au) deposit ($w_{\text{B}}/\%$)

样号	矿物	S	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Ag	Sn	Te	Au	Pb	合计
TL-30-1	黄铁矿	53.26	46.01	0.06	0.1	0	0	0	0	0	0.02	0.13	0	99.58
TL-30-2	黄铁矿	52.84	45.17	1.09	0.2	0	0.01	0.01	0.01	0	0.02	0.03	0	99.38
TL-38-1	自然铁	0	96.71	0.1	0.21	0.47	0.06	1.16	0	0.11	0	0	0	98.82
TL-38-2	含锡自然铜	0	0.59	0.03	0.23	83.82	1.34	0.69	2.84	9.88	0	0.07	0	99.49
TL-38-4	自然锡	0	0.33	0.07	0.11	0	0.78	0	0.01	98.28	0	0	0	99.58
TL-38-5	含锡自然铜	0	0.69	0.07	0.17	83.54	0.98	0.4	2.7	10.58	0	0.02	0	99.15
TL-84-1	钴镍黄铁矿	52.08	30.76	6.32	10.01	0	0	0	0.1	0.07	0	0	0	99.34
TL-84-2	含钴黄铁矿	52.61	43.61	2.73	0.39	0	0.01	0	0	0	0.04	0	0	99.39
TL-84-4	自然金	0	0.11	0	0.13	0.08	0	0	5.95	0	0	93.14	0	99.41
TL-84-5	含钴黄铁矿	53.07	42.32	2.62	0.49	0	0	0.77	0	0.04	0	0.01	0	99.32
TL-96-1	含锌自然铜	1.88	1.26	0.13	0.1	63.87	31.13	0.09	0	0	0	0	0	98.46
TL-96-2	含锌自然铜	0	0.92	0.2	0.12	67.1	31.24	0	0	0	0	0	0	99.58

仪器型号: JEOL JXA800R 电子探针仪。测试者: 中国地质科学院矿产资源研究所余静。

表 2 驼路沟矿区各岩段化探元素平均含量 ($w_B/10^{-6}$)

Table 2 Average content of metal elements in stratigraphic sequence and ores of the Tuolugou deposit ($w_B/10^{-6}$)											
岩段	样数	Au	As	Sb	Bi	Hg	Ni	W	Cr	Ti	
Z- ϵ^a	3	0.0294	34.4	1.13	0.3	0.043	11.73	18.63	66.17	2 038.53	
Z- ϵ^b	11	0.0196	20.8	0.99	0.4	0.046	15.3	21.03	78.78	2 171.15	
Z- ϵ^c	36	0.3391	211.2	4.56	0.5	0.066	57.62	39.82	78.32	1 901.59	
Z- ϵ^d	12	0.0146	8.6	1.23	0.4	0.047	21.43	30.88	85.06	1 892.69	
矿石	11	1.027	658.7	2.69	0.68	0.084	143.2	48.8	62.3	2 017.1	
岩段	样数	Sn	V	B	Ag	Cu	Pb	Zn	Mn	Mo	Co
Z- ϵ^a	3	1.33	54.5	63.57	0.21	32.4	91.7	33.5	431.9	0.32	4.6
Z- ϵ^b	11	1.63	53.3	29.4	4.56	38.9	148.6	77.3	417.9	0.28	6.2
Z- ϵ^c	36	2.54	68.3	39.12	7.13	217.5	1941.7	313.8	607.5	12.61	164.3
Z- ϵ^d	12	1.86	79.7	96.23	1.33	36.8	584.1	119.7	771	0.5	8.7
矿石	11	3.8	65.3	57.2	0.83	604.3	1335.4	51.3	240.1	36.97	489.8

测试单位: 河北地质测试中心。测试方法: Au 用石墨炉无火焰原子吸收光谱法; Ag 为火焰原子吸收光谱法; W、Sn、Mo 为极谱催化波法; As、Sb、Bi、Hg 用原子荧光光谱法; Cu、Pb、Zn、Co、Ni、Cr、V、Ti、Mn、Sr、Ba、Rb 为 X 荧光光谱法; B 用发射光谱法。

