

编号: 0258-7106 (2011) 06-1017-22

西藏甲玛铜多金属矿床角岩岩石类型、成因意义 及隐伏斑岩岩体定位预测*

王威平¹, 唐菊兴² * *

(1 中国地质科学院研究生部, 北京 100037; 2 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用
与资源评价重点实验室, 北京 100037)

摘 要 甲玛铜多金属矿床中发育角岩,按角岩与成矿的关系,可将其划分为成矿前角岩与成矿期角岩,多属钠长绿帘角岩相,矿物共生组合主要为钠长石+黑云母+石英。成矿前角岩以细晶化为主要特征,大多斑晶矿物没有独立晶形,其岩性主要为原生黑云母角岩(具典型斑点状、条带状构造)、长英质角岩;成矿期角岩的热液斑晶矿物具独立晶形,其岩性主要为硅化角岩、热液黑云母-绿泥石角岩等。参照地层接触关系、岩石结构特征,通过岩石化学和地球化学特征进行综合对比,确定了角岩的原岩为林布宗组砂板岩和碳质板岩。角岩是热变质作用的产物,在这一前提下,笔者统计了 0~40 勘探线各钻孔角岩与角岩型矿体厚度等值线图,与各钻孔角岩内 Cu、Mo 元素丰度浓集中心综合对比,并结合最新的地质勘探发现,对隐伏斑岩岩体进行了平面定位,并构建了甲玛铜多金属矿床模型,还原了甲玛矿区的成矿作用序列,对比阐释了热变质作用与热液蚀变作用对角岩型矿化的意义。

关键词 地质学 角岩 成矿前角岩 成矿期角岩 热变质 隐伏斑岩岩体 矿床模型 斑岩成矿系统 演化 甲玛
中图分类号: P618.41 **文献标志码**: A

Rock types and genetic significance of hornfels and location prediction of concealed porphyry bodies in Jiama copper polymetallic deposit, Tibet

WANG WeiPing¹ and TANG JuXing²

(1 Graduate School of Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract

The hornfels thermal metamorphism is well developed in the Jiama copper polymetallic deposit. Rock types of hornfels can be divided into the pre-oreforming stage hornfels and the syn-oreforming ones, belonging to AEH facies with the main mineral association being albite + biotite + quartz. The pre-oreforming hornfels consists of protogenic biotite hornfels with typical mottled and banded structures, and felsic hornfels characterized by refined grains, with most phenocryst minerals having no independent morphology. The syn-oreforming hornfels silicified hornfels and hydrothermal biotite-chlorite hornfels, with phenocryst minerals possessing good crystal habit. Based on stratigraphic contact relationship and rock fabrics, the authors infer that the protoliths of hornfels were sandy slates and carbonaceous slates, evidenced by comparative study of petrochemical and geochemical

* 本文得到危机矿山接替资源找矿专项典型矿床及成矿规律总结研究项目(编号 20089932)、国家 973 项目(编号 2011CB403103)、青藏专项(编号 1212010012005)共同资助

第一作者简介 王威平,男,1987 年生,硕士研究生,矿产普查与勘探专业。Email: wpw-tibet@126.com

* * 通讯作者 唐菊兴,男,研究员。Email: tangjuxing@126.com

收稿日期 2011-01-12 改回日期 2011-10-13。张绮玲编辑。

features. Considering that hornfels is a natural tracer material for thermal metamorphism, the authors contoured the thickness of hornfels and related mineralization and located the concentration centers of Cu and Mo, which helps indicate the location of the concealed porphyry body with the help of the late test exploration results. The authors built a model for the Jiama copper polymetallic deposit, which indicates the sequence of mineralization in the ore deposit and comparatively explains the roles of the thermal metamorphism and hydrothermal alteration in hornfels type mineralization.

Key words: geology, hornfels, pre-oreforming hornfels, syn-oreforming hornfels, thermal metamorphism, concealed porphyry, deposit model, porphyry metallogenic system, evolution, Jiama

甲玛铜多金属矿床是近年来在西藏冈底斯成矿带发现的一个超大型铜多金属矿床,随着勘探工作的不断深入,以及对矿床类型和深部预测的认识不断完善(唐菊兴等,2010;2011a,2011b;王登红等,2010;2011a;2011b;应立娟等,2010a;2010b;王崴平等,2010;彭惠娟等,2010),其铜、钼、金、银资源量不断扩大。甲玛铜多金属矿床是典型的斑岩-矽卡岩型矿床,主要由3个矿体组成,产于斑岩中的钼(铜)矿体、产于矽卡岩中的铜铅锌钼(金银)矿体和产于角岩中的钼铜矿体,其中斑岩和角岩中的铜钼矿体属于典型的斑岩型矿化体。目前得到控制的产于角岩中的铜钼矿体,钼资源量大于30万吨,铜的资源量已经达到250万吨以上,而斑岩中的铜资源量,仅仅为角岩型矿体铜资源量的 $1/30$ ^{①②③}。

对角岩的研究可上溯到20世纪初期,Goldschmidt(1911)在研究挪威Oslo地区辉长岩体接触变质晕时,揭示了热力学多相平衡规律,这一发现奠定了变质岩矿物共生分析的基础(路凤香等,2001)。国内外关于角岩的研究,多侧重于利用现代测试分析技术研究特征变质矿物,分析其形成时的物理化学条件(Christopher et al., 1985; Dickey et al., 1974; Daczko et al., 2002; Alberto et al., 2003; 蒋振频等,2007),进行同位素年代学研究(Suzuki et al., 1996),探讨岩石成因、原岩恢复(林主清等,2002),追索角岩与成矿之间的关系(唐菊兴等,2003;2010;王登红等,2011b)。角岩在斑岩铜钼矿床中广泛发育,作为矿床的重要组成部分,常作为硫

化物矿化赋存的主岩,但研究程度尚浅。因此,本文对甲玛铜多金属矿区的角岩及产于角岩中的铜钼矿体进行了较深入的研究。

1 矿床地质概况

甲玛铜多金属矿床位于拉萨地体中南部,区内出露地层简单,主要为被动陆缘相的碎屑-碳酸盐岩组成,包括上侏罗统多底沟组(J_3d)、下白垩统林布宗组(K_1l)和少量第四系(图1)。多底沟组主要为灰黑色中厚层灰岩,在矿区几乎全部发生不同程度的大理岩化,而成为大理岩,常发育矿化矽卡岩,伴随黄铜矿、斑铜矿、黝铜矿、辉钼矿、闪锌矿、方铅矿等矿化;林布宗组上部为灰、暗灰色砂岩和板岩互层,偶见安山质凝灰岩及凝灰质砂岩;下部为灰黑色粉砂岩夹碳质泥页岩、黑色的斑点板岩及灰白色的绢云母板岩。甲玛矿床受控于甲玛-卡军果推覆构造系及其伴生的滑覆构造系,甲玛-卡军果推覆构造系,大体由北面墨竹曲一带开始,沿江日啊-金布拱铲式断裂带向南叠缩推覆而成。矿区主要出露花岗岩、黑云母二长花岗斑岩、花岗闪长玢岩、石英闪长玢岩、闪长玢岩、闪长岩、闪斜煌斑岩、角闪辉绿(玢)岩、石英辉长岩等,钻孔所揭露的斑岩多呈脉状、枝状穿插围岩,其岩性主要为黑云母二长花岗斑岩、黑云母花岗斑岩、石英闪长玢岩等,多属于钙碱性系列岩石(唐菊兴等,2010),与铜钼矿化密切相关(图1)。

① 唐菊兴,王登红,钟康惠,汪雄武,郭衍游,刘文周,应立娟,郭娜,郭科,郑文宝,秦志鹏,李磊,凌娟,叶江,黎枫信,姚晓峰,李志军,孙艳,王友,白景国,唐晓倩,裴有哲,彭惠娟. 2009. 西藏自治区墨竹工卡县甲玛铜多金属矿区0-16-40-80、0-15线矿段铜多金属矿勘探报告. 内部资料.

② 唐菊兴,王登红,钟康惠,汪雄武,郭衍游,刘文周,应立娟,郭娜,郭科,郑文宝,秦志鹏,李磊,凌娟,叶江,黎枫信,姚晓峰,李志军,孙艳,王友,白景国,唐晓倩,裴有哲,彭惠娟. 2009. 西藏自治区墨竹工卡县甲玛矿区外围铜多金属矿详查报告. 内部资料.

③ 唐菊兴,王登红,黎枫信,郭衍游,郑文宝,唐晓倩,王煥. 2009. 西藏自治区墨竹工卡县甲玛铜多金属矿区0-40线角岩型矿体资源储量评估报告. 内部资料.

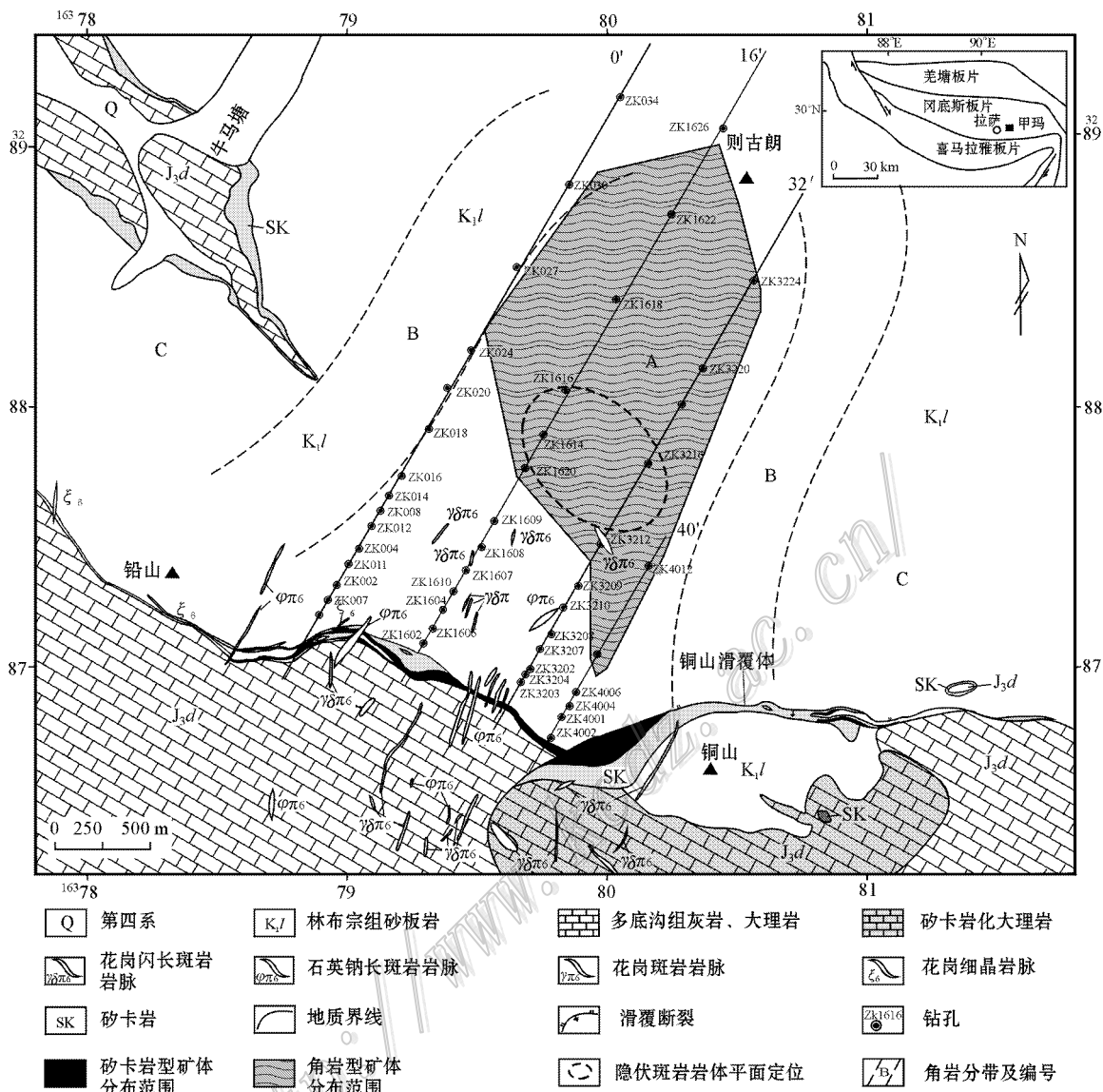


图 1 甲玛铜多金属矿床矿区地质图(底图据唐菊兴等, 2009^①)

Fig. 1 Geological map of the Jiamma copper polymetallic deposit (after Tang et al., 2009)

角岩是矿区内与成矿相关的斑岩体侵位后热变质作用的产物,在甲玛矿区,角岩化接触变质晕的范围达 20 km²,已经发现角岩型矿体主要分布在 0~40 线之间(图 1),平面上呈梭状,剖面上呈筒状,厚度大,品位高,大部分为工业矿体,一般钻孔见矿厚度 10~50 m,单孔(ZK3216)见矿视厚度最厚为 685.68 m(王崴平等,2010),含矿斑岩体的外接带角岩中的铜钼矿体已经成为极为重要的铜、钼矿化

类型,有望成为露天开采的重要矿体类型。

从表 1 可以看出,目前对于角岩的分类方式主要有 2 种:以角岩的热变质期原生矿物为代表命名;以角岩的后期热液改造所生成的蚀变矿物为代表命名。由于斑岩岩浆热液成因矿床内普遍的热变质与热液蚀变作用紧密联系,导致分类稍显混乱,因此笔者按成矿时间将角岩划分为成矿前角岩和成矿期角岩,前者为岩浆侵位过程中接触热变质作用所形成

① 唐菊兴,王登红,钟康惠,汪雄武,郭衍游,刘文周,应立娟,郭娜,郭科,郑文宝,秦志鹏,李磊,凌娟,叶江,黎枫信,姚晓峰,李志军,孙艳,王友,白景国,唐晓倩,裴有哲,彭惠娟. 2009. 西藏自治区墨竹工卡县甲玛矿区外围铜多金属矿详查报告. 内部资料.

