

文章编号:0258-7106(2013)01-0055-22

青海尕斯林格铁矿床矽卡岩矿物学及蚀变分带*

于淼¹, 丰成友^{2**}, 保广英³, 刘洪川³, 赵一鸣², 李大新², 肖晔², 刘建楠²

(1 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

3 青海省有色地质矿产勘查局地质矿产勘查院, 青海 西宁 810007)

摘要 尕斯林格矽卡岩型铁多金属矿床位于青海省西部祁曼塔格成矿亚带的中部。矿体处于花岗闪长岩与滩间山群白云质大理岩接触带内以及外接触带沿 NWW 向断裂构造破碎带分布的大理岩和蚀变安山岩内。从侵入接触带往东, 蚀变岩石分带性明显, 主要划分出 3 种含矿矽卡岩带: 含 Fe 的镁质矽卡岩带, 含 Fe、Cu 的钙质矽卡岩带, 含 Fe、Pb、Zn 的锰-钙质矽卡岩带。镁质矽卡岩带的矽卡岩矿物主要包括镁橄榄石及其蚀变矿物蛇纹石、粒硅镁石、透辉石、斜绿泥石, 有关的金属矿物主要为磁铁矿。钙质矽卡岩带的主要矽卡岩矿物有绿钙闪石、铁阳起石、钙铁辉石、铁叶绿泥石、磷灰石、中长石, 有关的金属矿物为磁铁矿、磁黄铁矿和少量黄铜矿。与锰-钙质矽卡岩有关的矽卡岩矿物有锰钙铁辉石、钙铁榴石、钙铝榴石、铁镁绿泥石、绿帘石、硅灰石、磷灰石、钙长石等, 金属矿物有方铅矿、闪锌矿、磁铁矿和磁黄铁矿。通过对矿物组合的研究, 确定了不同矿物组合的生成关系, 划分了成矿期次, 分为矽卡岩期、退化蚀变期和金属硫化物期, 矽卡岩期又分为早、晚 2 个阶段。矽卡岩早期生成的石榴子石的化学成分端员以钙铝榴石(Gro₆₇₋₉₉)为主, 辉石的成分端员以透辉石(Di₉₆₋₉₈)为主。矽卡岩期晚期阶段石榴子石的化学成分端员以钙铁榴石(Ad₇₈₋₉₈)为主, 辉石的成分端员以钙铁辉石(Hd₆₈₋₈₄)为主。与中国东部矽卡岩型矿床进行对比后发现, 锰-钙质矽卡岩带是一种向锰质矽卡岩带过渡的类型, 对于寻找与锰质矽卡岩有关的矿化类型具有指示意义。

关键词 地质学 矽卡岩分带 矽卡岩铁多金属矿床 电子探针分析 矿物组合 尕斯林格 青海祁曼塔格

中图分类号: P618.31

文献标志码: A

Characteristics and zonation of skarn minerals in Galinge iron deposit, Qinghai Province

YU Miao¹, FENG ChengYou², BAO GuangYing³, LIU HongChuan³, ZHAO YiMing²,
LI DaXin², XIAO Ye² and LIU JianNan²

(1 School of Earth Sciences and Resources, China University of Geoscience, Beijing 100083, China;

2 Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 3 Qinghai Institute of Nonferrous Metal and Geological Exploration, Xining 810007, Qinghai, China)

Abstract

The Galinge skarn iron polymetallic ore deposit of western Qinghai Province lies in central Qimantag metallogenic belt. Ore bodies are located in the contact zone between granodiorites, adamellite and dolomitic marble and in the marble and altered andesites which are distributed along the NWW-striking rupture structural fracture zone in the exocontact zone. From the invading contact zone to the east, the zonation of skarn minerals is obvious and can be mainly divided into three ore-bearing skarn zones: magnesian skarn zone with Fe, calcium skarn zone with Fe and Cu and manganoan-calcium skarn zone with Fe, Pb and Zn. The main skarn minerals in the

* 本文得到中国地质调查局地质调查项目(编号:1212011085528)、国家自然科学基金项目(批准号:41172076)和中国地质调查局青年地质英才计划(201112)的联合资助

第一作者简介 于淼,男,1987年生,硕士研究生,矿物、岩石、矿床学专业。Email:540052547@99.com

** 通讯作者 丰成友,男,1971年生,博士,研究员,从事矿床地质、地球化学研究。Email:fengchy@yahoo.com.cn

收稿日期 2012-06-06;改回日期 2012-12-10。许德煊编辑。

magnesian skarn zone include forsterite and its altered serpentine, chondrodite, diopside and chinochlorite, and the main metal mineral is magnetite; the calcium skarn is composed of hastingsite, ferroactinolite, hedenbergite, delessite, apatite and andesine, and the associated metal minerals are magnetite, pyrrhotite and a little chalcopyrite; the skarn minerals related to the manganocalcium skarn zone are manganhedenbergite, andradite, grossular, brunsvigite, epidote, wollastonite, apatite and anorthite, and the metal minerals are composed of galena, sphalerite, magnetite and pyrrhotite. Based on mineral assemblages, the authors divide the metallogenic periods into skarn period, hydrothermal period and sulfide period. Different periods have different stages: the skarn period is divided into early and late stage. The main chemical composition of early stages of skarn period is grossular (Gro_{67-99}) and diopside (Di_{96-98}); The main chemical composition of the late stage of skarn is andradite (Ad_{78-98}) and hedenbergite (Hd_{68-84}). Through a comparison with the deposits in eastern China, the authors have found that manganocalcium skarn zone is a transitional type to the manganocalcium skarn zone, and it has the guiding significance in search for mineralization type related to the manganocalcium skarn.

Key words: geology, skarn zonation, skarn iron polymetallic deposit, electron microprobe analysis, mineral assemblage, Galinge, Qimantag, Qinghai Province

青海尕斯库勒砂卡岩型铁多金属矿床地处东昆仑成矿带祁漫塔格成矿亚带中部、柴达木盆地西南缘(图 1),是中国西部为数不多的大型铁多金属矿床之一。该矿床在上世纪 70 年代就已被发现,截至 2011 年,其铁矿石资源量达 1.4991 亿吨, ($\text{Pb} + \text{Zn}$) 金属资源量达 10.66 万吨,达到大型规模。在区域上,类似尕斯库勒的砂卡岩矿床有卡而却卡多金属矿床、景忍-迎庆沟多金属矿床、虎头崖多金属矿床、肯德可克铁多金属矿床、野马泉铁多金属矿床、四角羊多金属矿床、长山铁矿床、那棱格勒河西多金属矿床、它温查汉多金属矿床等(刘云华等, 2006; 丰成友等, 2009; 李洪普等, 2010), 都是近几年查明的较有远景的砂卡岩型铁、铜多金属矿床, 构成了一个成矿带。这些不同元素组合的砂卡岩型矿床在空间上间隔相伴, 成矿年龄亦大致相同(丰成友等, 2011b)。由于该区域地理位置和交通条件的限制, 各矿床的研究程度普遍较低。本文旨在通过矿床地质特征的解剖和砂卡岩矿物学的系统研究, 查明矿床蚀变分带、砂卡岩类型及金属元素组合, 为进一步的找矿工作提供一些依据。

1 成矿地质背景

尕斯库勒砂卡岩型铁多金属矿床位于祁漫塔格早古生代弧后裂陷盆地中部(图 1), 成矿金属元素以 Fe 、 Pb 、 Zn 为主, 伴生 Au 、 Ag 、 Co 、 Cu 等有益元素。尕斯库勒矿区处于沉积盆地覆盖区, 所有矿体均为被第四系松散砂砾层掩埋的盲矿体。据钻孔资料分析

认为第四系之下为一套硅质岩、中-基性火山岩、灰岩和大理岩的海相沉积建造, 同时发育中-酸性、中性侵入岩。该矿区为一向斜构造, 主体构造线呈 NWW 向展布。

1.1 地层

尕斯库勒矿区内出露的地层为第四系及奥陶系—志留系滩间山群下岩组。第四系为松散砂砾层, 平均厚度 200 m 左右。奥陶系—志留系滩间山群是一套地壳拉张下沉、裂谷盆地发育过程中的产物, 从震荡的滨海-浅海到较深的海槽沉积环境的类复理石建造, 再到火山喷发沉积, 最后到深水碳酸盐沉积, 构成了一个较完整的沉积构造旋回。主要岩性为结晶灰岩、泥质灰岩、白云质灰岩、白云岩、大理岩、蛇纹石化大理岩、硅质岩、变质砂岩和粉砂岩、玄武安山岩等。

滩间山群是尕斯库勒矿区内主要的赋矿地层, 其中的碳酸盐岩和中-基性火山岩则是主要的赋矿围岩, 但在砂岩和粉砂岩中也存在含矿砂卡岩透镜体。

1.2 构造

该矿区为一 NWW 走向的向斜构造, 其中, 较完整的向斜发育在 V 矿群。该向斜南北两翼的岩性对称分布, 但产状不对称, 北翼较陡(倾角 $65 \sim 75^\circ$), 南翼较缓(倾角 $45 \sim 60^\circ$), 近轴部的地层比较平缓。顺走向自西往东, 该向斜被断层切割成 4 段。矿体大部分产于该向斜的北翼。

区内断裂构造十分发育, NWW 向、NW 向、NE 向和近 NS 向断裂组成了主体构造格架, NWW

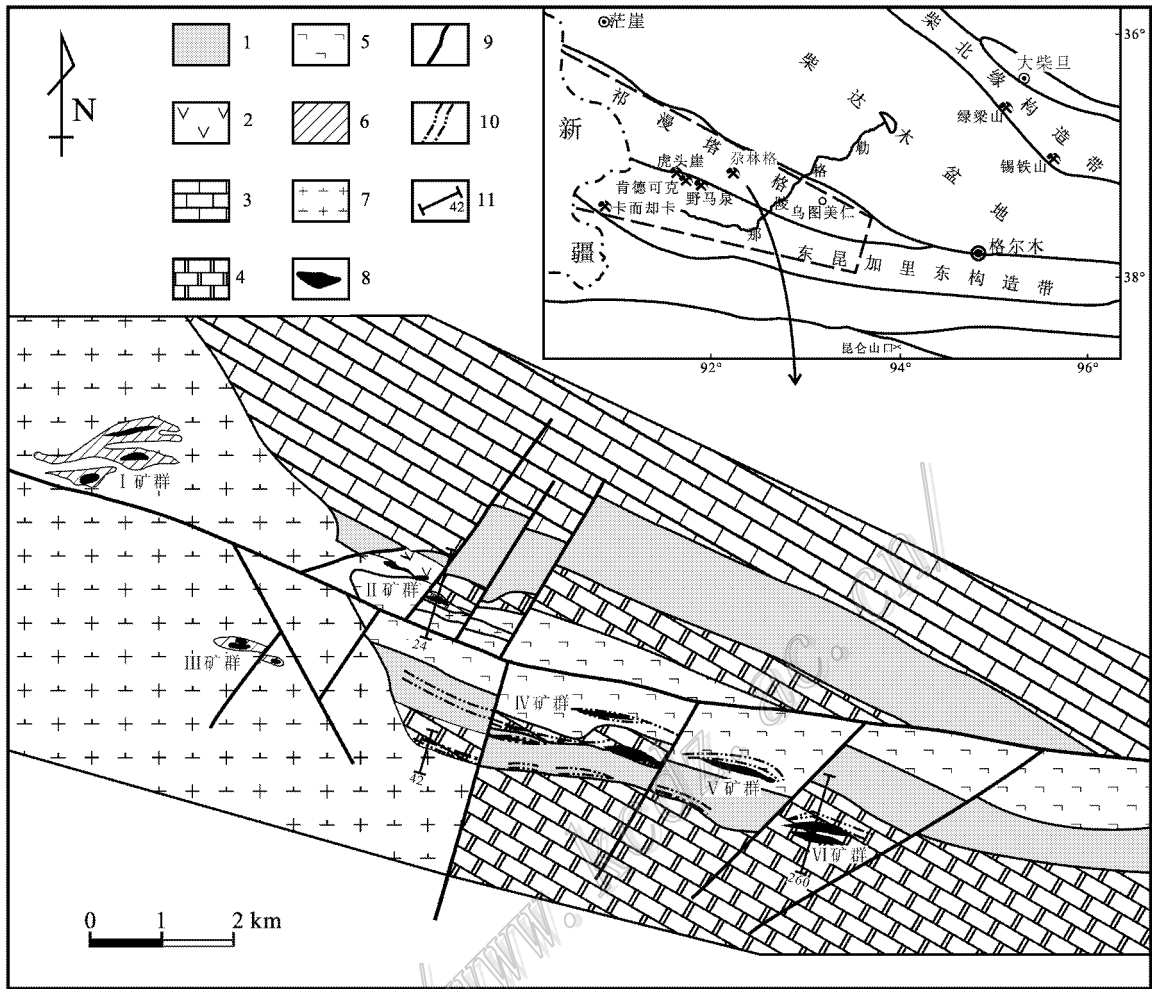


图 1 尕斯格砂卡岩矿床基岩地质图^①

1~6—奥陶系—志留系滩间山群：1—泥质粉砂岩；2—蛇纹石交代岩；3—灰岩；4—大理岩；5—硅质岩；6—透辉石砂卡岩；7—花岗闪长岩；8—矿体；9—断层；10—断裂破碎带；11—勘探线及编号

Fig. 1 Bedrock map of the Galingshe skarn deposit

1~6—Ordovician Tanjianshan Group；1—Argillaceous siltstone；2—Metasomatite serpentine；3—Limestone；4—Marble；5—Quartzites；6—Diopside skarn；7—Granodiorite；8—Ore body；9—Fault；10—Fracture zone；11—Exploration line and its serial number

向构造是主要的控矿构造。

矿区内碎裂岩、构造角砾岩十分发育，说明至少有 2 期以上的构造活动相互叠加。第 1 期是在成岩成矿的同期，成矿流体沿着 2 种不同岩性的接触构造薄弱带运移、贯入、交代和沉淀，随着流体冷却，胶结角砾形成了角砾岩。第 2 期是在地层发生褶皱的时期，地层在发生塑性弯曲的同时，还发生了层间滑动和脆性断裂。

1.3 岩浆岩

区内岩浆活动较为强烈，以印支期酸性—中酸性花岗闪长岩、闪长岩为主，且大多数以隐伏的形式存

在，呈不规则岩株状产出，与矿化关系最为密切。

闪长岩 主要矿物为斜长石，呈板状，自形到半自形，含量 70% 左右（图 2A）；其次为暗色矿物，主要为角闪石，绿色，半自形长柱状，含量 25% 左右，常次生蚀变为绿泥石，石英，含量 0~2.5%，呈他形充填于其他矿物之间。副矿物主要为磷灰石、榍石和锆石等。

花岗闪长岩 灰白色—浅肉红色，他形—半自形粒状结构、花岗结构，块状构造（图 2B）。矿物成分：斜长石 15%~25%，斜长石 20%~25%，石英 15%~20%，黑云母 5%~8%，有少量副矿物榍石、锆石等。岩石发育绿帘石化、绢云母化、基性斜长石化，局部

① 青海省有色地勘局地质矿产勘察院. 2007. 青海省格尔木市尕斯格铁矿区 V 矿群富铁矿详查地质报告. 内部资料.



