

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2020.04.010

新疆土根曼苏砂岩型铜矿矿物组合及富集规律

孟茹¹, 刘云华^{1,2*}, 庄晓¹, 刘淑文¹, 刘方杰³, 邓楠¹, 范媛媛¹

(1. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 陕西有色集团公司, 陕西 西安 710054)

摘要:新疆土根曼苏铜矿床赋存于早石炭世库山河群上组岩层中, 矿体呈层状、似层状产出, 受地层、构造的控制。笔者主要利用岩矿鉴定、电子探针、扫描电镜等分析方法查明了本区金属矿物从早到晚主要为黄铁矿、黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿、铜蓝、自然铜、黑铜矿、孔雀石等, 且相互交代关系明显。同时, 根据该区矿物共生组合及其在垂向上空间分布的差异, 大致可将矿床分为氧化带、次生硫化物带和原生硫化物带, 其中氧化带以孔雀石为标志性矿物, 次生硫化物带以辉铜矿、斑铜矿、铜蓝、蓝铜矿为主, 原生硫化物带则主要以黄铁矿、黄铜矿为主。研究发现, 矿体主要赋存在次生硫化物带中, 古陆的风化剥蚀为矿床提供了基本的成矿物质, 库山河群上组的巨厚石膏层被认为是 S^{2-} 的主要来源, 盆地为矿体形成提供了良好的赋存条件。在后期构造应力作用下, 含矿地层不断地被挤压抬升至潜水面以上, 在表生氧化、淋滤等作用下使铜硫化物不断发生叠加交代, 从而使铜元素不断富集, 形成了铜矿体。

关键词:砂岩型铜矿; 矿物组合; 次生铜矿富集; 土根曼苏; 新疆

中图分类号: P578.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2020)04-0108-12

On the Regularity of the Mineral Combination and Enrichment in Tugen Mansu Sandstone-Type Copper Deposit, Xinjiang

MENG Ru¹, LIU Yunhua^{1,2*}, ZHUANG Xiao¹, LIU Shuwen¹, LIU Fangjie³,
DENG Nan¹, FAN Yuanyuan¹

(1. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MNR, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Shaanxi Nonferrous Metals Group Corporation, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Tugen Mansu copper deposit in Xinjiang occurred in the upper group of the Early Carboniferous Kushanhe Group. The ore body is layered, controlled by stratum and structure in this area. Using a series of analytical methods of rock ore appraisal, electron probe and scanning electron microscope, the authors found that the main metallic minerals are pyrite, chalcopyrite, porphyry, pyroxene, copperite, copper blue, natural copper, black copper and malachite. There is

收稿日期: 2019-11-08; 修回日期: 2020-06-12

基金项目: 中国地质调查局整装勘查项目“新疆西天山那拉提山一带铜金矿整装勘查区关键基础地质研究”(12120114007401)

作者简介: 孟茹(1996-), 女, 山西运城人, 硕士研究生, 研究方向为矿床学及矿产地质。E-mail: 1005639821@qq.com

* 通讯作者: 刘云华(1965-), 男, 博士, 研究员, 从事矿产地质专业教学与研究工作。E-mail: 280056933@qq.com

an obvious mutual accountability between them. According to the mineral symbiosis combination and its spatial distribution in the vertical direction, the deposit can be roughly divided into oxidation zone, secondary sulfide zone and primary sulfide zone, in which the oxidized zone is symbolized as malachite. The secondary sulfide zone is mainly composed of chalcopyrite, porphyrite, copper blue and azurite. Raw sulfide zone mainly consists of pyrite and chalcopyrite. Ore body is mainly distributed in the secondary sulfide zone. Weathering and erosion of the ancient land provided the basic ore-forming materials for the deposit. The huge gypsum layer existing in the upper group of the Kushan River Group is considered to be the main source of S^{2-} and the basin provides a favourable condition for the formation of the ore body. Ore layers were continuously squeezed above the diving surface under the effect of tectonic stress. Copper sulfide was superimposed under the surface oxidation and leaching and the copper element was enriched, thus forming a copper ore body.

Keywords: sandstone-type copper deposit; mineral combination; secondary enrichment of copper ore; Tugen Mansu; Xinjiang

中国砂岩型铜矿主要分布于云南、四川等南方中生代红盆地中。近年来在新疆、甘肃、青海等地也发现了大量砂岩型铜矿,土根曼苏铜矿是在新疆发现的砂岩型铜矿床之一(冯永玖,2008;汪来群等,2009;王战华等,2003;张振亮等,2014;赵祖应等,2002)。该矿区位于新疆阿克陶县西南奥依塔克镇土根曼苏河的上游,矿化带长十多千米,部分地段完成了详查地质工作,提交的铜资源储量已达中型规模,伴生银矿数百吨,显示出较好的找矿前景。随着矿床勘探程度的提高,矿体不断被揭露,为区域上典型矿床的解剖研究提供了良好的条件。但由于该矿区自然条件较为恶劣,地质特征和富集规律研究不深入,前人对于该区矿床的成因取得了一些初步认识,如汪来群等(2009)认为该矿床为同生层控砂岩型矿床,局部轻微热液叠加改造富集;王战华等(2003)认为该矿床为岩控层控矿床,系先沉积后叠加形成;赵祖应等(2002)则认为该矿床属于沉积改造型砂岩铜矿。笔者在野外观察基础上,主要采用岩矿鉴定、电子探针、扫描电镜等分析方法,详细研究该矿床矿石矿物组合以及矿体空间分带特征,深化矿床成因认识。

1 区域地质背景

土根曼苏砂岩铜矿床大地构造位置位于西昆仑北带奥义塔格-恰尔隆晚古生代陆缘裂谷带内(毕华等,1999;李宝强等,2006;孙海田等,2003)。区

域地层属昆盖山地层小区,出露地层主要为古元古界(Pt_1)、泥盆系(D)、石炭系(C)、二叠系(P)、白垩系(K)及新生界等,含矿地层主要位于早石炭世库山河群组中,为杂色碎屑岩夹碳酸盐岩建造。区内构造主体为一组近于平行分布的巨型断裂构造带,不同地段构造带走向变化较大,构造线走向由东西向—北西向—东西向变化,总体展现出反“S”形构造痕迹。这些构造多具压剪性特征,沿断裂带逆冲推覆构造及挤压性质的褶皱变形、碎裂岩、糜棱岩十分发育(霍亮,2010;孙海田等,1996)。

