

新疆东天山天宇铜镍硫化物矿床金云母 Ar-Ar 年代学及其地质意义*

王晓青^{1,2}, 段士刚³, 陈小龙², 高 坡²

(1 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2 西藏金和矿业有限公司, 西藏 拉萨 850211;
3 中国地质科学院矿产资源研究所自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037)

摘 要 查明矿床形成后的变化保存情况对提高成矿预测能力十分重要。文章通过金云母的矿物化学和 Ar-Ar 年代学研究来探析天宇铜镍硫化物矿床形成后的变化保存问题。研究发现, 该矿床的云母有 2 种产状: 一种呈他形片状分布在橄榄石与辉石颗粒之间; 另一种是产在块状硫化物矿体与围岩的接触面上, 呈叶片状集合体。2 种云母种属为铁质黑云母、镁质黑云母和金云母。前者与角闪石近同期结晶, 结晶后受到了晚期硫化物熔体的影响, 后者为炽热的硫化物矿浆侵位时与围岩相互作用新生成的云母。云母结晶温度为 609.6~646.2°C, 2 个金云母样品的 Ar-Ar 坪年龄分别为 (250.4±1.5) Ma 和 (247.7±1.5) Ma。该 2 个坪年龄比岩体的锆石 U-Pb 年龄晚了约 30 Ma, 文章推测是由于区内晚二叠世—早三叠世的走滑断裂活动使该 Ar-Ar 年龄发生了重置。

关键词 地球化学; 铜镍硫化物矿床; 镁铁-超镁铁质杂岩体; 金云母 Ar-Ar 年代学; 天宇; 东天山

中图分类号: P618.41; P618.63

文献标志码: A

Ar-Ar geochronology of phlogopite and its geological significance from Tianyu Cu-Ni sulfide deposit in eastern Tianshan, Xinjiang Province, China

WANG XiaoQing^{1,2}, DUAN ShiGang³, CHEN XiaoLong² and GAO Po²

(1 College of Earth Science and Land Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2 Tibet Jinhe Mining Co., Ltd, Lhasa 850211, Tibet, China; 3 MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract

The change and preservation of ore deposits after their formation is also a key aspect of metallogenic prediction. In this study, we discuss the preservation of the Tianyu Cu-Ni sulfide deposit based on the mineralogical chemistry and Ar-Ar geochronology of phlogopite. Two kinds of biotite are distinguished in the deposit, one is distributed between olivine and pyroxene, and the other is developed as leaf-like aggregates on the contact surface between massive sulfide ore and wallrocks. The former crystallizes with amphibole, and is influenced by later period sulfide melt. The latter is newly crystallized biotite when hot sulfide pulp interacts with wallrocks. The crystallization temperature of biotite is 609.6~646.2°C estimated using the biotite Ti saturation geothermometer. Ar-Ar plateau ages of the two phlogopite samples are (250.4±1.5) Ma and (247.7±1.5) Ma respectively, which are about 30 Ma later than the zircon U-Pb age of the intrusion. It is speculated that the Ar-Ar age was reset due to the strike slip fault activity during Late Permian to Early Triassic in the area.

* 本文得到“深地资源勘查开采”项目课题(编号:2017YFC0601202)、成矿作用与矿产预测重点实验室基本科研业务费项目(编号:K1202、KK2014)和科技成果转化项目(编号:HE2013)联合资助

第一作者简介 王晓青,男,1983年生,博士研究生,研究方向为矿产普查与勘探。Email:yc214wxq@163.com

收稿日期 2021-05-21;改回日期 2021-11-14。赵海杰编辑。

Key words: geochemistry, copper-nickel sulfide deposit, mafic-ultramafic complex, phlogopite Ar-Ar geochronology, Tianyu, eastern Tianshan

作为岩浆岩中常见的镁铁质造岩矿物,黑云母类质同象置换相当广泛,使其组成在相当大的范围内变化。国际矿物学协会划分出了黑云母的4个端员固溶体:铁云母、金云母、铁叶云母和富镁黑云母(Rieder et al., 1998),以促进黑云母的进一步研究。黑云母的一些类质同象替换与温度、压力和氧逸度等物理化学条件之间展示了紧密的相关关系。例如,契尔马克替换(tschermakite substitution),即 $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{Si} \rightleftharpoons \text{Al}_2$ 替换,会导致体积减小,从而与结晶压力紧密相关,据此发展出了黑云母全铝地质压力计(Uchida et al., 2007);Ti与Fe、Mg、Al等之间复杂的偶合反应替代随温度升高而增强,据此发展出了黑云母Ti饱和温度计(Henry et al., 2005);黑云母 $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$ 比值随岩浆的氧逸度增加而增加,可能与 $\text{Mg} \rightleftharpoons \text{Fe}$ 完全置换和熔体中 $\text{Fe}^{2+} \leftrightarrow \text{Fe}^{3+}$ 间的转变有关(Wones et al., 1965)。基于此,黑云母的矿物化学常被用来揭示岩浆的物化条件、演化过程、物质来源及评价含矿性(Abdel-Rahman, 1994; Borodina et al., 1999; Webster, 2004; Henry et al., 2005; 唐攀等, 2017; 张毓策等, 2020; 张忠坤, 2020)。此外,黑云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素年龄属于中温热年代学(袁万明等, 2016; 田朋飞等, 2020),代表了 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素体系封闭后至今的时间,被用来限定矿床成矿年龄(郑义等, 2013; 钟军等, 2020)和研究矿床变化保存问题(孙敬博等, 2015)。

东天山的中天山地块和觉罗塔格构造带内产出一系列早二叠世赋存在镁铁-超镁铁质杂岩体中的铜镍硫化物矿床(王京彬等, 2006; 毛景文等, 2006; 秦克章等, 2012)。其中,天宇矿床是在中天山地块内发现的一处中型铜镍硫化物矿床,前人对其开展了岩相学、岩石地球化学与同位素年代学研究(唐冬梅等, 2009a; 2009b; Tang et al., 2011)、矿物学与矿物化学研究(宋林山等, 2014; 方林茹等, 2019)、成矿物质来源研究(王亚春等, 2013; 段士刚等, 2017)、控矿构造(陈柏林等, 2018)及成矿模式研究(邓刚等, 2012)等等,取得了许多重要认识,而关于矿床中云母的种属、成分特征及成因意义的研究仍很薄弱,关于云母在矿床变化保存方面的指示意义也未提及。本文报道了对天宇铜镍硫化物矿床中云母开展的该方面研究工作,并分析了其对矿床形成与变化保存的指示意义。

1 地质背景

东天山天宇铜镍矿区位于新疆哈密市东南方向约170 km。东天山位于中亚造山带的西南缘,它西起小热泉子,东至甘新交界,是中国重要的铁、镍、铜、金、铅锌成矿带(图1)。东天山是由塔里木和准噶尔古板块及其增生边缘拼接、碰撞形成,其地质历史大体可以划分为前震旦纪古陆块基底形成阶段、震旦纪至石炭纪古洋盆开合阶段和二叠纪以来大陆地壳陆内演化阶段(毛景文等, 2006; 陈毓川等, 2008)。

东天山地区在早二叠世为后碰撞环境,主要发生了韧性剪切作用与幔源岩浆底侵作用,韧性剪切作用形成了康古尔剪切带,沿剪切带形成了蚀变岩型及石英脉型金矿,如康古尔Au矿和马头滩Au矿;幔源岩浆底侵作用具有跨构造单元的“面型”分布特征,形成了大量岩浆铜镍硫化物矿床,如觉罗塔格构造带的图拉尔根、黄山和香山Cu-Ni矿床,及中天山地块内的天宇Cu-Ni矿床(王京彬等, 2006)。

天宇铜镍矿床及周边地区出露的岩层为中元古界长城系星星峡群,该群为一套绿片岩相至角闪岩相的变质火山熔岩、火山碎屑岩夹碳酸盐岩。区内构造作用强烈,主要为断裂,次为褶皱和单斜构造。断裂构造主要为沙泉子深大断裂及其次级断裂。区域内侵入岩十分发育,分布广泛,并以华力西期侵入岩为主,以加里东期侵入岩为次。加里东期侵入岩主要为片麻状花岗岩;华力西期侵入岩从酸性-中性-基性-超基性均有出露。华力西期晚期侵入岩是区内镁铁-超镁铁岩体形成的主要阶段,天宇铜镍矿、白石泉铜镍矿均与华力西晚期侵入岩关系密切。

天宇杂岩带由 $\Sigma 15$ ~ $\Sigma 21$ 号7个杂岩体组成。其中 $\Sigma 20$ 号杂岩体是天宇铜镍硫化物矿床的主体(图2),其出露长度大于1150 m,宽6~70 m,总体走向 49° ,向北倾,但倾角变化较大,且在东、西两端出现分支。其西北侧围岩为片麻状花岗岩,东南侧围岩为云母斜长片岩、斜长石英片岩,杂岩体深部超镁铁岩为全岩矿化,辉石岩、橄辉岩和橄玢岩相即为矿体,地表矿化较弱,以盲矿体为主(图3)。该杂岩体由北向南可划分为辉石闪长岩相、辉石岩相、橄辉岩