图 2 尕林格矿区侵入岩手标本照片

A. 闪长岩; B. 含暗色微粒包体的花岗闪长岩

Fig. 2 Hand specimen photographs of intrusive rocks in the Galinge ore district

A. Diorite; B. Granodiorite containing enclaves

高岭土化。镜下观察可见,大部分角闪石已被透辉石交代。岩石化学成分为铝过饱和,属高钾钙碱性系列。岩石中暗色微粒包体发育,说明存在地幔物质的混染。在岩体与围岩的接触部位,岩体常发生强烈的褪色蚀变,钾化、钠化和基性斜长石化发育,且多形成矽卡岩带,与成矿密切相关。

2 矿床地质特征

2.1 矿体及矿石特征

尕林格矿床由 6 个矿群组成,呈 NWW 向展布,东西长约 14 km。I 矿群和 III 矿群为花岗闪长岩中的捕虏体(图 3A); II 矿群主要产于花岗闪长岩与滩间山群大理岩接触带附近的透辉石矽卡岩和蛇纹石交代岩中(图 3B); IV 矿群、V 矿群和 VI 矿群主要产于滩间山群与花岗闪长岩外接触带的 NWW 向构造破碎带内(图 3C),因此,NWW 向断层是尕林格矿区重要的控矿构造。

不同矿群的矿体多呈层状、似层状、透镜状。其矿石类型也不尽相同, I 和 III 矿群以透辉石矽卡岩磁铁矿矿石为主; II 矿群以蛇纹石交代岩磁铁矿-镁磁铁矿-磁黄铁矿矿石为主,局部地段可见钴矿石和金矿石; IV 和 V 矿群以透辉石矽卡岩磁铁矿-磁黄铁矿矿石以及蚀变安山岩磁铁矿-磁黄铁矿矿石为主,局部地段可见黄铜矿矿石; VI 矿群以石榴子石辉石矽卡岩方铅矿和闪锌矿矿石为主,局部地段可见磁铁矿矿石和含银矿石。I、II 和 III 矿群贫硫,而 IV、V 和 VI 矿群则相对富硫,这可能与滩间山群的蚀变安山岩有关。从整个成矿带来看,其他矿区的未蚀变安山岩含有星点状磁黄铁矿。

各矿群的矿石特征如表 1 所示。

2.2 成矿期次划分及矽卡岩矿物生成顺序

本次研究根据 I 矿群 ZK16303、II 矿群 ZK2404、IV 矿群 ZK4204、VI 矿群 ZK26006 钻孔岩芯,通过镜下鉴定和电子探针分析,并与其他已知矽卡岩矿床(Newberry, 1998; Foster, 2004; Kwak, 1994)的矿物生成顺序进行对比,划分了成矿阶段。归纳起来,尕林格矽卡岩矿床的生成可分为 3 个期次,即矽卡岩期、退化蚀变期、金属硫化物期,其中,矽卡岩期又分为矽卡岩早期阶段和矽卡岩晚期阶段。各期次生成矿物的顺序见图 4。

矽卡岩早期阶段 接触带附近的围岩发生广泛的热接触变质作用,形成了各类角岩、大理岩、硅灰石、镁橄榄石等。通过 Si、Al、Fe、Mg 等元素的带入和带出形成了不同的矽卡岩矿物,主要为透辉石、钙铝榴石等。相邻的花岗岩类岩体提供了 Si、Al、Fe、Mg,并与矽卡岩形成过程中释放出来的 Ca 结合形成了石榴子石,主要赋存在火成岩与大理岩之间;而辉石的赋存位置是变化的,主要取决于大理岩中 Mg 含量的高低。石榴子石的化学成分端员以钙铝榴石($\text{Gr}_{67\sim 99}$)为主,辉石的成分端员以透辉石($\text{Di}_{96\sim 98}$)为主。该阶段所形成的硅灰石代表着交代的前锋,随着交代作用的增强,前锋不断向外移动,原矽卡岩脉被辉石石榴子石矽卡岩或符山石石榴子石矽卡岩所替代(毛景文等, 1996)。镁橄榄石大部分都被后期蛇纹石交代(图 5A)。该阶段内几乎未见金属矿物的生成。

矽卡岩晚期阶段 主要形成钙铁辉石、钙铁榴石等含铁较高的硅酸盐矿物。该阶段形成的矽卡岩矿物的温度明显低于早期阶段的钙铝榴石和硅灰石组合,并且远离岩体。石榴子石的化学成分端员以

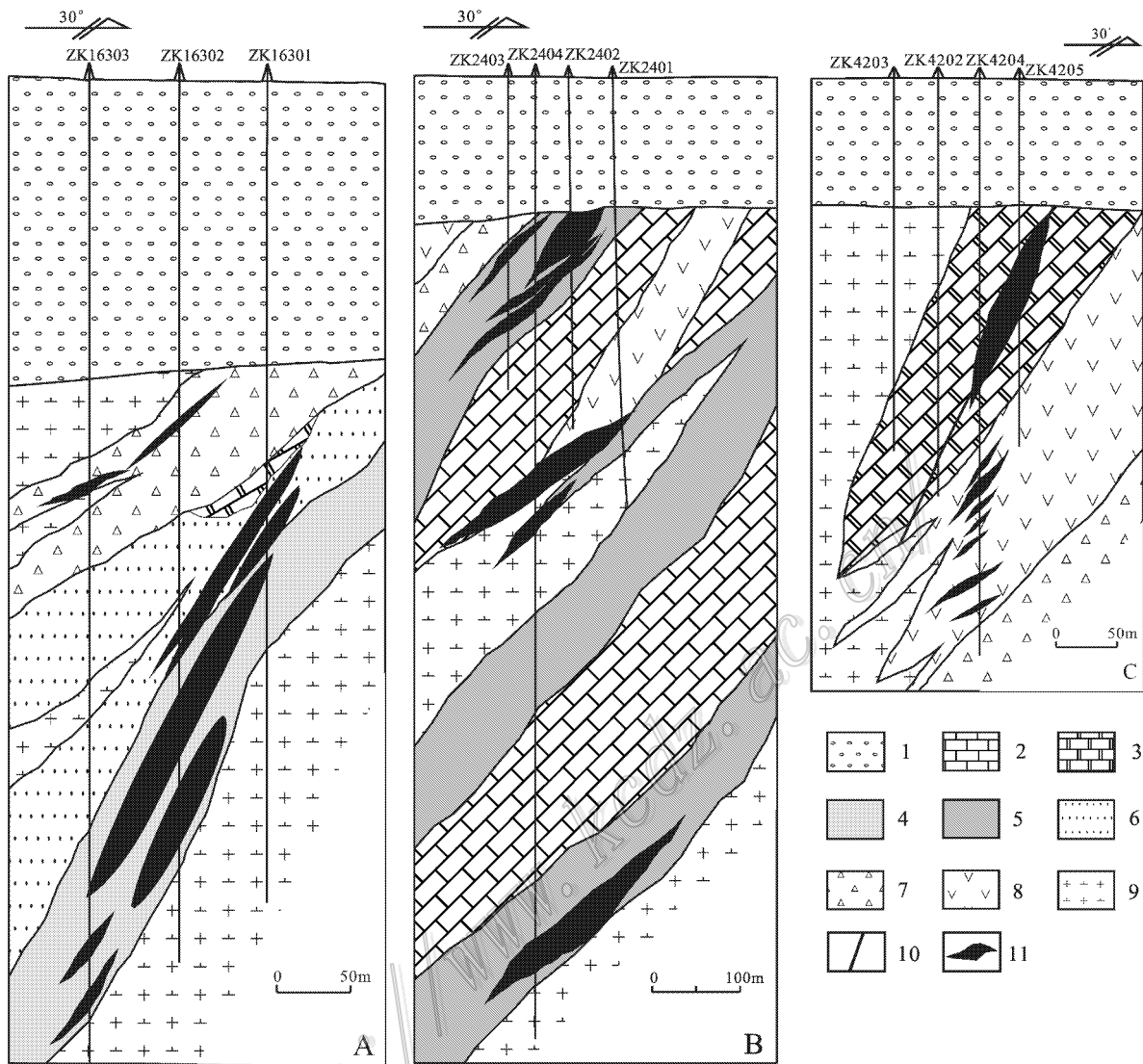


图 3 尔林格砂卡岩矿床地质剖面图

A. I 矿群 163 线地质剖面图; B. II 矿群 24 线地质剖面图; C. IV 矿群 42 线地质剖面图

1—第四系; 2—7—奥陶系—志留系滩间山群: 2—灰岩; 3—大理岩; 4—石榴子石砂卡岩; 5—蛇纹石交代岩; 6—透辉石砂卡岩; 7—硅质岩; 8—蚀变安山岩; 9—花岗闪长岩; 10—断层; 11—矿体

Fig. 3 Geological section of the Galinge skarn deposit

A. Geological section along No. 163 exploration line in No. I ore cluster; B. Geological section along No. 24 exploration line in No. II ore cluster; C. Geological section along No. 42 exploration line in No. IV ore cluster

1—Quaternary; 2—7—Ordovician Tanjianshan Group: 2—Limestone; 3—Marble; 4—Garnet skarn; 5—Serpentin metasomatite; 6—Diopsite skarn; 7—Quartzite; 8—Altered andesite; 9—Granodiorite; 10—Fault; 11—Ore body

钙铁榴石(Ad_{78-98})为主,辉石的成分端员以钙铁辉石为主(Hd_{68-84})。

退化蚀变期 其标志是生成大量细粒磁铁矿以及含水硅酸盐矿物(绿钙闪石、绿帘石、铁阳起石等),并形成少量的石榴子石和辉石(其成分端员见图 7A 和 7B)。早期的砂卡岩矿物相主要是无水的,

而晚期的砂卡岩矿物相则主要是含水的(Zaw et al., 2000),后者总是交代前者。此时期生成的磁铁矿的特点是粒度细,为早期磁铁矿(第一世代),具浸染状构造,明显地交代辉石和石榴子石,具交代溶蚀结构、溶蚀胶结结构、包含结构,叠加于早期砂卡岩之上,主要分布于早期生成的辉石、石榴子石颗粒间。

表 1 尕林格矿区诸矿群矿石特征
Table 1 Characteristics of different ore cluster in the Galinge ore district

	I	II	III	IV	V	VI
控矿因素	矿体产于花岗闪长岩体与滩间山群钙质大理岩接触带内	矿体产于花岗闪长岩与滩间山群白云质大理岩接触带内	矿体产于花岗闪长岩与滩间山群钙质大理岩接触带 0~1.5 km 内	矿体产于花岗闪长岩体与滩间山群外接触带 1.5~4 km 的 NWW 向构造破碎带内	矿体产于花岗闪长岩体与滩间山群外接触带 4~5.5 km 的 NWW 向构造破碎带内	矿体上部产于花岗闪长岩体与滩间山群大理岩外接触带 5.5~7 km 的 NWW 向构造破碎带内,下部产于接触带内
含矿岩性	透辉石砂卡岩	蛇纹石交代岩	透辉石砂卡岩	钙铁辉石砂卡岩、蚀变安山岩	钙铁辉石砂卡岩、蚀变安山岩	钙铁辉石砂卡岩、石榴子砂卡岩
矿体形态	透镜状、似层状	似层状、透镜状	似层状、透镜状	透镜状	层状、似层状、透镜状	透镜状
$w(\text{TFe})/\%$	39.78	21.68~31.55	30.05~57.51	31.76	46.67	40.94
$w(\text{Pb}+\text{Zn})/\%$				3.66		3.80
$w(\text{Pb}/\text{Zn})\%$						Pb 2.32 Zn 1.48
$w(\text{Au})/\text{g/t}$		3.04~8.01			0.72	
$w(\text{Co})/\text{g/t}$		0.022~0.125				
$w(\text{Cu})/\%$					0.1~0.12	
脉石矿物	透辉石、石英、白云石、方解石	镁橄榄石、粒硅镁石、蛇纹石、透辉石、石英、白云石、方解石、磷灰石、黄铁矿	透辉石、石英、白云石、方解石	绿钙闪石、石英、白云石、铁阳起石、透辉石、钙铁辉石、绿帘石、磷灰石、方解石、绿泥石	绿钙闪石、铁阳起石、钙铁辉石、石榴子石、绿帘石、绿泥石	石英、锰钙铁辉石、钙铁辉石、钙铁榴石、钙铝榴石、绿帘石、方解石、硅灰石、钙长石、磷灰石、萤石、绿泥石
矿石矿物	磁铁矿	镁磁铁矿、磁铁矿	磁铁矿	磁铁矿、磁黄铁矿、少量黄铜矿、方铅矿、闪锌矿	磁铁矿、磁黄铁矿、少量黄铜矿	以方铅矿、闪锌矿为主,含少量磁铁矿、磁黄铁矿
资料来源	本文	本文	①	本文	①	本文

