

文章编号: 0258-7106 (2020) 06-1141-16

Doi: 10.16111/j.0258-7106.2020.06.012

西藏新嘎果铅锌矿床矽卡岩矿物及金属矿物特征^{*}

吴纯能¹, 唐菊兴^{2**}, 唐攀³, 林彬², 杨阳¹, 张泽斌⁴, 孙渺⁴,
祁婧⁴, 李怡萱⁴

(1 成都理工大学, 四川成都 610059; 2 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; 3 西南交通大学, 四川成都 611756; 4 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要 新嘎果矿床是西藏冈底斯成矿带北缘矽卡岩多金属成矿带的一个典型矽卡岩型铅锌矿床。矽卡岩矿体主要呈层状、似层状产于下白垩统塔克那组地层中。电子探针测试结果表明, 矽卡岩矿物主要为钙铝榴石、钙铁辉石和绿帘石, 少量的硅灰石、密绿泥石等, 构成典型的钙质矽卡岩。金属矿物主要为闪锌矿、方铅矿、磁黄铁矿、黄铜矿、黄铁矿, 少量的白铁矿、毒砂、自然铋、斜方辉铅铋矿、辉砷镍矿等。该矿床中石榴子石成分特征指示成矿环境是变化的, 在早期进变质阶段由氧化环境向还原环境转变, 而晚期退变质阶段由氧化环境向还原环境转变。金属矿物中闪锌矿主要为铁闪锌矿, 表明其形成于中高温环境。而含铋的矿物主要为自然铋、斜方辉铅铋矿和方铅矿, 并且在这些矿物中 Ag 和 Bi 的含量呈正相关性, 指示铋对银的富集可能起着重要的作用; 此外, 铋也是新嘎果矿床重要的伴生有用元素, 具有较高的综合利用价值。

关键词 地质学; 锗矿物; 矿物学; 矽卡岩型铅锌矿床; 新嘎果; 冈底斯

中图分类号:P618.42; P618.43

文献标志码:A

Skarn mineral and metallic mineral characteristics of Xin'gaguo lead-zinc deposit, Tibet

WU ChunNeng¹, TANG JuXing², TANG Pan^{3*}, LIN Bin², YANG Yang¹, ZHANG ZeBin⁴, SUN Miao⁴,
QI Jing⁴ and LI YiXuan⁴

(1 Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2 MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 3 Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China; 4 School of Earth Science and Resource, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract

The Xin'gaguo deposit is a typical skarn-type lead-zinc deposit along the skarn polymetallic metallogenetic belt in the north of the Gangdise metallogenetic belt in Tibet. The skarn orebody has a bedded or bedded-like structure and was formed in the Takna Formation of Lower Cretaceous. The results of the electron microprobe analysis show that the skarn is a typical calcareous skarn mainly consisting of grossularite, hedenbergite and epidote as well as a small amount of wollastonite and pycnochlorite. The metal minerals mainly consist of sphalerite, galena, pyrrhotite, chalcopyrite and pyrite as well as a small amount of marcasite, arsenopyrite, native bismuth, cosalite, and gersdorffite. The metallogenetic environment changed according to the composition characteristics of the garnet in this deposit, with an early prograde metamorphic stage characterized by transforming from oxidation envi-

* 本文得到国家重点研发计划-深地专项(编号:2018YFC0604101)、中国地质科学院基本科研业务费专项经费项目(编号:SYSCR2019-02)、西藏自治区科技计划项目(编号:XZ201901-GB-24)和国家自然科学基金项目(编号:41902097)联合资助

第一作者简介 吴纯能,男,1994年生,硕士研究生,矿物学、岩石学、矿床学专业。Email:1033283751@qq.com

** 通讯作者 唐菊兴,男,1964年生,研究员,主要从事矿床学和固体矿产勘查与评价研究工作。Email:tangjuxing@126.com

收稿日期 2020-05-25; 改回日期 2020-11-01。秦思婷编辑。

ronment to reducing environment and a later retrograde metamorphic stage characterized by transforming from oxidation environment to reducing environment. The sphalerite in the metal minerals mainly consists of chrysotile, which indicates that it was formed in the environment with medium and high temperature. However, the bismuth-bearing minerals mainly consist of native bismuth, bjelkite and galena, and the values of Ag and Bi contained in these minerals are positively correlated, indicating that bismuth may have played an important role in the enrichment of silver; in addition, bismuth has a high comprehensive utilization value and is also an important associated useful element.

Key words: geology, bismuth mineral, mineralogy, skarn lead zinc deposit, Xin'gaguo, Gangdise

矽卡岩型矿床是世界上 Cu、Fe、Pb、Zn、W、Ag、Au 等金属矿产以及硼、金云母、透辉石、硅灰石、透闪石等非金属矿产最重要的来源之一, 是国内外学者关注的焦点 (Zhao et al., 2003; Meinert et al., 2005; Kamvong et al., 2009; Zhang et al., 2013; Zhang et al., 2017)。矽卡岩矿物研究是矽卡岩矿床定义和分类的基础, 其矿物组成与侵入岩成分、围岩组分、深度、氧逸度、温度和压力密切相关 (Titley, 1973; Burton et al., 1982; Meinert, 1997; Calagari et al., 2006), 在矽卡岩矿床研究中占有重要地位 (Einaudi, 1981)。通过对矽卡岩矿床主要矽卡岩矿物成分、共生组合等方面的研究, 可以反演矿床成岩成矿过程中物理化学环境的变化 (Meinert et al., 2005; 赵苗等, 2015)。

西藏冈底斯成矿带是位于雅鲁藏布江缝合带与班公湖-怒江缝合带之间的世界级的斑岩-矽卡岩-浅成低温热液型铜多金属成矿带 (Hou et al., 2009; Lin et al., 2017a; 2017b)。近年来, 冈底斯成矿带在国家基础地质调查工作和企业勘查的推动下, 取得了找矿重大突破, 已发现并评价了多个规模巨大的矿集区。该带南部主要为一系列中型-大型的斑岩型铜多金属矿床, 包括驱龙铜(钼)矿床、甲玛铜多金属矿床、厅宫-冲江铜矿床, 拉抗俄铜钼矿床、邦铺钼铜矿床等, 已成为中国重要的斑岩铜多金属成矿带 (唐菊兴等, 2012; Tang et al., 2019a; 林彬等, 2019)。该带北缘主要为以铅锌银矿化为主的矿床, 如蒙亚啊、亚贵拉、勒青拉、轮郎、列廷冈、龙玛拉等, 它们构成了一条与南缘的斑岩铜矿带平行分布的矽卡岩型铅锌银多金属成矿带, 目前对这类矿床的研究较薄弱 (Tang et al., 2019b; Wang et al., 2015; 2018)。

新嘎果矽卡岩型铅锌矿床是该带的重要代表, 前人对其矿床地质特征 (冷秋锋等, 2014; Tang et al., 2019b)、典中组火山岩 (唐攀等, 2018)、S-Pb 同位素 (程文斌等, 2010; Wang et al., 2016; Tang et al.,

2019b)、岩浆岩 (Wang et al., 2016; Tang et al., 2019b) 等进行了较为深入的研究, 但对于矽卡岩矿物及金属矿物方面的研究较薄弱。本文试图通过对新嘎果矿床主要矽卡岩矿物及金属矿物的矿物化学进行系统研究, 为该矿床成矿模式的建立奠定基础。

1 矿床地质特征

新嘎果矿区大地构造位置处于西藏南冈底斯中段北部, 洛巴堆-米拉山断裂南侧。矿区出露地层主要为下白垩统塔克那组、上白垩统设兴组 (图 1a、b)。下白垩统塔克那组主要分布于矿区南侧和北东侧, 出露面积约占矿区 1/4 以上。矿区南侧地层呈东西向展布, 发育东西向的褶皱构造, 矿区北东侧地层由于受构造影响而表现为杂乱无序的混杂特征。塔克拉组岩性组合特征: 下部为一套灰色长石岩屑砂岩, 局部夹石英砂岩和灰岩透镜体; 中-上部为石英砂岩、粉砂岩、生物碎屑灰岩、细晶灰岩等, 总体显示了一套浅海相沉积组合。受构造、岩浆作用影响, 地层中-上部灰岩发育硅化、矽卡岩化、碳酸盐化等。上白垩统设兴组分布于矿区南侧和北侧, 为一套潮汐砂泥岩相-红层砂泥岩相沉积组合, 岩性主要为紫红色、灰绿色泥岩、粉砂质泥岩、紫红色粉砂岩、黄灰色细砂岩等, 整合于塔克拉组之上。

矿区位于南冈底斯中段北部, 受冈底斯古近纪碰撞造山作用以及中新世东西向伸展作用的影响, 区内断层和褶皱构造强烈发育。断层主要有北西西向逆冲断层、北东东向逆冲断层和近南北向张扭性断层; 褶皱主要为北西西向向斜、北东东向背斜和北东东向向斜。矿区岩浆活动非常强烈, 侵入岩、喷出岩均有出露。侵入岩类型主要为闪长岩、黑云母花岗岩、花岗质岩脉和二长岩; 喷出岩主要为矿区北侧的林子宗火山岩。