2 矿床地质特征

2.1 矿区地质特征

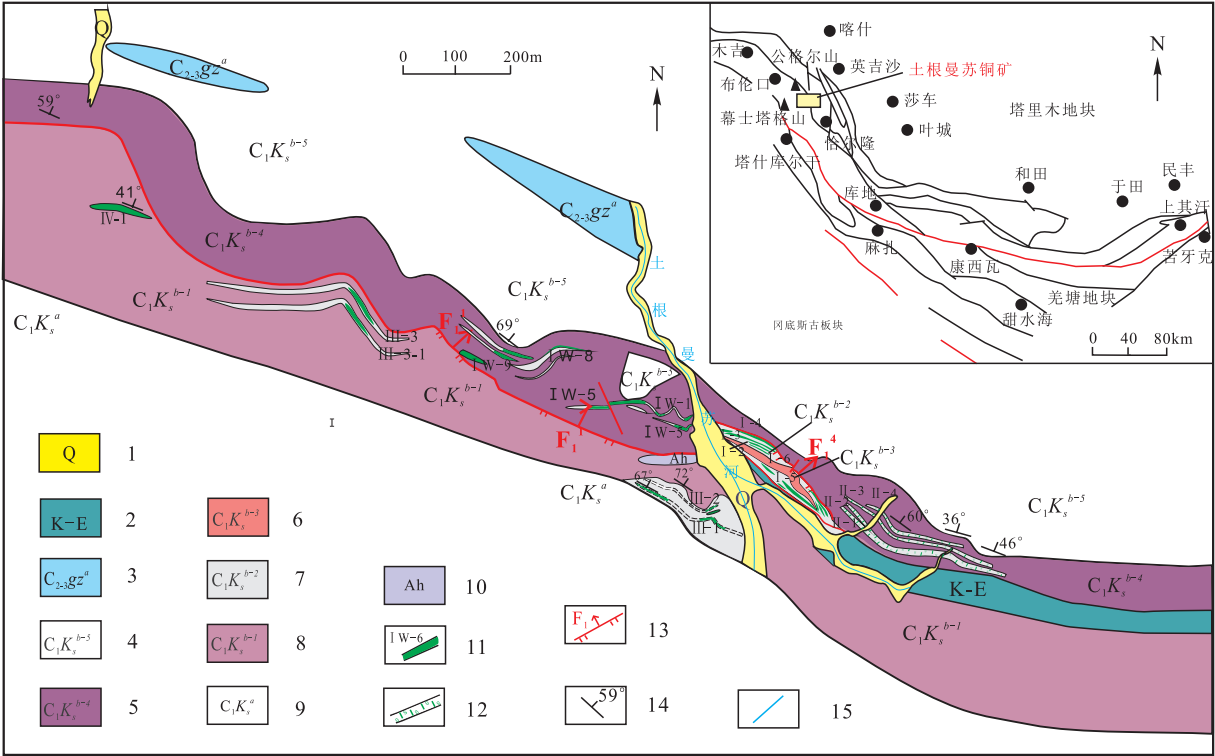
矿区出露地层有早石炭世库山河群下组(C_1ks^a)、早石炭世库山河群上组(C_1ks^b)、中上石炭统盖孜群($C_{2-3}gz$)及第四系(Q)。其中,库山河群上组(C_1ks^b)是该矿区的主要含矿层,在矿区分布广泛,地层总体呈北西—北北西向展布,倾向北东,局部向南陡倾,倾角 $50^\circ\sim 80^\circ$,延展比较稳定。

库山河群上组(C_1ks^b)自下而上可划分为5个岩性段:第一岩段岩性为紫红色砂岩夹中粗粒长石石英砂岩,底部局部见砾岩层,顶部为石膏层;第二岩段岩性主要为紫红色粉砂岩、紫红色泥质粉砂岩、灰色长石石英砂岩、深灰色长石石英砂岩、浅灰绿色泥质粉砂岩、灰褐色钙质砂岩等,为铜矿化主要地层;第三岩性段底部岩性为砾岩,向上依次为紫红色

砂岩夹灰白色石英砂岩,顶部为黑色细砂岩、灰褐色钙质砂岩和灰绿色泥质细砂岩;第四岩性段下部为薄层灰色泥质粉砂岩与紫红色泥质粉砂岩互层,上部为紫红色长石石英砂岩夹矿化石英砂岩为主,局部为钙质砂岩和硅质岩;第五岩性段岩性为黑色页岩、板岩、千枚岩等,未见矿化。沉积相横向变化较大,各岩性段岩性沿走向上差异也较大,主要表现在砂岩颜色上,从东到西,灰色、深灰色砂岩减少,紫红色砂岩明显增多,说明西矿段被氧化程度较深,该现象也为西矿段抬升比东矿段慢提供了有力佐证。

矿区内构造极为发育,不同级次,不同期次的褶皱、断层构造对含矿层及矿体的空间形态起到了重要的控制作用,显示出明显构造控矿特征。矿区内构造可分三级:一级构造为土根曼苏河断裂(图 1, F_1),该断裂呈北北西向贯穿整个矿区,沿土根曼苏河将矿化带分成东矿段和西矿段。东矿段构造主要

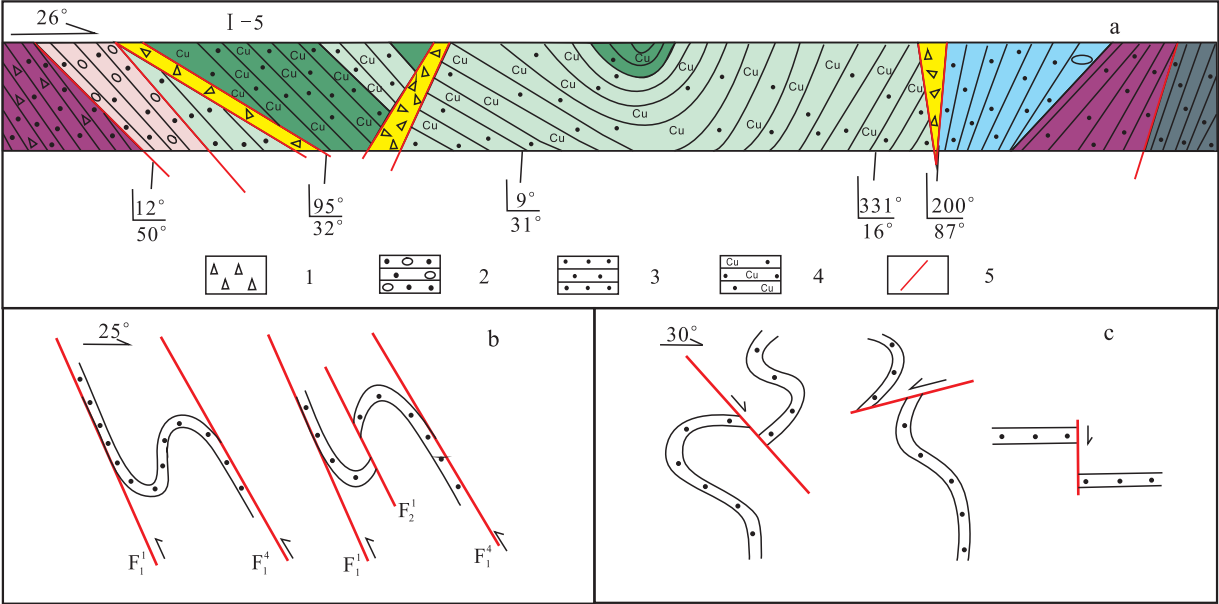
为因北东、南西向挤压形成的倒转向斜(图 2a)和次级逆冲推覆断层(图 2b),矿体主要赋存在向斜核部位置;西矿段整体为走向北西西展布的大型单斜岩层,倾向北东,倾角 $30^{\circ}\sim 80^{\circ}$,区内级褶皱和断裂构造十分复杂,且由于逆冲推覆作用,西矿段含矿层近地表处产生强烈的断褶、垮塌(图 2c),使上部矿体连续性遭到严重破坏;二级构造:本区二级构造主要为北东—南西向挤压形成的复式褶皱和逆冲推覆构造,同时包括轴线与断裂走向近一致的复式向斜构造,这些褶皱表现为较为紧闭的倒转向斜或背斜,轴面及两翼倾向主要为北东。此外,还有与褶皱伴生的轴向断层(包括层间滑动断层),这些断层不同程度的破坏了矿体的连续性;三级构造:三级构造主要包括不同方向的小断层或节理、小褶曲等,三级构造对矿体有一定的破坏,导致矿体在走向上连续性变差,局部对矿体起到富集作用,但富集程度较小。