金属硫化物期 主要形成金属硫化物。金属硫化物共生关系极为密切,闪锌矿、磁黄铁矿、黄铁矿形成较早,随之为钴、金、方铅矿、黄铜矿;同时,继续形成含水硅酸盐矿物(绿泥石、蛇纹石),以及磷灰石、石英、方解石、萤石等。

3 砂卡岩矿物成分分析

本次研究主要通过电子探针对尕林格矿区的砂卡岩矿物进行化学成分分析,从而对其砂卡岩矿物进行化学分带和矿物组合划分。电子探针分析在中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室完成。测试仪器为日本产 JXA-8230 电子探针仪。

根据矿物的主要化学成分分子百分含量,对照《系统矿物学》(王濮等,1984),进行矿物定名。应用

Geokit 软件(路远发,2004)进行石榴子石的化学成分计算,单斜辉石、角闪石、绿帘石、绿泥石类矿物的化学成分计算则应用电脑程序 Minpet 2.02 完成。根据国际矿物学会 1978 年和 1988 年提出的标准,对辉石族和角闪石族矿物进行具体划分。在计算绿钙闪石的化学成分时,先根据电差价法原理把全铁(TFeO)划分为 FeO 和 Fe₂O₃ 之后,再使用 Minpet 2.02 程序进行计算。

3.1 橄榄石族及其蚀变矿物

电子探针分析结果显示,尕林格矿区的橄榄石主要为镁橄榄石(表 2),主要分布于 II 矿群,为砂卡岩期早期阶段的产物。镜下观察显示,镁橄榄石不同程度地被蛇纹石交代(图 5A)。

蛇纹石主要产于退化蚀变期,交代早期富含 Mg 的砂卡岩矿物(如镁橄榄石和粒硅镁石等);在尕林

① 青海省有色地勘局地质矿产勘察院. 2007. 青海省格尔木市尕林格铁矿区 V 矿群富铁矿详查地质报告. 内部资料.

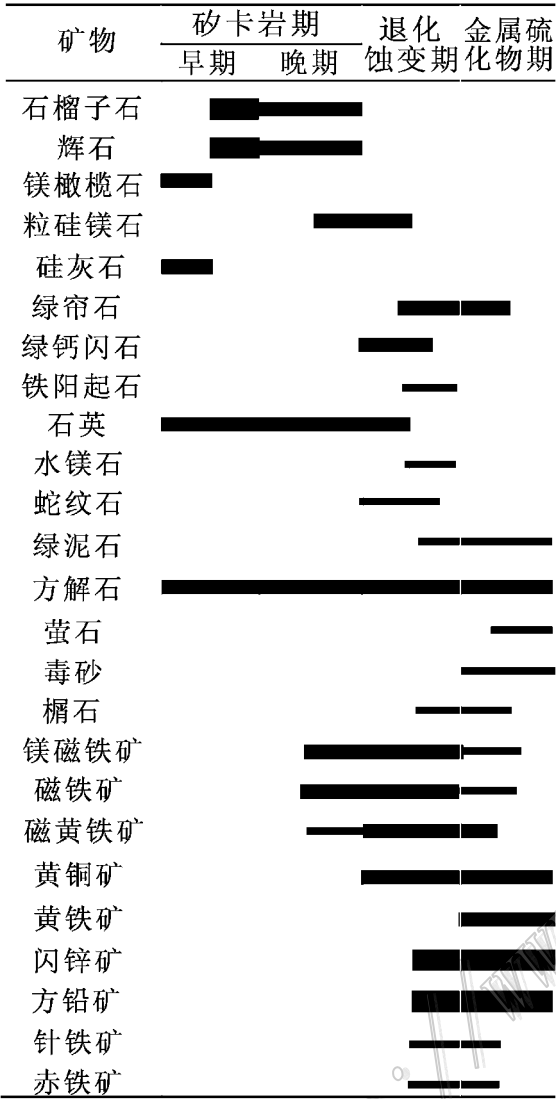


图 4 尕斯库勒湖铁床砂卡岩矿物和金属矿物的矿物组合共生关系

Fig. 4 Paragenetic relationships of skarn and ore mineral assemblages from the Galinge skarn deposit

格矿区,主要见于Ⅱ矿群,与镁橄榄石、粒硅镁石、斜绿泥石、磁铁矿、镁磁铁矿等共生。镜下观察显示,部分蛇纹石呈粒状(图 5C),推测为交代镁橄榄石和粒硅镁石而成。蛇纹石的化学组成见表 2。

3.2 粒硅镁石及其蚀变矿物

尕斯库勒湖矿区内的粒硅镁石及其蚀变矿物产于花岗闪长岩与白云质大理岩接触带的蛇纹石交代砂卡岩中。粒硅镁石的化学式为 $Mg_5[SiO_4]_2(OH,F)$,其中的 Mg^{2+} 可部分被 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 和 Ti^{2+} 所置换,其 $w(F)$ 为 7.003%~8.716%, $w(FeO)$ 为 2.685%~3.292%, $w(Al_2O_3)$ 为 0~0.029% (表 3)。从蚀变来

看,粒硅镁石除被蛇纹石完全交代外,部分还被 Al_2O_3 以类质同象形式替代了 MgO ,其 $w(Al_2O_3)$ 为 14.286%~15.171% (表 3), MgO 含量则随 Al_2O_3 含量的增加而减小,并且, F^- 的含量也依次降低,但 $(OH)^-$ 的含量则随 Al_2O_3 含量的增加而增加。镜下观察可见,粒硅镁石干涉色二级黄绿至二级橙红,见沿结合面的聚片双晶,并且被蛇纹石交代(图 5M)。

3.3 辉石族

本次研究测试了尕斯库勒湖矿区内辉石砂卡岩和角闪石砂卡岩中辉石的成分。在该矿区,辉石分布普遍,主要为单斜辉石。单斜辉石主要为透辉石、钙铁辉石和钙锰辉石组成的固熔体,因此,在分析单斜辉石时,需要考虑到各成分端员所占的比例。辉石砂卡岩必须通过富 Si 含铁流体与含 Ca、Mg 岩层发生交代反应而形成 (Gaspar et al., 2000)。

在尕斯库勒湖矿区,对应于早期原岩改造过程的辉石砂卡岩,其矿物组合主要为(钙铁辉石+钙铁榴石)组合和(钙铁辉石+铁阳起石+绿钙闪石)组合,这些矿物组合可能是由热变质或者早期交代变质所形成。但是,热变质所形成的辉石通常含 Fe 很低,其 $Hd < 25$,与交代变质所形成的辉石(Hd_{20-70})相反 (Newberry, 1982)。对应于热液蚀变改造的含水矿物组合为(蛇纹石+透辉石),通常含 Fe 更低。Ⅵ矿群的 Mn 含量 [$w(MnO)$ 为 3.43%~6.19% (表 4)] 明显不同于其他矿群,在单斜辉石化学组成三元图(图 6A)内明显偏向钙锰辉石端员。由表 4 可见,不同的矿群所发育的辉石种类也不同,Ⅱ矿群主要发育纯净的透辉石,并与蛇纹石伴生,对应于砂卡岩期热变质作用,而蛇纹石则为后期热液蚀变作用的产物;Ⅳ矿群主要发育钙铁辉石(图 7A);Ⅵ矿群主要发育锰钙铁辉石、钙铁辉石和透辉石。从不同矿群所发育的矿种上来看,Ⅱ矿群以 Fe 为主,Ⅳ矿群发育 Fe、Pb、Zn,伴生少量 Cu,Ⅵ矿群以 Pb、Zn 为主,伴生 Fe。对比来看,透辉石主要与 Fe 有关,钙铁辉石与 Fe、Pb、Zn 有关,而锰钙铁辉石则主要与 Pb、Zn 有关(图 7B)。尕斯库勒湖矿区各矿群的辉石成分端员见图 6A。

3.4 石榴子石

在尕斯库勒湖矿区,石榴子石的主要类型为钙铁榴石-钙铝榴石系列,不同矿群内的石榴子石的成分是不同的(表 5),即便是同一矿群,石榴子石的成分端员(图 6B)也分主次。但钙铝铁榴石总体上有一种趋

表 2 尔林格矿区代表性镁橄榄石及其蚀变矿物蛇纹石的电子探针分析

Table 2 Electron microprobe analyses of representative forsterite and its altered serpentine from the Galinge skarn deposit

组分	2404-5	2404-5	2404-5	2404-8-1	2404-8-2	2404-28-4-1	2404-28-2	2404-28-3
$w(B)/\%$								
SiO ₂	42.209	42.319	41.909	42.192	42.010	42.615	42.026	42.011
TiO ₂		0.008	0.014		0.029	0.063		0.016
Al ₂ O ₃		0.023	0.070	0.430	1.290	0.315	0.277	0.279
FeO	0.963	0.970	1.125	1.175	1.290	3.210	2.900	3.027
MnO		0.062	0.098	0.666	0.325	0.145	0.197	0.131
MgO	55.981	55.994	55.771	40.33	40.389	39.752	39.502	39.103
CaO	0.003	0.001	0.003	0.108	0.027	0.090	0.095	0.080
Na ₂ O		0.004		0.021				0.028
K ₂ O	0.017	0.017	0.040		0.004	0.015		
总和	99.24	99.34	99.03	84.92	85.36	86.21	85.00	84.68
以氧原子数为基础计算的阳离子数								
氧原子数	4	4	4	18	18	18	18	18
Si	1.001	1.002	0.998	4.02	3.976	4.03	4.026	4.04
Al		0.001	0.002	0.048	0.144	0.035	0.031	0.032
Ti				0.002	0.004		0.001	
Fe ²⁺	0.019	0.019	0.022	0.094	0.102	0.254	0.232	0.243
Mn	0.001		0.002	0.054	0.026	0.012	0.016	0.011
Mg	1.978	1.976	1.978	5.728	5.698	5.604	5.642	5.606
Ca				0.011	0.003	0.009	0.01	0.008
Na			0.004				0.005	
K						0.002		
Fe/Fe + Mg	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.04	0.04	0.04
矿物名称	镁橄榄石	镁橄榄石	镁橄榄石	蛇纹石	蛇纹石	蛇纹石	蛇纹石	蛇纹石

表 3 尔林格矿区代表性粒硅镁石及其蚀变未知矿物的电子探针分析

Table 3 Electron microprobe analyses of representative chondrodite and its unknown altered mineral from the Galinge skarn deposit

组分	27601-6-4	27601-6-5	27601-6-6	27601-6-7	27601-6-4	27601-6-5	27601-6-6
$w(B)/\%$							
SiO ₂	33.871	34.135	33.830	33.357	33.293	33.177	34.113
TiO ₂	0.264	0.104	0.125	0.031	0.019	0.010	0.019
Al ₂ O ₃	0	0	0.029	0.004	14.319	14.286	15.171
FeO	2.942	3.292	2.685	3.098	2.039	1.885	2.015
MnO	0.107	0.031	0.066	0	0	0.038	0
MgO	55.225	55.403	55.401	54.558	33.893	34.023	34.914
CaO	0	0.016	0.043	0.041	0.031	0.031	0.028
K ₂ O	0.009	0.027	0.035	0.006	0.005	0	0.007
F	8.402	8.490	7.003	8.716	0.293	0.449	0.836
总和	100.820	101.498	99.217	99.811	83.892	83.899	87.103
以氧原子数为基础计算的阳离子数							
氧原子数	10	10	10	10	10	10	10
Si	2.848	2.854	2.845	2.843	3.250	3.241	3.225
Ti	0.017	0.007	0.008	0.002	0.001	0.001	0.001
Al	0.000	0.000	0.003	0.000	1.648	1.645	1.691
Fe	0.207	0.230	0.189	0.221	0.166	0.154	0.159
Mn	0.008	0.002	0.005	0.000	0.000	0.003	0.000
Mg	6.920	6.903	6.943	6.930	4.931	4.953	4.919
Ca	0.000	0.001	0.004	0.004	0.003	0.003	0.003
K	0.001	0.003	0.004	0.001	0.001	0.000	0.001
F	2.234	2.245	1.862	2.349	0.090	0.139	0.250
矿物名称	粒硅镁石	粒硅镁石	粒硅镁石	粒硅镁石	未知矿物	未知矿物	未知矿物