表 1 斑岩岩浆热液成因铜钼矿床斑岩、角岩、角岩内矿化类型一览表

Table 1 Types of porphyry, hornfels and mineralization occurring in hornfels in ore deposits associated with porphyry magma-hydrothermal solution

矿床名称	斑岩类型	角岩类型	角岩内矿化类型	参考文献
西藏甲玛铜多金属矿床	黑云母二长花岗斑岩、黑云母花岗斑岩、石英闪长玢岩	黑云母角岩、长英质角岩、硅化角岩、热液黑云母-绿泥石角岩	细脉浸染状 Mo、Cu 矿化	唐菊兴等,2010;
西藏玉龙铜矿床	黑云母二长花岗斑岩	青磐岩化角岩	细脉浸染状 Cu、Mo 矿化	唐菊兴,2003
江西德兴铜矿床	花岗闪长斑岩	黑云母角岩、透闪阳起石角岩	细脉浸染状 Cu、Mo 矿化	邵克忠,1983
新疆包谷图铜钼矿床	闪长岩、闪长玢岩	硅化角岩、热液黑云母角岩	浸染状 Cu 矿化	申萍等,2009
新疆东天山白山钼矿床	花岗斑岩	长英质角岩	细脉状、网脉状、浸染状 Mo 矿化	邓刚等,2004
内蒙古敖脑达坝铜多金属矿床	花岗斑岩	热液绿泥石石英角岩、热液黑云母石英角岩	浸染状 Cu 矿化	赵元艺等,1994
河南栾川三道庄钼矿床	二长花岗岩、黑云母花岗闪长岩	长英质角岩、钙硅酸盐角岩、透辉石斜长石角岩	细脉状浸染状 Mo、W 矿化	瓮纪昌等,2010
土耳其 Ayvalik Ayazmant 铁铜矿床	二长闪长岩、石英二长斑岩	黑云母角岩(钾质角岩)、辉石角岩(钙质角岩)	Fe、Cu 矿化	Tolga,2010

的由原生变质矿物组成的角岩 ;后者为岩浆-热液演化过程中对前期角岩造成的蚀变叠加作用所形成的由热液新生矿物占主导地位的角岩。甲玛铜多金属矿床角岩类型从平面上主要显示 3 个分带(图 1):A 带主要为成矿期角岩,其岩性为热液黑云母-绿泥石角岩(含退变质型绿泥石角岩)、硅化角岩、砂卡岩化角岩等,该带也含原生黑云母角岩、长英质角岩等 ;B 带为成矿期角岩与成矿前角岩的过渡带,其岩性为原生黑云母角岩(含退变质型绿泥石角岩)、长英质角岩与硅化角岩等 ;C 带主要为成矿前角岩,其岩性为原生黑云母角岩(含退变质型绿泥石角岩)、长英质角岩,该带也含硅化角岩、青磐岩化角岩等。

2 甲玛铜多金属矿区角岩岩石类型

甲玛矿区中,与角岩呈过渡整合接触的为林布宗组(K_1l)碳质板岩和砂板岩。碳质板岩(图 2a、2b)呈黑色、深灰色,外表呈致密隐晶质,具板理构造、斑点状构造,变余泥质结构。砂板岩呈灰白色、浅黄色等,具板状、块状构造,变余砂质结构。角岩下部出露砂卡岩、大理岩等。

甲玛矿区角岩类型复杂,其原岩受到了热变质与热液蚀变作用的综合影响,按照角岩与成矿时间的关系,可将矿区范围内的角岩系统分为两大类:成

矿前角岩与成矿期角岩。成矿前角岩以接触热变质作用产生的原生黑云母为特征矿物,其平均化学式为 $(K_{1.88}Na_{0.02})_{1.91}(Mn_{0.02}Mg_{2.60}Fe_{1.30}^{2+}Fe_{0.99}^{3+}Ti_{0.21}Al_{0.32}Cr_{0.02}Ca_{0.01})_{5.48}[(Al_{2.62}Si_{5.38})_8O_{20}](OH)_2$;成矿期角岩以热液蚀变作用产生的热液黑云母为特征矿物,其平均化学式为 $(K_{1.75}Na_{0.03})_{1.78}(Mn_{0.01}Mg_{3.24}Fe_{0.74}^{2+}Fe_{1.22}^{3+}Ti_{0.14}Al_{0.18}Cr_{0.02})_{5.57}[(Al_{2.63}Si_{5.37})_8O_{20}](OH)_2$ (王崴平等,待刊)^①。笔者在甲玛矿区采集了 22 个典型的板岩和角岩岩石样品,并将其系统地分为 5 组(表 2,此处分组并非岩石地层单位中的“组”,而是板岩和角岩按照特征矿物进行命名和分类的“组”),分别为砂板岩(第 1 组)、碳质板岩(第 2 组)、原生黑云母角岩(第 3 组)、热液黑云母-绿泥石角岩(第 4 组)和硅化角岩(第 5 组),其中第 3 组为成矿前角岩,第 4 组和第 5 组为成矿期角岩。表 2 为各组样品主量元素的测试结果,分析单位为西南冶金地质测试所,其中, SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 、 TiO_2 、 MnO 、 P_2O_5 等元素采用了 XRF(X-射线荧光法)的分析方法,测定精度分别为 0.50%、1.16%、1.60%、2.20%、0.70%、2.22%、0.44%、0.49%、0.75%、3.20%,F 元素采用 ISE(离子选择性电极法)分析,测定精度为 2.30%,Cl 元素采用 COL(分光光度法)分析,测定精度为 2.35%,FeO 采用 VOL(滴定法)分析,测定

① 王崴平,唐菊兴. 甲玛铜多金属矿床角岩中黑云母矿物化学特征及其对成矿的指示. 地质通报,待刊.



a. ZK4305-93.60 m 斑点状碳质板岩



b. ZK4707-50 m 条带状碳质板岩



c. ZK3219-267.125 m 斑点状原生黑云母角岩



d. ZK3219-836.05 m 条带状原生黑云母角岩



e. ZK1624-431.4 m 热液黑云母-绿泥石角岩



f. ZK4011-540.7 m 硅化角岩石英脉中黑云母

图2 甲玛矿区板岩、角岩样品照片

注: ZK4305-93.60 m 表示样品取自钻孔 4305 的 93.6 m 处, (+) 代表正交偏光, 比例尺见各张照片标示

Fig. 2 Types of slate and hornfels in the Jiamia ore deposit

表 2 甲玛铜多金属矿床砂板岩、碳质板岩、角岩化学成分
Table 2 Chemical compositions of sandy slate, carbonaceous slate and hornfels in the Jima copper polymetallic deposit

编号及岩石鉴定名称		组别	w(B)/%													
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	LOI	F	Cl
JN-1	砂板岩	1	66.02	18.21	3.21	0.51	1.18	0.13	0.24	6.04	0.74	0.014	0.024	3.46	0.12	0.010
JW-2	砂板岩	1	69.35	16.32	2.79	3.66	1.12	0.19	0.14	2.55	0.66	0.031	0.11	2.84	0.063	0.014
砂板岩平均值			67.69	17.27	3.00	2.09	1.15	0.16	0.19	4.30	0.70	0.02	0.07	3.15	0.09	0.01
JW-1	碳质板岩	2	69.48	18.28	2.21	3.00	0.62	0.13	0.21	2.73	0.98	0.10	0.028	2.03	0.078	0.011
JW-5220-3	碳质板岩	2	66.87	16.28	0.98	5.57	1.77	1.88	0.36	2.55	0.72	0.19	0.093	2.31	0.049	0.018
ZK2322-382.56	碳质板岩	2	67.03	15.60	0.67	4.78	1.50	1.42	0.28	3.62	0.64	0.15	0.12	3.55	0.065	0.012
ZK4707-136	碳质板岩	2	60.69	21.02	0.98	3.36	2.05	0.50	0.22	5.54	0.93	0.063	0.14	4.26	0.092	0.013
ZK6302-144.5	碳质板岩	2	68.35	15.34	0.60	4.32	1.92	2.24	1.00	2.49	0.71	0.082	0.11	2.71	0.066	0.051
ZK9602-32.15	碳质板岩	2	62.44	19.24	1.06	5.11	1.99	0.69	0.42	4.23	0.76	0.056	0.11	3.86	0.079	0.012
ZK9602-213.8	碳质板岩	2	70.38	14.60	0.57	4.58	1.81	1.63	0.49	2.67	0.58	0.088	0.099	2.40	0.049	0.015
碳质板岩平均值			66.46	17.19	1.01	4.39	1.67	1.21	0.43	3.40	0.76	0.11	0.10	3.02	0.07	0.02
ZK3213-189.15	斑点状原生黑云母角岩	3	65.36	17.39	3.12	1.35	1.73	0.36	1.09	4.47	0.68	0.034	0.12	3.86	0.14	0.015
ZK3213-733.3	斑点状原生黑云母角岩	3	60.30	19.33	1.23	2.65	1.63	0.73	4.83	6.62	0.71	0.039	0.17	1.62	0.13	0.027
ZK1527-626.1	条带状原生黑云母角岩	3	58.61	19.43	0.45	5.90	2.38	3.59	1.58	3.33	0.87	0.070	0.14	2.94	0.081	0.017
ZK4803-696.4	条带状原生黑云母角岩	3	66.35	14.45	1.05	3.84	2.85	4.51	1.55	2.70	0.63	0.055	0.11	1.21	0.18	0.044
原生黑云母岩岩平均值			62.66	17.65	1.46	3.43	2.15	2.30	2.26	4.28	0.72	0.05	0.14	2.41	0.13	0.03
ZK817-99	热液黑云母-绿泥石角岩	4	64.41	16.53	3.05	0.79	2.02	1.65	0.30	4.78	0.70	0.040	0.13	4.93	0.18	0.015
ZK1616-232.7	热液黑云母-绿泥石角岩	4	58.23	21.26	1.36	2.14	1.87	0.86	2.74	7.33	0.80	0.023	0.11	2.64	0.14	0.011
ZK3213-715.1	热液黑云母-绿泥石角岩	4	65.82	15.85	0.85	2.49	1.66	0.39	3.65	6.78	0.70	0.034	0.12	1.13	0.15	0.035
ZK3219-863.81	热液黑云母-绿泥石角岩	4	69.76	10.65	1.30	3.93	2.78	2.73	1.16	2.03	0.40	0.082	0.37	4.26	0.17	0.024
ZK3219-870.85	热液黑云母-绿泥石角岩	4	44.97	19.65	3.80	8.34	4.47	7.36	0.47	1.41	0.84	0.20	0.45	7.97	0.25	0.030
ZK3219-918.1	热液黑云母-绿泥石角岩	4	32.25	2.67	19.87	7.83	0.64	26.64	0.18	0.06	0.15	0.54	0.52	8.35	0.041	0.054
热液黑云母-绿泥石角岩平均值			55.91	14.44	5.04	4.25	2.24	6.61	1.42	3.73	0.60	0.15	0.28	4.88	0.16	0.03
ZK3217-17	硅化角岩	5	69.18	15.32	3.89	0.38	0.75	0.08	0.23	4.70	0.78	0.020	0.024	4.34	0.11	0.013
ZK3219-59.6	硅化角岩	5	73.57	14.81	1.65	0.53	0.59	0.09	0.22	4.26	0.73	0.021	0.076	3.06	0.18	0.017
ZK1616-169.2	硅化角岩	5	59.75	20.57	2.78	1.30	1.66	0.50	2.09	6.58	0.80	0.029	0.14	3.46	0.16	0.013
硅化角岩岩平均值			67.50	16.90	2.77	0.74	1.00	0.22	0.85	5.18	0.77	0.02	0.08	3.62	0.15	0.01
角岩总体平均值			60.66	15.99	3.42	3.19	1.93	3.81	1.54	4.23	0.67	0.09	0.19	3.83	0.15	0.02

分析单位:西南冶金地质测试所;分析时间:2011年2月。

精度为4.54%,LOI采用GR(重量法)分析,测定精度为3.32%。

成矿前角岩主要表现了热变质作用对原岩产生的细晶化作用,其特征矿物大多没有独立的晶形,这类角岩呈灰色、灰白色,保留了透入性、均一性的半定向斑点状变成构造、条带状变余构造,这些构造较为规则,光学显微镜下无法识别斑点或条带状集合体矿物的晶形,具隐晶质结构,扫描电镜下,可观察到斑点或条带的组成矿物为碳粒、石英、钠长石、黑云母(雏晶),基质的成分为石英、钠长石、黑云母,但矿物颗粒的形状极不规则,彼此之间接触线呈锯齿状或缝合粒状,为共生矿物组合。岩石类型以斑点状角岩(图2c、3a)、条带状角岩(图2d、3b)为代表,其内普遍发育原生黑云母,其岩石化学成分表现为高硅、低铝、铁、镁的特征, $w(\text{SiO}_2)$ 平均为62.66%, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 平均为17.65%, $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 平均为1.46%, $w(\text{FeO})$ 3.43%, $w(\text{MgO})$ 平均为2.15%。此外,还有块状长英质角岩。成矿前角岩往往也发生退化变质作用,例如由黑云母、石英、碳粒、钠长石等组成的斑点状集合体,在后期热液作用下,黑云母可退变质为绿泥石或绿帘石,导致斑点颜色由黑色转为绿色或浅绿色。在矿区范围内,平面上由外围向中心,成矿前角岩的厚度逐渐减小,颜色由红色或绿色过渡到灰色、灰白色。剖面上由浅而深,在钻孔50~100 m深度范围内主要表现为条带状构造,100~300 m深度范围内主要表现为斑点状构造或块状构造。由于矿区内角岩变质级别较低,红柱石、堇青石等变质矿物较为少见。成矿前角岩的矿化一般较弱,金属矿物仅可见呈浸染状分布的黄铁矿,当其受到热液蚀变作用的叠加时,也可出现黄铜矿化等。值得一提的是,并非所有显示条带状黑云母皆指示原生黑云母的产出特征,笔者在岩芯编录过程中,发现按照视倾角条带状黑云母的产状主要分为两类,一类呈近水平纹层状,视倾角约为 $0\sim 15^\circ$;另一类呈缓倾斜状,视倾角约为 $25\sim 30^\circ$,部分岩芯可见水平纹层状黑云母被缓倾斜状黑云母穿插的现象、且缓倾斜状黑云母的条带形态极不规则并赋存于微节理中,同时在围岩内产生分散的枝杈状构造,这一现象指示了后者可能为钾质热液填充微节理并交代围岩而成。本次研究中笔者主要采集的样品为近水平纹层状且其赋存部位未发现明显微节理的黑云母条带,并将其定义为条带状原生黑云母角岩(图2d)。