1. 第四系:冲洪积物、坡积物;2. 白垩+第三纪:片岩夹灰岩、泥灰岩;3. 中上石炭统盖孜群下组:红色、灰白色砂岩夹杂色过渡层,底部有砾岩;4. 下石炭统库山河群上组五段:黑色页岩、板岩、千枚岩;5. 库山河群上组四段:紫红色砂岩夹石英砂岩;6. 库山河群上组三段:紫红色石英砂岩;7. 库山河群上组二段:石英砂岩、矿化石英岩;8. 库山河群上组一段:紫红色石英砂岩夹矿化石英砂岩;9. 下石炭统库山河群下组:碳酸盐岩、碎屑岩;10. 石膏层;11. 矿体位置及编号;12. 矿化体;13. 实测及推测逆冲断层;14. 产状;15. 河流

图 1 阿克陶县土根曼苏铜矿区地质略图(据刘云华,2013)

Fig. 1 Geological sketch map of the Tugen Mansu copper mine in Akto County (After LIU Yunhua, 2013)



1. 角砾岩;2. 含砾砂岩;3. 砂岩;4. 矿化层;5. 断层

图 2 (a)土根曼苏铜矿区 PD2848-72 局部地段实测剖面图、(b)土根曼苏铜矿东矿段构造形成和演化示意和(c)西矿段近地表断褶垮塌构造剖面示意图

Fig. 2 (a)The measured section of PD2848-72 in the Tugen Mansu copper mine area,(b)The tectonic formation and evolution of the eastern mining area of the Tugen Mansu copper deposit(c)The schematic diagram of the near-surface fault pleat collapse structure in the western section

矿区内未见岩浆岩,但在外围盖孜河北侧发育有海西晚期的花岗岩及早石炭世中基性、中酸性火山岩。

2.2 矿体地质特征

土根曼苏含矿层走向延长达 10 km,矿体呈透镜状、层状、似层状产出,矿体严格受地层的控制,未见穿层现象。矿化主要发生在具碳酸盐、硅质胶结组合的灰-深灰-灰黑色中细粒砂岩中,膏岩层附近褶皱转折端成矿的最有利部位(图 2a)。东矿段 I-5 矿体为本区具有代表性的矿体之一,矿体呈似层状、透镜状产出,地表长 700 m,厚度变化范围为 0.67~36.27 m,Cu 品位为 0.26%~4.78%,平均品位为 1.70%;伴生银品位为 0.50×10⁻⁶~236.26×10⁻⁶,平均品位为 32.96×10⁻⁶。矿体总体产状为

10°~356°∠18°~88°,矿石类型为含铜灰黑色长石石英中砂-细砂岩型。东段为向斜褶皱转弯部位,矿体厚大,矿体及围岩较为破碎。

通过光、薄片镜下鉴定,结合扫描电镜、电子探针分析发现,该区铁铜矿物主要有黄铁矿(FeS₂)、黄铜矿(CuFeS₂)、斑铜矿(Cu₅FeS₄)、辉铜矿(Cu₂S)等,铜蓝(CuS)次之,其他铁铜化合物以孔雀石(Cu₂(CO₃)(OH)₂)、褐铁矿(Fe₂O₃·nH₂O)、黑铜矿(CuO)为主,赤铜矿(Cu₂O)、自然铜(Cu)和蓝铜矿(Cu₃[CO₃]₂(OH)₂)次之。矿石矿物在不同矿段相对含量具有明显差异,东矿段以黄铜矿和斑铜矿为主,西矿段以斑铜矿、辉铜矿、铜蓝为主。脉石矿物成分以石英为主,其次是钾长石及酸性斜长石和硅质岩屑,胶结物主要为硅质、钙质、泥质、铁质等(表 1)。

表 1 矿石矿物组成表
Tab.1 Mineral composition of ore

矿物类型	主要矿物	次要矿物
铁铜硫化物	黄铜矿、黄铁矿、斑铜矿、辉铜矿	铜蓝、蓝辉铜矿、辉银矿等
其他铁铜化合物	孔雀石、褐铁矿、黑铜矿	赤铜矿、自然铜、蓝铜矿等
脉石矿物	石英	钾长石、酸性斜长石、硅质岩屑

矿石结构主要有填隙胶结结构、交代结构、交代残余结构等。填隙胶结结构主要表现为金属矿物呈胶结物形式分布于碎屑颗粒间的空隙中(图 3a、图 3b、图 3c)。本区交代结构较为复杂,常见晚期铜矿物交代早期铜矿物,如斑铜矿交代黄铜矿(图 3b、图 3c、图 3d),辉铜矿及铜蓝交代斑铜矿、黄铜矿(图 3c、图 3d、图 3e),辉铜矿交代斑铜矿(图 3f),黑铜矿交代辉铜矿(图 3g)等等,矿物之间的环带状交代明显。

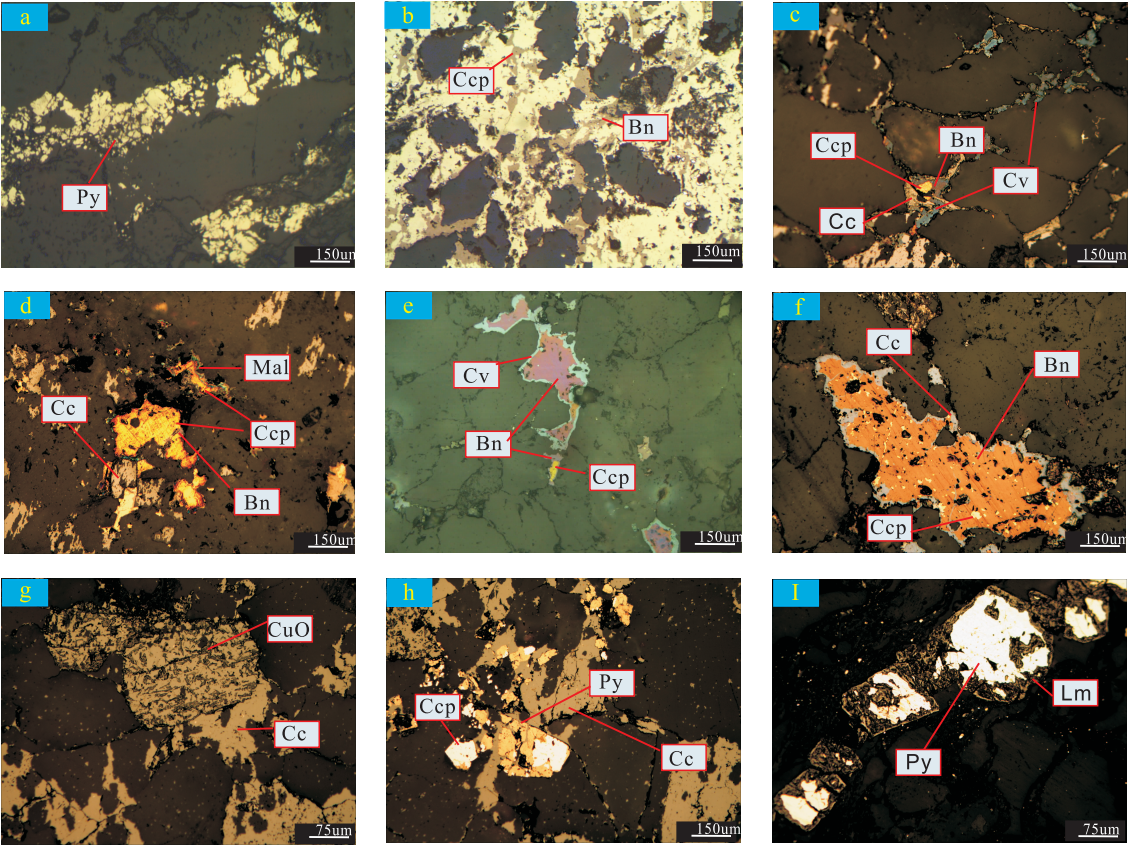
矿石构造主要有浸染状构造、条带状构造和块状构造。浸染状构造主要为黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿等呈他形粒状或集合体稀疏分布于岩石碎屑颗粒孔隙中;条带状构造表现为黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿等金属矿物呈条带状充填于碎屑砂岩中;在矿石的局

