

玻利维亚多尔各市D铜矿矿物元素组合分带及找矿预测

胡加昆, 吴文飞, 郟晓鑫, 陈子聪, 李敬, 陆俊吉

云南冶金资源股份有限公司, 昆明, 650216

内容提要:玻利维亚多尔各市D铜矿地处安第斯褶皱带中段,西科迪勒拉构造带东侧南端。矿体主要赋存于多尔各组二段(E_3t^2)地层中。通过对多尔各市D铜矿矿物分带、主元素及微量元素组合分析,采用数理统计分析方法。研究表明:①粉砂岩型矿化(I型矿化):近矿硅化增加,矿化范围叠加石膏脉,围岩泥质(脉)含量减少,方解石化(隐晶质)发育减弱;远离矿化硅化减弱,石膏脉消失,方解石化增强,泥化增强。②砂砾岩型矿化(II型矿化):近矿硅化增加,矿化范围叠加石膏脉,围岩泥质(脉)含量减少,方解石化(隐晶质)减弱;远离矿化段,硅化减弱,石膏脉消失,方解石化增强,泥化增强。③石英脉型矿化(III型矿化):内带主要发育矿化、硅化,最显著的特征为发育大量矿化脉及石英脉;外带发育泥质脉及石英脉。④Cu—Ag元素组合为矿区重要的矿化元素组合内带,Ca—Mn元素组合为矿区近矿围岩褪色蚀变元素组合中带,U—V元素组合为矿区含矿“红层”元素组合外带。通过矿物分带、地球化学元素分析,确定找矿靶区,并在靶区探获铜矿量770.08万吨、平均品位1.77%、金属量136304 t。

关键词:玻利维亚多尔各市D铜矿;矿物组合;空间分带

玻利维亚多尔各市D铜矿地处安第斯褶皱带中段,西科迪勒拉构造带东侧南端。该地区是安第斯山内部填充凹陷区,在安第斯山复杂的演变过程及强大的形态调整中,其在构造上被侧向和纵向下沉的板块控制。西科迪勒拉白垩纪广泛海侵,第三纪太平洋板块强烈俯冲使其西科迪勒拉褶皱隆起伴有强烈而频繁岩浆活动(李丽文等,2015)。西科迪勒拉砂岩铜矿带,是玻利维亚铜资源最有潜力的区域。在古近统一新近统砂砾岩及火山岩夹层中,产生众多的砂砾岩型铜矿、金矿、铅锌银矿、锑矿等,该带中的科罗科罗(Corocoro)铜矿、马蒂尔德(Mathilde)锌矿、财富山(Potosí)银矿、乌尤尼(Uyuni)锂盐矿等,都是世界屈指可数的大型矿床(李丽文等,2015),在科罗科罗至多尔各之间,仅砂砾岩型铜矿床就发现20余处(图1)。前人在多尔各市D铜矿区开展过铜矿床的矿物分带工作较少,笔者等通过近两年在该区开展过的地质勘查工作,对矿物分带进行大量的数理统计分析,充分研究矿物分带、主元素组合及微量元素组合,确定该铜矿:

(1)粉砂岩型矿化(I型矿化):近矿硅化增加,并且矿化范围叠加石膏脉,围岩泥质(脉)含量减

少,方解石化(隐晶质)发育减弱;远离矿化硅化减弱,石膏脉消失,方解石化增强,泥化增强。

(2)砂砾岩型矿化(II型矿化):近矿硅化增加,并且矿化范围叠加石膏脉,围岩泥质(脉)含量减少,方解石化(隐晶质)发育减弱;远离矿化段,硅化减弱,石膏脉消失,方解石化增强,泥化增强。

(3)石英脉型矿化(III型矿化):内带最显著的特征为发育大量矿化脉及石英脉;外带主要发育泥质脉及石英脉。

(4)Cu—Ag元素组合为矿区重要的矿化元素组合内带,Ca—Mn元素组合为矿区近矿围岩褪色蚀变元素组合中带,U—V元素组合为矿区含矿“红层”元素组合外带。

(5)通过矿物分带、地球化学元素分析,确定找矿靶区,并在靶区探获铜矿量770.08万吨、平均品位1.77%、金属量136304 t。

1 区域及矿床地质

1.1 区域地质背景

D铜矿处于安第斯褶皱带中段及西科迪勒拉构造带东侧南端,处于次级构造北Altiplano内,其最

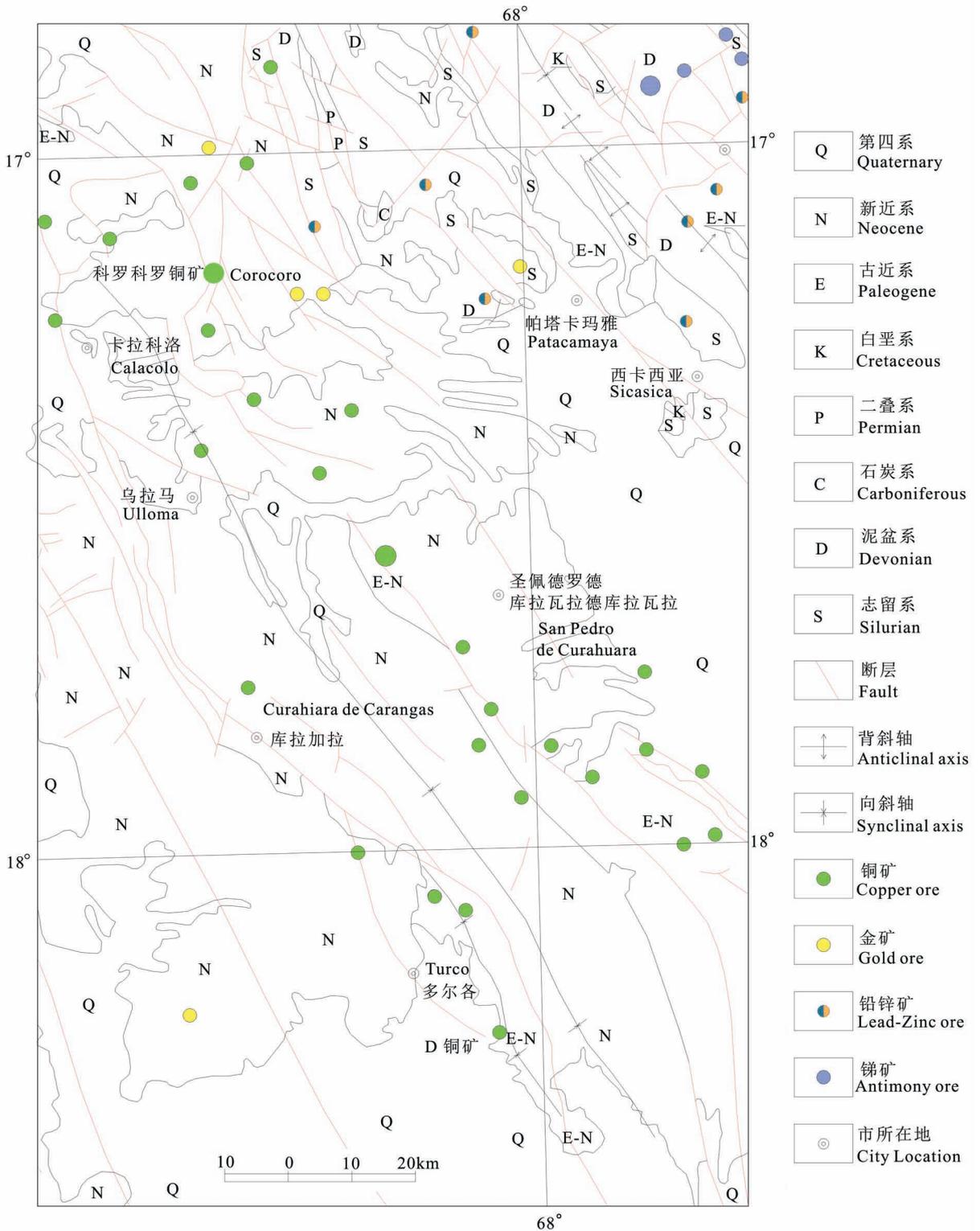


图 1 玻利维亚科罗科罗—多尔各砂岩铜矿带区域地质图

Fig. 1 Regional geological map of the Corocolo—Turco sandstone copper belt, Bolivia

古老的岩石是基底变质花岗岩,其 Rb-Sr 年龄为 1050 ± 100 Ma, 在 Andean(安第斯山脉)造山运动过

程中,在此区形成走向 N—S 的左行走滑断裂、轴向 NW—SE 低角度的背斜与高角度断层,在向斜翼部

发育大量的拖曳褶曲(图2)。北 Altiplano(高原)区是一个铜多金属矿集区,铜矿床产于新近纪陆源碎屑岩,矿床蚀变发育较弱或未蚀变,成因上归为与红层相关的层状或层控矿床,矿床的产出与次一级的拖曳褶曲及横向断层相关。

1.2 地层

多尔各市 D 铜矿区内出露主要地层为渐新统(E_3)是一套厚度在 2000 m 以上的陆相混杂沉积序列,这个序列由冲积平原和河流沉积的砂岩、砾岩以及沉火山碎屑所组成,分为 5 段(图3)。

1.2.1 渐新统多尔各组第一岩性段(E_3t^1)

主要分布于矿区中部,北西—南东向背斜核部,岩性为紫红色中至厚层状、部分地段为块状细砂岩夹同色薄至中层状粉砂岩及少量泥岩,局部为细砂岩及粉砂岩互层,顶部部分地段可见宽 1~6 cm 的

含砾砂岩或砾石条带。该层厚度大于 425 m。该层局部见沿裂隙填充的孔雀石细脉及零星团块。

1.2.2 渐新统多尔各组第二岩性段(E_3t^2)

主要分布于背斜两翼,矿区北部为转折端,岩性为紫红色、紫褐色含砾砂岩,其次为灰白色含砾砂岩、灰褐色细砂岩。砾石成分复杂,主要由火山质岩屑、安山岩质的岩屑及少量石英砾石组成,砾石次棱角状,砾石堆积杂乱,分选性差,在大的砾石周围可见绿泥石化(孙勇,2015)。胶结物主要为红褐色、灰白色和灰绿色泥质及粉砂质,局部见红褐色泥质;整段地层,裂隙发育,脉体较常见,主要为泥质脉及石膏脉,可见少量白色石英细脉及石英晶簇产出;矿化主要产于紫红色、紫褐色含砾砂岩包裹的灰白色含砾砂岩内,靠近矿化段(田必林,2012),其泥质含量增多,特别是灰白色、灰绿色泥质团斑含量明显增