由于成矿期广泛发育的热液蚀变作用,对角岩

产生了显著的改造,致使角岩的颜色、结构、构造等外在特征都发生了明显的变化,将此类角岩归为成矿期角岩,其实质是一类热液蚀变岩。该类角岩呈灰白色、灰绿色、浅绿色、斑杂色等。斑点状、条带状构造已发生退化,渐至消失,呈现出非均一性的块状、角砾状、脉状等构造。岩石具有斑状变晶结构,斑晶矿物较为自形,热液矿物在角岩中的分布不均匀,多赋存于角岩的节理、裂隙中,与其他热液矿物共生于角岩内部,基质为隐晶质结构。岩石类型为热液黑云母-绿泥石角岩(图2e)、硅化角岩(具明显的石英脉、石英网脉或全岩石英化)(图2f)、矽卡岩化角岩、青磐岩化角岩、阳起石角岩等,其中前两种具有明显的成矿指示意义。热液黑云母-绿泥石角岩主要分布于8~32线,出露钻孔深度范围为400~1 000 m,多与黄铜矿化有关,其岩石化学成分表现为硅含量降低,铁、镁含量增高[$w(\text{SiO}_2)$ 平均为55.91%, $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 、 $w(\text{FeO})$ 平均分别为5.04%、4.25%, $w(\text{MgO})$ 平均为2.24%]。硅化角岩在矿区平面上皆有分布,0~40 勘探线范围内为硅化强度最高的地带,出露于钻孔深度范围为100~1 000 m,其岩石化学成分表现为高硅低铝,同时具有一定的铁镁含量[$w(\text{SiO}_2)$ 平均为67.50%, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为16.90%, $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 、 $w(\text{FeO})$ 平均分别为2.77%、0.74%, $w(\text{MgO})$ 平均约1.00%]。硅化角岩中含有铁镁质,原因在于甲玛矿区内石英脉中往往赋存有黑云母(图2f),硅化角岩与辉钼矿化、黄铜矿化密切相关。扫描电镜下,对热液型角岩的基质进行观察,结合电子探针分析,发现其基质为呈细粒鳞片变晶结构的黑云母、钠长石、石英等矿物,矿物相互之间呈镶嵌状,因此热液型角岩的基质成分仍然代表了原始的热变质所形成的矿物共生组合特征。随着深度的增加,在钻孔900 m孔深的位置,角岩基质的共生矿物组合转变为钾长石、石英、黑云母,且基质的组成矿物未见明显的蚀变现象,因此,该角岩虽然处于热液活动活跃地带,但其基质的矿物组成仍为热变质期的矿物共生组合特征。此外,成矿期角岩还包括由退变质作用所形成的角岩,以代表性矿物黑云母向绿泥石的转变作为特征(图4c、4e)。

从砂板岩、碳质板岩到角岩,岩石化学组成特征并没有显著的变化(图5),在板岩与角岩主量元素的二元图解中,板岩与角岩的样品投点区域接近,尤以 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 、 $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO})\text{-SiO}_2$ 、 MgO-SiO_2 哈克图表现明显,说明从砂板岩或碳质板岩到角岩是一个

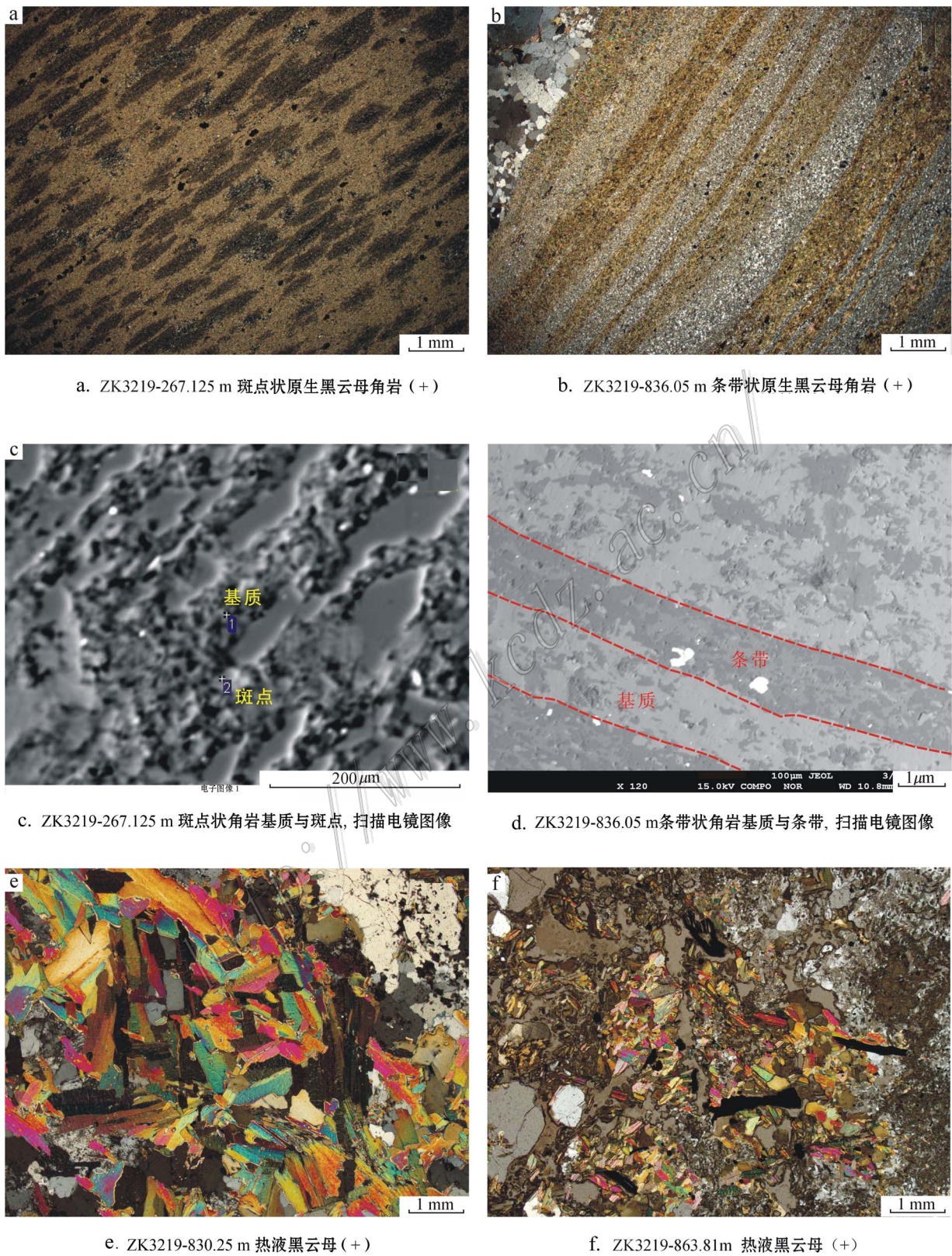


图 3 甲玛矿区角岩主要类型及其结构特征

注: ZK3219-267.125 m 表示样品取自钻孔 3219 的 267.125 m 处, (+) 代表正交偏光, 比例尺见各张照片标示

Fig. 3 Types and fabric characteristics of hornfels in the Jima ore deposit

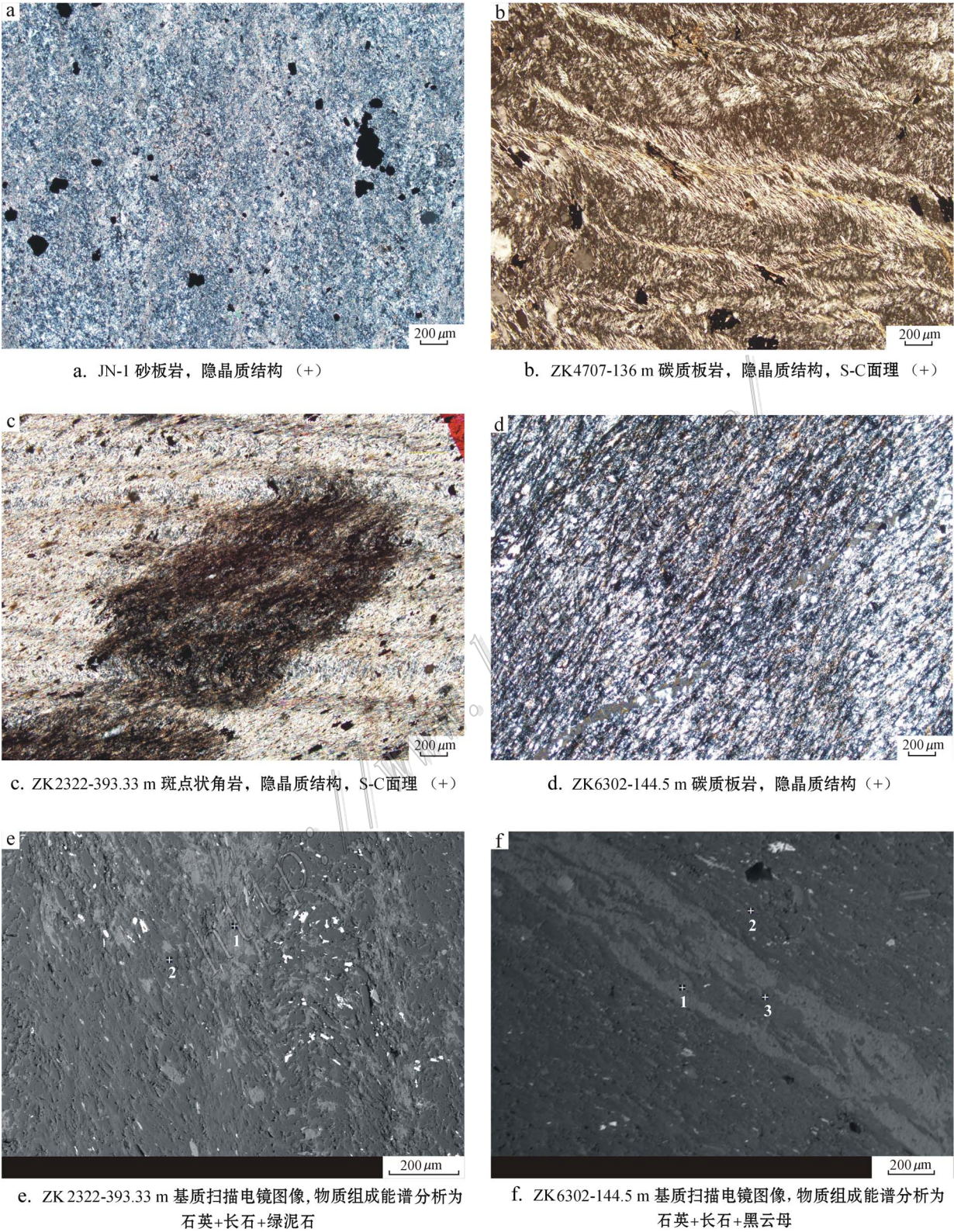


图 4 甲玛矿区砂板岩、碳质板岩、角岩显微组构特征对比
ZK4707-136 m 表示样品取自钻孔 4707 的 136 m 处，(+)表示正交偏光
Fig. 4 Comparison between sandy slate, carbonaceous slate and hornfels in the Jima ore deposit

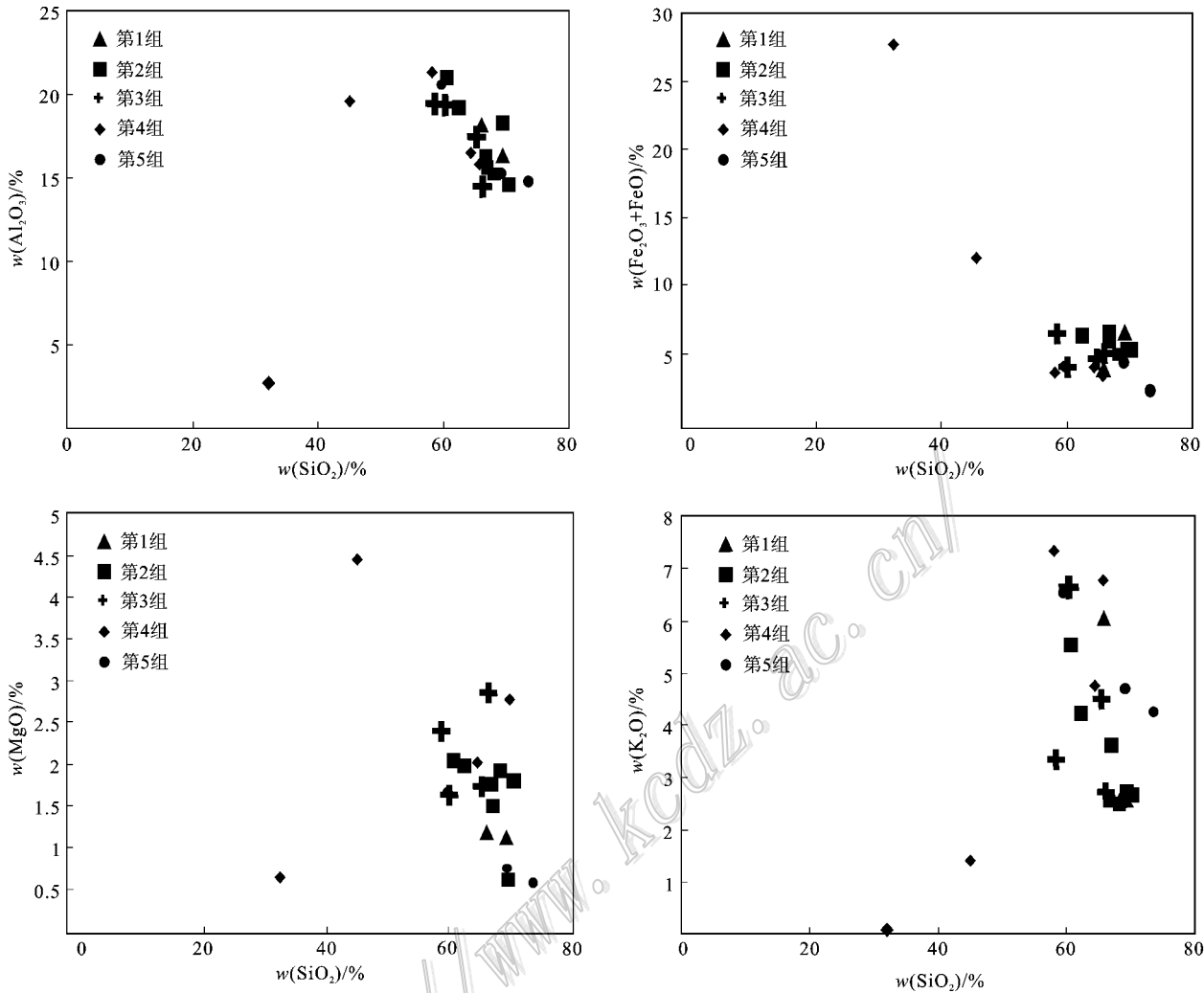


图 5 甲玛铜多金属矿床板岩、角岩主量元素二元图解

Fig.5 Binary diagram of major elements in slate and hornfels of the Jiama deposit