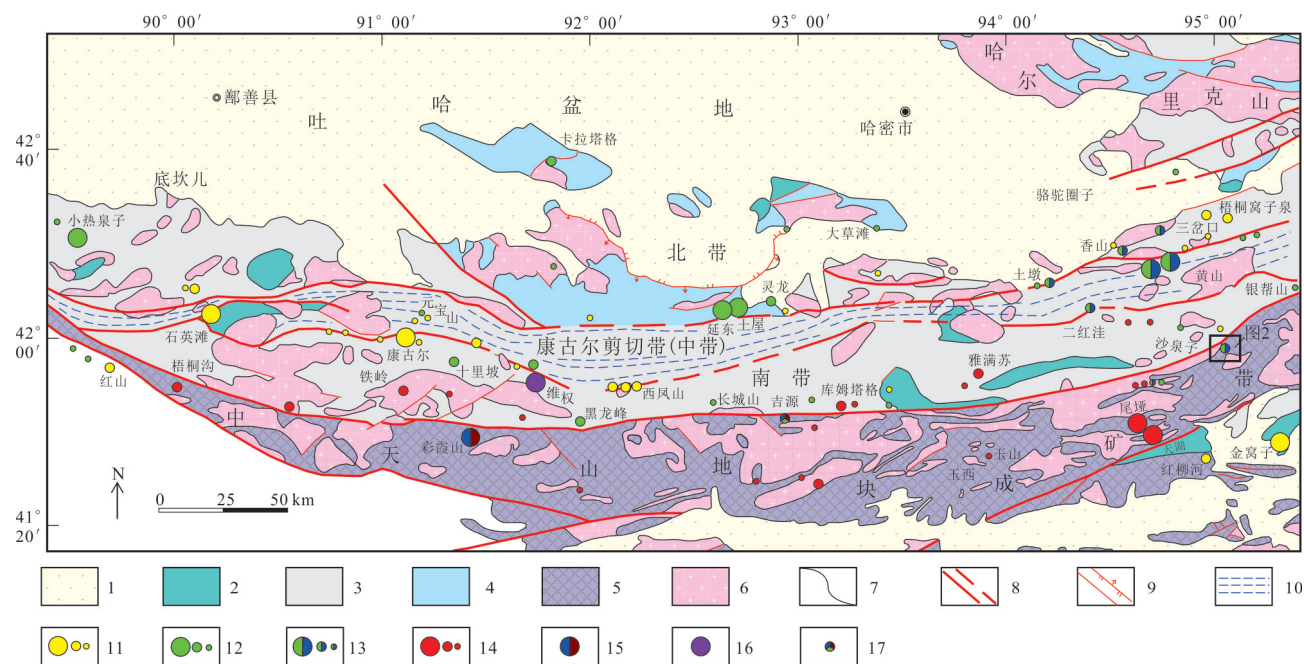


图1 东天山构造格架与矿床分布图(据王京彬等,2006修改)

1—中生代沉积盖层;2—二叠纪陆相火山-沉积岩系;3—石炭纪火山-沉积岩系;4—奥陶纪—泥盆纪火山-沉积岩系;5—前寒武纪变质岩;6—花岗岩类;7—地质界线;8—区域断层/推测区域断层;9—断层/逆断层;10—剪切带;11—金矿床(大、中、小型);12—铜矿床(大、中、小型);13—铜镍硫化物矿床(大、中、小型);14—铁矿床(大、中、小型);15—铅锌矿床;16—银多金属矿床;17—多金属矿床

Fig. 1 Map of the tectonic framework and deposit distribution in the East Tianshan Mountains (modified after Wang et al., 2006)

1—Mesozoic to Cenozoic sedimentary cover; 2—Permian continental volcanic sedimentary rocks; 3—Carboniferous volcanic sedimentary rocks; 4—Ordovician to Devonian volcanic sedimentary rocks; 5—Precambrian metamorphic rocks; 6—Granite; 7—Geological boundary; 8—Regional fault / Inferred regional fault; 9—Fault / Reverse fault; 10—Ductile shear zone; 11—Gold deposits (large, medium and small); 12—Copper deposits (large, medium and small); 13—Copper-nickel sulfide deposits (large, medium and small); 14—Iron ore deposits (large, medium and small); 15—Lead-zinc deposits; 16—Silver-rich polymetallic ore deposits; 17—Polymetallic ore deposits

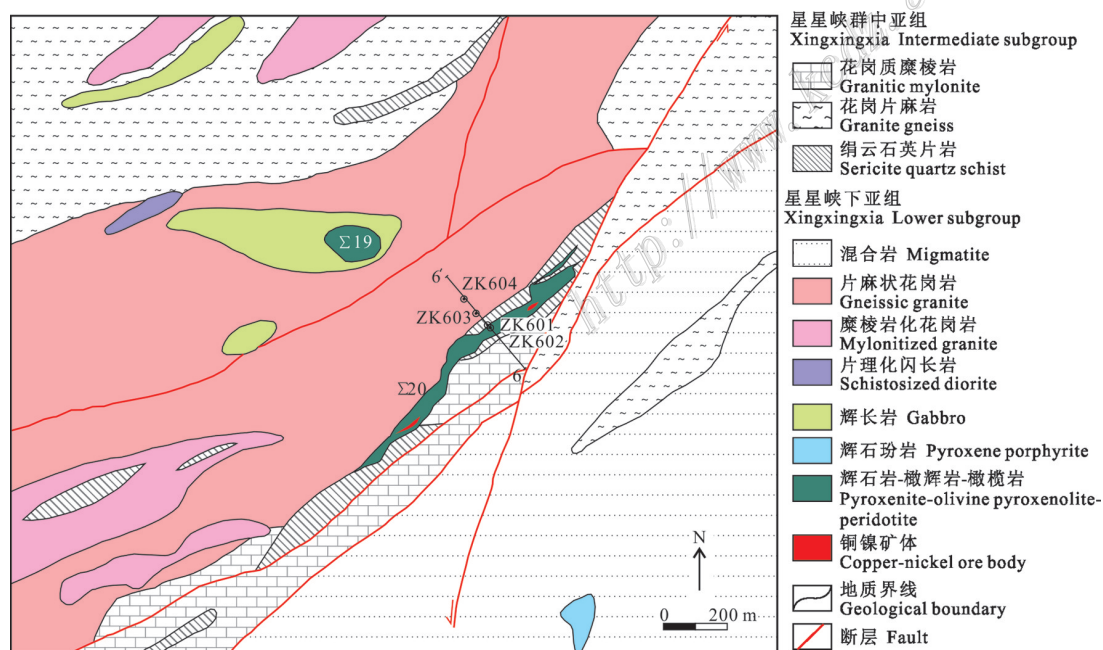


图2 天宇铜镍硫化物矿床地质图

Fig. 2 Geological map of the Tianyu copper-nickel sulfide deposit

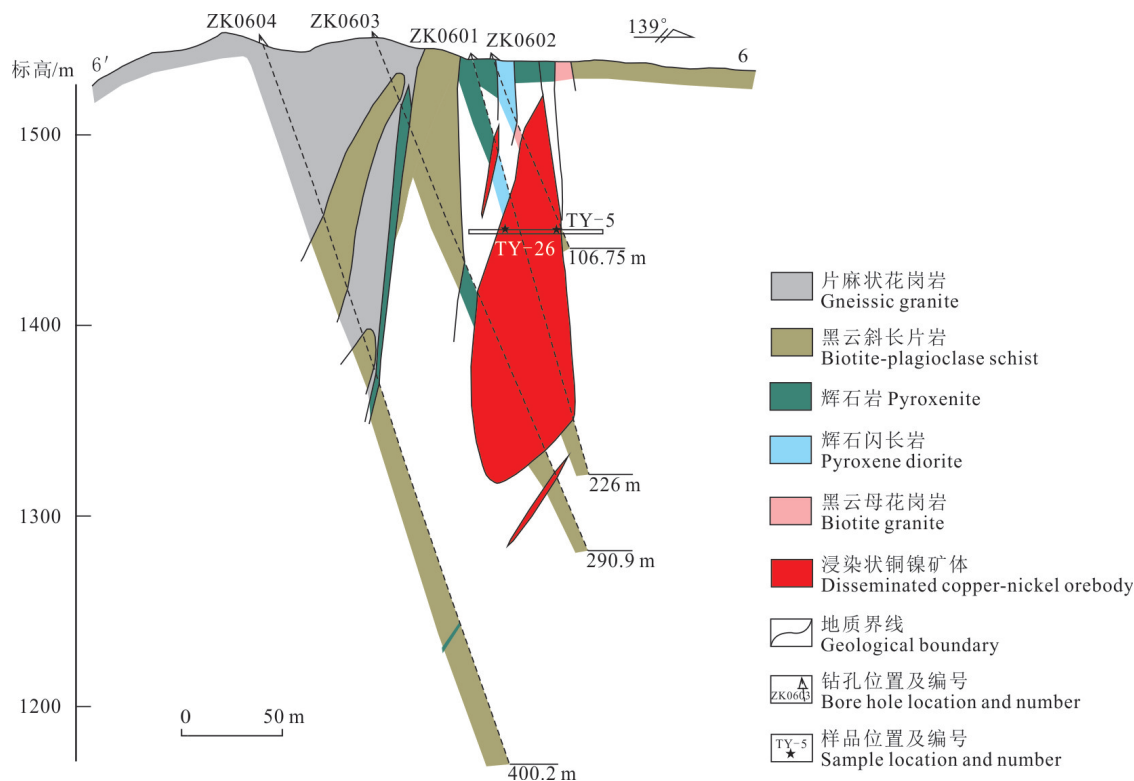


图3 天宇铜镍硫化物矿床6号勘探线剖面图(位置见图2)