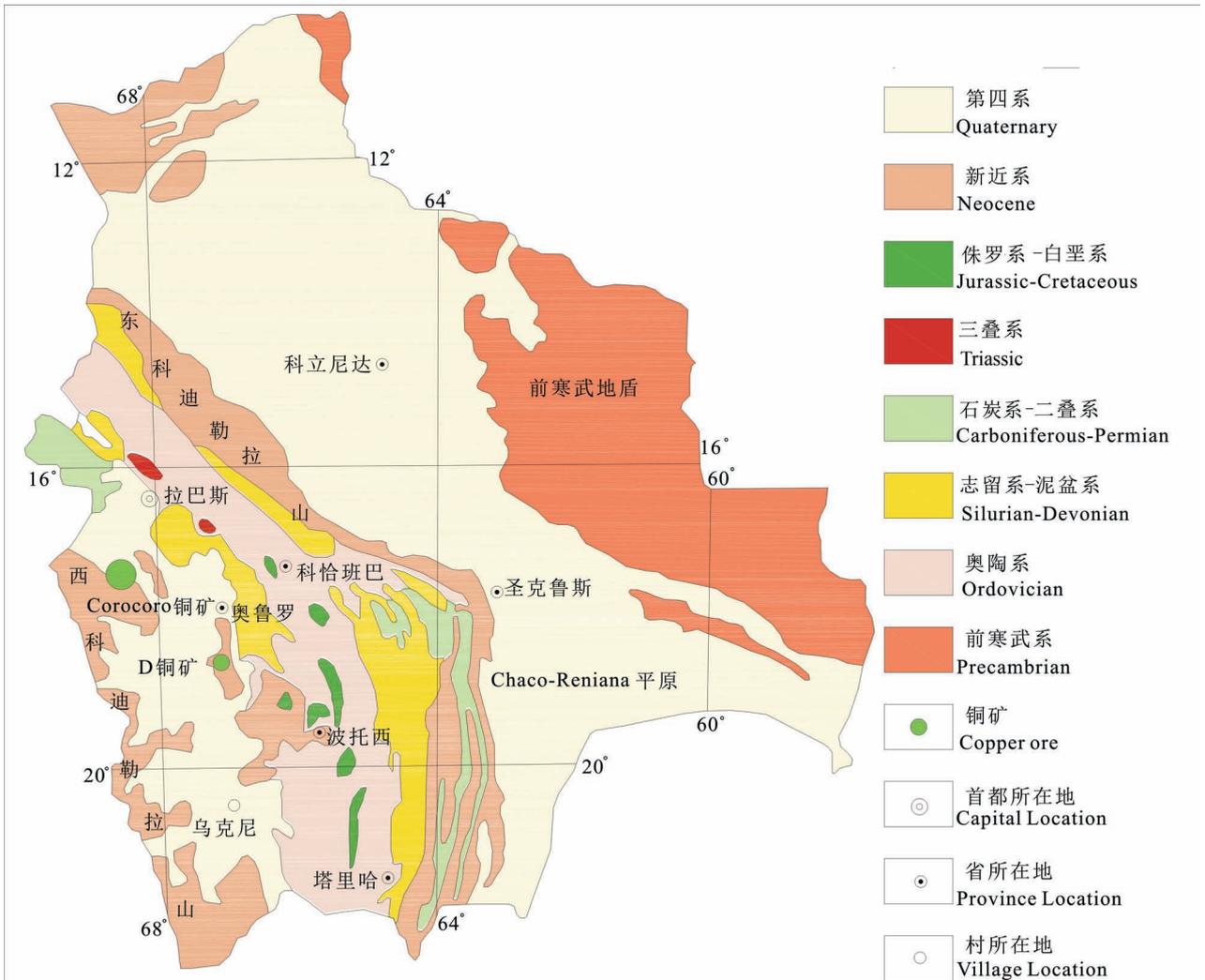


图2 玻利维亚地质简图

Fig. 2 Simplified geological map of Bolivia

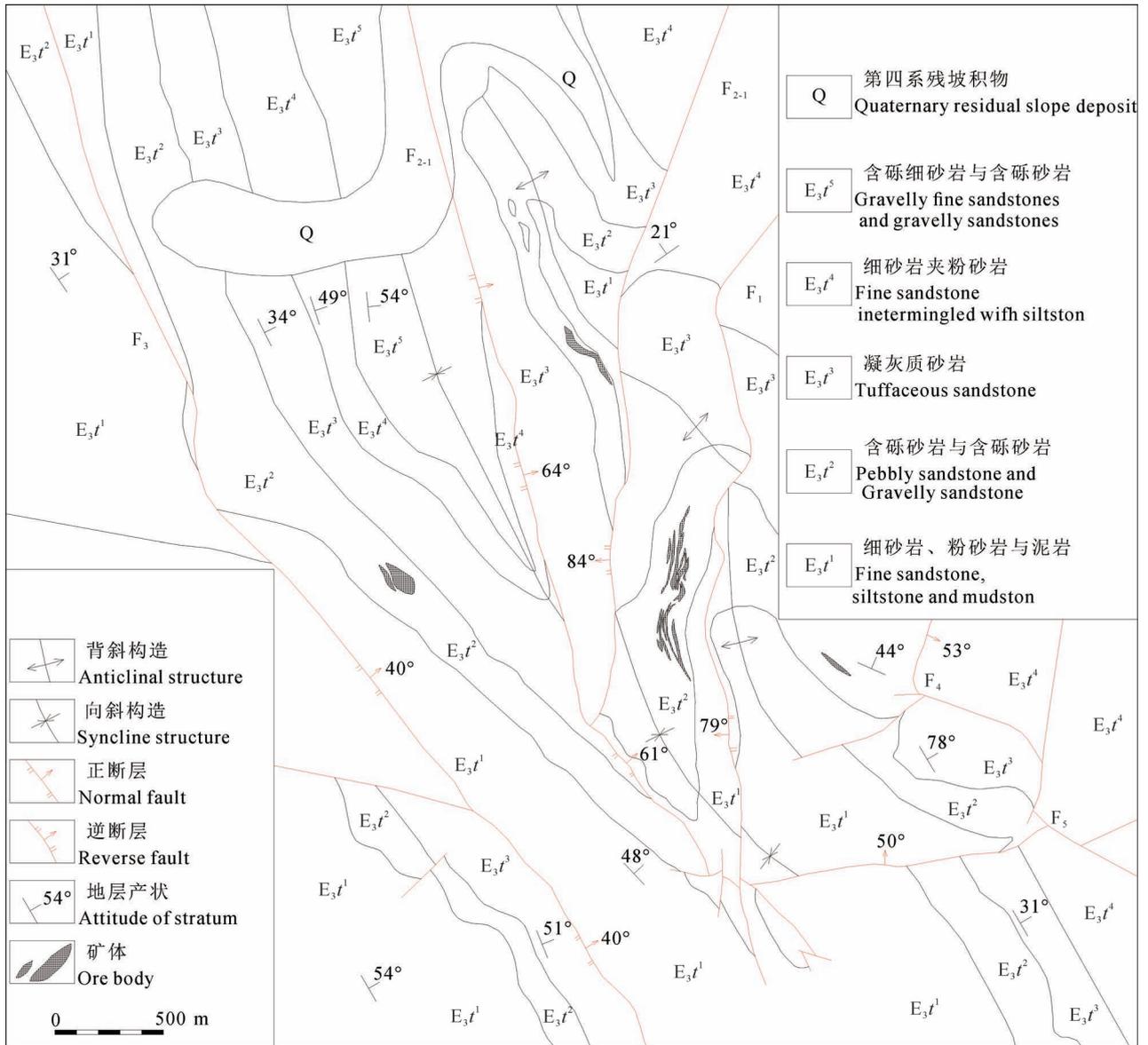


图 3 玻利维亚多尔各市 D 铜矿矿区地质图

Fig. 3 Geological map of the D copper deposit in Turco City, Bolivia

多,即从胶结物看形成了浅—紫交互的特征,赤铜矿、自然铜、硅孔雀石、黑铜矿(张良钜等,2016)等矿石矿物产于灰白色含砾砂岩内。从钻孔揭露的产出特征看,硅孔雀石包裹两者,而自然铜处于硅孔雀石、黑铜矿的二者接触带,即氧化环境(孔雀石)—过渡相(自然铜)的成矿特征;该层厚度 75~149 m,是矿区主要含矿地层。

1.2.3 渐新统多尔各组第三岩性段 (E₃t³)

分布于矿区两侧及其外围地区。岩性为灰绿色含凝灰质砂岩,其次可见灰绿色含砾—凝灰质砂岩、灰褐色含砾凝灰质和含凝灰质砂岩、红褐色泥质凝

灰质砂岩(李院强,2016),局部可见薄层状含砾凝灰质砂岩与含凝灰质砂岩组成的互层。整段地层,局部砾石含量较多,砾石磨圆度较好(呈次圆状,少量呈扁平状),砾径 3~8 cm,砾石成分与二段较相似,主要为黑云母闪长斑岩、钾长石与石英砾石,局部砾石周围可见绿泥石化皮壳。地层胶结物主要为灰绿色凝灰质,其次为灰白色粉砂质、红褐色泥质物,局部可成小团斑状、条带状、块状产出。地层局部裂隙发育,其主要被脉体充填,脉体为白色石英脉及红褐色泥质—硅质脉,其次裂隙内可见石英晶簇产出,局部可见绿泥石、绿帘石小团斑产出以及泥质

物排列呈定向性与S—C组构,指示层内局部出现滑移。此外,在A区可见石英脉型矿化,石英呈乳白色、烟灰色、浅肉红色、浅蓝绿色,脉体宽2~30 cm,其矿石矿物为硅孔雀石、赤铜矿、自然铜等。该层厚度大于376 m,为矿区弱矿化层。

1.2.4 渐新统多尔各组第四段(E₃t⁴)

岩性为紫红色薄至中层状细砂岩、粉砂岩及少量浅灰绿色含凝灰质砂岩,中间夹数层2~5m厚浅灰绿色中至厚层状含凝灰质石英砂岩。该层厚度大于122m。

1.2.5 渐新统多尔各组第五段(E₃t⁵)

岩性为灰白色薄至中层状含砾凝灰质砂岩、紫

红色中至厚层状含砾细砂岩、灰褐色中至厚层状含砾砂岩混杂沉积,整套地层火山灰含量较高,砾石以安山岩、英安岩为主,砾径0.3~17 cm之间,砾石无分选,磨圆度差,具轻微沿层定向排列现象。该层厚度大于259 m。

1.3 构造

1.3.1 褶皱

北西—南东向背斜:该背斜为长条状,总体走向NW,核部出露渐新统多尔各组第一岩性段,两翼为第二岩性段、第三岩性段,背斜东侧被断层F₂₋₁切错,致使第一岩性段、第二岩性段遭受风化剥蚀,直接接触为第三岩性段。转折端地层产状变化较大,

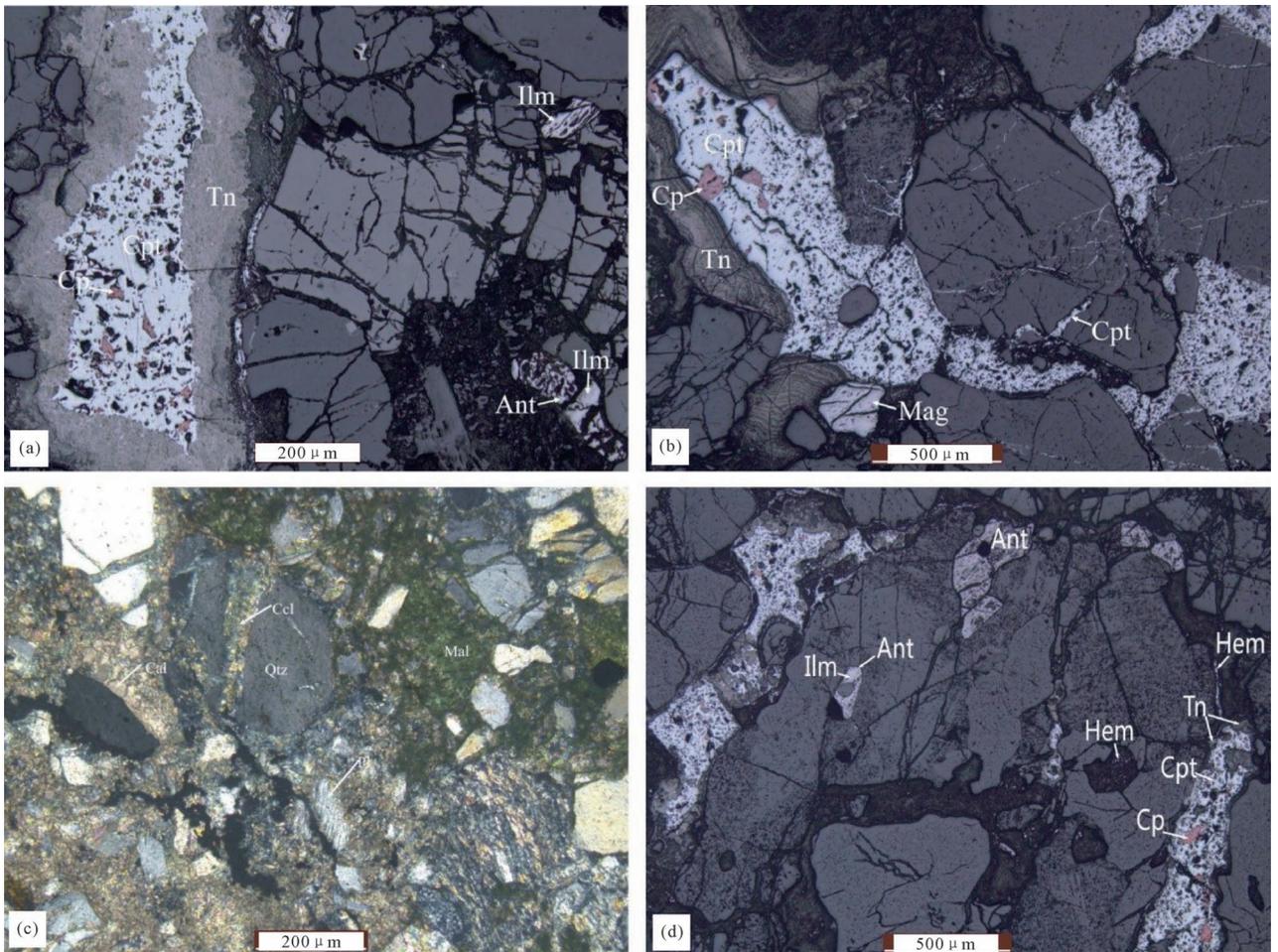


图4玻利维亚多尔各市D铜矿主要矿石矿物镜下照片:(a)自然铜被赤铜矿交代呈残余状;(b)自然铜被赤铜矿交代呈残余状;(c)呈孔隙式胶结;(d)自然铜被赤铜矿交代

Fig. 4 Representative photos of main ores in D copper deposit

in Turco City, Bolivia: (a), (b) and (d) the natural copper is repalced by cuprite; (c) porous cementation

Cp—自然铜; Cpt—赤铜矿; Tn—黑铜矿; Ccl—硅孔雀石; Mal—孔雀石; Ilm—钛铁矿;

Ant—锐钛矿; Mag—磁铁矿; Hem—赤铁矿; Qtz—石英

Cp—natural copper; Cpt— cuprite; Tn—black copper; Ccl—malachite; Mal—malachite; Ilm—ilmenite; Ant— anatase;

Mag—magnetite; Hem—hematite; Qtz—quartz

东翼地层倾向 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$,倾角 $29^{\circ}\sim 55^{\circ}$;西翼地层倾向 $224^{\circ}\sim 258^{\circ}$,倾角 $55^{\circ}\sim 61^{\circ}$ 。西翼陡东翼缓,两翼不对称,为歪斜倾伏褶皱。

向斜:该向斜区域上位于嘎兰嘎斯(Carangas)—D铜矿向斜构造带南段。呈长条状,总体走向NW,北端核部出露地层为渐新统多尔各组第五岩性段,两翼为第四岩性段、第三岩性段、第二岩性段、第一岩性段,向斜南端受区域应力挤压作用及 F_1 、 F_{2-1} 、 F_{2-2} 断裂影响,核部出露渐新统多尔各组第一岩性段。东翼地层倾向 $304^{\circ}\sim 60^{\circ}$,倾角 $21^{\circ}\sim 50^{\circ}$;西翼地层倾向 $224^{\circ}\sim 258^{\circ}$,倾角 $31^{\circ}\sim 54^{\circ}$ 。两翼不对称,为歪斜倾伏褶皱。

1.3.2 断层

F_1 :出露在矿权中部偏东地段,延伸长约3632 m,呈近南北向展布,断裂面呈舒缓波状,斜冲擦痕明显,带内充填紫褐色泥质物,为右行扭动特征的逆断层。断裂面倾向西,幅宽 $0\sim 5$ m,倾角 $62^{\circ}\sim 79^{\circ}$;该断裂切错地层,其水平错距达56 m;在该断裂带可观察到断裂面下盘见羽状裂隙发育,局部裂隙内充填氧化铜。

F_2 :出露在矿权中部偏西地段,追索延伸长约5150 m, NW—NNW 向展布,断裂面呈舒缓波状,倾向NE,倾角 $64^{\circ}\sim 83^{\circ}$,为逆断层。

F_{2-1} :出露在矿区南东地段,追索延伸长约3470 m,呈近SN向及NNE向展布,向南交汇于 F_1 断裂。断裂面呈舒缓波状,倾向W,倾角 56° ,为正断层;该断裂在工作区切割背斜轴,致使第一岩性段、第二岩性段缺失,水平错距达93 m,具有右行扭动特征。

F_3 :出露在矿权南部及西部地段,追索延伸长5650 m,呈NW向展布,断裂面呈舒缓波状,倾向NE,倾角 57° ,对地层有切错,水平错距不明,为正断

层。 F_4 、 F_5 断裂出露于矿权东南地段,断裂规模相对较小,对地层有切错作用。

2 多尔各市D铜矿矿体地质

2.1 矿体地质特征

铜矿体主要赋存于多尔各组二段(E_3t^2)地层中,岩性主要为紫色含砾砂岩及砂砾岩,矿体主要产于紫褐色、灰白色含砾砂岩内,灰白色含砾砂岩呈团斑状产于紫褐色含砾砂岩内。矿体严格受岩层控制,地表出露形态主要为大脉状、脉状、透镜状及瘤状,沿层呈似层状产出。

