

陕西凤太矿集区八卦庙金矿床绿泥石特征及其找矿意义

张娟^{1,2}, 刘新星^{1*}, 王义天², 陈绍聪², 胡乔青², 刘协鲁³

ZHANG Juan^{1,2}, LIU Xinxing^{1*}, WANG Yitian², CHEN Shaocong², HU Qiaoqing², LIU Xielu³

1. 河北地质大学/河北省战略性关键矿产资源重点实验室, 河北 石家庄 050031;

2. 中国地质科学院矿产资源研究所/自然资源部成矿作用和资源评价重点实验室, 北京 100037;

3. 北京探矿工程研究所, 北京 100083

1. Hebei key Laboratory of strategic Critical Mineral Resources/Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China;

2. MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment/Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

3. Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China

摘要:为探讨陕西凤太矿集区八卦庙金矿床绿泥石的成岩成矿意义,运用电子探针分析了矿床围岩、不同成矿阶段及煌斑岩脉中的绿泥石。结果显示,矿区内绿泥石的分布特征可以分为4类:分布在围岩中由黑云母蚀变而成(I型)、叶片状或鳞片状、与石英硫化物共(伴)生的绿泥石脉(II型)、蠕虫状包裹在石英颗粒中(III型)及由钠长石蚀变具钠长石假晶的绿泥石(IV型)。前3种主要为蠕绿泥石(铁绿泥石),含少量密绿泥石,IV型分布在铁镁绿泥石和蠕绿泥石(铁绿泥石)的范围,均指示形成于偏还原环境。在其结构的离子置换中既有Fe对Mg的置换,也有Mg对Fe的置换,表明绿泥石的形成既与泥质碎屑岩围岩有关,也受到富铁、镁的成矿流体影响。由绿泥石地质温度计估算出4类绿泥石的形成温度为198~255℃,均属于中-低温热液蚀变范围。在金成矿过程中,随着温度不断下降热液流体性质由弱酸性→近中性→弱碱性演化。金矿化的有利形成环境为近中性。

关键词:绿泥石;电子探针;组成特征;形成环境;八卦庙金矿床;陕西

中图分类号:P578.962;618.51 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)04-0586-18

Zhang J, Liu X X, Wang Y T, Chen S C, Hu Q Q, Liu X L. Characteristics of chlorite from the Baguamiao gold deposit in Shaanxi Province and its geological implication. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(4): 586-603

Abstract: In order to discuss petrogenic and ore-forming significances of chlorite of the Baguamiao gold deposit in Shaanxi province, the chlorite minerals from wall rocks, lamprophyre and ores of different stages were chemically analyzed by means of electron-microprobe. Four types of the chlorite in the deposit were identified, namely chlorite derived from altered biotite in wall rocks (type I), chlorite in (with) quartz-sulfide veins (type II), wormlike chlorite included in quartz (type III) and chlorite in altered albite in lamprophyre (type IV). The former three types of chlorites are mainly Fe-rich prochlorite and minor pycnochlorite, indicating that they could be formed in a partial reducing environment. The phenomenon that Mg ions were mainly substituted with Fe ions in its lattice suggests that the formation of those chlorites is closely associated with the argillaceous wall rocks under several metamorphisms, and affected by mafic hydrothermal fluid. According to the chlorite geothermometer, these chlorites were formed in low-moderate

收稿日期:2020-03-18;修订日期:2020-04-15

资助项目:中国地质调查局项目《秦岭-大巴山-大别山成矿规律及找矿方向研究》(编号:1212011220869)和河北省高等学校科学技术研究项目《冀东峪耳崖金矿床黄铁矿中矿物包裹体微区研究》(编号:QN2019144)

作者简介:张娟(1987-),女,博士,讲师,矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail:zhangjqt@s126.com

*通信作者:刘新星(1987-),男,博士,副教授,矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail:liuxinxing963@163.com

temperature ranging from 198°C to 255°C. It is believed that the hydrothermal fluid was gradually evolved from faintly acid to nearly neutral and finally to faintly acid with the continuous decrease of temperature in the mineralization process. Favorable formation environment of gold is close to neutral conditions.

Key words: chlorite; electronmicroprobe; characteristics of compositions; forming environment; Baguamiao gold deposit; Shaanxi Province

绿泥石在自然界广泛分布,是热液蚀变作用、中低温变质作用、成岩成矿过程的产物,通常与铜、金、铀、锡等矿床成矿作用密切相关,其本身特征能够反映流体性质和水-岩反应的环境^[1-3]。绿泥石的结构及成分十分复杂,国内外学者对其化学成分及结构、形成的物理化学条件、共生矿物组合及绿泥石的原岩成分研究成果丰富^[4-7]。Cathelineau等^[3]在研究 Los Azufres 和 SaltonSea 地热体系时发现绿泥石成分中的 Al^{IV} 与温度之间存在着正相关关系,并由此提出了绿泥石固溶体地质温度计。