Fig. 3 Geological profile of exploration line 6 of the Tianyu copper-nickel sulfide deposit (see Fig. 2 for location)

相和橄榄岩相,其中后三者为渐变过度关系,被辉石闪长岩侵入(唐冬梅等,2009a)。在地表仅达镍工业品位,镍矿体位于深部,包括低品位的浸染状矿体和少量高品位的块状矿体,矿体与围岩花岗片麻岩、花岗质糜棱岩、绢云石英片岩和片麻状花岗岩截然接触。

矿石主要为稀疏浸染状、浸染状、稠密浸染状、块状、角砾状及脉状等构造,结构类型主要为自形-半自形粒状结构、半自形-他形粒状结构、他形粒状结构、海绵陨铁结构,其次有出溶体结构和镶嵌状结构(唐冬梅等,2009a;段士刚等,2017)。矿石中金属硫化物以磁黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿、镍黄铁矿为主,闪锌矿、方铅矿、辉钼矿等微量;脉石矿物以橄榄石、辉石、蛇纹石、斜长石、透闪石、黑云母、金云母、绿泥石、方解石、白云石、滑石等为主(邓刚等,2012)。

2 样品采集与测试

2.1 样品采集

野外和室内观察发现,天宇铜镍硫化物矿床原生云母有2种:一种是在超镁铁质岩中,另一种是产

在块状硫化物矿体与围岩的接触面上。样品采自1350中段和1400中段,其中TY-5、TY-26、TY-39、TY-153、TY-168为采自1350中段的浸染状矿石(图4a),TY-49、TY-152、TY-7、TY-163为采自1400中段块状矿体边部的矿石(图4b)。将前7件磨制了光薄片,镜下挑选新鲜的云母进行探针成分分析。后2件发育粗大的金云母(图4c、d),挑选金云母单矿物进行 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素测年。金云母在浸染状矿石手标本上肉眼不易辨识,在显微镜下呈他形片状分布在橄榄石与辉石颗粒之间,与角闪石间呈嵌晶结构(图4e、f),大小0.2~1.0 mm。块状矿体边部的金云母,产在块状硫化物矿体与围岩的接触面上。接触界线附近的围岩发生了约10 cm宽的重结晶,矿物颗粒变得更加粗大。接触界线上的金云母单体呈粗大片状(2~8 mm),他形,集合体呈叶片状集合体,且平行接触面呈薄面状延伸,新鲜无蚀变、无变形现象。

2.2 实验方法

电子探针分析在中国地质科学院矿产资源所电子探针实验室完成,仪器为JEOL JXA-8230型电子探针仪,分析条件为加速电压5 kV、电流20 nA、束斑

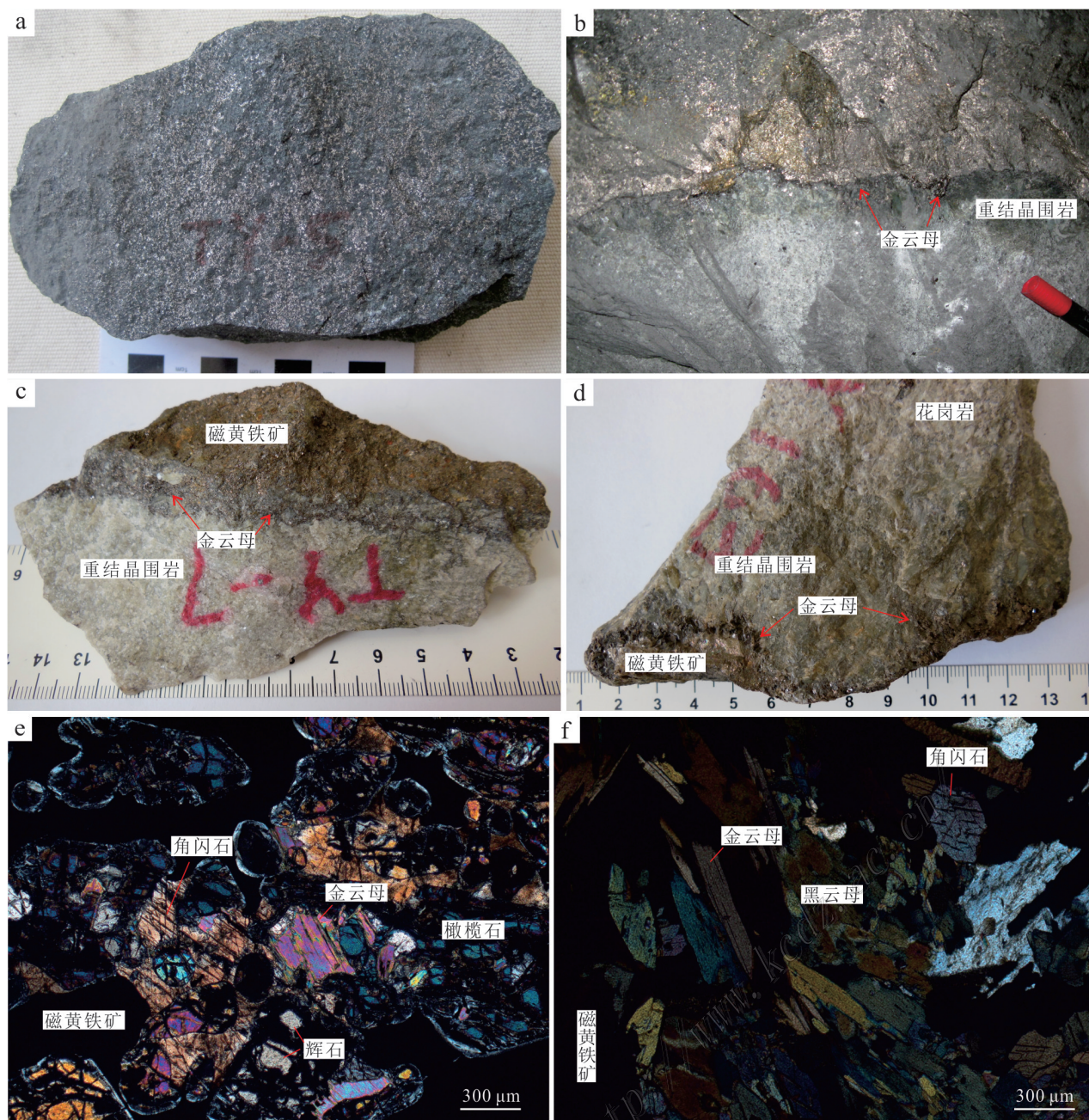


图4 天宇矿床含金云母铜镍矿石样品照片(a~d)和正交偏光显微照片(e、f)

a. 浸染状铜镍矿石; b. 块状矿石及其边部粗大金云母和重结晶围岩; c、d. 块状矿石与重结晶围岩之间粗大的金云母; e、f. 他形片状金云母和黑云母与角闪石间呈嵌晶结构

Fig. 4 Photographs (a~d) and orthogonally polarized micrographs (e, f) of Cu-Ni ore samples containing phlogopite in the Tianyu deposit

a. Disseminated copper-nickel ore; b. Massive ore and coarse phlogopite and recrystallized surrounding rock at its edge; c, d. Coarse phlogopite between massive ore and recrystallized surrounding rock; e, f. Allomorphic lamellar phlogopite and biotite which are intercalated with amphibole

直径5 μm, 标样采用天然矿物或合成金属国家标准, 分析精度为0.01%。

Ar-Ar 同位素测年在中国地质科学院地质研究所氩同位素实验室完成。首先将样品粉碎、过筛

后进行水漂、磁选和重液分离等, 分选出60~80目的金云母, 然后在双目镜下手工挑选, 挑选金云母纯度达到99%以上, 送中国地质科学院地质研究所 Ar-Ar 同位素实验室进行测试。先对选纯的金云母样品用

超声波清洗。清洗后的样品被封进石英瓶中送核反应堆中接受中子照射。照射工作是在中国原子能科学研究所的“游泳池堆”中进行的。样品的阶段升温加热使用石墨炉,质谱分析是在多接收稀有气体质谱仪 Helix MC 上进行的。所有的数据在回归到时间零点值后再进行质量歧视校正、大气氩校正、空白校正和干扰元素同位素校正,用 ISOPLOT 程序计算坪年龄及正、反等时线(Ludwig, 2001),坪年龄误差以 2 s 给出。详细实验流程和参数见有关文章(陈文等, 2006; 张彦等, 2006)。