(近)等化学组分的变质系列;从成矿前角岩(第 3 组)到成矿期角岩(第 4 组和第 5 组), SiO_2 、 Al_2O_3 、 $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO})$ 、 MgO 的含量未见明显变化,但在 K_2O - SiO_2 哈克图中,成矿前角岩与成矿期角岩的投点区域相对分散,造成这一变化的原因为第 3 组成矿期角岩中含有热液黑云母等含钾矿物,第 4 组成矿期角岩受到硅化蚀变,硅含量提高,从而导致成矿前角岩与成矿期角岩的钾硅含量投点分散。

甲玛矿区角岩中原生黑云母(图 3a、3b、3c、3d)和热液黑云母(图 3e、3f)区别明显,最大区别在于晶体发育程度,原生黑云母不具有独立晶形,只能在扫描电镜下结合电子探针确定其化学组分;而热液黑云母的晶形发育完整,在普通光学显微镜或者手标本下即可观察。如前所述,原生型角岩或热液型角岩的基质成分,一定程度上都反映了热变质期的矿

物共生组合,从浅部的钠长石 + 石英 + 黑云母转变到深部的钾长石 + 石英 + 黑云母,代表了热变质级别的递增,相当于从钠长-绿帘角岩相过渡到角闪角岩相,甚至辉石角岩相,表明热量来自于垂直方向,说明角岩下部可能存在隐伏斑岩岩体。

3 角岩原岩恢复及稀土元素、微量元素分布特征

甲玛矿区地层综合柱状图(图 6)显示林布宗组地层,上部为砂岩、砂板岩,下部为泥质板岩、碳质板岩,林布宗组地层受到岩浆热变质作用普遍发生角岩化蚀变形成角岩。从手标本看,砂板岩呈黄褐色、棕黄色,碳质板岩呈灰黑色、灰色,角岩呈灰白色等;板岩的板理构造极为发育,而角岩则更为致密,已经看不到板理,多呈块状,部分成矿前角岩所保留的变

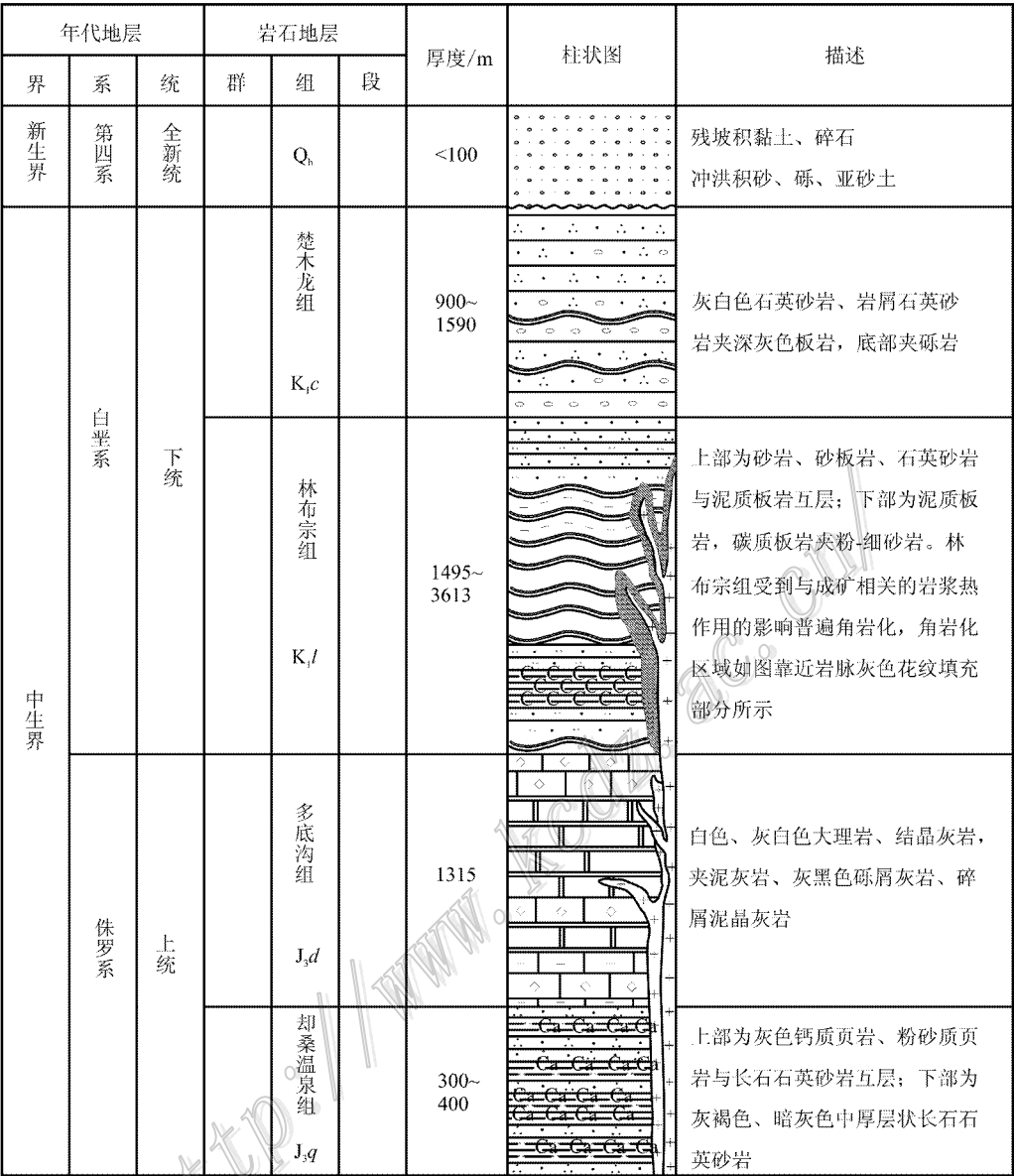


图 6 甲玛矿区地层综合柱状图(地层划分及文字描述据唐菊兴等,2009^①)
Fig. 6 Generalized stratigraphic column of the Jiamā ore deposit

余斑点构造、变余条带构造,可与板岩进行对比(图 2a、2b、2c、2d),这一宏观特征是角岩进行原岩恢复的最佳指示。角岩与砂板岩或碳质板岩的显微组构特征具有相似性,都表现为隐晶质结构,都保留了区域应力作用下的韧性剪切作用,显示出 S-C 面理(图 4b、4c)在扫描电镜下,角岩与板岩的显微组构相似(图 4e、4f),结合电子探针能谱分析,发现二者基质的物质组成相似(石英+长石+黑云母/绿泥石),指

示了角岩的原岩为砂板岩或碳质板岩等。
由于矿区热变质期后发生了广泛的热液蚀变作用,致使角岩的矿物成分和结构构造进一步发生变化,并叠加了许多后期热液矿物,因此对角岩原岩的探索,尚需结合岩石化学和地球化学方法。根据甲玛矿区角岩的岩相学特征,选取用于原岩恢复的样品 13 件(表 2),分别为砂板岩(第 1 组)、碳质板岩(第 2 组)、原生黑云母角岩(第 3 组),由于第 4 组和

① 唐菊兴,王登红,钟康惠,汪雄武,郭衍游,刘文周,应立娟,郭娜,郭科,郑文宝,秦志鹏,李磊,凌娟,叶江,黎枫信,姚晓峰,李志军,孙艳,王友,白景国,唐晓倩,裴有哲,彭惠娟. 2009. 西藏自治区墨竹工卡县甲玛铜多金属矿区 0-16-40-80、0-15 线矿段铜多金属矿勘探报告. 内部资料.

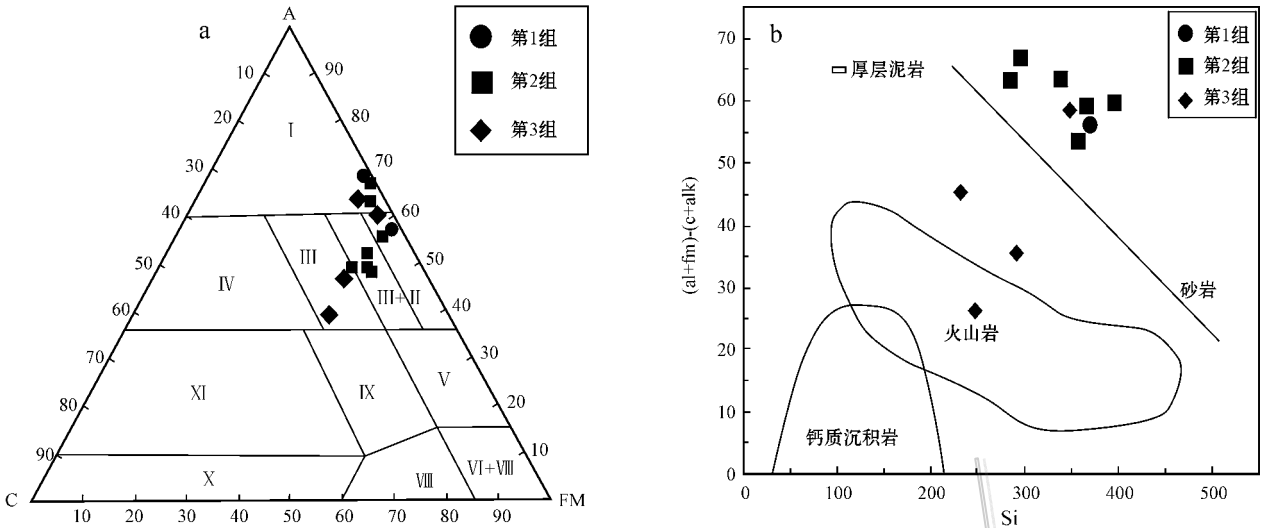


图 7 甲玛矿区角岩原岩恢复判别图解(a. 底图据王仁民等,1987;b. 底图据 Simonen, 1953)

I—富铝黏土岩及酸性火山岩;II—黏土岩及亚杂砂岩;III—中性及碱性火山岩和杂砂岩;IV—长石砂岩;V—凝灰质粉砂岩;
VI—硅铁质沉积岩;VII、VIII—超基性岩;IX—基性火山岩及铁质白云质泥灰岩;X—钙质碳酸盐岩;XI—钙硅酸盐岩及石英岩

Fig. 7 Discrimination diagrams of protolith restoration for hornfels in the Jiamia ore deposit (a. after Wang et al. , 1987 ;
b. after Simonen, 1953)

I—Aluminum-rich clay rocks and acidic volcanics ; II —Clay rocks and sub—miscellaneous sandstone ; III —Neutral and alkaline volcanics and mis-
cellaneous sandstone ; IV — Feldspar sandstone ; V —Tuff silty sandstone ; VI—Ferrosilicon qualitative sedimentary rocks ; VII , VIII—Ultramafic
rocks ; IX —Basic volcanics and ferruginous dolomitic marl ; X—Calcium carbonatite ; XI—Calcareous silicate rock and quartzite

表 3 甲玛铜多金属矿区板岩、角岩稀土元素数据($w(B)/10^{-6}$)

Table 3 REE data of slate and hornfels in the Jiamia copper polymetallic deposit

样号及岩石名称	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
80 砂板岩	35.46	67.73	8.38	31.32	6.13	0.89	5.44	0.82	5.62	1.09	3.13	0.49	2.87	0.48	30.43
72 砂板岩	28.18	53.12	5.95	21.31	4.22	0.90	4.18	0.66	4.73	0.98	2.70	0.43	2.68	0.42	27.31
JM01-B1b 绢云母板岩	80.63	143.70	16.06	60.24	10.09	1.53	7.74	1.20	7.36	1.48	4.49	0.63	4.63	0.63	34.3
板岩平均值	48.09	88.18	10.13	37.62	6.81	1.11	5.79	0.89	5.90	1.18	3.44	0.52	3.39	0.51	30.68
JM09-B2 角岩	72.25	145.60	14.57	54.45	9.97	1.51	7.66	1.12	6.33	1.22	3.73	0.54	3.92	0.54	26.4
IPD16-B1 角岩	37.22	72.42	7.13	26.91	5.29	1.00	5.28	0.91	5.89	1.24	3.72	0.54	3.81	0.50	30.1
IPD19-B1 角岩	26.57	54.93	5.97	21.97	4.95	1.33	5.85	1.07	6.87	1.33	4.27	0.61	4.32	0.60	32.6
角岩平均值	45.35	90.98	9.22	34.44	6.74	1.28	6.26	1.03	6.36	1.26	3.91	0.56	4.02	0.55	29.70

注 序号 1-2 所对应的数据引自杜光树等,1998 序号 3-6 所对应的数据引自郑文宝,2009 稀土元素标准化数据采用球粒陨石丰度,Taylor et al. , 1985。

第 5 组角岩样品都受到了热液蚀变,存在后期交代作用,其岩石化学成分不用于原岩恢复。

从 A-C-FM 图解(图 7a),可见 13 件样品主要落入 I、II、III 原岩单元中,原岩岩性显示为黏土岩、杂砂岩或火山岩,再选取 (al + fm) - (c + alk) - si 图解(图 7b)进行判别,可见角岩、砂板岩、碳质板岩的原岩主要为泥质岩或砂岩。

通过矿区板岩和角岩的稀土元素球粒陨石标准

化型式(表 3,图 8)的对比,可以发现二者都存在非常明显的负铕异常,且总体斜率较为一致,稀土元素配分曲线都向右倾斜,负铕异常明显,说明二者的确存在‘亲缘’关系,但二者细小的差别,说明热变作用和热液作用对岩石 REE 的地球化学行为产生了影响。由于热液流体中的 REE 含量比岩石 REE 含量低 500 万倍到 100 万倍 (Michard,1989),可以认为 REE 的地球化学行为在热液蚀变过程中是稳定的,

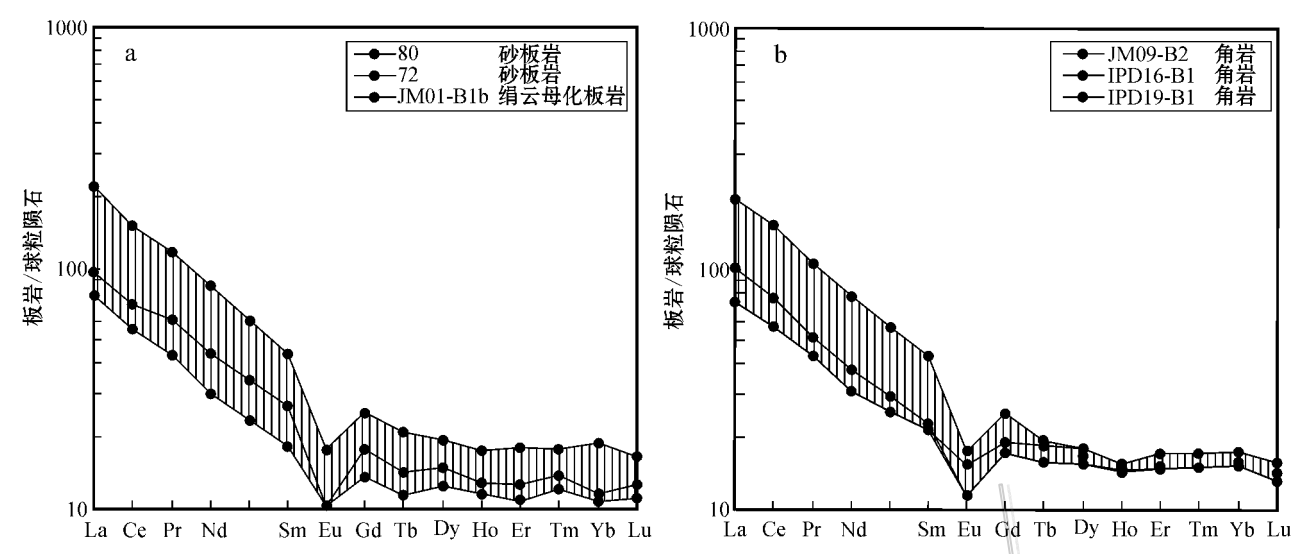


图 8 甲玛矿区板岩(a)、角岩(b)稀土元素球粒陨石标准化配分型式

Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns of slate (a) and hornfels (b) in the Jiama ore district