部范围内可见铜硫化物均匀分布,形成块状构造(连志义等,2018)。

2.3 主要金属矿物特征

2.3.1 辉铜矿(Cu₂S)

辉铜矿是矿区内最重要的矿石矿物,在整个成矿过程中几乎都有产出,主要呈浸染状分布于碎屑孔隙之间,或交代斑铜矿、黄铜矿矿物分布在斑铜矿、黄铜矿的边缘(图 3f、图 3h),部分呈环带状,同时易被铜蓝、黑铜矿所交代(图 3g)。在镜下呈灰白色,半自形-他形晶粒状结构,主要为细粒到微细粒级。辉铜矿电子探针波谱分析结果显示其主要元素铜含量范围在 74.31%~80.34%,硫含量范围在 19.71%~24.88%,与辉铜矿中主量元素理论含量 Cu 79.86%,S 20.14%相比变化较大,结合显微镜



a. 细粒黄铁矿(Py)呈脉状充填于颗粒孔隙之间;b. 黄铜矿(Ccp)、斑铜矿(Bn)等胶结石英长石等碎屑颗粒;c. 铜蓝(Cv)交代黄铜矿(Cp)、斑铜矿(Bn);d. 斑铜矿(Bn)、辉铜矿(Cc)交代黄铜矿(Ccp)且铜矿物边缘发生孔雀石化(Mal);e. 铜蓝(Cv)交代斑铜矿(Bn),斑铜矿(Bn)交代黄铜矿(Ccp);f. 斑铜矿(Bn)与黄铜矿(Ccp)呈交代残余结构,斑铜矿(Bn)边缘被辉铜矿(Cc)交代;g. 黑铜矿(CuO)交代辉铜矿(Cc);h. 黄铜矿(Ccp)与黄铁矿(Py)呈共生关系,辉铜矿(Cc)交代黄铜矿(Ccp)、黄铁矿(Py);i. 黄铁矿(Py)发生褐铁矿化(Lm)

图 3 矿石矿物组成及结构特征图

Fig. 3 Mineral composition and structural characteristics of ore

下光片所观察到的辉铜矿、斑铜矿之间的交代关系,表明部分辉铜矿和斑铜矿之间呈过渡关系,或由于两者颗粒较细,所测成分为其二者的混合。同时,辉铜矿中均含有较高含量的银,表明辉铜矿是该区银的重要赋存矿物(表 2)。

2.3.2 斑铜矿(Cu₅FeS₄)

大部分斑铜矿呈浸染状分布于沉积碎屑颗粒孔

隙中(图 3b),在显微镜下斑铜矿主要呈淡玫瑰红色,他形粒状结构,少部分系由交代黄铜矿转变而来,具有交代结构,表明其形成于黄铜矿之后。斑铜矿不稳定,常被辉铜矿或铜蓝交代(图 3c、图 3f),其电子探针波谱分析结果显示,斑铜矿中普遍含银及镍,暗示其物质来源可能与基性岩浆 Cu-Ni 硫化物矿床有关(表 3)。

表 2 辉铜矿电子探针分析结果表(%)
Tab. 2 Results of electron probe X-ray micro analysis of chalcopyrite (%)

矿物	As	Fe	S	Cu	Pb	Zn	Sb	Ni	Ag	Co	Au	Total
辉铜矿	0.176	0.07	21.1	78.28	0.147	0.084	0.009	—	0.18	0.004	—	100.049
辉铜矿	—	0.06	20.97	79.11	0.097	0.258	—	—	0.082	—	—	100.576
辉铜矿	—	0.113	21.36	77.52	0.14	0.206	0.035	—	1.3	—	—	100.674
辉铜矿	—	0.673	19.71	78.22	0.038	0.138	0.018	—	0.105	0.026	0.347	99.274
辉铜矿	—	0.02	20.97	78.57	0.035	0.033	—	—	0.302	0	0.022	99.953
辉铜矿	—	0.014	21.92	77.17	0.008	0.137	0.012	0.014	0.071	—	—	99.346
辉铜矿	—	0.179	21.11	77.95	0.118	0.094	—	—	0.567	0.025	0.128	100.171
辉铜矿	—	2.03	24.06	75	—	0.063	0.008	0.016	0.014	—	0.397	101.589
辉铜矿	—	0.616	21.14	75.79				0.001	1.74	0.01		99.296
辉铜矿	—	0.206	20.93	77.83				0.018	0.127	0.024		99.135
辉铜矿	0.015	1.96	23.21	74.81				—	0.201	—		100.196
辉铜矿	—	2.64	23.02	74.31				0.024	0.604	0.015		100.614
辉铜矿	—	0.054	21.15	77.99				0.015	0.269	—		99.477
辉铜矿	—	1.75	22.62	75.63				—	0.017	0.027		100.044
辉铜矿	—	0.079	21.27	80.34				—	0.234	0.026		101.949
辉铜矿	—	0.62	21.09	78.04				—	0.24	—		99.991

注:“—”代表该元素低于检测限,空缺处为未检测。该实验在长安大学成矿作用及其动力实验室完成。

表 3 斑铜矿电子探针波谱分析结果(%)
Tab. 3 Results of electron probe X-ray micro analysis of bornite (%)

矿物	As	Fe	S	Cu	Pb	Zn	Sb	Ni	Ag	Co	Au	Total
$w(M)/10^{-2}$												
斑铜矿	—	12.29	26.1	61.15	0.084	0.11	0.009	0.035	0.019	0.025	—	99.823
斑铜矿	0.275	11.83	25.54	60.88	0.099	0.035	—	0.002	0.917	0.023	—	99.602
斑铜矿	0.064	13.48	27.03	59.15	0.179	0	0.033	0.019	—	0.039	0.192	100.186
斑铜矿	0.039	8.94	25.11	64.42				0.012	0.024	0.002		98.548
斑铜矿	—	12.5	26.6	60.65	0.042	0.081	0.039	0.039	0.458	0.038	0.244	100.691

