

云南金厂河铁铜铅锌多金属矿床矽卡岩矿物学特征及蚀变分带

黄 华¹, 张长青², 周云满³, 刘 博¹, 谢永富³, 董云涛³, 杨春海³, 董文伟³

(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. 云南黄金矿业集团股份有限公司, 云南 昆明 650224)

摘 要: 金厂河铁铜铅锌多金属矿床是位于“三江”地区保山地块北部的隐伏多金属矿床, 矿体呈层状、似层状产于上寒武统核桃坪组大理岩化灰岩与矽卡岩内, 受 NW 向 F2 断裂和 NE 向 F10 断裂控制明显。本文根据野外穿切关系及矿物共生组合, 将矿床划分为 4 个成矿阶段, 即矽卡岩阶段、退化蚀变阶段、石英-硫化物阶段、碳酸盐阶段。矿脉石矿物包括石榴子石、辉石、角闪石、绿帘石、绿泥石、黑柱石、石英、方解石、萤石等, 矿石矿物主要包括磁铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、黄铁矿、方铅矿和闪锌矿。本文以矽卡岩矿物为研究对象, 利用电子探针技术对其矿物学特征进行研究, 结果表明: 该矿床矽卡岩矿物主要为钙矽卡岩, 石榴子石以钙铁榴石为主, 辉石为透辉石-钙铁辉石过渡系列, 角闪石主要为阳起石、铁阳起石和铁闪石, 黑柱石含铁较高, 多与磁铁矿相伴生, 本矿床含少量锰质矽卡岩, 包括锰铝榴石、含锰钙铁辉石、含锰阳起石、含锰黑柱石。矿床从深至浅的垂向分带以及自东向西的水平分带具有相似性: 含 Fe 钙质矽卡岩→含 Cu 钙质矽卡岩→含 Pb-Zn 锰质矽卡岩→大理岩化灰岩, 表明由矿床中部至两侧, 自东向西, 均有明显高温氧化环境向低温还原环境演化趋势。通过与已有矽卡岩 Pb-Zn 矿床矿物分带模型对比, 推测存在深部岩浆热液以断裂交汇部位侵入交代围岩成矿, 该矿床应为远接触带的矽卡岩型隐伏铁铜铅锌多金属矿床。

关键词: 保山地块, 金厂河铁铜铅锌多金属矿床, 矿物学, 电子探针分析, 矽卡岩分带

中图分类号: P588.31⁺2; P618.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)01-0127-22

Skarn mineralogy and zoning model of the Jinchanghe copper-zinc-iron polymetallic deposit in Yunnan Province

HUANG Hua¹, ZHANG Chang-qing², ZHOU Yun-man³, LIU Bo¹, XIE Yong-fu³, DONG Yun-tao³, YANG Chun-hai³ and DONG Wen-wei³

(1. Faculty of Sciences and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. Yunnan Gold Mining Industry Group, Kunming 650224, China)

Abstract: The Jinchanghe deposit is a concealed mineral deposit located in the northern part of the Baoshan massif in Sanjiang region. The ore bodies occur in the skarn and marbleized limestone of Hetaoping Formation in lamellar and stratoid forms, and are controlled obviously by the NW-trending F2 fault and the NE-trending F10 fault. Four ore-forming stages, i. e., skarn stage, retrograde alteration stage, quartz sulfide stage and carbonate stage, were recognized based on the field relationship and mineral associations. Metallic minerals consist mainly of magnetite, chalcopyrite, pyrrhotite, pyrite, galena and sphalerite, whereas gangue minerals are composed of

收稿日期: 2013-04-05; 修订日期: 2013-12-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40902029); 公益性科研资助项目(K0904_200911007); 云金集团资助项目

作者简介: 黄 华(1989-), 女, 汉族, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: huanghuallsd@163.com。

garnet, pyroxene, epidote, chlorite and ilvaite. With skarn minerals as the study objects and by using electron microprobe technology, the authors investigated the mineralogical characteristics. Electron microprobe analyses show that most of skarn minerals in the Jinchanghe ore deposit are calcium skarn minerals, and the end member of garnet is dominated by andradite, together with minor grossular. The clinopyroxene comprises hedenbergite and diopside. The amphibole in the Jinchanghe deposit includes actinolite, ferroactinolite and grunerite. Ilvaite contains relatively high iron and is commonly associated with magnetite. Skarn minerals are manganese minerals in small amounts, comprising spessartine, manganese hedenbergite, manganese actinolite and manganese ilvaite. There exists vertical alteration zonation from the depth to the shallow part and horizontal alteration zonation from east to west, varying in order of remote and buried pluton \rightarrow calcium skarn zone with Fe \rightarrow calcium skarn zone with Cu \rightarrow manganese skarn zone with Pb and Zn \rightarrow marbleized limestone. The alteration zone of the Jinchanghe ore deposit indicates that there is a higher temperature and oxidation zone in the middle part of the vertical profile and in the east part of the horizontal profile. Compared with zoning models of skarn minerals in polymetallic ore deposits both in China and abroad, it is inferred that the remote magmatic hydrothermal fluid intruded through the cross-cutting zone of the two faults, and the infiltration effect occurred in the surrounding rocks, thus forming the ore bodies. The Jinchanghe ore deposit is therefore considered to be a copper-zinc-iron polymetallic concealed deposit in the distant contact zone.

Key words: Baoshan massif; Jinchanghe copper-zinc-iron polymetallic deposit; mineral characteristics; electron microprobe analysis; skarn zonation

作为矽卡岩矿床的主要成员, W、Sn、Cu、Mo、Fe、Zn、Pb 矽卡岩型矿床均具有重要的经济价值 (Einaudi *et al.*, 1981; Meinert, 1992, 1993; Mao *et al.*, 2006, 2011; Misra, 2000)。金厂河铁铜铅锌多金属矿床地处“三江”成矿带保山地块北部, 与其紧邻的昌宁-孟连构造带和兰坪-思茅地块共同构成了铅、锌、铜、铁多金属成矿带, 目前成矿带内主要有镇康芦子园、保山核桃坪等矽卡岩型铅锌矿床。金厂河矿床是多种物化探手段圈定的具有大面积磁异常、高重力重叠及 Zn、Pb、Cu 等元素高浓集异常, 2003 年进行钻探验证时发现的厚大隐伏铁铜铅锌矿床, 尽管前人对其矿床地质特征和垂向矿化分带进行了初步研究(符德贵等, 2004; 周荣等, 2008; 张恩才等, 2010), 但对该矿床的成因认识仍然较为薄弱。在矽卡岩型矿床的研究中, 矿物化学研究工作十分重要 (Einaudi *et al.*, 1981; Einaudi and Burt, 1982), 对矽卡岩矿物学及其分带特征的研究, 有助于对矽卡岩矿床形成过程和成矿机制的更好理解。本文初步总结了该矿床的成矿地质条件及成矿阶段、蚀变及矿化特征, 着重对矽卡岩矿物进行了镜下鉴定和电子探针分析, 揭示矽卡岩矿物的矿物学特征、形成条件及其与矿化的关系, 为进一步研究该矿床的成矿机制奠定重要的基础。

1 区域地质背景

金厂河矿床位于冈底斯-念青唐古拉褶皱系南段, 保山-永德褶皱束北段之核桃坪复背斜东翼, 属于保山-镇康铅锌多金属成矿带。保山地块西侧为高黎贡-怒江断裂, 东侧为澜沧江断裂(云南省地质矿产局, 1990), 北部在碧江一带由于澜沧江断裂和怒江断裂汇拢而消失, 南部延出境外, 构成滇缅泰马 (Sibumasu) 地体的一部分。

保山地块地层出露较齐全, 包括古生界、中生界和新生界, 其中古生代地层出露范围较广, 早古生代与晚古生代地层均有出露, 早古生界主要为寒武系上统沙河厂组与核桃坪组大理岩化灰岩、变质砂岩、钙质板岩, 晚古生代及中生代地层为泥岩、灰岩、白云质灰岩。区域上主要构造线方向为北北西向, 晚期被北西向及北东向断裂错断。

早古生代花岗岩出露在地块南部, 年龄范围大致在 500~470 Ma 之间, 形成于统一的冈瓦纳大陆时期 (Chen *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2009; 陶琰等, 2010), 形成于中新生的酸性岩体有志本山花岗岩体 (126.7 ± 1.6 Ma), 柯街花岗岩体 (93 ± 13 Ma), 形成于晚古生代的花岗岩体有木场花岗岩、岩房 (大雪

山)、耿马大山岩体(陶琰等,2010)。石炭-二叠纪有基性火山岩活动(肖龙等,2003),分布在保山镇康(勐永-木场)等地的相应地层中(陶琰等,2010)。

2 矿床地质特征

金厂河矿床位于近南北向的木瓜树-朱石箐断裂与木瓜树-阿石寨断裂所夹持的北东、北西向构造交汇处的西部边界。矿区出露地层主要为寒武系、奥陶系、志留系及第四系(图 1),本矿区主要赋矿围岩是上寒武统核桃坪组中段大理岩化灰岩。

矿区主要见 NW 向、NE 向、近 NS 向三组断裂,其中 F2 走向 NW,倾向南西,倾角 74°,具压扭性逆断层性质;F10 走向 NE,倾向南东,倾角 70°,具张扭性正断层活动特征(图 1)。F2、F10 两断裂交汇于矿区东侧,是重要的运矿构造,同时也控制矿体分布范围;区内主要褶皱为金厂河背斜,褶皱轴面应力作用较为集中,地层容易产生张性裂隙,使得该背斜核部的层间裂隙成为有利的容矿构造。

矿区地表见海西期辉绿岩-辉长岩,主要呈岩脉、岩株状产出,分布点较多,主要呈岛状-透镜状分布,出露面积约 0.11~0.39 km²(图 1)。

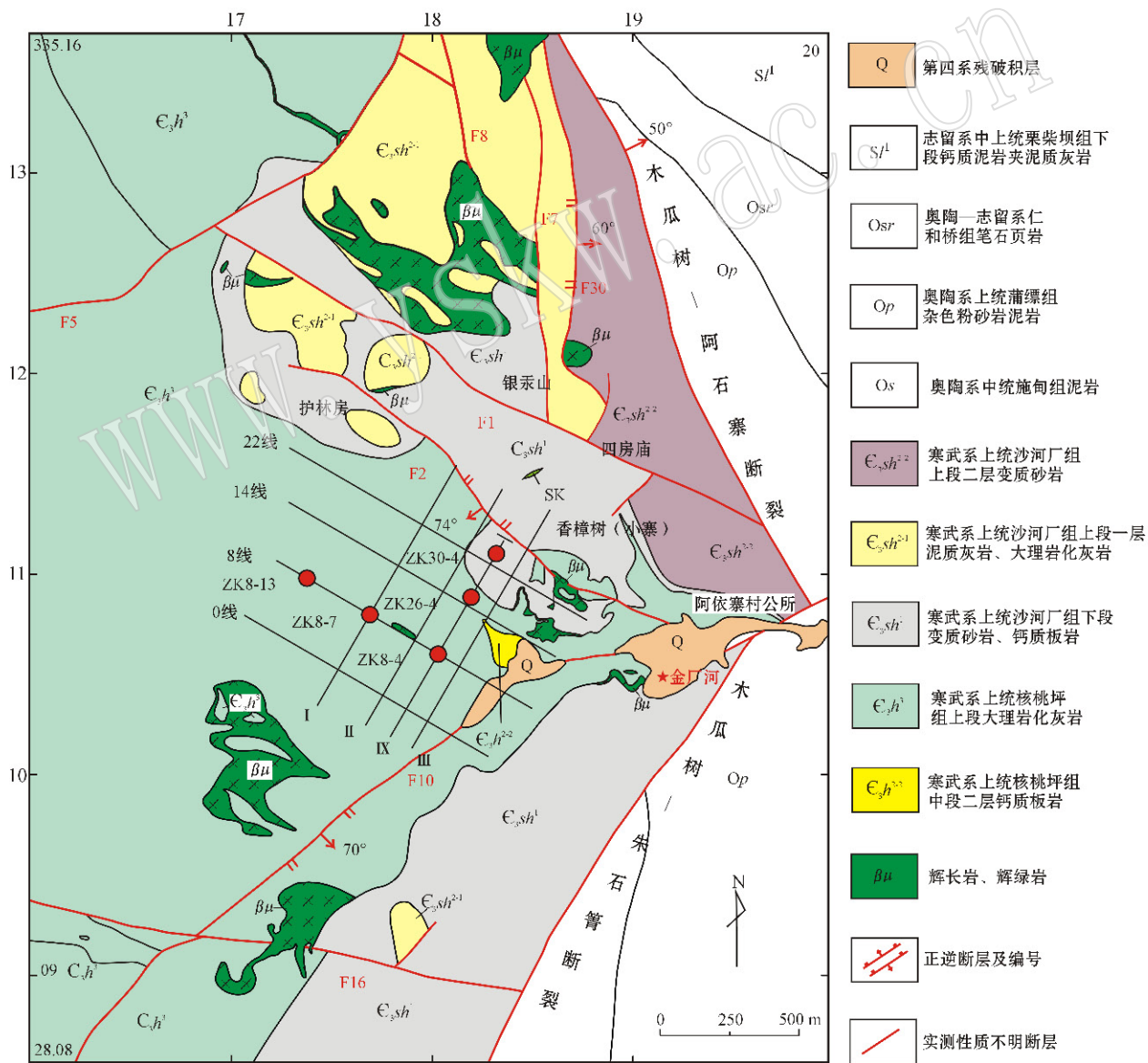


图 1 金厂河矿区地质略图

Fig. 1 Simplified geological map of the Jingchanghe deposit

金厂河铁铜铅锌矿体位于地表以下 261.20~732.10 m, 总体走向为北东-南西向, 倾向总体缓倾向东, 矿化带沿走向长度约 1 000 m, 沿倾向宽度约 1 500 m。矿体呈层状、似层状、透镜状产于矽卡岩和矽卡岩化大理岩中, 在金厂河隆起中心部位矿体厚度

大, 向四周矿化减弱, 厚度减薄(图 2)。目前共圈定矿体 174 个, 有铅锌矿体 43 个、铜矿体 57 个、磁铁矿体 65 个。Pb 平均品位 0.68%, 最高 7.07%; Zn 平均品位 3.19%, 最高 11.68%; Cu 平均品位 0.12%, 最高 6.88%; Fe 平均品位 35.02%, 最高 51.75%。