新嘎果矿床主要为矽卡岩型铅锌矿化, 伴生银

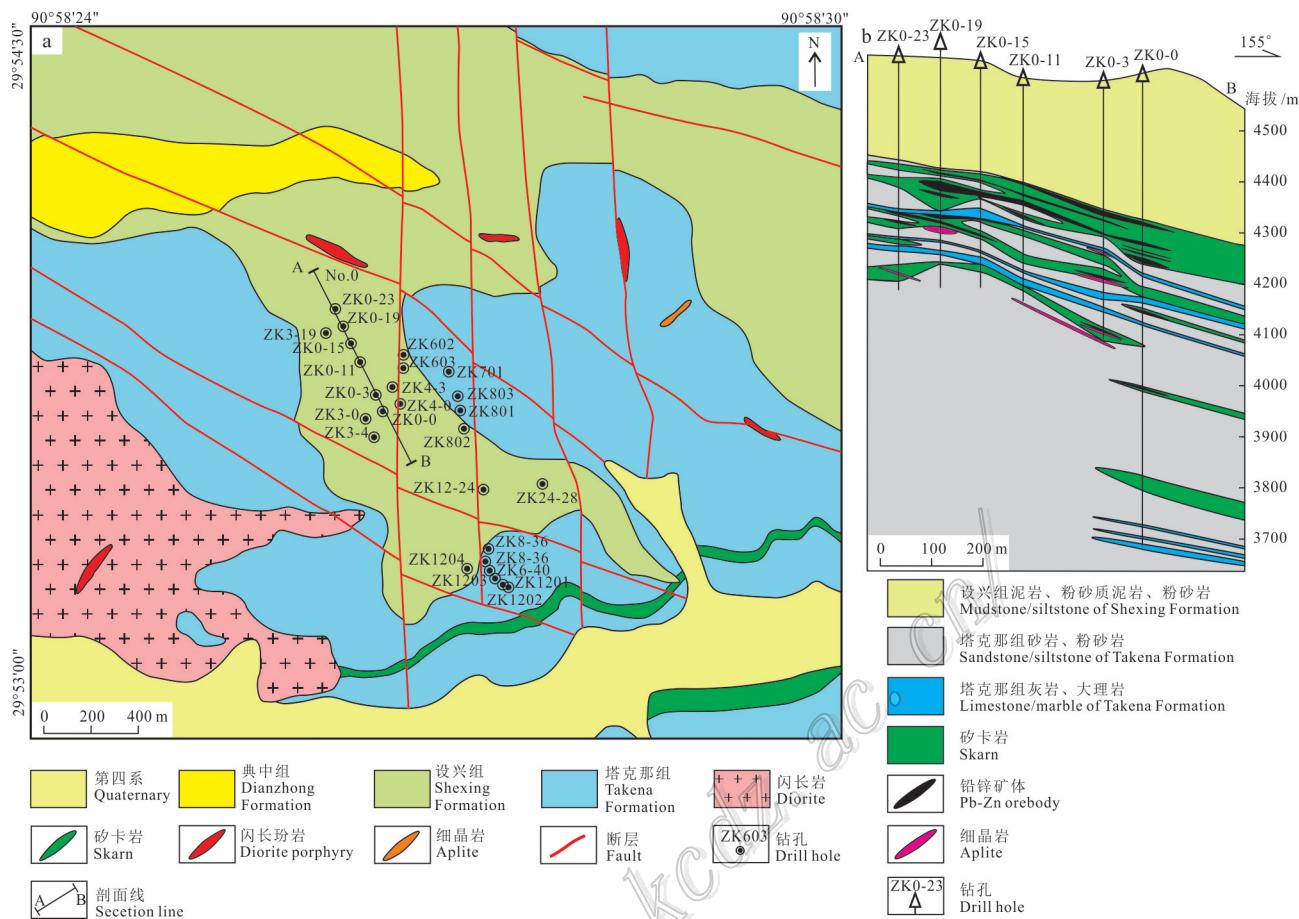


图1 新嘎果矿区地质图(a)和0号勘探线剖面图(b)(据Tang et al., 2019b)

Fig. 1 Geological map of the Xin'gaguo deposit, Tibet (a) and cross section along No. 0 exploration line of the Xin'gaguo Pb-Zn deposit (b) (after Tang et al., 2019b)

矿化。铅锌矿体主要赋存于塔克拉组中,局部产于断层破碎带中,呈层状、似层状或透镜体产出(图1a、b),金属矿物主要为闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、磁铁矿、磁黄铁矿、黄铁矿,少量的毒砂、白铁矿、自然铋、斜方辉铅铋矿、辉砷镍矿等(图2a-i),矿石构造主要为浸染状、条带状、脉状,少量的块状及致密浸染状构造。此外,在矿区的东南部和西侧产出规模较小的铁矿体,呈层状、囊状产于塔克那组中,金属矿物主要为磁铁矿,少量赤铁矿和黄铜矿,矿石构造主要为块状、致密浸染状及条带状构造。

矿区围岩蚀变主要为矽卡岩化、硅化和大理岩化等。矽卡岩化主要形成于塔克那组和设兴组接触带及塔克那组大理岩和砂岩接触带及砂岩中。矽卡岩矿物主要为石榴子石、辉石、绿帘石、石英、方解石,少量的硅灰石、绿泥石、阳起石等(图3)。

根据蚀变特征、矿物组合及交代关系,新嘎果矿

床成矿过程可分为进化蚀变矽卡岩阶段、退化蚀变矽卡岩阶段和硫化物阶段3个阶段。进化蚀变矽卡岩阶段主要形成石榴子石、辉石,少量的硅灰石。退化蚀变矽卡岩阶段以绿帘石和绿泥石为主。硫化物阶段主要为方解石、石英,以及大量产出闪锌矿、方铅矿、磁黄铁矿等硫化物(图4)。

2 样品及测试分析

矽卡岩样品采自不同深度的钻孔岩芯。矽卡岩矿物成分电子探针分析在天津地质调查中心实验室完成,仪器为日本岛津公司生产的EPMA-1600型电子探针。测试时工作条件为:加速电压15 kV,电流20 nA,束斑直径10 μm。F、S、Cl、Fe元素分析背景信号时间为40 s,Na、Mg、Al、Si、P、K、Mn、Ca、Ti、V元素背景时间为20 s。主量元素的允许相对误差小于

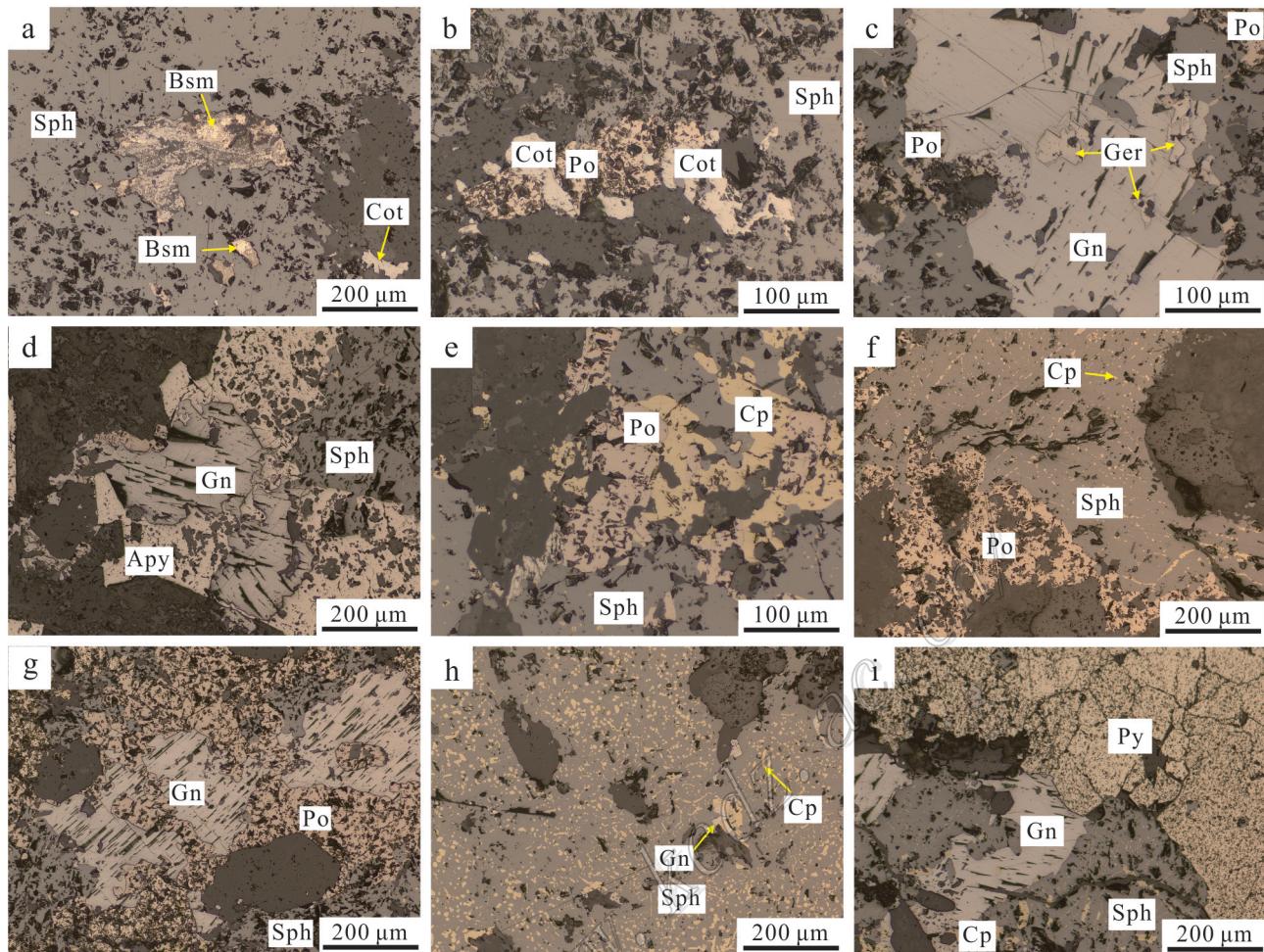


图2 新嘎果铅锌多金属矿床金属矿物镜下照片

a. 闪锌矿与自然铋共生; b. 斜方辉铅铋矿交代磁黄铁矿; c. 方铅矿与辉砷镍矿共生; d. 毒砂被方铅矿和闪锌矿交代; e. 磁黄铁矿交代黄铜矿; f. 闪锌矿与黄铜矿的固溶体分离结构; g. 磁黄铁矿交代方铅矿; h. 闪锌矿与黄铜矿的固溶体分离结构; i. 黄铁矿交代方铅矿和闪锌矿
Sph—闪锌矿; Gn—方铅矿; Po—磁黄铁矿; Cp—黄铜矿; Py—黄铁矿; Apy—毒砂; Bsm—自然铋; Cot—斜方辉铅铋矿; Ger—辉砷镍矿

Fig. 2 Photomicrographs showing ore minerals of the Xin'gagou Pb-Zn deposit

a. Native bismuth with sphalerite; b. Pyrrhotite metasomatized by cosalite; c. Gersdorffite with galena; d. Arsenopyrite metasomatized by galena and sphalerite; e. Chalcopyrite metasomatized by pyrrhotite; f. Exsolution textures of sphalerite-chalcopyrite; g. Galena metasomatized by pyrrhotite; h. Exsolution textures of sphalerite-chalcopyrite; i. Galena and sphalerite metasomatized by pyrite.