注:“—”代表该元素低于检测限,空缺处为未检测。该实验在长安大学成矿作用及其动力实验室完成。

2.3.3 铜蓝(CuS)

铜蓝主要分布于东矿段,以交代斑铜矿、黄铜

矿、辉铜矿的形式出现,分布于斑铜矿、黄铜矿、辉铜矿矿物边缘呈环带状(图 3c),表明其形成于这

些矿物之后。镜下呈深蓝色-浅蓝色,具有反射多色性,强非均质体,偏光色呈火橙-橙黄色,常呈他形-半自形粒状及其集合体。电子探针波谱分析

结果显示,该区铜蓝中 S 的含量相对较低,含有 4%~10%的铁,分析可能是由矿物交代不完全所致(表 4)。

表 4 铜蓝电子探针波谱分析结果表(%)
Tab. 4 Results of electron probe X-ray micro analysis of covellite (%)

矿物	As	Fe	S	Cu	Pb	Zn	Sb	Ni	Ag	Co	Total
铜蓝	—	7.82	25.29	66.2	—	0.089	—	—	0.262	0.048	99.709
铜蓝	0.141	7.82	25.31	66.93	0.026	0.122	0.018	0.028	0.199	—	100.595
铜蓝	0.254	5.42	24.92	69.19	—	0.058	—	—	0.315	0.024	100.181
铜蓝	—	4.18	25.05	69.51	0.071	0.12	0.035	—	—	0.01	98.976
铜蓝	—	9.93	24.8	65.03				0.024	—	0.018	99.802
铜蓝	0.042	10.12	25.63	64.49				—	0.031	0.009	100.321
铜蓝	—	8.89	24.94	66.46				—	0.163	—	100.453
铜蓝	—	6.4	24.37	69.55				0.043	0.238	0.006	100.608

注:“—”代表该元素低于检测限,空缺处为未检测。该实验在长安大学成矿作用及其动力实验室完成。

2.3.4 黄铜矿(CuFeS₂)

黄铜矿也是矿区内重要的矿石矿物之一,其含量仅次于辉铜矿、斑铜矿。主要赋存在矿体中下部,黄铜矿主要呈细脉状、网脉状、浸染状分布于粒屑之间的空隙中(图 3b),或被斑铜矿、辉铜矿、孔雀石等交代呈残留体包裹于其他矿物中(图 3c、图 3f),粒度为 0.005~0.2 mm,镜下呈铜黄色。电子探针结

果显示,黄铜矿含量范围分别为:Cu 33.5%~43.44%,平均为 36.99%;Fe 23.69%~30.13%,平均为 27.88%;S 30.89%~34.53%,平均为 33.41%;与黄铜矿的理论组成:Cu 34.56%,Fe 30.52%,S 34.92%,铜含量明显增高,而铁含量明显降低,推测是由于其中部分已被斑铜矿或辉铜矿交代所致(表 5)。

表 5 黄铜矿电子探针波谱分析结果表(%)
Tab. 5 Results of electron probe X-ray micro analysis of chalcopyrite (%)

矿物	As	Fe	S	Cu	Pb	Zn	Sb	Ni	Ag	Co	Au	Total
黄铜矿	—	23.69	30.89	43.44	0.097	0.129	—	0.044	0.041	0.057	—	98.387
黄铜矿	—	30.13	34.44	34.43	0.125	0.065	0.02	0.041	0.004	0.054	—	99.309
黄铜矿	—	29.91	34.42	33.93	0.101	0.013	—	—	0.03	0.072	—	98.476
黄铜矿	—	30.04	34.53	34.22	0.03	0.024	—	—	0.048	0.098	—	98.99
黄铜矿	—	29.88	34.53	34.06	—	—	—	—	—	0.068	—	98.538
黄铜矿	0.009	24.01	31.66	42.46	—	—	—	—	0.052	0.016	—	98.207

注:“—”代表该元素低于检测限。该实验在长安大学成矿作用及其动力实验室完成。

2.3.5 黄铁矿(FeS₂)

黄铁矿多分布在矿体下段,与黄铜矿共生,在光片下观察黄铁矿主要为他形粒状,个别为自形晶(图 3i),主要呈细脉状、浸染状分布于粒屑之间的空隙中(图 3a),其多发生褐铁矿化,与黄铜矿伴生(图 3h)。

2.3.6 黑铜矿(CuO)

黑铜矿是一种铜的氧化物,颜色为钢灰色、铁黑色到黑色,一般为土状产在铜矿的氧化区域,系辉铜矿风化产物(图 3g),光片中呈褐色,具明显多色性,反射色亮灰白带黄,表面有麻点,在各矿区均有分布。

2.3.7 孔雀石($2\text{CuO} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)

孔雀石是本区内一种主要的氧化矿物,广泛发育于矿床氧化带,颜色翠绿。在镜下呈灰色微带褐红色,强非均质性,呈纤维状,他形粒状结构。有的呈粒状分散在长石、石英表面。与辉铜矿、斑铜矿、黄铜矿呈交代结构(图 3d)。

3 矿床分带特征

根据上述矿物分布状况及相互交代关系,推测铜矿物的氧化演变过程大致为(黄铁矿、黄铜矿)→斑铜矿→辉铜矿→铜蓝→(孔雀石、黑铜矿、褐铁矿等),反映出氧化作用的逐步加强(胡煜昭等,2013)。结合矿物在矿体垂向上共生组合的差异,大致可将矿床分为氧化带、次生硫化物带、原生硫化物带。