矿区共发现铜矿体118个,其中对各区规模较大的3个矿体(A20、B20、D10)。

A20号矿体赋存于渐新统多尔各组第二段(E_3t^2)中,沿层产出,呈扁平脉状,矿体产状与地层一致,矿体走向北西,倾向北东,倾角 $43^{\circ}\sim 47^{\circ}$,走向长208 m,倾向延深88 m,最大厚度8.28 m,最小厚度1.46 m,平均厚度4.23 m,矿体真厚度2.08 m,铜品位 $0.11\%\sim 2.8\%$ 、平均品位1.15%。

B20号矿体赋存于渐新统多尔各组第二段(E_3t^2)中,沿层产出,呈似层状,矿体产状与地层产状一致,矿体走向近南北向,倾向北西西,倾角 $47^{\circ}\sim 54^{\circ}$,平均倾角 51° ,走向长度为218 m,倾向延深47 m,最大厚度11.79 m,最小厚度1.32 m,平均厚度6.03 m,铜品位 $0.01\%\sim 5.44\%$ 、平均品位1.55%。

D10号矿体赋存于渐新统多尔各组第二段(E_3t^2)中,沿层产出,呈扁平脉状,矿体产状与地层产状一致,矿体走向北西向,倾向南西,倾角 $78^{\circ}\sim 79^{\circ}$,走向长183.50 m,厚度 $1.44\sim 3.32$ m,平均厚度1.78 m,厚度变化系数为68.92%,属稳定型,铜品位 $0.586\%\sim 7.470\%$ 、平均品位2.21%。

表1 玻利维亚多尔各市D铜矿矿石主要矿物组成

Table 1 Main mineral Composition of the ores in D copper deposit in Turco City, Bolivia

矿化类型	产出地层	金属矿物	脉石
含砾砂岩型	E_3t^2	自然铜、赤铜矿、硅孔雀石、黑铜矿、磁铁矿、钛铁矿、赤铁矿、褐铁矿、锐钛矿、黄铁矿	角砾:花岗岩、安山岩、流纹岩、闪长岩类、火山岩—凝灰岩、泥岩、长石、玄武安山岩、变质细粒石英砂岩;砂状碎屑:石英、长石、安山岩岩屑、花岗岩岩屑、喷出岩岩屑、黑云母、闪长玢岩、中性火山岩岩屑、变质粉砂岩;胶结物:方解石、石榴石(个别样品);杂基:水白云母、硅孔雀石、铁泥质、绿泥石、沸石(个别样品)、绿帘石
粉砂岩型	E_3t^1	赤铜矿、自然铜、硅孔雀石、黑铜矿、磁铁矿、钛铁矿、赤铁矿、褐铁矿、锐钛矿	砂状碎屑:石英、长石;岩屑:泥质岩屑、喷出岩岩屑、绿泥石岩屑、变质粉砂岩岩屑;胶结物:不透明矿物;杂基:水白云母、硅孔雀石、铁泥质、石榴石
石英脉型	E_3t^3	硅孔雀石、自然铜、赤铜矿	玉髓、石英、铁泥质、后生石英,偶见方解石、水白云母、闪石

2.2 矿石质量

2.2.1 矿物特征

矿床的矿物组成见表 1、2。

主要金属矿物:赤铜矿、自然铜、黑铜矿、硅孔雀石、黄铁矿、磁铁矿、钛铁矿、赤铁矿、褐铁矿、锐钛矿。脉石矿物:水云母、方解石、玉髓、铁泥质、后生石英等(图 4)。

2.2.2 矿石结构构造

矿石结构:含砾粗粒砂状结构、含砂质角砾状结构、残余结构、片状结构、他形粒状结构、鳞片结构、针状结构、纤维状结构、隐晶质结构、重结晶结构。

矿石构造:星散状构造、稀疏浸染状构造、脉状—稀疏浸染状构造、斑块状构造、砾状构造、细脉状构造、碎粉状构造、放射球粒状构造。

2.2.3 矿石化学成份

原矿中 Cu 6.91%, SiO₂ 68.41%, 其它元素含量较低。见表 3

2.2.4 矿石类型

矿石自然类型为砂岩型及砂砾岩型铜矿石,铜主要以氧化铜的形式存在,氧化率高达 98.30%,结合率达 45.60%(昆明冶金研究院^①),工业类型为高结合率的氧化铜矿石。

3 不同类型矿化蚀变矿物组合及空间变化规律

矿区围岩蚀变主要为硅化、石膏化、碳酸盐化、泥化、褪色作用,并形成了相应的热液脉体。岩石由红褐色砂岩到灰白色砂岩的变化是一种褪色作用。红褐色砂岩褪色为灰白色砂岩,其显微组构和胶结

表 3 玻利维亚多尔各市 D 铜矿矿石多元素分析结果(%)

Table 3 Multielement analysis results(unit: %) of the ores in D copper deposit in Turco City, Bolivia

元素	Cu	S	Fe	As	Au [*]	Ag [*]
含量	6.91	0.092	1.43	<0.10	<0.10	25.9
元素/氧化物	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K	Na
含量	1.01	0.3	68.41	8.09	1.23	0.8

表 2 玻利维亚多尔各市 D 铜矿矿石主要矿物粒度及含量组成

Table 2 The main mineral particle size and content composition of the ores in D copper deposit in Turco City, Bolivia

类型	矿物	分子式	粒度(mm)	含量
自然元素	自然铜	Cu	0.01~2	偶见到 5%
氧化物	赤铜矿	Cu ₂ O	≤0.05~0.5	<1%~5%
	黑铜矿	CuO	≤0.01~0.05	少到 1%
	磁铁矿	Fe ₃ O ₄	≤0.02~0.5	偶见
	钛铁矿	FeTiO ₃	≤0.02~1	少到<1%
	锐钛矿	TiO ₂	≤0.02~0.1	偶见
	赤铁矿	Fe ₂ O ₃	≤0.02~0.8	<1%
	褐铁矿	FeO(OH)·nH ₂ O	隐晶质	<1%
	玉髓	SiO ₂	隐晶质	95%
碳酸盐	方解石	CaCO ₃	≤0.1~1.6	偶见到 15%
硅酸盐	硅孔雀石	(Cu, Al) ₂ H ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₂ ·nH ₂ O	≤0.02~0.3	少到 3%
	水云母	K{Al ₂ [AlSi ₃ O ₁₀](OH) ₂ }	≤0.01~0.06	1%~10%
	铁泥质	----	隐晶质	少到 3%
硫化物	黄铁矿	CuFeS ₂	≤0.02	偶见

物类型发生了变化,同时形成了浸染状矿石(邹海俊,2008)。

3.1 平面组合变化规律

通过 5 条典型剖面图大比例尺蚀变填图成果,绘制了矿区矿物组合分带平面图。

从矿物组合分带平面图反映出的特征有:①矿床的矿物组合规律受矿区的褶皱构造、F₁、F₂、F₃ 的控制。②背斜西翼的 B 区 E₃t² 内分布的 II 中带最宽(30~50 m),蚀变与矿化也最强,B 区也是矿床的主要勘查区,II 中带呈现局部膨大或缩小的特征。③背斜东翼的 C 区 E₃t² 内主要发育两层 II 中带,II 中带较窄(5~20 m),其中局部 II 中带残留有 II 外带的灰褐色含砾砂岩,II 中带也呈现局部膨大或缩小的特征。④向斜西翼的 A 区 E₃t² 内分布的 II 中带宽 20~30 m,蚀变与矿化较强,II 中带也呈现局部膨大或缩小的特征。⑤背斜核部发育有 I 中带,向斜核部发育有 II 中带,带宽 5~10 m。⑥F₁ 断层斜切背斜轴部,沿 F₁ 断裂分布有 I 中带、II 中带(图 5)。

3.2 剖面组合变化规律

结合 3 类矿化类型、特征、空间分布以及与构造的关系,D 铜矿矿床的粉砂岩型(I 型)矿化、砂砾岩型(II 型)矿化、石英脉型(III 型)矿化的矿床的矿物组合规律受矿区的褶皱构造、F₁、F₂、F₃ 的控制,褶皱构造控制初始矿层的分布和矿物组合的分布,F₁、F₂、F₃ 为配矿构造,F₁、F₂、F₃ 次一级层间断层为容矿构造,并控制蚀变的分布(图 6)。

3.2.1 粉砂岩型矿化(I 型矿化)的矿物分带特征

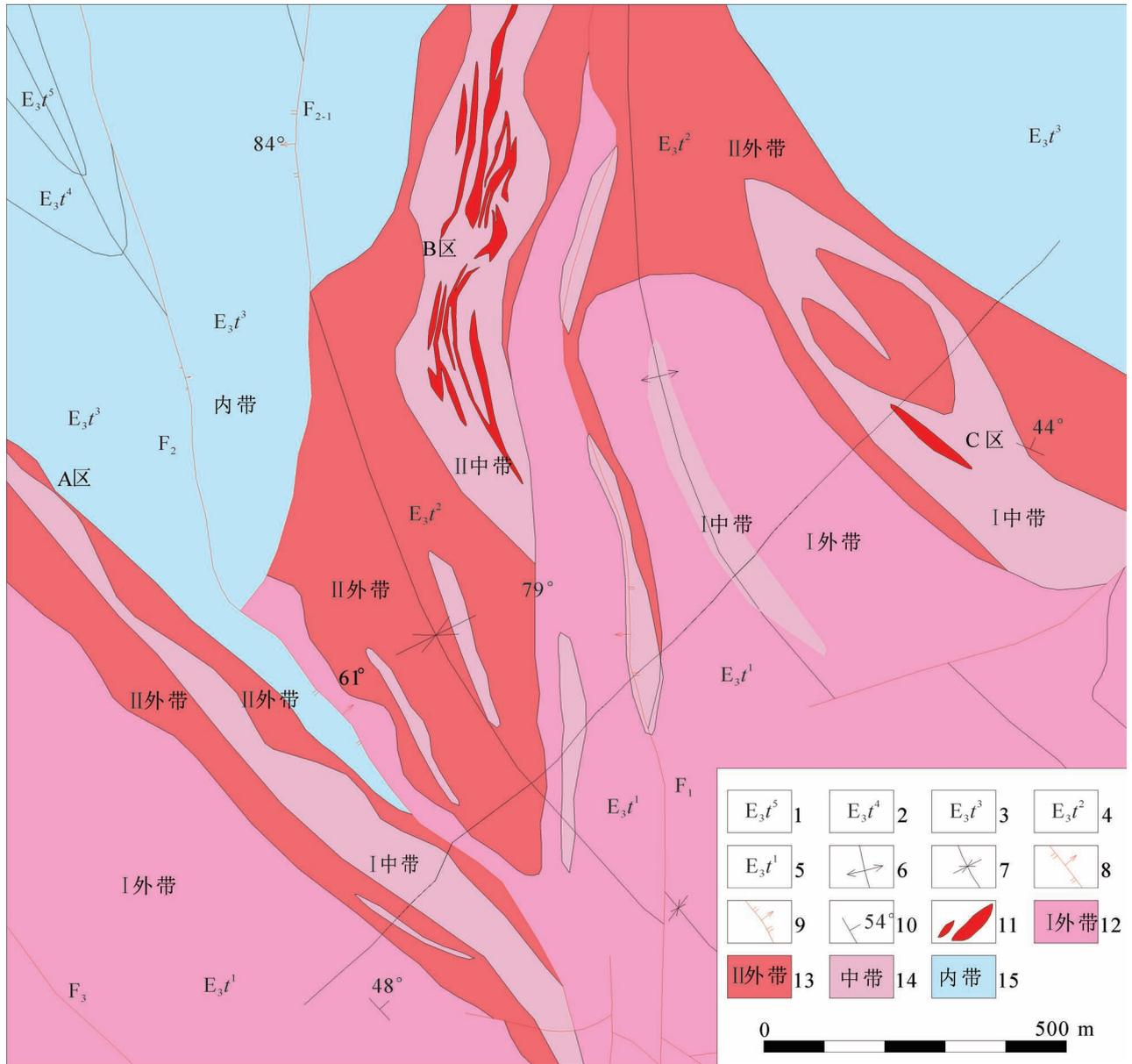


图 5 玻利维亚多尔各市 D 铜矿矿区蚀变组合分带平面图

Fig. 5 Alteration combination zoning plane of the D copper deposit in Turco City, Bolivia

1—渐新统多尔格组第五段;2—渐新统多尔格组第四段;3—渐新统多尔格组第三段;4—渐新统多尔格组第二段;5—渐新统多尔格组第一段;6—背斜构造;7—向斜构造;8—正断层;9—逆断层;10—地层产状;11—矿体;12—I 外带; 13—II 外带;14—中带;15—内带
 The Turco Formation of Oligocene: 1—the Fifth Member, 2—the Fourth Member, 3—the Third Member, 4—the Second Member, 5—the First Member; 6—anticlinal structure; 7—syncline structure; 8—normal fault; 9—reverse fault; 10—attitude of stratum; 11—ore body; 12—I outer band; 13—II outer band; 14—middle belt; 15—iner band

粉砂岩型矿化(I 型矿化)在矿区内主要位于矿区中部(F₁ 断层中部上盘)E₃t¹ 内及矿区偏南端(F₁ 断层偏南端下盘)E₃t¹ 内^①。① 硅化—矿化(灰白—蓝绿色、团块状)、石膏化(细脉状、白色)、局部泥化脉(红褐色)及方解石化(隐晶质、细脉)。② 硅化—矿化(灰白—蓝绿色、团斑状或中厚层状):其

范围最窄,处于蚀变中心,局部可见白色石英细脉,主要呈团斑状或中厚层状产出。平面上:矿化团斑长轴大体呈线状排列,可以划分为互相垂直的两个方向;剖面上:矿化团斑可以组合为多个彼此平行的带。矿化团斑从外到内发育去方解石化→硅化→Cu 矿化,而 Cu 矿化从外到内发育硅孔雀石