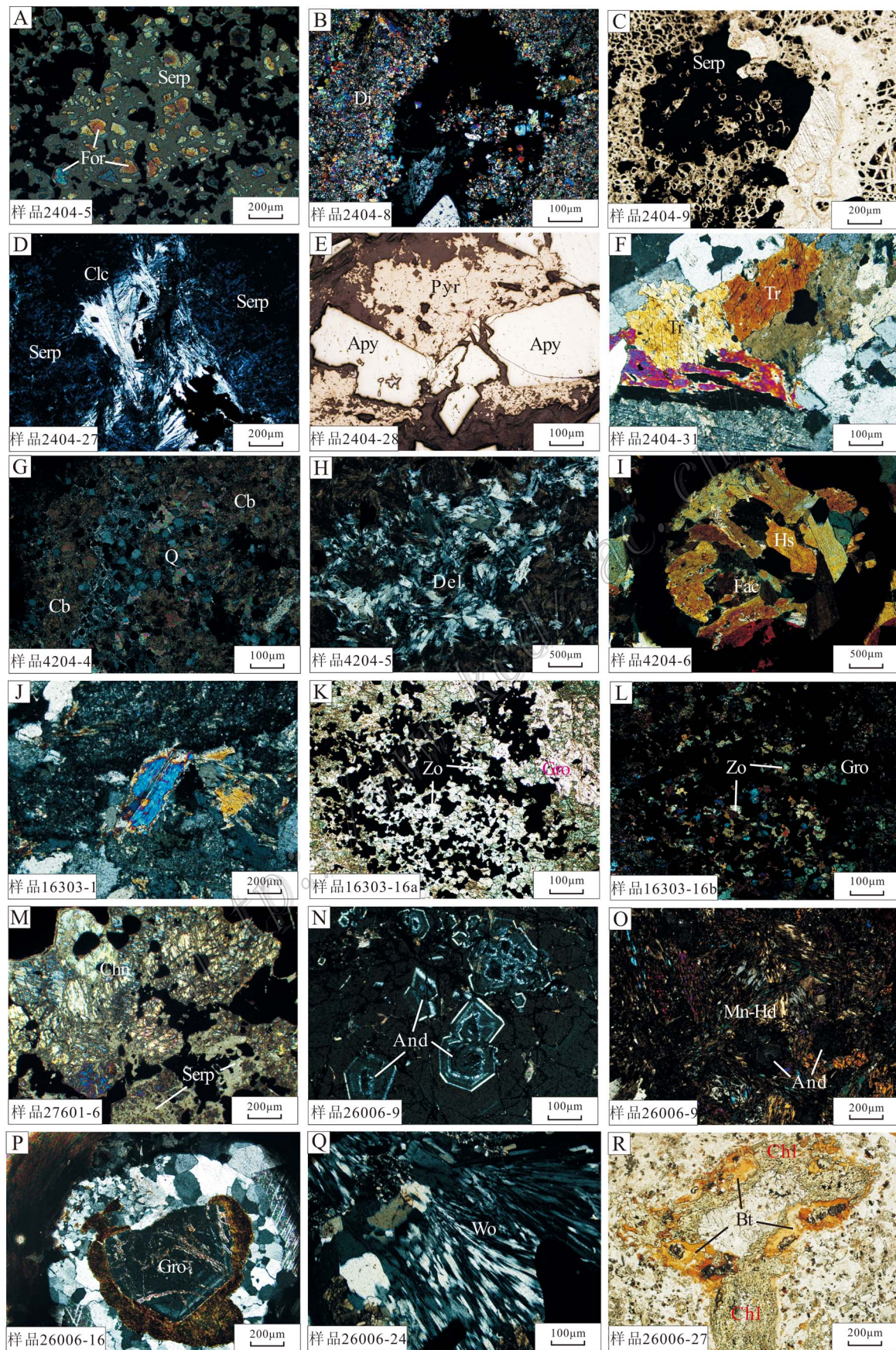


图 5 尕林格砂卡岩矿床部分样品显微镜照片

A. 蛇纹石(Serp)交代镁橄榄石(For)(样品 2404-5);B. 粒状透辉石(Di)砂卡岩(样品 2404-8);C. 粒状蛇纹石(Serp)交代岩(样品 2404-9);D. 蛇纹石磁铁矿(Mt)矿石,斜绿泥石(Clc)发育,呈板状集合体(样品 2404-27);E. 含毒砂(Apy)、磁黄铁矿(Pyr)方解石脉(样品 2404-28);F. 花岗闪长岩,角闪石(Tr)具有明显的闪石式解理(样品 2404-31);G. 变质石英砂岩、粉砂岩,石英(Q)呈鲕粒状(样品 4204-4);H. 含铁叶绿泥石蚀变安山岩,铁叶绿泥石(Del)呈放射状集合体,干涉色一级灰白(样品 4204-5);I. 含绿钙闪石蚀变安山岩,铁阳起石(Fac)发育,绿钙闪石(Hs)单偏光镜下具有很多色性,板状,正交偏光镜下(样品 4204-6);J. 花岗闪长岩,角闪石(Tr)被透辉石(Di)交代,可见边部角闪石残留(样品 16203-1);K. 单偏光,含黝帘石(Zo)钙铝榴石(Gro)砂卡岩,黝帘石呈粒状集合体,单偏光镜下呈淡绿色,具弱多色性,钙铝榴石全消光(样品 16303-16a);L. 正交偏光,黝帘石(Zo)具有鲜艳而明亮的二至三级彩色干涉色(样品 16303-16b);M. 蛇纹石(Serp)交代粒硅镁石(Chn)(样品 27601-6);N. 含钙铁榴石(And)砂卡岩(样品 26006-9);O. 含钙铁榴石、锰钙铁辉石砂卡岩. 钙铁榴石(And)正交偏光镜下具有明显的环带状构造,全消光 锰钙铁辉石(Mn-Hd)交代石榴子石,呈柱状,正交偏光镜下具有二级至三级干涉色(样品 26006-9);P. 含钙长石、硅灰石和钙铝榴石(Gro)砂卡岩(样品 26006-16);Q. 硅灰石大理岩,硅灰石(Wo)正交偏光镜下低干涉色,集合体呈放射状(样品 26006-24);R. 花岗闪长岩,黑云母(Bi)被绿泥石(Chl)交代残留(样品 26006-27)

表 4 尕林格矿区代表性电子探针分析

Table 4 Electron microprobe analyses of representative pyroxenes from the Galinge skarn deposit									
组分	2404-8	2404-11	4204-6	4204-18	26006-9-1	26006-9-2	26006-25	26006-26	26006-27
	II	II	IV	IV	VI	VI	VI	VI	VI
	$w(B)/\%$								
SiO ₂	55.26	54.22	49.77	48.78	51.06	50.66	51.97	50.78	54.28
TiO ₂	0.11		0.07	0.11	0.03		0.00	0.43	0.06
Al ₂ O ₃	0.45	0.20	0.63		1.91	0.01	0.02	6.00	0.10
Cr ₂ O ₃	0.01	0.00		0.01	0.02	0.02	0.02		0.04
FeO	0.93	0.69	23.82	20.21	12.99	17.60	11.84	2.40	9.31
MnO	0.12	0.13	0.41	0.47	6.19	3.43	0.93	0.03	0.45
MgO	17.99	17.58	0.13	4.96	6.31	5.16	10.14	15.68	13.47
CaO	25.71	26.00	22.58	23.30	23.38	23.84	24.33	25.49	20.38
Na ₂ O	0.00	0.02	0.00	0.05		0.03			1.93
K ₂ O	0.01				0.01		0.03		
总和	100.59	98.84	97.41	99.80	99.97	100.75	99.28	100.81	100.02
以 6 个氧原子数为基础计算的阳离子数									
Si	1.989	1.989	0.992	1.941	2.006	1.996	2.000	1.840	2.025
Al ^(IV)	0.011		0.008		0.059				0.160
Al ^(VI)	0.008		0.022	0.030			0.001	0.097	0.004
Ti	0.003		0.002	0.003	0.001		0.000	0.012	0.002
Cr						0.001	0.001		0.001
Fe ³⁺		0.022		0.040		0.012		0.059	0.119
Fe ²⁺	0.028		0.799	0.630	0.428	0.567	0.381	0.014	0.168
Mn	0.004	0.004	0.014	0.016	0.206	0.114	0.030	0.001	0.014
Mg	0.965	0.961	0.187	0.294	0.370	0.303	0.582	0.847	0.749
Ca	0.991	1.022	0.968	0.993	0.984	1.008	1.003	0.990	0.815
Na		0.001		0.004		0.002			0.140
K			9.77		0.001		0.001		
Jo	0.35	0.42	1.39	1.62	20.54	11.48	3.06	0.11	1.34
Di	96.84	97.33	18.68	30.03	36.85	30.40	58.57	92.04	71.28
Hd	2.81	2.22	79.93	68.27	42.61	58.12	38.37	7.35	27.96
矿物名称	透辉石	透辉石	钙铁辉石	钙铁辉石	锰钙铁辉石	锰钙铁辉石	透辉石	透辉石	透辉石

势,即钙铁榴石总是与钙铁辉石相关(图 5O),而钙铝榴石总是趋向于绿帘石(图 5K,L)(Verkaerena et al., 1979)。

在该矿区,石榴子石砂卡岩主要分布于Ⅵ矿群内。钙铝榴石产于砂卡岩化蚀变花岗闪长岩内及内中。整体来说,石榴子石的生成顺序还是比较明显

带靠近岩体的石榴子石砂卡岩内,靠近岩体处,Al₂O₃ 含量偏高,有利于交代而形成钙铝榴石,如样品 26006-27-2 为较纯的钙铝榴石,产于岩体内。较纯净的钙铁榴石反映出钙铝榴石-钙铁榴石生长末期的环境富铁,如样品 26006-9-1 就产于富磁铁矿的,从内带到外带,石榴子石化学成分端员的百分比

逐次变化(图 6B)。

3.5 角闪石

角闪石交代岩一般形成于矽卡岩晚期,属晚期矽卡岩阶段的产物,常由交代早期的无水矽卡岩或矽卡岩旁侧的碱质交代岩而形成(赵一鸣等,1990)。因此,其生成一般晚于早期无水矽卡岩矿物。

尕林格矿区内,主要发育绿钙闪石和铁阳起石(表 6 和图 8A、8B),与钙铁辉石共生,集中产于Ⅳ矿群的蚀变安山岩中。镜下观察显示,铁阳起石叠加在辉石之上(图 5I),为晚期交代蚀变矿物。关于绿钙闪石,在国外的一些矽卡岩铁矿中早就有所报道(Krutov,1936; Dick et al., 1979),主要产于富钠碱性岩中,在化学成分上较其他角闪石类矿物含氯特别高,Al₂O₃含量也比较高,K₂O和Na₂O含量也很

可观,而 SiO₂ 含量相对较低。在国内,如新疆磁海、福建马坑和挂山等铁矿床中,都发现有含氯绿钙闪石,其化学特征与国外发现的绿钙闪石很相似(盛继福,1985;赵一鸣等,1980)。绿钙闪石主要与高铝的基性和中-基性侵入岩有关,有些矿区虽无中-基性侵入岩,但也有高铝的绿钙闪石产出,这可能是由于围岩除灰岩外,还发育有凝灰质粉砂岩和安山岩类所致(赵一鸣等,2003)。尕林格矿区绿钙闪石的产出环境属于后者,在蚀变安山岩中发育大量的绿钙闪石,并伴生有铁阳起石、磁铁矿、磁黄铁矿和少量黄铜矿。绿钙闪石的大量出现,说明在矽卡岩期晚期阶段,流体中挥发组分活动强烈,正是由于大量氯元素在绿钙闪石中富集,导致流体中挥发分急剧减少,使金属元素的迁移受到限制,从而析出沉淀而形成矿石。

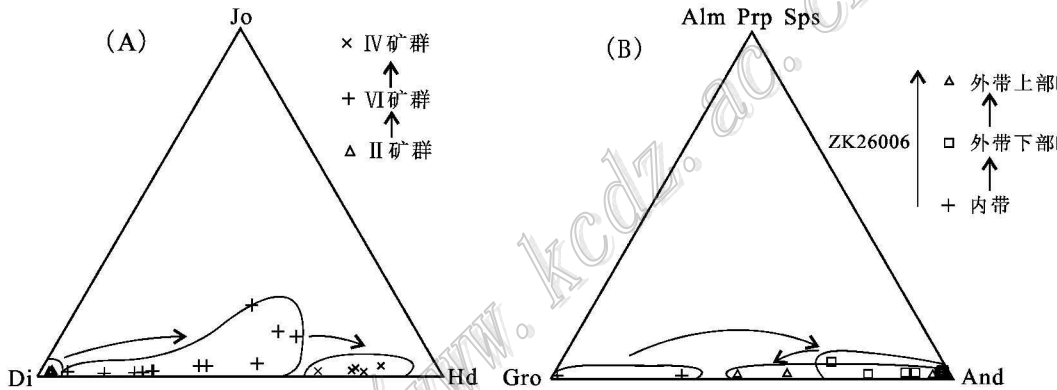


图 6 尕林格矽卡岩矿床单斜辉石和石榴子石的成分特征

A. 单斜辉石成分三元图; B. 石榴子石成分三元图; Jo—钙锰辉石; Di—透辉石; Hd—钙铁辉石; Alm—铁铝榴石; And—钙铁榴石; Gro—钙铝榴石; Prp—镁铝榴石; Sps—锰铝榴石

Fig. 6 Composition characteristics of pyroxene and garnet in the Galinge skarn deposit

A. Ternary plot of pyroxene composition; B. Ternary plot of garnet composition; Jo—Johannsenite; Di—Diopside; Hd—Hedenbergite; Alm—Almandine; And—Andradite; Gro—Grossular; Prp—Pyrope; Sps—Spessartine

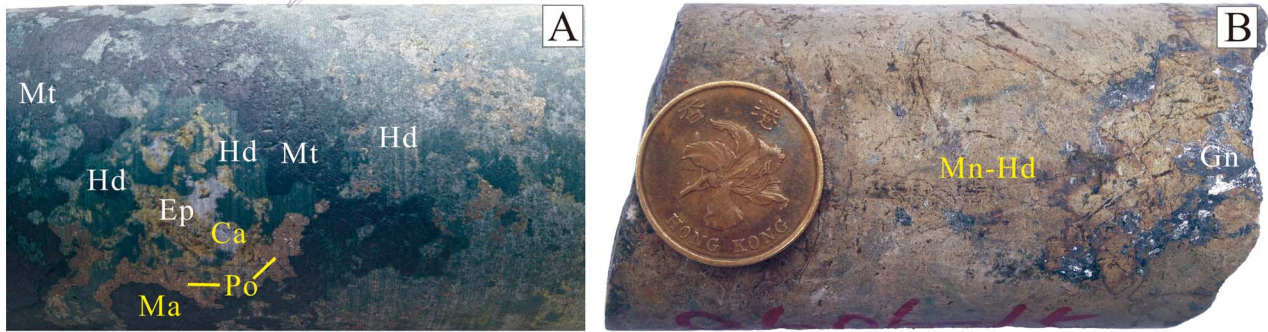


图 7 尕林格矿区辉石族矿物野外手标本照片

Ca—方解石; Ep—绿帘石; Gn—方铅矿; Hd—钙铁辉石; Mt—磁铁矿; Mn-Hd—锰-钙铁辉石; Po—磁黄铁矿

Fig. 7 Hand specimen photographs of pyroxenes in the Galinge ore district

Ca—Calcite; Ep—Epidote; Gn—Galena; Hd—Hedenbergite; Ma—Magnetite; Mn-Hd—Mn-hedenbergite; Po—Pyrrhotite