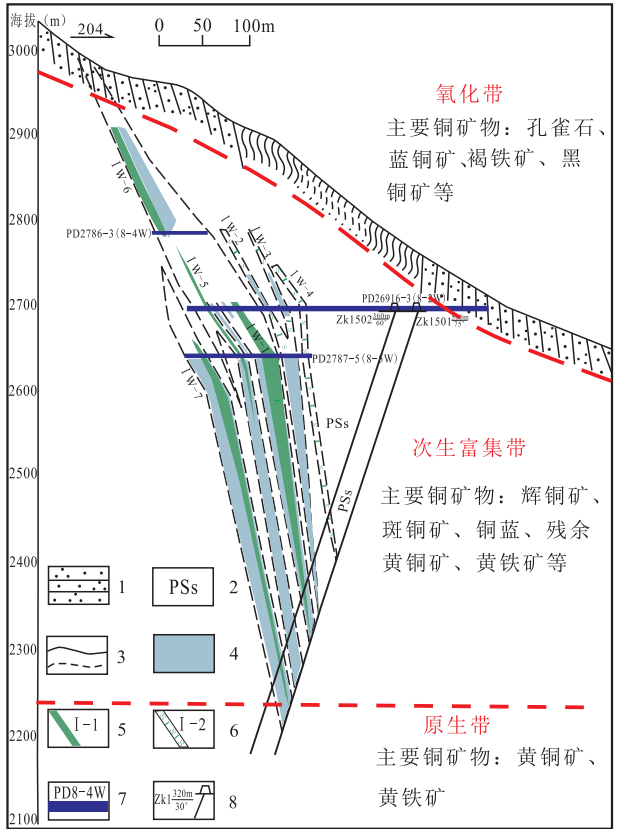
3.1 氧化带

氧化带在该矿区中普遍存在,几乎所有矿体及矿化层露头上均可见到孔雀石充填在节理、裂隙中。在局部细粒砂岩中,可见孔雀石呈薄膜覆盖,形成明显富集的氧化矿石。除孔雀石外,氧化带还发育有蓝铜矿、黑铜矿、自然铜、赤铜矿、褐铁矿以及残余黄铜矿、黄铁矿等。本区氧化带深度不大,约 30~80 m,在断层附近氧化深度加大。从 15 号线勘探线剖面图中观察到(图 4),氧化带自海拔 2 900 m 处向上至地表,厚度约 80 m,岩性主要以紫红色砂岩为主,铜矿物多为铜氧化物及残余的黄铜矿和黄铁矿,常见孔雀石交代黄铜矿,黑铜矿交代辉铜矿,黄铁矿发生褐铁矿化等,由于经历了较为强烈的渗透淋滤作用,导致该带铜矿物贫化(姚文勋,1975)。

3.2 次生硫化物带

该区矿体主要赋存在次生富集带中,其金属硫化物主要有辉铜矿、斑铜矿、铜蓝以及少量的黄铜矿和黄铁矿等,辉铜矿为该带标志性矿物,也是该带最重要的矿石矿物。东矿段铜硫化物多以黄铜矿和斑铜矿为主,且黄铜矿含量远高于其他矿段,可能是由于本区北西—南东向的逆冲推覆构造作用,使东矿段抬升速度较快,暴露到氧化带的时间较短;西矿段则主要以斑铜矿、辉铜矿、铜蓝为主,深部可能发育有一定规模的次生硫化物带。以西段 15 号勘探线所控制的矿体为例(图 4),矿体多赋存 2 900~

2 250 m 的灰白色石英砂岩中(次生硫化物带中),主要呈条带状或似透镜状产出,中部矿体较厚,上下贫薄,在 2 250 m 以下矿体尖灭,该带厚约 650 m,铜矿物以辉铜矿、斑铜矿、铜蓝居多,并有残余黄铜矿、黄铁矿,交代关系明显。



1. 石英砂岩;2. 紫红色石英砂岩;3. 黑色片岩、千枚岩;4. 灰白色石英砂岩;5. 矿体及编号;6. 矿化体及编号;7. 坑道及编号;8. 设计钻孔及编号

图 4 土根曼苏铜矿西段 15 号勘探线剖面图(据阿克陶广新矿业发展有限公司,2014 修改)

Fig. 4 Sectional view of the 15th exploration line in the western section of the Tugen Mansu copper mine

3.3 原生硫化物带

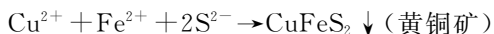
本区原生硫化物带主要以黄铜矿和黄铁矿为主,斑铜矿、辉铜矿、铜蓝等在该带含量明显降低。从本区西段 15 号勘探线剖面图中观察到,原生带位于 2 250 m 以下(图 4),常见矿化,但未形成矿体。本区内氧化带、次生硫化物带、原生带之间的界线都不明显,多呈现混合带,推测为铜矿物之间的迭加交代所致(胡明铭等,1999)。

4 矿床富集规律研究

笔者主要通过对土根曼苏铜矿的区域地质背景、矿区及矿床地质特征、矿石组成、矿物分带等进行研究,认为该矿床成因类型为沉积成岩-改造成因(BROWN,1997;高坪仙,1996;何毅特,1996;刘玄等,2015),矿体主要赋存在次生富集带的灰白色石英砂岩中,且在褶皱转折部位矿体变厚。古陆的风化剥蚀提供了基本的成矿物质,沉积物的搬运沉积形成了矿源层,盆地卤水在上覆压力及构造挤压条件下将成矿物质迁移到盆地边缘,与海水中的 S^{2-} 结合形成原生金属硫化物沉淀(HITZMAN, et al., 2005; 华仁民, 1989; 王明艳等, 2011; 张可等, 2013),后期由于地层不断被挤压抬升,含铜物质抬升至潜水面以上,在表生氧化、渗透淋滤等作用下,铜元素进一步通过交代作用得到富集,形成了具有工业意义的铜矿体(霍亮, 2010)。

4.1 原生带形成机理

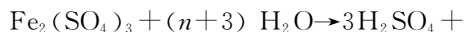
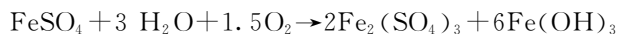
该区原生带金属矿物主要以黄铁矿、黄铜矿为主。土根曼苏铜矿产于晚古生代大陆边缘拗陷盆地中,在矿区砂岩粒屑中发现有石英脉-云英岩型原生铜矿石碎屑,其中含有浸染状分布的黄铜矿、黄铁矿,推测矿区上游与岩浆作用有关的原生铜矿床是该矿床主要的物质来源,成矿物质经长期风化剥蚀迁移到盆地内部,并形成沉淀。区内发现有大量 Cl^- 存在,推测盆地内贱金属离子主要是以 Cu 、 Cl 络合物的形式进行迁移,与多数学者关于砂岩型铜矿内流体迁移形式观点一致(SIMON, et al., 2006; 曹养同, 2010; 刘家军等, 2007; 夏浩东等, 2011),在上覆压力及构造驱动作用下,卤水沿着盆地边缘向上运动,与海水中的 S^{2-} 结合,生成原生金属硫化物沉淀。库山河群上组存在的巨厚石膏层被认为是 S^{2-} 的主要来源,在已发现的砂岩型铜矿中也几乎都存在蒸发岩系,大量研究表明其可能是砂岩型铜矿中 S^{2-} 的主要来源(HITZMAN, et al., 2010; ZHAO, et al., 2013; 高辉等, 2012; 胡明铭等, 1999)。



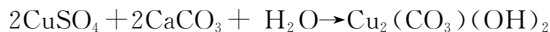
4.2 氧化带形成机理

本区氧化带深度不大,约30~80 m。在原生矿

物形成之后,该区在构造应力作用下被挤压抬升,当含矿层抬升至潜水面以上时,矿区氧逸度升高,金属硫化物开始逐渐被氧化,形成了硫酸铜或其他金属氧化物(HITZMAN, et al., 2010)。其中黄铁矿多发生褐铁矿化(图3i),因黄铁矿被氧化生成的硫酸亚铁不甚稳定,易被氧化成高价硫酸盐,进而在弱酸性或中性介质中水解形成褐铁矿,在氧化带富集。



铜的硫化物多被氧化形成硫酸铜溶液,下渗参与交代反应。在本区氧化带中广泛发育有孔雀石和部分蓝铜矿,系为硫酸铜溶液在下渗过程中遇到碳酸盐岩或溶液发生钙化反应所形成的产物。