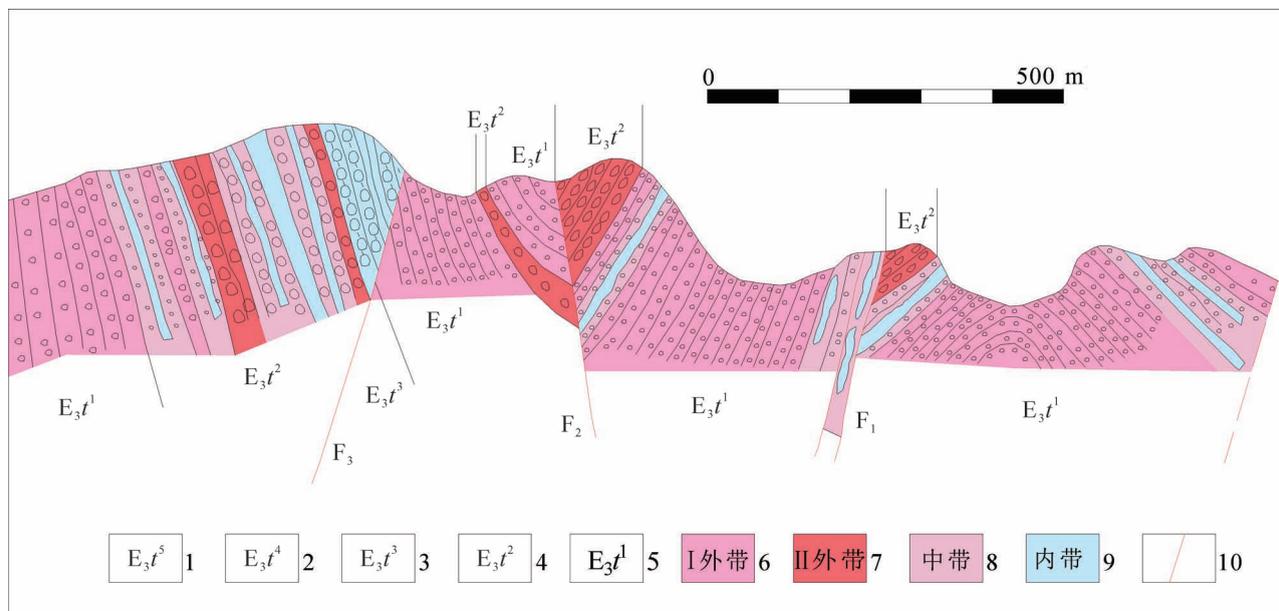


图 6 玻利维亚多尔各市 D 铜矿矿化蚀变组合组合分带模式图

Fig. 6 Zoning pattern of mineralization—alteration combination in the D copper deposit in Turco City, Bolivia

1—渐新统多尔格组第五段;2—渐新统多尔格组第四段;3—渐新统多尔格组第三段;4—渐新统多尔格组第二段;
5—渐新统多尔格组第一段;6—I 外带;7—II 外带;8—中带;9—内带;10—断层

The Turco Formation of Oligocene: 1—the Fifth Member, 2—the Fourth Member, 3—the Third Member, 4—the Second Member,
5—the First Member; 6—I outer band; 7—II outer band; 8—middle belt; 9—inner band; 10—fault

→赤铜矿→黑铜矿→自然铜。③石膏化(细脉状、白色):为近矿围岩蚀变,其分布范围比矿化范围宽,局部可叠加在矿化范围内,脉内不发育矿化。④局部泥化脉(红褐色),其常内石膏脉切割。⑤方解石化(隐晶质、细脉):其为背景蚀变,整段基本都发育隐晶质方解石,仅仅靠近矿化带而趋弱(图7)。

根据矿化类型的差异,将矿化类型划分为三类:粉砂岩型矿化(I型矿化)、砂砾岩型矿化(II型矿化)、石英脉型矿化(III型矿化)

可将粉砂岩型矿化(I型矿化)划分为3个带(I内带、I中带、I外带):①I内带:发育矿体、面状的硅化与局部石膏细脉。此带最显著的特征为硅孔雀石、赤铜矿、黑铜矿、自然铜等矿石矿物的产出(姚文勋,1975),其次见面状硅化的发育,岩石坚硬,再次有少量后期的白色石膏细脉发育,最后为不发育方解石化(隐晶质)。②I中带:发育方解石—石英脉、石膏细脉、方解石—石膏细脉、泥化(细脉—团斑)和方解石化(隐晶质)。此带最显著的特征为石膏脉与白色方解石细脉的发育,其次发育少量泥质细脉—团斑,最后为发育方解石化(隐晶质)。③I外带:发育泥化(细脉—团斑)和方解石

化(隐晶质)。此带最显著的特征为泥质细脉的大量发育,并且发育方解石化(隐晶质)(图8)。

综上所述:近矿硅化增加,并且矿化范围叠加石膏脉,围岩泥质(脉)含量减少,方解石化(隐晶质)发育减弱;远离矿化段硅化减弱,石膏脉消失,方解石化增强,泥化增强。

3.3.2 砂砾岩型矿化(II型矿化)的矿物分带特征

砂砾岩型矿化(II型矿化)为矿区的主要矿化类型。在矿区内主要为受构造控制不明显的矿体(图9、图10),同时也有明显受构造控制的矿体(图9:F₁断裂带内)。

①蚀变类型:主要为硅化—矿化、石膏化、碳酸盐化、泥化、褪色作用(张良钜等,2015;赵珍梅,2010)。②硅化—矿化:其范围最窄,处于蚀变中心,局部可见白色石英细脉,主要呈团斑状或中厚层状产出。矿石矿物为孔雀石、自然铜、黑铜矿、赤铜矿,孔雀石包裹三者,而自然铜处于孔雀石和黑铜矿接触带内,从矿化中心到外围依次为:赤铜矿→黑铜矿→自然铜→孔雀石。③石膏化:为近矿围岩蚀变,其分布范围比矿化范围宽,局部可叠加在矿化范围内,脉内不发育矿化。④碳酸盐化:其主要以方解石泥晶的形式产出于泥质胶结物中,在矿石内



图 7 玻利维亚多尔各市 D 铜矿围岩蚀变特征照片: (a) 具少量方解石的白色石膏脉切断红褐色泥质脉; (b) 石膏细脉与团斑状矿化; (c) 硅质增加与泥质减少的含砾砂岩型矿石; (d) 砾石周围的泥化

Fig. 7 Photos of alteration in the D copper deposit in Turco City, Bolivia; (a) gypsum veins with a small amount of calcite cutting off the reddish brown argillaceous veins; (b) gypsum veinlets and blotchy mineralization; (c) gravelly sandstone-type ores with increased siliceous and decreased argillaceous; (d) sludging around gravel

含量较少, 偶见方解石细脉及晶簇。⑤泥化: 分为 3 种类型。其一为砾石泥化, 在大的砾石内见云母片以及泥化的团斑, 显示其发生了泥化现象, 为矿质的再次富集提供了条件; 其二为泥质胶结物, 胶结物具有紫褐色、灰褐色、灰白色、灰绿色等。紫褐色与灰褐色胶结物含方解石泥晶, 滴稀盐酸可见起泡现象, 为弱碱性—氧化性界面。灰白色、灰绿色胶结物硅质含量较高, 可能受深部富热水作用, 滴稀盐酸不起泡, 为中酸性—弱还原性界面。从钻孔揭露特征看, 灰白色、灰绿色胶结物主要呈团斑状产出, 其被紫褐色、灰褐色所包裹, 显示钻孔揭露部分早期为中酸性—弱还原性界面, 后期遭到弱碱性—氧化性流体的交代作用。其三为泥质脉, 红褐色(紫褐色、灰褐色)泥质细脉, 其发育较为普遍, 少量地段发育较

多。⑥褪色作用: 红褐色砂岩褪色为灰白色砂岩, 其显微结构和胶结物类型发生了变化, 同时形成了浸染状矿石(李院强, 2016)。

脉体发育 3 种类型: 白色(泥质、硅质、石膏)脉、红褐色(紫褐色、灰褐色)泥质脉、白色石英脉。从脉体特征及切割关系看, 白色脉经常被红褐色泥质脉从中心充填, 显示其形成于白色脉之后, 这也显示早期的中酸性—弱还原性界面, 后期的弱碱性—氧化性流体作用, 而在矿化体产出部位, 没有见脉体产出, 但显示硅化增强与方解石泥晶的消失, 则可以推测白色石英脉为最后一期脉体。

可将砂砾岩型矿化(Ⅱ型矿化)划分为 3 个带(Ⅱ内带、Ⅱ中带、Ⅱ外带): ①Ⅱ内带: 发育矿体、面状的硅化与局部石膏细脉。此带最显著的特征为硅

孔雀石、赤铜矿、黑铜矿、自然铜等矿石矿物的产出,其次见面状硅化的发育,岩石坚硬,再次有少量后期的白色石膏细脉发育,最后为不发育方解石化(隐晶质)。② II 中带:发育方解石—石英脉、石膏细脉、方解石—石膏细脉、泥化(细脉—团斑)和方解石化(隐晶质)。此带最显著的特征为石膏脉与白色方解石细脉的发育,其次发育少量泥质细脉—团斑,最后为发育方解石化(隐晶质)。③ II 外带:发

脉、方解石—石膏细脉、泥化(细脉—团斑)和方解石化(隐晶质)。此带最显著的特征为石膏脉与白色方解石细脉的发育,其次发育少量泥质细脉—团斑,最后为发育方解石化(隐晶质)。③ II 外带:发

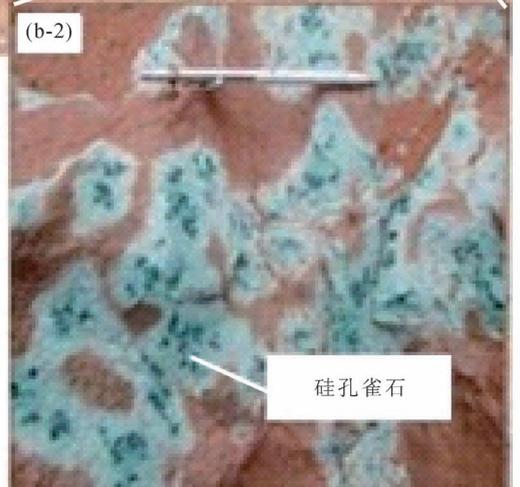
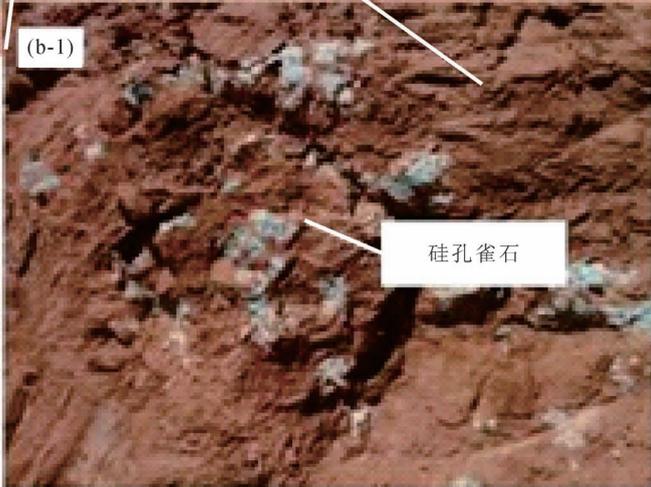
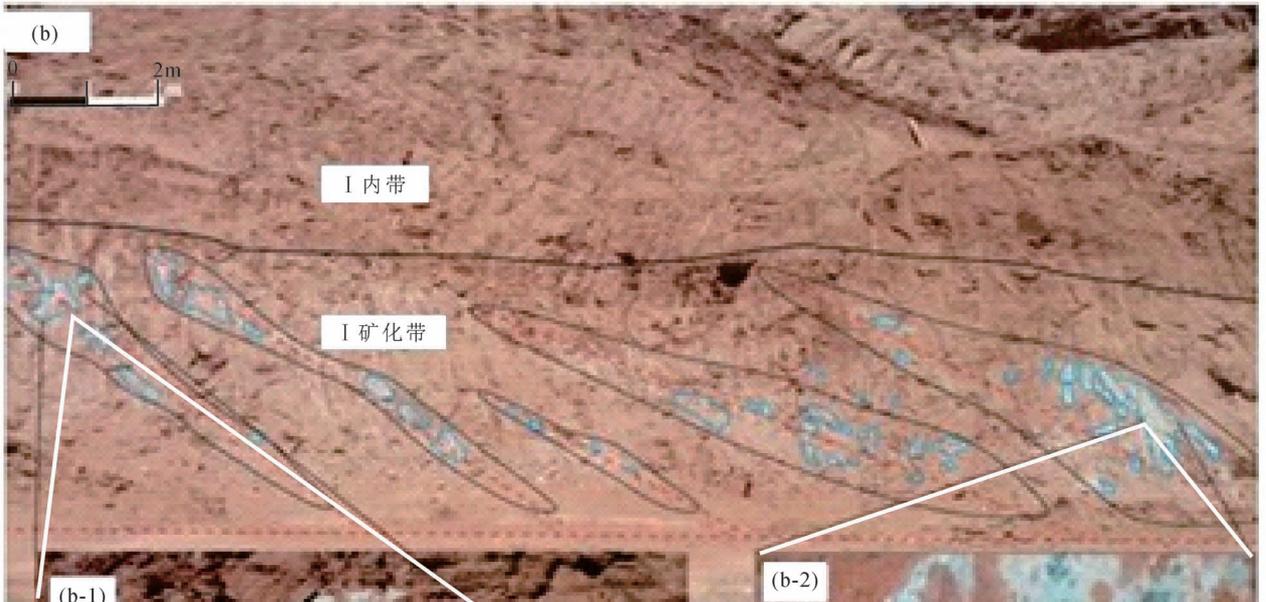
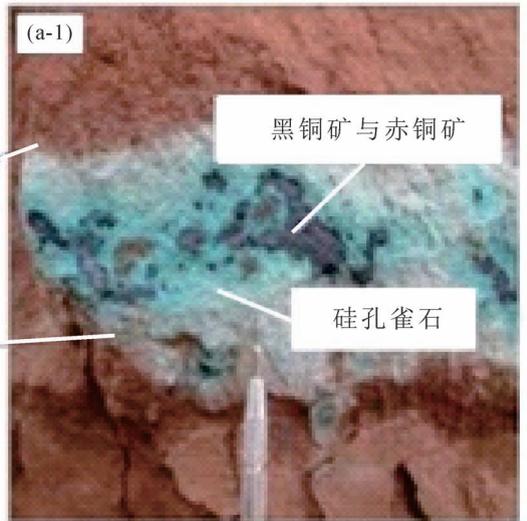
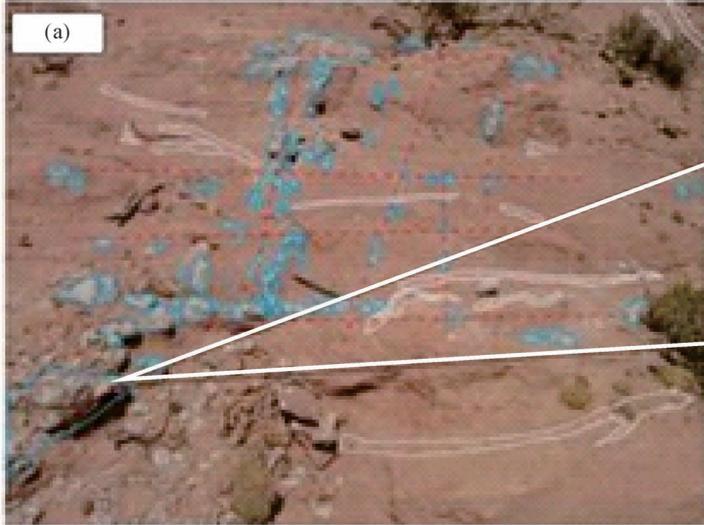