2.3 实验结果

2.3.1 EPMA 分析

电子探针分析结果见表 1,表中以 22 个氧原子为基础计算了云母的阳离子数及相关参数。由分析结果可知,天宇杂岩体云母具有贫钛特征。在 Foster 等(1962)的云母分类图解中投影于铁质黑云母、镁质黑云母和金云母区域(图 5)。测年云母样品种属为金云母。

2.3.2 Ar-Ar 同位素测年

天宇铜镍硫化物矿床金云母样品阶段加热 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄分析结果见表 2,计算的年龄谱和等时线图 6。样品 TY-7 在 840~1400°C 的 10 个中-高温阶段组成了 1 个年龄坪,坪年龄 $t_p=(250.4\pm 1.5)\text{Ma}$,对应了 98.4% 的 ^{39}Ar 释放量(图 6a)。相应的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 等时线年龄 $t_i=(250.7\pm 2.4)\text{Ma}$,初始值 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 为 283.7 ± 6.8 (MSWD=1.2)(图 6b),等时线年龄和坪年龄在误差范围内一致。 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始值接近于现代大气氩比值(尼尔值 295.5 ± 5),两者在误差范围内一致,表明测试结果是有意义的。因此, TY-7 金云母 $(250.4\pm 1.5)\text{Ma}$ 的坪年龄是有地质意义的,代表了金云母 Ar 同位素的封闭年龄。

样品 TY-163 在 820~1400°C 的 10 个中-高温阶段组成了 1 个年龄坪,坪年龄 $t_p=(247.7\pm 1.5)\text{Ma}$,对应了 92.7% 的 ^{39}Ar 释放量(图 6c)。相应的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 等时线年龄 $t_i=(247.7\pm 2.6)\text{Ma}$,初始值 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 为 268 ± 70 (MSWD=0.72)(图 6d),等时线年龄和坪年龄在误差范围内一致。 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始值与现代大气氩比值(尼尔值 295.5 ± 5.0) 在误差范围内一致,表明测试结果是有意义的。因此, TY-163 金云母 $(247.7\pm 1.5)\text{Ma}$ 的坪年龄是有地质意义的,代表了金云母 Ar 同位素的封闭年龄。

样品 TY-7 金云母坪年龄 $(250.4\pm 1.5)\text{Ma}$ 和 TY-163 金云母坪年龄 $(247.7\pm 1.5)\text{Ma}$ 在误差范围内一

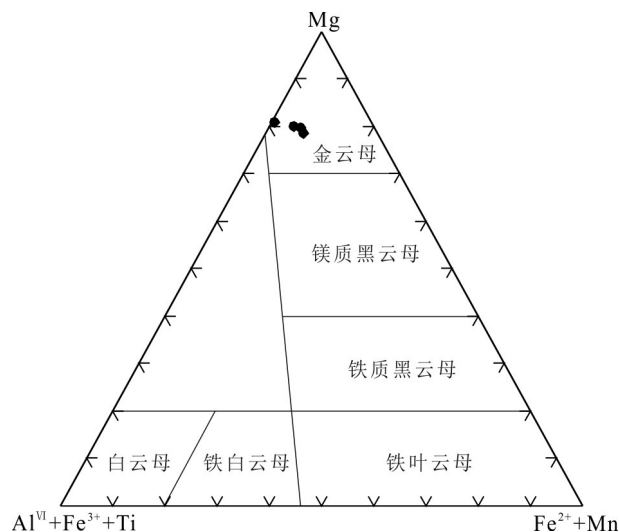


图 5 天宇矿床云母分类图解(据 Foster et al., 1962)

Fig. 5 Classification diagram of mica in Tianyu deposit (after Foster et al., 1962)

致,代表了矿体地温梯度降低到金云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 封闭温度(300°C)后至今的时间。

3 讨论

天宇铜镍矿床的云母有 2 种产状,其一是在浸染状与海绵陨铁状矿石中与角闪石呈嵌晶结构,分布在具有浑圆状蛇纹石化的橄榄石和辉石颗粒之间,又被大量金属矿物充填形成海绵陨铁结构;其二是在块状硫化物矿石与重结晶围岩接触面上由粗大的深棕色叶片状金云母呈线状平行接触面延伸,新鲜无蚀变,无变形现象,并且围岩重结晶带宽约 10 cm,颗粒粗大,颜色变深。前者具有岩浆黑云母的岩相学特征(唐攀等, 2017),结晶发生在橄榄石和辉石之后,与角闪石近同期,但明显早于硫化物;后者明显是炽热的硫化物矿浆侵位后引起围岩变质重结晶或与围岩发生小范围同化混染新生成的金云母。在 FeO^T - 10TiO_2 - MgO 图解(图 7; Nachit et al., 2005)中,前者投影在重结晶黑云母区,可能反映了晚期硫化物熔体对早期结晶黑云母和金云母的影响;后者投影在新生黑云母区域,与野外观察认识一致。天宇矿床金云母的低 Ti 特征 ($\text{Ti}<0.2$) 也符合固相线下交代作用成因黑云母的特征(马昌前等, 1994)。利用 Henry 等(2005)提出的黑云母 Ti 含量温度计: $T=\{[\ln(\text{Ti})-a-c(X_{\text{Mg}})^3]/b\}^{0.333}$, 其中 $X_{\text{Mg}}=\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$, $a=-2.3594$, $b=4.6482\times 10^{-9}$,

表1 天宇铜镍硫化物矿床云母电子探针分析结果(w(B)/%)
Table 1 Results of electron microprobe analysis(w(B)/%) of biotite from the Tianyu copper nickel sulfide deposit

组分	TY- 153-1-1	TY- 153-1-2	TY- 153-1-3	TY- 153-1-4	TY- 153-1-5	TY- 153-1-6	TY- 153-1-7	49-1-1 49-1-2 49-1-3 49-1-4 49-1-5					TY- 168-1-1	TY- 168-1-2	TY- 168-1-3	TY- 168-1-4	TY- 152-3-2	TY- 5-1-1	TY- 39-3-3	TY- 39-3-4
	153-1-1	153-1-2	153-1-3	153-1-4	153-1-5	153-1-6	153-1-7	49-1-1	49-1-2	49-1-3	49-1-4	49-1-5	168-1-1	168-1-2	168-1-3	168-1-4	152-3-2	5-1-1	39-3-3	39-3-4
SiO ₂	35.82	35.63	34.99	36.30	35.66	36.30	35.69	41.06	37.57	39.91	40.23	40.60	37.91	38.43	39.63	37.33	41.51	40.05	38.98	38.60
TiO ₂	1.33	1.25	1.32	1.37	1.27	1.44	1.27	0.71	0.07	0.39	1.03	1.10	1.08	1.22	1.44	1.28	0.30	0.64	0.72	0.94
Al ₂ O ₃	13.43	13.64	13.22	13.05	13.24	12.94	13.75	14.41	13.92	15.41	13.32	13.60	13.52	14.32	14.82	15.17	18.82	17.58	16.94	16.57
FeO	28.26	28.14	27.54	28.43	28.16	27.67	28.08	4.98	6.92	4.39	4.74	4.26	16.98	16.66	18.29	19.41	4.63	5.20	7.08	6.88
MnO	0.19	0.12	0.19	0.15	0.17	0.18	0.22	0.03	0.20	0.04	0.05	0.00	0.33	0.28	0.34	0.41	0.06	0.20	0.10	0.17
MgO	5.55	5.52	5.93	5.76	5.72	5.57	5.81	22.43	23.81	24.10	23.42	22.85	12.28	14.23	13.65	14.12	24.61	23.20	23.08	23.51
CaO	0.05	0.06	0.07	0.05	0.05	0.05	0.03	0.03	0.00	0.02	0.08	0.00	0.18	0.16	0.06	0.14	0.13	0.03	0.09	0.08
Na ₂ O	0.21	0.15	0.16	0.18	0.19	0.15	0.19	1.81	0.34	2.54	0.66	0.66	0.13	0.18	0.20	0.18	2.16	1.36	1.01	0.87
K ₂ O	9.91	9.36	8.73	9.93	9.16	8.87	10.00	6.48	3.11	3.51	6.95	7.96	9.25	10.08	9.21	6.75	4.55	6.79	5.71	5.42
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.15	0.00	0.18	0.01	0.05	0.00	0.04	0.04	0.00	0.04	0.10	0.15	0.02	0.00	0.23
Cl	0.04	0.01	0.03	0.07	0.04	0.04	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02	0.07	0.10	0.07	0.08	0.03	0.01	0.04	0.06
基于22个氧原子计算阳离子数及相关参数																				
Si	5.79	5.79	5.78	5.84	5.81	5.91	5.75	5.94	5.75	5.78	5.92	5.94	5.94	5.78	5.82	5.64	5.62	5.61	5.56	5.54
Al ^{iv}	2.21	2.21	2.22	2.16	2.19	2.09	2.25	2.06	2.25	2.22	2.08	2.06	2.06	2.22	2.18	2.36	2.38	2.39	2.44	2.46
Al ^{vi}	0.35	0.41	0.36	0.31	0.36	0.39	0.36	0.39	0.27	0.41	0.22	0.29	0.44	0.32	0.39	0.34	0.62	0.52	0.41	0.35
Ti	0.16	0.15	0.16	0.17	0.16	0.18	0.15	0.08	0.01	0.04	0.11	0.12	0.13	0.14	0.16	0.15	0.03	0.07	0.08	0.10
Fe	3.82	3.83	3.81	3.82	3.84	3.77	3.78	0.60	0.89	0.53	0.58	0.52	2.23	2.10	2.25	2.45	0.52	0.61	0.85	0.83
Mn	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	0.04	0.04	0.04	0.05	0.01	0.02	0.01	0.02
Mg	1.34	1.34	1.46	1.38	1.39	1.35	1.40	4.83	5.44	5.20	5.13	4.99	2.87	3.19	2.99	3.18	4.97	4.85	4.91	5.03
Ca	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.03	0.02	0.01	0.02	0.02	0.00	0.01	0.01
Na	0.07	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.06	0.51	0.10	0.71	0.19	0.19	0.04	0.05	0.06	0.05	0.57	0.37	0.28	0.24
K	2.04	1.94	1.84	2.04	1.90	1.84	2.06	1.19	0.61	0.65	1.30	1.49	1.85	1.94	1.73	1.30	0.79	1.21	1.04	0.99
OH*	3.99	4.00	3.99	3.98	3.98	3.91	4.00	3.91	3.99	3.97	3.99	3.98	3.96	3.97	3.97	3.93	3.93	3.99	3.99	3.88
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.08	0.00	0.08	0.01	0.02	0.00	0.02	0.02	0.00	0.02	0.05	0.06	0.01	0.00	0.11
Cl	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01	0.02
T ⁹⁰ C	185.4	185.4	198.3	189.9	190.1	188.9	192.7	635.3	614.3	648.1	641.7	646.8	402.4	431.3	408.1	403.6	646.2	634.7	609.6	613.7