矿活动有关。据此可以确定, Au、As、Pb、Cu、Zn、Mo、Co, 可以作为圈定含矿层的化探异常元素组合。

如果以相关系数大于 0.5 为标准来简单地确定两者相关并划分元素组合的话, 根据表 3 的数据, 则有 Co-As-Ni-Mo-Au (按相关系数由大向小排序, 以下同)、Pb-Zn-Sb-Ag 和 Sn-Hg-Cu-Mo-W 三个元素组合。尽管在所有的被分析的样品中, 这 19 种元素的含量都在微量级, 并且它们在岩石中的赋存状态也不十分清楚, 但是从相关分析中, 起码可以认定 Co-As-Ni-Mo-Au 和 Pb-Zn-Sb-Ag、Sn-Hg-Cu-Mo-W 是本矿床含矿岩系中分别具有化学亲合力的三组元素。与表 2 的数据对比可知, 矿石中的异常富集元素为 Co、Au、As、Ni、Mo、Pb、Cu, 不但包括了上述三组元素中第一组元素的全部, 而且也包含第二组元素的 Pb 和第三组元素的 Cu。由此可以断定, 含矿岩系中的 Co-As-Ni-Mo-Au 元素组合是与以 Co 为主的喷气成矿活动有关的元素组合, 矿石中的 Co 和 Au 主要来源于喷气沉积成矿作用, 而另 2 个元素组合则也许暗示了另两类成因的矿化作用。

在含矿岩系的地球化学剖面上(图略), 大多数成矿元素和成矿指示元素(主要是 Co、Au、Ag、Cu、Pb、Zn、Mo、As、Sb、Sn、W、Hg)构成以含矿层(第 3 岩段)为中心, 向上(第 4 岩段)和向下(第 2 和第 1 岩段)快速衰减到背景场的曲线。其余元素(主要指 B、Mn、Bi、V、Ti、Cr)则有不同的变异趋势, 如: Cr 的两处高点分别出现第 3 和第 2 岩段中两处含磁铁矿大于 2% 的火山-沉积岩中; V 和 Ti 仅在第 4 岩段的石英角斑岩含量较高; Bi 仅在第 3 和第 4 岩段的局

部有不明原因的跳动; Mn 仅在钴矿化层的含褐铁矿的岩石中有较高的含量; B 则在第 4 岩段局部电气石含量较高处才有强烈的跳跃。

在主矿体及其附近, Co、Ni、Au、Ag、Cu、Pb、Zn、Mo、As、Sb、Sn、W、Hg 有较强烈的跳动(但它们之间的重合不太好), Pb 的异常晕最宽, 由 $w_{Pb} \geq 5\ 000 \times 10^{-6}$ 的 5 件样品构成, Co、Au、Ag、Sb 的晕较窄, 通常由 3 件样品构成, Mo 的晕最窄, 只有一个样点, 而 Hg 则呈双峰式套合在上述晕上。镜下观测发现, 这里的大多数样品中均含较多的喷气岩纹层或浸染状黄铁矿, 这些纹层宽 $< 1\text{ mm}$, 夹于变质的火山-沉积岩中。仔细辨认后发现, 重合较好的矿体晕由 Co、Ni、Au、Pb、Mo、As 等元素组成, 这些元素大部分是矿石中相对围岩含量较高的组分(表 2)。由此可以相信, Co、Ni、Au、Pb、Mo、As 是指示矿体的化探元素组合。本矿床的矿体是通过查证 Au-Co-As 组合异常发现的, 因此, 增加 Ni、Pb、Mo 的测试分析必不可少, 因为 Co-Ni-Au-Pb-Mo-As 组合异常比 Au-Co-As 组合异常更能区分矿致异常和非矿异常。

5 结论和建议

(1) 矿床地质-地球化学特征、矿体的产态、矿石结构构造以及金属矿物的标型表明, 驼路沟钴(金)矿床主要与海底喷气沉积成矿作用有关, 含矿的火山-沉积岩系(包括喷气沉积岩)以富钠为特征, 其形成于震旦—寒武纪, 而非二叠纪。

(2) 在加里东和晚华力西—印支碰撞造山过程

表 3 骆驼沟矿区含矿岩系地球化学剖面元素相关矩阵

Table 3 Correlation matrix of metal elements in ore-bearing strata from the geochemical section of the Tuolugou deposit