不易发生变化的,因此热液作用对于原岩 REE 配分型式的改造程度可以忽略。从图 8 可以发现,从板岩到角岩,轻稀土元素(La-Eu)配分型式一致,而重稀土元素(Gd-Lu)则存在差别,这似乎指示了低级别的接触热变质作用倾向于改变重稀土元素的地球化学行为,但由于稀土元素熔点与沸点高、化学性质稳定,部分学者认为即便在高级变质作用中,稀土元素也基本不发生迁移(江博明等,1985;陈德潜等,1990)。

矿区砂岩、板岩和角岩的微量元素分析结果及蛛网图(表 4,图 9)显示,Bi、Mo 元素分别比地壳丰度高出近千倍和近百倍,二者同属于钨钼族元素(刘

英俊等,1984),Bi 和 Mo 元素分别主要赋存于独立的矿物硫铋铜矿(应立娟等,2010b)和辉钼矿中,此外 Bi 元素在斑铜矿、黝铜矿中也有分布(应立娟等,2010b;杨时惠,1995),而 Mo 元素则为甲玛矿区的主矿化元素(表 6),且黄铜矿中也含有较多的 Mo(表 6),因此 Bi 和 Mo 元素含量高说明二者由成矿热液携带而来。而 Ag 元素在砂岩、板岩和角岩中则出现了亏损。刘英俊等(1984)指出 Ag 元素的富集主要与辉长岩有关,而甲玛矿区的辉长岩产出较少,Ag 元素常与 Pb、Zn 等一道迁移,而甲玛矿区的 Pb、Zn 矿化除在铅山局部富集外,牛马塘、铜山等处基本无 Pb、Zn 矿化,且甲玛矿区中黄铜矿的 Ag 含量也非常

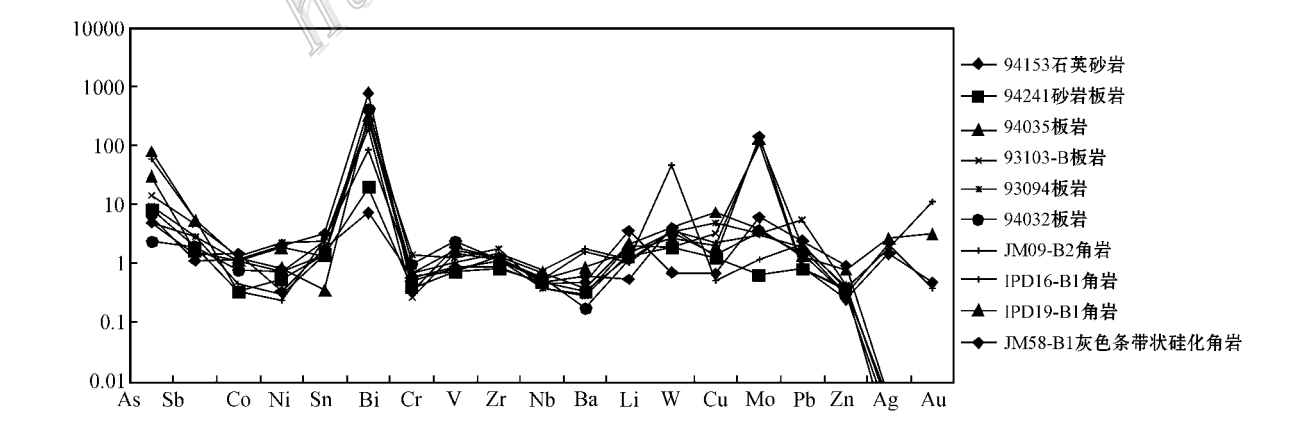


图 9 甲玛矿区板岩、角岩微量元素地壳丰度标准化蛛网图

Fig. 9 Crustal abundance-normalized trace element spider diagrams of slate and hornfels in the Jiama ore district

表 2 甲玛铜多金属矿床砂板岩、碳质板岩、角闪岩化学成分
Table 2 Chemical compositions of sandy slate, carbonaceous slate and hornfels in the Jiama copper polymetallic deposit

编号及岩石鉴定名称			组别	w(B)/%													
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	LOI	F	Cl
JN-1	砂板岩	1	66.02	18.21	3.21	0.51	1.18	0.13	0.24	6.04	0.74	0.014	0.024	3.46	0.12	0.010	
JW-2	砂板岩	1	69.35	16.32	2.79	3.66	1.12	0.19	0.14	2.55	0.66	0.031	0.11	2.84	0.063	0.014	
砂板岩平均值			67.69	17.27	3.00	2.09	1.15	0.16	0.19	4.30	0.70	0.02	0.07	3.15	0.09	0.01	
JW-1	碳质板岩	2	69.48	18.28	2.21	3.00	0.62	0.13	0.21	2.73	0.98	0.10	0.028	2.03	0.078	0.011	
JW-5220-3	碳质板岩	2	66.87	16.28	0.98	5.57	1.77	1.88	0.36	2.55	0.72	0.19	0.093	2.31	0.049	0.018	
ZK2322-382.56	碳质板岩	2	67.03	15.60	0.67	4.78	1.50	1.42	0.28	3.62	0.64	0.15	0.12	3.55	0.065	0.012	
ZK4707-136	碳质板岩	2	60.69	21.02	0.98	3.36	2.05	0.50	0.22	5.54	0.93	0.063	0.14	4.26	0.092	0.013	
ZK6302-144.5	碳质板岩	2	68.35	15.34	0.60	4.32	1.92	2.24	1.00	2.49	0.71	0.082	0.11	2.71	0.066	0.051	
ZK9602-32.15	碳质板岩	2	62.44	19.24	1.06	5.11	1.99	0.69	0.42	4.23	0.76	0.056	0.11	3.86	0.079	0.012	
ZK9602-213.8	碳质板岩	2	70.38	14.60	0.57	4.58	1.81	1.63	0.49	2.67	0.58	0.088	0.099	2.40	0.049	0.015	
碳质板岩平均值			66.46	17.19	1.01	4.39	1.67	1.21	0.43	3.40	0.76	0.11	0.10	3.02	0.07	0.02	
ZK3213-189.15	斑点状原生黑云母角闪岩	3	65.36	17.39	3.12	1.35	1.73	0.36	1.09	4.47	0.68	0.034	0.12	3.86	0.14	0.015	
ZK3213-733.3	斑点状原生黑云母角闪岩	3	60.30	19.33	1.23	2.65	1.63	0.73	4.83	6.62	0.71	0.039	0.17	1.62	0.13	0.027	
ZK1527-626.1	条带状原生黑云母角闪岩	3	58.61	19.43	0.45	5.90	2.38	3.59	1.58	3.33	0.87	0.070	0.14	2.94	0.081	0.017	
ZK4803-696.4	条带状原生黑云母角闪岩	3	66.35	14.45	1.05	3.84	2.85	4.51	1.55	2.70	0.63	0.055	0.11	1.21	0.18	0.044	
原生黑云母角闪岩平均值			62.66	17.65	1.46	3.43	2.15	2.30	2.26	4.28	0.72	0.05	0.14	2.41	0.13	0.03	
ZK817-99	热液黑云母-绿泥石角闪岩	4	64.41	16.53	3.05	0.79	2.02	1.65	0.30	4.78	0.70	0.040	0.13	4.93	0.18	0.015	
ZK1616-232.7	热液黑云母-绿泥石角闪岩	4	58.23	21.26	1.36	2.14	1.87	0.86	2.74	7.33	0.80	0.023	0.11	2.64	0.14	0.011	
ZK3213-715.1	热液黑云母-绿泥石角闪岩	4	65.82	15.85	0.85	2.49	1.66	0.39	3.65	6.78	0.70	0.034	0.12	1.13	0.15	0.035	
ZK3219-863.81	热液黑云母-绿泥石角闪岩	4	69.76	10.65	1.30	3.93	2.78	2.73	1.16	2.03	0.40	0.082	0.37	4.26	0.17	0.024	
ZK3219-870.85	热液黑云母-绿泥石角闪岩	4	44.97	19.65	3.80	8.34	4.47	7.36	0.47	1.41	0.84	0.20	0.45	7.97	0.25	0.030	
ZK3219-918.1	热液黑云母-绿泥石角闪岩	4	32.25	2.67	19.87	7.83	0.64	26.64	0.18	0.06	0.15	0.54	0.52	8.35	0.041	0.054	
热液黑云母-绿泥石角闪岩平均值			55.91	14.44	5.04	4.25	2.24	6.61	1.42	3.73	0.60	0.15	0.28	4.88	0.16	0.03	
ZK3217-17	硅化角闪岩	5	69.18	15.32	3.89	0.38	0.75	0.08	0.23	4.70	0.78	0.020	0.024	4.34	0.11	0.013	
ZK3219-59.6	硅化角闪岩	5	73.57	14.81	1.65	0.53	0.59	0.09	0.22	4.26	0.73	0.021	0.076	3.06	0.18	0.017	
ZK1616-169.2	硅化角闪岩	5	59.75	20.57	2.78	1.30	1.66	0.50	2.09	6.58	0.80	0.029	0.14	3.46	0.16	0.013	
硅化角闪岩平均值			67.50	16.90	2.77	0.74	1.00	0.22	0.85	5.18	0.77	0.02	0.08	3.62	0.15	0.01	
角闪岩总体平均值			60.66	15.99	3.42	3.19	1.93	3.81	1.54	4.23	0.67	0.09	0.19	3.83	0.15	0.02	

分析单位:西南冶金地质测试所; 分析时间: 2011 年 2 月。

表 5 甲玛铜多金属矿床斑点状角岩 2322-393.33、碳质板岩 6302-144.5 基质物质组成电子探针分析数据
Table 5 EPMA data of spotted hornfels 2322-393.33 and carbonaceous hornfels 6302-144.5 in the Jiamma copper polymetallic deposit

样品编号	w(B)/%													矿物名称
	Na ₂ O	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	FeO	Cr ₂ O ₃	NiO	总和	
2322-393.33-1	0.00	27.00	12.19	21.45	0.33	0.00	0.72	0.00	0.72	25.36	0.09	0.00	87.86	绿泥石
2322-393.33-2	0.00	98.71	0.00	0.31	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.09	0.00	0.02	99.18	石英
2322-393.33-3	0.28	51.03	1.25	35.01	7.95	0.00	0.06	0.01	0.14	2.01	0.01	0.05	97.80	长石
6302-144.5-1	0.134	35.358	9.161	17.595	6.512	0.239	0.112	0	1.109	21.043	0.478	0	91.741	黑云母
6302-144.5-2	6.164	57.262	0.27	27.088	0.177	8.997	0.076	0	0.012	0.904	0.042	0	100.992	长石

注 上述元素采用日本电子公司生产的 JXA-823V 型电子探针分析仪测得,在中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室完成,实验中的加速电压为 20 kV,束流为 2×10^{-8} A,束斑大小为 2 μ m;分析时间:2011 年 4 月。

表 6 甲玛铜多金属矿床角岩型矿体中黄铜矿、辉钼矿电子探针分析数据及矿物化学式计算
Table 6 EPMA data of chalcopyrite and molybdenite from hornfels in the Jiamma copper polymetallic deposit

样品编号	w(B)/%													
	Mo	K	Fe	Mn	Ni	Cu	As	Au	Pb	Ag	S	Co	Zn	总和
3219-580.70-4	0.688		30.886	0.048	0.004	35.005				0.005	34.518	0.021	0.047	101.222
3219-602.85-1	0.025	0.01	30.97			34.409			0.101	0.053	34.503	0.024	0.033	100.128
3219-776-1-1	0.127		30.473	0.012	0.003	35.048		0.008	0.169	0.014	34.489	0.062	0.114	100.519
3219-776-1-2	0.134		47.053	0.018	0.174	0.015	0.032		0.134		51.902	0.41	0.16	100.032
3219-806.2-1	0.073		30.67			34.96		0.046	0.011	0.011	34.39	0.047	0.369	100.577
3219-806.2-2	0.095		30.832	0.006		35.135	0.052	0.024		0.028	34.275	0.021	0.247	100.715
3219-836.05-2-1-1	59.717		0.026			0.009		0.437		0	40.767	0.024	0.189	101.169
3219-836.05-2-1-2	59.039	0.004	0.012	0.033				0.492	0.026		40.555		0.129	100.29
3219-836.05-2-2-1	59.62							0.575		0.022	41.112		0.068	101.397

样品编号	矿物化学式(以 S 为 2 计算)	矿物名称
3219-580.70-4	(Cu _{1.023} Mo _{0.013} Zn _{0.001}) _{1.038} (Fe _{1.028} Mn _{0.002} Co _{0.001}) _{1.030} S _{2.000}	黄铜矿(含 Mo)
3219-602.85-1	(Cu _{1.006} Pb _{0.001} Zn _{0.001} Ag _{0.001}) _{1.009} (Fe _{1.031} Co _{0.001}) _{1.032} S _{2.000}	黄铜矿(含 Ag)
3219-776-1-1	(Cu _{1.026} Mo _{0.002} Pb _{0.002} Zn _{0.003}) _{1.033} (Fe _{1.015} Co _{0.002}) _{1.017} S _{2.000}	黄铜矿(含 Mo)
3219-776-1-2	(Fe _{1.041} Co _{0.009} Ni _{0.004} Mo _{0.002} Pb _{0.001} Zn _{0.003}) _{1.059} (S ₂ As _{0.001}) _{2.001}	黄铁矿(含 Cu、Mo)
3219-806.2-1	(Cu _{1.026} Mo _{0.001} Zn _{0.011}) _{1.038} (Fe _{1.024} Co _{0.001}) _{1.026} S _{2.000}	黄铜矿(含 Mo)
3219-806.2-2	(Cu _{1.035} Mo _{0.002} Zn _{0.007}) _{1.043} (Fe _{1.033} Co _{0.001}) _{1.034} (S ₂ As _{0.001}) _{2.001}	黄铜矿(含 Mo)
3219-836.05-2-1-1	(Mo _{0.979} Zn _{0.005} Au _{0.003} Fe _{0.001} Co _{0.001}) _{0.989} S _{2.000}	辉钼矿(含 Au)
3219-836.05-2-1-2	(Mo _{0.973} Zn _{0.003} Au _{0.004} Mn _{0.001}) _{0.981} S _{2.000}	辉钼矿(含 Au)
3219-836.05-2-2-1	(Mo _{0.969} Zn _{0.002} Au _{0.005}) _{0.976} S _{2.000}	辉钼矿(含 Au)