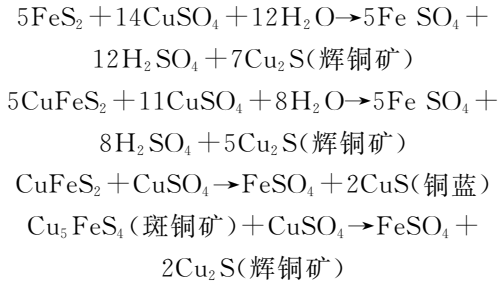
部分铜的硫化物还被氧化生成自然铜、黑铜矿、赤铜矿等。铜来源除原生硫化物之外,后期所形成的次生硫化物也因挤压抬升至地表附近发生表生氧化作用。如在本区分布广泛的黑铜矿,主要为辉铜矿的风化产物。由此可见,该区氧化带矿物的形成不是“一次性”的,而是经历长期表生氧化混合的结果,由于环境的变化,导致氧化带中矿物组合类型、所处空间都存在着差异(王永明等, 2003)。



4.3 次生硫化物带富集机理

次生硫化物带为该区主要的矿体富集区,且主要在西矿段发育,厚度约500 m。铜硫化物被氧化后形成的硫酸铜因其溶解度大易被淋滤,当渗透到潜水面(氧化还原界面)以下时, $CuSO_4$ 在还原环境中以交代金属硫化物的方式生成次生硫化物,使 Cu 进一步富集。在本区次生富集带中主要金属矿物有斑铜矿、辉铜矿、铜蓝以及交代残余的黄铜矿、黄铁矿等,且以辉铜矿居多。因矿区长期处于挤压抬升阶段,除原生硫化物外,赋存在还原环境中的次生硫化物也会被不断抬升至地表附近,进入到氧化环境

中参与反应,其中一部分被氧化(如上述孔雀石、自然铜、黑铜矿等)赋存在氧化带,另一部分则再次氧化成硫酸铜溶液,下渗进行交代反应,变化过程十分复杂,导致该区硫化物之间的分带现象不明显,但不断地叠加交代促进了 Cu 百分含量的增加,有利于提高矿石品位。



5 结论

(1)新疆土根曼苏砂岩型铜矿床金属矿物主要有黄铁矿、黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿、铜蓝、自然铜、黑铜矿、赤铜矿、孔雀石、褐铁矿等,相互交代关系明显。其中东矿段以黄铜矿和斑铜矿为主,而西矿段则以斑铜矿、辉铜矿、铜蓝为主。

(2)可将矿床分为氧化带、次生富集带、原生硫化物带。由于地壳在不断挤压抬升,氧化淋滤作用持续进行,含铜物质不断地被迭加交代,导致矿化带之间的界限不明显。

(3)初步认为土根曼苏铜矿为沉积成岩-改造成因,后期漫长的氧化淋滤过程使得含铜物质得到富集,使得矿体主要赋存在次生富集带中,以辉铜矿为标志性矿物。在不同地段发育的次生富集带亦有不同。该区东矿段主要以原生黄铜矿为主,铜品位较低,除褶皱轴部外,深部成矿潜力较弱,因而东矿段主要以查明褶皱轴部位置矿层为主;西矿段金属矿物以辉铜矿、斑铜矿、铜蓝等次生硫化物为主,说明该矿段表生氧化和淋滤作用较为充分,深部具有一定的找矿远景,且在褶皱部位矿体品质更好,厚度更大,系本区今后重要的找矿方向。

参考文献(References):

冯永玖. 新疆西昆仑特格里曼苏铜矿地质特征及矿化富集规律研究[D]. 吉林:吉林大学, 2008.
FENG Yongjiu. Study on the Geological Characteristics and

Enrichment Regularities of the Mineralization of Tegeli-mansu Copper deposit, West Kunlun, Xinjiang Autonomous Region[D]. Jinlin: Jilin University, 2008.
汪来群, 赵祖应. 新疆土根曼苏铜矿地质特征及远景评价[J]. 资源环境与工程, 2009, 23(3): 254-258.
WANG Laiqun, ZHAO Zuying. Geological Characteristics and Prospecting Potential Evaluation of Tugen Mansu Copper Deposit, Xinjiang [J]. Resource Environment and Engineering, 2009, 23(3): 254-258.
王战华, 赵祖应, 孔令芝, 等. 土根曼苏砂岩铜矿新认识[J]. 新疆有色金属, 2003, (S1): 12-15.
WANG Zhanhua, ZHAO Zuying, KONG Lingzhi, et al. New Breakthrough of the Tugen Mansu Sandstone Copper Deposits [J]. Xinjiang Nonferrous Metals, 2003, (S1): 12-15.
张振亮, 冯选洁, 董福辰, 等. 西南天山砂砾岩容矿矿床类型及找矿方向[J]. 西北地质, 2014, 47(3): 70-82.
ZHANG Zhenliang, FENG Xuanjie, DONG Fuchen, et al. Type, Genesis and Exploration Direction of Glutenite-hosted Ore Deposits in the Southwestern Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2014, 47(3): 70-82.
赵祖应, 关剑宇, 李先军, 等. 土根曼苏砂岩铜矿地质特征及找矿前景[J]. 地质找矿论丛, 2002, 17(2): 103-106.
ZHAO Zuying, GUAN Jianyu, LI Xianjun, et al. Geological Characteristics of Tugen Mancu Copper Ore Deposit and the Potentiality for Further Exploration [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2002, 17(2): 103-106.
毕华, 王中刚, 王元龙, 等. 西昆仑造山带构造-岩浆演化史[J]. 中国科学(D 辑), 1999, 29(5): 398.
BI Hua, ZHAO Zhonggang, WANG Yuanlong, et al. The Evolution of Magma in Orogenic Belt, West Kunlun[J]. Science in China (Series D), 1999, 29(5): 398.
李宝强, 杨万志, 赵树铭, 等. 西昆仑成矿带成矿特征及勘查远景[J]. 西北地质, 2006, 39(2): 128-142.
LI Baoqiang, YANG Wanzhi, ZHAO Shuming, et al. Metallogenic Characteristics and Prospecting Areas in the Western Kunlun Metallogenic Belt [J]. Northwestern Geology, 2006, 39(2): 128-142.
孙海田, 李纯杰, 吴海, 等. 西昆仑金属成矿省概论[M]. 北京: 地质出版社, 2003.