表 5 尕林格矿区代表性石榴子石的电子探针分析

Table 5 Electron microprobe analyses of representative garnet from the Galinge skarn deposit

组分	26006-25-1	26006-25-2	26006-25-3	26006-27-3	26006-27-1	26006-27-2	26006-9-1	26006-9-2	26006-9-3	26006-10	26006-15
	$w(B)/\%$										
SiO ₂	36.20	36.64	35.74	33.82	37.71	38.02	35.93	37.00	35.97	37.12	35.97
TiO ₂	0.03			7.54	1.30	0.11			0.01	0.49	0.01
Al ₂ O ₃	0.47	6.02	2.57	1.31	13.44	21.82	0.80	8.86	0.24	10.41	
Cr ₂ O ₃		0.01		0.60	0.02	0.03				0.01	
FeO	27.68	20.82	24.87	19.80	9.93	0.24	27.23	17.66	28.46	13.90	28.07
MnO	0.52	0.55	0.37	0.18	0.15	0.04	0.35	0.28	0.44	0.28	0.45
MgO	0.09	0.08	0.13	0.63			0.09	0.01		0.24	0.18
CaO	32.06	33.35	32.49	33.36	35.76	37.30	33.41	33.99	33.25	34.99	33.28
总和	97.05	97.47	96.17	97.24	98.31	97.56	97.81	97.80	98.37	97.44	97.96
以 24 个氧原子数为基础计算的阳离子数											
Si	3.042	3.006	3.010	2.824	2.976	2.941	3.002	2.995	2.997	2.991	3.008
Ti	0.002			0.474	0.077	0.006			0.001	0.030	0.001
Al	0.046	0.582	0.255	0.129	1.250	1.989	0.079	0.845	0.024	0.988	
Cr		0.001		0.039	0.001	0.002				0.001	
Fe ³⁺	1.924	1.413	1.738	1.383	0.656	0.016	1.902	1.158	1.978	0.937	1.963
Fe ²⁺	0.021	0.015	0.014				0.000	0.037	0.004		
Mn	0.037	0.038	0.026	0.013	0.010	0.003	0.025	0.019	0.031	0.019	0.032
Mg	0.011	0.009	0.017	0.079			0.011	0.001		0.029	0.022
Ca	2.887	2.931	2.933	2.985	3.024	3.091	2.990	2.948	2.968	3.021	2.982
Pyr	0.37	0.31	0.56	2.56			0.36	0.02		0.95	0.74
Spe	1.24	1.29	0.88	0.41	0.33	0.09	0.81	0.63	1.03	0.62	1.04
Alm	0.71	0.51	0.47					1.24	0.15		
Gross	0.02	27.07	10.90	27.69	67.18	99.04	4.52	40.28	0.02	52.62	1.23
And	97.65	70.79	87.19	67.41	32.41	0.77	94.30	57.82	98.80	45.79	96.99
矿物名称	钙铁榴石	钙铁榴石	钙铁榴石	钙铁榴石	钙铝榴石	钙铝榴石	钙铁榴石	钙铁榴石	钙铁榴石	钙铝榴石	钙铁榴石

表 6 尕林格矿区代表性角闪石的电子探针分析

Table 6 Electron microprobe analyses of representative amphibole from the Galinge skarn deposit

组分	4204-14	4204-7	4204-6-1	4204-6-2	4204-18-1	4204-18-2	4204-15-1	4204-15-2
	$w(B)/\%$							
SiO ₂	37.93	37.08	37.74	47.20	51.56	51.30	49.13	37.88
TiO ₂	0.60	0.77	0.27	0.04	0.02	0.07		0.45
Al ₂ O ₃	11.47	11.58	11.18	1.95	0.99	1.20	3.36	10.88
Fe ₂ O ₃	9.88	10.71	11.74					11.69
FeO	21.99	21.57	20.62	30.48	31.21	30.63	28.72	22.06
MnO	0.15	0.18	0.16	0.39	0.35	0.53	0.23	0.28
MgO	1.46	1.19	1.49	3.39	3.80	4.41	5.58	1.13
CaO	11.05	10.91	11.32	13.47	11.53	11.61	11.84	11.27
Na ₂ O	0.97	0.88	1.15	0.24	0.19	0.27	0.37	1.10
K ₂ O	3.15	3.42	3.16	0.41	0.23	0.25	0.60	2.91
总和	98.65	98.29	98.83	97.57	99.88	100.27	99.83	99.65
以 23 个氧原子数为基础计算的阳离子数								
Si	6.232	6.115	6.045	7.555	7.925	7.849	7.525	6.230
Al ^{IV}	1.665	1.822	1.895	0.368	0.075	0.151	0.475	1.697
Al ^{VI}	0.594	0.529	0.387	0.000	0.104	0.066	0.132	0.437
Ti	0.075	0.046	0.152	0.005	0.003	0.008	0.000	0.056
Fe ³⁺	1.242	1.528	1.550	0.665	0.967	0.901	0.716	1.464
Fe ²⁺	3.071	2.896	3.137	3.415	3.044	3.018	2.964	3.070
Mn	0.021	0.029	0.011	0.053	0.046	0.068	0.030	0.039
Mg	0.364	0.273	0.035	0.808	0.872	1.006	1.274	0.279
Ca	1.978	2.032	2.020	2.310	1.898	1.904	1.943	2.009
Na	0.315	0.369	0.296	0.073	0.055	0.080	0.109	0.355
K	0.671	0.634	0.770	0.084	0.044	0.048	0.117	0.617
阳离子总量	16.227	16.274	16.298	15.335	15.033	15.099	15.284	16.254
矿物名称	绿钙闪石	绿钙闪石	绿钙闪石	铁阳起石	铁阳起石	铁阳起石	铁阳起石	绿钙闪石

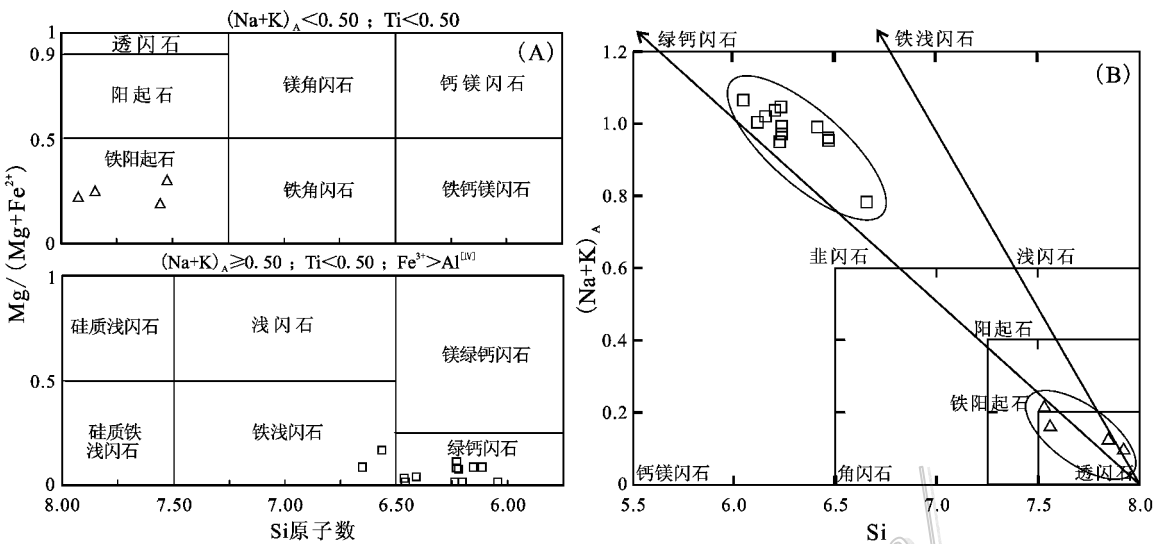


图 8 尕斯库勒湖铁床砂卡岩矿床钙角闪石的成分特征

A. 钙角闪石的分类(底图据 Leake,1978 ;Leake et al. , 1997) ;B. 钙角闪石的 Si-(Na+K)_A 图表(底图据 Gasper et al. , 2000 略有改动)

Fig. 8 Composition characteristics of amphibole in the Galinge skarn deposit

A. Classification of calcic amphibole (base map after Leake, 1978 ;Leake et al. , 1997) ;B. Si-(Na+K)_A diagram of calcic amphibole (base map after Gasper et al. , 2000)

3.6 绿帘石族

绿帘石主要形成于砂卡岩期晚期阶段。绿帘石中的 Fe 以 Fe³⁺ 呈八面体配位,其化学式为 Ca₂(Al₂Fe)Si₃O₁₂(OH)。绿帘石主要富含 Al(表 7),故

通常产于内砂卡岩带。低温钙质交代作用的主要特征是绿帘石化。

在尕斯库勒湖矿区,绿帘石分布广泛,可见于Ⅵ矿群的硅质岩内、砂卡岩化花岗闪长岩内,以及在内带砂卡岩中与钙铝榴石共生产出。

3.7 绿泥石族

绿泥石在砂卡岩矿床中主要形成于砂卡岩期后酸性淋滤阶段。Foster(1962)按化学成分,将绿泥石划分为 9 个变种。

由表 8 和图 9 可见,尕斯库勒湖铁床砂卡岩矿床内主要发育斜绿泥石、叶绿泥石、铁镁绿泥石、铁叶绿泥石和鲕绿泥石等常见的绿泥石族矿物。镜下观察显示,斜绿泥石呈长条形,有解理缝(图 5D),通常为交代金云母而形成(Zhao et al. , 2003),其成分中 Mg²⁺ 含量远大于 Fe²⁺,主要产于富镁质的岩石(如蛇纹岩等)中。铁镁绿泥石常见于花岗岩的裂隙中。叶绿泥石是绿泥石族中最常见的矿物之一,与斜绿泥石一样,可由铁镁质矿物经蚀变而形成,在砂卡岩矿床中常是辉石、角闪石、石榴子石的主要蚀变矿物。铁叶绿泥石属于富铁的绿泥石变种,主要产于基性火山岩、玄武岩、辉绿岩等岩石中。鲕绿泥石主要产于沉积型铁矿中,但也见于碳质砂岩、粉砂岩和灰岩的伴生层中,常与磁铁矿共生(王濮等,1984)。

表 7 尕斯库勒湖矿区代表性绿帘石的电子探针分析

Table 7 Electron microprobe analyses of representative epidote from the Galinge skarn deposit

组分	26006-8-1	26006-8-2	26006-6	26006-7
w(B)/%				
SiO ₂	38.18	38.23	39.27	39.031
TiO ₂	0.01	0.01	0.05	0.015
Al ₂ O ₃	24.94	24.19	26.74	24.562
FeO	8.80	9.76	7.68	10.785
MnO	0.04	0.34	0.64	0.144
MgO	0.08		0.03	
CaO	23.68	23.05	23.39	23.717
Na ₂ O			0.01	
总和	95.73	95.58	97.81	98.25
以 13 个氧原子数为基础计算的阳离子数				
Si	3.06	3.078	3.064	3.064
Al ^[IV]	2.354	2.294	2.457	2.271
Ti	0.001	0.001	0.003	0.001
Fe ³⁺	0.53	0.59	0.45	0.64
Mn	0.003	0.023	0.042	0.01
Mg	0.009		0.004	
Ca	2.034	1.988	1.955	1.995
Na			0.001	
总和	2.046	2.011	2.002	2.005
矿物名称	绿帘石	绿帘石	绿帘石	绿帘石

表 8 尕林格矿区代表性绿泥石的电子探针分析

Table 8 Electron microprobe analyses of representative chlorite from the Galinge skarn deposit

组分	2404-27	4204-8	4204-12	4204-14	4204-19	26006-10	26006-22	26006-26	26006-27
	Ⅱ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅵ	Ⅵ	Ⅵ	Ⅵ
					$w(B)/\%$				
SiO ₂	29.42	26.69	31.57	31.64	26.48	25.74	25.55	34.40	28.72
TiO ₂		0.07	0.07	0.04	0.01				0.03
Al ₂ O ₃	21.52	20.88	16.65	11.55	16.49	16.73	17.13	13.58	21.39
Cr ₂ O ₃	0.14	0.27	0.73	1.45	0.18	0.30	0.05	0.08	
FeO	1.26	36.82	36.48	37.49	38.07	30.31	41.57	0.64	24.63
MnO	0.04			0.14	0.45	1.85	2.80	0.07	0.38
MgO	32.21	3.46	3.78	6.09	5.83	9.79	2.01	35.90	9.53
CaO	0.04	0.08	0.26	0.61	0.21	0.15	0.04	0.09	1.81
Na ₂ O		0.24	0.01		0.04	0.03	0.01		0.03
K ₂ O	0.05	0.71	0.14		0.12				0.83
总和	84.54	89.09	89.23	88.29	89.15	84.78	89.41	84.73	87.43
以 13 个氧原子数为基础计算的阳离子数									
Si	2.820	2.936	3.412	3.521	2.963	2.930	2.934	3.274	3.023
Al ^[Ⅳ]	2.429	2.704	2.119	1.513	2.173	2.243	2.316	1.522	2.651
SUM	5.249	5.640	5.531	5.034	5.136	5.173	5.250	4.796	5.674
Al ^[Ⅵ]									
Ti	0.000	0.006	0.006	0.003	0.001				0.002
Fe ²⁺	0.101	3.387	3.297	3.488	3.563	2.886	3.992	0.051	2.167
Fe ³⁺									
Cr		0.012	0.023	0.064	0.128	0.016	0.027	0.004	0.007
Mn	0.003			0.013	0.043	0.179	0.272	0.006	0.034
Mg	4.601	0.567	0.610	1.010	0.973	1.662	0.345	5.094	1.495
Ca	0.004	0.010	0.030	0.073	0.025	0.018	0.005	0.009	0.204
Na	0.001	0.051	0.002		0.009	0.008	0.002		0.006
K	0.006	0.099	0.020		0.017				0.111
Fe/Fe+Mg	0.021	0.857	0.844	0.775	0.785	0.635	0.920	0.010	0.592
矿物名称	斜绿泥石	鲕绿泥石	铁叶绿泥石	铁叶绿泥石	鲕绿泥石	铁镁绿泥石	鲕绿泥石	叶绿泥石	铁镁绿泥石