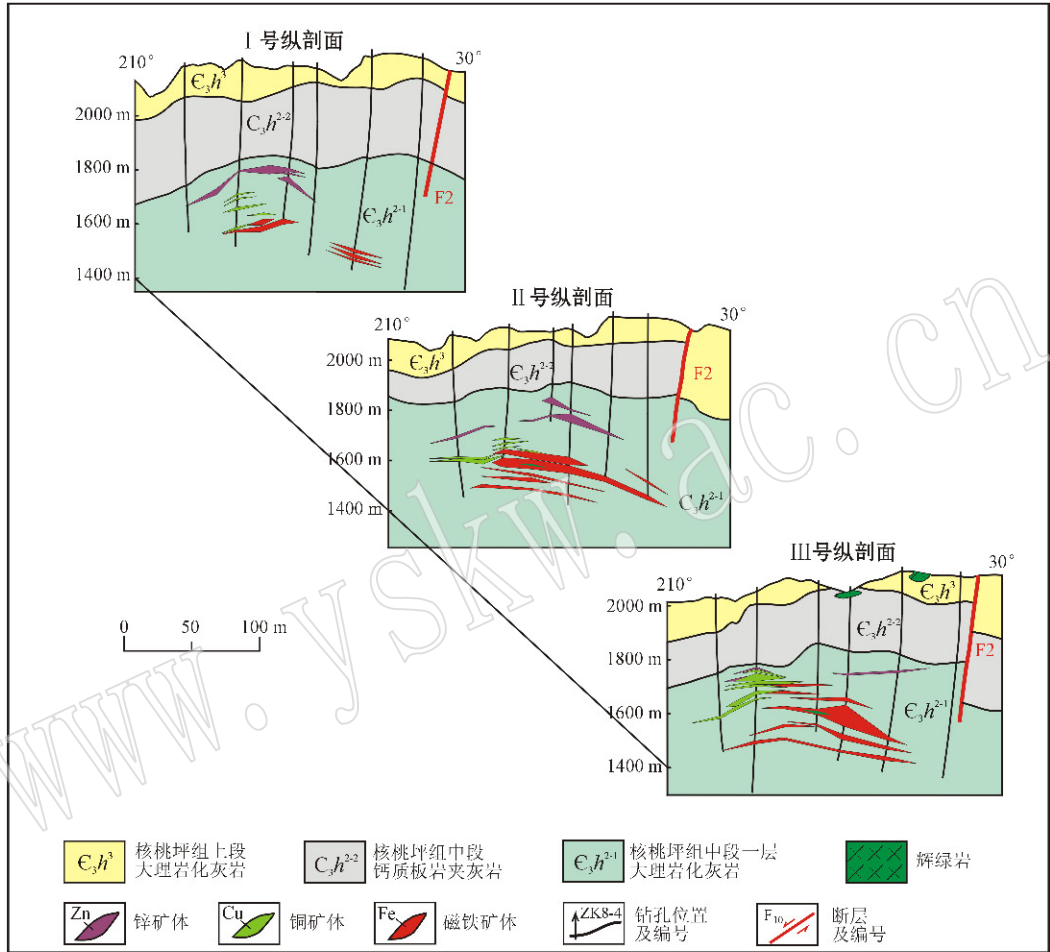


图 2 金厂河矿区联合剖面图

Fig. 2 Combined geological section of the Jinchanghe copper-zinc-iron polymetallic deposit

矿石矿物主要为磁铁矿、闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、磁黄铁矿。①黄铜矿为浸蚀结构或其他形粒状结构, 块状、浸染状构造, 在辉石、闪石、黑柱石中均有分布(图 3a、b、c), 常与磁黄铁矿、闪锌矿、方铅矿共生(图 3d)。②闪锌矿为棕红、棕褐色, 方铅矿为铅灰色, 均为他形粒状结构, 块状、条带状、浸染状构造, 两者伴生出现, 与黄铜矿及磁黄铁矿共生(图 3d), 分布于阳起石、黑柱石、石榴子石中(图 3b、d、e)。③磁铁矿呈铁黑色, 半金属光泽, 半自形-他形中细粒结构, 浸染状构造, 沿阳起石脉充填于黑柱石粒间(图 3f)。铅锌铜矿产出状态有两种: ①分布于退化蚀变

矿物间的铅锌铜矿呈团包状、稠密浸染状交代矽卡岩及退化蚀变矿物(图 3g); ②分布于石英脉中的铅锌铜矿, 呈稠密浸染状或脉状沿石英脉交代早期矽卡岩矿物(图 3h、i)。

脉石矿物主要为石榴子石、辉石、阳起石、黑柱石、绿帘石、绿泥石, 其次为石英、方解石、萤石、少量楣石、金红石等, 脉石矿物结构主要为纤状变晶结构, 柱状、束状变晶结构, 中-粗粒状结构, 自形短柱状结构, 细粒变晶结构, 他形粒状结构, 中-粗粒自形-半自形粒状结构, 构造主要为块状构造、浸染状构造、条带状构造。

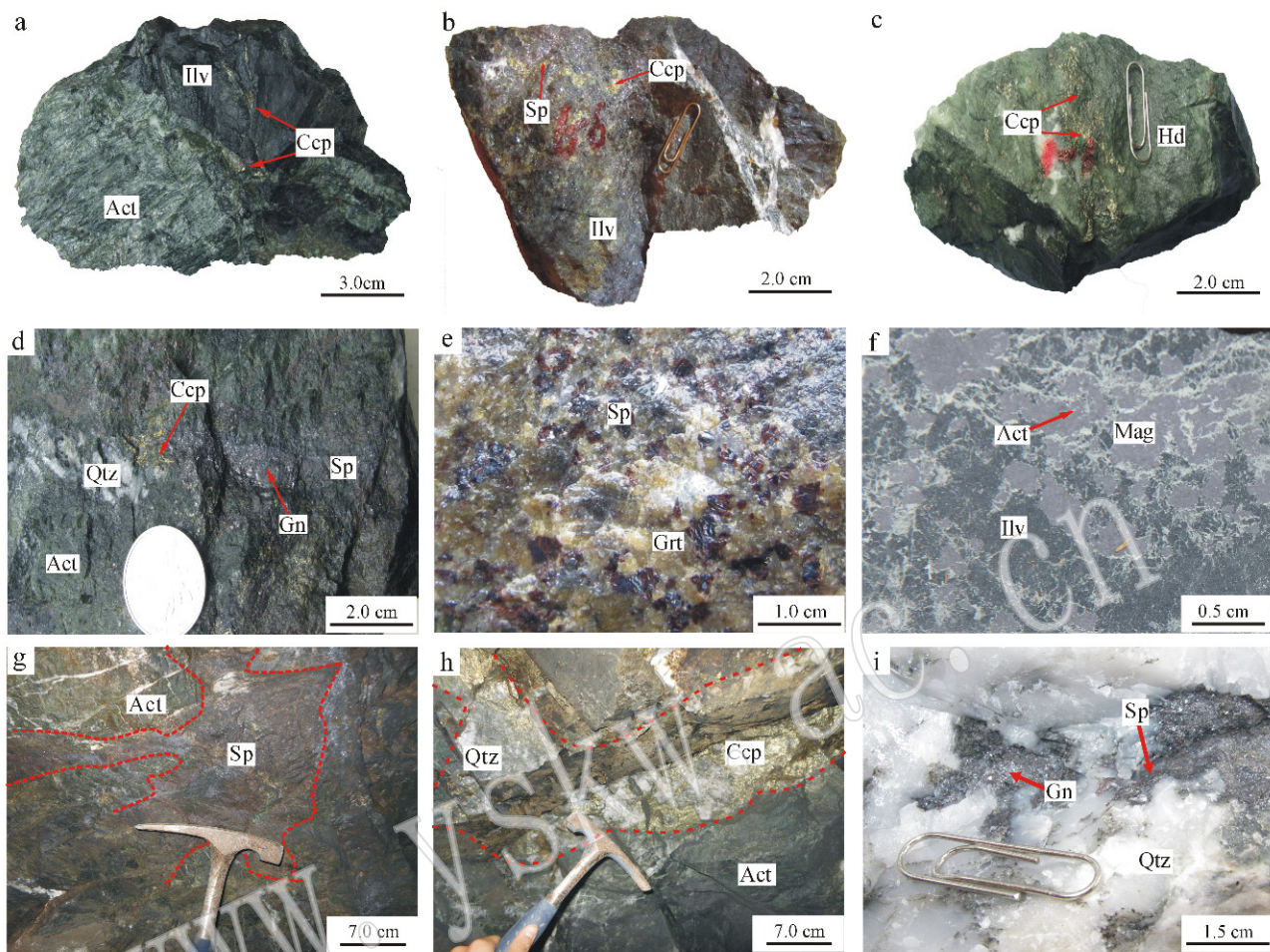


图 3 金厂河铁铜铅锌多金属矿床矿物组合与矿石特征(矿物缩写符号据沈其韩, 2009)

Fig. 3 Mineral association and features of ore minerals in the Jinchanghe Cu-Zn-Fe polymetallic deposit (the mineral abbreviations after Shen Qihan, 2009)

a—黄铜矿交代阳起石与黑柱石；b—闪锌矿、黄铜矿交代黑柱石；b—黄铜矿脉交代钙铁辉石；d—闪锌矿、黄铜矿交代阳起石；e—闪锌矿交代石榴子石；f—磁铁矿分布于阳起石中，阳起石交代黑柱石；g—闪锌矿阳起石；h—石英脉中的黄铜矿；i—石英脉中的闪锌矿、方铅矿；Grt—石榴子石；Hd—钙铁辉石；Act—阳起石；Ilv—黑柱石；Mag—磁铁矿；Ccp—黄铜矿；Sp—闪锌矿；Gn—方铅矿；Qtz—石英
 a—chalcopyrite replacing actinolite and ilvaite；b—sphalerite and chalcopyrite replacing ilvaite；c—vein chalcopyrite replacing hedenbergite；d—sphalerite and chalcopyrite replacing actinolite；e—sphalerite replacing garnet；f—vein actinolite associated with magnetite cutting through ilvaite；g—sphalerite replacing actinolite；h—chalcopyrite associated with quartz；i—sphalerite and galena associated with quartz；Grt—garnet；Hd—hedenbergite；Act—actinolite；Ilv—ilvaite；Mag—magnetite；Ccp—chalcopyrite；Sp—sphalerite；Gn—galena；Qtz—quartz

3 成矿阶段划分

根据野外手标本穿插关系，结合镜下鉴定、矿石结构构造及矿物共生组合等特征，将金厂河矿床划分为砂卡岩阶段、退化蚀变阶段、石英-硫化物阶段、碳酸盐阶段 4 个阶段。

砂卡岩阶段主要矿物为石榴子石、辉石，主要分布于砂卡岩带中部，常见其被交代而呈交代残余结构。退化蚀变阶段是矿区内主要成矿阶段之一，矿

物主要为阳起石、黑柱石、绿帘石、绿泥石、萤石、磁铁矿，退化蚀变矿物充填交代砂卡岩矿物，呈浸染状、网脉状或细脉状叠加于砂卡岩之上，沿节理、裂隙或岩性界面交代石榴子石、辉石等矿物，同时形成大量磁铁矿呈稠密浸染状沿阳起石脉分布于黑柱石粒间。石英-硫化物阶段主要形成闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、磁黄铁矿等金属矿物，是最主要的成矿阶段之一，矿化一般与退化蚀变作用关系密切，常在阳起石、黑柱石发育的部位充填有大量黄铜矿、闪锌矿、方铅矿，形成块状、浸染状、条带状的砂卡岩型矿石，

硫化物也沿石英脉或方解石脉分布于退化蚀变矿物中,形成石英脉型铜铅锌矿。碳酸盐阶段形成方解石、石英、少量黄铁矿,方解石、石英多呈细脉状切穿早期形成的矿物,黄铁矿多呈星点状沿裂隙面分布于绿泥石化方解石脉中。

4 矽卡岩矿物特征

本次进行分析的矽卡岩样品主要采自钻孔 ZK8-4、ZK26-4、ZK30-4、ZK8-7、ZK8-13,首先将样品磨制为 0.03 mm 厚的探针片并进行镜下鉴定和拍照,并对不同成矿阶段不同类型的矽卡岩矿物进行电子探针成分分析,进一步确定矽卡岩矿物的端员组分。电子探针实验由中国地质科学院矿产资源研究所探针实验室完成,所用仪器为 JO-JAX8203 型电子探针仪器,测试加速电压为 20 kV,束电流 20 nA,束斑直径 5 μm ,标样为天然矿物或者国家标准合成金属,分析误差小于 0.01%。金厂河矿床矽卡岩矿物包括石榴子石、辉石、阳起石、黑柱石、绿帘石、绿泥石等,不同矽卡岩矿物组合与相应的矿石类型相对应(图 3)。

4.1 石榴子石

本矿床石榴子石可分为两个世代:①早期石榴子石呈黄褐色,单偏光镜下多为浅黄色、浅褐色,极高正突起,无解理,呈自形-半自形、中-粗粒结构,粒径约 1.0~1.5 mm,下部矽卡岩中石榴子石环带较发育(图 4a),上部石榴子石环带不发育。石榴子石常被阳起石、绿帘石、黑柱石、闪锌矿等矿物交代(图 4b、c、d)。②晚期石榴子石呈浅黄色,自形细粒结构,粒径约 0.3~0.5 mm,环带不发育,可见晚期细粒石榴子石呈脉状切穿早期石榴子石的现象(图 4b)。

石榴子石探针数据分析见表 1,计算得出的端员组分如图 5a 所示,以钙铁榴石端员(2.94%~98.53%)为主,其次为少量的钙铝榴石(0.67%~65.19%)、极少量的铁铝榴石(0.00~31.66%)和锰铝榴石(0.12%~45.94%),其中个别锰铝榴石的 MnO 含量最高可达 20.15%,这类石榴子石常与闪锌矿相伴生。根据探针数据分析,金厂河铁铜铅锌矿石榴子石可表示为: $\text{Ca}_{(1.29\sim 3.20)}\text{Mg}_{(0\sim 0.03)}\text{Mn}_{(0.01\sim 1.35)}\text{Fe}_{(0\sim 1.49)}^{2+}\text{Fe}_{(0.09\sim 2.03)}^{3+}\text{Al}_{(0.01\sim 1.75)}\text{Ti}_{(0\sim 0.05)}\text{Si}_{(2.86\sim 3.07)}\text{O}_{12}$ 。对于环带发育较好的石榴子石,沿切面利用电子探针进行分析,可知由中心向边缘,石榴子