Kranidiotis 等^[8]建立了绿泥石的形成温度与其中 Al、Fe、Mg 四面体配位数的关系方程; Bryndzi 等^[9]通过实验研究得出了绿泥石的化学成分与其形成的氧逸度和硫逸度之间的关系; Cathelineau 等^[10]认为绿泥石在 100~350°C 时,随着温度的上升, Al^{IV} 、Fe、Fe/Mg 增加,而八面体空穴和 Al^{IV} 降低; Bevins 等^[11]的研究表明,绿泥石和其主岩的 $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$ 含量之间存在线性正相关关系。国内许多学者运用绿泥石地质温度计对其研究区内的绿泥石进行化学成分研究及温度估算,取得了较好的效果,如肖志峰等^[12]对海南抱板金矿田围岩蚀变带中的绿泥石进行了温度和氧逸度估算,认为从蚀变到成矿物质沉淀热液的温度和氧逸度是变化的; 华仁民等^[13]对金山金矿热液蚀变粘土矿物的特征、热液蚀变机制及水-岩反应环境进行详细研究; 赵明等^[14]则运用绿泥石地温计探讨了济阳坳陷古近系原型盆地的热历史。许多学者^[15-21]利用地质温度计对矿床内与矿化关系密切的绿泥石进行了温度估算,讨论了绿泥石的成岩成矿意义,并探讨了绿泥石与矿化之间的关系。迄今,绿泥石地质温度计在地热体系、矿床学研究、盆地古地温梯度研究等方面的应用已经越来越广泛,并取得了良好的效果。

西秦岭凤县-太白县矿集区(以下简称凤太矿集区)八卦庙金矿床围岩蚀变类型多样,主要有硅化、绢云母化、碳酸盐化、黄铁矿化、磁黄铁矿化、绿泥石化等,其中以硅化、黄铁矿化、磁黄铁矿化与成

矿关系密切,但绿泥石作为矿区内普遍存在的蚀变对金矿化的形成也具有重要影响。郑作平等^[22]利用绿泥石六组分固溶体热液模型,计算了八卦庙金矿床中绿泥石形成的物理化学条件,但其对八卦庙金矿床内绿泥石的分类过于简单,取样位置与金矿化的关系不明确,且未讨论各成矿阶段绿泥石对于金矿化的影响。因此,本文基于野外地质调查,显微镜下特征观察和电子探针化学成分分析,对八卦庙金矿床中绿泥石的类型、组分、形成温度、环境及其形成机制进行了系统研究,以期查明与绿泥石有关的各成矿阶段成矿流体的性质,约束八卦庙金矿床成矿流体的演化特征及金沉淀的物理化学环境。本文研究成果有助于对区内金矿勘查工作提供新的思路和线索。

1 地质背景

八卦庙金矿床是西秦岭凤太矿集区最大的金矿床(图1),探明金储量超过 100 t^[23]。矿区出露的地层主要为中—上泥盆统。中泥盆统古道岭组(D_2g)主要分布在背斜核部,岩性以细晶灰岩、含炭生物碎屑灰岩为主。星红铺组(D_3x)是金矿床的主要赋矿层位,岩性以结晶灰岩、条带状泥灰岩、铁白云质千枚岩、粉砂质千枚岩和粉砂岩为主。矿区构造复杂,主要为 NW—SE 向为主体展布的一系列不同级次的 NW—NE 向复式褶皱构造、NW 向脆—韧性剪切构造带及 NW 向和 NE 向断裂构造等(图1)。矿区北部发育 2 条规模较大的高角度逆断层(F_{12} 和 F_{13}),走向与地层走向基本一致(图2)。其中 F_{12} 发育于上部星红铺组与下部古道岭组界面(图1-b), F_{13} 产于星红铺组下岩性段和上岩性段之间(图1),为一条脆韧性剪切带,控制矿体产出。矿区内岩浆岩发育较少,仅有少量酸性钠长岩脉、煌斑岩脉,花岗斑岩脉和闪长玢岩脉发育于矿区北部,具有 NW 向和 NE 向 2 种产状。