注 上述元素采用日本电子公司生产的 JXA-823V 型电子探针分析仪测得,在中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室完成,实验中的加速电压为 20 KV,束流为 2×10^{-8} A,束斑大小为 2 μ m;分析时间:2011 年 4 月。

少(表 6),这也导致了矿区整体范围内 Ag 元素相比于地壳丰度发生亏损。总体而言,微量元素蛛网图解在砂、板岩和角岩中保持了较为一致的型式,指示了砂岩、板岩和角岩的同源性。

通过角岩与板岩的岩相学特征、岩石化学判别分析、地球化学特征与微量元素特征的综合对比,笔者推断在热变质作用下,甲玛铜多金属矿区经历了泥质岩、泥质砂岩、砂岩→碳质板岩、砂板岩→角岩

的(近)等化学变质,形成了成矿前的角岩,随着岩浆热液的不断演化,蚀变矿物与矿石矿物不断形成,赋存于角岩内,形成了成矿期的角岩与角岩型矿化,同时,超过 20 km² 的角岩化接触变质晕说明,甲玛铜多金属矿区的角岩化蚀变不仅仅因简单热传导作用形成,还由于受到矿化流体的更为有效的对流热传输作用而成(Allaby et al., 1990)。

4 角岩对热源的指示意义

甲玛矿区角岩化接触变质晕的面积大约为 20 km²,如此规模的热变质作用预示深部必定有隐伏的斑岩岩体。角岩作为热变质作用的特征产物,对矿区进行角岩化作用强弱的判定,有助于对隐伏岩体定位的指示。而角岩化作用强弱的表现,最直接的标志就是角岩岩层厚度的大小,角岩越厚,意味着受到烘烤作用越强,离热源就越近。通过统计甲玛铜多金属矿区 0~40 线各钻孔的角岩和角岩型矿体厚度(表 7),进行等值线的圈定(图 10),发现由南西北

表 7 甲玛铜多金属矿区角岩厚度与角岩型矿化情况一览表
Table 7 Thickness and mineralization of hornfels in the Jiamma copper polymetallic deposit

钻孔号	角岩厚度 /m	角岩型矿 体厚度/m	角岩 w(Cu)/%	角岩 w(Mo)/%
ZK003	49.90	14.00	0.09	0.02
ZK007	0.00	15.40	0.24	0.05
ZK008	82.73	1.03	0.07	0.00
ZK011	5.30	3.52	0.16	0.01
ZK012	0.00	0.00	0.04	0.00
ZK014	63.91	4.00	0.08	0.00
ZK016	125.20	14.87	0.13	0.00
ZK018	270.05	41.59	0.15	0.01
ZK020	308.70	17.80	0.12	0.01
ZK026	464.50	111.70	0.10	0.02
ZK030	872.95	90.00	0.09	0.01
ZK034	741.92	30.00	0.11	0.01
ZK1602	24.10	0.00	0.03	0.00
ZK1604	187.78	0.64	0.06	0.01
ZK1607	214.54	6.99	0.05	0.01
ZK1608	249.22	0.00	0.07	0.03
ZK1609	254.10	10.30	0.08	0.01
ZK1616	419.90	353.21	0.21	0.04
ZK1618	528.13	135.76	0.13	0.02
ZK1620	340.13	85.18	0.20	0.02
ZK1622	570.40	171.87	0.20	0.02
ZK1626	772.50	187.42	0.19	0.02
ZK3203	162.27	14.00	0.18	0.01
ZK3204	180.87	24.41	0.17	0.02
ZK3207	223.10	31.20	0.10	0.01
ZK3208	307.25	30.00	0.11	0.02
ZK3209	462.60	82.00	0.19	0.02
ZK3212	400.10	280.14	0.28	0.02
ZK3216	729.10	685.68	0.25	0.05
ZK3220	845.10	243.50	0.19	0.01
ZK3224	982.50	26.00	0.07	0.01
ZK4002	34.10	14.42	0.27	0.01
ZK4004	369.00	108.34	0.14	0.02
ZK4006	310.40	51.86	0.18	0.01
ZK4008	521.45	102.58	0.21	0.01
ZK4012	614.78	336.74	0.27	0.03

东方向,出现角岩化程度愈强、角岩型矿体厚度愈厚的趋势。Kathryn(2007)认为大洋中的角岩是作为岩浆房顶部轴热传递的记载体,说明角岩化热变质中心为热源集中地带,甲玛铜多金属矿区角岩化中心与矿化中心相吻合,作为热源的斑岩岩浆-热液系统,也是含矿热液向周围发散的中心部位,二者的吻合说明了岩浆-热液系统演化的阶段性和同源性。甲玛铜多金属矿床岩浆-热液系统至少经历了 3 个阶段,早阶段,岩浆初始就位,隐伏斑岩岩体母岩浆房上侵过程中不断向外释放热量,这一过程有利于接触热变质作用的发生,驱动同生水 and 地下水,形成大规模角岩化接触热变质晕圈,这一阶段是角岩的主要生成阶段,产生成矿前角岩;中阶段,当岩浆房侵位深度达 4~2 km 时,高温单相岩浆流体发生气液分离作用(Sillitoe, 2010),热液流体开始分异出来,并顺着节理裂隙向上迁移,其后发生了沉淀和富集,形成以黄铜矿、辉钼矿为主的矿化,此时岩浆不断结晶,在矿区浅部形成岩脉、岩枝,沿岩脉、岩枝接触带角岩化强度增加,范围变大,形成了成矿期角岩,并沿接触带或断层形成了外砂卡岩,或在岩脉、岩枝内部形成内砂卡岩,这一阶段是砂卡岩的主要形成阶段。晚阶段,系统降温冷却,较低温的大气降水逐渐进入流体,角岩和砂卡岩主要发生退化蚀变作用,形成以黄铁矿、黄铜矿为主的矿化,退化蚀变作用可发生于成矿前角岩,如原生黑云母向绿泥石转变,也可发生于成矿期角岩,如热液黑云母向绿泥石转变,该类角岩仍可归于成矿期角岩。角岩化热变质与角岩型矿化皆源于隐伏斑岩岩体,即隐伏斑岩岩体既产生了巨大的热量,又形成了携带大量矿物质元素的岩浆-热液流体。

笔者绘制了甲玛铜多金属矿区 0~40 线各钻孔角岩的 Cu、Mo 元素浓度等值线图(图 11)。角岩的 Cu、Mo 元素浓度中心较为集中,二者空间位置较为接近。同时,Mo 元素的浓集中心与角岩型矿体的厚度中心空间位置十分接近。热液矿床中,Mo 元素作为一种高温矿化指示元素,其浓度中心具有对热源的指示作用,位于 ZK1616、ZK3216 等钻孔所控制的范围内。

热源附近的角岩相比于其他部位,除了厚度大、矿化好、铜钼元素富集外,角岩被斑岩岩脉穿切的现象也常见,在岩芯编录过程中也得到了证实。与一般钻孔的岩性层位特征——“第四系-板岩-角岩-砂卡岩-斑岩-灰岩”不同,热源附近的钻孔内循环出现

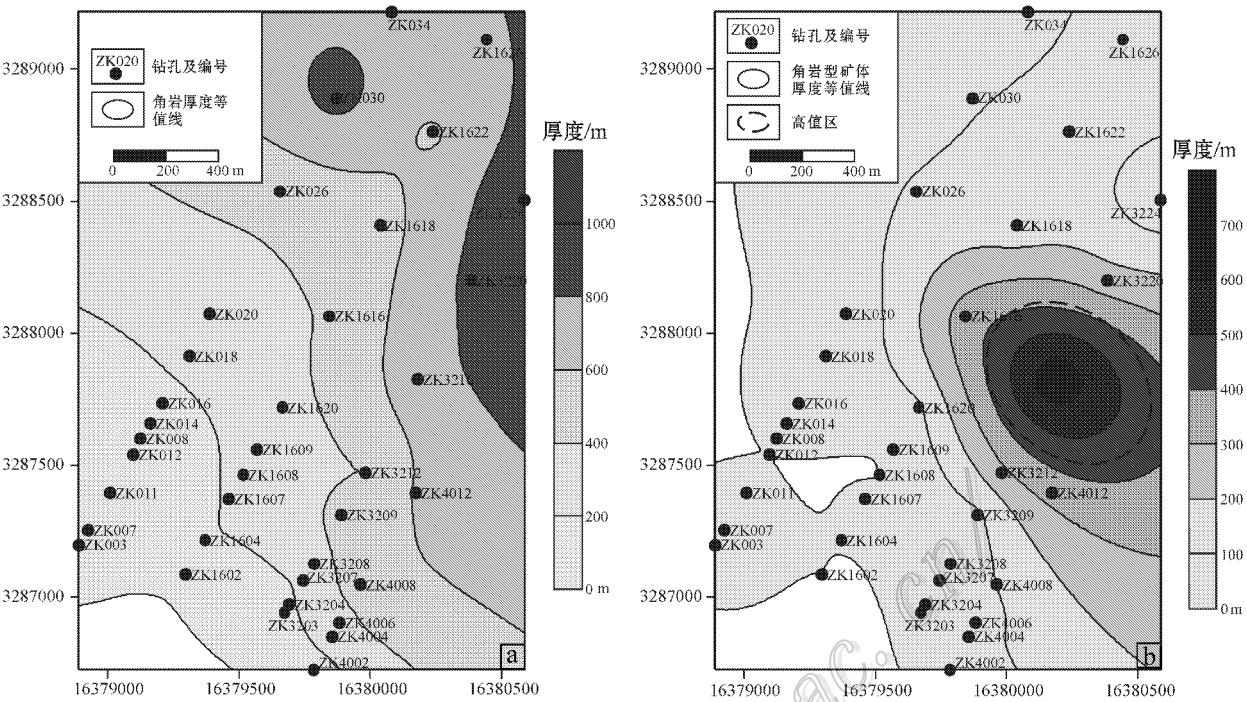


图 10 甲玛矿区 0~40 线各钻孔角岩厚度(a)与角闪型矿体厚度(b)等值线图

Fig. 10 Thickness contour of hornfels (a) and hornfels-type ore body (b) in drill holes of 0~40 line in the Jiamia ore deposit

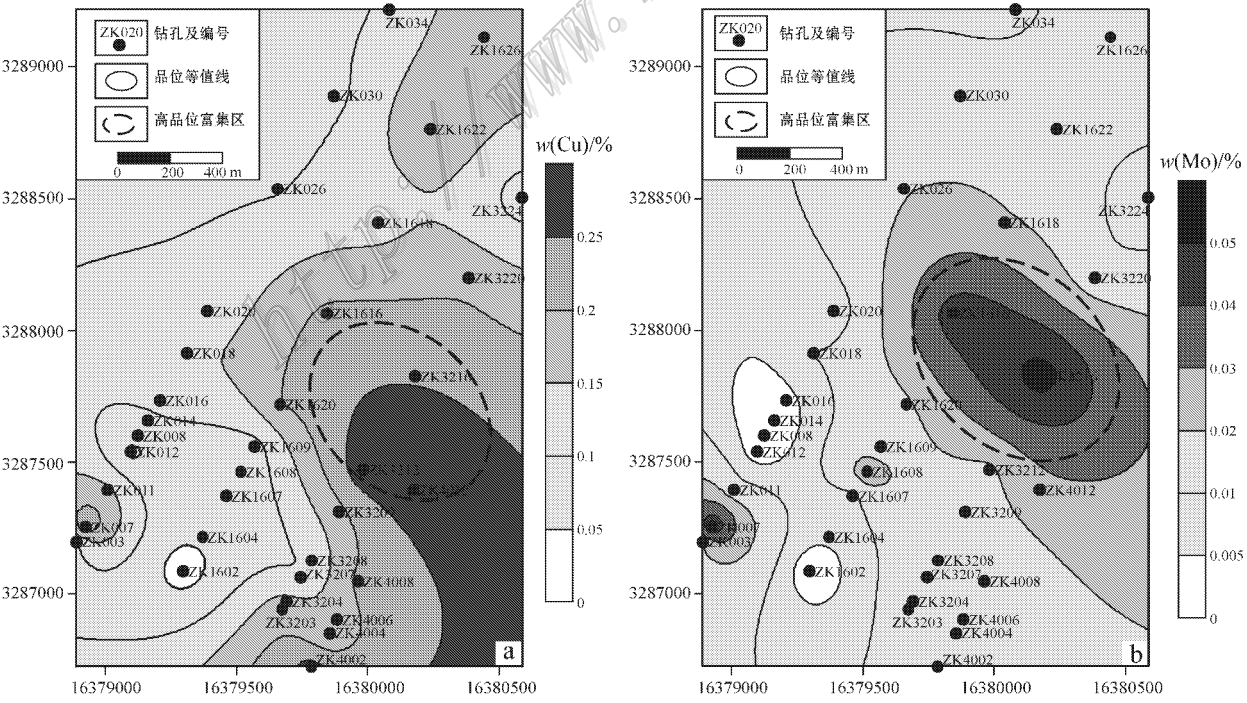


图 11 甲玛矿区 0~40 线各钻孔角岩 Cu(a)、Mo(b)元素丰度等值线图

Fig. 11 Element abundances contour of Cu (a) and Mo (b) in drill holes of 0~40 line in the Jiamia ore deposit