注: MF=Mg/(Fe³⁺+Fe²⁺+Mg+Mn); T=[ln(Ti)-a-c(X_{Mg})³/b]^{0.333}, X_{Mg}=Mg/(Mg+Fe), a=-2.3594, b=4.6482×10⁻⁹, c=-1.7283。

表 2 金云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 阶段升温加热分析结果
Table 2 Stage heating results of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ratios of phlogopite

$T/^{\circ}\text{C}$	$(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$(^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$(^{37}\text{Ar}_0/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$(^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$^{40}\text{Ar}/\%$	F	$^{39}\text{Ar}(\times 10^{-14}\text{mol})$	$^{39}\text{Ar}/\%$	年龄/Ma	$\pm 1\sigma/\text{Ma}$
TY-7, W=30.06 mg, J=0.004498										
700	71.1038	0.1862	1.2085	0.0646	22.73	16.1785	0.05	0.18	126.7	9.0
780	41.8092	0.0543	0.3525	0.0363	61.68	25.7941	0.38	1.64	198.0	2.2
840	37.7721	0.0163	0.0222	0.0279	87.22	32.9439	3.06	13.30	249.3	2.3
880	33.9815	0.0033	0.0109	0.0255	97.16	33.0153	3.44	26.41	249.8	2.3
920	33.5426	0.0015	0.0322	0.0251	98.71	33.1116	2.37	35.43	250.5	2.3
960	33.5747	0.0016	0.0164	0.0248	98.58	33.0992	2.19	43.78	250.4	2.3
1000	33.7028	0.0013	0.0143	0.0247	98.85	33.3160	2.62	53.77	251.9	2.4
1040	33.6236	0.0019	0.0194	0.0247	98.31	33.0559	3.12	65.65	250.1	2.3
1080	33.5117	0.0018	0.0271	0.0246	98.40	32.9773	3.15	77.66	249.5	2.3
1120	33.8431	0.0024	0.0335	0.0248	97.90	33.1339	3.23	89.96	250.6	2.3
1200	33.9396	0.0024	0.0426	0.0249	97.95	33.2444	2.47	99.37	251.4	2.4
1400	39.9242	0.0233	0.1870	0.0274	82.81	33.0666	0.17	100.00	250.1	2.9
Total age=249.3 Ma; $t_{\text{p}}=(250.4\pm 1.5)\text{Ma}$; $t_{\text{i}}=(250.7\pm 2.4)\text{Ma}$; $(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_{\text{i}}=283.7\pm 6.8$										
TY-163, W=30.70 mg, J=0.004499										
700	73.0017	0.1990	2.5026	0.0691	19.68	14.3929	0.06	0.23	113.2	7.8
780	43.4489	0.0390	0.0000	0.0304	73.44	31.9104	1.83	7.34	242.0	2.3
820	33.6889	0.0037	0.0209	0.0239	96.75	32.5959	4.09	23.18	246.9	2.3
860	33.0639	0.0016	0.0539	0.0234	98.55	32.5861	3.50	36.74	246.8	2.3
900	33.0651	0.0015	0.0445	0.0233	98.67	32.6250	1.99	44.45	247.1	2.3
940	33.0967	0.0007	0.0000	0.0231	99.34	32.8796	1.71	51.08	248.9	2.3
980	33.2023	0.0014	0.0242	0.0233	98.71	32.7738	1.92	58.51	248.1	2.3
1020	33.0683	0.0017	0.0718	0.0236	98.49	32.5693	2.51	68.22	246.7	2.3
1060	33.0151	0.0009	0.0429	0.0232	99.17	32.7410	2.72	78.79	247.9	2.3
1100	33.0545	0.0014	0.0294	0.0231	98.76	32.6456	2.51	88.50	247.2	2.3
1200	33.3046	0.0019	0.0449	0.0230	98.28	32.7321	2.73	99.08	247.8	2.3
1400	34.9236	0.0059	0.3669	0.0232	95.04	33.1996	0.24	100.00	251.1	3.1
Total age=246.7Ma; $t_{\text{p}}=(247.7\pm 1.5)\text{Ma}$; $t_{\text{i}}=(247.7\pm 2.6)\text{Ma}$; $(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_{\text{i}}=268\pm 70$										

$c=-1.7283$, 计算出天宇铜镍矿床的金云母结晶温度为 $609.6\sim 646.2^{\circ}\text{C}$ (表 1), 仍处于岩浆温度范围内。因此, 可以认为天宇块状矿体边部的粗大金云母是铜镍硫化物矿浆凝固过程中形成的。

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素年龄属于中温热年代学 (袁万明等, 2016; 田朋飞等, 2020), 根据测年对象的不同可以用来约束成矿年龄 (Duan et al., 2018)、构造带活动时间 (陈文等, 2006)、隆升剥蚀 (孙敬博等, 2015)、盆地演化、矿床保存变化等方面 (田朋飞等, 2020)。天宇矿床金云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄可以用来指示矿床形成后的变化保存。天宇杂岩体锆石 SIMS U-Pb 年龄是 $(280\pm 2)\text{Ma}$ (Tang et al., 2011), 锆石 U-Pb 体系的封闭温度高于 900°C

(Lee et al., 1997; Cherniak et al., 2000), 因此该锆石年龄记录了杂岩体和矿体的侵位时间在早二叠世。天宇金云母 Ar-Ar 坪年龄为 $(250.4\pm 1.5)\text{Ma}$ 和 $(247.7\pm 1.5)\text{Ma}$, 代表了金云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 同位素体系封闭 (封闭温度 $(350\pm 50)^{\circ}\text{C}$; Harrison et al., 1985; Grove et al., 1996; McDougall et al., 1999) 后至今的时间。该年龄比锆石年龄晚了约 30 Ma, 可能由以下 2 种原因造成: 一是由于隆升剥蚀地温梯度降低到金云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 封闭温度, 二是矿体附近印支期岩浆活动或断裂作用使 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄发生了重置。