石中 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 阳离子数较高,且呈此消彼长的关系,除个别环带外各环带 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 阳离子数并无太大变化,呈高低交替出现(图 6)。

4.2 辉石

本矿床辉石可大致分为两期:①早期辉石呈淡绿色(图 4e),正高突起,形态多为束状、纤维状,不规则粗粒结构,粒径约 1~2 mm,有弱多色性,正交偏光下可见 II 级蓝、绿、黄、紫等干涉色,集合体呈宽脉状充填于石榴子石之间,或与石榴子石共生(图 4f)。②晚期辉石多呈暗绿色,自形-半自形结构,粒度较细,粒径约 0.1~0.3 mm,多呈脉状切穿早期辉石(图 4e),细粒磁铁矿沿此细粒辉石脉分布。

根据电子探针数据分析(表 2)可知,辉石中 SiO_2 变化范围为 50.31%~54.36%, CaO 变化范围为 21.49%~24.72%, MgO 变化范围为 4.06%~12.17%, TFeO 变化范围为 10.15%~22.24%,属于钙铁辉石-次透辉石-透辉石系列(图 5b),主要矿物组成为钙铁辉石、透辉石,含少量的含锰钙铁辉石。钙铁辉石常与磁铁矿共生(图 4e),而含锰钙铁辉石常与闪锌矿共生(图 4g)。

含锰钙铁辉石呈束状、长柱状或纤状集合体产出,粒径 0.2~3 mm(图 4g),单偏光下为无色-淡黄色,正交偏光下为 I 级黄红,最高干涉色为 II 级蓝,其特点为 TFeO 含量较其它类型辉石相对较高,可达 16.48% 和 19.98%,一定量的 Fe_2O_3 组成特殊的钙铁契尔马克分子 $\text{CaFe}_2^{3+}\text{SiO}_6$ 。根据探针数据分析,金厂河矿床辉石可表示为: $\text{Na}_{(0\sim 0.04)}\text{Ca}_{(0.91\sim 1.01)}\text{Mg}_{(0.24\sim 0.68)}\text{Fe}_{(0.32\sim 0.70)}^{2+}\text{Fe}_{(0\sim 0.06)}^{3+}\text{Al}_{(0\sim 0.05)}\text{Si}_{(1.97\sim 2.02)}\text{O}_6$ 。

4.3 角闪石、绿帘石、绿泥石

角闪石、绿帘石、绿泥石属于退化蚀变阶段的产物,常由早期的石榴子石或辉石退化蚀变而成,其生成一般晚于早期矽卡岩矿物。

本矿床中的闪石是最主要的退化蚀变矿物,也是该区最重要的矽卡岩矿物,约占到所有矽卡岩矿物的 40% 左右。根据电子探针数据分析(表 3)可知,矿区内闪石大致分为两种类型:①钙角闪石:主要包括阳起石、铁阳起石,少量铁角闪石(图 7a),阳起石呈深绿-墨绿色,呈自形或他形交代早期矽卡岩矿物(图 4c、i),形态为长柱状、纤维状、束状(图 4h、i),粒度粗细不等,细粒在 0.5~1.0 mm,粗粒在 2~5 mm 之间。该区阳起石多与闪锌矿、磁铁矿共生。

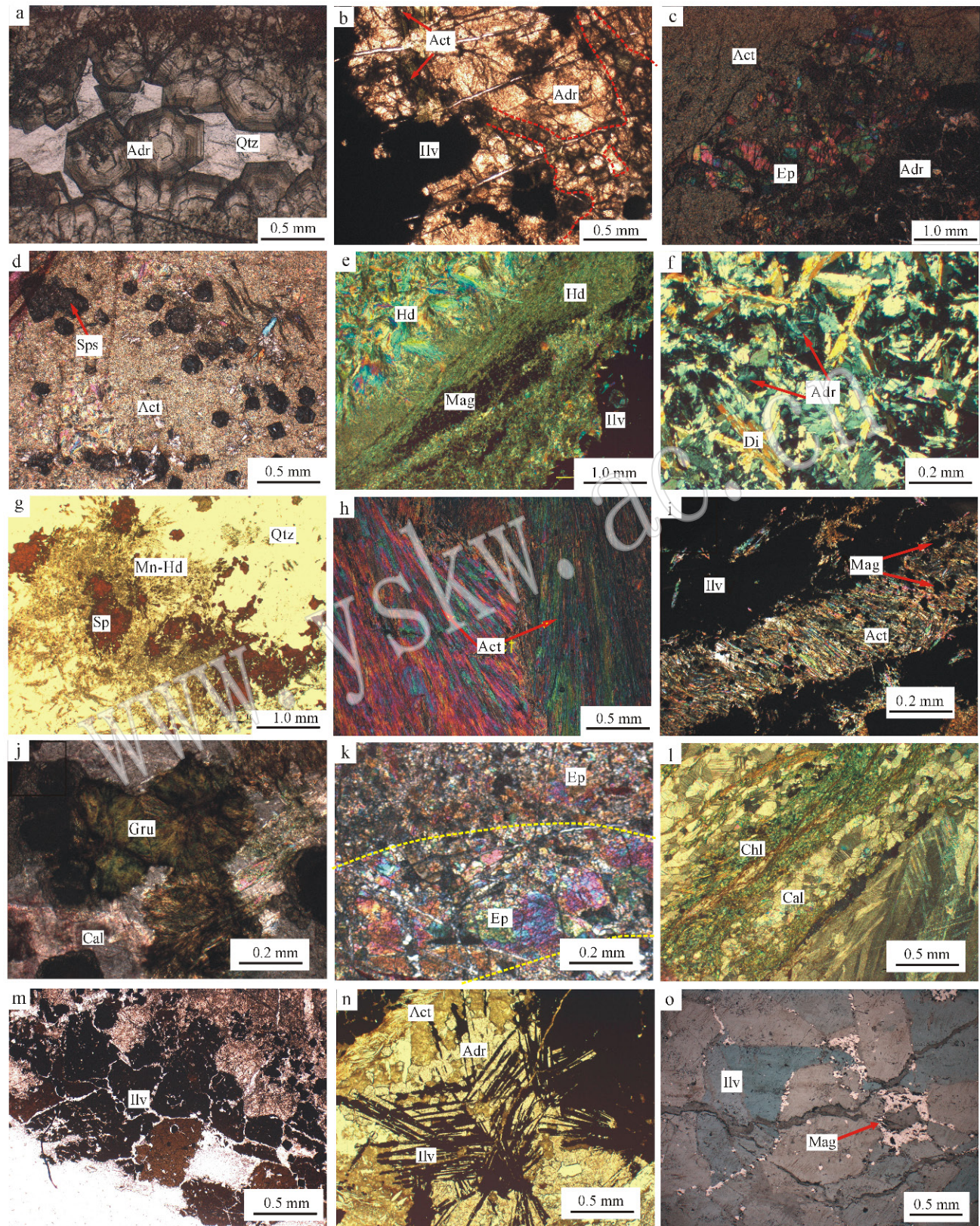


图 4 金厂河铁铜铅锌多金属矿床岩石、矿石镜下显微特征

Fig. 4 Microscope characteristics of rocks and ores in the Jinchanghe Cu-Zn-Fe polymetallic deposit

a—具环带结构的钙铁榴石(单偏光);b—晚期脉状石榴子石切穿早期石榴子石;c—石榴子石退化蚀变为绿帘石(正交偏光);d—自形锰铝榴石(正交偏光);e—晚期辉石呈脉状切穿早期辉石(正交偏光);f—钙铁榴石与透辉石共生;g—含锰钙铁辉石与闪锌矿共生(单偏光);h—束状阳起石(正交偏光);i—含细粒磁铁矿的阳起石脉交代黑柱石(正交偏光);j—放射状铁闪石(正交偏光);k—晚期粗粒绿帘石穿切早期细粒绿帘石;l—绿泥石沿方解石脉分布;m—半自形-他形粒状黑柱石(单偏光);n—自形长柱状黑柱石交代石榴子石(单偏光);o—细粒磁铁矿交代黑柱石(反射光);Adr—钙铁榴石;Sps—锰铝榴石;Di—透辉石;Hd—钙铁辉石;Mn-Hd—含锰钙铁辉石;Act—阳起石;Gru—铁闪石;

Ilv—黑柱石;Ep—绿帘石;Chl—绿泥石;Ccp—黄铜矿;Sp—闪锌矿;Mag—磁铁矿;Cal—方解石;Qtz—石英

a—zonal texture andradite(under transmitted light);b—vein garnet cutting through garnet of the early skarn stage(under transmitted light);c—retrograde alteration of garnet into epidote(under transmitted light);d—euohedral spessartite(under transmitted light);e—vein pyroxene cutting through pyroxene of the early skarn stage(under transmitted light);f—diopside associated with andradite;g—sphalerite associated with johannsenite(under transmitted light);h—bunchy actinolite(under transmitted light);i—vein actinolite associated with granular magnetite cutting through ilvaite(under transmitted light);j—radial runerite(under transmitted light);k—later vein epidote cutting through early epidote(under transmitted light);l—chlorite distributed along with veined calcite(under transmitted light);m—hypidiomorphic-xenomorphic granular columnar ilvaite(under transmitted light);n—euohedral columnar ilvaite replacing garnet(under transmitted light);o—granular magnetite replacing ilvaite(under reflected light);Adr—andradite;Sps—spessartite;Di—diopside;Hd—hedenbergite;Mn-Hd—manganoan hedenbergite;Act—actinolite;Gru—grunerite;Ilv—ilvaite;

Ep—epidote;Chl—chlorite;Ccp—chalcopyrite;Sp—sphalerite;Mag—magnetite;Cal—calcite;Qtz—quartz

表 1 金厂河铁铜铅锌多金属矿床代表性石榴子石电子探针分析结果

Table 1 Representative electron microprobe analyses of garnets from the Jinchanghe deposit

样品号	31-1-2	38-3-3	78-1-1.1	78-1-1.2	78-1-1.3	78-1-1.4	102-1-1	104-1	111-1-1	ZK30-4-56-1	ZK26-4-34-1
SiO ₂	34.48	34.03	35.84	35.75	37.81	36.92	37.20	36.22	36.08	37.45	38.79
TiO ₂	0.258	0.00	0.359	0.021	0.019	0.00	0.66	0.005	0.00	0.82	0.138
Al ₂ O ₃	9.66	1.09	6.52	0.59	10.27	9.48	9.62	0.07	5.85	10.94	18.77
Cr ₂ O ₃	0.05	0.02	0.00	0.05	0.10	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00
FeO	16.13	27.21	20.78	28.05	16.27	17.53	15.82	28.94	20.79	14.43	7.53
MnO	0.89	0.36	0.08	0.16	0.08	0.24	0.22	0.12	0.08	0.34	20.15
MgO	0.22	0.12	0.03	0.10	0.02	0.00	0.08	0.13	0.06	0.13	0.01
CaO	34.52	33.52	34.90	34.22	35.41	34.99	35.66	34.13	35.21	35.81	15.31
Total	96.212	96.333	99.933	98.936	99.978	99.157	99.263	99.619	98.076	99.907	100.72
以 24 个氧原子数为基础计算的阳离子数											
Si	2.86	2.91	3.07	2.96	2.98	2.95	2.96	2.98	2.96	2.95	3.06
Ti	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.05	0.01
Al	0.94	0.11	0.66	0.06	0.95	0.89	0.90	0.01	0.56	1.02	1.75
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ³⁺	1.12	1.94	0.09	1.94	1.05	1.14	1.05	1.99	0.42	0.95	0.21
Fe ²⁺	0.00	0.00	1.49	0.00	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29
Mn	0.06	0.03	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	1.35
Mg	0.03	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00
Ca	3.07	3.07	3.20	3.04	2.99	3.00	3.04	3.01	3.09	3.02	1.29
Ura	0.15	0.06	0.00	0.17	0.30	0.00	0.06	0.03	0.04	0.00	0.00
Adr	53.16	93.80	2.94	95.28	52.28	56.02	51.53	98.53	68.85	46.59	10.68
Pyr	0.87	0.48	0.09	0.39	0.09	0.00	0.29	0.51	0.22	0.49	0.06
Sps	1.98	0.83	0.12	0.36	0.18	0.53	0.48	0.28	0.17	0.74	45.94
Gro	43.85	4.84	65.19	3.80	46.68	42.33	47.64	0.67	30.71	52.18	33.48
Alm	0.00	0.00	31.66	0.00	0.67	1.12	0.00	0.00	0.00	0.00	9.84

注:Alm—铁铝榴石,Adr—钙铁榴石,Gro—钙铝榴石,Pyr—镁铝榴石,Sps—锰铝榴石;分析精度为 0.0 n%;FeO 为 TFe;分析者:陈小丹、海东婧。

②铁镁铁角闪石(图 7b):主要为铁闪石,深绿色,呈集合体粒度在 0.5~1.5 mm 间,该种铁闪石基本不圆形放射状集合体(图 4j),充填交代早期石榴子石,与矿石共生。

表 2 金厂河铁铜铅锌多金属矿床代表性辉石电子探针分析结果

Table 2 Representative electron microprobe analyses of clinopyroxenes from the Jinchanghe deposit