Sph—Sphalerite; Gn—Galena; Po—Pyrrhotite; Cp—Chalcopyrite; Py—Pyrite; Apy—Arsenopyrite; Bsm—Native bismuth;

Cot—Cosalite; Ger—Gersdorffite

2%。以下天然矿物作为标定矿物: 钠长石(Si, Al, K)、橄榄石(Mg)、透长石(K)、方解石(Ca)、蔷薇辉石(Mn)、铁铝榴石(Fe)、金红石(Ti)和铬铁矿(Cr)。

3 矽卡岩矿物及金属矿物特征

3.1 石榴子石

石榴子石在新嘎果矿床矽卡岩中广泛发育(图3c,d), 野外手标本中主要为棕色、黄棕色, 其次为浅

黄色、浅翠绿色等。镜下主要呈自形晶, 粒状结构, 粒径0.2~2.0 cm不等, 单偏光下颜色为浅褐色, 正极高突起, 在正交偏光下呈一级灰干涉色。

电子探针分析结果显示(表1), 石榴子石中 $w(\text{SiO}_2)=33.63\%\sim39.45\%$, 平均36.51%; $w(\text{CaO})=33.00\%\sim40.79\%$, 平均36.53%; $w(\text{TFeO})=2.90\%\sim27.54\%$, 平均9.68%; $w(\text{Al}_2\text{O}_3)=0.02\%\sim18.91\%$, 平均13.33%; MnO 、 MgO 、 TiO_2 、 Cr_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 含量均较低。根据电子探针数据可得到新嘎果矿床矽卡岩

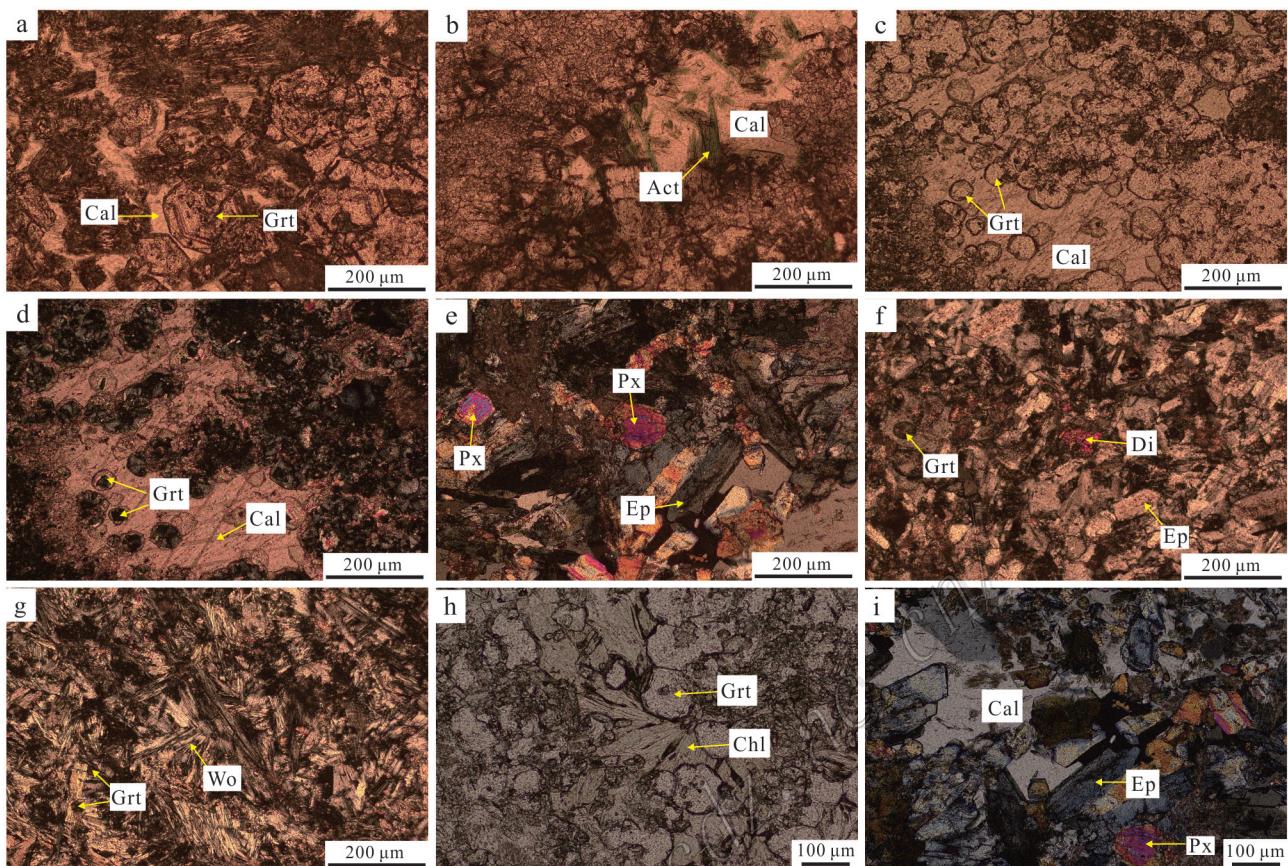


图3 新嘎果铅锌矿床矿物显微照片

a. 具有环带结构的石榴子石(单偏光);b. 阳起石与方解石共生(单偏光);c. 自形粒状石榴子石颗粒(单偏光);d. 自形粒状石榴子石颗粒(正交偏光);e. 绿帘石与辉石共生正交偏光;f. 干涉色为橙红色的透辉石颗粒(正交偏光);g. 放射状硅灰石集合体(正交偏光);h. 淡绿色绿泥石集合体(单偏光);i. 干涉色为灰蓝色的绿帘石集合体(正交偏光)

Gn—方铅矿; Sph—闪锌矿; Act—阳起石; Grt—石榴子石; Px—辉石; Di—透辉石; Wo—硅灰石; Chl—绿泥石; Ep—绿帘石; Cal—方解石

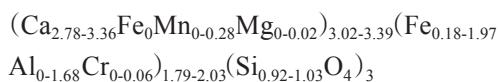
Fig. 3 Photographs showing minerals of the Xin'gaguo Pb-Zn deposit

a. Zoning structure of garnet (plainlight); b. Actinolite with calcite (plainlight); c. Euhedral garnet (plainlight); d. Euhedral garnet (crossed nicols); e. Epidote with pyroxene (crossed nicols); f. Diopside with orange red interference color (crossed nicols); g. Radial wollastonite assemblages (crossed nicols); h. Greenish chlorite assemblage (plainlight); i. Epidote assemblage with dusty blue interference color (crossed nicols)

Gn—Galena; Sph—Sphalerite; Act—Actinolite; Grt—Garnet; Px—Pyroxene; Di—Diopside; Wo—Wollastonite;

Chl—Chlorite; Ep—Epidote; Cal—Calcite

中石榴子石化学分子式为:



石榴子石 Al_2O_3 与 FeO 含量呈明显的线性负相关性(图 5a), SiO_2 与 CaO 含量呈微弱的正相关性(图 5b)。新嘎果矿床石榴子石主要为钙铝榴石, 次为少量钙铁榴石, 属于钙铁榴石-钙铝榴石类质同像系列(图 6b), 并且钙铁榴石与钙铝榴石含量呈明显的线性负相关关系(图 6a)。

3.2 辉石与硅灰石

辉石是新嘎果矿床矽卡岩中常见组成矿物之

一, 常与石榴子石、硅灰石等矽卡岩矿物共生, 其含量分布不均匀, 多以短柱状、粒状集合体发育, 具半自形-他形晶结构, 单偏光下呈无色, 高正突起, 正交偏光下干涉色可达一级橙黄色-二级红蓝色(图 3e)。电子探针分析结果显示(表 2), 新嘎果辉石属于钙铁辉石-透辉石系列(图 7a), $w(\text{SiO}_2)=49.23\% \sim 50.00\%$, 平均 49.61% ; $w(\text{CaO})=23.27\% \sim 23.60\%$, 平均 23.43% ; $w(\text{TFeO})=15.75\% \sim 20.38\%$, 平均 18.06% ; $w(\text{MgO})=5.62\% \sim 7.79\%$, 平均 6.70% ; $w(\text{MnO})=0.42\% \sim 0.65\%$, 平均 0.53% ; Na_2O 、 K_2O 、 TiO_2 、 Al_2O_3 和 Cr_2O_3 的含量较小。根据电子探针数

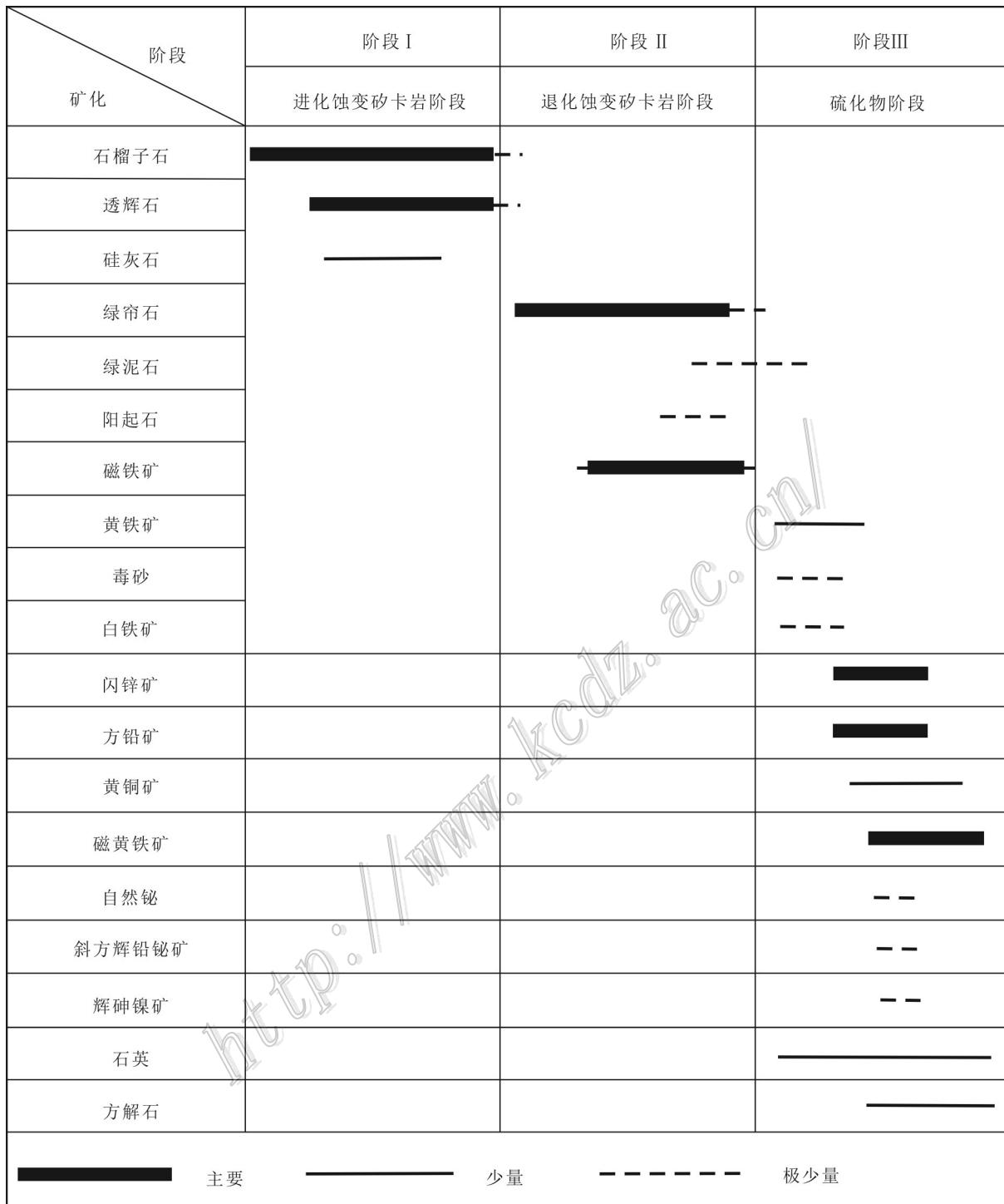


图4 新嘎果矿床矿物共生序列图(据 Tang et al., 2019b)