八卦庙金矿床为脆韧性剪切带型,矿体主要产于受八卦庙-小梨园-羊肠沟脆韧性剪切带控制的构造蚀变带中,受泥盆系岩性和断裂构造蚀变带控

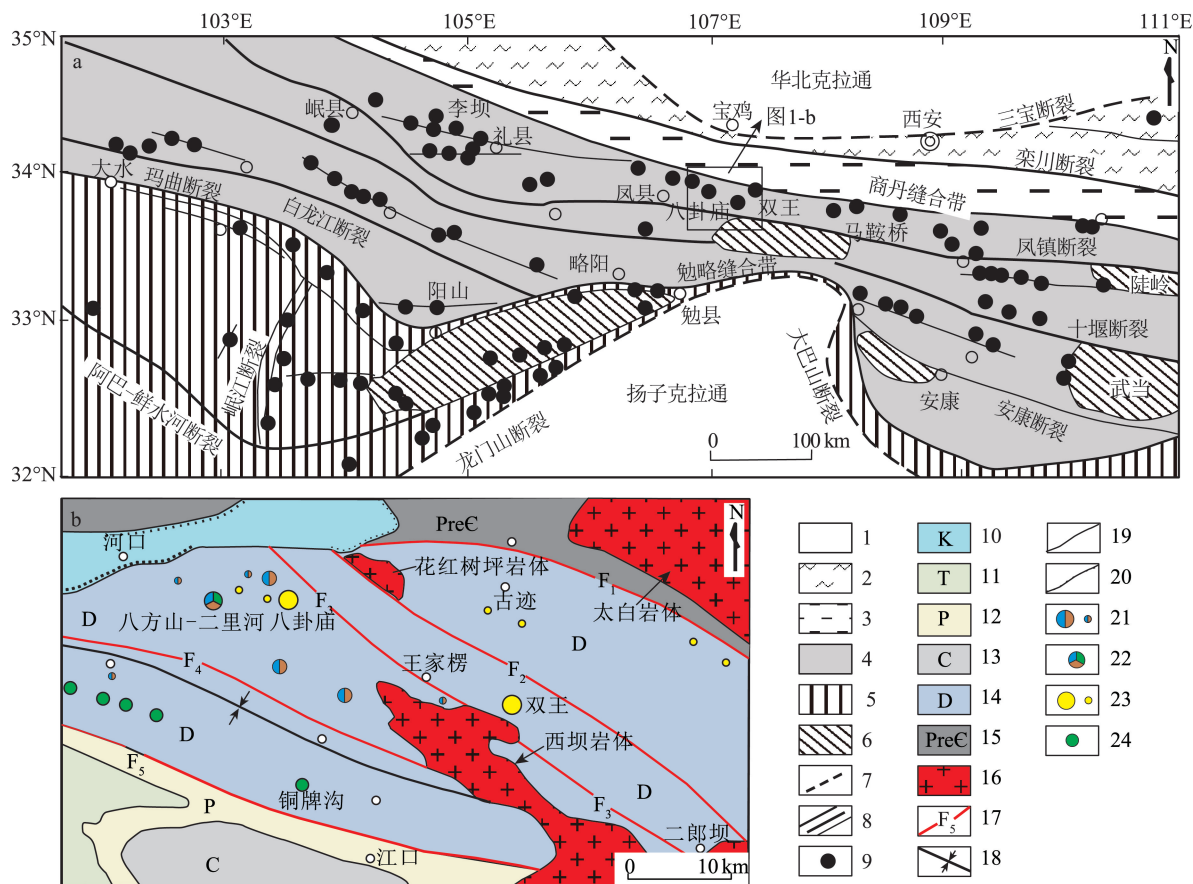


图1 西秦岭构造格架和金矿床分布(a,据参考文献[24-25]修改)及凤县—太白县矿集区地质矿产简图(b,据参考文献[26-28]修改)

Fig. 1 The distribution of tectonic framework and gold deposits in western Qinling (a) and geological map of Fengxian-Taibai ore cluster (b)

- 1—新生代河湖相沉积物;2—中朝克拉通南缘;3—北秦岭造山带;4—南秦岭造山带;5—前陆褶冲带;6—前寒武纪地体;7—克拉通—造山带边界断裂;8—不同尺度的区域性断裂;9—金矿床;10—白垩系砾岩夹炭质页岩;11—三叠系细碎屑岩夹碳酸盐岩;12—二叠系浅变质千枚岩夹灰岩;13—石炭系浅变质千枚岩及含炭硅质岩;14—泥盆系千枚岩、碳酸盐岩及变质杂砂岩;15—前寒武副变质岩、变火山岩及石英片岩;16—印支期—燕山期中酸性侵入岩;17—断层及编号;18—古盆河段家坝复式向斜;19—地层界线;20—不整合界线;21—铅锌矿床(点);22—铅锌铜矿床;23—金矿床(点);24—铜矿点

制,蚀变带整体的展布方向与区域构造一致(图2),构造发育处蚀变程度较高。矿体总体走向为NNW向,向北陡倾。矿体中部连续,东西两侧及上下两端出现分支。矿体规模有很大变化,在NE方向上,矿床中部的矿体规模最大,向北、南两侧矿化减弱。金矿化主要集中在不同产状的石英脉及斑点状千枚岩、粉砂质千枚岩内,尤其是千枚岩与泥灰岩或条带状泥灰岩接触部位千枚岩一侧,矿石类型有蚀变岩型和石英脉型。在NW方向上,以位于矿床中部的64~67线附近矿体厚度最大,品位最富。金矿石有3种类型:构造蚀变岩型、破碎带蚀变岩型和含金石英脉型,其中以构造蚀变岩型为主。金属矿物含量低,常见的有自然金、黄铁矿、磁铁矿,其次为

黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等;脉石矿物主要有石英、绢云母、铁白云石、镁铁方解石、绿泥石,少量钠长石、黑云母、方解石等。自然金主要呈显微—可见金,以明金为主,其次为显微金和超显微金。矿石结构主要由他形粒状结构、半自形—自形粒状结构、碎裂结构、交代残余结构、乳滴状结构、包含嵌晶结构等;矿石构造主要有浸染状构造、团块状构造、胶状构造等。结合前人研究成果,通过详细的野外观察和测量工作,以及矿脉穿插关系、矿石组构特征,将八卦庙金矿床的成矿作用过程划分为4个阶段(图3):Ⅰ近平直石英—铁白云石阶段,Ⅱ揉皱石英—铁白云石—硫化物阶段,Ⅲ平直石英—硫化物—铁白云石阶段,Ⅳ张裂隙石英脉阶段。其中Ⅱ、Ⅲ阶