样品号	33-1-1	33-1-2	61-1-1	61-1-3	63-1-1	64-2-2	80-2-1	104-2	111-1-2	ZK30-4-16-1-2	ZK30-4-48-2	ZK30-4-50-2
SiO ₂	50.67	50.60	52.70	52.07	51.83	50.31	51.12	53.98	54.36	51.01	52.85	52.76
TiO ₂	0.03	0.004	0.023	0.00	0.00	0.025	0.00	0.00	0.007	0.00	0.00	0.018
Al ₂ O ₃	0.73	1.25	0.15	0.34	0.19	0.42	1.20	0.10	0.00	1.11	0.25	1.28
Cr ₂ O ₃	0.02	0.00	0.00	0.07	0.01	0.08	0.01	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00
FeO	19.28	16.48	13.34	15.28	15.45	22.24	18.24	10.15	10.59	19.98	16.68	16.01
MnO	1.20	3.26	0.27	0.18	0.00	0.69	1.91	0.32	0.27	2.65	0.43	0.41
MgO	5.38	5.4	10.43	8.82	8.6	5.43	6.02	12.17	11.68	4.06	8.00	7.56
CaO	23.19	23.7	24.72	24.51	24.65	21.49	22.37	24.39	24.59	22.90	23.35	23.28
Na ₂ O	0.56	0.41	0.07	0.16	0.19	0.20	0.23	0.03	0.04	0.18	0.15	0.34
K ₂ O	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	101.056	101.096	101.694	101.433	100.938	100.905	101.116	101.15	101.548	101.898	101.704	101.654
以 6 个氧原子和 4 个阳离子为基准计算												
Si	1.98	1.97	1.99	1.99	1.99	1.99	1.99	2.01	2.02	1.99	2.01	2.00
Al ^{IV}	0.02	0.03	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Al ^{VI}	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01	0.04	0.00	0.00	0.04	0.01	0.06
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ³⁺	0.06	0.04	0.04	0.03	0.04	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ²⁺	0.57	0.50	0.38	0.45	0.45	0.70	0.59	0.32	0.33	0.65	0.53	0.51
Mn	0.04	0.11	0.01	0.01	0.00	0.02	0.06	0.01	0.01	0.09	0.01	0.01
Mg	0.31	0.31	0.59	0.50	0.49	0.32	0.35	0.68	0.65	0.24	0.45	0.43
Ca	0.97	0.99	1.00	1.00	1.01	0.91	0.93	0.97	0.98	0.96	0.95	0.95
Na	0.04	0.03	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02
Di	31.63	32.29	57.84	50.51	50.00	29.91	35.00	67.33	65.66	24.49	45.45	45.26
Hd	64.29	56.25	41.18	48.48	50.00	68.22	59.00	31.68	33.33	66.33	53.54	53.68
Jo	4.08	11.46	0.98	1.01	0.00	1.87	6.00	0.99	1.01	9.18	1.01	1.05

注：0.000 为低于检测限；Di—透辉石，Hd—钙铁辉石，Jo—锰钙辉石；分析精度为 0.0 n%；FeO 为 TFe；分析者：陈小丹、海东婧。

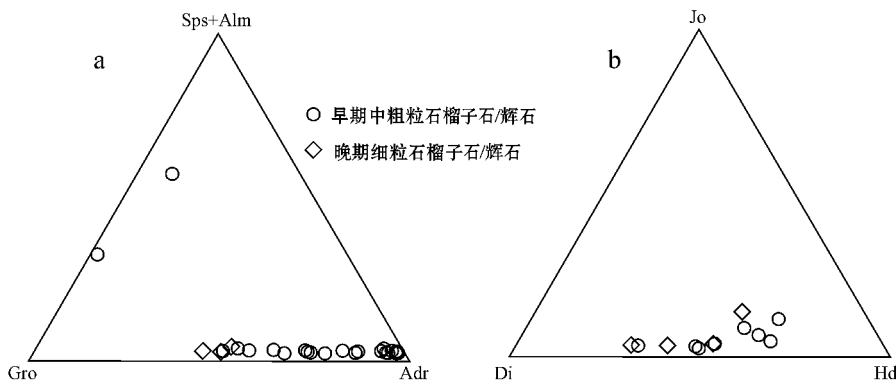


图 5 金厂河铁铜铅锌矿石石榴子石(a)及辉石(b)端员组分图解

Fig. 5 Compositions of garnets (a) and pyroxene (b) from the Jinchanghe deposit

Gro—钙铝榴石；Adr—钙铁榴石；Sps + Alm—锰铝榴石 + 铁铝榴石；Di—透辉石；Hd—钙铁辉石；Jo—锰钙辉石

Gro—grossularite；Adr—andradite；Sps + Alm—spessartine + almandine；Di—diopside；Hd—hedenbergite；Jo—johannsenite

绿帘石：黄绿色—草绿色，粒状、束状结构(图 4k)黄绿色—淡绿色弱多色性，交代早期石榴子石和阳起石，多位于石榴子石与阳起石的接触部位(图

4c)，可划分为两个世代，早期绿帘石为自形—半自形细粒结构，粒径约 0.2~0.5 mm，晚期绿帘石为自形—半自形粗粒结构，粒径约在 1~2 mm，呈脉状充填于

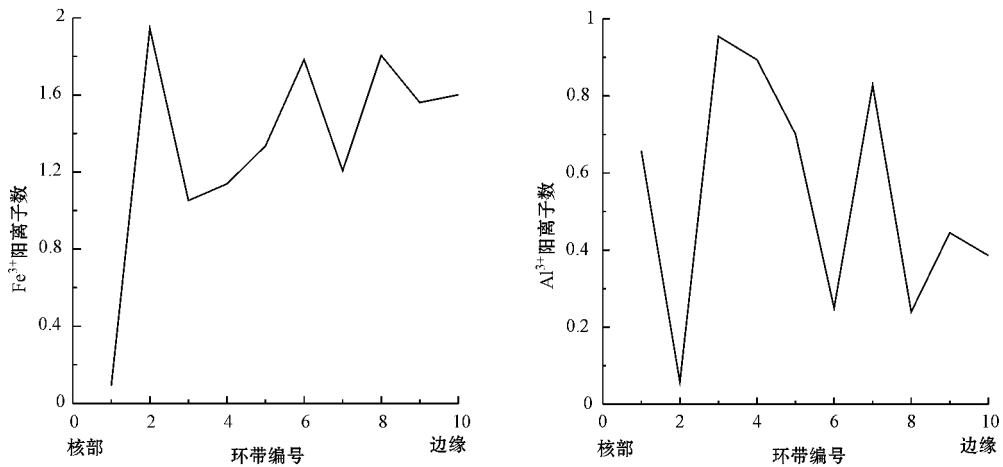


图 6 环带结构石榴子石成分变化趋势图

Fig. 6 Variation trend of composition of garnet from core to rim within zoning structure

表 3 金厂河铁铜铅锌多金属矿床代表性角闪石电子探针分析结果

Table 3 Representative electron microprobe analyses of amphiboles from the Jinchanghe deposit

样品编号	37-1-3	ZK26-4-31-1	ZK26-4-31-2	50-1-1	63-1-3	ZK8-13-1	ZK8-13-3	ZK8-7-1	ZK8-7-2	ZK8-7-3	63-1-2	ZK30-4-39-1
SiO ₂	53.17	54.2	54.47	48.78	49.13	53.41	53.93	53.11	52.39	51.66	43.62	46.11
TiO ₂	0.00	0.00	0.001	0.00	0.054	0.048	0.01	0.037	0.024	0.02	0.09	0.00
Al ₂ O ₃	0.62	0.25	0.31	0.78	2.37	1.95	1.46	0.49	0.41	1.26	7.06	6.06
FeO	22.14	19.32	18.51	32.48	32.87	13.64	13.44	22.65	25.96	26.12	33.16	31.72
MnO	1.68	1.87	1.93	0.55	0.33	1.42	1.48	0.06	0.08	0.15	0.34	1.84
MgO	9.29	11.08	11.43	3.52	3.15	14.43	14.57	9.16	6.72	7.02	2.12	2.94
CaO	11.97	12.51	12.28	11.12	11.83	12.66	12.52	11.66	11.73	11.76	11.6	0.06
Na ₂ O	0.09	0.03	0.05	0.04	0.33	0.20	0.17	0.08	0.00	0.23	0.99	1.47
K ₂ O	0.03	0.02	0.02	0.07	0.27	0.06	0.07	0.10	0.03	0.09	1.00	4.41
Total	98.98	99.28	99.01	97.35	100.50	97.81	97.64	97.34	97.34	98.30	99.97	94.61
以 23 个氧为基准计算的阳离子数												
Si	7.93	7.96	7.99	7.80	7.64	7.76	7.84	8.01	8.04	7.87	6.92	7.59
Al ^{IV}	0.07	0.04	0.01	0.15	0.36	0.24	0.16	0.01	0.04	0.13	1.08	0.41
Al ^{VI}	0.04	0.01	0.04	0.00	0.07	0.10	0.09	0.10	0.11	0.10	0.24	0.77
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.006	0.005	0.001	0.004	0.003	0.002	0.011	0.00
Fe ³⁺	0.97	0.98	1.00	0.86	0.78	0.90	0.93	1.04	1.07	0.95	0.33	0.48
Fe ²⁺	1.79	1.39	1.27	3.48	3.48	0.76	0.70	1.82	2.26	2.38	4.06	3.89
Mn	0.21	0.23	0.24	0.07	0.04	0.17	0.18	0.01	0.01	0.02	0.05	0.26
Mg	2.07	2.43	2.50	0.84	0.73	3.13	3.16	2.06	1.54	1.59	0.50	0.72
Ca	1.91	1.97	1.93	1.91	1.96	1.97	1.95	1.88	1.93	1.92	1.97	0.01
Na	0.03	0.01	0.02	0.01	0.10	0.06	0.05	0.02	0.00	0.07	0.30	0.47
K	0.01	0.00	0.00	0.01	0.05	0.01	0.01	0.02	0.00	0.02	0.20	0.93
阳离子总量	15.03	15.02	15.00	15.14	15.22	15.10	15.07	14.96	14.93	15.05	15.67	15.52
种属	含锰阳起石	含锰阳起石	含锰阳起石	铁阳起石	铁阳起石	阳起石	阳起石	阳起石	铁阳起石	铁阳起石	铁角闪石	铁闪石

注: 空格表示低于检测限, 分析精度为 0.0 n%, FeO 为 TFe; 分析者: 陈小丹、海东婧。

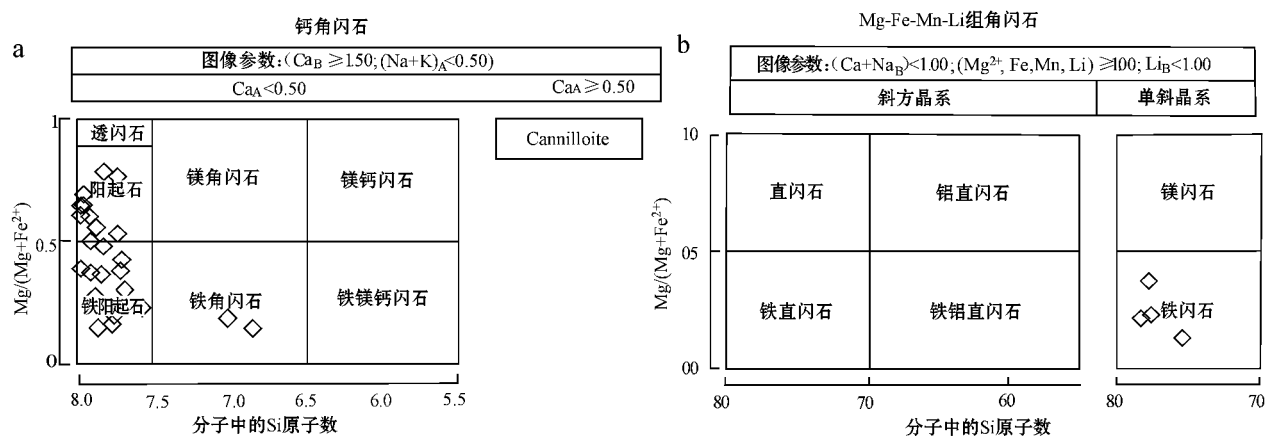


图 7 金厂河铁铜铅锌矿角闪石分类图解(底图据 Leake *et al.* , 1997)

Fig. 7 Classification of amphiboles from the Jinchanghe deposit (after Leake *et al.* , 1997)

早期绿帘石中(图 4k)。据电子探针数据分析(表 4), 为 21.11% ~ 27.23%, TFeO 变化范围为 6.72% ~ 14.39%, 属于典型的绿帘石。该矿床的帘石中 SiO₂ 变化范围为 37.66% ~ 39.68%, CaO 变化范围为 22.38% ~ 24.65%, Al₂O₃ 变化范围

表 4 金厂河铁铜铅锌多金属矿床绿帘石电子探针分析结果

Table 4 Representative electron microprobe analyses of epidote from the Jinchanghe deposit

样品编号	28-1-2	36-1-2	41-1-2	89-1-1.1	123-2	133-2	ZK30-4-48-1	ZK26-4-26-1
SiO ₂	37.99	38.62	37.66	37.77	39.68	39.66	39.18	39.52
TiO ₂	0.03	0.20	0.03	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02
Al ₂ O ₃	21.81	24.23	22.92	21.11	24.76	27.23	23.39	22.74
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02
FeO	14.20	11.46	13.02	14.39	10.35	6.72	12.09	12.94
MnO	0.56	0.03	0.20	0.03	0.00	0.03	0.20	0.11
MgO	0.09	0.04	0.00	0.05	0.00	0.03	0.03	0.04
CaO	22.81	23.75	22.38	22.89	24.34	24.65	24.06	23.82
Na ₂ O	0.05	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00
K ₂ O	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00
Total	97.54	98.36	96.30	96.25	99.14	98.32	99.02	99.20
以 12 个氧为基准计算的阳离子数								
Si ⁴⁺	3.01	2.98	2.99	3.03	3.02	2.98	3.02	3.05
Ti ⁴⁺	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al ³⁺	2.03	2.20	2.14	1.99	2.22	2.41	2.12	2.06
Cr ³⁺	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ³⁺	0.93	0.72	0.79	0.91	0.61	0.41	0.77	0.76
Fe ²⁺	0.01	0.02	0.08	0.05	0.04	0.01	0.00	0.07
Mn ²⁺	0.04	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
Mg ²⁺	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca ²⁺	1.94	1.96	1.91	1.97	1.98	1.99	1.99	1.97
Na ⁺	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
K ⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
种属	绿帘石	绿帘石	绿帘石	绿帘石	绿帘石	绿帘石	绿帘石	绿帘石

注：Fe₂O₃ 含量用电价差法计算获得，空格表示低于检测限，分析精度为 0.0 n%，FeO 为 TFe；分析者：陈小丹、海东婧。

绿泥石:浅绿色,镜下呈自形-半自形细粒结构,集合体呈鳞片状、面状沿方解石脉分布(图 41),说明绿泥石形成于较晚成矿阶段。根据电子探针数据分析(表 5)绿泥石较富铁,TFeO 变化范围为 21.46% ~