Fig. 4 Sequence of mineral paragenesis of the Xin'gaguo Pb-Zn deposit (after Tang et al., 2019b)

据可得到新嘎果矿床矽卡岩中辉石化学分子式为：



硅灰石是新嘎果矿床矽卡岩中重要的组成矿物，在手标本中呈乳白色、灰白色，多为放射状结合体，粒

径为0.1~0.3 mm, 单偏光下, 硅灰石具正中突起, 无色透明, 消光角较小(图3h)。正交偏光下具一级灰白、黄白干涉色(图3g)。硅灰石电子探针分析结果见表3, 端员组成图解见图7b, $w(\text{SiO}_2)=51.66\% \sim$

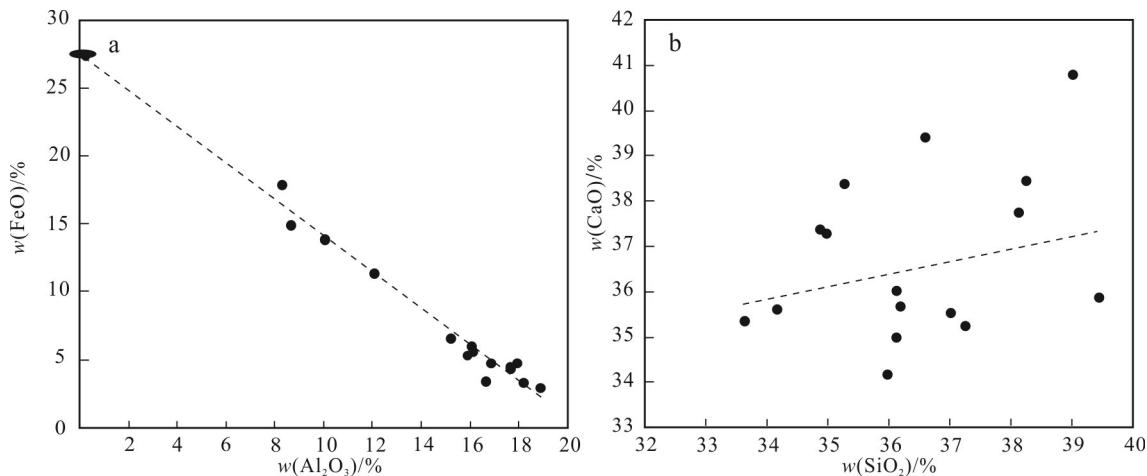
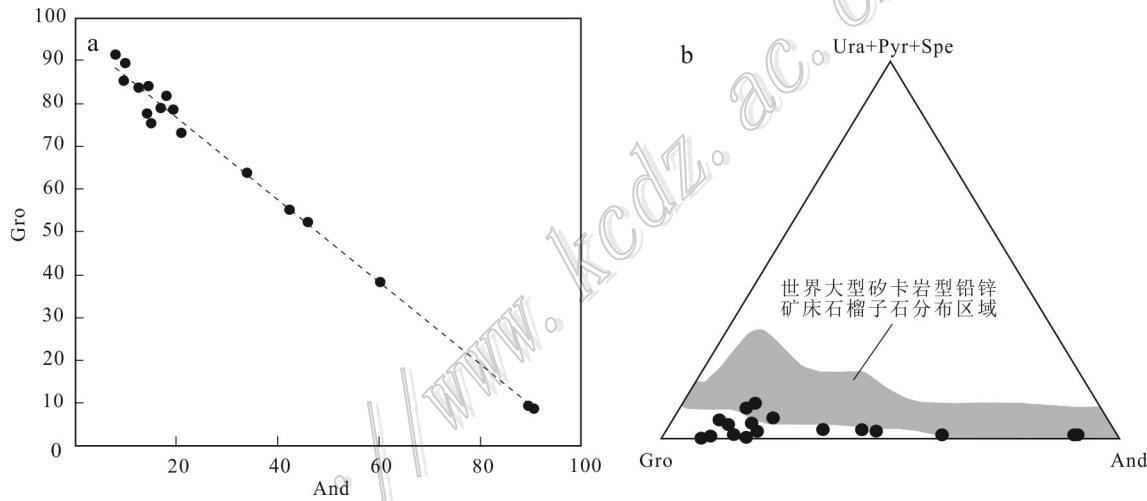
图5 新嘎果矿床石榴子石 FeO-Al₂O₃(a)和 CaO-SiO₂(b)相关性图解Fig. 5 FeO-Al₂O₃ (a) and CaO-SiO₂ (b) correlation diagrams of garnets from the Xin'gaguo deposit

图6 新嘎果矿床石榴子石 Gro-And 相关性图解(a)及端员组分图解(b) (底图据 Meinert et al., 2005)

And—钙铁榴石; Gro—钙铝榴石; Ura—钙铬榴石; Pyr—镁铝榴石; Spe—锰铝榴石

Fig. 6 The And-Gro correlation diagram (a) and end member diagram (b) of garnets from the Xin'gaguo deposit

(base map after Meinert et al., 2005)

And—Andradite; Gro—Grossularite; Ura—Uvarovite; Pyr—Pyrope; Spe—Spessartite

52.60%，平均 51.99%； $w(\text{CaO})=47.45\% \sim 52.81\%$ ，平均 50.55%；另含极少量的 MgO、MnO、FeO 等。根据电子探针数据得到新嘎果矿床矽卡岩中硅灰石化学分子式为： $\text{Ca}_{1.97-2.11}\text{Si}_{1.93-2}\text{O}_3$ 。

3.3 绿泥石和绿帘石

作为退化蚀变矽卡岩阶段的主要含水矽卡岩矿物，绿泥石和绿帘石较发育。绿泥石手标本中颜色为浅绿色，呈鳞片状集合体发育，与石榴子石、绿帘石、石英等矿物共生（图 3h）。单偏光下，绿泥石颜色

为淡绿色，呈鳞片状集合体，分布于石榴子石、绿帘石及金属矿物粒间（图 3h）。电子探针分析结果（表 4）表明，绿泥石属于密绿泥石类（图 8）， $w(\text{SiO}_2)=25.41\% \sim 27.31\%$ ，平均 26.36%； $w(\text{Al}_2\text{O}_3)=16.14\% \sim 17.55\%$ ，平均 16.84%； $w(\text{TiFeO})=20.40\% \sim 23.93\%$ ，平均 22.17%； $w(\text{MgO})=14.33\% \sim 15.69\%$ ，平均 15.01%； $w(\text{MnO})=3.19\% \sim 4.48\%$ ，平均 3.84%；此外，含极少量的 TiO₂、CaO、K₂O、Cr₂O₃。根据电子探针数据得到新嘎果矿床矽卡岩中绿泥石化学分子式为：

表1 新嘎果铅锌多金属矿床代表性石榴子石电子探针分析结果和端员组分(据Tang et al., 2019b)

Table 1 Electron microprobe analyses, ion proportions and end members of representative garnet from the Xin'gago Pb-Zn polymetallic deposit (after Tang et al., 2019b)

组分	ZK019-423-1-1	ZK019-423-1-2	ZK836-223-1-1	ZK836-223-1-2	ZK836-37-2-1	ZK836-37-2-2	ZK836-37-2-3	ZK836-37-2-4	ZK836-37-3	ZK836-386-1-1	ZK019-39.0	ZK003-425-3-1	ZK003-425-3-2	ZK003-342-1-1	ZK836-508-1	ZK019-408-1	
	<i>w(B)%</i>																
SiO ₂	36.13	37.61	37.01	35.97	33.63	34.97	34.17	34.87	35.27	39.01	38.13	38.25	36.18	36.12	39.45	37.25	36.59
TiO ₂	0.78	0.54	0.82	0.04	-	4.52	0.06	4.05	0.23	0.03	0.12	0.07	0.41	1.64	-	0.09	0.90
Al ₂ O ₃	15.23	17.96	16.09	8.27	0.02	8.65	0.18	10.07	12.08	18.91	18.22	17.68	16.86	16.12	15.91	17.70	16.65
Cr ₂ O ₃	0.67	0.08	0.02	0.02	0.01	-	-	0.01	0.03	-	0.01	0.00	-	1.03	-	0.04	
FeO	6.58	4.74	6.03	17.88	27.54	14.9	27.47	13.89	11.39	2.90	3.35	4.32	4.74	5.57	5.30	4.49	3.39
MnO	1.62	4.14	0.73	0.40	0.33	0.51	0.31	0.73	0.76	0.12	2.42	1.71	3.94	0.07	0.31	0.43	0.12
MgO	-	0.02	0.07	0.02	-	0.20	0.08	0.16	0.16	-	0.01	0.01	-	0.03	0.04	0.04	0.03
CaO	34.99	33.00	35.54	34.18	35.35	37.30	35.62	37.39	38.37	40.79	37.74	38.46	35.68	36.03	35.87	35.25	39.41
总和	96.00	98.09	96.31	96.78	96.88	101.06	97.89	101.16	98.27	101.79	99.99	100.51	97.81	95.58	97.91	95.25	97.13
以24个氧原子数为基础计算的阳离子数																	
Si	2.92	2.96	2.96	2.88	2.77	2.89	2.75	2.85	2.94	2.95	2.94	2.89	2.91	3.08	2.98	2.91	
Ti	0.05	0.03	0.05	-	-	0.27	-	0.24	0.01	-	0.01	-	0.02	0.10	-	0.01	0.05
Al	1.45	1.66	1.52	0.80	-	0.81	0.02	0.94	1.15	1.68	1.66	1.60	1.59	1.53	1.46	1.67	1.56
Cr	0.04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.06	-	-
Fe ³⁺	0.45	0.31	0.40	1.23	1.97	0.99	1.94	0.92	0.77	0.18	0.22	0.28	0.32	0.38	0.35	0.30	0.23
Fe ²⁺	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mn	0.11	0.28	0.05	0.03	0.02	0.03	0.02	0.01	0.05	0.05	0.01	0.16	0.11	0.27	-	0.02	0.03
Mg	-	-	0.01	-	-	0.02	0.01	0.02	0.02	-	-	-	-	-	-	0.01	-
Ca	3.03	2.78	3.05	3.01	3.25	3.17	3.23	3.16	3.32	3.30	3.12	3.17	3.05	3.11	3.00	3.03	3.36
Ura	2.05	0.23	0.06	0.07	0.04	-	-	0.02	0.08	-	0.03	-	-	-	3.14	0.01	0.10
And	21.24	15.28	19.49	60.44	90.51	45.96	89.41	42.59	34.03	8.29	9.88	12.70	14.29	18.06	17.16	14.75	10.05
Pyr	-	0.07	0.27	0.10	0.01	0.74	0.30	0.57	0.58	-	0.05	0.02	-	0.13	0.15	0.17	0.09
Spe	3.52	9.02	1.59	0.92	0.74	1.06	0.68	1.51	1.54	0.23	4.82	3.40	8.03	0.16	0.67	0.96	0.24
Gro	73.19	75.41	78.59	38.38	8.70	52.25	9.61	55.32	63.84	91.40	85.25	83.84	77.68	81.66	78.89	84.11	89.51