“角岩-斑岩-角岩-斑岩”的穿层现象,这些钻孔主要是 ZK034、ZK1616、ZK1618、ZK1620、ZK1622、ZK1626、ZK3212、ZK3216、ZK4012,其角岩更为细晶化,也更厚。上述钻孔角岩的平均厚度达到 543.10 m。这一现象说明随着斑岩岩浆-热液系统的分异演化,不断有小的岩枝、岩脉产生,角岩受到了热度更高的烘烤,斑岩岩脉在上升的过程中,与角岩围岩高角度相切,岩脉与角岩的接触带可见明显的浅黄色冷凝边。在斑岩岩浆-热液上升的过程中,将会对其围岩产生压应力作用,超过围岩岩石能干性的限度,将会诱发围岩破裂,含矿热液充填于此产生了脉体并伴随矿化。这些钻孔所控制的区域,指示了斑岩岩浆的最有效作用范围隐伏斑岩岩体的平面位置(图 1)。隐伏斑岩岩体位置由 ZK1616、ZK1620、ZK3212、ZK3216 等钻孔所控制。最新的地质勘探结果显示,在 ZK1616 和 ZK1620 之间的 ZK1614(图 1)中发现厚达 400 多米的斑岩岩脉。

甲玛矿区角岩形成过程中,区域上由北向南的推覆构造再次活跃,形成了条带状黑云母的牵引构造(图 12a)与角岩的层间揉皱(图 12b),指示了隐伏斑岩岩体释放热量形成的角岩与特征矿物受到了区域推覆构造作用的影响,在与矽卡岩接触的角岩中,可以发现石榴子石等矽卡岩矿物具有顺裂隙交代围岩呈脉状产出的现象(图 12c),而类似的现象在大理岩中(图 12d)也可以发现,表明矽卡岩的主要形成阶段晚于角岩的主要形成阶段,矽卡岩和角岩中都可以观察到隐爆角砾岩,且外矽卡岩中出现热液隐爆角砾岩(图 12e、12f),说明隐伏斑岩岩体顶部分异出岩浆热液发生气液分离的时间更晚,而岩浆气、液相的分离被认为是对斑岩矿床成矿的有利条件。基于此,笔者建立了甲玛铜多金属矿床模型(图 13)。

甲玛铜多金属矿区内与矿化有关的斑岩岩体侵位,同期造成了林布宗组砂板岩、碳质板岩的角岩化与多底沟组灰岩的大理岩化。这一过程除了 CO_2 、 H_2O 等,其他物质基本不发生变化,无矿石矿物的形成,随后,热液蚀变作用占据主导地位,成矿作用也发生在这一阶段。角岩对矿质元素富集的影响主要体现在其物理性质上,从砂板岩到角岩,岩石结构从砂状结构到角岩结构,岩石的孔隙度逐渐减小,尽管天水在重力作用下可以渗透到角岩-矽卡岩-斑岩体系中,但循环上升的含矿热液却很难穿透角岩,角岩为成矿元素提供了稳定的盖层,有效地阻挡了含矿热液的逸失;同时,岩体底辟上隆,导致矿区大量发

育张性节理、裂隙,而含矿热液向应力薄弱的地带逃逸、流动,大量填充张性节理、裂隙,并在其中沉淀、富集,从而形成角岩型矿化。

在矿区的硅钙界面衍生了受控于角岩和大理岩的层间扩容构造,后期含矿热液填充空间,对下部大理岩交代,形成硅灰石、石榴子石、透辉石矽卡岩,由于剧烈的水岩反应,导致了矿质元素富集,因此,角岩化作用期后形成的硅钙界面对于矽卡岩型矿化起到了地球化学障的作用。

5 结 论

(1) 甲玛铜多金属矿区的角岩可分为成矿前角岩与成矿期角岩,成矿前角岩包括黑云母角岩(具典型的斑点状、条带状构造)、长英质角岩,与矿化无关,成矿期角岩包括硅化角岩、热液黑云母-绿泥石角岩等,其实质是一种蚀变岩,对矿化具有指示意义。

(2) 成矿前角岩与成矿期角岩,其基质成分一致,皆由钠长石、石英、黑云母等矿物组成,随着深度的增加,基质中的矿物共生组合转变为钾长石、石英、黑云母,指示了热源来自于垂直方向,说明角岩下方存在隐伏斑岩岩体;此外,不仅斑晶矿物的共生组合,基质矿物共生组合也同样能够指示变质相、变质级别等信息。

(3) 角岩对于矿化的作用来自其物理性质,能够为矿液运移提供稳定的盖层,有利于矿质元素的沉淀;角岩化作用之后所形成的硅钙界面,在区域推覆构造的作用下,产生层间扩容构造,有利于矽卡岩和矽卡岩型矿化的形成,这一硅钙界面对于矽卡岩型矿化起到了地球化学障的作用。

(4) 角岩热变质作用强度与矿化强度,以及后期岩脉对角岩穿插的密度反映了隐伏斑岩岩体对于矿区空间范围上的作用强度,据此可对隐伏斑岩岩体做出定位预测,甲玛铜多金属矿床的隐伏斑岩岩体大致位于 16 线 ~ 32 线由 ZK1616、ZK1620、ZK3212、ZK3216 等钻孔所控制的区域内。

志 谢 感谢审稿人对本文提出的宝贵建议!感谢秦克章研究员在矿床综合研究等方面给予的支持,感谢王登红研究员在角岩与角岩型矿化研究中给予的整体性建议,感谢汪雄武教授在角岩野外研究过程中给予的指导,感谢吴春明研究员、魏春景研

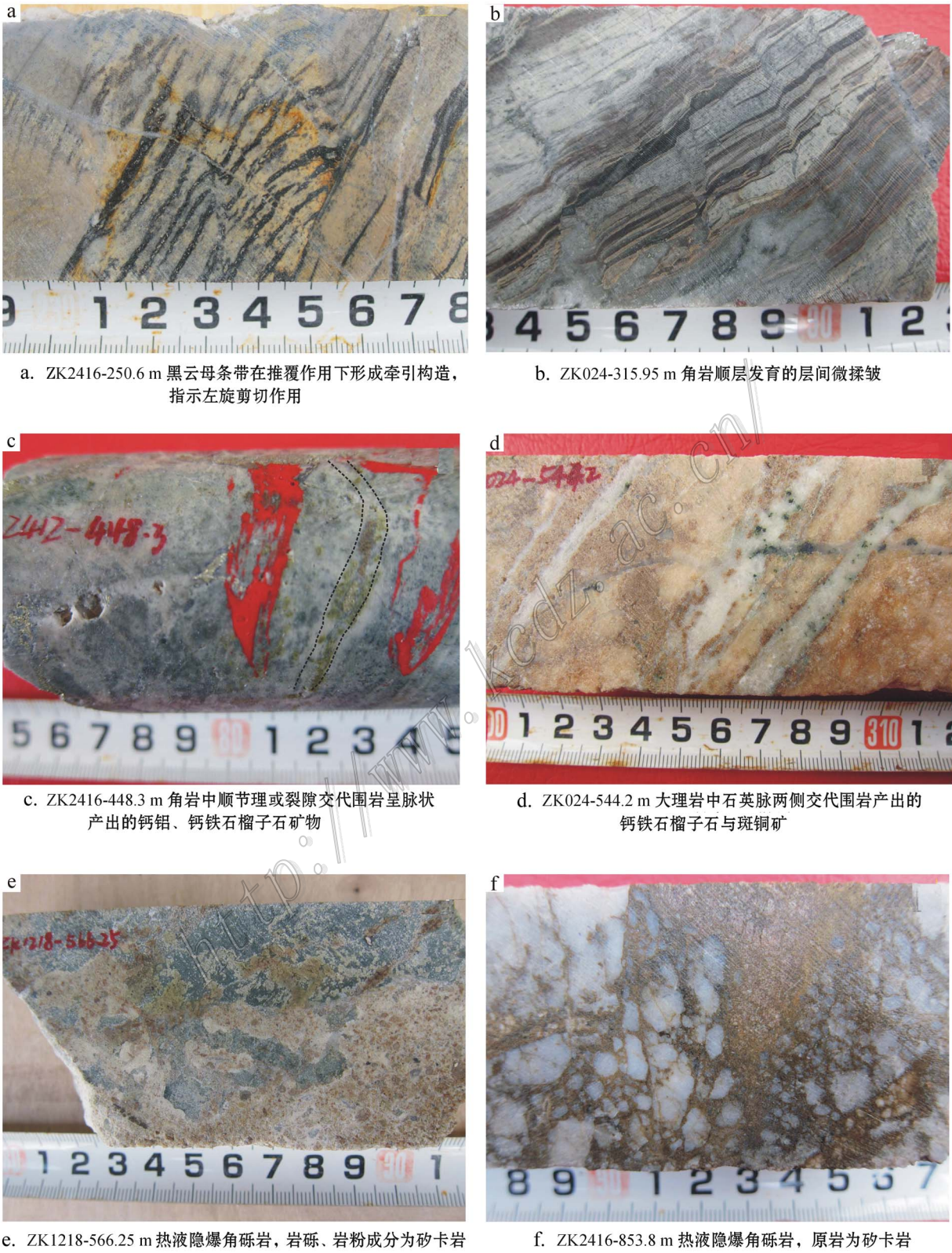


图 12 甲玛铜多金属矿床角闪岩与砂卡岩中微观构造现象

Fig. 12 Microstructure phenomena of hornfels and skarn in the Jima ore deposit

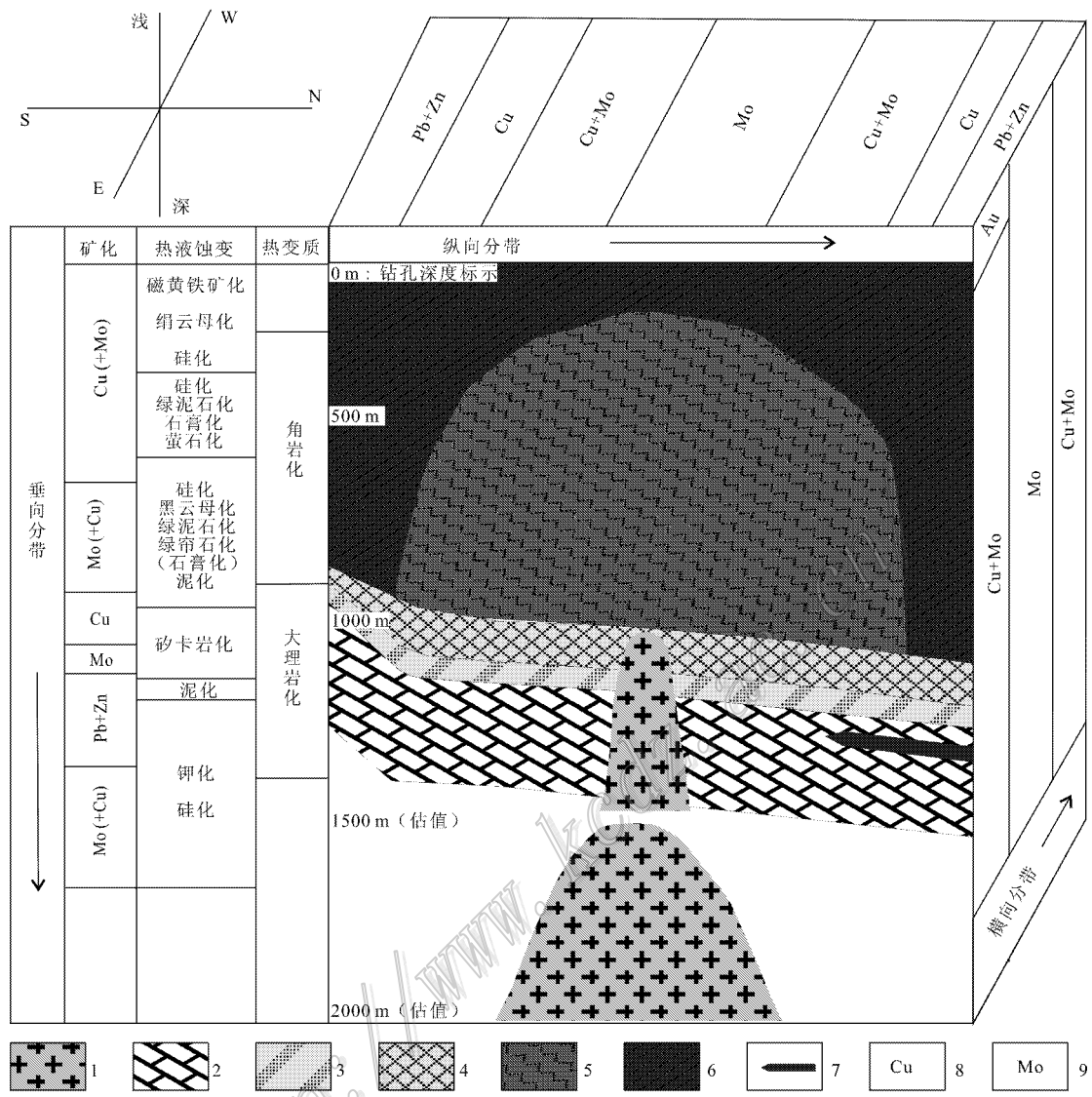


图 13 甲玛铜多金属矿床模型

1—二长花岗岩；2—大理岩、灰岩；3—硅灰石砂卡岩；4—石榴子石砂卡岩；5—角岩；6—碳质板岩、砂板岩；7—推覆构造运动方向；8—铜元素；9—钼元素

Fig. 13 Model of the Jiama polymetallic copper deposit

1—Adamellite porphyry；2—Marble and limestone；3—Wollastonite skarn；4—Garnet skarn；5—Hornfels；6—Carbonaceous slate and sandy slate；7—Direction of nappe structure；8—Copper；9—Molybdenum

究员在角岩研究过程中给予的变质岩基础知识的指点,感谢应立娟、高一鸣、姚晓峰等博士在本文成文过程中给予的帮助。

References

Alberto R, Mario T, Emma S, Giancarlo S and Paul M H. 2003. Cordierite-anorthoclase hornfels xenoliths in lavas of the Stromboli Volcano (Aeolian Islands, Southern Italy): An exanple of fast cooled contact metamorphic aureole [J]. European Journal of Mineralogy, 15(4): 665-679.