43.67%,矿区主要发育铁镁绿泥石、铁绿泥石、斜绿泥石和鲕绿泥石(图 8a),可知热液流体演化到晚期阶段铁质仍然较富。

表 5 金厂河铁铜铅锌多金属矿床绿泥石电子探针分析结果

Table 5 Representative electron microprobe analysis of chlorite from Jinchanghe deposit

样品编号	44-1-2	36-1-1	41-1-1	89-1-2.2	ZK30-4-25-2	ZK30-4-35-1-3	ZK26-4-26-1-1
SiO ₂	28.40	23.51	26.54	28.98	27.37	25.53	25.93
TiO	0.01	0.02	0.00	0.03	0.06	0.01	0.00
Al ₂ O ₃	18.58	21.41	20.49	16.81	19.22	19.70	20.00
Cr ₂ O ₃	0.31	0.03	0.00	0.00	0.05	0.04	0.04
FeO	21.46	43.67	25.91	25.43	30.32	33.85	32.36
MnO	0.02	0.59	0.36	0.16	0.59	0.92	0.76
MgO	19.23	1.15	15.31	16.80	12.63	9.87	11.07
CaO	0.07	0.00	0.00	0.13	0.01	0.01	0.02
Na ₂ O	0.04	0.00	0.11	0.08	0.05	0.00	0.02
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00
Total	88.11	90.38	88.71	88.42	90.31	89.94	90.18

以 14 个氧为基准计算的阳离子数

Si ⁴⁺	2.91	2.67	2.77	3.02	2.87	2.76	2.76
Ti ⁴⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al ³⁺	2.24	2.86	2.51	2.06	2.37	2.50	2.51
Cr ³⁺	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ³⁺	1.32	1.14	1.36	1.29	1.26	1.38	1.36
Fe ²⁺	0.51	2.99	0.89	0.92	1.39	1.67	1.51
Mn ²⁺	0.00	0.06	0.03	0.01	0.05	0.08	0.07
Mg ²⁺	2.95	0.20	2.40	2.62	1.98	1.60	1.77
Ca ²⁺	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Na ⁺	0.01	0.00	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00
K ⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe/(Fe+Mg)	0.38	0.95	0.48	0.46	0.57	0.66	0.62

注: Fe₂O₃ 含量用电价差法计算获得,空格表示低于检测限,分析精度为 0.0 n%, FeO 为 TFe;分析者 陈小丹、海东婧。

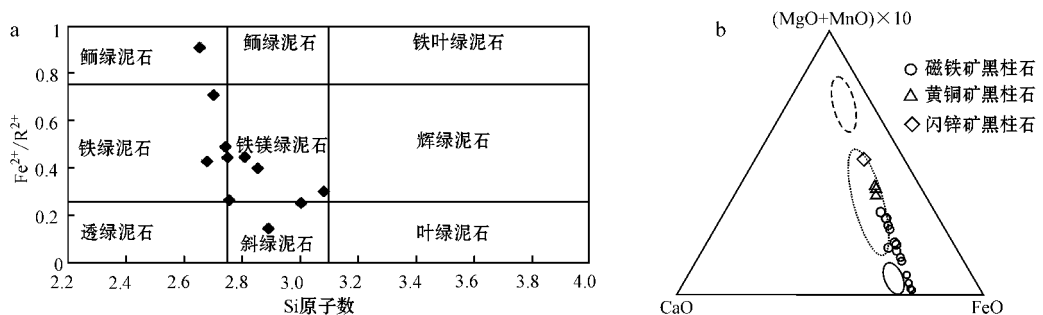


图 8 金厂河矿区绿泥石分类 (a, 底图据 Foster, 1962) 与黑柱石 $(MgO+MnO) \times 10 - CaO - FeO$ 三角图 (b, 底图据唐萍芝等 2011)

Fig. 8 Classification of chlorite (a, base map after Foster, 1962) and $(MgO + MnO) \times 10 - CaO - FeO$ diagrams of ilvaite (b, base map after Tang Pingzhi et al., 2011) from the Jinchanghe deposit

图 b 中虚线代表与中酸性岩体有关的黑柱石投影的大致区域, 点线代表与基性岩体有关的黑柱石投影的大致区域, 实线代表与超基性岩体有关的黑柱石投影的大致区域

Fig. b hidden circle represents ilvaite related to intermediate acidity rock; dotted circle represents ilvaite related to subsiliceous rock; full circle represents ilvaite related to ultrabasic rock

4.4 黑柱石

黑柱石是一种特殊的退化蚀变矿物,本矿床中黑柱石分布较广,手标本为深黑色,玻璃光泽,以颜色深、无金属光泽与磁铁矿相区别(图 3h),单偏光镜下为黑褐色-黑色,无解理,自形-半自形中粗粒或不规则粒状结构,粒径约 1.0~2.5 mm,晶型为短柱状、长柱状、块状(图 4m),部分呈树枝状集合体,具褐色-黑色多色性(图 4m,n);反射光下可见清楚的灰色-灰蓝色双反射,属强非均质(图 4o)。该区黑柱石交代石榴子石和辉石等早期砂卡岩矿物(图 4n),说明黑柱石形成于成矿作用晚期,随着热液活动加强,由早期砂卡岩矿物退化蚀变而成。

标准黑柱石矿物的化学组成为 $\text{CaFe}_2^+ \text{Fe}^{3+}$

$[\text{Si}_2\text{O}_7] \text{X}(\text{OH})$ (Ivan and Rossitsa, 2005)。金厂河矿区黑柱石大多为普通黑柱石、部分含锰黑柱石,可表示为: $\text{Ca}_{1.03}(\text{Fe}_{1.80}\text{Mn}_{0.16}\text{Mg}_{0.01})_{1.97^{2+}}(\text{Fe}_{0.97}\text{Al}_{0.02})_{0.99}^{3+}[\text{Si}_{2.00}\text{O}_7] \text{X}(\text{OH})$

从表 6 和图 8b 中可看出,金厂河矿区的黑柱石中,与铅锌矿有关的黑柱石 MnO 含量较高, MnO 含量最高可达 8.72%,多数分布于 1.0%~6.0% 之间,属含锰黑柱石,与黄铜矿有关的黑柱石 MnO 含量也较高,为 4.25%,与磁铁矿有关的黑柱石则含有较多的铁质, FeO 含量范围为 47.34%~52.28%。这表明,金厂河矿区的黑柱石的形成可能与基性岩体有关(唐萍芝等, 2011)。

表 6 金厂河铁铜铅锌多金属矿床黑柱石电子探针分析结果

Table 6 Representative electron microprobe analyses of ilvaite from the Jinchanghe deposit

样品编号	54-3-2	52-2-1	ZK22-2-2.1	ZK22-2-2.2	38-3-4	ZK8-7-1	ZK8-7-2	Zk8-13-1	Zk8-13-2	Zk8-13-3
SiO ₂	29.41	30.67	29.84	29.71	29.84	30.71	29.98	30.66	30.77	30.52
TiO ₂	0.04	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	0.22	0.17	0.10	0.38	0.16	0.10	0.24	0.14	0.33	0.20
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.00
FeO	50.64	52.28	48.10	47.34	49.39	46.71	45.75	43.66	43.08	44.12
MnO	1.32	1.40	3.69	4.07	4.25	6.61	6.42	8.72	7.86	7.34
MgO	0.07	0.17	0.09	0.36	0.10	0.11	0.10	0.13	0.23	0.08
CaO	16.50	14.20	13.80	13.96	14.14	14.37	14.32	14.43	14.77	13.94
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.01	0.10	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	98.20	98.89	95.64	95.83	98.00	98.62	98.74	97.77	97.08	96.21
以 8 个氧为基准计算的阳离子数										
Si ⁴⁺	1.95	2.01	2.02	2.01	1.99	2.02	2.01	2.03	2.04	2.04
Ti ⁴⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al ³⁺	0.02	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02	0.01	0.03	0.02
Cr ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ³⁺	1.09	0.95	0.92	0.94	1.03	0.94	0.95	0.91	0.87	0.86
Fe ²⁺	1.71	1.91	1.79	1.72	1.71	1.62	1.60	1.49	1.51	1.60
Mn ²⁺	0.07	0.08	0.21	0.23	0.24	0.37	0.36	0.49	0.44	0.42
Mg ²⁺	0.01	0.02	0.01	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
Ca ²⁺	1.17	1.00	1.00	1.01	1.01	1.01	1.03	1.02	1.05	1.00
Na ⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K ⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
种属	黑柱石	黑柱石	黑柱石	黑柱石	黑柱石	含锰黑柱石	含锰黑柱石	含锰黑柱石	含锰黑柱石	含锰黑柱石

注: Fe₂O₃ 含量用电价差法计算获得,空格表示低于检测限,分析精度为 0.0 n%, FeO 为 TFe; 分析者: 陈小丹、海东婧。

5 蚀变及矿化分带

5.1 水平分带

从 8 号典型横剖面分带图(图 9)可见,金厂河矿区砂卡岩与矿石矿物组合在水平方向上自东向西存

在一定的分带趋势: 阳起石黑柱石砂卡岩(含磁铁矿、黄铜矿)与石榴子石阳起石砂卡岩(含黄铜矿、少量铅锌矿)含量均逐渐降低,相反,阳起石砂卡岩(含铅锌矿)含量逐渐升高。自 F10 断裂向西,阳起石、黑柱石均有发育,其 Fe/Fe+Mn+Mg 比值均呈逐渐降低趋势(图 10),具体蚀变及矿化分带描述见表 7。

表 7 金厂河矿床水平分带特征
Table 7 Horizontal zoning characteristics of the Jinchanghe deposit

	含 Pb-Zn 锰质砂卡岩带(西带)	含 Cu 钙砂卡岩带(中带)	含 Fe 钙砂卡岩带(东带)
含矿岩性	阳起石砂卡岩	阳起石黑柱石砂卡岩 阳起石砂卡岩	阳起石黑柱石砂卡岩 阳起石石榴子石砂卡岩
w(TFeO)/%	—	15.70~39.80	31.52~42.73
w(Pb+Zn)/%	4.12~6.43	1.96~4.34	—
w(Cu)/%	0.07~1.20	0.34~2.33	0.02~1.50
砂卡岩矿物	含锰阳起石: 淡绿色, 纤状柱状结构, 长度约 2.5~5 mm	黑柱石: 深黑色细粒结构(0.5~1.5 mm)、柱状形态(长度约 1~4 mm); 阳起石: 淡绿色, 纤状柱状结构, 长度约 3~5 mm; 辉石: 淡绿色, 束状、纤维状、粒状结构, 粒径约 0.3~2.0 mm	黑柱石: 深黑色细粒结构(1.0~5.0 mm)、柱状形态(长度约 3~10 mm); 石榴子石: 细粒结构(0.5~4 mm); 阳起石: 绿色束状或纤状结构, 长度约 3~5 mm
矿石矿物	闪锌矿、方铅矿、少量黄铜矿	黄铜矿、磁铁矿、铅锌矿	磁铁矿、少量黄铜矿

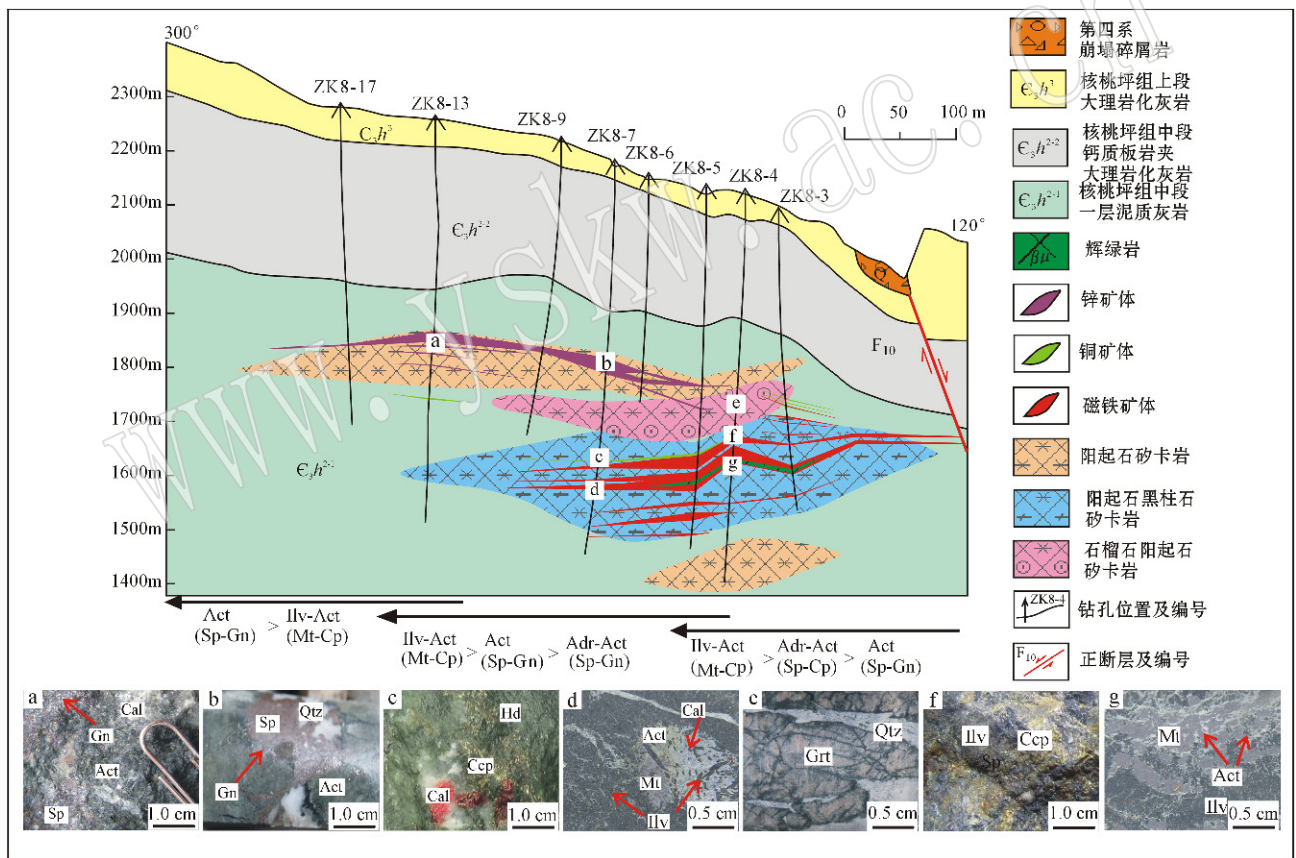


图 9 金厂河矿区 8 勘探线地质剖面分带图

Fig. 9 Geological cross section and zonation along No. 8 exploration line of the Jinchanghe deposit