	Au	As	Sb	Bi	Hg	Ni	W	Cr	Ti	Sn	V	B	Ag	Cu	Pb	Zn	Mn	Mo	Co
Au	1	0.9193	0.0129	-0.0830	0.1511	0.9416	-0.0490	-0.2178	-0.0880	0.2183	-0.0896	-0.1137	-0.0622	0.1600	-0.0671	-0.0623	-0.0977	0.0966	0.5294
As	0.9193	1.0000	0.0005	-0.0508	0.2452	0.9544	0.0306	-0.2767	0.0009	0.3005	-0.0526	-0.0992	-0.1036	0.2759	-0.0630	-0.1007	-0.1255	0.2502	0.6990
Sb	0.0129	0.0005	1.0000	0.0130	0.2236	-0.0044	0.0220	0.3220	-0.0030	0.3135	0.1495	-0.1129	0.7248	0.0653	0.5626	0.7786	-0.0576	0.0814	0.0486
Bi	-0.0830	-0.0508	0.0130	1.0000	-0.0877	-0.0015	0.1186	-0.0597	0.0377	0.1731	-0.0342	-0.0059	0.0956	-0.0792	0.2186	0.0050	-0.0721	0.2122	0.2137
Hg	0.1511	0.2452	0.2236	-0.0877	1.0000	0.1420	0.6554	0.0039	0.2766	0.7831	0.1587	-0.0398	0.1633	0.9212	0.3667	0.2553	-0.0523	0.4177	0.3812
Ni	0.9416	0.9544	-0.0044	-0.0015	0.1420	1.0000	-0.0447	-0.2290	-0.0502	0.2120	-0.0206	-0.0566	-0.0900	0.1834	-0.0807	-0.0813	-0.1065	0.1075	0.6394
W	-0.0490	0.0306	0.0220	0.1186	0.6554	-0.0447	1.0000	0.1506	0.3376	0.5036	0.2066	0.1157	-0.0207	0.7145	0.2451	0.0378	-0.0968	0.2926	0.2984
Cr	-0.2178	-0.2767	0.3220	-0.0597	0.0039	-0.2290	0.1506	1.0000	0.2906	-0.0231	0.3279	0.1118	0.5548	-0.0343	0.3789	0.6029	-0.0018	-0.0872	-0.1806
Ti	-0.0880	0.0009	-0.0030	0.0377	0.2766	-0.0502	0.3376	0.2906	1.0000	0.5137	0.5004	0.2722	0.0208	0.3132	0.2034	0.0819	-0.2637	0.3346	0.1006
Sn	0.2183	0.3005	0.3135	0.1731	0.7831	0.2120	0.5036	-0.0231	0.5137	1.0000	0.2292	0.1335	0.1907	0.7034	0.4434	0.2480	-0.1863	0.5254	0.4435
V	-0.0896	-0.0526	0.1495	-0.0342	0.1587	-0.0206	0.2066	0.3279	0.5004	0.2292	1.0000	0.2859	0.1037	0.1609	0.2238	0.1559	-0.1332	0.1483	0.0181
B	-0.1137	-0.0992	-0.1129	-0.0059	-0.0398	-0.0566	0.1157	0.1118	0.2722	0.1335	0.2859	1.0000	-0.1748	0.0433	-0.0001	-0.0854	-0.0735	-0.0047	0.0588
Ag	-0.0622	-0.1036	0.7248	0.0956	0.1633	-0.0900	0.0207	0.5548	0.0208	0.1907	0.1037	-0.1748	1.0000	-0.0254	0.5524	0.8725	-0.0310	-0.0278	-0.1210
Cu	0.1600	0.2759	0.0653	-0.0792	0.9212	0.1834	0.7145	-0.0343	0.3132	0.7034	0.1609	0.0433	-0.0254	1.0000	0.1899	0.0189	-0.0783	0.3572	0.4478
Pb	-0.0671	-0.0630	0.5626	0.2186	0.3667	-0.0807	0.2451	0.3789	0.2034	0.4434	0.2238	-0.0001	0.5524	0.1899	1.0000	0.6393	-0.0057	0.3231	0.0473
Zn	-0.0623	-0.1007	0.7786	0.0050	0.2553	-0.0813	0.0378	0.6029	0.0819	0.2480	0.1559	-0.0854	0.8725	0.0189	0.6393	1.0000	-0.0529	-0.0086	-0.1136
Mn	-0.0977	-0.1255	-0.0576	-0.0721	-0.0523	-0.1065	-0.0968	-0.0018	-0.2637	-0.1863	-0.1332	-0.0735	-0.0310	-0.0783	-0.0057	-0.0529	1.0000	-0.0280	-0.1224
Mo	0.0966	0.2502	0.0814	0.2122	0.4177	0.1075	0.2926	-0.0872	0.3346	0.5254	0.1483	-0.0047	-0.0278	0.3572	0.3231	-0.0086	-0.0280	1.0000	0.5974
Co	0.5294	0.6990	0.0486	0.2137	0.3812	0.6394	0.2984	-0.1806	0.1006	0.4435	0.0181	0.0588	-0.1210	0.4478	0.0473	-0.1136	-0.1224	0.5974	1