针对第一种可能性, 考虑到东天山印支期活跃的岩浆和构造活动, 假设天宇矿床所在地区地温

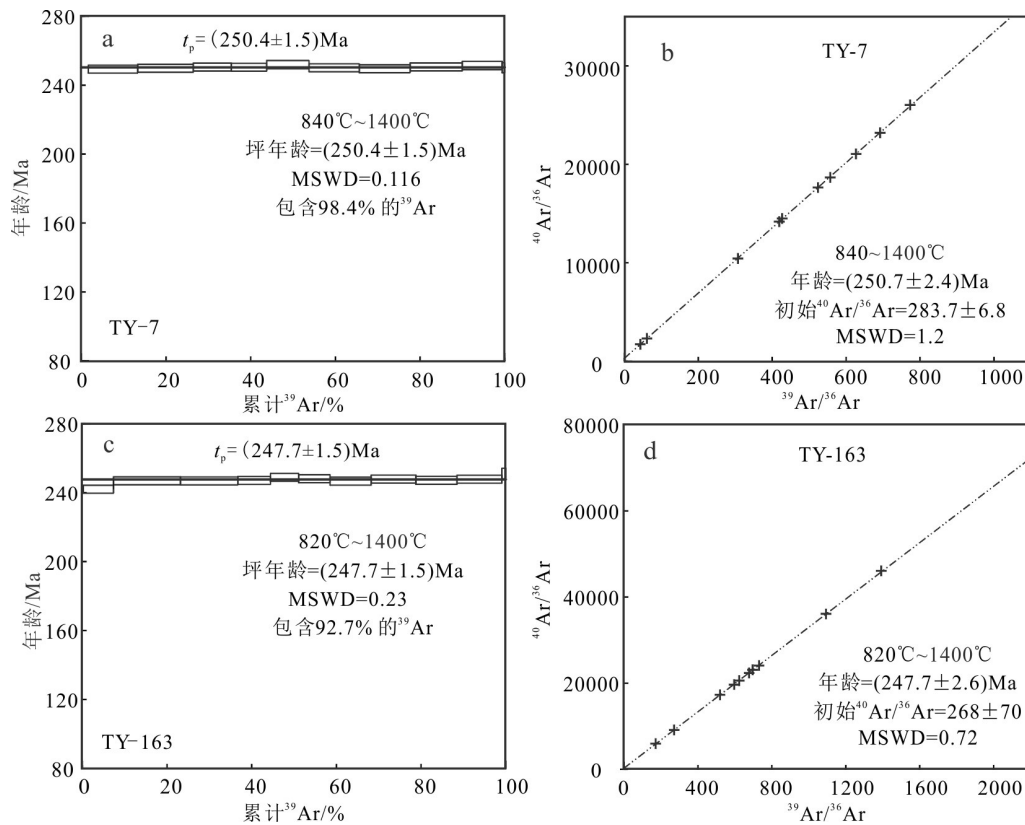


图6 天宇金云母 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 阶段升温年龄谱图(a,c)和等时线图(b,d)

Fig. 6 Plateau ages (a, c) and isochron charts of stage heating results (b, d) of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ratios of Tianyu phlogopite

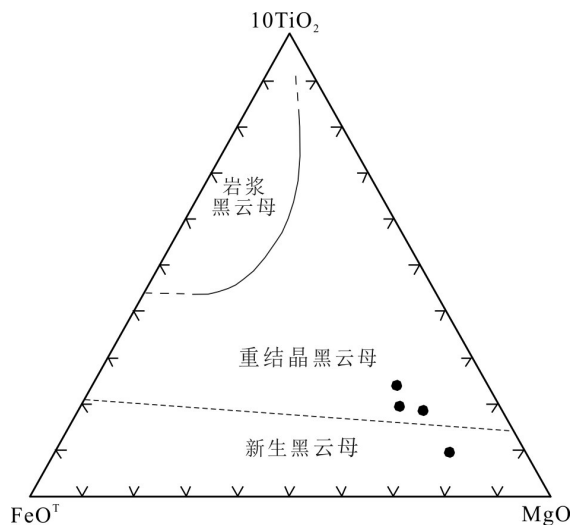


图7 天宇矿床金云母 $\text{FeO}^{\text{T}}\text{-}10\text{TiO}_2\text{-MgO}$ 图解
(据 Nachit et al., 2005)

Fig. 7 $\text{FeO}^{\text{T}}\text{-}10\text{TiO}_2\text{-MgO}$ diagram of Tianyu phlogopite
(after Nachit et al., 2005)

梯度介于造山带正常水平 $30^\circ\text{C}/\text{km}$ (朱文斌等, 2007) 至较高温度 $50^\circ\text{C}/\text{km}$ (朱文斌等, 2007) 之间, 地表温度选择 10°C , 那么云母 Ar-Ar 体系封闭温度

350°C 代表的地下深度约为 6.8~11.3 km (孙敬博等, 2015)。也就是说自 250 Ma 至今, 该地区发生了约 6.8~11.0 km 的隆升和剥蚀。天宇铜镍硫化物矿床为贯入式成矿 (唐冬梅等, 2009a; 邓刚等, 2012), 其角闪石以填隙形式产出, 是岩浆固结-近固结状态下的产物, 根据 Ridolfi 等 (2010) 角闪石压力计计算得到其角闪石结晶压力在 274~452 MPa 之间, 平均为 361 MPa, 换算的侵位深度在 12~15 km 之间 (方林茹等, 2019)。位于天宇铜镍矿西南约 50 km 处的尾亚岩体年龄介于 253.9~259.9 Ma (王京彬等, 2006), 其发育的角闪石也以填隙形式产出, 是岩浆固结-近固结状态下的产物, 根据 Ridolfi 等 (2010) 角闪石压力计计算得到角闪石结晶压力介于 0.27~0.45 GPa 之间, 对应的侵位深度为 10.1~16.9 km (石煜等, 2016)。似乎均支持剥蚀深度接近 11 km。然而必须指出的是, Ridolfi 等 (2010) 的角闪石全铝压力计估算的是角闪石在熔体中结晶时的压力值, 不是在近固相线温度下结晶的角闪石的的压力值, 因此它适用于估算火山岩角闪石斑晶结晶时的压力, 而不适用于计算侵入体的结

晶压力(汪洋,2014)。因此上述深度的可靠性存在疑问。Wang等(2008;2010)根据断裂构造热年代学数据推测该地区出露的晚二叠世一早三叠世岩体侵位深度均较浅。李季霖等(2021)利用黑云母全铝压力计计算了该地区花岗岩类剥蚀程度,结果表明尾亚环形杂岩体内环(锆石 U-Pb 年龄范围为 244.7~228.7 Ma)平均为 5.8 km,尾亚外环(锆石 U-Pb 年龄范围为 257.4~236 Ma)平均为 5 km;天湖杂岩体(243~241 Ma)内环平均为 2.4 km,外环平均为 3.3 km。因此,天宇-尾亚地区三叠纪以来剥蚀程度可能在 2.4~5.8 km,而并非角闪石压力计指示的近 11 km 的剥蚀。

在地壳浅部,仅几十米厚的天宇岩墙状杂岩体会快速冷却。金云母 Ar-Ar 年龄与锆石年龄间约 30 Ma 的差距,可能反映了印支期岩浆或断裂活动的热作用重置。印支期侵入岩在中天山地块比较发育,例如上述尾亚杂岩体、天湖杂岩体。但目前天宇矿区还未见有印支期侵入岩的报道,因此推测该重置年龄可能由断裂活动导致。天宇矿区位于沙泉子深大断裂南侧 4~5 km 处,矿区赋矿断裂以及后期破矿断裂被认为是沙泉子深大断裂派生的次级断裂。断裂构造研究表明,区域上在约 270~245 Ma 发生了大规模右行剪切作用,在约 240~235 Ma 发生了左行剪切作用(陈文等,2005;Wang et al., 2010)。天宇矿区近南北向和北北东向断裂主要为成矿后断裂(陈柏林等,2018),可能是沙泉子大断裂晚二叠世一早三叠世再活动在矿区的反映。天宇金云母 Ar-Ar 年龄与区域大规模右行剪切作用时代吻合,可能反映了后期构造热作用对金云母 Ar-Ar 同位素封闭体系的重置。

4 结 论

天宇铜镍硫化物矿床原生云母有 2 种:一种是在超镁铁质岩中,呈他形片状分布在橄榄石与辉石颗粒之间,与角闪石间呈嵌晶结构;另一种是产在块状硫化物矿体与围岩的接触面上,呈叶片状集合体,云母单体为粗大的他形片状。前者结晶后受到了晚期硫化物熔体的影响,后者为炽热的硫化物岩浆侵位时与围岩相互作用新生成的金云母。金云母结晶温度为 609.6~646.2°C, Ar-Ar 坪年龄为 (250.4±1.5)Ma 和 (247.7±1.5)Ma。金云母 Ar-Ar 坪年龄比岩体的锆石 U-Pb 年龄晚了约 30 Ma,推测是由