Act—阳起石; Ilv—黑柱石; Adr—钙铁榴石; Hd—钙铁辉石; Mt—磁铁矿; Ccp—黄铜矿; Sp—闪锌矿; Gn—方铅矿; Cal—方解石; Qtz—石英
Act—actinolite; Ilv—ilvaite; Adr—andradite; Hd—hedenbergite; Mt—magnetite; Ccp—chalcopyrite; Sp—sphalerite; Gn—galena;
Cal—calcite; Qtz—quartz

5.2 垂直分带

根据野外岩芯编录分析总结, 金厂河矿区铁铜铅锌矿床存在明显垂向蚀变矿化分带。上砂卡岩带

为 Pb-Zn 矿化带, 赋矿砂卡岩主要由含锰阳起石组成, 位于标高 1 850~1 700 m; 中砂卡岩带为 Cu 矿化带, 赋矿砂卡岩主要由阳起石、石榴子石、辉石组成,

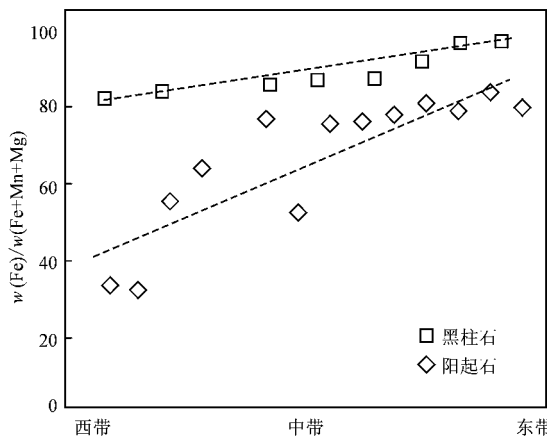


图 10 金厂河多金属矿床黑柱石与阳起石 Fe/Fe+ Mn + Mg 比值水平方向变化趋势

Fig. 10 Fe/Fe+ Mn + Mg variation of ilvaite and actinolite in the horizontal direction in the Jinchanghe polymetallic deposit

位于标高 1 700~1 650 m ;下矽卡岩带为 Fe 矿化带, 赋矽卡岩主要由黑柱石、阳起石,位于标高 1 650~1 500 m。

据 8 号勘探线钻孔对比图(图 11),矿物组合存在明显的垂向分带,垂向剖面中部石榴子石和辉石含量较多,阳起石和绿帘石等退化蚀变矿物在深部和浅部仍均有发育,磁铁矿主要发育于剖面中部,向上部铜矿和铅锌矿含量逐渐增加。

矿物端员组分在垂向剖面上也有一定变化规律:中部闪石以铁阳起石端员为主,上下两侧则以阳起石端员为主,辉石在中部偏向钙铁辉石端员,而在上下两侧则偏向透辉石端员,且自深至浅,锰辉石端员含量有逐渐升高的趋势(图 11)。以 8 号勘探线钻孔对比图作为典型剖面,自上而下蚀变矿化分带描述如表 8 所示:

表 8 金厂河矿床垂直分带特征

Table 8 Vertical zoning characteristics of the Jinchanghe deposit

	含 Pb-Zn 锰质矽卡岩带	含 Cu 钙矽卡岩带	含 Fe 钙矽卡岩带	无矿退化蚀变岩
含矿岩性	阳起石矽卡岩	石榴石阳起石矽卡岩	阳起石黑柱石矽卡岩	阳起石绿帘石矽卡岩
$\tau_c(\text{TFeO})\%$			32.19~42.20	
$\tau_c(\text{Pb} + \text{Zn})\%$	2.15~4.90			
$\tau_c(\text{Cu})\%$		0.56~1.50		
矽卡岩矿物	含锰阳起石:纤状柱状结构,长度约 1.5~10 mm	阳起石:柱状结构,粒径约 0.5~5.0 mm; 石榴子石:半自形-他形中-细粒结构,粒径 0.1~0.5 mm 辉石:淡绿色,柱状、纤维状、不规则粒状结构,粒径约 1~2 mm	黑柱石:自形-半自形中-粗粒结构,粒径约 1.0~2.5 mm,形态为短柱状和粒状; 阳起石:束状纤状结构,粒度粗细不等,约 0.5~5.0 mm 粒径,充填交代石榴子石	阳起石:纤状束状结构,粒度粗细不等; 绿帘石:自形中-粗粒结构,粒径约 0.1~0.5 mm
矿石矿物	闪锌矿、方铅矿:他形粒状结构,浸染状构造,分布于含锰阳起石中	黄铜矿:他形粒状结构,浸染状构造交代阳起石	粗粒磁铁矿呈不规则粒状分布于黑柱石粒间; 少量细粒自形磁铁矿沿晚期微晶阳起石脉分布	—

6 成矿条件及矿床成因机制探讨

6.1 矿床成因类型

由于矿区未发现与矽卡岩和成矿有关的岩体,因此矿床成因类型尚未完全确定,但该区却发育有广泛的矽卡岩化围岩蚀变。从矿物组合看,金厂河矿床矿物组合主要为钙质矽卡岩建造,包括少量含锰矽卡岩。石榴子石以钙铁榴石为主,含少量锰铝榴石,其端员组分的变化与世界大型矽卡岩型铅锌矿石榴子石端员组分变化范围较为一致(图 12a),辉石为透辉石-钙铁辉石过渡系列,与世界范围内矽卡

岩型铅锌矿的辉石端员组分也比较相近(图 12b),研究表明,钙铝榴石主要受流体的扩散交代作用形成,而钙铁榴石则主要受岩浆流体的影响较大(Gasper *et al.*, 2008),黄华等(未发表资料)测得金厂河区内闪锌矿 Rb-Sr 同位素年龄为 118 Ma 左右,与保山地块内燕山晚期岩浆活动一致。本期岩浆活动发生于中特提斯海槽闭合时,保山地块内部地壳重熔产生岩浆活动及幕式剪切拉张,过铝质花岗岩、辉绿岩、矽卡岩型-岩浆热液型矿床构成保山地块内部燕山晚期成矿作用中相关联的地质体组合(陶琰等, 2010),这在一定程度上表明金厂河矿床的形成与隐伏花岗岩侵入所带来的成矿物质与大量热能有关,

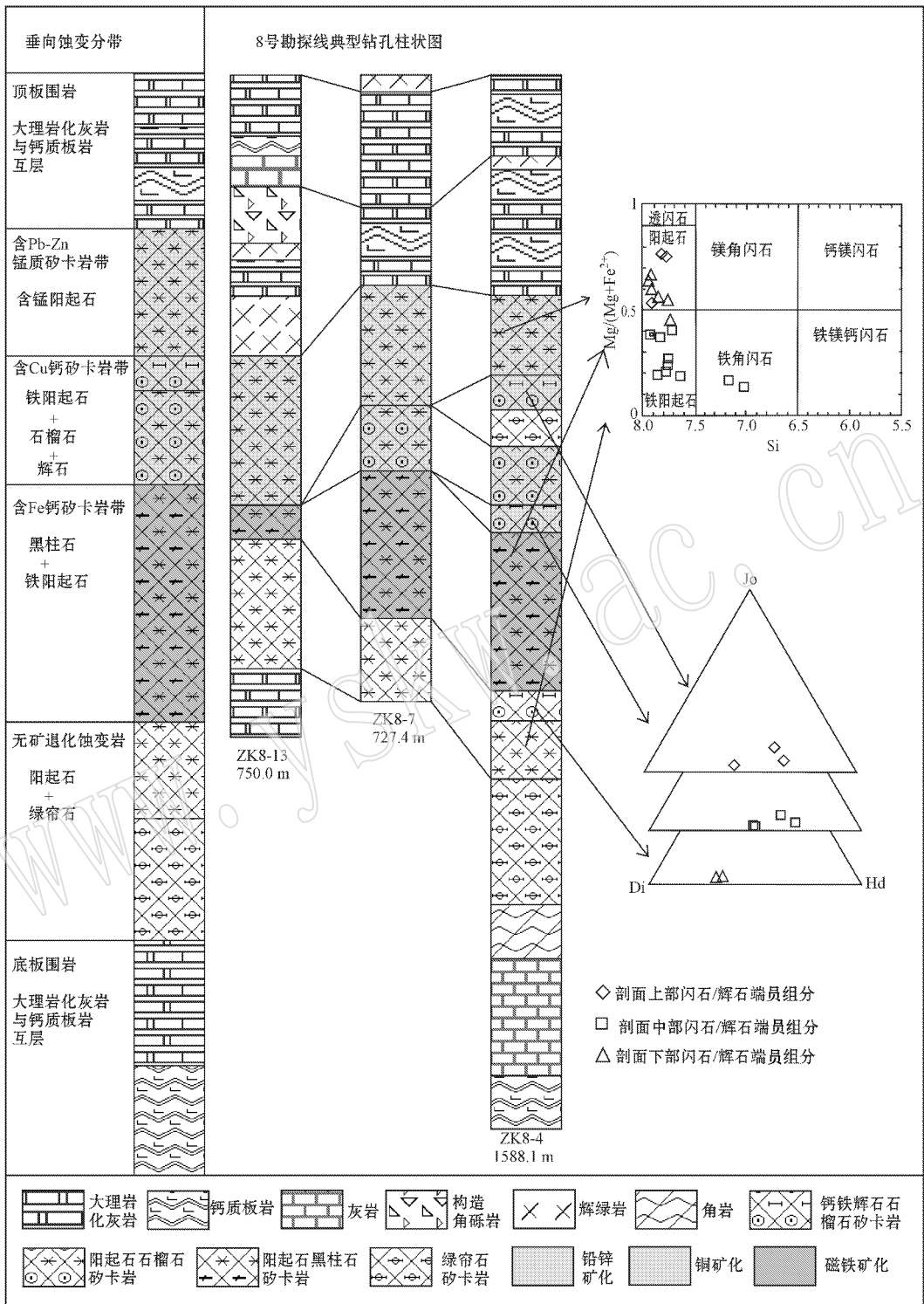


图 11 金厂河铁铜铅锌多金属矿床钻孔柱状图及矿物端员组分垂向变化图

Fig. 11 Column of typical drill holes and variation trend of end members of minerals in the vertical direction in the Jinchanghe polymetallic deposit

属于燕山晚期形成的砂卡岩型多金属矿床。此外，(德贵等 2004) 推测应有深部隐伏中酸性岩体。物探资料显示金厂河矿区为区域重力负异常区(符

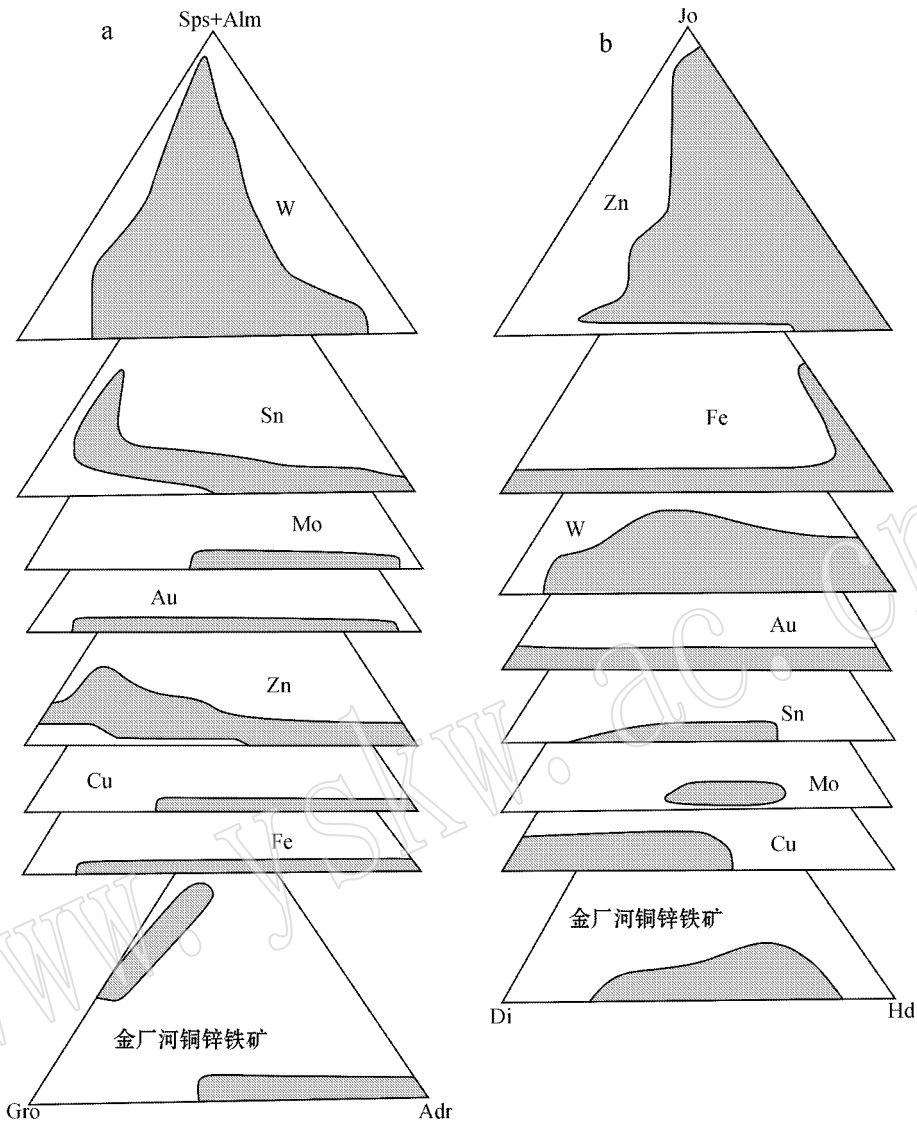


图 12 世界大型矽卡岩型矿床石榴子石(a)和辉石(b)组分(据 Meinert, 1992)