图 8 玻利维亚多尔各市 D 铜矿粉砂岩型矿化 (I 型矿化) 的矿物组合分带特征: (a) 地表沿裂隙分布的孔雀石; (a-1) 硅孔雀石内包裹的黑铜矿与赤铜矿; (b) I 矿化带地表孔雀石分布特征; (b-1) I 矿化带沿层间裂隙分布的硅孔雀石; (b-2) I 矿化带呈斑块状分布的硅孔雀石

Fig. 8 Siltstone-type mineralization (type-I) mineral assemblage zoning characteristics of the D copper deposit in Turco City, Bolivia; (a) malachite distribution along fissures on the surface; (a-1) black copper and cuprite covered with malachite; (b) surface distribution of malachite mineralization belt I; (b-1) chrysocolla along the interlaminar fracture in mineralized belt I; (b-2) plaques chrysocolla in mineralized belt I

育泥化(细脉—团斑)和方解石化(隐晶质)。此带最显著的特征为泥质细脉的大量发育,并且发育方解石化(隐晶质)。

综上所述:近矿硅化增加,并且矿化范围叠加石膏脉,围岩泥质(脉)含量减少,方解石化(隐晶质)发育减弱;远离矿化段硅化减弱,石膏脉消失,方解石化增强,泥化增强。

3.2.3 石英脉型矿化(III型矿化)的矿物分带特征

石英脉型矿化(III型矿化)发育于 E_3t^3 内,细脉状的石英脉型矿化,其走向大致与地层平行而倾向

相反,单条脉体具扭张性特征,可见多条细脉平行产出,也可见主脉与支脉的分支复合现象(图 11)。
① 蚀变类型:矿化(硅孔雀石、黑铜矿、自然铜)、硅化(脉状、白色、烟灰色)、泥化(红褐色);
② 矿化:可以划分为两种类型与两个期次:第一期为浸染状矿化,

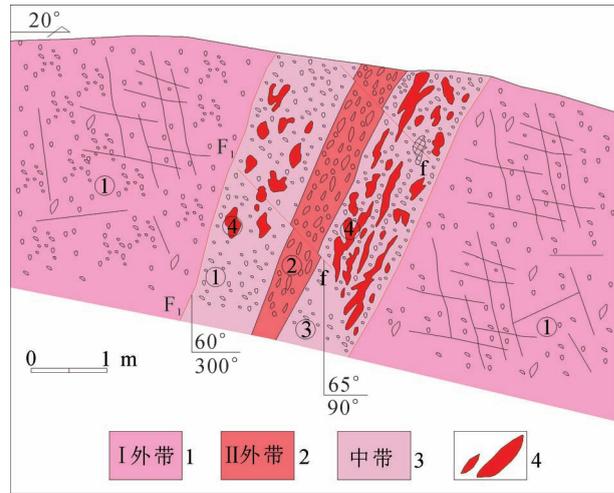


图 9 玻利维亚多尔各市 D 铜矿 DC006 点 矿体剖面素描图

Fig. 9 Sketch drawing of ore body section at DC006

in the D copper deposit in Turco City, Bolivia

1—I 外带; 2—II 外带; 3—中带; 4—矿体; ①浅紫红色细—中砂岩, 含团斑状 Cu 矿化; ②灰白色含砾砂岩; ③浅灰绿色含砾中粗砂岩, 矿化强; ④Cu 矿化。F: 靠近断裂面矿化强, 在裂面上见方解石薄膜; f: 穿层裂隙

1—outer band I; 2—outer band II; 3—middle belt; 4—ore body; ① light purplish red fine—medium-grained sandstone, containing porphyritic Cu mineralization; ② gray-white gravelly sandstone; ③ light gray-green gravel in coarse sandstone, strong mineralization; ④ Cu mineralization. F: mineralization is strong near the fracture surface, and calcite thin film can be seen on the fracture surface; f: penetrating crack

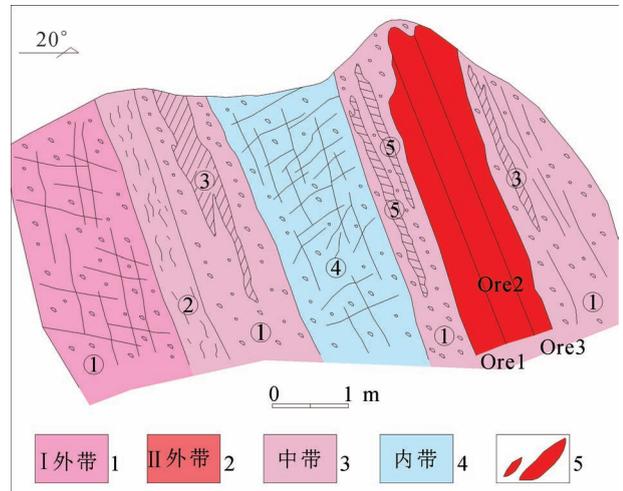


图 10 玻利维亚多尔各市 D 铜矿 DC009 点 矿体剖面素描图

Fig. 10 Sketch drawing of ore body section at DC009

in the D copper deposit in Turco City, Bolivia

1—I 外带; 2—II 外带; 3—中带; 4—内带; 5—矿体; ①紫红—紫褐色细—中砂岩, 右侧内见浅灰绿—浅灰色细—中砂岩残留; ②浅灰绿色矿化体; ③紫红—紫褐色粉砂—泥质粉砂岩, 内见浅灰绿色蚀变体残留; ④浅灰绿—浅黄色细—中砂岩; ⑤浅紫—浅灰白色蚀变残留体主矿体下盘; Ore 主矿体: 划分为 3 个带, Ore1 为绿—浅蓝绿色孔雀石—黑铜矿—赤铜矿化带, Ore2 为绿色孔雀石—赤铜矿化带, Ore3 为浅绿孔雀石—赤铜矿化带

1—outer band I; 2—outer band II; 3—middle belt; 4—inner band; 5—ore body; ① purplish red—purplish brown fine—medium-grained sandstone, the right side of the light gray-green—light gray fine—medium-grained sandstone residue; ② light gray-green mineralized body; ③ purplish red—purplish brown silty sand—argillaceous siltstone, pale gray-green corrosion variation remains; ④ light grey-green—light yellow fine—medium-grained sandstone; The footwall of the main ore body of the alteration residual body with light purple and pale gray; Ore main Ore body: Ore1 is green—light blue-green malachite—black copper—cuprite belt, Ore2 is green malachite—cuprite belt, Ore3 is light green malachite—cuprite belt

其矿石矿物与石英为同期产物,可见石英呈乳白色、烟灰色、浅肉红色、浅蓝绿色,显示出氧化性与还原性流体的物理化学转换界面成矿特征,脉体宽2~30 cm,其矿石矿物为自然铜、黑铜矿、孔雀石、赤铜矿等,也可见被含量 Cu^+ 、 Cu^{2+} 浸染的黑灰

色、浅蓝绿色石英,局部浸染为团块状矿化,大小为1~5 mm;第二期为细脉状矿化,其主要为矿石矿物而脉石矿物较少,产出于第一期矿化脉中部的裂隙内,脉宽1~2 cm,矿石矿物为自然铜、黑铜矿、孔雀石、赤铜矿等,裂隙局部发育孔洞构造,局部孔洞内

表4 玻利维亚多尔各市D铜矿元素地球化学特征参数表(单位: $\times 10^{-6}$)

Table 4 Geochemical characteristic parameters of elements (unit: $\times 10^{-6}$) in D copper deposit in Turco City, Bolivia

元素	极大值	极小值	算术平均值	标准离差	变化系数	背景值	异常下限 计算值	异常下 限取值	元素丰度 值(黎彤)	元素浓集 系数
Al	43100	3000	11184.87	1.65	0.59	9674.33	26462.32	26000	83000	0.13
Fe	50800	5100	27770.86	1.32	0.26	27100.57	47186.37	40000	58000	0.48
Ca	152000	1100	22519.08	2.62	0.95	14836.85	102086.16	100000	52000	0.43
Na	7600	100	806.02	2.10	1.12	546.61	2406.65	2000	23000	0.04
K	8100	800	2196.62	1.42	0.40	2035.57	4095.32	4000	17000	0.13
Mg	18100	800	4637.22	1.98	0.71	3667.62	14419.41	14000	28000	0.17
Ti	2540	50	811.30	1.73	0.56	709.19	2119.06	2000	6400	0.13
Cu	117450	9.4	2971.68	6.55	3.97	103.98	4466.94	4000	63	47.17
Ag	51.3	0.01	0.92	4.34	4.41	0.07	1.39	1	0.08	11.46
As	154.5	0.8	2.97	1.57	1.81	2.39	5.89	4	2.2	1.35
B	30	10	11.16	-	0.47	-	-	-	13	0.86
Ba	4240	20	344.76	2.28	1.26	225.32	1170.71	1000	390	0.88
Be	2.55	0.12	0.57	1.43	0.41	0.53	1.09	1	1.3	0.44
Bi	2.08	0.02	0.07	1.47	1.00	0.06	0.14	0.1	0.004	18.21
Cd	8.6	0.01	0.30	2.59	1.81	0.16	1.10	1	0.2	1.49
Co	20.5	1.7	7.65	1.46	0.39	7.18	15.26	15	25	0.31
Cr	95	6	23.68	1.46	0.44	21.70	46.17	40	110	0.22
Cs	2.62	0.18	0.64	1.44	0.47	0.59	1.21	1	1.4	0.46
Ga	12.15	1.28	4.78	1.44	0.35	4.50	9.39	9	18	0.27
Ge	0.3	0.05	0.12	1.46	0.45	0.11	0.24	0.2	1.4	0.09
Hf	1.17	0.02	0.34	1.71	0.55	0.30	0.87	0.8	1.5	0.23
In	0.193	0.006	0.03	1.48	0.48	0.03	0.06	0.05	0.1	0.31
Li	154	3.2	18.65	1.88	0.79	14.80	52.50	50	21	0.89
Mn	2200	76	546.50	1.54	0.50	492.81	1164.68	1000	1300	0.42
Mo	7.06	0.29	1.61	1.67	0.48	1.43	3.99	3	1.3	1.24
Nb	3.66	0.05	0.30	2.21	1.15	0.20	0.99	0.9	19	0.02
Ni	32.6	2.8	12.61	1.43	0.36	11.91	24.20	20	89	0.14
P	2450	130	896.45	1.57	0.41	825.50	2033.29	1500	1200	0.75
Pb	40.6	1	9.06	1.49	0.45	8.29	18.41	15	12	0.76
Rb	31.9	3.1	12.79	1.39	0.34	12.14	23.36	20	78	0.16
Sb	6.43	0.05	0.25	1.59	1.37	0.20	0.50	0.5	0.6	0.41
Sc	9.5	0.9	4.77	1.40	0.31	4.57	8.97	7	0.08	59.57
Sn	3.3	0.2	0.96	1.38	0.35	0.39	0.74	1	1.7	0.57
Sr	9940	10.9	695.35	4.31	1.71	260.81	4838.61	2000	480	1.45
Te	0.17	0.01	0.02	-	0.75	-	-	-	0.0006	33.95
Th	20.2	0.7	7.65	1.51	0.39	7.10	16.18	14	5.8	1.32
Tl	0.38	0.03	0.09	1.42	0.43	0.09	0.18	0.15	0.48	0.20
U	22.7	0.05	0.64	1.52	1.25	0.55	1.27	1	1.7	0.38
V	149	0.26	63.82	2.30	0.35	55.88	294.94	290	140	0.46
W	100	0.05	2.34	2.91	4.92	0.13	1.11	1	1.1	2.12
Zn	412	7	82.77	1.77	0.64	70.10	219.62	200	94	0.88
Zr	188	1	11.25	1.81	0.98	8.80	28.84	20	130	0.09
稀土	469.6	2.5	126.91	1.71	0.53	116.18	338.92	250	-	-

见充填红褐色粘土。同时与矿化脉配套的还存在与其走向垂直的白色石英脉。③硅化(脉状、白色、烟灰色):主要以白色石英脉、烟灰色石英脉产出;④泥化(红褐色):其走向大致与地层平行而倾向相反,单条脉体具扭张性特征,可见多条细脉平行产出,也可见主脉与支脉的分支复合现象。局部见切割早期的石英脉。

可将石英脉型矿化(Ⅲ型矿化)划分为 2 个带(Ⅲ内带、Ⅲ外带):①Ⅲ内带:主要发育矿化、硅化。此带最显著的特征为发育大量矿化脉及石英脉。②

Ⅲ外带:主要发育泥质脉及石英脉。总体而言,从地表填图的特征来看,此类矿化类型矿石量较少,蚀变类型简单。

4 多尔各市 D 铜矿元素组合及空间变化规律

在矿区共采集地球化学样品 1263 件,其中地表样品 806 件、钻孔样品 457 件。其中主含矿地层第二岩性段采样 731 件,含矿样品 121 件,第一岩性段采样 251 件,第三岩性段采样 281 件。所有样品均