注:And—钙铁榴石;Gro—钙铝榴石;Ura—钙铅榴石;Pyr—镁铝榴石;Spe—锰铅榴石;“-”表示低于检测限;FeO为全铁含量。

表2 新嘎果铅锌多金属矿床辉石电子探针分析结果和端员组分(据Tang et al., 2019b)

Table 2 Electron microprobe analyses, ion proportions and end members of representative pyroxene from the Xin'gaguo Pb-Zn polymetallic deposit (after Tang et al., 2019b)

组分	ZK003-370-1	ZK003-370-2
<i>w</i> (B)/%		
SiO ₂	50	49.23
TiO ₂	-	0.02
Al ₂ O ₃	0.1	0.14
Cr ₂ O ₃	-	0.03
FeO	15.75	20.38
MnO	0.65	0.42
MgO	7.79	5.62
CaO	23.6	23.27
Na ₂ O	0.04	0.04
K ₂ O	-	-
总和	97.93	99.15
以6个氧原子和4个阳离子为基准计算		
Si	1.99	1.98
Al(IV)	-	-
Al(VI)	-	-
Ti	-	-
Cr	-	-
Fe ³⁺	0.03	0.06
Fe ²⁺	0.49	0.62
Mn	0.02	0.01
Mg	0.46	0.34
Ca	1.01	1
Na	-	-
K	-	-
Jo	2.17	1.39
Di	45.88	32.61
Hd	51.94	66

注:Di—透辉石;Hd—钙铁辉石;Jo—锰钙辉石;“-”表示低于检测限;
FeO为全铁含量。



绿帘石手标本颜色呈黄绿色-深绿色,主要呈他形晶粒状结构,常与绿泥石、石榴子石等矽卡岩矿物共生(图3i)。单偏光下,绿帘石主要为灰色-灰白色,呈柱状结构,正交偏光下,呈一级灰蓝色-二级橙黄干涉色,具有高突起(图3i)。电子探针数据分析结果(表5)显示,*w*(SiO₂)=36.64%~39.70%,平均37.87%;*w*(Al₂O₃)=22.23%~25.82%,平均24.34%;*w*(CaO)=22.63%~25.92%,平均24.03%;*w*(TFeO)=5.86%~11.86%,平均8.58%;

表3 新嘎果铅锌多金属矿床硅灰石电子探针分析结果和端员组分

Table 3 Electron microprobe analyses, ion proportions and end members of representative wollastonite from the Xin'gaguo Pb-Zn polymetallic deposit

组分	ZK003-475-1-1	ZK003-475-1-11	ZK003-475-2-1	ZK003-475-2-2	ZK003-475-2-1
<i>w</i> (B)/%					
SiO ₂	51.94	52.03	51.66	52.6	51.75
TiO ₂	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01
Al ₂ O ₃	-	-	-	0.03	-
Cr ₂ O ₃	-	-	0.01	-	0.01
FeO	0.44	0.44	0.49	0.45	0.49
MnO	0.2	0.2	0.22	0.26	0.22
MgO	0.01	0.01	0.04	0.06	0.04
CaO	52.81	48.04	52.16	52.28	47.45
Na ₂ O	0.03	0.03	0.01	0.02	0.01
K ₂ O	-	-	-	-	-
总和	105.45	100.77	104.60	105.72	99.98
以6个氧原子和4个阳离子为基准计算					
Si	1.93	2	1.94	1.95	2
Al(IV)	-	-	-	-	-
Al(VI)	-	-	-	-	-
Ti	-	-	-	-	-
Cr	-	-	-	-	-
Fe ³⁺	0.19	-	0.18	0.15	-
Fe ²⁺	-	0.01	-	-	0.02
Mn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	-	-	-	-	-
Ca	2.11	1.98	2.1	2.07	1.97
Na	-	-	-	-	-
K	-	-	-	-	-
Wo	98.95	98.84	98.83	98.75	98.7
En	0.04	0.04	0.1	0.16	0.11
Fs	0.93	1.03	1.04	1.04	1.15
Ac	0.08	0.09	0.03	0.05	0.04

注:Wo—硅灰石;En—顽火辉石;Fs—斜方铁辉石;“-”表示低于检测限;FeO为全铁含量。

w(MnO)=0.02%~0.73%,平均0.18%;此外,含有极少量的MgO、TiO₂、K₂O等。根据电子探针数据可得到新嘎果矽卡岩中绿帘石化学分子式为:
 $Ca_{1.97-2.25}Fe_0(Al_{2.09-2.47}Fe_{0.39-0.79})_{2.8-2.98}(Si_{1.98-2.1}O_7)(Si_{0.99-1.05}O_4)O(OH)$ 。

3.4 金属矿物

本次共选取新嘎果金属矿物样品20件,进行磨片和电子探针分析测试,测试结果详见表6。

闪锌矿*w*(Zn)=53.26%~56.88%(平均55.48%),

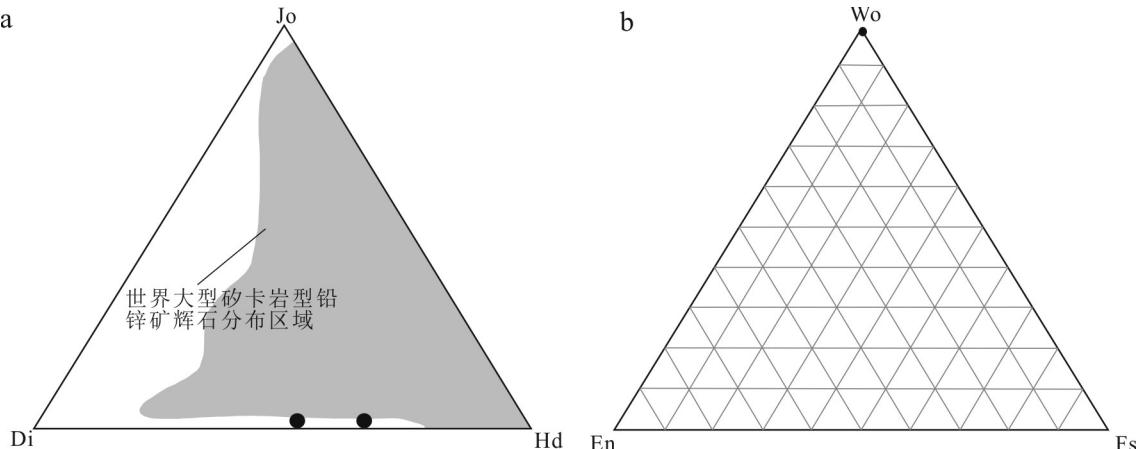


图7 新嘎果矿床辉石(a)和硅灰石(b)端员组分图解(底图据Meinert et al., 2005)

Di—透辉石; Hd—钙铁辉石; Jo—锰钙辉石; Wo—硅灰石; En—顽火辉石; Fs—斜方铁辉石

Fig. 7 The endmember diagrams of pyroxene and wollastonite from the Pusangguo deposit (base map modified after Meinert et al., 2005)

Di—Diopside; Hd—Hedenbergite; Jo—Johannsenite; Wo—Wollastonite; En—Enstatite; Fs—Ferrosilite

表4 新嘎果铅锌多金属矿床绿泥石电子探针分析结果和端员组分

Table 4 Electron microprobe analyses, ion proportions and end members of representative chlorite from the Xin'gaguo Pb-Zn polymetallic deposit

组分	ZK019-386-2-1		ZK003-425-4		组分	ZK019-386-2-1		ZK003-425-4	
	<i>w</i> (B)/%					以14个O原子为基准计算阳离子数			
SiO ₂	27.31		25.41		Si	5.98		5.62	
TiO ₂	0.01		0.02		Al(IV)	2.02		2.38	
Al ₂ O ₃	16.14		17.55		Al(VI)	2.15		2.21	
Cr ₂ O ₃	0.11		0.05		Ti	-		-	
FeO	23.93		20.4		Cr	0.02		0.01	
MnO	3.19		4.48		Fe ³⁺	0.08		-	
MgO	14.33		15.69		Fe ²⁺	4.3		3.84	
CaO	0.22		0.08		Mn	0.59		0.84	
Na ₂ O	0.01		-		Mg	4.68		5.17	
K ₂ O	0.02		0.01		Ni	-		-	
总和	85.27		83.69		Zn	-		-	
					Ca	0.05		0.02	
					Na	0.01		-	
					K	0.01		0.01	

注:“-”表示低于检测限; FeO为全铁含量。

w(S)=32.81%~33.36%(平均33.10%), *w*(Fe)=9.10%~12.06%(平均10.55%), 分子式为 Zn_{1.57-1.7}Fe_{0.32-0.42}S₂。

方铅矿 *w*(Pb)=83.08%~89.13%(平均86.12%), *w*(S)=12.71%~14.23%(平均13.62%), *w*(Bi)<0.01(小于检测限度)~3.51%(平均1.51%), *w*(Ag)=0~1.62%(平均0.66%), 分子式为 Pb_{0.9-1.05}S。

自然铋 *w*(Bi)=91.08%~91.86%(平均91.47%), *w*(Sb)=0.15%~0.18%(平均0.17%), *w*(Ag)=0.005%~0.023%(平均0.014%)。

斜方辉铅铋矿 *w*(Pb)=39.93%~40.15%(平均40.03%), *w*(Bi)=33.56%~33.68%(平均33.62%), *w*(S)=17.62%~17.79%(平均17.71%), *w*(Sb)=4.79%~4.83%