Fig. 12 Ternary plots of garnet (a) and pyroxene (b) compositions of major large skarn deposits (after Meinert, 1992)

6.2 矽卡岩与成矿的关系

研究表明, 锰质矽卡岩是评价含 Pb-Zn-Ag 矽卡岩矿床的重要找矿标志 (Zharikov, 1959; Einaudi *et al.*, 1981); 钙矽卡岩则与 Fe-Cu-W-Sn-Mo-Au 矿床的形成密切相关 (Einaudi *et al.*, 1981; Meinert, 1987, 1997; 赵一鸣等, 1990)。金厂河多金属矿床的矿物组合为含 Fe-Cu 钙矽卡岩-含 Pb-Zn 锰矽卡岩过渡系列, Pb-Zn 金属元素带对应的矽卡岩矿物有较高的 Mn 含量。如图 13, 与铅锌矿化有关的黑柱石与阳起石 Mn 含量相对较高, 而与磁铁矿化有关的黑柱石与阳起石 Mn 含量降低, Fe 含量相对较高, 这很好的验证了该矿床是一个铅锌铜铁多金属矿

床, 不同类型的矽卡岩与矿化之间有着明显的成矿专属性。

Nakano 等 (1994) 指出, 辉石的 Mn/Fe 比值可以指示矽卡岩金属矿化类型。矽卡岩铜、铁矿床辉石的 Mn/Fe 比值较低, 大多小于 0.1, 而矽卡岩铅锌矿的 Mn/Fe 比值大多高于 0.1。金厂河铅锌铜多金属矿床中辉石的 Mn/Fe 比值可明显划分为两个范围: 0.03~0.07 以及 0.11~0.21, 分别指示铁铜矿化与铅锌矿化, 这又一次很好地验证了金厂河矿床的多金属矿化, 同时支持金厂河铅锌铜多金属矿床的矽卡岩成因。

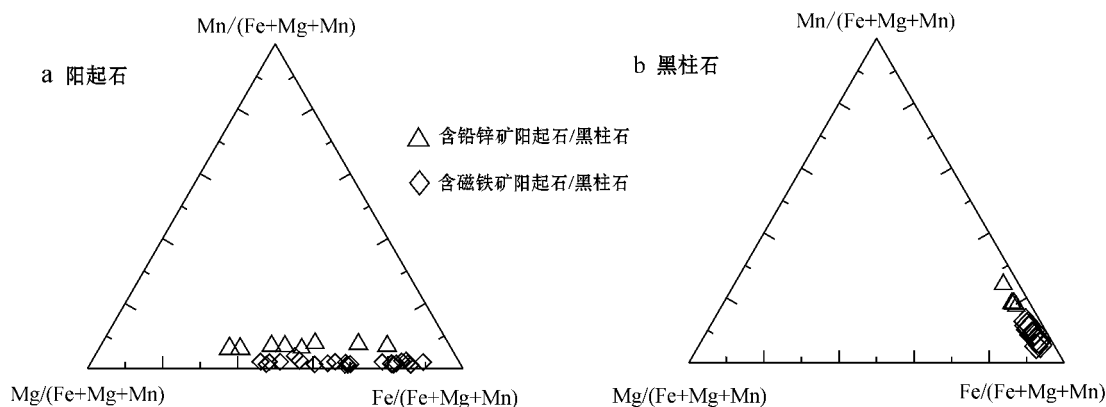


图 13 金厂河矿床矽卡岩与矿化关系

Fig. 13 The relationship between mineralization and skarn minerals of the Jinchanghe deposit

6.3 矽卡岩对成矿环境的指示意义

6.3.1 不同阶段成矿环境变化特点

矽卡岩矿物化学组分、结构构造、共生组合等的研究,可以为矽卡岩形成条件提供有力证据。金厂河矿床石榴子石和辉石的矿物组成分别为: $\text{Adr}_{2.94-98.53}\text{Gro}_{0.67-65.10}(\text{Sps}_{0.12-45.94} + \text{Alm}_{0.00-31.66})$ 和 $\text{Di}_{24.49-67.33}\text{Hd}_{31.68-68.22}\text{Jo}_{1.01-11.46}$ 其成分变化范围较大,表明矽卡岩矿物不是在完全封闭的平衡条件下形成的(赵劲松等,1996;周振华等,2011)。

石榴子石的成分环带变化是揭示与石榴子石生长相关的地质特征的重要依据之一(陈能松等,2003)。金厂河矿床石榴子石环带结构发育,从核部向边缘 Fe、Al 阳离子数呈现出此消彼长的关系,这主要是由于石榴子石中 Fe^{3+} 和 Al^{3+} 价态相同,半径相近(Fe^{3+} 为 0.078 nm, Al^{3+} 为 0.054 nm),从而可发生替代,说明石榴子石的环带是内部化学成分的外在表现。此外,自核部至边缘,Fe、Al 阳离子数呈高低交替出现,并无明显上升或下降趋势,表明矽卡岩形成于动荡的环境中,并非连续的生长过程,存在明显的生长间断(Hickmott and Spear,1992;张泽明等,2005)。

据梁祥济(1994),钙铁榴石在 450~600°C, $\text{pH} = 4.0 \sim 11.0$ 的氧化-弱氧化环境中形成,而钙铝榴石在 550~700°C,中-酸性环境中容易晶出。金厂河矿床矽卡岩阶段出现了钙铁榴石、钙铁辉石、透辉石组合,这表明本矿床流体在矽卡岩阶段呈现出酸度较低、氧逸度较高的特点(梁祥济,1994;赵一鸣等,1997);早期石榴子石以钙铁榴石为主,晚期石榴子石较早期相对贫 Fe 富 Al,更偏向钙铁榴石-钙铝榴

石的中间成分,这表明流体的氧逸度较早期相对降低(赵斌等,1982), pH 值也相对降低,从碱性过渡到中-酸性环境。

该矿床辉石退化蚀变作用较强,各种退化蚀变矿物(阳起石、黑柱石、绿帘石、绿泥石、磁铁矿)大量发育,表明透辉石形成闪石等退化蚀变矿物的流体溶液应属于含 K、Na 氯化物和氟化物的酸性流体(梁祥济,2000)。

矿区绿帘石主要集中分布于 Fe 矿化带下部,可见绿帘石交代石榴子石和阳起石,这指示溶液中氧逸度相对升高(Berman *et al.*, 1985; Perkins *et al.*, 1986),同时,该阶段形成富含 OH^- 的退化蚀变矿物,消耗了流体中大量的 H^+ ,使溶液呈碱性,因此形成了高氧逸度的碱性流体,利于溶液中 Fe 的氯化络合物发生水解沉淀出来(艾永富等,1981;赵一鸣等,1992),当温度继续降低,热液流体中的金属元素组分(Cu、Pb、Zn)会进入到矽卡岩体系中,形成各种硫化物沉淀下来。

6.3.2 不同蚀变分带成矿环境变化特点

矽卡岩体系中, Ca、Al、Ti、Mn 常较多地富集于还原性较强的环境中,而 Fe 较多地富集于氧化性较强的环境中(Ochiai *et al.*, 1993; Nicolescu *et al.*, 1998; 张智宇等,2010),金厂河矿床中部以富 Fe^{3+} 的钙铁榴石为主,而顶部和底部靠近地层的方向则逐渐转变为 Fe^{2+} 、Mg 的透辉石-钙铁辉石,且石榴子石中 Al、Mn 含量也逐渐升高,同时矽卡岩矿物伴生金属矿物组合自下而上也有相应规律性变化: $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe-Cu} \rightarrow \text{Pb-Zn}$ (图 14),以上特征符合交代成矿专属性中铁的价态分布规律(赵一鸣等,2012),表明矿

床中部向顶、底方向,砂卡岩化溶液酸度与氧逸度呈逐渐降低的趋势。

结合上文蚀变及矿化分带可知,在垂直方向:矿床中部石榴子石、辉石、黑柱石磁铁矿的出现,表明温压条件及流体氧逸度较高;矿床上部铅锌矿含量

升高,顶底部阳起石、绿帘石含量逐渐增多,表明温压条件及流体氧逸度呈下降趋势;同理,在水平方向:自两断裂交汇处向矿区西部:温压条件由高降低,氧化性逐渐减弱,而还原性逐渐增强(梁祥济, 2000)。

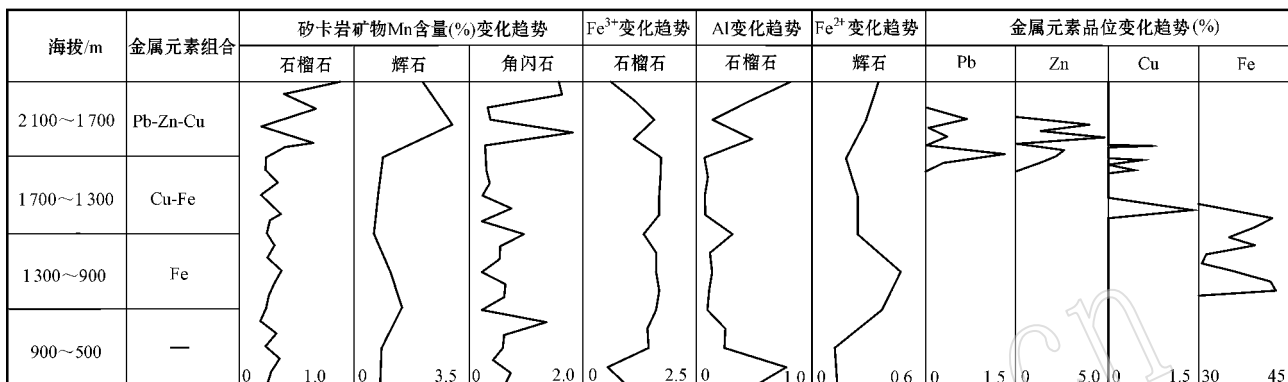


图 14 金厂河矿床砂卡岩矿物 Mn、Fe、Al 含量及矿石品位垂向变化趋势

Fig. 14 Variation trend of Mn, Fe, Al content of skarn minerals and grade of ore minerals in the vertical direction in the Jinchanghe deposit

6.4 矿物组合分带对隐伏岩体的指示意义

空间分带特征能反映流体演化、围岩成分、温度变化以及氧化还原环境、形成深度等 (Meinert *et al.*, 2005; 张智宇等, 2010)。从上文可知,金厂河铁铜铅锌矿床从浅至深的垂向分带与自西向东的水平分带具有相似性:大理岩化灰岩→含 Pb-Zn 锰质砂卡岩→含 Cu 钙质砂卡岩→含 Fe 钙质砂卡岩。Zhao 等(2003)总结了我国及世界砂卡岩型 Pb-Zn-(Ag)矿床分带模型,与之对比可初步推测隐伏岩体可能位于矿区东侧。在 Zhao 等(2003)总结的不同 Pb-Zn-(Ag)矿床中,距离岩体越近,Fe 含量相对较高,代表环境的氧逸度就相对越高,金厂河矿区砂卡岩 Fe/Fe + Mn + Mg 比值由东侧向西逐渐降低(图 10),可以进一步从矿物化学成分验证隐伏岩体可能位于矿区东侧。

结合金厂河铁铜铅锌多金属矿床地质特征,可对该矿床成矿机制作出初步推测。赵一鸣等(2012)提出,砂卡岩铅锌矿可以产于距接触带上百米至 1~2 km 以外的碳酸盐地层中,两组构造体系交叉部位对成矿的控制作用十分明显。因此推测成矿岩浆热液以区内 F2、F10 两交汇断层为运矿构造,先行交代矿区中部大理岩化灰岩,进而在压力差与浓度差的作用下向远离两交汇断裂方向沿次级裂隙或顺层滑脱面运移,对周围地层进行渗滤和扩散交代,最终成

矿流体以背斜核部的层间裂隙为容矿构造沉淀富集成矿,形成厚达 400 m 的砂卡岩型铁铜铅锌多金属矿床。

7 结论

(1)金厂河铁铜铅锌多金属矿床主要为钙砂卡岩:石榴子石主要为钙铁榴石,辉石主要为钙铁辉石和透辉石,角闪石主要是阳起石、铁阳起石、少量铁闪石,且矿区黑柱石发育,这些砂卡岩矿物含铁量均较高;此外,矿区有少量的锰砂卡岩,包括少量锰铝榴石、锰钙辉石,含锰阳起石、含锰黑柱石。

(2)金厂河铁铜铅锌多金属矿床的矿化蚀变阶段可划分为砂卡岩阶段、退化蚀变阶段、石英硫化物阶段和碳酸盐阶段,退化蚀变阶段和石英硫化物阶段是主要的成矿阶段,且矿区水平与垂直方向均存在明显的蚀变矿化分带:大理岩化灰岩→含 Pb-Zn 锰质砂卡岩→含 Cu 钙质砂卡岩→含 Fe 钙质砂卡岩→远程或深部隐伏岩体。

(3)金厂河矿床形成的不同阶段经历了氧化-还原、碱性-中酸性环境的转变,自矿床中部至顶底部不同蚀变矿化分带有高温-低温、氧化-还原趋势。

(4)初步推测区内两交汇断裂处存在隐伏岩体,金厂河矿床厚层砂卡岩的形成与隐伏岩体的侵

蚀交代作用有关,且推测岩浆热液先行交代矿区中部围岩,进而对周围地层进行渗滤和扩散,最终形成矽卡岩型铁铜铅锌多金属矿床。

致谢 感谢程彦博助理研究员在本文成文过程中给予的指点,感谢云南黄金矿业集团股份有限公司对野外工作的支持,感谢中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室的陈振宇老师和陈小丹、海东婧在论文实验过程中给予了热情的指导和帮助,资料收集过程中得到了中国地质大学(北京)张承帅、姚磊、刘晓菲的帮助,审稿专家给论文提出了许多建设性的意见,在此一并感谢。

References

Ai Yongfu and Jing Lingnian. 1981. The study of the relationship between the mineralization and the garnet in the skarn ore deposits [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, (1): 83~90 (in Chinese with English abstract).

Berman R G, Brown T H and Greenwood H J. 1985. An internally consistent thermodynamic data base for minerals in the system $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{FeO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ [J]. *Atomic Energy of Canada Technical Report*, TR-337: 62.