中,驼路沟矿床的喷气沉积型矿体,受到过构造改造,并导致金在局部地段的进一步富集。在矿床勘查中除沿层找矿外,还要注意研究构造变形导致矿体在空间上的变位和重新排布。

(3) 矿床中的石英钠长岩是典型的喷气沉积岩,而并非“脉岩”,它是矿体的重要找矿标志。根据类似的喷气沉积成矿作用的分带模式推断,该矿区的喷气沉积成矿作用可能是较远离喷气中心的产物,向喷气沉积成矿中心,应该出现 Cu-Co 的成矿元素组合。因此,在矿床勘查的初期要注意寻找可能存在的 Cu 矿化。

(4) 元素地球化学研究揭示, Au、As、Pb、Cu、Zn、Mo、Co 是圈定含矿层的化探异常元素组合,而 Co-Ni-Au-Pb-Mo-As 组合异常可以指示矿体。建议在今后的地球化学勘查中,增加 Ni、Pb、Mo 的测试分析,因为 Co-Ni-Au-Pb-Mo-As 组合异常比 Au-Co-As 组合异常更能区分矿致异常和非矿异常。

References

- Annels A E and Simmonds J R. 1984. Cobalt in the Zambian copper belt [J]. *Precambrian Research*, 25(13): 75 ~ 98.
- Fleischer V D. 1984. Discovery, geology and genesis of copper-cobalt mineralization at Chambishi southeast prospect, Zambia [J]. *Precambrian Research*, 25(13): 119 ~ 133.
- Fu D J. 1997. The geological characteristics of Wubaoshan cobalt ore district, Yichun and the discovery of new ore-hosting horizon [J]. *Jiangxi Geology*, 11(4): 30 ~ 32 (in Chinese with English abstract).
- Li H M, Shen Y C and Hu Z G. 2000. Geological characteristics of Tuolugou cobalt (gold) deposit in East-Kunlun Mountains, Qinghai Province [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 19(4): 331 ~ 332 (in Chinese).
- Li H M, Shen Y C, Hu Z G, et al. 2001. Geology of Tuolugou cobalt (gold) deposit in East-Kunlun Mountains, Qinghai Province, and the first discussion on its genesis [J]. *Geology and Prospecting*, 37(1): 60 ~ 64 (in Chinese with English abstract).
- Sun H T and Ge C H. 1996. Hydrothermal exhalative copper deposits in Zhongtiaoshan district, Shanxi Province [M]. Beijing: Beijing Science and Technology Press. 136p (in Chinese with English abstract).
- Wan C L and Liu R F. 1999. A preliminary analysis of the metallogenic conditions of Dahenglu Co-Cu deposit in Jilin Province [J]. *World Geology*, 18(1): 21 ~ 24 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y W and Qin K Z. 1997. The extremely basic member of VAMSD deposit series—the Deerni large copper-cobalt deposit of Qinghai Province: its geological characteristics and genetic type [J]. *Mineral Deposits*, 16(1): 1 ~ 10 (in Chinese with English abstract).
- Xu W Y, Zhang D Q, Yan S H, et al. 2001. Achievements and prospecting of the mineral resources survey in eastern Kunlun area [J]. *Chinese Geology*, 28(1): 25 ~ 29 (in Chinese with English abstract).
- Xu Y and Zu X Y. 1999. Potential for prospecting of cobalt deposits in the Kunlun-Qinling orogenic belt [J]. *Geological Exploration for Non-ferrous Metals*, 8(6): 396 ~ 399 (in Chinese with English abstract).
- Xue B G. 1996. Geological characteristics of superimposed cobalt mineralization in the Yimen copper district [J]. *Mineral Resources and Geology*, 10(6): 388 ~ 394 (in Chinese with English abstract).
- Zhang D Q, Feng C Y, Li D X, et al. 2001. Orogenic gold deposits in the North Qaidam and East Kunlun Orogen, West China [J]. *Mineral Deposits*, 20(2): 137 ~ 146 (in Chinese with English abstract).
- 傅大捷. 1997. 宜春五宝山钴矿区地质特征及赋矿新层位的发现 [J]. *江西地质*, 11(4): 30 ~ 32.
- 李厚民, 沈远超, 胡正国. 2000. 海东昆仑驼路沟钴(金)矿床地质特征——一种新型的与富钠火山岩有关的钴(金)矿床 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 19(4): 321 ~ 322.
- 李厚民, 沈远超, 胡正国, 等. 2001. 青海东昆仑驼路沟钴(金)矿床地质特征及成因初探 [J]. *地质与勘探*, 37(1): 60 ~ 64.
- 孙海田, 葛朝华. 1990. 中条山热液喷气成因铜矿床 [M]. 北京: 北京科学技术出版社. 136 页.
- 万丛礼, 刘荣访. 1999. 浅析吉林省大横路钴铜矿床成矿条件 [J]. *世界地质*, 18(1): 21 ~ 24.
- 王玉往, 秦克章. 1997. VAMSD 矿床系列最基性端员——青海省德尓尼大型铜钴矿床的地质特征及成因类型 [J]. *矿床地质*, 16(1): 1 ~ 10.
- 徐文艺, 张德全, 阎升好, 等. 2001. 东昆仑地区矿产资源大调查进展与前景展望 [J]. *中国地质*, 28(1): 25 ~ 29.
- 徐勇, 祝新友. 1999. 昆仑造山带钴矿找矿前景初步评价 [J]. *有色金属矿产与勘查*, 8(6): 396 ~ 399.
- 薛步高. 1996. 论易门铜矿区叠加钴矿化地质特征 [J]. *矿产与地质*, 10(6): 388 ~ 394.
- 张德全, 丰成友, 李大新, 等. 2001. 柴北缘-东昆仑地区的造山型金矿床 [J]. *矿床地质*, 20(2): 137 ~ 146.