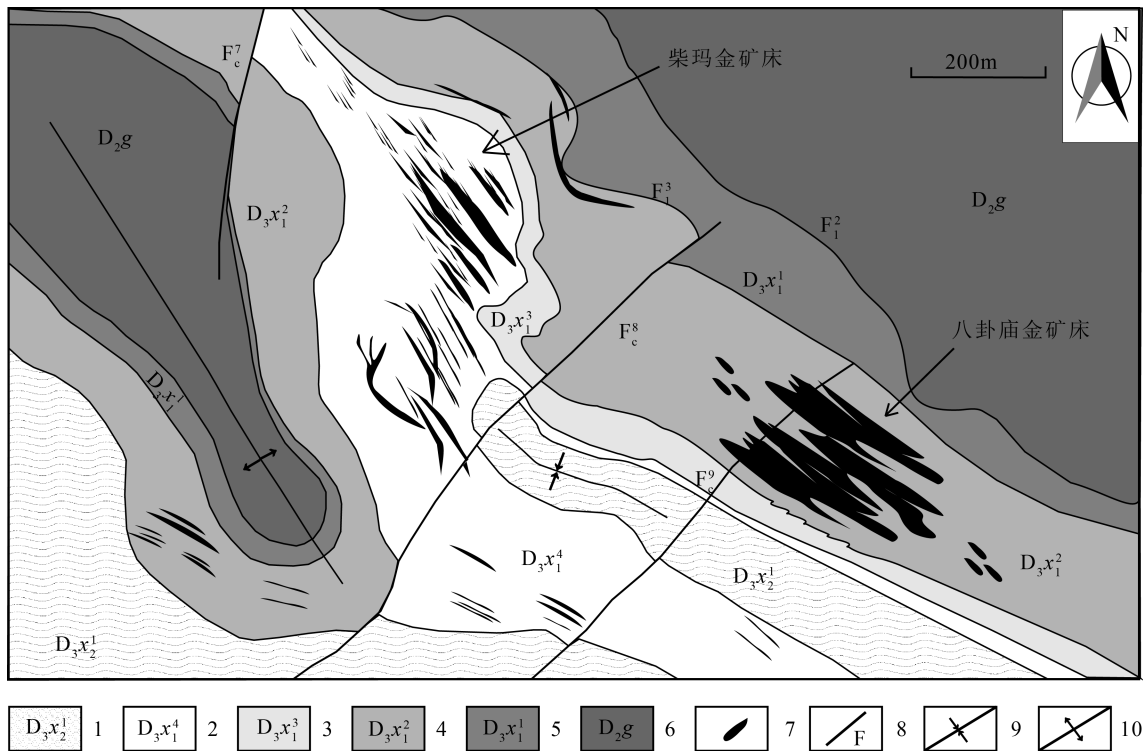


图 2 西秦岭凤太矿集区八卦庙金矿床地质简图(据参考文献[29]修改)

Fig. 2 Geological sketch of the Baguamiao gold deposit in Fengxian-Taibai ore concentration area, West Qinling
1—上泥盆统猩红铺组中段第一岩性层;2—上泥盆统猩红铺组下段第四岩性层;3—上泥盆统猩红铺组下段第三岩性层;4—上泥盆统猩红铺组下段第二岩性层;5—上泥盆统猩红铺组下段第一岩性层;6—中泥盆统古道岭组;7—金矿体;8—断层;9—背斜;10—向斜

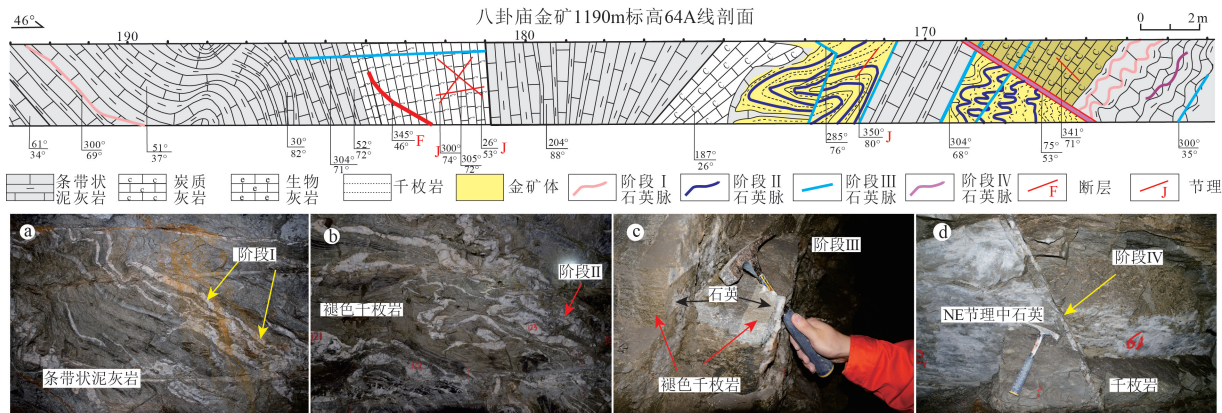


图 3 八卦庙金矿床中不同阶段脉体的穿插关系

Fig. 3 Intercalation relationship of veins at different metallogenic stages in the Baguamiao gold deposit

段为主成矿阶段。

I 阶段为成矿阶段早期,主要特征是形成 NWW 向顺层-近顺层石英-铁白云石脉(图 3-a),倾向变化较大。脉体发生变形并非平直脉体,且不是完全顺层位产出,在边部往往具有切层性质。矿

石矿物主要为黄铁矿和磁黄铁矿,含量很少。硫化物多呈细粒状或细脉状在石英及铁白云石的粒间裂隙充填。围岩蚀变主要发育于石英脉与围岩接触部位,蚀变类型为硅化、铁白云石化、碳酸盐化、绿泥石化等。总体看,蚀变现象较弱。硫化物常与