从各矿群内绿泥石的发育情况(图 9)来看,Ⅱ矿群主要发育斜绿泥石,并且,主要产于蛇纹石交代岩中;Ⅳ矿群主要发育铁叶绿泥石,与绿钙闪石、阳起石等矽卡岩期后退化蚀变阶段的矿物共生,Ⅵ矿群内,不同的岩性段发育有不同种类的绿泥石,其中,在矽卡岩化花岗闪长岩中,主要发育叶绿泥石和铁镁绿泥石。

4 金属矿物化学成分

尕林格矿床各矿群内普遍发育有磁铁矿,但不同矿群内磁铁矿的化学成分明显不同(表 9)。

Ⅱ矿群中部分磁铁矿的 MgO 平均含量达到 7.7%左右,与其他矿群磁铁矿的 MgO 含量有很大区别。这种磁铁矿产在Ⅱ矿群的富 Mg 质蛇纹石矽卡岩中,其伴生矿物有镁橄榄石、粒硅镁石和斜绿泥石等。赵一鸣等(1998)认为,镁磁铁矿是浅成中-酸性

侵入体与富镁的白云石大理岩之间接触交代的产物,形成于浅成高温较氧化的环境。Ⅵ矿群中部分磁铁矿的 Al₂O₃ 含量也明显较其他矿群中的含量偏高。Архилленксва(1987)研究发现,镁和铝是以类质同象方式进入磁铁矿中,并指出,磁铁矿中镁的含量与其硬度有关。

5 矿化蚀变分带

依据镜下鉴定和电子探针分析结果,本文详细描述并记录了各岩性段的矿物共生次序。按照矿物的共生组合划分了 3 个成矿阶段,同一阶段内不同岩性段的矿物组合也不尽相同。在尕林格矿区,大致划分出 4 个不同的岩性单元:硅质岩单元,中-基性蚀变火山岩单元,大理岩及其交代矿物岩性单元,蚀变岩体单元。

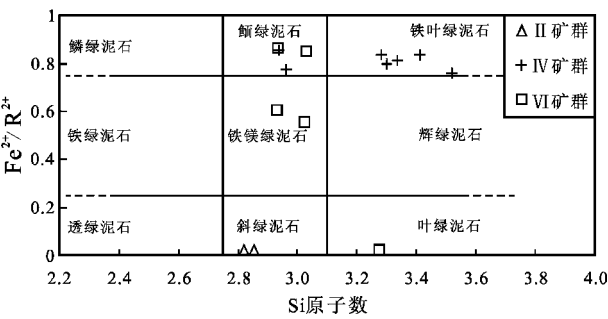


图 9 尕斯库勒湖铁钾矿床绿泥石的分类(底图根据 Foster, 1962)

Fig. 9 Classification of chlorite from the Galinge skarn deposit (base map after Foster, 1962)

表 9 尕斯库勒湖铁钾矿床代表性磁铁矿的电子探针分析

Table 9 Electron microprobe analyses of representative magnetite from the Galinge skarn deposit

组分	27601-6	27601-6	2404-5-2	2404-5-3	2404-27
	VI	VI	II	II	II
	$w(B)/\%$				
SiO ₂	0	0.013	0.035	0.026	0.080
TiO ₂	0.248	0.119	0	0.007	0
Al ₂ O ₃	0.333	2.613	0.388	0.472	0.018
FeO	91.387	89.656	84.855	84.182	89.138
MnO	0.348	0.125	0.961	0.846	1.309
MgO	1.857	2.846	7.760	7.747	0.428
CaO	0	0	0	0	0.007
Na ₂ O	0.040	0.002	0	0	0
K ₂ O	0	0	0.006	0	0.009
总和	94.213	95.374	94.005	93.280	90.989
矿物名称	磁铁矿	磁铁矿	镁磁铁矿	镁磁铁矿	磁铁矿

硅质岩在尕斯库勒湖铁钾矿床分布很普遍,属于滩间山群,厚度从几米到几十米不等,主要呈层状、透镜状,镜下观察可见鲕粒状石英随机分布(如图 5G),推测该岩性由含黏土矿物和碳酸盐矿物的砂岩、粉砂岩经硅化形成。

蚀变火山岩主要呈深墨绿色,也属滩间山群,应是受砂卡岩期后热液蚀变的改造而形成。ZK4204 钻孔的蚀变安山岩,80%以上由绿钙闪石组成,局部地段可见中长石。而 ZK26006 钻孔的蚀变安山岩,则主要由长石、石英组成,其中的钙长石、绿帘石、辉石由钙质交代作用形成,铁阳起石则是交代绿钙闪石所形成。该岩性的含矿性不是很理想,品位不高,主要矿物为磁黄铁矿和磁铁矿。

大理岩及其交代矿物主要为砂卡岩层,包括钙铁榴石、钙铝榴石及各种辉石(如透辉石和钙铁辉石等)。砂卡岩层是主要含矿层位,主要有磁铁矿、方铅矿和闪锌矿,且矿石品位可观。

蚀变岩体单元主要由蚀变花岗闪长岩组成,不同矿群内出露的岩体的岩性几乎相同,但蚀变强度和矿物组合有所不同,反映出岩体与围岩之间物质交换的差异,其中的辉石主要是交代角闪石所形成。

不同岩性段的矿物组合如下所示(图 10):

I 与硅质岩单元相关的矿物组合

I a 石英 + 方解石 ± 黄铁矿;

I b 石英 + 绿帘石 + 榍石 ± 黄铁矿;

II 与中-基性蚀变火山岩单元相关的矿物组合

II a 绿钙闪石 + 铁阳起石 + 方解石 ± 钙铁辉石 ± 白云石 + 磁黄铁矿 ± 黄铁矿;

II b 绿钙闪石 + 铁叶绿泥石 + 石英 ± 铁阳起石 ± 磷灰石 ± 白云石 ± 黄铁矿 + 磁黄铁矿 + 磁铁矿;

II c 绿钙闪石 + 钙铁辉石 + 铁叶绿泥石 + 磷灰石 + 正长石 + 黄铁矿;

II d 中长石 + 钠长石 + 钙长石 + 绿帘石 + 石英 + 方解石 ± 磷灰石 ± 钙铁辉石 ± 绿泥石 ± 硅灰石 ± 榍石 ± 磁黄铁矿;

III 与大理岩及其交代矿物岩性单元相关的矿物组合

III a 锰钙铁辉石 + 钙铁榴石 + 石英 + 方解石 + 方铅矿 + 磁黄铁矿;

III b 钙铝铁榴石 + 方解石 ± 绿帘石 ± 铁镁绿泥石 ± 石英 ± 磁铁矿 + 方铅矿 + 闪锌矿;

III c 石英 + 方解石;

III d 硅灰石 + 钙长石 + 石英;

III e 镁橄榄石 + 蛇纹石 + 白云石 + 方解石 + 磁铁矿 + 镁磁铁矿 ± 黄铁矿;

III f 蛇纹石 + 透辉石 + 磷灰石 + 石英 + 方解石;

III g 蛇纹石 + 斜绿泥石 + 白云石 + 磁铁矿;

IV 与蚀变岩体(即内砂卡岩带)单元相关的矿物组合

IV a 石英 + 钙铝榴石 + 绿帘石 + 透辉石 + 黑云母 + 硅灰石 + 钙长石;

IV b 石英 + 角闪石 + 透辉石 + 黑云母。

赵一鸣等(1990,1992)曾将砂卡岩建造按其矿物共生组合的不同及其所反映的围岩岩性的差异划分为 4 类,即钙质砂卡岩、镁质砂卡岩、锰质砂卡岩和碱质砂卡岩。不同的砂卡岩所伴生的金属矿化也不一样。

尕斯库勒湖砂卡岩矿床的特点是,花岗闪长岩大面积地与碳酸盐岩接触(图 1),在花岗闪长岩外接触带

变质砂岩、粉砂岩和灰岩之间的构造破碎带内,砂卡岩化也很发育。该矿床从西往东显示出较为明显的矿化分带趋势,其砂卡岩类型由西往东可划分出 3 种类型,即含 Fe 的镁质砂卡岩(Mg-SK),含 Fe(磁铁矿和磁黄铁矿)-Cu 的钙质砂卡岩(Ca-SK),含 Pb-Zn-Fe 的锰-钙质砂卡岩(Mn-Ca-SK)(图 11)。

含 Fe 的镁质砂卡岩主要产于花岗闪长岩与白云质大理岩的接触带附近(图 11 和图 3B),主要包括 II 矿群。其砂卡岩矿物主要为透辉石、蛇纹石、斜绿泥石等(图 9)。其中,蛇纹石和斜绿泥石通常是晚期热液交代矿物。镁质砂卡岩包含的主要金属矿物为磁铁矿和磁黄铁矿。花岗闪长岩中暗色矿物明显被交代淋滤,透辉石、绿帘石、钙长石增多,黑云母减少,基性斜长石发育。

含 Fe(磁铁矿和磁黄铁矿)-Cu 的钙质砂卡岩主要产于外接触带构造破碎带内,包括 IV 矿群和 V 矿群。该地段内花岗闪长岩脉发育(图 3C)。砂卡岩矿物主要为绿钙闪石、铁阳起石、钙铁辉石、石榴子石。蚀变安山岩内大量发育绿钙闪石、铁阳起石和钙铁辉石等,而大理岩内沿构造断裂处发育石榴子石以及钙铁辉石等。与蚀变安山岩相关的金属矿物有磁铁矿、磁黄铁矿和黄铜矿,大量硫化物矿物和氧化物矿物的共同出现,构成了当时特定的物理化学环境。大理岩内主要发育磁铁矿,与石榴子石、钙铁

辉石共生。

含 Pb-Zn-Fe 的锰-钙质砂卡岩主要发育在矿区东部的 VI 矿群内。其砂卡岩矿物主要包括锰钙铁辉石、钙铁榴石、钙铝榴石、硅灰石等(图 10)。与锰钙铁辉石相关的金属矿物主要为方铅矿和闪锌矿,而与石榴子石相关的金属矿物主要为磁铁矿。实际上,此锰钙质砂卡岩带应是过渡性砂卡岩带,在中国东部的许多矿区内都存在此现象,如阳山铁矿,在靠近岩体处,主要发育以钙铁榴石和次透辉石为主的钙砂卡岩,在过渡带则出现较多的含锰钙铁辉石砂卡岩,矿化类型除磁铁矿化外,还伴有有闪锌矿化,而到了矿床边缘部位,则广泛出现含锰钙铁辉石、钙蔷薇辉石、锰黑柱石等锰质砂卡岩矿物,矿化类型则变为以闪锌矿和方铅矿为主(赵一鸣等,1982)。因此,笔者推测在尕斯库勒湖区的东部还有找矿潜力,下一步应将重点放在该地段,寻找与锰质砂卡岩有关的矿化类型。

6 讨论

6.1 尕斯库勒湖矿床演化

据上所述,可大致总结出尕斯库勒湖多金属矿床的成矿演化模型。此外,砂卡岩矿物的组成与岩浆的化学成分、围岩组分、形成深度和氧化条件等,有

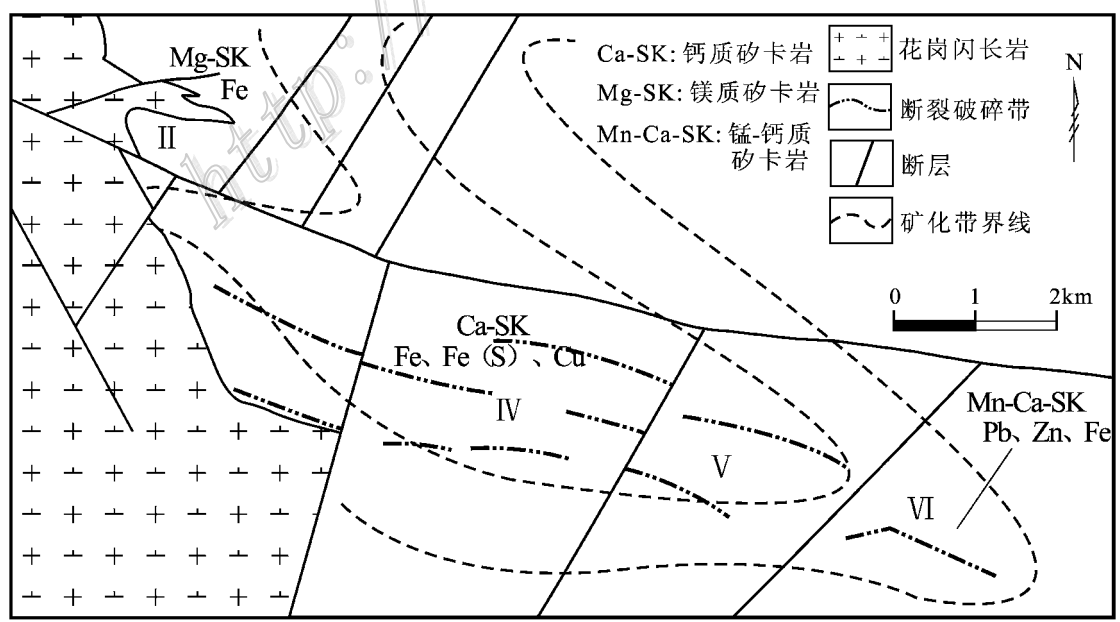


图 11 尕斯库勒湖砂卡岩矿床岩石矿物分带地质结构图

Fig. 11 Geological map showing distribution of skarn minerals in the Galinge skarn deposit