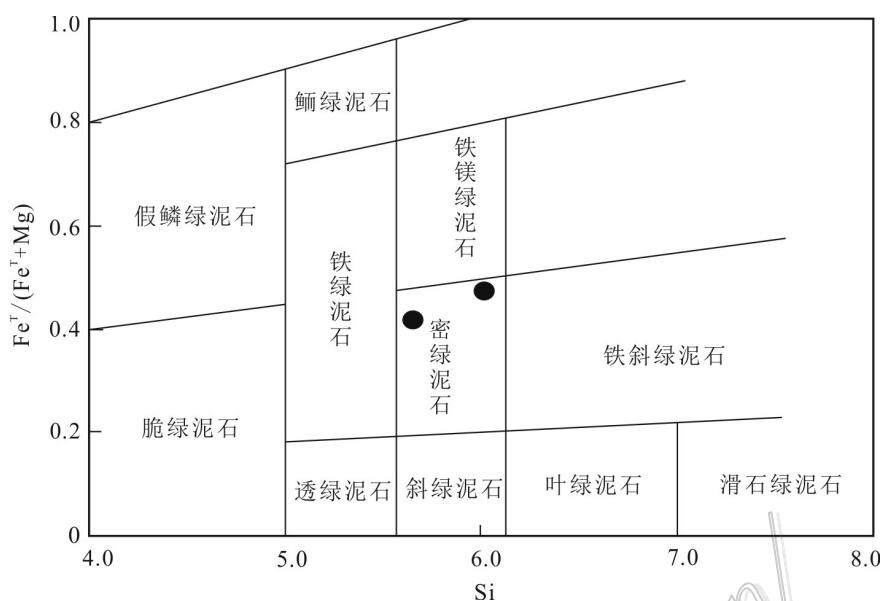


图8 新嘎果矿床绿泥石分类图解(底图据Hey et al., 1954修改)

Fig. 8 The classification of chlorite from the Xin'gaguo deposit (base map modified after Hey et al., 1954)

表5 新嘎果铅锌多金属矿床绿帘石电子探针分析结果和端员组分

Table 5 Electron microprobe analyses, ion proportions and end members of representative epidote from the Xin'gaguo Pb-Zn polymetallic deposit

组分	ZK003-425-1	ZK003-425-2	ZK003-342-2-1	ZK003-342-2-2	ZK019-268-1	ZK019-282-1-1	ZK019-282-2-1	ZK019-345-1	ZK019-345-2	ZK019-360-1-1	ZK836-37-1-1	ZK836-37-3-2	ZK836-192-1
<i>w</i> (B)/%													
SiO ₂	36.69	37.78	37.07	37.81	38.58	37.32	37.29	38.27	39.7	39.120	37.680	38.360	36.640
TiO ₂	0.02	0.06	0.04	0.01	0.02	0.1	0.07	0.05	0.21	0.020	0.020	0.050	0.030
Al ₂ O ₃	23.86	23.25	25.82	23.79	25.14	24.77	25.69	22.23	22.41	25.790	23.620	25.810	24.310
FeO	8.51	8.98	7.39	8.83	8.06	8.16	8.01	11.86	10.69	6.580	9.400	5.860	9.250
MnO	0.02	0.02	0.73	0.27	0.19	0.07	0.03	0.05	0.03	0.550	0.050	0.190	0.080
MgO	0.05	0.04	-	0.27	0.02	0.04	0.14	0.1	0.1	0.020	-	0.210	0.020
CaO	25.92	25.58	22.63	23.21	23.45	23.53	23.67	23.52	23.4	23.430	25.440	25.690	22.950
Na ₂ O	0.04	0.02	-	0.01	0.01	-	-	0.01	-	-	0.010	0.010	-
K ₂ O	0.01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.010	0.010	0.010
总和	95.12	95.73	93.68	94.20	95.47	93.99	94.90	96.09	96.54	95.51	96.220	96.190	93.290
以12个氧为基准计算的阳离子数													
Si	2.975	3.037	3.009	3.063	3.070	3.026	2.993	3.063	3.141	3.100	3.014	3.039	3.001
Ti	0.001	0.004	0.002	0.001	0.001	0.006	0.004	0.003	0.012	0.001	0.001	0.003	0.002
Al	2.280	2.202	2.470	2.272	2.358	2.367	2.430	2.097	2.090	2.409	2.227	2.410	2.347
Fe ³⁺	0.577	0.604	0.502	0.598	0.536	0.553	0.538	0.794	0.707	0.436	0.629	0.388	0.634
Mn	0.001	0.001	0.050	0.019	0.013	0.005	0.002	0.003	0.002	0.037	0.003	0.013	0.006
Mg	0.006	0.005	-	0.033	0.002	0.005	0.017	0.012	0.012	0.002	-	0.025	0.002
Ca	2.252	2.203	1.968	2.015	2.000	2.044	2.035	2.017	1.984	1.990	2.181	2.181	2.014
Na	0.006	0.003	-	0.002	0.002	-	-	0.002	-	-	0.002	0.002	-
K	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.001	0.001

注:“-”表示低于检测限;FeO为全铁含量。

表6 新嘎果铅锌多金属矿床金属矿物电子探针分析结果

Table 6 Electron microprobe analyses of representative ore minerals from the Xin'gaguo Pb-Zn polymetallic deposit

样品编号	矿物名称	w(B)/%													
		Ag	Pb	Bi	Fe	Cu	Zn	Sb	Co	Ni	S	As	Se	Te	
ZK0-0-315-2	自然铋	0.02	-	91.08	0.03	-	0.44	0.18	-	-	-	-	-	-	91.75
ZK019-315-3		0.01	-	91.86	0.02	-	0.08	0.15	-	0.03	-	-	-	-	92.15
ZK0-0-315-4	斜方辉铅铋矿	0.62	40.15	33.68	0.13	0.22	0.03	4.83	-	0.06	17.62	-	0.02	0.03	97.39
ZK0-0-315-5		0.70	39.91	33.56	0.12	0.18	0.15	4.79	-	-	17.79	-	0.04	-	97.24
ZK0-0-329-1	辉砷镍矿	-	-	-	8.78	0.03	-	0.09	3.58	21.02	18.38	43.51	-	0.06	95.45
ZK0-0-329-2		-	-	-	8.82	-	0.06	0.07	3.10	21.17	18.17	42.34	-	0.01	93.74
ZK0-0-363-1	毒砂	0.01	-	-	34.59	-	0.02	0.02	0.08	-	19.72	44.09	-	0.04	98.57
ZK019-294-2		-	-	-	34.32	0.05	-	-	0.07	-	20.27	38.61	0.16	-	93.48
ZK0-0-363-2	-	89.13	-	-	0.03	0.02	0.04	0.11	-	13.94	-	-	0.06	0.03	103.36
ZK0-0-794-1	方铅矿	1.62	83.08	3.51	0.10	-	1.21	-	-	-	14.23	-	0.01	0.03	103.79
ZK019-294-1	-	0.36	86.13	1.01	0.01	0.05	0.12	-	-	-	12.71	-	0.02	0.02	100.43
ZK0-0-363-2	磁黄铁矿	-	-	-	57.99	-	0.64	-	0.07	-	39.10	0.36	0.05	0.01	98.22
ZK0-0-422-1		-	-	-	59.11	0.14	-	-	0.07	-	39.08	0.33	-	0.01	98.74
ZK0-0-363-3	黄铜矿	0.01	-	-	29.43	35.00	-	-	0.02	-	33.96	0.20	-	0.05	98.67
ZK0-0-422-2		0.05	-	-	29.54	34.52	-	-	-	-	34.26	0.21	-	0.03	98.61
ZK0-0-422-3	-	-	-	12.06	-	53.26	-	0.01	-	33.29	0.06	-	0.01	98.69	
ZK0-0-794-2	-	-	-	10.07	-	56.06	-	-	-	33.06	0.06	0.01	-	99.26	
ZK0-0-363-4	闪锌矿	0.02	-	-	10.88	-	55.71	-	0.04	-	33.36	0.06	-	0.03	100.10
ZK0-0-329-3	-	-	-	10.66	-	55.49	-	0.02	-	33.00	0.05	-	-	99.22	
ZK019-315-1	-	0.02	-	-	9.10	-	56.88	0.02	0.04	-	32.81	0.05	-	-	98.92

注：“-”表示低于检测限。

(平均 4.81%), $w(\text{Ag})=0.62\% \sim 0.70\%$ (平均 0.66%), 分子式为 $2\text{Pb}_{0.87-0.88}\text{S} \cdot \text{Bi}_{1.45-1.47}\text{S}_3$ 。

毒砂 $w(\text{Fe})=34.32\% \sim 34.59\%$ (平均 34.45%), $w(\text{S})=19.72\% \sim 20.27\%$ (平均 19.99%), $w(\text{As})=38.61\% \sim 44.09\%$ (平均 41.35%), 分子式为 $\text{Fe}_{0.97-1.01}\text{As}_{0.82-0.96}\text{S}$ 。

磁黄铁矿 $w(\text{Fe})=57.99\% \sim 59.11\%$ (平均 58.55%), $w(\text{S})=39.08\% \sim 39.10\%$ (平均 39.09%), $w(\text{As})=0.33\% \sim 0.36\%$ (平均 0.35%), 分子式为 $\text{Fe}_{0.95-0.96}\text{S}-\text{Fe}_{1.06-1.09}\text{S}$ 。

黄铜矿 $w(\text{Fe})=29.43\% \sim 29.54\%$ (平均 29.49%), $w(\text{Cu})=34.52\% \sim 35.00\%$ (平均 34.76%), $w(\text{S})=33.96\% \sim 34.26\%$ (平均 34.11%), $w(\text{As})=0.20\% \sim 0.21\%$ (平均 0.21%), 分子式为 $\text{Cu}_{1.02-1.04}\text{Fe}_{0.99}\text{S}_2$ 。

4 讨 论

4.1 矿床成因类型

根据矿物共生组合和围岩岩性, 矿卡岩分为交代矽卡岩和变质矽卡岩, 交代成因的矽卡岩按照矿

物成分的不同又可分为钙质矽卡岩、镁质矽卡岩、锰质矽卡岩以及碱质矽卡岩(Einaudi, 1981; 赵一鸣等, 2012)。钙质矽卡岩主要由钙铁辉石和石榴子石组成, 局部有锰钙辉石、透辉石等(赵一鸣等, 2012)。新嘎果矿床的石榴子石属非连续的钙铁榴石-钙铝榴石类质同象系列, 以钙铝榴石为主, 少量的钙铁榴石, 辉石以钙铁辉石为主, 次为透辉石, 并且含大量的硅灰石, 表明属典型的钙质矽卡岩。此外, 金属硫化物 S 同位素显示, 新嘎果成矿流体中的硫来源于岩浆硫和生物硫(Tang et al., 2019b)。因此, 新嘎果矿床矽卡岩为岩浆热液流体交代塔克那组碳酸盐岩形成。