石英、铁白云石、黑云母、磁黄铁矿、绿泥石、电气石等共同构成千枚岩内斑点。Ⅱ阶段主要特征是形成 NW 向的顺层-近顺层揉皱石英-硫化物脉(图 3-b)。该阶段石英脉可见叠在Ⅰ阶段石英脉之上,未见切穿关系,但二者脉体的矿物组成、围岩蚀变强弱及蚀变矿物组合截然不同。该阶段矿石矿物主要为黄铁矿和磁黄铁矿,其次为闪锌矿、黄铜矿、方铅矿、自然金、自然铋等。硫化物多呈浸染状分布在铁白云石颗粒中,或以细脉状、脉状沿铁白云石及石英的粒间裂隙充填。黄铁矿、磁黄铁矿常与石英、铁白云石、铁方解石、白云石、方解石、绿泥石、钠长石、电气石等共同构成千枚岩内的斑点。围岩蚀变主要发育于石英脉与围岩接触部位,受流体影响,千枚岩发育硅化、绿泥石化、铁白云石化、碳酸盐化、钠长石化、黄铁矿化、磁黄铁矿化等,条带状粉砂质大理岩多发育硅化、碳酸盐化。总体看,越接近矿脉,岩石变形越强,蚀变也越强。Ⅲ阶段主要为 NE 向节理石英脉(图 3-c),与地层斜交(倾向多变化在 $280^{\circ} \sim 335^{\circ}$ 之间),倾角一般较陡,节理常呈雁列式排列。该阶段节理脉金品位较高,与Ⅰ阶段 NW 向矿脉的交叉部位构成富矿体。矿石矿物主要有黄铁矿、磁黄铁矿,还包括少量黄铜矿、闪锌矿、方铅矿等。金主要以粒间金、裂隙金和自然金的形式产出。脉石矿物主要有石英及少量铁白云石、方解石、白云石等。围岩蚀变主要为硅化、碳酸盐化、黄铁矿化、绢云母化、绿泥石化。节理石英脉两侧千枚岩内多形成宽数厘米至数十厘米的灰黄色、灰绿色褪色带,褪色千枚岩金品位也较高。Ⅳ阶段产物主要为充填于 NE 向或 NW 向断裂中的石英脉(图 3-d),此脉明显切断揉皱脉、NE 向脉及岩脉。产状变化较大,走向 NW,石英脉充填于张裂隙内,脉壁不规则,长数米,宽数厘米。脉内通常硫化物较少。脉体的成分变化较大,粗大的脉体以石英为主,脉壁两旁可能含有铁白云石,延伸不长。细脉矿物组成以石英为主,含少量铁白云石、黄铁矿、磁黄铁矿、电气石、黑云母等。围岩蚀变较弱,一般有硅化、黄铁矿化、绢云母化、绿泥石化、碳酸盐化。

2 绿泥石的类型及分布特征

绿泥石是八卦庙金矿中十分重要的动力变质或热液蚀变的产物之一,在矿区内低绿片岩相碎屑

岩中广泛存在,尤其是在矿化强烈的部位,绿泥石十分发育。此外,矿区内充填在断裂中的煌斑岩脉,在热液作用下,钠长石也发生了绿泥石化。

通过野外地质特征观察和室内镜下鉴定,将八卦庙金矿床的绿泥石分布特征分为 4 类(表 1)。

(1) 围岩中广泛发育的绿泥石化。呈定向排列分布在云母石英片岩、粉砂质千枚岩中(Ⅰa 类)(图版 I-a),或作为组成围岩斑点中的矿物存在(Ⅰb 类)(图版 I-b)。此类绿泥石的形成,是由于三叠纪时期,围岩在 NE 向的强烈挤压下,发生了动力变质作用,围岩中的黑云母蚀变成绿泥石。其蚀变程度由围岩遭受的构造变形强烈程度决定。绿泥石常保留黑云母的假象,在空间上具有面状分布的特征。随着构造变形的递进或在左行剪切、区域内挤压持续作用下,绿泥石蚀变增强,且发生变形。并且,成矿热液沿裂隙或通过渗透作用对围岩的交代使绿泥石化更加普遍,成为金矿床重要的蚀变类型之一。

(2) 与热液矿物如石英、铁白云石、硫化物形成脉状穿切围岩或之前存在的脉体,部分脉体中绿泥石呈叶片状或鳞片状集合体(Ⅱa 类)(图版 I-c),具交代黑云母的假象,颗粒较粗大,部分脉体规模较小,主要是绿泥石呈细小鳞片状充填在石英裂隙中(Ⅱb 类)(图版 I-d)。