着密切的关系(Burton et al., 1982; Meinert, 1997)。

首先,砂卡岩矿床的成矿母岩具有成矿专属性(赵一鸣等, 1990; 裴荣富等, 1995; 谢桂青等, 2006), 包括: 与中性和中偏基性(或偏碱性)侵入体有关的 Fe、Cu、Pb、Zn 等多金属矿化; 与中-酸性侵入岩有关的 Pb、Zn 矿化; 与酸性侵入体有关的 Fe、Sn、Mo 矿化。尕斯库勒岩体以花岗闪长岩基为主, 部分钻孔可见闪长岩枝分布在花岗闪长岩基的顶部, 据此推测, 花岗闪长岩要晚于闪长岩上侵定位。尕斯库勒矿区的矿化以 Fe 为主, 伴生 Cu、Pb、Zn 矿化, 绝大多数矿体产在花岗闪长岩与围岩的接触带内, 以及 NWW 向的断裂破碎带内, 所以, 成矿作用应主要与花岗闪长岩有关。岩浆沿 NWW 向深断裂上侵, 并为流体循环提供了能量。在高温高盐度的岩浆流体向东运移的过程中, 流体的盐度逐渐降低, 但围岩中的蒸发盐类及构造变形卤水起到了增加流体盐度的作用, 使流体动力学平衡再次建立, 确保了流体可进行较长距离的搬运(Bussell et al., 1990)。

其次, 不同阶段内形成的砂卡岩矿物组合反映了不同阶段流体的氧化条件。在砂卡岩期早期阶段, 流体主要来源于岩浆, H_2O 的化学位(μ_{H_2O})较低, 水解作用较弱。初期, 流体交代钙质灰岩, 形成了硅灰石、石榴子石和钙铁辉石等钙砂卡岩矿物。其中, 纯硅灰石的形成需要较高的氧逸度(图 12A)。钙铁石榴石和钙铁辉石的形成条件是, SiO_2 和 $CaCO_3$ 必须相对不饱和, 并且需要相对较高的 Fe^{3+}/Fe^{2+} 活性比(Bussell et al., 1990), 这两种矿物经常伴生, 此矿物组合经常限定在一定的 $f(O_2)$ - t 条件下(图 12A 和 B)。如果锰钙铁辉石与钙铁石榴石伴生, 那么, 流体不仅需要相对较高的 Fe^{3+}/Fe^{2+} 活性比, 而且, Mn^{2+}/Fe^{2+} 活性比也必须较高。早期, 流体交代白云岩, 形成了镁橄榄石、粒硅镁石、透辉石等贫铁富镁的砂卡岩矿物, 这主要取决于流体 μ_{H_2O} 的变化, 当 Fe 的化学位(μ_{Fe})较高时, 随着 μ_{H_2O} 的增高, 水解作用逐渐增强, 高温无水矿物被低温富水矿物交代, 并伴有 Fe、Mn 从高温矿物中释放, 活动性增强, 这与钙砂卡岩交代建造有明显不同(赵一鸣等, 2012)。因此, 砂卡岩期早期阶段的流体具有低酸度和中-高氧逸度的特点(赵一鸣等, 1997; Öymen, 2010; 姚磊等, 2012)。

与砂卡岩期早期阶段相比, 砂卡岩期晚期阶段的氧化条件减弱很多(Ray et al., 1992)。研究(赵斌等, 1982)表明, 偏向钙铁石榴石端员的石榴子石形成

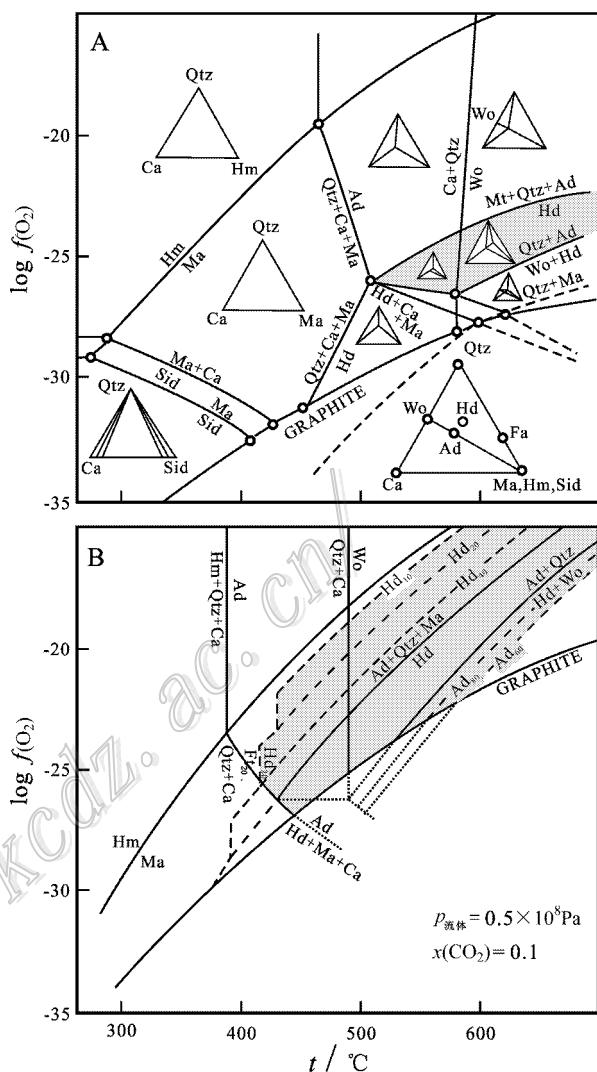


图 12 低压力条件下 $\log f(O_2)$ - t 等压线图

A. 阴影区显示了钙铁辉石+钙铁石榴石+硅灰石矿物组合稳定区范围(Burt, 1971); B. 阴影区显示了石榴子石-辉石组合稳定区范围, 假设条件下钙铁石榴石最大稳定区由虚线控制, 实线 Qtz+Ca 的反应平衡根据 Liou(1974), Gustafson(1970; 1974), Taylor 等(1978); $f(O_2)$ 缓冲区根据 French 等(1965) 和 French(1971)。Ad—钙铁石榴石; Ca—方解石; Hd—钙铁辉石; Ht—赤铁矿; Ma—磁铁矿; Qtz—石英; Sid—菱铁矿; Wo—硅灰石

Fig. 12 Low-pressure isobaric $\log f(O_2)$ - t diagram

A. Shaded area shows the extent of the stability field for the assemblage hedenbergite + andradite + wollastonite (Burt, 1971); B. The ruled area shows the stability region for garnet pyroxene of Capote. Basine composition. Maximum stability of andradite under the assumed conditions is outlined by the ticked pattern. Solid line calc-silicate equilibria is based on experimental data from Liou (1974), Gustafson (1970; 1974), Taylor and Liou (1978); The $f(O_2)$ buffers are based on data in French and Eugster (1968) and French (1971); Ad—Andradite; Ca—Calcite; Hd—Hedenbergite; Ht—Hematite; Ma—Magnetite; Qtz—Quartz; Sid—Siderite; Wo—Wollastonite

时的氧化的条件,要高于中间成分的石榴子石。在尕斯库勒湖矿区,砂卡岩晚期阶段石榴子石成分端员,远离钙铁榴石端员而向钙铝榴石端员过渡。退化蚀变期的流体可能存在天水的混入(Taylor et al., 1997; Atkinson et al., 1978), H_2O 的化学位较高,水解作用增强,溶液中开始富集大量的 H_2S 、 CO_2 、F 和 Cl 等挥发分。此时期主要形成绿帘石、绿泥石、绿钙闪石、铁阳起石、蛇纹石和水镁石等一些含水退化蚀变矿物及金属氧化物。尕斯库勒湖矿区内广泛发育绿帘石,可见绿帘石交代石榴子石的现象(图 5L),此矿物组合的稳定性受流体温度及氧逸度的控制,经常在特定的 $f(O_2)$ - t 条件下生成(图 13),溶液中氧逸度的升高对绿帘石的形成具有重要作用(Berman et al., 1985; Perkins et al., 1986)。绿钙闪石的出现证明了流体在该阶段富集挥发分。水镁石通常具有较高的温度稳定范围,而且,在 500°C 条件下,水镁石可转化为方镁石。交代作用中,一般而言,外带富 Mg, 内带富 Al,且内带的酸性程度比外带高。各种绿泥石的出现也暗示着溶液内富集大量的 H^+ , 其 pH 值

较低,酸性较强。由此可见,退化蚀变阶段的流体具有较高的氧逸度和较低的 pH 值。

退化蚀变期也是成矿的主要阶段。大量金属元素以络合物的形式运移,随着温度的降低,绿钙闪石、绿泥石、绿帘石和蛇纹石等含 OH^- 的退化蚀变矿物大量形成,消耗了溶液中大量的 H^+ 及挥发分,从而导致溶液酸性程度降低,搬运能力下降,使得 Fe 的氯化物络合物发生水解,游离出 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} , 在高氧逸度条件下,形成了大量的磁铁矿(艾永富等, 1981; 赵一鸣等, 1992)。

6.2 砂卡岩矿床对比

在祁漫塔格地区,大多数与砂卡岩矿床有关的侵入岩为闪长岩、花岗闪长岩、石英闪长岩和二长花岗岩,如虎头崖、野马泉、卡而却卡。丰成友(2011a)和马圣钊等(2012)认为,虎头崖 Cu-Pb-Zn 多金属矿床是与花岗闪长岩有关的砂卡岩矿床,测得花岗闪长岩的年龄为 (235.4 ± 1.8) Ma (锆石 LA-ICP-MS),测得辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 (225.0 ± 4.0) Ma 和 (230.1 ± 4.7) Ma,其年龄基本一致。据笔者近年研究,尕斯库勒湖花岗闪长岩的年龄为 229 Ma (笔者未发表资料),与区域成矿事件的时限一致,充分说明该区域具有寻找印支期砂卡岩矿床的巨大潜力。

就尕斯库勒湖矿区的砂卡岩矿物而言,在平面上,不同矿群内其化学成分依次变化,如辉石族矿物,在垂向上,同一钻孔内其化学成分也出现明显的分带,如石榴子石族矿物。而且,不同分带所伴生的砂卡岩矿物也各不相同,其中,镁橄榄石总是与粒硅镁石、透辉石共生,钙铁辉石总是与钙铁榴石伴生,绿帘石总是趋向于钙铝榴石,等等。在退化蚀变期,砂卡岩矿物的伴生取向也各不相同,如,绿钙闪石与钙铁辉石共生,集中产于Ⅳ矿群的蚀变安山岩中,绿钙闪石的大量出现,说明退化蚀变期流体内富集挥发分,携带金属的能力强。蛇纹石交代镁橄榄石和粒硅镁石;斜绿泥石主要发育在Ⅱ矿群的蛇纹石交代岩中;铁叶绿泥石主要发育于Ⅳ矿群,与绿钙闪石、阳起石等砂卡岩期后退化蚀变阶段的矿物共生。

尕斯库勒湖矿床可划分出 3 种砂卡岩带,每种砂卡岩带所伴生的矿化类型也不同。镁质砂卡岩,与磁铁矿有关;钙质砂卡岩,与磁铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿有关;锰-钙质砂卡岩,与方铅矿、闪锌矿、磁铁矿有关。这与中国东部的砂卡岩矿床类型相比,既有相同点,又有不同点。如,与中国东部的阳山铁矿相比,阳山

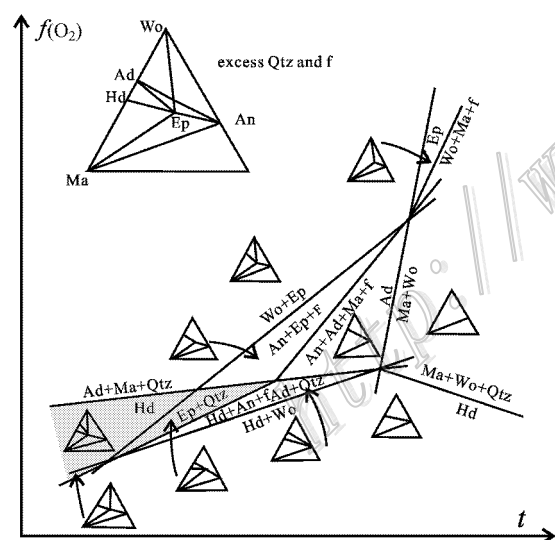


图 13 $CaO-FeO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ 体系
 $f(O_2)$ - t 等压线图(据 Liou, 1973)

阴影区显示了钙铁辉石+钙铁榴石+绿帘石+石英矿物组合的稳定范围;An—钙铁榴石;Ep—绿帘石;f—液体;Gr—钙铁钙榴石,其他矿物代号同图 11

Fig. 13 Isobaric $f(O_2)$ - t diagram system for
 $CaO-FeO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ (after Liou, 1973)

Shaded area shows the extent of the stability field for the assemblage hedenbergite + andradite + epidote + quartz; An—Andradite; Ep—Epidote; F—Fluid; Gr—Grandite; same abbreviations as in Figure 11