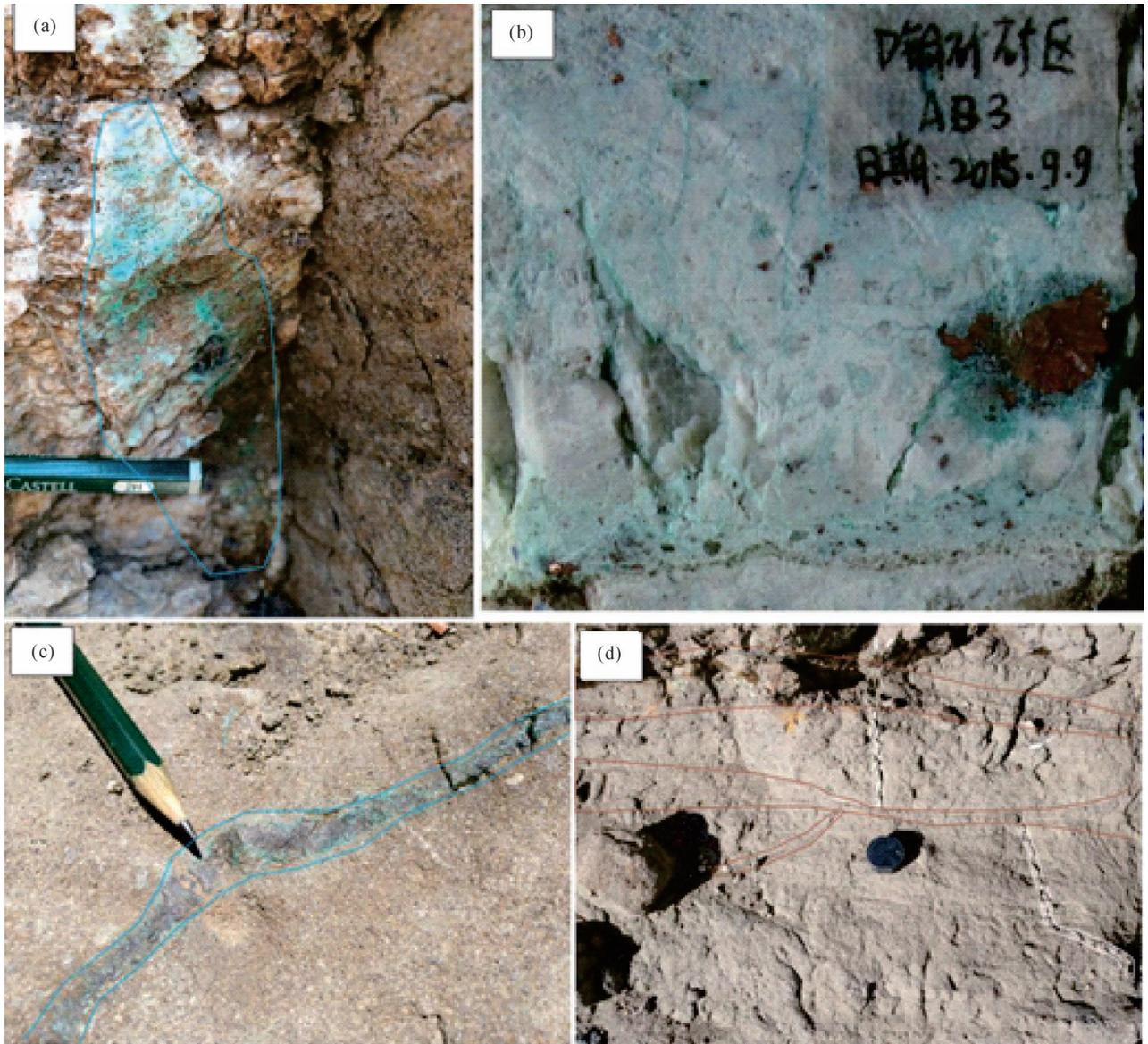


图 11 玻利维亚多尔各市 D 铜矿石英脉型矿化(Ⅲ型矿化)矿物组合分带特征:(a):断层破碎带附近的孔雀石化;(b):褪色蚀变砂岩内的孔雀石化;(c):孔雀石化沿地表裂隙展布;(d):地表普见断裂裂隙分布

Fig. 11 Mineral assemblage zoning characteristics of the quartz vein-type mineralization (type III) from the D copper deposit in Turco City, Bolivia: (a): petrification of peacock near fault fracture zone; (b): petrification of peacock in faded altered sandstone; (c): spreading of peacock along cracks in the ground; (d): fractures and fissures are common on the surface

由玻利维亚 ALS 化验室制样,并分析测定,除 Au 元素采用半定量法分析外,其余 50 种元素(Al、Fe、Ca、Na、K、Mg、Ti、S、Cu、Ag、As、B、Ba、Be、Bi、Cd、Co、Cr、Cs、Ga、Ge、Hf、Hg、In、Li、Mn、Mo、Nb、Ni、P、Pb、Rb、Re、Sb、Sc、Se、Sn、Sr、Ta、Te、Th、Tl、U、V、W、Zn、Zr、La、Ce、Y)均采用王水、ICP-AES、ICP-MS 分析方法进行测定。

据表 4 可知:

(1) 矿区地层内相对集中的元素有 Cu、Ag、As、Bi、Cd、Mo、Sc、Sr、Te、Th、W。其中:Cu、Sc、Sr、Te 元素非常集中,Ag、Bi 元素明显集中,As、Cd、Mo、Sr、Th、W 元素不明显集中。

(2) 相对分散的元素有 Al、Fe、Ca、Na、K、Mg、Ti、B、Ba、Be、Co、Cr、Cs、Ga、Ge、Hf、In、Li、Mn、Nb、Ni、P、Pb、Rb、Sb、Sn、Tl、U、V、Zn、Zr。

(3) 均匀分布的元素有 Fe、K、B、Be、Co、Cr、Cs、Ga、Ge、In、Mo、Ni、P、Pb、Rb、Sc、Sn、Th、Tl、V; 分布较均匀的元素有 Al、Ca、Mg、Ti、Hf、Li、Mn、Te、Zn、Zr、稀土 La+Ce+Y; 不均匀分布的元素有 Na、As、Ba、Bi、Cd、Nb、Sb、Sr、U; 较不均匀分布的元素有 Cu、Ag、W。

(4) Al、Fe、Ca、K、Mg、Ti、Cu、As、B、Be、Bi、Cd、Co、Cr、Cs、Ga、Ge、Hf、In、Li、Mn、Mo、Nb、Ni、P、Pb、Rb、Sb、Sc、Sn、Sr、Th、Tl、U、V、W、Zn、Zr、稀土 La+Ce+Y 元素符合对数正态分布; Na、Ag 元素基本符合对数正态分布; Ba、Te 元素不符合正态分布。

4.1 主量元素不同层位含量特征

将矿区内采集的 1263 件地球化学样品的主量元素含量按不同地层的 4 个岩性段分别求取算术平均值,对比元素含量在不同地层中的变化情况(表

5, 图 12)。具体不同层位主量元素地球化学特征如下:

(1) Ca 元素在 E_3t^1 灰白色石膏或碳酸钙裂隙脉含量最高,在 E_3t^2 灰白色石膏或碳酸钙裂隙脉含量高,在 E_3t^1 浅色围岩蚀变内、断层 F_4 穿过的 E_3t^4 含量偏高。

(2) Cu 元素在 E_3t^1 和 E_3t^2 矿段(浅色)内含量最高。

(3) 在 E_3t^1 中,浅色层中 Cu 元素和 Ca 元素含量远高于紫色层,紫色层中 Al、Fe、Mg 元素高于浅色层,紫色层中 K 元素略高于浅色层,浅色层中 S 元素远高于紫色层。

(4) 在 E_3t^2 中,浅色层中 Cu 元素和 Ca 元素含量远高于紫色层。

4.2 主量元素相关性分析

相关性分析是指对两个或多个具备相关性的变量元素进行分析,从而衡量两个变量因素的相关密切程度。相关性的元素之间需要存在一定的联系或者概率才可以进行相关性分析。分析 Cu 元素与 Al、Fe、Ca、Na、K、Mg、Ti 元素之间的直线相关方向和密切程度,元素 Pearson 相关性系数值为: Al 0.075*、Fe 0.092**、Ca 0.062*、Na 0.045、K 0.072*、Mg 0.083**、Ti 0.088** (表 6)。表明 Cu 元素与 Al、Ca、K 元素相关性在 0.05 水平上是显著的,为正向极弱相关;Cu 元素与 Fe、Mg、Ti 元素相关性在 0.01 水平上是显著的,为负向极弱相关;Cu 元素与 Na 元素无相关性。

4.3 微量元素不同层位含量特征

将矿区内采集的 1136 件地球化学样品的微量

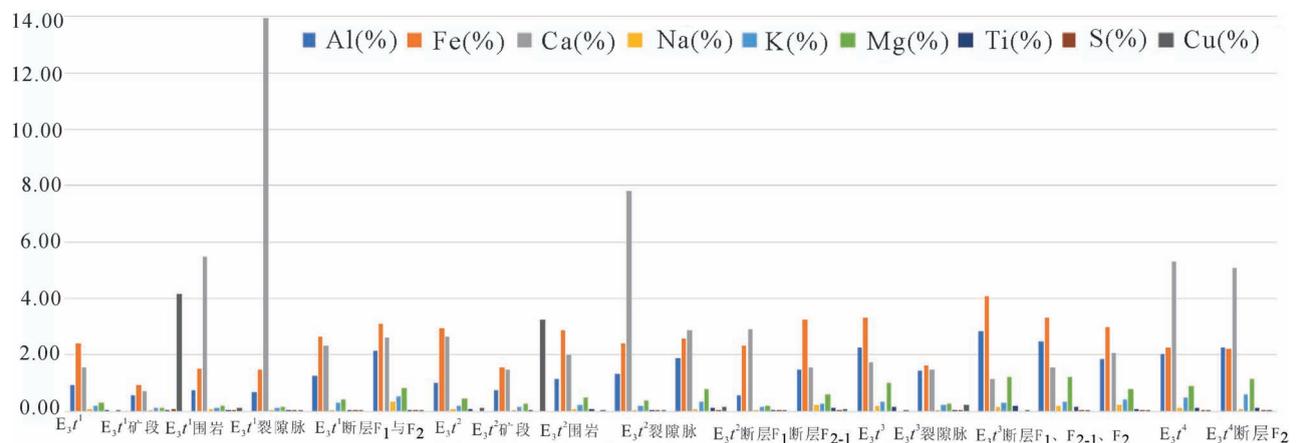


图 12 玻利维亚多尔各市 D 铜矿主量元素在不同层位中含量变化直方图

Fig. 12 Histogram of the content change of main elements in different layers of the D copper deposit in Turco City, Bolivia



图 13 玻利维亚多尔各市 D 铜矿微量元素在 E_3t^1 、 E_3t^2 和 E_3t^3 中含量变化直方图

Fig. 13 Histogram of trace elements contents in E_3t^1 , E_3t^2 and E_3t^3 in the D copper deposit, Turco City, Bolivia

元素含量按不同地层的 4 个岩性段分别求取算术平均值(见表 7),对比元素含量在不同地层中的变化情况,具体不同层位微量元素地球化学特征如下:

在 E_3t^1 中, Ba、Mn、P、Sr 元素含量远高于其他元素, V、Zr 元素含量略高于其他元素;其中浅色矿

段内 Ba、Sr 元素含量偏高,浅色围岩蚀变内 Ba、Mn、P 元素含量偏高,浅色石膏或碳酸钙脉 Ba、P 元素含量偏高(图 13)。

在 E_3t^2 中, Ba、Mn、P、Sr 元素含量远高于其他

表 5 玻利维亚多尔各市 D 铜矿区不同地层主量元素含量 (%) 变化表

Table 5 Variation of main elements contents (%) in different strata in D copper deposit in Turco City, Bolivia

地层代号及地质体	岩性特征	样品	A	Fe	Ca	Na	K	Mg	Ti	S	Cu	
E_3t^1		紫红色细—粉砂岩	177	0.94	2.41	1.57	0.07	0.20	0.31	0.04	-	0.01
E_3t^1	矿段	灰绿色含铜细砂岩	7	0.56	0.92	0.71	0.02	0.12	0.11	0.01	0.08	4.17
	围岩蚀变	灰白色细—粉砂岩	9	0.76	1.51	5.49	0.07	0.12	0.20	0.03	0.03	0.12
	裂隙脉	灰白色石膏、碳酸钙细脉	2	0.69	1.49	13.95	0.02	0.14	0.18	0.02	0.07	0.00
	断层 F_1	紫红色泥岩、泥质粉砂岩	6	1.25	2.67	2.32	0.04	0.29	0.41	0.03	0.02	0.03
	断层 F_2	紫红色细—粉砂岩	1	2.16	3.09	2.61	0.33	0.54	0.84	0.03	0.03	0.00
E_3t^2		紫褐色含砾砂岩、砂砾岩	550	1.01	2.96	2.67	0.07	0.21	0.44	0.08	-	0.11
E_3t^2	矿段	灰绿色含铜含砾砂岩、含铜砂砾岩	67	0.76	1.56	1.49	0.04	0.16	0.25	0.04	-	3.24
	围岩蚀变	灰白色含砾砂岩、砂砾岩	157	1.16	2.89	2.00	0.07	0.22	0.50	0.09	-	0.05
	裂隙脉	灰白色石膏、碳酸钙细脉	10	1.33	2.42	7.81	0.04	0.20	0.38	0.06	0.04	0.03
		乳白色石英细脉	6	1.88	2.59	2.87	0.08	0.33	0.77	0.11	0.04	0.17
	断层 F_1	灰褐色含砾砂岩	6	0.55	2.34	2.93	0.04	0.16	0.18	0.05	0.02	0.01
断层 F_{2-1}	灰褐色细砂岩	10	1.49	3.25	1.57	0.22	0.28	0.61	0.14	0.02	0.10	
E_3t^3		灰绿色含凝灰质含砾砂岩	93	2.26	3.34	1.75	0.21	0.34	1.00	0.16	-	0.01
E_3t^3	裂隙脉	烟灰色、乳白色玉髓、石英	9	1.47	1.64	1.49	0.07	0.25	0.25	0.06	0.03	0.24
	断层 F_1	浅灰绿色含凝灰质细砂岩	1	2.84	4.09	1.16	0.16	0.32	1.24	0.20	0.00	0.01
	断层 F_{2-1}	浅灰褐色细—中砂岩	14	2.49	3.33	1.58	0.18	0.34	1.22	0.15	0.01	0.00
	断层 F_2	浅灰绿色砂岩	2	1.87	3.01	2.08	0.22	0.44	0.78	0.10	0.02	0.00
E_3t^4		浅紫红色细—中砂岩	4	2.04	2.26	5.31	0.11	0.48	0.91	0.11	0.01	0.00
E_3t^4	断层 F_2	灰褐色含泥质粉—细砂岩	5	2.27	2.21	5.10	0.10	0.58	1.17	0.11	0.01	0.00