(3) 呈蠕虫状结构包裹在揉皱状含金石英脉矿石的石英中(图版 I-e),颗粒细小,具一级灰白干涉色(Ⅲ类)。

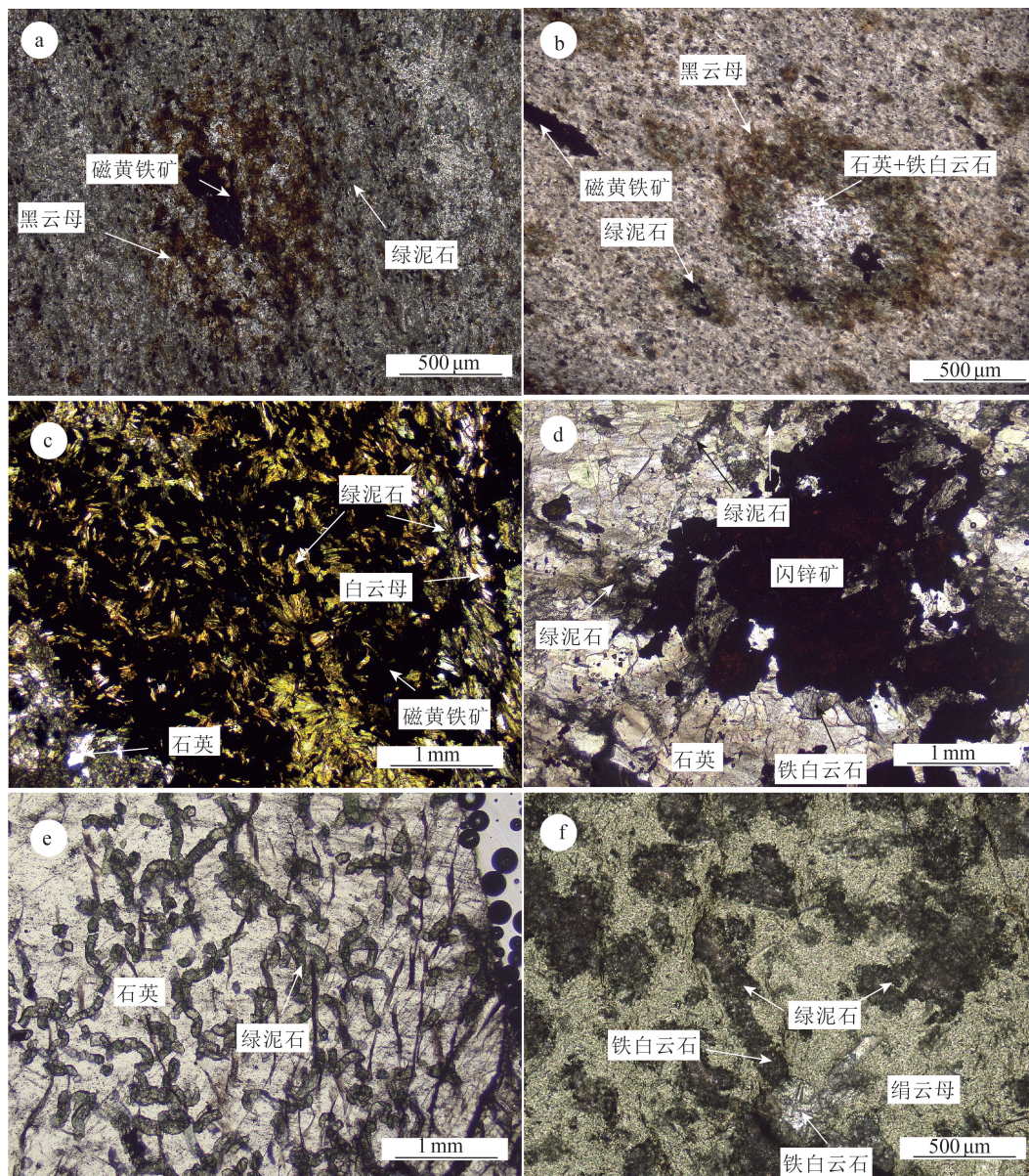
(4) 由钠长石蚀变形成,保留钠长石的假象,或与钠长石密切共生(Ⅳ类)(图版 I-f),主要发育在蚀变煌斑岩脉中。

3 绿泥石岩相学特征

本次采集了围岩、含矿石英脉体及蚀变煌斑岩样品,进行光薄片制备,然后在光学显微镜下观察鉴定。镜下特征显示,八卦庙金矿中的绿泥石主要呈叶片状、鳞片状、蠕虫状等,与石英、铁白云石、含铁白云石、黄铁矿、磁黄铁矿密切共生,广泛交代黑云母、钠长石、黄铁矿、磁黄铁矿及少量闪锌矿等。

表 1 列出了代表性样品的采样位置及其显微特征。根据这些特征,选取代表性绿泥石进行圈点,然后进行电子探针分析。分析结果见表 2。

图版 I Plate I



a. 绿泥石沿黑云母颗粒边部、矿物解理进行交代,部分黑云母仅见骸晶结构(单偏光);b. 粉砂质千枚岩中的斑点构造,石英、磁黄铁矿、钠长石、铁白云石、绿泥石和黑云母共同组成了斑点,其中绿泥石对黑云母进行交代(单偏光);c. 绿泥石与石英硫化物共(伴)生,呈叶片状(单交偏光),正交偏光下呈铁锈色异常干涉色;d. 绿泥石呈细脉状沿裂隙充填(单交偏光)石英裂隙中,与细粒含铁白云石共生;e. 呈蠕虫状包裹与石英中的绿泥石;f. 煌斑岩中由钠长石蚀变而成的绿泥石,保留钠长石假象。

4 绿泥石化学成分特征

绿泥石的化学成分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 JE-OL-JXA-8230 型电子探针,加速电压 15 kV,加速电流 10 nA,束斑直径 5 μm 。标样采用天然矿物或者合成金属国家标准,分析误差小于 0.01%。

各样品中绿泥石的电子探针分析数据见表 2^[30],其结构式和特征值见表 3(采用以 14 个氧原子为标准计算)。在利用电子探针对绿泥石成分进行分析时,必须对绿泥石的结构特征等进行考虑,绿泥石的结构较复杂,常含有其他矿物的微细包裹体、混层结构、衬里等,再加上绿泥石颗粒本身较细小,常与其他矿物形成复杂的共(伴)生关系。因此,

表 1 八卦庙金矿床样品采样位置及绿泥石的矿相学特征

Table 1 Sampling location and ineragraphic characteristics of chlorites from the Baguamiao gold deposit