4.2 对成矿环境与矿化的指示

矽卡岩的矿物成分和矿物组合能提供关于矽卡岩和成矿环境的许多重要信息(Einaudi et al., 1981; Crowe et al., 2001; Lu et al., 2003; Kim et al., 2006; Martin et al., 2011)。钙铁榴石多易形成于碱性介质中, 而钙铝榴石在酸性介质中形成最佳, 且钙铁榴石

形成时的氧逸度比钙铝榴石形成时的氧逸度高(Zhang et al., 2017; 艾永富等, 1981)。新嘎果矿床石榴子石主要为钙铝榴石, 表明早期进化蚀变矽卡岩阶段主体为还原、酸性环境。部分石榴子石环带显示, 成分发生突变, 内部为钙铁榴石, 外部为钙铝榴石(图9a), 表明早期进化蚀变矽卡岩阶段由氧化环境向还原环境转变。退化蚀变矽卡岩阶段, 大量发育绿帘石(Fe^{3+}), 表明成矿环境为氧化环境。而硫化物阶段大量产出磁黄铁矿, 指示成矿环境变为还原环境, 从而造成大量的金属硫化物沉淀。因此, 新嘎果矿床环境至少经历了3次氧化还原的变化过程。早期的岩浆演化的成矿流体具有较高的氧逸度, 硫以 SO_4^{2-} 或 SO_2 的形式存在, 有利于铅、锌、铜等成矿物质进行运移。塔克那组地层中的生物碎屑灰岩含有大量的有机质, 并且部分金属硫化物样品硫同位素显示生物硫的特征, 地层中有机质的加入是造成成矿流体由氧化环境变为还原环境的关键因素(Tang et al., 2019b)。

闪锌矿中微量元素对于形成温度具有特征的反映, 研究表明高温条件下形成闪锌矿富集Fe、Mn、In、Se和Te等元素, 并且具有较高的In/Ga比值, 而低温条件下形成闪锌矿则相对富集Cd、Ga、Ge等元素, 并且具有较低In/Ge比值(刘英俊等, 1984; 韩照信, 1994; 蔡劲宏等, 1996), 而Fe和Mn对于矿物形成温度具有更为良好的指示作用, 温度较高时往往形成铁闪锌矿(刘英俊等, 1984; 叶霖等, 2012)。新嘎果闪锌矿颜色为黑色, 为铁闪锌矿, Fe含量为

9.10~12.06, 平均值10.55, 表明其形成于中高温环境(叶霖等, 2012)。

4.3 锰矿物及成因意义

铋矿物普遍存在于热液矿床, 特别是与侵入体有关的热液矿床(Zhou et al., 2017)。在愈来愈多的矽卡岩型铜金矿床中不断发现独立的铋矿物, 并且Au、Ag与Bi呈正相关, 指示金(银)矿物与铋矿物具有密切的成因联系(胡欢等, 2001; 任云生等, 2004; 刘家军等, 2010; 肖渊甫等, 2012; Zhou et al., 2017)。研究表明, 铋在熔融状态下可以吸附金, 以铋-金熔体形式运移、富集金(Zhou et al., 2017); 在富铋和贫硫的成矿流体中, 形成黑铋金矿-自然铋-自然金组合; 当成矿流体温度降低, S^2 含量增加, 铋在富硫流体中主要以硫络合物形式运移, 以铋的硫化物、硫盐矿物形式出现, 形成铋矿物-自然金(银)矿物组合(Cook et al., 2004; Tormannen et al., 2005; Oberthur et al., 2008; Zhou et al., 2017)。

新嘎果矿床含有较高的Bi含量, 含铋的矿物主要为自然铋、斜方辉铅铋矿和方铅矿。这些矿物均含有一定量的Ag, 并且方铅矿中的Ag和Bi的含量呈正相关性, 指示银-铋元素的共生反映出成矿流体的成分和性质演化过程, 铋对银的富集可能起着重要的作用。

铋是重要的工业有用元素, 新嘎果矿床矽卡岩矿石中铋含量较高(最高可达 722.4×10^{-6} , 未刊数据), 对冈底斯成矿带北缘矽卡岩型铅锌银矿床研究

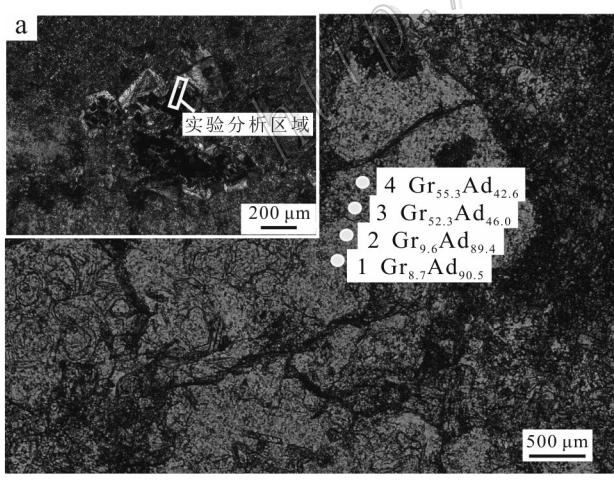


图9 新嘎果矿床石榴子石环带结构成分剖面图(a)及其电子探针分析结果(b)

Fig. 9 Compositional section of garnets with zoning structure from the Xingaguo deposit (a) and electron microprobe analyses of representative garnets (b)

和勘查方向的确定具有重要的意义,铋的赋存状态研究有利于矿石的综合回收利用;也有必要进一步详细研究铋矿化与银矿化的关系及分布规律,对该带银的成矿机理研究也具有一定的指导作用。

5 结 论

(1) 新嘎果矿床矽卡岩矿物主要为石榴子石、透辉石和绿帘石,少量的硅灰石、绿泥石等,为典型的钙质矽卡岩组合。金属矿物主要为闪锌矿、方铅矿、磁黄铁矿、黄铜矿,少量的自然铋、斜方辉铅铋矿、辉砷镍矿等。

(2) 新嘎果矿床地层有机质的加入是成矿环境变化的重要因素,早期由相对氧化环境到还原环境转变,而晚期由氧化环境到还原环境,造成大量成矿物质沉淀。闪锌矿形成于中高温环境。

(3) 新嘎果矿床含铋的矿物主要为自然铋、斜方辉铅铋矿和方铅矿,这些矿物中 Ag 和 Bi 的含量呈正相关性,铋对银的富集可能起着重要的作用,铋是重要的伴生有用元素,具有较高的综合利用价值。

致 谢 感谢西藏强瑞矿业有限责任公司提供了大量资料,并为作者的野外工作提供了帮助;感谢天津地调中心郭虎老师为电子探针测试提供帮助;感谢审稿专家给论文提出了许多建设性的意见!

References

- Ai Y F and Jin L N. 1981. A preliminary study on the relationship between composition and mineralization of garnets[J]. Journal of Peking University (Natural Science Edition), 1: 83-90(in Chinese with English abstract).
- Burton J C and Taylor L A. 1982. The $f(O_2)$ -T and $f(S_2)$ -T stability relations of hedenbergite and of hedenbergite johannsenite solid solutions[J]. Econ. Geol., 77(4): 764-783.
- Cai J H, Zhou W N and Zhang J Z. 1996. Typomorphic characteristics of sphalerites in the Yinshan copper, lead and zinc polymetallic deposit, Jiangxi[J]. Journal of Guilin Institute of Technology, 16 (4): 370-375(in Chinese with English abstract).
- Calagari A A and Hosseinzadeh G. 2006. The mineralogy of copper-bearing skarn to the East of the Sungun-Chay river, East-Azardjan, Iran[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 28(4): 423-438.
- Cheng W B, Gu X X, Tang J X, Lü P R, Zhong K H, Liu X J and Gao Y M. 2010. Lead isotope characteristics of ore sulfides from typical deposits in the Gangdese-Nyainqntanglha metallogenic belt: Implications for the zonation of ore-forming elements[J]. Acta Petrologica Sinica, 26(11): 3350-3362(in Chinese with English abstract).
- Cook N J and Ciobanu C L. 2004. Bismuth tellurides and suphosalts from the Larga hydrothermal system, Metaliferi Mts., Romania: Paragenesis and genetic significance[J]. Mineralogical Magazine, 68(2): 301-321.
- Crowe D E, Riciputi L R, Bezenek S and Ignatiev A. 2001. Oxygen isotope and traceelement zoning in hydrothermal garnets: Windows into large-scale fluid-flow behavior[J]. Geology, 29(6): 478-482.
- Einaudi M T, Meinert L D and Newberry R J. 1981. Skarn deposits[J]. Econ. Geol., 75th Anniversary Volume: 317-391.
- Han Z X. 1994. The typomorphic characteristics of the sphalerite in the Qinling Devonian system lead-zinc metallogenic belt[J]. Journal of Xi'an College of Geology, 16(1): 12-17(in Chinese with English abstract).
- Hey M H. 1954. A new review of the chlorites[J]. Mineral Magazine, 30(1): 277-292.
- Hou Z Q, Yang Z M, Qu X M, Meng X J, Li Z Q, Beaudoin G, Rui Z Y, Gao Y F and Zaw K. 2009. The Miocene Gangdese porphyry copper belt generated during post-collisional extension in the Tibetan Orogen[J]. Ore Geology Reviews, 36(1-3): 25-51.
- Hu H, Wang R C and Lu J J. 2001. Mineral assemblage chemical composition and genetic significance of skarn gold deposit in Shizishan ore field, Tongling, Anhui Province[J]. Mineral Deposits, 20 (1): 86-98(in Chinese with English abstract).
- Kamvong T and Zaw K. 2009. The origin and evolution of skarn-forming fluids from the Phu Lon deposit, northern Loei Fold Belt, Thailand: Evidence from fluid inclusion and sulfur isotope studies[J]. Journal of Asian Earth Science, 34(5): 624-633.
- Kim H S. 2006. Deformation-induced garnet zoning[J]. Gondwana Research, 10(3-4): 379-388.
- Leng Q F, Zheng W B, Tang P, Lin B and Ding S. 2014. Geological characteristics of the Xin'gagu lead-zinc deposit, Tibet[J]. Mineral Deposits, 33(Supp.): 97-98(in Chinese with English abstract).
- Lin B, Tang J X, Chen Y C, Song Y, Hall G, Wang Q, Yang C, Fang X, Duan J L, Yang H H, Liu Z B, Wang Y Y and Feng J. 2017a. Geochronology and genesis of the Tiegelongnan porphyry Cu (Au) deposit in Tibet: Evidence from U-Pb, Re-Os dating and Hf, S, and H-O isotopes[J]. Resource Geology, 67(1): 1-21.
- Lin B, Chen Y C, Tang J X, Wang Q, Song Y, Yang C, Wang W L, He W and Zhang L J. 2017b. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and Rb-Sr ages of the Tiegelongnan porphyry Cu-(Au) deposit in the Bangong Co-Nujiang metallogenic belt of Tibet, China: Implication for generation of super-large deposit[J]. Acta Geologica Sinica (English edition), 91(2): 602-616.
- Lin B, Tang J X, Tang P, Zheng W B, Greg H, Chen G L and Zhang Z K. 2019. Polycentric complex mineralization model of porphyry system: A case study of Jiama superlarge deposit in Tibet[J]. Mineral Deposits, 38(6): 1204-1222(in Chinese with English abstract).