Bureau of Geology and Mineral Resources in Yunnan Province. 1990. *Regional Geology of Yunnan Province* [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).

Chen Fukun, Li Xianghui, Wang Xiuli, *et al.* 2007. Zircon age and Nd-Hf isotopic composition of the Yunnan Tethyan belt, southwestern China [J]. *Int. J. Earth Sci.*, 96: 1179~1194.

Chen Nengsong, Sun Min, Yang Yong, *et al.* 2003. Major and trace element zoning in metamorphic garnets and their metamorphic process implications [J]. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 315~320 (in Chinese with English abstract).

Einaudi M T. 1982. General features and origin of skarns associated with porphyry copper plutons, Southwestern North America [A]. Titley S R. *Advances in the Geology of Porphyry Copper Deposits* [C]. The University of Arizona Press, Southwestern North America, Tucson, 185~209.

Einaudi M T and Burt D M. 1982. Introduction-terminology, classification and composition of skarn deposit [J]. *Economic Geology*, 77: 745~754.

Einaudi M T, Meinert L D and Newberry R J. 1981. Skarn deposits. *Economic Geology* [J]. 75th Anniversary Volume, 317~391.

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.

Fu Degui, Cui Ziliang and Guan Deren. 2004. The comprehensive ore-prospecting of Jinchanghe blind multimetallic deposit, Baoshan [J]. *Yunnan Geology*, 23(2): 188~198 (in Chinese with English abstract).

Gasper M, Knaack C, Meinert L D, *et al.* 2008. REE in skarn systems: a LA-ICP-MS study of garnets from the Crown gold deposit [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(1): 185~205.

Hickmott D D and Spear F S. 1992. Major and trace element zoning in garnets from calcareous pelites in the NW Shelburne Falls Quadrangle, Massachusetts: Garnet growth histories in retrograded rocks [J]. *Journal of Petrology*, (33): 965~1005.

Ivan K B and Rossitsa D V. 2005. Manganilvaite, $\text{CaFe}^{2+}\text{Fe}^{3+}(\text{Mn}, \text{Fe}^{2+})\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})$, a new mineral of the ilvaite group from Pb-Zn skarn deposits in the Rhodope Mountains, Bulgaria [J]. *The Canadian Mineralogist*, 43: 1027~1042.

Leake B E, Woolley A R, Arps C E S, *et al.* 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.

Liang Xiangji. 1994. Garnets of grossular-andradite Series: their characteristics and metasomatic mechanism [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 13(4): 342~352 (in Chinese with English abstract).

Liang Xiangji. 2000. *Experimental Studies on the Mechanism of the Formation of Skarns and Skarn Ore Deposits in China* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 56~80 (in Chinese).

Liu Shen, Hu Ruizhong, Gao Shan, *et al.* 2009. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on the age and origin of Early Palaeozoic I-type granite from the Tengchong-Baoshan Block, western Yunnan province, SW China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 36: 168~182.

Mao Jingwen, Franco P and Nigel C. 2011. Mesozoic metallogeny in East China and corresponding geodynamic settings—an introduction to the special issue [J]. *Ore Geology Reviews*, doi: 10.1016/j.oregeorev.2011.09.003.

Mao Jingwen, Wang Yitian, Lehmann B, *et al.* 2006. Molybdenite Re-Os and albite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of Cu-Au-Mo and magnetite porphyry systems in the Changjiang valley and metallogenic implications [J]. *Ore Geology Reviews*, 29: 307~324.

Meinert L D. 1992. Skarn and Skarn Deposit [M]. *Geoscience Canada*, 19: 145~162.

Meinert L D. 1993. Igneous petrogenesis and skarn skarn deposit [J]. *Geol. Assoc. Canada Spec*, 40: 569~583.

Meinert L D. 1987. Skarn zonation and fluid evolution in the Groundhog mine, Central mining district, New Mexico [J]. *Economic Geology*, 82(3): 523~545.

Meinert L D. 1997. Application of skarn deposit zonation models to min-

- eral exploration[J]. *Exploration and Mining Geology*, 6(2): 185~208.
- Meinert L D, Dipple G M and Nicolescu S. 2005. World skarn deposits [J]. *Econ. Geol.*, 100 : 299~336.
- Misra K C. 2000. *Understanding Mineral Deposit*[J]. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 414~449.
- Nakano T, Yoshino T, Shimazaki H, *et al.* 1994. Pyroxene composition as an indicator in the classification of skarn deposit[J]. *Econ. Geol.*, 89(7): 1 567~1 580.
- Nicolescu S, Cornell D H, Sodervall U, *et al.* 1998. Secondary ion mass spectrometry analysis of rare earth elements in grandite garnet and other skarn related silicates[J]. *European Journal of Mineralogy*, 10 : 251~259.
- Ochiai K, Tagiri M and Tanaka H. 1993. Behavior of the rare earth elements during the skarn formation at the Kamaishi mine, Japan[J]. *Resource Geology*, 43 : 291~300.
- Perkins E H, Brown T H and Berman R G. 1986. PTX-SYSTEM : three programs for calculation of pressure-temperature-composition phase diagram[J]. *Computers and Geoscience*, 12 : 749~755.
- Shen Qihan. 2009. The recommendation of a systematic list of mineral abbreviation[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(5): 495~500(in Chinese with English abstract).
- Tang Pingzhi, Wang Yuwang, Wang Jingbin, *et al.* 2011. Finding and significance of ilvaite in the Cihai Iron Deposit, Xinjiang Autonomic Region, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 31(1): 9~16(in Chinese with English abstract).
- Tao Yan, Hu Ruizhong, Zhu Feilin, *et al.* 2010. Ore-forming age and the geodynamic background of the Hetaoping lead-zinc deposit in Baoshan, Yunnan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(6): 1 760~1 772(in Chinese with English abstract).
- Xiao Long, Xu Yigang, Mei Houjun, *et al.* 2003. Petrogenesis of the basalts of Woniusi Formation at Baoshan area, Yunnan : Is it of mantle plume origin[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(1): 20~28(in Chinese with English abstract).
- Zhang Encai, Chen Xinmin, Li Zhihong, *et al.* 2010. Zonation and ore prospecting Longyang ore concentration area in Baoshan, Yunnan [J]. *Mineral Deposit*, 29(2): 141~145(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zeming, Xiao Yilin, Shen Kun, *et al.* 2005. Garnet growth compositional zonation and metamorphic P-T path of the ultrahigh-pressure eclogites from the Sulu orogenic belt, eastern Central China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 809~818(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhiyu, Du Yansong, Zhang Jing, *et al.* 2010. Alteration and mineralization zoning in Tongshan skarn-type copper deposit in Guichi, Anhui Province, and its genesis[J]. *Mineral deposit*, 29(6): 999~1 016(in Chinese with English abstract).
- Zhao Bin, Li Tongjin, Li Zhaoping, *et al.* 1982. A study on garnet from some skarn deposits in China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, (4): 296~304(in Chinese with English abstract).
- Zhao Jingsong and Newberry R J. 1996. Novel knowledge on the origin and mineralization of skarns from Shizhuoyuan[J]. *Acta Mineralogical Sinica*, 16(4): 442~449(in Chinese with English abstract).
- Zhao Yiming, Dong Yongguan, Li Daxin, *et al.* 2003. Geology, mineralogy, geochemistry, and zonation of the Bajiazi dolomite-hosted Zn-Pb-Ag skarn deposit, Liaoning Province, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 23 : 153~182.
- Zhao Yiming, Lin Wenwei and Bi Chengsi. 2012. *Skarn Deposit of China*[M]. Beijing : Geological Publishing House, 68~77, 212~227(in Chinese with English abstract).
- Zhao Yiming, Lin Wenwei, Bi Chengsi, *et al.* 1990. *Skarn Deposits of China*[M]. Beijing : Geological Publ. House, 1~354(in Chinese with English abstract).
- Zhao Yiming, Lin Wenwei, Zhang Dequan, *et al.* 1992. *Metasomatic Mineralization—Study of Some Ore-bearing Metasomatic Formations*[M]. Beijing : Beijing Science & Technology Press, 1~47(in Chinese with English abstract).
- Zhao Yiming, Zhang Yanan and Lin Wenwei. 1997. Characteristics of pyroxenes and pyroxenoids in skarn deposits of China and the relationship with metallization[J]. *Mineral Deposits*, (4): 318~329(in Chinese with English abstract).
- Zharikov V A. 1959. Geology and metasomatic phenomenon in polymetallic skarn deposits of the western Karamazur[J]. *Trudy IGEM. Izd. AN SSSR* 14, 1~36(in Russian).
- Zhou Rong, Chen Jun and Lü Yongzeng. 2008. The large scale blind multimetallic ore deposit of Jinchanghe, Baoshan[J]. *Yunnan Geology*, 23(2): 188~198(in Chinese with English abstract).
- Zhou Zhenhua, Liu Hongwei, Chang Guoxiong, *et al.* 2011. Mineralogical characteristics of skarns in the Huanggang Sn-Fe deposit of Inner Mongolia and their metallogenic indicating significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogical*, 30(1): 97~112(in Chinese with English abstract).

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.
- 陈能松, 孙敏, 杨勇, 等. 2003. 变质石榴石的成分环带与变质过程[J]. *地学前缘*, 10(3): 315~320.
- 符德贵, 崔子良, 官德任. 2004. 保山金厂河铜多金属隐伏矿综合找矿[J]. *云南地质*, 23(2): 188~198.
- 梁祥济. 1994. 钙铝-钙铁系列石榴石的特征及其交代机理[J]. *岩石矿物学杂志*, 13(4): 342~352.

- 梁祥济. 2000. 中国矽卡岩和矽卡岩矿床形成机理的实验研究[M]. 北京: 学苑出版社, 56~80.
- 沈其韩. 2009. 推荐一个系统的矿物缩写表[J]. 岩石矿物学杂志, 28(5): 495~500.
- 唐萍芝, 王玉往, 王京彬, 等. 2011. 新疆磁海铁矿床中黑柱石的发现及其地质意义[J]. 矿物学报, 31(1): 9~16.
- 陶 琰, 胡瑞忠, 朱飞霖, 等. 2010. 云南保山核桃坪铅锌矿成矿年龄及动力学背景分析[J]. 岩石学报, 26(06): 1760~1772.
- 肖 龙, 徐义刚, 梅厚钧, 等. 2003. 云南保山卧牛寺组玄武岩成因: 地幔柱活动的产物[J]. 岩石矿物学杂志, 22(1): 20~28.
- 云南省地质矿产局. 1990. 云南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 张恩才, 陈新敏, 李志宏, 等. 2010. 云南保山珑阳矿集区矿床分带及其找矿意义[J]. 云南地质, 29(2): 141~145.
- 张泽明, 肖移林, 沈 昆, 等. 2005. 苏鲁超高压榴辉岩的石榴石生长成分环带及变质作用 $p-t$ 轨迹[J]. 岩石学报, 21(3): 809~818.
- 张智宇, 杜杨松, 张 静, 等. 2010. 安徽贵池铜山矽卡岩型铜矿床蚀变矿化分带特征及其成因[J]. 矿床地质, 29(6): 999~1016.
- 赵 斌, 李统锦, 李昭平, 等. 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.
- 赵劲松, Newberry R J. 1996. 对柿竹园矽卡岩成因及其成矿作用的新认识[J]. 矿物学报, 16(4): 442~449.
- 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, 1~354.
- 赵一鸣, 林文蔚, 毕承思, 等. 2012. 中国矽卡岩矿床[M]. 北京: 地质出版社, 68~77, 212~227.
- 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, 1~47.
- 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, (4): 318~329.
- 周 荣, 陈 均, 吕永增, 等. 2008. 保山金厂河大型铜铁多金属隐伏矿床[J]. 云南地质, 27(2): 189~196.
- 周振华, 刘宏伟, 常帽雄, 等. 2011. 内蒙古黄岗锡铁矿床矽卡岩矿物学特征及其成矿指示意义[J]. 岩石矿物学杂志, 30(1): 97~112.

《岩石矿物学杂志》荣获“2013 中国最具国际影响力学术期刊”称号

继首次荣获“2012 中国最具国际影响力学术期刊”称号后, 本刊近日再次入选“2013 中国最具国际影响力学术期刊”。清华大学图书馆、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、中国科学文献计量评价研究中心自2012年开始对中国学术期刊进行国际影响力综合分析研究。2013年度的评选利用 CAJ-IJCR2013 对中国(大陆)正式出版的具有 CN 刊号, 连续3年及以上正常出版, 国际他引影响因子、国际他引总被引频次均大于0, 所发表的文献50%以上为研究论文的期刊在前一年度表现出来的国际影响力进行了分析和评价, 首次定义期刊国际影响力指数(CI)并按CI降序排列, 在全部4622种(其中科技期刊3502种, 人文社科期刊1120种)备选期刊中依序分别按TOP5%和TOP5%~10%各选出175种科技期刊、56种人文社科期刊, 列入“中国最具国际影响力学术期刊”和“中国国际影响力优秀学术期刊”的名单。

以下是获得“2013 中国最具国际影响力学术期刊”的地质类期刊的名称及其各项指标:

序号	刊名	国际影响力指数(CI)	国际他引频次	国际他引影响因子	序号	刊名	国际影响力指数(CI)	国际他引频次	国际他引影响因子
1	Chinese Science Bulletin	508.318	7447	0.973	10	地球化学	99.197	777	0.386
2	岩石学报	262.041	2498	0.609	11	中国科学 地球科学	82.396	726	0.215
3	Acta Geologica Sinica	226.730	1720	0.985	12	地球学报	78.271	516	0.432
4	地质学报	203.409	1602	0.808	13	科学通报	75.317	714	0.131
5	地学前缘	134.355	1152	0.405	14	地球科学	72.378	585	0.256
6	Science China Earth Sciences	122.361	477	1.134	15	岩石矿物学杂志	71.826	482	0.385
7	矿床地质	111.048	733	0.612	16	高校地质学报	71.046	566	0.262
8	地质论评	107.666	955	0.279	17	中国地质	65.777	528	0.237
9	地质通报	104.827	962	0.231	18	地球科学进展	58.804	521	0.147

本表数据引自2013年12月30日出版的《中国新闻出版报》专版07。