样品号	取样位置	绿泥石分布类型	主要矿物组合	绿泥石镜下特征	金品位/(g·t ⁻¹)
BGM-139	炭质条带状千枚岩化灰岩		石英、铁白云石、绿泥石、黑云母、绢云母、磁黄铁矿	主要呈鳞片状交代黑云母,一级灰干涉色,沿黑云母解理、裂隙或边部交代,部分黑云母被交代较彻底	0.49
BGM-56			石英、铁白云石、绢云母、绿泥石		0.04
BGM-193	成矿Ⅲ阶段脉旁的灰黑色粉砂质千枚岩	I a	石英、铁白云石、绢云母、磁黄铁矿、绿泥石	主要呈鳞片状与石英铁白云石共生,一级灰干涉色,围岩未发生褪色	0.02
BGM-17			斑点为细小的硫化物颗粒斑晶,绿泥石与石英、铁白云石、绢云母等定向排列	主要呈鳞片状与石英铁白云石共生,一级灰干涉色,围岩发生褪色	8.26
BGM-49	成矿Ⅰ阶段脉旁的炭质斑点状千枚岩,发育皱纹线理		硫化物、石英、钠长石、黑云母和绿泥石组成矿物斑点的主要成分,斑点受构造影响发生变形	主要呈鳞片状交代黑云母,一级灰干涉色,沿边部交代,表现出一定的褪色性	2.49
YK-3	绿泥石化粉砂质千枚岩		磁黄铁矿、石英、铁白云石、绿泥石组成环带状斑点,斑点仅定向排列、无变形		0.08
YK-1	条带状泥灰岩		石英、铁白云石、绿泥石、黑云母、绢云母、磁黄铁矿、钛铁矿	主要呈鳞片状交代黑云母,一级灰干涉色,沿黑云母边部交代,呈面状分布	0.03
YK-5	成矿Ⅳ阶段脉旁的条带状千枚岩化灰岩	I b	自形黄铁矿与绿泥石组成斑点,斑点仅定向,无变形	主要呈鳞片状交代黑云母,一级灰干涉色,黑云母被交代较彻底	0
YK-8	绿泥石化粉砂质千枚岩		硫化物、黑云母和绿泥石组成斑点,斑点仅定向,无变形	主要呈鳞片状交代黑云母,一级灰干涉色,沿边部交代,表现出一定的褪色性	0.05
BGM-230	成矿Ⅰ阶段脉旁的炭质千枚岩	II a	石英、铁白云石、白云母、磁黄铁矿、黄铁矿、绿泥石	主要呈叶片状与石英、白云母、少量铁白云石共生,一级灰干涉色	0.1
BGM189	成矿Ⅱ阶段脉体		绿泥石、白云母、磁黄铁矿、黄铁矿	主要呈叶片状与白云母、磁黄铁矿、黄铁矿共生,一级灰干涉色	20~40
BGM-116	成矿Ⅲ阶段脉旁的炭质千枚岩	II b	石英、铁白云石、闪锌矿、磁黄铁矿、黄铁矿、绿泥石	呈细小鳞片状充填在石英裂隙中	0.53
BGM-138	成矿Ⅱ阶段脉体		绿泥石、石英、黑云母、磁黄铁矿、黄铁矿	主要呈叶片状与磁黄铁矿、黄铁矿共生,一级灰干涉色,交代黑云母	2.52
BGM-137	成矿Ⅱ阶段脉体	III	绿泥石、石英	呈蠕虫状包裹在石英中	0
BGM-158	蚀变煌斑岩脉	IV	绿泥石、钠长石、石英、铁白云石、黄铁矿	主要呈鳞片状交代钠长石,保留钠长石晶型	低品位

在对其进行分析和讨论时必须将上述因素考虑在内。Foster^[31]通过研究提出,(Na₂O+K₂O+CaO)>0.5%时,说明绿泥石成分存在不同程度的混染,在数据处理及分析过程中需予以剔除^[32-33]。表格中采用的数据已经剔除不符合要求的数据。大量研究表明,绿泥石中Fe³⁺的含量一般小于铁总量的5%^[1,34],而在绿泥石电子探针分析过程中,Fe²⁺含量不能直接获得,因此绿泥石中的Fe²⁺可近似用全铁

含量代表,本文亦如此。

各类型绿泥石中SiO₂、Al₂O₃、FeO、MgO、MnO的含量如表2所示。其中Ⅳ型绿泥石的MgO、FeO含量均较高,可能与绿泥石由煌斑岩中的钠长石蚀变而来有关。由于绿泥石的MgO含量在上述4种不同类型绿泥石之间差异较明显,故以其为横坐标分别对其余4种主要成分做投点分析。结果显示,八卦庙金矿床中4种类型绿泥石的FeO含量随MgO

表 2 八卦庙金矿床绿泥石电子探针分析结果
Table 2 Electron microprobe analyses of chlorites from the Baguamiao gold deposit