元素, V、Zn 元素含量略高于其他元素;其中浅色矿段和围岩蚀变内 P、Sr 元素含量偏高,浅色石英脉 Sr 元素含量偏高(图 14)。

在 E_3t^3 中, Ba、Mn、P、Sr 元素含量远高于其他元素, V、Zn 元素含量略高于其他元素;其中浅色玉髓脉 Ba、Sr 元素含量偏高;(图 15)

在 E_3t^4 中, Ba、Mn、P、Sr 元素含量远高于其他元素, V、Zn 元素含量略高于其他元素。

4.4 微量元素组合聚类分析

聚类分析主要是遵循“物以类聚”的原则,研究不同对象之间的亲疏关系,归纳和提炼元素之间的组合关系,并通过元素组合特征解释成矿过程和成矿元素的迁移、富集规律(方明, 2011)。

将微量元素进行聚类分析,取相关系数为 0.7 以上的集群组合,结合系统聚类谱系图(详见图 13),将微量元素组合分为 Ga—Li—Be—Co—Sc、Rb—Tl、Hf—Zr、Sn—Th—Ge、U—V、

Cu—Ag 六种组合, Ga—Li—Be—Co—Sc 组合代表矿区主要造岩元素组合; Hf—Zr 组合代表矿区高温成矿元素组合; U—V 组合代表矿区“红层”元素组合; Cu—Ag 组合代表矿区矿化元素组合异常,说明 Cu、Ag 元素共伴生。

4.5 元素地球化学聚类分析

聚类分析主要是遵循“物以类聚”的原则,研究不同对象之间的亲疏关系,归纳和提炼元素之间的组合关系,并通过元素组合特征解释成矿过程和成矿元素的迁移、富集规律(方明, 2011)。

表 6 玻利维亚多尔各市 D 铜矿矿石中元素 Pearson 相关性系数值明细表

Table 6 Values of Pearson correlation coefficient of elements of the ores in D copper deposit in Turco City, Bolivia

元素	Cu	Al	Fe	Ca	Na	K	Mg	Ti
Cu	1	0.075 *	0.092 **	0.063 *	0.045	0.072 *	0.083 **	0.088 **
Al		1	0.892 **	0.984 **	0.942 **	0.990 **	0.990 **	0.989 **
Fe			1	0.838 **	0.740 **	0.905 **	0.900 **	0.937 **
Ca				1	0.979 **	0.986 **	0.960 **	0.959 **
Na					1	0.950 **	0.913 **	0.913 **
K						1	0.979 **	0.985 **
Mg							1	0.994 **
Ti								1

注: *—在 0.05 水平(双侧)上显著相关。 **—在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

表 7 玻利维亚多尔各市 D 铜矿不同地层微量元素含量 ($\times 10^{-6}$) 变化表Table 7 Changes of trace elements contents ($\times 10^{-6}$) in different strata in D copper deposit in Turco City, Bolivia

地层代号及地质体	岩性特征	样品	Ag	As	B	Ba	Be	Bi	Cd	Co	Cr	Cs	Ga	
E_3t^1		紫红色细—粉砂岩	177	0.05	3.97	12.59	241.64	0.45	0.11	0.32	6.14	19.21	1.01	3.34
E_3t^1	矿段	灰绿色含铜细砂岩	7	7.12	3.30	10.00	930.00	0.31	0.10	0.11	2.54	8.57	0.53	1.93
	围岩蚀变	灰白色细—粉砂岩	9	0.22	4.06	16.00	646.67	0.25	0.06	0.44	4.21	12.56	0.72	2.36
	裂隙脉	灰白色石膏、碳酸钙细脉	2	0.02	6.30	20.00	1120.00	0.41	0.06	0.50	3.45	8.00	1.22	2.37
E_3t^2		紫褐色含砾砂岩、砂砾岩	550	0.48	2.78	10.85	300.13	0.59	0.06	0.34	7.75	26.10	0.60	4.90
E_3t^2	矿段	灰绿色含铜含砾砂岩、含铜砂砾岩	67	7.83	5.21	10.00	550.00	0.43	0.07	0.16	4.49	26.37	0.37	3.82
	围岩蚀变	灰白色含砾砂岩、砂砾岩	157	0.74	2.26	10.19	460.70	0.60	0.07	0.22	7.75	24.93	0.54	5.28
	裂隙脉	灰白色石膏、碳酸钙细脉	10	0.20	4.67	15.00	770.00	0.54	0.06	0.43	6.27	22.60	0.78	4.22
		乳白色石英细脉	6	1.93	3.62	12.50	1181.67	0.57	0.11	0.23	8.45	17.50	0.54	4.98
E_3t^3		灰绿色含凝灰质含砾砂岩	93	0.09	1.73	11.43	371.61	0.79	0.07	0.23	12.66	16.89	0.54	6.92
E_3t^3	裂隙脉	烟灰色、乳白色玉髓、石英	9	1.38	1.47	10.00	1663.33	0.40	0.06	0.12	4.06	15.33	0.40	2.63
E_3t^4		浅紫红色细—中砂岩	4	0.02	1.75	12.50	420.00	1.17	0.07	0.78	6.68	11.75	0.85	5.53

将 40 种地球化学元素进行聚类分析,取相关系数为 0.7 以上的集群组合,结合系统聚类谱系图(详见图 14),将矿区元素组合分为 Mg—Li—Al—Ca—K—Rb、Ti—Hf、Fe—Co、Sn—Th、U—V、Cu—Ag 6 种组合,其中:Mg—Li—Al—Ca—K—Rb 组合为矿区主要造岩元素组合、Fe—Co 组合为矿区主要的亲铁元素组合、U—V 组合为矿区“红层”元素组合、Cu—Ag 组合为矿区矿化元素组合异常,说明 Cu、Ag 元素伴生。

4.6 元素地球化学因子分析

因子分析方法是通过对研究变量之间的协方差矩阵的内部结构,将原来较多的变量组合成少数的“因子”。通过因子可以再现原始变量之间的相关关系,提示产生这些关系的内在原因,从而有助于探索事物的因果联系(方明,2011)。同一因子中,相同正或负载荷的绝对值较大的元素(化合物)间,在各该因子中是相关的,它们的聚合可以看作各因子的特征组合,反映相关物质属性。特征根 λ 最大或较大的因子,反映研究区内最重要或较重要的物质属性;与特征组合载荷值的正号或负号相关联的各数据点计量值的空间变化反映相关物质属性的空间变化,从而揭示某种物质属性的空间分布。不同因子所揭示的一类(特征组合的载荷值符号相同时)或两类(主要荷载元素的载荷值分为正负两种符号时)物质属性都是某种主导地质作用的结果,所以,因子计量的趋势变化一定程度上表达着某种地质作用的因果关联(顾锡莲等,2008)。因子分析得到矿化元素组合,可绘制其异常图和指示元素异常图,根据异常的空间展布特征与地质因素密切相关性,反

映成矿作用及其演化信息,从而进行成矿预测,提出隐伏矿定位预测靶区。

将 40 种地球化学元素分析成果经对数变换后进行因子分析,经 KMO 和 Bartlett 的检验:适合做因子分析,公因子方差提取:变量共同度较高,根据特征值表和变化曲线,选取 8 为因子数,此时特征值的累计贡献率为 79.012%,满足分析的需要。将 8 个因子做方差极大旋转,得到的因子载荷值表 8 所示,由此得到 8 个主因子,代表了矿区成岩成矿作用的特点。

F_1 : Al、Mg、K、Ga、Li、Rb、Co、Sc、Ti、Be、Na 元素。该组主要代表造岩元素组合。

F_2 : Th、Nb、Sn、Ge 元素。该组主要代表亲铜(硫)元素组合。

F_3 : As、Cs 元素。该组主要代表亲铁元素组合。

F_4 : V、W、U 元素。该组主要代表矿区“红色”主要元素组合。

F_5 : Cr、Ni 元素。该组主要代表亲铁、亲铜元素组合。

F_6 : Cu、Ag 元素。该组主要代表矿区矿化元素组合及亲硫金属元素组合。

F_7 : Ca、Cd、Mn 元素。该组主要代表矿区碳酸盐岩相对富集,指示近矿围岩褪色蚀变元素组合。

F_8 : Ba、Sr 元素。该组主要代表造岩碱性元素的亲氧性组合。

4.7 元素组合分带特征

根据矿区元素地球化学特征和统计分析结果可知:

Cu—Ag 元素组合为矿区重要的矿化元素组合

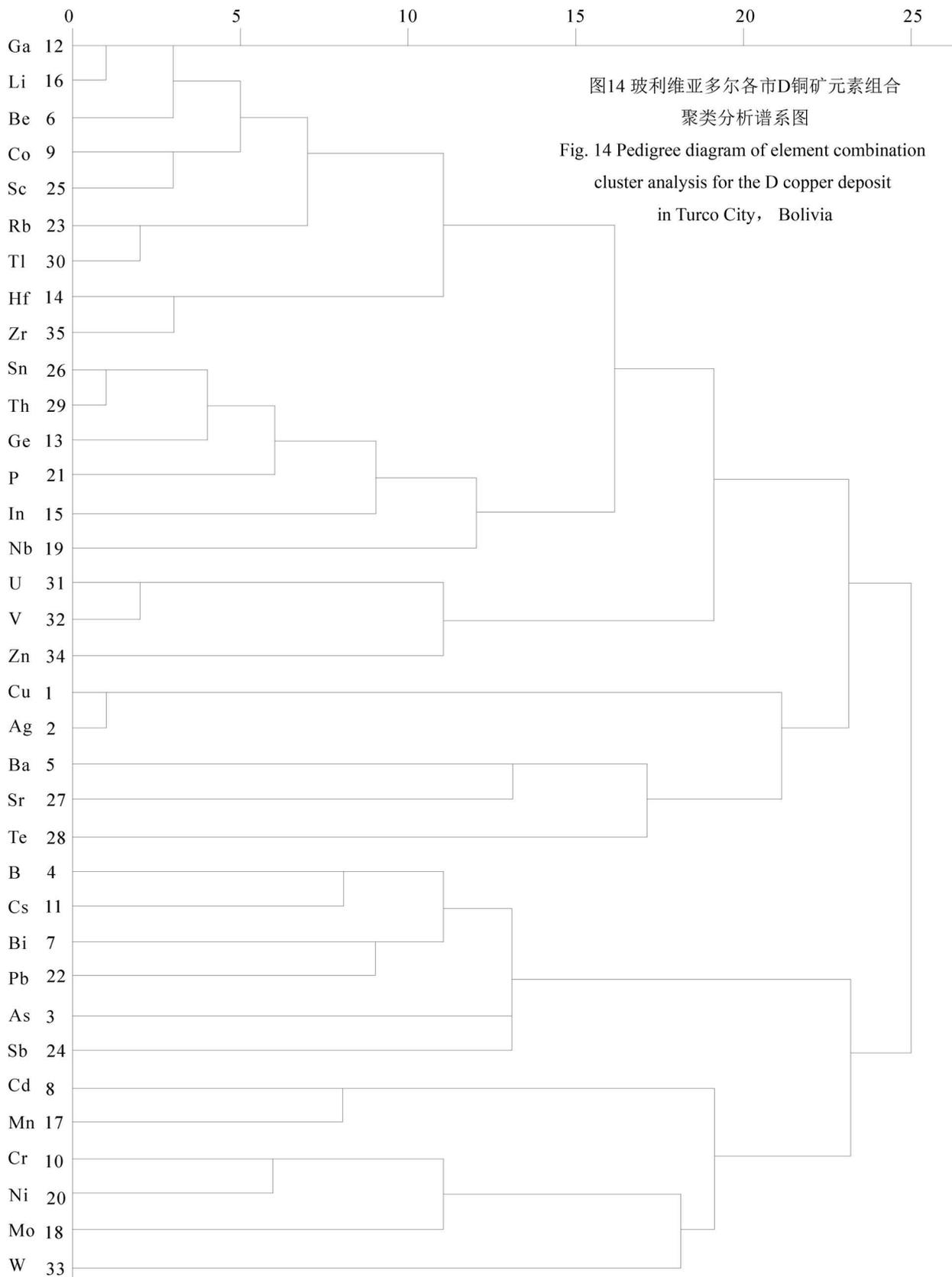


图14 玻利维亚多尔各市D铜矿元素组合
聚类分析谱系图

Fig. 14 Pedigree diagram of element combination
cluster analysis for the D copper deposit
in Turco City, Bolivia