于区内晚二叠世一早石炭世的走滑断裂活动使该 Ar-Ar 年龄发生了重置。

致 谢 在野外工作中得到了新疆第六地质大队齐利平工程师的帮助,在此表示衷心的感谢!同时感谢审稿人对本文的评论和提出的修改意见。

References

- Abdel-Rahman A F M. 1994. Nature of biotites from alkaline, calc-Alkaline, and peraluminous magmas[J]. *Journal of Petrology*, 35(2): 525-541.
- Borodina N S, Fershtater, G B and Votyakov S L. 1999. The oxidation ratio of iron in coexisting biotite and hornblende from granitic and metamorphic rocks: The role of P, T and fO₂[J]. *The Canadian Mineralogist*, 37(6): 1423-1429.
- Chen B L, Dong F X, Li S B, Chen Z L and Han F B. 2018. A preliminary study on the ore-controlling structure in Tianyu nickel deposit, eastern Tianshan Mountains, NW China[J]. *Journal of Geomechanics*, 24(2): 177-187(in Chinese with English abstract).
- Chen W, Sun S, Zhang Y, Xiao W J, Wang Y T, Wang Q L, Jiang L F and Yang J T. 2005. ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology study of the Qiugemingtashi-Huangshan ductile shear zone in East Tianshan, Xinjiang, NW China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(6): 790-804(in Chinese with English abstract).
- Chen W, Zhang Y, Jin G S and Zhang Y Q. 2006. Late Cenozoic episodic uplifting in southeastern part of the Tibetan plateau—Evidence from Ar-Ar thermochronology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 867-872(in Chinese with English abstract).
- Chen Y C, Liu D Q, Tang Y L, Wang D H, Dong L H, Xu X and Wang X D. 2008. Mineral resources and metallogenic system in Tianshan, China (volume I)[M]. Beijing: Geological Publishing House. 243-287 (in Chinese).
- Cherniak D J and Watson E B. 2001. Pb diffusion in zircon—Science direct[J]. *Chemical Geology*, 172(1-2): 5-24.
- Deng G, Lu H F, Yang L Z, Jia J D and Ma J L. 2012. Metallogenic model and prospecting space of Tianyu copper nickel deposit in East Tianshan[J]. *Nonferrous Metals*, 27(3): 27-31 (in Chinese).
- Duan S G, Jiang Z S, Zhang Z H, Li F M and Ren Y Q. 2017. Re-Os isotopic analysis of pyrrhotite from Tianyu Cu-Ni sulfide deposit in eastern Tianshan Mountains, Xinjiang: Constraints on sources of ore-forming materials[J]. *Mineral Deposits*, 36(1): 25-37(in Chinese with English abstract).
- Duan S G, Zhang Z H, Wang D C, Jiang Z S, Luo W J and Li F M. 2018. Pyrite Re-Os and muscovite ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of the Beizhan iron deposit in the Chinese Tianshan Orogen and its geological significance[J]. *International Geology Review*, 60(1): 57-71.
- Fang L R, Tang D M, Qin K Z, Niu Y J, Mao Y J and Kang Z. 2019. The indicative significance of amphibole composition to magma-

- tic process of copper-nickel deposits in eastern Tianshan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(7): 2061-2085(in Chinese with English abstract).
- Foster M D. 1962. Interpretation of the composition of trioctahedral micas[J]. *US Geological Survey, Professional Paper*, 354(B): 11-49.
- Grove M and Harrison T M. 1996. ^{40}Ar (super*) diffusion in Fe-rich biotite[J]. *American Mineralogist*, 81(7-8): 940-951.
- Harrison T M, Duncan I and McDougall I. 1985. Diffusion of ^{40}Ar in biotite: Temperature, pressure and compositional effects[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49(11): 2461-2468.
- Henry D J, Guidotti C V and Thomsom J A. 2005. The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelitic biotites: Implications for geothermometry and Ti-substitution mechanisms[J]. *American Mineralogist*, 90(2-3): 316-328.
- Lee J K W, Williams I S and Ellis D J. 1997. Pb, U and Th diffusion in natural zircon[J]. *Nature*, 390: 159-162.
- Li J L, Chen Z L, Zhou T F, Han F B, Zhang W G, Huo H L, Liu B, Zhao T Y, Han Q, Li P, Zheng J X and Chen G M. 2021. Estimation of the extend of granitoid exhumation in the Weiya Tianhu area: Insight into ore prospecting in the Central Tianshan region, Xinjiang[J]. *Earth Science Frontiers*, 28(3): 355-378(in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. User's manual for Isoplot 3. 00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel[J]. *Berkeley Geochronology Center, Special Publication*, 4: 37-41.
- Ma C Q, Yang K G and Tang Z H. 1994. Magma-dynamics of granitoids-Theory, method and a case study of the eastern Hubei granitoids[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press. 210-212 (in Chinese).
- Mao J W, Franco P, Zhang Z H, Chai F M, Yang J M, Wu H, Chen S P, Cheng S L and Zhang C Q. 2006. Late Variscan post-collisional Cu-Ni sulfide deposits in East Tianshan and Altay in China: Principal characteristics and possible relationship with mantle plume [J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(7): 925-942(in Chinese with English abstract).
- McDougall I and Harrison T M. 1999. Geochronology and thermochronology by the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ method[M]. New York: Oxford University Press. 1-269.
- Nachit H, Ibhi A, Abia E H and Ohoud M B. 2005. Discrimination between primary magmatic biotites, reequilibrated biotites and neoformed biotites[J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 337(16): 1415-1420.
- Qin K Z, Tang D M, Su B X, Mao Y J, Xue S C, Tian Y, Sun H, San J Z, Xiao Q H and Deng G. 2012. The tectonic setting, style, basic feature, relative erosion degree, ore-bearing evaluation sign, potential analysis of mineralization of Cu-Ni bearing Permian mafic-ultramafic complexes, northern Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 45(4): 83-116(in Chinese with English abstract).
- Ridolfi F, Renzulli A and Puerini M. 2010. Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: An overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160(1): 45-66.
- Rieder M, Cavazzini G, D'Yakonov Y S, Frank-Kamenetskii V A, Gottardi G, Guggenheim S, Koval P W, Müller G, Neiva, A M R, Radoslovich E W, Robert J L, Sassi F P, Takeda H, Weiss Z and Wones D R. 1998. Nomenclature of the micas[J]. *Clays and Clay Minerals*, 46: 586-595.
- Shi Y, Wang Y W, Wang J B and Li D D. 2016. Mineralogical characteristics and petrogenetic significance of the amphibole in the Weiya V-Ti magnetite deposit in the eastern Tianshan[J]. *Mineral Exploration*, 7(1): 45-52(in Chinese with English abstract).
- Song L S, Zhao W T and Wang L J. 2014. Mineralogy characteristics of the main rock-forming minerals in the Tianyu Cu-Ni sulfide deposit, East Tianshan, Xinjiang[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 33(1): 108-115(in Chinese with English abstract).
- Sun J B, Sun T F, Chen W, Yu S, Yin J Y, Li C, Zhang Y and Liu X Y. 2015. Thermo-tectonic evolution history of Hongyuntan area, eastern Tianshan, Xinjiang: Constrained from Ar-Ar and (U-Th)/He dating[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(12): 3732-3742(in Chinese with English abstract).
- Tang D M, Qin K Z, Sun H, Su B X, Xiao Q H, Cheng S L and Li J. 2009a. Lithological, chronological and geochemical characteristics of Tianyu Cu-Ni deposit: Constraints on source and genesis of mafic-ultramafic intrusions in eastern Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(4): 817-831(in Chinese with English abstract).
- Tang D M, Qin K Z, Sun H, Qi L, Xiao Q H and Su B X. 2009b. PGE geochemical characteristics of Tianyu magmatic Cu-Ni deposit: Implications for magma evolution and sulfide segregation[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(5): 680-697(in Chinese with English abstract).
- Tang D M, Qin K Z, Li C S, Qi L, Su B X and Qu W J. 2011. Zircon dating, Hf-Sr-Nd-Os isotopes and PGE geochemistry of the Tianyu sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusion in the central Asian Orogenic Belt, NW China[J]. *Lithos*, 126(1-2): 84-98.
- Tang P, Tang J X, Zheng W B, Leng Q F and Lin B. 2017. Progress in study of mineral chemistry of magmatic and hydrothermal biotites[J]. *Mineral Deposits*, 36(4): 935-950(in Chinese with English abstract).
- Tian P F, Yuan W M and Yang X Y. 2020. The basics, essential concepts and geological applications of thermochronology[J]. *Geological Review*, 66(4): 975-1004(in Chinese with English abstract).
- Uchida E, Endo S and Makino M. 2007. Relationship between solidification depth of granitic rocks and formation of hydrothermal ore deposits[J]. *Resource Geology*, 57(1): 47-56.
- Wang J B, Wang Y W and He Z J. 2006. Ore deposits as a guide to the tectonic evolution in the East Tianshan Mountains, NW China[J]. *Geology in China*, 33(3): 461-469(in Chinese with English abstract).
- Wang Y C, Zhang H G, Xu J L and Yang C J. 2013. Re-Os isotopic