- stract).
- Liu J J, Zhai D G, Li Z M, He M Q and Li C Y. 2010. Occurrence of Ag, Co, Bi and Ni elements and its genetic significance in the Baiyangping silver-copper polymetallic metallogenetic concentration area, Lanping basin, southwestern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(6): 1646-1660(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. Elemental geochemistry[M]. Beijing: Science Press. 1-548(in Chinese with English abstract).
- Lu H Z, Liu Y M, Wang C L, Xu Y C and Li H Q. 2003. Mineralization and fluid inclusion study of the Shizhuoyuan W-Sn-Mo-F skarn deposit, Hunan Province, China[J]. *Econ. Geol.*, 98(5): 955-974.
- Martin L A J, Ballèvre M, Halfpenny A and Boulvais P. 2011. Garnet re-equilibration by coupled dissolution-reprecipitation: Evidence from textural, major element and oxygen isotope zoning of 'cloudy' garnet[J]. *Metamorphic Geology*, 29(2): 213-231.
- Meinert L D. 1997. Application of skarn deposit zonation models to mineral exploration[J]. *Exploration and Mining Geology*, 6(2): 185-208.
- Meinert L D, Dipple G M and Nicolescu S. 2005. World skarn deposits[J]. *Economic Geology*, 100th Anniversary Volume I: 299-336.
- Oberthür T and Weiser T W. 2008. Gold-bismuth-telluride-sulphide assemblages at the Viceroy mine, Harare-Bindura-Shamva greenstone belt, Zimbabwe[J]. *Mineralogical Magazine*, 72(4): 953-970.
- Ren Y S, Liu L D, Wan X Z and Chen G H. 2004. A study on the relationship between bismuth minerals and gold mineralization in skarn gold deposits in Shizishan orefield[J]. *Mineralogy and Petrology*, 24(2): 41-45(in Chinese with English abstract).
- Tang J X, Duoji, Liu H F, Lang X H, Zhang J S, Zheng W B and Ying L J. 2012. Minerogenetic series of ore deposits in the east part of the Gangdise metallogenetic belt[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 33(4): 393-410(in Chinese with English abstract).
- Tang P, Tang J X, Zheng W B, Leng Q F, Lin B, Tang X Q and Wang H. 2018. Zircon U-Pb ages, Hf isotopes and geochemistry of the volcanic rocks in Dianzhong Formation from Xin'gaguo area, Tibet[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 37(1): 47-60(in Chinese with English abstract).
- Tang P, Tang J X, Lin B, Wang L Q, Zheng W B, Leng Q F, Gao X, Zhang Z B and Tang X Q. 2019a. Mineral chemistry of magmatic and hydrothermal biotites from the Bangpu porphyry Mo (Cu) deposit, Tibet[J]. *Ore Geology Reviews*, 115(1): 103-122.
- Tang P, Tang J X, Wang Y, Lin B, Zheng W B, Leng Q F, Zhang Z B, Yang Y, Wu C N, Qi J and Li Y X. 2019b. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry, S-Pb-Hf isotopic compositions, and mineral chemistry of the Xin'gaguo skarn Pb-Zn deposit, Tibet, China[J]. *Geological Journal*, 55(6): 1-20.
- Titley S R. 1973. "Pyrometasomatic": An alteration type[J]. *Econ. Geol.*, 68(8): 1326-1329.
- Tormaen T O and Koski R A. 2005. Gold enrichment and the Bi-Au association in pyrrhotite-rich massive sulfide deposits, Escanaba trough, southern Gorda Ridge[J]. *Econ. Geol.*, 100(6): 1135-1150.
- Wang L Q, Tang J X, Deng J, Kang H R, Lin B, Cheng W B, Li Z and Zhang Z. 2015. The Longmala and Mengya's skarn Pb-Zn deposits, Gangdese region, Tibet: Evidence from U-Pb and Re-Os geochronology for Formation during Early India-Asia collision[J]. *International Geology Review*, 57(14): 1825-1842.
- Wang L Q, Cheng W B, Tang J X, Kang H R, Zhang Y and Li Z. 2016. U-Pb geochronology, geochemistry, and H-O-S-Pb isotopic compositions of the Leqingla and Xin'gaguo skarn Pb-Zn polymetallic deposits, Tibet, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 115(1): 80-96.
- Wang L Q, Tang J X, Yang Y, Li Z and Lin B. 2018. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry, and S-Pb isotopic compositions of the Lietinggang iron polymetallic deposit, Tibet, China[J]. *Ore Geology Review*, 98(1): 62-79.
- Xiao Y F, Wang Q, Li Z J, He J L, Gong T T, Wang Y L and Zhang S M. 2012. Discovery and significance of bismuth mineral in gaer poor copper and gold deposits in Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(7): 1106-1112(in Chinese with English abstract).
- Ye L, Gao W, Yang Y L, Liu T G and Peng S S. 2012. Trace elements in sphalerite in Laochang Pb-Zn polymetallic deposit, Lancang, Yunnan Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1362-1372(in Chinese with English abstract).
- Zhang Y, Shao Y J, Wu C D and Chen H Y. 2017. LA-ICP-MS trace element geochemistry of garnets: Constraints on hydrothermal fluid evolution and genesis of the Xinqiao Cu-S-Fe-Au deposit, eastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 86(1): 426-439.
- Zhang Z Y, Du Y S and Zhang J. 2013. Alteration, mineralization, and genesis of the zoned Tongshan skarn-type copper deposit, Anhui, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 53(1): 489-503.
- Zhao M, Pan X F, Li Y, Chen G H, Zhang C, Kang C, Wei J, Zhang T F and Liu Q. 2015. Mineralogical characteristics and geological significance of the Zhuxi Cu-W polymetallic oredeposit, Jiangxi Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 34(2-3): 548-568(in Chinese with English abstract).
- Zhao Y M, Dong Y G, Li D X and Bi C S. 2003. Geology, mineralogy, geochemistry, and zonation of the Bajiazi dolostone-hosted Zn-Pb-Ag skarn deposit, Liaoning Province, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 23(1): 153-182.
- Zhao Y M, Lin W W and Bi C S. 2012. Skarn ore deposits in China[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-115(in Chinese with English abstract).
- Zhou H Y, Sun X M, Cook N J, Lin H, Fu Y, Zhong R C and Brugger J. 2017. Nano-to micron-scale particulate gold hosted by magnetite: A product of gold scavenging by bismuth melts[J]. *Econ. Geol.*, 112(4): 993-1010.

附中文参考文献

- 艾永富,金玲年. 1981. 石榴石成分与矿化关系的初步研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1: 83-90.

- 蔡劲宏,周卫宁,张锦章. 1996. 江西银山铜铅锌多金属矿床闪锌矿的标型特征[J]. 桂林工学院学报,16(4): 370-375.
- 程文斌,顾雪祥,唐菊兴,王立强,吕鹏瑞,钟康惠,刘晓吉,高一鸣. 2010. 西藏冈底斯-念青唐古拉成矿带典型矿床硫化物 Pb 同位素特征——对成矿元素组合分带性的指示[J]. 岩石学报,26(11): 3350-3362.
- 韩照信. 1994. 秦岭泥盆系铅锌成矿带中闪锌矿的标型特征[J]. 西安地质学院学报,16(1): 12-17.
- 胡欢,王汝成,陆建军. 2001. 安徽铜陵狮子山矿田矽卡岩金矿床的矿物组合、化学成分及成因意义[J]. 矿床地质,20(1): 86-98.
- 冷秋锋,郑文宝,唐攀,林彬,丁帅. 2014. 西藏新嘎果铅锌矿床地质特征[J]. 矿床地质,33(增刊): 97-98.
- 林彬,唐菊兴,唐攀,郑文宝,Greg H,陈国良,张忠坤. 2019. 斑岩成矿系统多中心复合成矿作用模型——以西藏甲玛超大型矿床为例[J]. 矿床地质,38(6): 1204-1222.
- 刘家军,翟德高,李志明,何明勤,刘玉平,李朝阳. 2010. 兰坪盆地白秧坪银铜多金属矿集区中银、钴、铋、镍的赋存状态与成因意义[J]. 岩石学报,26(6): 1646-1660.
- 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.
- 任云生,刘连登,万相宗,陈国华. 2004. 狮子山矿田矽卡岩型金矿铋矿物与金矿化关系研究[J]. 矿物岩石,24(2): 41-45.
- 唐菊兴,多吉,刘鸿飞,郎兴海,张金树,郑文宝,应立娟. 2012. 冈底斯成矿带东段矿床成矿系列及找矿突破的关键问题研究[J]. 地球学报,33(4): 393-410.
- 唐攀,唐菊兴,郑文宝,冷秋锋,林彬,唐晓倩,王豪. 2018. 西藏新嘎果地区典中组火山岩年代学、Hf 同位素及地球化学特征[J]. 岩石矿物学杂志,37(1): 47-60.
- 肖渊甫,王强,李志军,何佳乐,龚婷婷,王瑜亮,张世铭. 2012. 西藏尕尔穷铜金矿床铋矿物的发现及意义[J]. 地质学报,86(7): 1106-1112.
- 叶霖,高伟,杨玉龙,刘铁庚,彭绍松. 2012. 云南滇沧老厂铅锌多金属矿床闪锌矿微量元素组成[J]. 岩石学报,28(5): 1362-1372.
- 赵苗,潘小菲,李岩,陈国华,张诚,康川,魏锦,张天福,刘茜. 2015. 江西朱溪铜钨多金属矿床矽卡岩矿物学特征及其地质意义[J]. 地质通报,34(2-3): 548-568.
- 赵一鸣,林文蔚,毕承思. 2012. 中国矽卡岩矿床[M]. 北京: 地质出版社. 1-115.