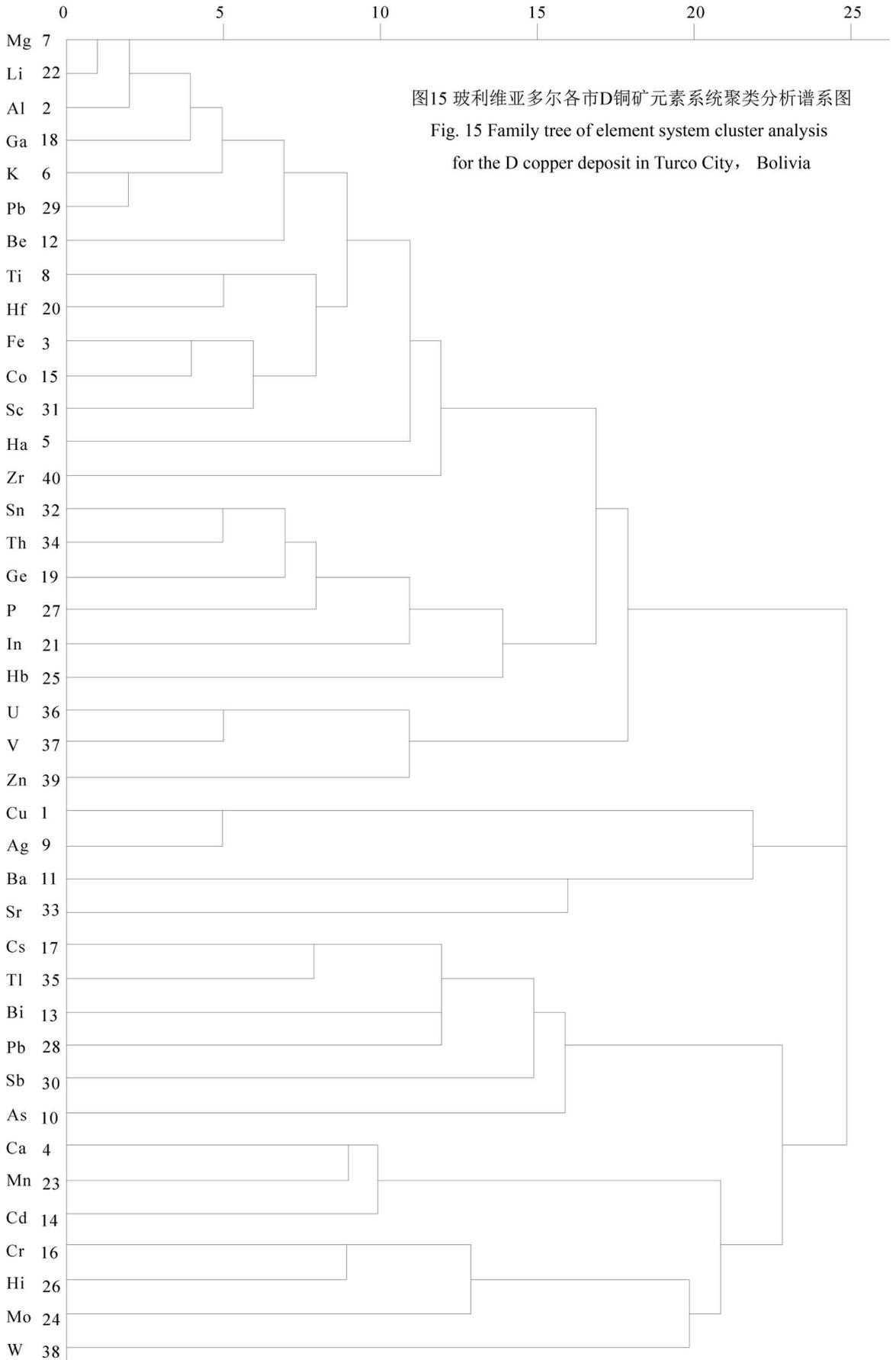


图15 玻利维亚多尔各市D铜矿元素系统聚类分析谱系图

Fig. 15 Family tree of element system cluster analysis for the D copper deposit in Turco City, Bolivia

表 8 玻利维亚多尔各市 D 铜矿矿石中元素因子分析
方差极大旋转因子载荷矩阵表

Table 8 Factor analysis variance maximum rotation factor loading matrix
of the ores in D copper deposit in Turco City, Bolivia

元素	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8
Al	0.905	-0.104	0.090	0.155	-0.038	0.014	-0.150	0.116
Mg	0.895	-0.003	-0.061	0.170	-0.008	0.098	-0.186	0.041
K	0.871	0.001	0.202	0.117	-0.011	-0.009	-0.016	0.167
Ga	0.870	0.388	-0.033	0.116	0.100	-0.041	-0.110	0.061
Li	0.861	0.077	0.051	0.154	0.014	0.093	-0.169	0.114
Rb	0.836	0.235	0.206	0.126	0.007	-0.071	0.099	0.053
Co	0.797	0.032	0.106	0.106	0.373	0.182	0.038	0.031
Sc	0.750	0.296	-0.079	0.007	0.460	0.004	0.149	0.026
Ti	0.735	0.195	-0.372	0.113	0.099	0.245	-0.112	-0.074
Be	0.733	0.401	0.251	0.019	0.083	-0.048	0.020	0.049
Na	0.725	-0.049	-0.203	0.076	-0.232	0.092	-0.065	-0.005
Tl	0.691	-0.087	0.569	0.034	-0.116	0.115	0.085	-0.103
Hf	0.682	0.186	-0.282	0.085	0.319	0.213	-0.125	-0.043
Fe	0.630	0.328	0.102	0.019	0.306	0.446	0.002	-0.123
Zr	0.611	0.066	-0.157	-0.560	0.319	0.238	-0.022	-0.083
P	0.559	0.478	-0.246	0.126	0.167	-0.189	-0.082	0.163
Th	0.152	0.824	-0.145	0.043	0.212	-0.182	-0.156	0.047
Nb	-0.189	0.805	-0.162	-0.113	-0.194	0.044	0.086	-0.104
Sn	0.323	0.796	-0.023	0.034	0.108	-0.065	-0.095	0.033
Ge	0.283	0.769	-0.197	0.075	-0.026	-0.128	-0.035	-0.003
In	0.484	0.664	0.065	0.043	0.063	-0.005	0.148	-0.176
As	-0.131	0.048	0.742	0.004	0.061	-0.231	0.155	-0.078
Cs	0.227	-0.149	0.722	0.074	-0.056	0.286	0.046	-0.103
Bi	0.181	-0.424	0.683	0.049	0.103	-0.122	-0.112	-0.009
Pb	0.110	-0.063	0.672	0.066	0.341	0.386	-0.068	0.069
Sb	-0.168	-0.048	0.647	-0.053	-0.043	0.302	-0.031	-0.144
V	0.161	0.044	-0.002	0.950	0.032	0.065	-0.021	-0.020
W	-0.163	0.109	0.105	-0.912	0.117	0.033	0.104	-0.067
U	0.336	0.026	0.122	0.789	-0.122	-0.239	-0.056	-0.039
Zn	0.353	0.371	0.131	0.585	0.170	0.172	-0.200	0.187
Cr	0.034	0.056	-0.089	-0.048	0.864	-0.072	-0.001	0.022
Ni	0.297	-0.023	0.295	-0.095	0.775	0.037	0.181	0.013
Mo	-0.169	0.535	0.197	-0.173	0.559	0.198	0.229	0.026
Cu	-0.127	0.140	-0.141	0.194	-0.030	-0.854	-0.187	0.106
Ag	-0.196	0.111	-0.106	-0.038	0.033	-0.816	-0.104	0.019
Ca	-0.082	0.004	-0.083	-0.067	0.034	0.054	0.893	0.102
Cd	-0.281	0.010	0.203	-0.038	-0.071	0.054	0.765	-0.183
Mn	0.038	-0.085	-0.009	-0.138	0.342	0.209	0.756	-0.141
Ba	0.013	-0.077	-0.019	-0.029	-0.025	-0.068	-0.176	0.796
Sr	0.250	0.032	-0.265	0.134	0.072	-0.052	0.083	0.741

注:提取方法:主成分。旋转法;具有 Kaiser 标准化的正交旋转法。a. 旋转在 7 次迭代后收敛。

5 结论

(1) 粉砂岩型矿化(I型矿化):近矿硅化增加,并且矿化范围叠加石膏脉,围岩泥质(脉)含量减少,方解石化(隐晶质)发育减弱;远离矿化硅化减弱,石膏脉消失,方解石化增强,泥化增强。

(2) 砂砾岩型矿化(II型矿化):近矿硅化增加,并且矿化范围叠加石膏脉,围岩泥质(脉)含量减少,方解石化(隐晶质)发育减弱;远离矿化段,硅化减弱,石膏脉消失,方解石化增强,泥化增强。

(3) 石英脉型矿化(III型矿化):内带主要发育矿化、硅化,此带最显著的特征为发育大量矿化脉及石英脉;外带主要发育泥质脉及石英脉。

(4) Cu—Ag 元素组合为矿区重要的矿化元素组合内带, Ca—Mn 元素组合为矿区近矿围岩褪色蚀变元素组合中带, U—V 元素组合为矿区含矿“红层”元素组合外带。

(5) 通过矿物分带、地球化学元素分析,确定找矿靶区,并在靶区探获铜矿量 770.08 万吨、平均品位 1.77%、金属量 136304 吨。

注 释 / Notes

① 昆明冶金研究院. 2012. 玻利维亚五星铜矿选矿试验研究报告.

② 胡加昆,张云付,陈子聪. 2018. 玻利维亚奥鲁罗省多尔各市 D 铜矿 D 区普查报告[R]. 昆明:云南冶金资源股份有限公司.

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

方明. 2011. 加拿大东部 Coxheath 斑岩型铜钼矿地质特征及找矿模型研究. 指导老师:高珍权. 昆明:昆明理工大学硕士论文.

内带。

Ca—Mn 元素组合为矿区近矿围岩褪色蚀变元素组合中带。

U—V 元素组合为矿区含矿“红层”元素组合外带。

- 顾锡莲,许光,李延军. 2008. 因子分析在小盆地——野马泉地区成矿潜力评价中的应用. 西部探矿工程, 20(5):147~150.
- 李丽文,温彬,黄明生. 2015. 玻利维亚阿力安萨铜矿床地质特征与成因分析. 甘肃冶金 37(3):98~101.
- 李院强. 2016. 广西巴马料屯金矿地质地球化学特征及矿床成因研究. 指导教师: 庞保成. 桂林: 桂林理工大学硕士学位论文.
- 孙勇. 2015. 西准噶尔额敏东部志留系的厘定及其构造演化. 导师: 李永军. 西安: 长安大学硕士学位论文.
- 田必林. 2012. 可控源音频大地电磁法在黑龙江省宁安市地热资源勘查中的应用. 导师: 朱建伟. 长春: 吉林大学硕士学位论文.
- 姚文勋. 1975. 云南某矿区一个铜矿床的次生富集规律. 地质与勘探, (1):11~17.
- 张良钜,覃敏锋,曾伟来. 2015. 川南杏仁状玄武岩中沥青与铜矿物的矿物学特征及其成因. 矿物学报, 35(2):127~135.
- 赵珍梅. 2010. 基于ETM~+与ASTER数据蚀变信息提取方法研究. 指导老师: 王润生. 北京: 中国地质大学(北京)博士论文.
- 邹海俊. 2008. 楚雄盆地构造变形及其成矿作用研究. 指导教师: 韩润生、方维萱. 昆明: 昆明理工大学博士论文.
- Fang Ming. 2011. Study on Geological Character and Prospecting Model of the Coxheath Porphyry Cu—Mo Deposit in the East of Canada [D]. Supervisor: P Gao Zhenquan, Kunming: Master Dissertation of Kunming University of Science and Technology.
- Gu Xilian, Xu Guang, Li Yanjun. 2008. Application of factor analysis in the evaluation of metallogenic potential in the small basin——Yemaquan area. Western Exploration Engineering, 20(5):147~150.
- Li Liwen, Wen Bin, Huang Mingsheng. 2015. Analysis on geological features and genesis of Alianza copper deposit in Bolivia. Gansu Metallurgy, 37(3):98~101.
- Li Yuanqiang. 2016. Geology, Geochemistry and Genesis of the Liaotun Gold Deposit, Bama County, Guangxi, China [D]. Supervisor: Pang Baocheng. Guilin: Master Dissertation of College of Earth Science, Guilin University of Technology.
- Sun Yong. 2015. The Redefinition of the Silurian System and Its Significances in the Eastern Emin, Western Junggar [D]. Supervisor: Li Yongjun, Xi'an: Master Dissertation of Chang'an University.
- Tian Bilin. 2012. CSAMT Looking for Geothermal Resources Application in Nina of Heilongjiang Province [D]. Supervisor: Zhu Jianwei. Changchun: Doctor Dissertation of Jilin University.
- Yao Wenxun. 1975. Secondary enrichment of a copper deposit in a mining area in Yunnan. Geology and Prospecting, 11~17.
- Zhang Liangju, Qin Minfeng, Zeng Weilai. 2015. Mineralogy and genesis of bitumen and Cu-bearing minerals in amygdaloid basalt from southern Sichuan Province, China. Acta Mineralogica Sinica, 35(2):127~135.
- Zhao Zhenmei. 2010. A Study on Methods Used to Extract Alteration Information from ETM+ and ASTER Data [D]. Supervisor: Wang Runsheng. Beijing: Doctor Dissertation of China University of Geosciences (Beijing).
- Zou Haijun. 2008. Study on Tectonic Deformation and Mineralization of Chuxiong Basin [D]. Advisor: Han Runsheng, Fang Weixuan. Kunming: Doctoral Dissertation of Kunming University of Science and Technology.

Mineral and element assemblage zoning and prospecting prediction of the D copper deposit in Turco City, Bolivia

HU Jiakun, WU Wenfei, QIE Xiaoxin, CHEN Zicong, LI Jing, LU Junji

Yunnan Metallurgical Resources Group Co., Ltd., Kunming, 650216

Objectives: In order to find out the characteristics of the mineralized zoning of the D copper deposit in Turco City, Bolivia, evaluate the prospecting potential and delineate the prospecting target area, comprehensive prospecting had been carried out in this area by means of geological and geochemical testing and analysis.

Methods: Mathematical statistics analysis of mineral zonation——major and trace elements geochemistry.

Results: The results show that: ① siltstone-type mineralization (type-I) and glutenite-type mineralization (type-II) are characterized by high-degree of silicification, developed gypsum veins, less contents of argillaceous (veins) in surrounding rocks and low-degree of calcite close to ore bodies, while decreasing silicification, disappearing gypsum veins and increasing argillization and carbonatation developed in country rocks along with increase of distance from ore bodies. ② quartz vein-type mineralization (type-III) develops mineralization and silicification with amounts of mineralized and quartz veins in the interior, while argillaceous and quartz veins outside. ③ internal zoning of mineralized elements comprises Cu—Ag combination, middle zoning is composed of Ca—Mn combination, and external zoning consists of U—V combination.

Conclusions: Based on the analysis of mineral zoning and geochemical elements, the ore target area was determined; and the average grade of copper ore is 1.77%, with metal amount of 136304 t in the target area.

Keywords: the D copper deposit in the city of Turco, Bolivia; mineral assemblage; spatial zoning

First author: HU Jiakun, male, born in 1972, senior geological engineer, mainly engaged in metal deposit exploration research; Email: 331821322@qq.com

Manuscript received on: 2019-06-20; Accepted on: 2020-05-06; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview.2020.04.012