- analysis of the Tianyu Cu-Ni sulfide deposit of East Tianshan, Xinjiang[J]. *Jilin Geology*, 32(1): 51-58(in Chinese with English abstract).
- Wang Y, Li J Y and Sun G H. 2008. Post-collision eastward extrusion and tectonic exhumation along the eastern Tianshan orogen, central Asia: Constraints from dextral strike-slip motion and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological evidence[J]. *Journal of Geology*, 116: 599-618.
- Wang Y, Sun G H and Li J Y. 2010. U-Pb (SHRIMP) and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological constraints on the evolution of the Xingxingxia shear zone, NW China: A Triassic segment of the Altyn Tagh fault system[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 122(3/4): 487-505.
- Wang Y. 2014. The Al-in-hornblende barometry for calc-alkaline igneous rocks: Retrospect, evaluation and applications[J]. *Geological Review*, 60(4): 839-850(in Chinese with English abstract).
- Webster J D. 2004. The exsolution of magmatic hydrosaline chloride liquids[J]. *Chemical Geology*, 210: 33-48.
- Wones D R and Eugster H P. 1965. Stability of biotite: Experiment theory and application[J]. *American Mineralogist*, 59(9): 1228-1271.
- Yuan W M. 2016. Thermochronological method of revealing conservation and changes of mineral deposits[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(8): 2571-2578(in Chinese with English abstract).
- Zhang Y C, Chen S Y, Zhao J N, Zhao Y H and Li J. 2020. Compositional characteristics and petrogenetic and metallogenic significance of biotite in granite in Gejiu tin polymetallic ore concentration area, Yunnan Province[J]. *Mineralogy and Petrology*, 40(1): 76-88(in Chinese with English abstract).
- Zhang Y, Chen W, Chen K L and Liu X Y. 2006. Study on the Ar-Ar age spectrum of diagenetic I/S and the mechanism of ^{39}Ar recoil loss—Examples from the clay minerals of *P-T* boundary in Changxing, Zhejiang Province[J]. *Geological Review*, 52(4): 556-561(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z K, Chen G L, Yang Z K, Tang P, Gao F T, Jiao H J, Wang Z C, Qi J and Wu C N. 2020. Mineral chemistry of biotite and hornblende of ore-bearing porphyry from the Jiama porphyry copper-polymetallic deposit[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 39(6): 685-702(in Chinese with English abstract).
- Zheng Y, Zhang L and Guo Z L. 2013. Zircon LA-ICP-MS U-Pb and biotite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Tiemuert Pb-Zn-Cu deposit, Xinjiang: Implications for ore genesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(1): 191-204(in Chinese with English abstract).
- Zhong J, Fan H H, Chen J Y, Meng Y N, Zhao J Y, Shi C H and Wang S Y. 2020. Geochemistry characteristics and $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ age of biotite from the Saima Aegirine-nepheline syenite and its geological significance[J]. *Earth Science*, 45(1): 131-144(in Chinese with English abstract).
- Zhu W B, Zhang Z Y, Shu L S, Wan J L, Lu F H, Wang S L, Yang W and Su J B. 2007. Uplift and exhumation history of the Precambrian basement, northern Tarim: Evidence from apatite fission track data[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(7): 1671-1682(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈柏林, 董法先, 李松彬, 陈正乐, 韩凤彬. 2018. 东天山天宇镍矿床控矿构造初步研究[J]. *地质力学学报*, 24(2): 177-187.
- 陈文, 孙枢, 张彦, 肖文交, 王义天, 王清利, 姜立丰, 杨俊涛. 2005. 新疆东天山秋格明塔什—黄山韧性剪切带 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年代学研究[J]. *地质学报*, 79(6): 790-804.
- 陈文, 张彦, 金贵善, 张岳桥. 2006. 青藏高原东南缘晚新生代抬升作用的 Ar-Ar 热年代学证据[J]. *岩石学报*, 22(4): 867-872.
- 陈毓川, 刘德权, 唐延龄, 王登红, 董联慧, 徐新, 王晓地. 2008. 中国天山矿产及成矿体系(上册)[M]. 北京: 地质出版社. 243-287.
- 邓刚, 卢鸿飞, 杨良哲, 贾金典, 马金林. 2012. 东天山天宇铜镍矿成矿模式及找矿空间初探[J]. *新疆有色金属*, 27(3): 27-31.
- 段士刚, 蒋宗胜, 张作衡, 李凤鸣, 任雅琼. 2017. 东天山天宇铜镍硫化物矿床磁黄铁矿 Re-Os 同位素物质来源示踪[J]. *矿床地质*, 36(1): 25-37.
- 方林茹, 唐冬梅, 秦克章, 牛艳杰, 毛亚晶, 康珍. 2019. 角闪石成分对东天山铜镍矿床岩浆过程的指示意义[J]. *岩石学报*, 35(7): 2061-2085.
- 李季霖, 陈正乐, 周涛发, 韩凤彬, 张文高, 霍海龙, 刘博, 赵同阳, 韩琼, 李平, 郑加行, 陈贵民. 2021. 新疆尾亚—天湖地区花岗岩类剥蚀程度估算及对区域找矿的启示[J]. *地学前缘*, 28(3): 355-378.
- 马昌前, 杨坤光, 唐仲华. 1994. 花岗岩类与岩浆动力学-理论方法及鄂东花岗岩类例析[M]. 武汉: 中国地质大学出版社. 210-212.
- 毛景文, Franco P, 张作衡, 柴凤梅, 杨建民, 吴华, 陈世平, 程松林, 张长青. 2006. 天山-阿尔泰东部地区海西晚期后碰撞铜镍硫化物矿床: 主要特点及可能与地幔柱的关系[J]. *地质学报*, 80(7): 925-942.
- 秦克章, 唐冬梅, 苏本勋, 毛亚晶, 薛胜超, 田野, 孙赫, 三金柱, 肖庆华, 邓刚. 2012. 北疆二叠纪镁铁-超镁铁岩铜、镍矿床的构造背景、岩体类型、基本特征、相对剥蚀程度、含矿性评价标志及成矿潜力分析[J]. *西北地质*, 45(4): 83-116.
- 石煜, 王玉往, 王京彬, 李德东. 2016. 东天山尾亚钨钛磁铁矿矿床角闪石矿物学特征及成因意义[J]. *矿产勘查*, 7(1): 45-52.
- 宋林山, 赵文婷, 汪立今. 2014. 新疆东天山天宇铜镍硫化物矿床主要造岩矿物特征研究[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 33(1): 108-115.
- 孙敬博, 孙腾飞, 陈文, 喻顺, 尹继元, 李超, 张彦, 刘新宇. 2015. 新疆东天山红云滩地区构造-热演化探讨: 来自 Ar-Ar 和 (U-Th)/He 热年代学的约束[J]. *岩石学报*, 31(12): 3732-3742.
- 唐冬梅, 秦克章, 孙赫, 苏本勋, 肖庆华, 程松林, 李军. 2009a. 天宇铜镍矿床的岩相学、锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征: 对东疆镁铁-超镁铁质岩体源区和成因的制约[J]. *岩石学报*, 25(4): 817-831.
- 唐冬梅, 秦克章, 孙赫, 漆亮, 肖庆华, 苏本勋. 2009b. 东疆天宇岩浆 Cu-Ni 矿床的铂族元素地球化学特征及其对岩浆演化、硫化物熔离的指示[J]. *地质学报*, 83(5): 680-697.
- 唐攀, 唐菊兴, 郑文宝, 冷秋锋, 林彬. 2017. 岩浆黑云母和热液黑云

- 母矿物化学研究进展[J]. 矿床地质, 36(4): 935-950.
- 田朋飞, 袁万明, 杨晓勇. 2020. 热年代学基本原理、重要概念及地质应用[J]. 地质论评, 66(4): 975-1004.
- 王京彬, 王玉往, 何志军. 2006. 东天山大地构造演化的成矿示踪[J]. 中国地质, 33(3): 461-469.
- 王亚春, 张弘刚, 许家玲, 杨长江. 2013. 新疆东天山天字铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素物质来源示踪研究[J]. 吉林地质, 32(1): 51-58.
- 汪洋. 2014. 钙碱性火成岩的角闪石全铝压力计——回顾、评价和应用实例[J]. 地质论评, 60(4): 839-850.
- 袁万明. 2016. 矿床保存变化研究的热年代学技术方法[J]. 岩石学报, 32(8): 2571-578.
- 张毓策, 陈守余, 赵江南, 赵月华, 李姜. 2020. 云南个旧锡多金属矿集区花岗岩中黑云母的成分特征及成岩成矿意义[J]. 矿物岩石, 40(1): 76-88.
- 张彦, 陈文, 陈克龙, 刘新宇. 2006. 成岩混层(I/S)Ar-Ar 年龄谱型及 ^{39}Ar 核反冲丢失机理研究——以浙江长兴地区 P-T 界线粘土岩为例[J]. 地质论评, 52(4): 556-561.
- 张忠坤, 陈国良, 杨征坤, 唐攀, 高福太, 焦海军, 王志超, 祁婧, 吴纯能. 2020. 西藏甲玛铜多金属矿含矿斑岩黑云母和角闪石矿物化学特征[J]. 岩石矿物学杂志, 39(6): 685-702.
- 郑义, 张莉, 郭正林. 2013. 新疆铁木尔特铅锌铜矿床锆石 U-Pb 和黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学及其矿床成因意义[J]. 岩石学报, 29(1): 191-204.
- 钟军, 范洪海, 陈金勇, 孟艳宁, 赵敬洋, 史长昊, 王生云. 2020. 辽宁赛马霓霞正长岩黑云母地球化学特征、 $^{40}\text{Ar}\sim^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地质意义[J]. 地球科学, 45(1): 131-144.
- 朱文斌, 张志勇, 舒良树, 万景林, 卢华复, 王胜利, 杨伟, 苏金宝. 2007. 塔里木北缘前寒武基底隆升剥露史: 来自磷灰石裂变径迹的证据[J]. 岩石学报, 23(7): 1671-1682.