Allaby A and Allaby M. 1990. The concise oxford dictionary of earth sciences[M]. Oxford: Oxford University Press. 1-432.
Chen D Q and Chen G. 1990. Practical rare earth element geochemistry [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press. 1-268 (in Chinese).
Christopher I C and Yau Y. 1985. Hydroxyapophyllite in hornfels beneath the Duluth complex northeastern Minnesota [J]. Canadian Mineralogist, 23: 489-490.
Daczko N R, Stevenson J A, Clarke G L and Klepeis K A. 2002. Successive hydration and dehydration of a high-P mafic hornfels involving clinopyroxene-kyanite symplectites, Mt. Daniel, Fiordland, New Zealand[J]. J. Metamorphic Geol., 20: 669-682.
Deng G, Wu H and Lu Q M. 2004. Geological characteristics and

- prospecting mark of the Baishan porphyry Mo deposit, East Tianshan [J]. Geological Bulletin of China, 23(11): 32-1138 (in Chinese with English abstract).
- Dickey J S J R and Obata M. 1974. Graphitic hornfels dikes in the Ronda high-temperature peridotite massif [J]. American Mineralogist, 59: 1183-1189.
- Li T. Chemical element abundances in the earth and its major shells [J]. Geochimica, 3: 167-174 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y J, Cao L M, Li Z L, Wang H N, Chu T Q and Zhang J R. 1984. Geochemistry of elements [M]. Beijing: Science Press. 1-548 (in Chinese).
- Du G S, Yao P, Pan F C, Su D K, Li W B and Ning Y Y. 1998. Sedimentation-exhalation skarn and its mineralization: An example from the Jima copper-polymetallic deposit, Tibet [M]. Chengdu: Sichuan Sci. Press. 1-113 (in Chinese).
- Michard A. 1989. Rare earth element systematics in hydrothermal fluids [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 53: 745-750.
- Han S Q, Chen X H, Yang N, Shi W and Ye B Y. 2010. Geological characteristics and metallogenic model of super-large Kounrad porphyry copper deposit, Kazakhstan [J]. Journal of Geomechanics, 16(2): 203-210 (in Chinese with English abstract).
- Jiang B M and Zhang Z Q. 1985. Rare earth geochemistry and petrogenesis of Archean granulite-genesis from eastern Hebei province, North China [J]. Bulletin of the Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, 13: 4-37 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Z P, Dong Y J, Yu J F, Hu R Q and Wu S L. 2007. The discovery of hornblende-garnet-zoisite hornfels in the metamorphic basement of Xiangshan uranium ore field [J]. Uranium Geology, 23(3): 145-149 (in Chinese with English abstract).
- Kathryn G. 2007. Oceanic hornfels: Records of heat transport near axial magma chamber roofs [A]. Goldschmidt Conference Abstracts, A325.
- Kazuhiro S, Hidekazu Y, Kenji A and Setsuo Y. 1996. CHIME dating of monazite from pelitic hornfels of the Kurihashi Granodiorite, Kitakami Mountains [J]. Japan Nagoya Univ.: Journal Earth Planet. Sci. 43: 17-26.
- Lin Z Q, Chen S D, Yang Y L and Jie Y J. 2007. Discussion on genesis of hornfels in Xinci hornfels member of Xikou Formation, Fujian [J]. Geology of Fujian, 4: 246-251 (in Chinese with English abstract).
- Lu F X, Sang L K, Wu J H and Liao Q A. 2001. Petrology [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-338 (in Chinese with English abstract).
- Nan Z B, Tang J X and Li B H. 2007. Discussion on geological and chemical characters and origin of Narigongma porphyry copper-molybdenum deposit in Qinghai Province [J]. Xinjiang Geology, 25(2): 199-205 (in Chinese with English abstract).
- Peng H J, Wang X W, Tang J X, Qin Z P, Hou L and Zhou Y. 2010. The characteristics of cathodoluminescence-visualized microstructure in quartz: A case study from Jima Igneous Rock in Tibet [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 29(3): 279-283 (in Chinese with English abstract).
- Qiu J R. 1983. Magmatite petrology [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-340 (in Chinese).
- Shao K Z. 1983. Discussion on some geological issues in Dexing porphyry copper deposit [J]. Journal of Shijiazhuang University of Economics, 4: 65-72 (in Chinese).
- Shen P, Shen Y C, Liu T B, Zhang R, Wang J B, Zhang Y X, Meng L, Wang L J and Wang J. 2009. Host-rocks and alteration characters of the Baogutu porphyry copper-molybdenum deposit in Xinjiang, NW China [J]. Acta Petrologica Sinica, 25(4): 777-792 (in Chinese with English abstract).
- Sillitoe R H. 2010. Porphyry copper systems [J]. Econ. Geol., 105: 3-41.
- Simonen A. 1953. Stratigraphy and sedimentation of the Svecofennidic, early Archean supracrustal rocks in southwestern Finland [J]. Bull. Comm. Geol. Finland, 160: 1-64.
- Suzuki K, Yoshida H, Amano K and Yogo S. 1996. CHIME dating of monazite from pelitic hornfels of the Kurihashi granodiorite, Kitakami Mountains [J]. Japan Nagoya Univ.: Journal Earth Planet. Sci., 43: 17-26.
- Tang J X. 2003. The study on metallogeny and localizing forecast of Yulong porphyry copper-molybdenum mineralization, Xizang (Tibet) (Doctoral Thesis) [D]. Supervisor: Wang C S. Sichuan: Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Tang J X, Deng S L, Zheng W B, Ying L J, Wang X W, Zhong K H, Qin Z P, Ding F, Li F J, Tang X Q, Zhong Y F and Peng H J. 2011a. Exploration model of the Jima copper polymetallic deposit in Mozhuogongka County, Tibet [J]. Mineral Deposits, 30(2): 179-196 (in Chinese with English abstract).
- Tang J X and Wang D H. 2011b. New progress exploration and study on the Jima copper polymetallic deposit, Tibet [C]. Mineral Deposits, 30(2): 177-178 (in Chinese).
- Tang J X, Wang D H, Wang X W, Zhong K H, Ying L J, Zheng W B, Li F J, Guo N, Qin Z P, Yao X F, Li L, Wang Y and Tang X Q. 2010. Geological features and metallogenic model of the Jima copper-polymetallic deposit in Tibet [J]. Acta Geoscientica Sinica, 31(4): 495-506 (in Chinese with English abstract).
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. The continental crust, its composition and evolution, an examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks [M]. Oxford: Blackwell. 1-312.
- Tolga O. 2010. Geochemistry, mineralogy and genesis of the Ayazmant Fe-Cu skarn deposit in Ayvalik, (Balikesir), Turkey [J]. Ore Geology Reviews, 37: 175-201.
- Wang D H, Tang J X, Ying L J, Chen Z H, Xu J X, Zhang J J, Li S R and Zeng Z L. 2010a. Application of "Five levels + Basemeng" model for prospecting deposits into depth [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 40(4): 733-738 (in Chinese with English abstract).
- Wang D H, Tang J X, Ying L J, Rui Z Y and Zheng W B. 2011a. A preliminary comparison between Jima and worldclass copper deposits and an analysis of the prospecting potential [J]. Mineral Deposits, 30(2): 197-206 (in Chinese with English abstract).
- Wang D H, Tang J X, Ying L J, Lin B and Ding S. 2011b. Hornfels feature in the Jima ore deposit, Tibet and its significance on deep prospecting [J]. Acta Petrologica Sinica, 7: 189-194 (in Chinese with English abstract).
- Weng J C, Zhang Y Z, Huang C Y, Li W Z, Cui B L and Luo M W. 2010. Geological characteristics and genesis of Sandaozhuang super-large molybdenum-tungsten ore deposit in Luanchuan [J]. Geology and Exploration, 46(1): 41-48 (in Chinese with English abstract).
- Wang W P and Tang J X. Mineral chemistry characteristics of biotites from hornfels and their mineralization signatures in Jima polymetal-

- lic copper deposit, Tibet. (Unpublished).
- Wang R M, He G P and Chen Z Z. 1987. Discriminance of protolith restoration diagram for metamorphic rock [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-199 (in Chinese).
- Wang W P, Tang J X, Zheng W B, Ying L J, Wang H, Tang X Q and Qin Z P. 2010. Geological characteristics of hornfels-type orebody in Jiamia polymetallic copper deposit, Tibet [J]. Mineral Deposits, 29 (Supp.): 292-294 (in Chinese).
- Wang X C, Wang X L, Wang L, Liu J Y, Xia B, Deng J and Xu X M. 2007. Metallogeny and reformation of the Duobaoshan super large porphyry copper deposit in Heilongjiang [J]. Chinese Journal of Geology, 42(1): 124-133 (in Chinese with English abstract).
- Yang S H. 1995. A research on the state of occurrence and mineralogy of Au, Ag, Bi, Co and Ni in Jiamachikang polymetallic ore deposit, Xizang [J]. J. Mineral Petrol., 15 (1): 26-34 (in Chinese with English abstract).
- Ying L J, Wang D H, Tang J X and Qu W J. 2010a. Re-Os dating of molybdenite occurring in different rocks from the Jiamia copper deposit in Tibet and its metallogenic significance [J]. Acta Geology Sinica, 84(8): 1165-1174 (in Chinese with English abstract).
- Ying L J, Wang D H, Tang J X, Wang H, Chen Z Y, Zheng W B and Li F J. 2010b. Bismuth minerals and its relationship with copper mineralization in the Jiamia copper polymetallic deposit, Tibet [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 40(4): 801-809 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Y Y, Li D C and Cheng Z J. 1994. Characteristics of wall rock alteration of porphyry-type copper, silver and tin polymetal deposit, Aonaodaba, Inner Mongolia [J]. Jilin Geology, 13(2): 57-62 (in Chinese with English abstract).
- Zheng W B. 2009. Geochemical characteristic of Jiamia polymetallic copper deposit, Mozhuogongka County, Tibet (Master Thesis) [D]. Supervisor: Tang J X. Sichuan Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈德潜, 陈刚. 1990. 实用稀土元素地球化学 [M]. 北京: 冶金工业出版社. 1-268.
- 邓刚, 吴华, 卢全敏. 2004. 东天山白山斑岩型钼矿床的地质特征及找矿标志 [J]. 地质通报, 23(11): 32-1138.
- 杜光树, 姚鹏, 潘凤雏, 栗登逵, 李文彬, 宁英毅. 1998. 喷流成因砂卡岩与成矿——以西藏甲玛铜金属矿床为例 [M]. 成都: 四川科学技术出版社. 1-113.
- 黎彤. 1976. 化学元素的地球丰度 [J]. 地球化学, 3: 167-174.
- 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 王鹤年, 储同庆, 张景荣. 1984. 元素地球化学 [M]. 北京: 科学出版社. 1-548.
- 路凤香, 桑隆康, 郭金华, 廖群安. 2001. 岩石学 [M]. 北京: 地质出版社. 1-338.
- 江博明, 张宗清. 1985. 冀东太古代麻粒岩-片麻岩的稀土地球化学和岩石成因 [J]. 中国地质科学院地质研究所刊, 13: 4-37.
- 蒋振频, 董永杰, 喻建发, 胡荣泉, 吴水林. 2007. 相山铀矿田基底变质岩中角闪石榴(斜)黧帘石角岩的发现 [J]. 铀矿地质, 23(3): 145-149.
- 林主清, 陈斯盾, 杨玲雅, 揭育金. 2002. 福建省溪口组新祠角岩段的角岩(化)成因探讨 [J]. 福建地质, 4: 246-251.
- 彭惠娟, 汪雄武, 唐菊兴, 秦志鹏, 侯林, 周云. 2010. 石英显微构造阴极发光特征研究——以西藏甲玛岩体为例 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 29(3): 279-283.
- 邵克忠. 1983. 德兴斑岩铜矿矿床地质若干问题的商榷 [J]. 河北地质学院学报, 4: 65-72.
- 申萍, 沈远超, 刘铁兵, 张锐, 王京彬, 张云孝, 孟磊, 王丽娟, 汪疆. 2009. 新疆包谷图斑岩型铜钼矿床容矿岩石及蚀变特征 [J]. 岩石学报, 25(4): 777-792.
- 唐菊兴. 2003. 西藏玉龙斑岩铜(钼)矿成矿作用与矿床定位预测研究(博士论文) [D]. 导师: 王成善. 四川: 成都理工大学.
- 唐菊兴, 王登红, 汪雄武, 钟康惠, 应立娟, 郑文宝, 黎枫信, 郭娜, 秦志鹏, 姚晓峰, 李磊, 王友, 唐晓倩. 2010. 西藏甲玛铜多金属矿床地质特征及其矿床模型 [J]. 地球学报, 31(4): 495-506.
- 唐菊兴, 邓世林, 郑文宝, 应立娟, 汪雄武, 钟康惠, 秦志鹏, 丁峰, 黎枫信, 唐晓倩, 钟裕峰, 彭慧娟. 2011a. 西藏墨竹工卡县甲玛铜多金属矿床勘查模型 [J]. 矿床地质, 30(2): 179-196.
- 唐菊兴, 王登红. 2011b. 西藏甲玛等超大型铜多金属矿床勘查与研究新进展 [J]. 矿床地质, 30(2): 177-178.
- 王登红, 唐菊兴, 应立娟, 陈郑辉, 许建祥, 张家菁, 李水如, 曾载淋. 2010. “五层楼+地下室”找矿模型的适用性及其对深部找矿的意义 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 40(4): 733-738.
- 王登红, 唐菊兴, 应立娟, 芮宗瑶, 郑文宝. 2011a. 甲玛与世界级铜矿的初步对比及下一步找矿工作建议 [J]. 矿床地质, 30(2): 197-206.
- 王登红, 唐菊兴, 应立娟, 林彬, 丁帅. 2011b. 西藏甲玛矿区角岩特征及其对深部找矿的意义 [J]. 岩石学报, 7: 189-194.
- 王仁民, 贺高品, 陈珍珍. 1987. 变质岩原岩图解判别法 [M]. 北京: 地质出版社. 1-199.
- 王威平, 唐菊兴, 郑文宝, 应立娟, 王焕, 唐晓倩, 秦志鹏. 2010. 西藏甲玛铜多金属矿床角岩型矿体地质特征 [J]. 矿床地质, 29(增刊): 292-294.
- 瓮纪昌, 张云政, 黄超勇, 李文智, 崔蓓蕾, 罗明伟. 2011. 柴川三道庄特大型钼钨矿床地质特征及矿床成因 [J]. 地质与勘探, 46(1): 41-48.
- 应立娟, 王登红, 唐菊兴, 王焕, 陈振宇, 郑文宝, 黎枫信. 2010b. 西藏甲玛铜多金属矿床中钼矿物及其与铜矿化关系 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 40(4): 801-809.
- 应立娟, 王登红, 唐菊兴, 畅哲生, 屈文俊. 2010a. 西藏墨竹工卡县甲玛铜多金属矿不同矿石中辉钼矿 Re-Os 同位素定年及其成矿意义 [J]. 地质学报, 84(8): 1165-1174.
- 杨时惠. 1995. 西藏甲玛赤康多金属矿床金银秘钴镍赋存状态及其矿物学特征研究 [J]. 矿物岩石, 15(1): 26-34.
- 赵元艺, 李殿超, 程泽君. 1994. 内蒙古敖伦达坝斑岩型铜银锡多金属矿床围岩蚀变特征研究 [J]. 吉林地质, 13(2): 57-62.
- 郑文宝. 2009. 西藏墨竹工卡县甲玛铜多金属矿床地球化学特征(硕士论文) [D]. 导师: 唐菊兴. 四川: 成都理工大学.