铁矿主要发育钙质矽卡岩和锰质矽卡岩,缺少镁质矽卡岩,而尕林格矿床在靠近岩体处发育有大量的蛇纹石交代岩,它们的相同点是,在远离岩体处都发现了与铅锌矿化类型有关的锰钙铁辉石,并且,这两个矿床在矿化类型和成矿专属性上十分相似,都具有明显的矿化分带及矽卡岩分带。又如辽宁八家子铁多金属矿床,在岩体接触带发育有镁质矽卡岩磁铁矿,而在离接触带有一定距离的白云质大理岩断裂带内则分布有锰质矽卡岩铅锌矿体(Zhao et al., 2003),并且,大部分矿体产于断裂破碎带内,这一点与尕林格矿床相类似,但是,辽宁八家子矿床缺少钙质矽卡岩。即便是在同一成矿带内,其矽卡岩矿化类型也不尽相同,如,与邻近的虎头崖矽卡岩矿床相比,虽然控矿地层、成矿母岩均一致,但虎头崖的矿化类型以 Pb、Zn 为主,伴生 Fe、Cu,而尕林格矿床则以 Fe 为主,伴生 Cu、Pb、Zn,这可能与尕林格矿区发育闪长岩有关,流体从闪长岩中淋滤出 Fe 质成分,为成矿提供了物质来源。最近的野马泉矽卡岩矿床的矿化类型与尕林格矿床十分相似,并且,与成矿有关的岩体类型也大体一致,只是成矿规模上远不如尕林格矿床,这可能与矿区的主体构造轮廓有关,尕林格矿区的主体构造轮廓为一向斜,区内构造破碎带发育,而野马泉矿区的构造则相对简单,且破碎带不发育。

7 结论与建议

尕林格矽卡岩矿床的形成可划分为矽卡岩期、退化蚀变期以及金属硫化物期,其中,矽卡岩期又可划分为早期阶段和晚期阶段,退化蚀变期是主要的成矿阶段。根据各时期的矿物组合和交代关系判断,矽卡岩期的流体具有中-高氧逸度和低酸度的特点,而退化蚀变期的流体则具有高氧逸度和较高酸度的特点。由于大量含 OH^- 的富水矿物的形成,消耗了大量的 H^+ ,在这种高氧逸度条件下,磁铁矿得以大量形成。

通过对矽卡岩矿物组合的研究,本文确定了不同矿物组合的生成关系。例如,铁阳起石交代绿钙闪石,并与钙铁辉石、铁叶绿泥石共生,产于蚀变安山岩中,蛇纹石主要与斜绿泥石、透辉石共生。情况较为复杂的是 VI 矿群,钙铁榴石-钙铝榴石系列的矿物共生,并伴生钙铁辉石系列,锰钙铁辉石和硅灰石

也很发育,在 VI 矿群的变质石英砂岩、粉砂岩中发育有大量的绿帘石,而在蚀变安山岩中,钙铁辉石、绿帘石、硅灰石、钙长石、中长石和钠长石共生。

通过本次研究可知,尕林格矿床内的矽卡岩矿物化学成分在横向和垂向上变化规律明显,如辉石族矿物和石榴子石族矿物,而且,该矿床在成矿专属性上也存在特殊性,划分了三个矿化蚀变分带,镁矽卡岩为磁铁矿,钙矽卡岩为磁铁矿和黄铜矿,锰质矽卡岩为方铅矿、闪锌矿和磁铁矿。此种成矿专属性的划分对于评价矿区的找矿潜力十分重要,例如,若将锰-钙质矽卡岩带视为钙质矽卡岩向锰质矽卡岩过渡的地带,那么,在锰-钙质矽卡岩带的附近,就有继续寻找锰质矽卡岩矿化类型的潜力,故建议,将该矿区下一步找矿工作的重点东移。

参考文献/References

- 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.
- 丰成友,李东生,屈文俊,杜安道,王松,苏生顺,江军华. 2009. 青海祁漫塔格索拉吉岭矽卡岩型铜铅矿床辉钼矿-钼同位素定年及其地质意义[J]. 岩矿测试, 28(3): 223-227.
- 丰成友,王雪萍,舒晓峰,张爱奎,肖晔,刘建楠,马圣钊,李国臣,李大新. 2011a. 青海祁漫塔格虎头崖铅锌多金属矿区年代学研究及地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 41(6): 1806-1816.
- 丰成友,赵一鸣,李大新,刘建楠,肖晔,李国臣,马圣钊. 2011b. 青海西部祁漫塔格地区矽卡岩型铁铜多金属矿床的矽卡岩类型和矿物学特征[J]. 地质学报, 85(7): 1108-1115.
- 李洪普,宋忠宝,田向东,芦文全. 2010. 东昆仑四角羊铅锌多金属矿床成矿地质特征及找矿意义[J]. 西北地质, 43(4): 179-187.
- 刘云华,莫宣学,喻学惠,张雪亭,许国武. 2006. 东昆仑野马地区景忍花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 22(10): 2457-2463.
- 路远发. 2004. Geokit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. 地球化学, 33(5): 459-464.
- 马圣钊,丰成友,李国臣,舒晓峰. 2012. 青海虎头崖铜铅锌多金属矿床硫、钼同位素组成及成因意义[J]. 地质与勘探, 48(2): 321-331.
- 毛景文,李红艳, Guy B. 1996. 湖南柿竹园矽卡岩-云英岩型 W-Sn-Mo-Bi 矿床地质和成矿作用[J]. 矿床地质, 15(1): 1-15.
- 裴荣富, 主编. 1995. 中国矿床模式[M]. 北京: 地质出版社. 262-264.
- 盛继福. 1985. 新疆磁海铁矿蚀变特征[J]. 中国地质科学院矿床地质

- 研究所所刊,第3号.北京:地质出版社. 89-107.
- 王 濮,潘兆槽,翁玲宝,等. 1984. 系统矿物学[M]. 北京:地质出版社. 448-457.
- 谢桂青,毛景文,李瑞玲,赵财胜. 2006. 鄂东南地区矽卡岩铁矿床的地质特征和矿床模式讨论[J]. 矿床地质, 25: 147-150.
- 姚 磊,谢桂青,张承帅,刘佳林,杨海波,郑先伟,刘晓帆. 2012. 鄂东南矿集区程潮大型矽卡岩铁矿的矿物学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 28(1): 133-146.
- 赵 斌,李统锦,李昭平,吴海鸥. 1982. 我国一些矿区矽卡岩中石榴石的研究[J]. 矿物学报, (4): 296-304.
- 赵一鸣,谭慧静,袁润广,林峰雪. 1980. 含角闪石在闽西南矽卡岩铁矿床中的发现及其地质意义[J]. 地质评论, 26(4): 300-306.
- 赵一鸣,谭慧静,孙静华. 1982. 福建马坑、阳山铁矿床的矽卡岩分带特征及其与矿化分带的关系[J]. 岩矿测试, 1(1): 11-22.
- 赵一鸣,林文蔚,毕承思,李大新. 1986. 中国矽卡岩矿床基本地质特征[J]. 中国地质科学院院报, 14: 59-60.
- 赵一鸣,林文蔚,毕承思,等. 1990. 中国矽卡岩矿床[M]. 北京:地质出版社. 354页.
- 赵一鸣,林文蔚,张德全,等. 1992. 交代成矿作用及其找矿意义几个重要含矿交代建造的研究[M]. 北京:北京科学技术出版社. 156页.
- 赵一鸣,张铁男,林文蔚. 1997. 我国矽卡岩矿床中的辉石和似辉石特征及其与金属矿化的关系[J]. 矿床地质, 16(4): 318-329.
- 赵一鸣,张 男,毕承思,郭立鹤. 1998. 镁铁矿在镁矽卡岩 $\text{Au}(\text{Fe}, \text{Cu})$ 等矿床中的发现及镁铁矿-镁磁铁矿系列研究[J]. 地质学报, 72(4): 378.
- 赵一鸣,李大新. 2003. 中国矽卡岩矿床中的角闪石[J]. 矿床地质, 22(4): 345-359.
- 赵一鸣,林文蔚,等. 2012. 中国矽卡岩矿床[M]. 北京:地质出版社. 392页.
- Архиленикская А Я. 张汉凯,译. 1987. Коршуновск 和 Рудорск (东西伯利亚)金属矿床中的镁磁铁矿[J]. 地质科技情报(武汉地质学院), 6(3): 35-39.
- Atkinson W W Jr and Einaudi M T. 1978. Skarn formation and mineralization in the contact aureole at Carr Fork, Bingham, Utah[J]. Econ. Geol., 73: 1326-1365.
- Berman R G, Brown T H and Greenwood H J. 1985. An internally consistent thermodynamic data base for minerals in the system $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{FeO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ [R]. Atomic Energy of Canada Technical Report, TR-337: 62.
- Burt D M. 1971. Some phase equilibria in the system $\text{Ca}-\text{Fe}-\text{Si}-\text{C}-\text{O}$ [J]. Geophysical Lab., Ann. Rept. Director, Yearbook, 71: 178-184.
- Burton J C, Taylor L A and Chou I M. 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: 764-783.
- Bussell M A, Alpers C N, Petersen Ulrich, Shepherd T J, Bermudez C and Baxter A N. 1990. The Ag-Mn-Pb-Zn vein, replacement, and skarn deposits of Uchucchacua, Peru; studies of structure, mineralogy, metal zoning, Sr isotopes, and fluid inclusions [J]. Econ. Geol., 85: 1348-1383.
- Dick L A and Robinson G W. 1979. Chlorine-bearing potassium hastingsite from a sphalerite skarn in south Yukon [J]. Can. Min., 17: 25-26.
- Forster D B, Seccombe P K and Phillips D. 2004. Controls on skarn mineralization and alteration at the Cadia deposits, New South Wales [J]. Australia Economic Geology, 99: 761-788.
- Foster M D. 1962. Interpretation of the Composition and a Classification of the Chlorites [J]. U. S. Geol. Survey Prof. Paper, 414-A: 1-31.
- French B M. 1971. Stability relations of siderite (FeCO_3) in the system $\text{Fe}-\text{C}-\text{O}$ [J]. Am. Jour. Sci., 271: 37-78.
- French B M and Eugster H P. 1965. Experimental control of oxygen fugacities by graphite-gas equilibria [J]. Jour. Geophys. Research, 70: 1529-1539.
- Gaspar L M and Inverno C M C. 2000. Mineralogy and metasomatic evolution of distal strata-bound scheelite skarns in the Riba de Alva Mine, northeastern Portugal [J]. Econ. Geol., 95: 1259-1275.
- Gustafson W I. 1970. Stability relations of andradite, hedenbergite, and related minerals in the system $\text{Ca}-\text{Fe}-\text{Si}-\text{O}-\text{H}$. Unpub. Ph. D. disserf [D]. Los Angeles: Univ. California. 208p.
- Gustafson W I. 1974. The stability of andradite, hedenbergite and related minerals in the system $\text{Ca}-\text{Fe}-\text{Si}-\text{O}-\text{H}$ [J]. Jour. Petrology, 15: 455-496.
- Krutov G A. 1936. Dashkesanite: A new chlorine amphibole of the hastingsite group [J]. Bull. Acad. Sci. USSR, (2-3): 341-374.
- Kwak T A P. 1994. Hydrothermal alteration in carbonate-replacement deposits [J]. Geological Association of Canada Short Course Notes, 11: 381-402.
- Leake B E. 1978. Nomenclature of amphiboles [J]. Mineralogical Magazine, 42: 533-563.
- Leake B E, Woolley A R, Arps C E S, Birch W D, Gilbert M C, Grice J D, Hawthorne F C, Kato A, Kisch H J, Krivovichev V G, Linthout K, Laird J, Mandarino J A, Maresch W V, Nickel E H, Rock N M S, Schumacher J C, Smith D C, Stephenson N C N, Ungaretti L, Whittaker E J W and Guo Y Z. 1997. Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names [M]. Canad. Mineral., 35: 219-246.
- Liou J G. 1973. Synthesis and stability relations of epidote. $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{FeSi}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$ [J]. Jour. Petrology, 14: 381-413.
- Liou J G. 1974. Stability relations of andradite-quartz in the system $\text{Ca}-\text{Fe}-\text{Si}-\text{O}-\text{H}$ [J]. Am. Mineralogist, 59: 1016-1025.
- Meinert L D. 1997. Application of skarn deposit zonation models to mineral exploration [J]. Exploration and Mining Geology, 6: 185-208.
- Newberry R J. 1982. Tungsten-bearing skarns of the Sierra Nevada. I.

- The Pine Creek mine, California[J]. *Econ. Geol.*, 77:823-844.
- Newberry R J. 1998. W- and Sn-skarn deposits[J]. *Mineralogical Association of Canada Short Course Series*, 26:289-335.
- Oyman T. 2010. Geochemistry, mineralogy and genesis of the Ayazmant Fe-Cu skarn deposit in Ayvalik (Balıkesir), Turkey [J]. *Ore Geology Reviews*, 37:175-200.
- Perkins E H, Brown T H and Berman R G. 1986. PTX-system: Three programs for calculation of pressure-temperature -composition phase diagrams[J]. *Computers and Geoscience*, 12:749-755.
- Ray G E, Grond H C, Dawson G L and Wesster I C L. 1992. The Mount Riordan (Crystal Peak) garnet skarn, Hedley District, Southern British Columbia[J]. *Econ. Geol.*, 87:1862-1876.
- Taylor B E and O'Neil J R. 1977. Stable isotope studies of metasomatic Ca-Fe-Al-Si skarns and associated metamorphic and igneous rocks, Osgood Mountains, Nevada[J]. *Contr. Mineralogy Petrology*, 63:1-49.
- Taylor B E and Liou J G. 1978. The low-temperature stability of andradite in C-O-H fluids[J]. *Am. Mineralogist*, 63:378-393.
- Verkaeren J and Bartholome P. 1979. Petrology of the San Leone Magnetite skarn deposit[J]. *Econ. Geol.*, 74:53-66.
- Zaw K and Singoyi B. 2000. Formation of magnetite-scheelite skarn mineralization at Kara, Northwestern Tasmania: Evidence from mineral chemistry and stable isotopes[J]. *Econ. Geol.*, 95:1215-1230.
- 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*, 23:153-182.

<http://www.kcdz.ac.cn/>