附中文参考文献

Geology and Geochemistry of Tuolugou Exhalative-Sedimentary Co-Au Deposit, Qinghai Province

Zhang Dequan¹, Wang Yan², Feng Chengyou¹, Li Daxin¹, Yan Shenghao¹ and Cui Yanhe¹

(1 Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 2 Qinghai Geological Survey, Xining 810001, Qinghai, China)

Abstract

The Tuolugou cobalt-gold deposit, located in the central part of the East Kunlun orogen, serves as the first example of exhalative-sedimentary deposits in this region and is now under exploration. Lithologies of Co- and Au-bearing formation in the Tuolugou ore district include detrital and volcanic rocks of four lithostratigraphic sub-units, which are from bottom to top black shale ($Z-E^a$), tuff-sandstone ($Z-E^b$), volcano-sedimentary rocks ($Z-E^c$) and sandstone ($Z-E^d$). There are no intrusive rocks involved in the Tuolugou ore district. Volcanics in four sub-units are intermediate to acidic and show a chemical affinity of active continental margin or island arc. The cobalt-gold ore bed is hosted by volcano-sedimentary rocks ($Z-E^c$), whose sequence is mainly composed of metamorphosed pelitic siltstone with interbeds of tuff and exhalite (quartz albitite). U-Pb dating data (570 Ma) obtained from zircon of quartz albitite indicate an age between Sinian and Cambrian. Co-Au orebodies are in stratiform and lenticular forms. They extend conformably in strata, forming an over 7 km-long mineralization zone. Individual orebodies are 100 to 1 000 m long and 0.86 to 4.45 m thick, with average grades of 0.024 % ~ 0.108 % Co and 0.3 ~ 0.78 g/t Au. The ores display laminar, banded, disseminated and massive textures. The gangue minerals include quartz, albite, carbonate (siderite, ankerite and calcite), sericite, chlorite and tourmaline (dravite), whereas the ore minerals are composed of pyrite (> 30 %), small amounts of arsenopyrite, chalcopyrite, sphalerite, pyrrhotite, bornite, and trace cobalt pentlandite, cobalt pyrite, linnaeite, carrollite, cattierite and gold. Cobalt is contained in pyrite in the ore. The multiple orogeny during Caledonian and Late Variscan to Indosinian produced extensive metamorphism and deformation, and led to the development of folds that evolved into thrusts. This caused reformation of exhalative-sedimentary orebodies and partial emplacement of gold orebodies. The complex ore-forming process mentioned above finds expression in variable generations of pyrite in Co-Au ores. Pyrite of early generation is anhedral, fine-grained and fragmented, with quartz, calcite and gold filled in microfractures. Pyrite of early generation is sometimes seen to be elongated into spindle-shaped crystalloblasts. Pyrite of late generation is of a lower proportion relative to early pyrite, and is subhedral to euhedral and coarse-grained in form with no fragmentation. Microprobe analyses show that early pyrite has high average content of Co and Ni, and low Au (2.44 % Co, 0.49 % Ni and 0.01 % Au) relative to late pyrite (0.1 % Co, 0.1 % Ni and 0.14 % Au). All this suggests that early pyrite and late pyrite were formed before regional metamorphism and deformation (exhalative-sedimentary stage) and during metamorphic and deformation stage, respectively, and that cobalt mineralization is mainly related to exhalative-sedimentary mineralization, whereas gold is mainly an epigenetic product related to collisional orogeny.

Key words: cobalt deposit, exhalative-sedimentary mineralization, Tuolugou, East Kunlun