- SUN Haitian, LI Chunjie, WU Hai, et al. Introduction of the Metal Mineralization Province, West Kunlun[M]. Beijing:Geology Publishing House, 2003.
- 霍亮. 新疆西昆仑造山带内生金属成矿作用及成矿预测研究[D]. 吉林:吉林大学, 2010.
- HUO Liang. Study on Endogenic Metallic Metallization and Metallogenic Prediction in Western Kunlun Orogenic Belt, Xinjiang Province[D]. Jilin: Jilin university, 2010.
- 孙海田, 李纯杰, 李锦荣, 等. 西昆仑布伦口地区发现铁铜共生矿床成矿带[J]. 地球学报, 1996, (03):340.
- SUN Haitian, LI Chunjie, LI Jinrong, et al. The Iron-copper Symbiotic Deposit Metallogenic Belt Was Discovered in the Blumkou Area of West Kunlun[J]. Acta Geoscientica Sinica, 1996, (03):340.
- 连志义, 穆可斌. 北祁连奥陶系阴沟群中蒲花沟铜矿成矿类型及成因分析[J]. 西北地质, 2018, 51(2):126-135.
- LIAN Zhiyi, MU Kebin. Metallogenic Types and Genesis Analysis of the Puhagou Copper Deposit in Ordovician Yingou Group in North Qilian[J]. Northwestern Geology, 2018, 51(2):126-135.
- 胡煜昭, 吴鹏, 冉崇英. 论滇中砂岩铜矿浅、紫交互带赋矿及其金属硫化物分带之成因与成矿作用演化[J]. 地质论评, 2013, 59(05):893-899.
- HU Yuzhao, WU Peng, RAN Chongying. A Discussion on the Genesis of Sandstone-hosted Copper Deposits Occurring in the Contact Zone between Purple and Gray Sandstone, Metallic Sulphide Zoning and the Evolution of Metallization in Central Yunnan[J]. Geological Review, 2013, 59(05):893-899.
- 姚文勋. 云南某矿区一个铜矿床的次生富集规律[J]. 地质与勘探, 1975, (01):11-17.
- YAO Wenxun. Secondary Enrichment Law of a Copper Deposit in a Mining Area of Yunnan Province[J]. Geology and Exploration, 1975, (01):11-17.
- 胡明铭, 郑明华, 陈建平. EH-PH 相图在玉龙铜矿床次生富集作用研究中的应用[J]. 矿物岩石, 1999, (04):82-85.
- HU Mingming, ZHENG Minghua, CHEN Jianping. The Application of EH-PH Diagram to Secondary Enrichment of YuLong Copper Deposit [J]. Mineralogy and Petrology, 1999, (04):82-85.
- 高坪仙. 东非铜矿带与中国东川铜矿带某些地质特征对比[J]. 国外前寒武纪地质, 1996, (02):49-53.
- GAO Pingxian. Comparison of Geological Characteristics of the East African Copper Belt with China's Dong Chuan Copper Belt[J]. Precambrian Geology Abroad, 1996, (02):49-53.
- 何毅特. 东川铜矿成矿系列、矿床类型及成矿模式[J]. 云南地质, 1996, (04):319-329.
- HE Yite. Metallogenic series, Deposit Type and Metallogenic Model of Dongchuan Copper Deposit[J]. Yunnan Geology, 1996, (04):319-329.
- 刘玄, 范宏瑞, 胡芳芳, 等. 沉积岩型层状铜矿床研究进展[J]. 地质论评, 2015, (1):45-64.
- LIU Xuan, FAN Hongrui, HU Fangfang, et al. Research Progresses on Sediment-hosted Stratiform Copper Deposit[J]. Geological Review, 2015, (1):45-64.
- 华仁民. 东川式层状铜矿的沉积-改造成因[J]. 矿床地质, 1989, (02):3-13.
- HUA Renmin. On the "Sedimentation-transformation" Genesis of the Dongchuan Type Stratiform Copper Deposits [J]. Mineral Deposits, 1989, (02):3-13.
- 王明艳, 王安建, 邓圣富, 等. 澳大利亚布朗斯(Browns) Co-Cu-Ni 多金属矿床地球化学特征及与中国南方黑色岩系金属矿床对比[J]. 大地构造与成矿学, 2011, 35(1):105-117.
- WANG Mingyan, WANG Anjian, DENG Shengfu, et al. Geochemistry of the Browns Co-Cu-Ni Polymetallic Deposit and Comparison with the Black Shale Hosted Polymetallic Deposits in South China[J]. Geotectonica Et Metallogenia, 2011, 35(1):105-117.
- 张可, 刘绍友. 赞比亚铜矿带控矿要素浅析[J]. 地质科技情报, 2013, 32(5):131-134, 145.
- ZHANG Ke, LIU Shaoyou. The Study of Ore-Controlling Factors in the Zambian Copper Belt[J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(5):131-134, 145.
- 曹养同. 新疆库车盆地古近系—新近系蒸发岩系发育规律及其金属成矿研究[D]. 北京:中国地质科学院, 2010.
- CAO Yangtong. Development and Regularity of Evaporates and its Metallization in Kuqa Basin[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2010.
- 刘家军, 柳振江, 杨艳, 等. 盐类在金属、非金属成矿过程中的作用[J]. 地质找矿论丛, 2007, 22(3):161-171.

- LIU Jiajun, LIU Zhenjiang, YANG Yan, et al. The Salt Roles in the Mineralizing Processes of Metal and Non-metal Deposits [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2007, 22(3): 161-171.
- 夏浩东, 王明艳, 邓会娟. 沉积岩容矿的层状铜矿床成因——以澳大利亚布朗斯(Browns)铜多金属矿床为例[J]. 世界地质, 2011, 30(3): 323-334.
- XIA Haodong, WANG Mingyan, DENG Huijuan. Genesis of Sedimentary Rock-hosted Stratiform Copper Deposit——A Case Study on Browns Cu-polymetallic Deposit, Australia [J]. Global Geology, 2011, 30(3): 323-334.
- 高辉, 裴荣富, 王安建, 等. 海相砂页岩型铜矿成矿模式与地质对比——以中国云南东川铜矿和阿富汗安纳克铜矿为例[J]. 地质通报, 2012, 31(8): 1332-1351.
- GAO Hui, PEI Rongfu, WANG Anjian, et al. Marine Sand Shale-hosted Copper Mineralization Model and Geological Correlation: A Case Study of the Dongchuan Copper Mine in Yunnan and the Aynak Copper Mine in Afghanistan[J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(8): 1332-1351.
- 王永明, 王建国, 宋纯利. 刁泉银铜矿床硫化物次生富集特征[J]. 地质找矿论丛, 2003, 18(2): 122-125.
- WANG Yongming, WANG Jianguo, SONG Chunli. Secondary Enrichment Features of Diao Quan Ag-Cu Deposit and the Ore-searching Direction[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2003, 18(2): 122-125.
- 刘云华, 新疆阿克陶县土根曼苏铜矿床地质、成矿规律及找矿方向综合研究[R]. 2013.
- LIU Yunhua. Comprehensive study on the geology, ore-forming regularity and ore-prospecting direction of Tugemansu Copper deposit in Aktao County xinjiang Province[R]. 2013.
- A. C. Brown. World - class sediment hosted stratiform copper deposits: Characteristics, genetic concepts and metallogeny[J]. Australian Journal of Earth Sciences and the International Geoscience Journal of the Geological Society of Australia, 1997, 44(3): 317-328.
- MURRAY H., RODNEY K., DAVID B., et al. The Sediment-hosted Stratiform Copper Ore System[J]. Economic Geology, 2005, 100.
- ADAM C. S., THOMAS P., PHILIP A. CANDELA, et al. Copper partitioning in a melt-vapor-brine-magnetite-pyrrhotite assemblage[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2006, 70(22): 5583-5600.
- ZHAO Xinfu, ZHOU Meifu, LI Jianwei, et al. Late Paleoproterozoic Sedimentary Rock-hosted Stratiform Copper Deposits in South China: Their Possible Link to the Supercontinent Cycle[J]. Mineralium Deposita, 2013, 48(1): 129-136.
- MURRAY H., DAVID S., STUART B. Formation of Sedimentary Rock-hosted Stratiform Copper Deposits through Earth History[J]. Economic Geology, 2010, 105(3): 627-639.