类型	样品号	测试号	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	P ₂ O ₅	FeO	TiO ₂	BaO	NiO	MnO	Cr ₂ O ₃	总和
I a	BGM-139	1-1	0.007	14.973	23.189	25.34	0.001	0.083	0	22.379	0.068	0	0	0.048	0.041	86.129
	BGM-139	1-2	0.005	15.003	23.223	24.88	0.001	0.087	0	22.399	0.069	0	0	0.052	0.036	85.755
	BGM-56	1-3	0.044	14.11	22.576	24.428	0.006	0.07	0.006	24.951	0.153	0.002	0.013	0.153	0.106	86.618
	BGM-56	1-4	0.038	13.98	23.123	25.118	0.005	0.009	0.006	25.032	0.15	0	0.008	0.162	0.106	87.737
	BGM-193	1-2	0.017	11.454	22.059	25.031	0.085	0.022	0	30.742	0		0.081	0.095	0.038	89.624
	BGM-193	1-3	0.018	10.874	21.819	24.951	0.087	0.028	0	31.052	0.01	0	0.081	0.105	0.038	89.063
	BGM-193	1-4	0.015	11.657	22.102	26.121	0.091	0.017	0	29.655	0	0	0.067	0.087	0.033	89.845
	BGM-17	1-1	0.045	9.444	20.458	25.436	0.019	0.145	0.014	31.686	0.009	0.01	0	0	0.115	87.381
	BGM-17	1-2	0.044	8.984	20.548	25.256	0.016	0.165	0.014	32.036	0.01	0.01	0	0	0.115	87.198
	BGM-17	1-3	0.039	9.614	20.438	25.686	0.016	0.205	0.009	31.726	0.011	0.01	0	0	0.108	87.862
	BGM-49	1-1	0.03	14.616	22.181	25.297	0.004	0.04	0	24.617	0.115	0.027	0	0.199	0.083	87.209
	BGM-49	1-2	0.02	13.956	21.271	26.017	0.004	0.06	0	25.267	0.119	0.027	0	0.108	0.083	86.932
I b	YK-3	1-1	0.053	13.545	21.238	26.256	0.023	0.047	0.035	26.332	0	0	0	0	0.001	87.53
	YK-3	1-2	0.051	13.465	20.998	26.276	0.025	0.058	0.032	25.842	0.01	0	0	0.002	0.001	86.76
	YK-3	1-4	0.081	13.986	21.709	25.618	0.03	0.132	0.029	25.582	0.067	0	0	0.075	0.185	87.494
	YK-3	1-5	0.087	14.016	21.559	26.158	0.02	0.092	0.027	24.972	0.075	0	0	0.068	0.188	87.262
	YK-1	1-1	0.034	18.019	21.803	26.304	0.013	0.164	0.006	19.922	0.096	0	0.009	0	0.008	86.378
	YK-1	1-2	0.034	17.779	22.073	27.154	0.016	0.204	0.004	19.182	0.126	0.02	0.009	0	0.009	86.61
	YK-5	1-1	0.018	16.939	19.956	27.262	0	0.005	0.023	20.178	0.048	0.027	0.064	0.007	0.007	84.534
	YK-5	1-2	0.019	16.879	20.556	28.042	0	0.008	0.023	19.648	0.038	0.034	0.045	0.007	0.009	85.308
	YK-8	1-1	0.019	14.336	22.797	24.717	0.059	0.008	0.017	24.573	0.038	0	0.012	0.145	0.088	86.809
	YK-8	1-2	0.015	13.506	22.777	24.967	0.054	0.008	0.015	23.813	0.042	0	0.009	0.155	0.088	85.449

续表 2

类型	样品号	测试号	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	P ₂ O ₅	FeO	TiO ₂	BaO	NiO	MnO	Cr ₂ O ₃	总和
II ^a	BGM-230	2-2	0.013	15.672	23.571	26.058	0.009	0	0.005	23.986	0.039	0.056	0	0.017	0.025	89.451
	BGM-230	2-3	0.015	16.252	22.921	26.368	0.011	0	0.006	24.026	0.042	0.048	0	0.019	0.026	89.734
	BGM189	3-1	0.014	16.572	22.454	26.771	0.004	0.019	0.003	22.314	0.126		0	0.113	0.011	88.401
	BGM189	3-2	0.014	16.552	22.594	26.291	0.003	0.016	0.002	22.214	0.156	0.005	0	0.113	0.013	87.973
	BGM189	3-3	0.016	16.412	22.544	26.591	0.004	0.019	0.003	22.964	0.106	0	0	0.127	0.011	88.797
	BGM189	3-4	0.012	17.092	22.214	26.791	0.004	0.018	0.003	22.424	0.136	0	0	0.103	0.015	88.812
II ^b	BGM-116	2-1	0.004	7.777	21.082	24.891	0.001	0	0.023	32.336	0	0	0.026	0	0.084	86.224
	BGM-116	2-2	0.004	7.827	20.792	25.251	0.002	0.06	0.019	32.426	0	0	0.022	0.01	0.084	86.497
	BGM-138	2-1	0.045	15.503	22.889	24.896	0.039	0.05	0	23.233	0.087	0	0.004	0.092	0.061	86.899
	BGM-138	2-2	0.038	15.343	22.979	24.716	0.045	0.07	0	22.883	0.067	0	0.002	0.102	0.063	86.308
	BGM-138	2-3	0.051	14.993	22.649	24.916	0.039	0.05	0	23.543	0.097	0	0.004	0.088	0.069	86.499
	BGM-138	2-4	0.045	15.533	22.739	25.136	0.041	0.06	0	22.923	0.087	0.005	0.004	0.097	0.064	86.734
III	BGM-138	3-1	0.012	14.47	22.27	25.575	0	0.018	0	23.923	0	0.02	0.022	0.13	0.071	86.511
	BGM-138	3-2	0.014	15.01	22.36	25.395	0.007	0.018	0	24.573	0.008	0.02	0.18	0.12	0.071	87.776
	BGM-138	3-3	0.012	14.34	22.25	25.825	0.005	0.015	0	23.963	0.002	0	0.021	0.13	0.073	86.636
	BGM-137	1-1	0	14.719	23.472	24.238	0	0.031	0.003	25.5	0	0	0.026	0.095	0.079	88.163
	BGM-137	1-2	0	14.639	24.032	24.258	0.003	0.031	0.002	25.71	0.01	0	0.026	0.089	0.079	88.879
	BGM-137	1-3	0.01	14.849	23.322	24.478	0.004	0.034	0.003	26.19	0	0.005	0.026	0.105	0.08	89.106
IV	BGM-158	2-1	0.03	12.466	19.179	27.255	0.006	0.177	0.003	28.213	0.123	0.011	0	0.129	0.12	87.712
	BGM-158	2-2	0.031	12.386	18.939	27.275	0.006	0.169	0.002	29.023	0.133	0.013	0	0.149	0.121	88.247
	BGM-158	2-3	0.03	13.396	19.029	26.895	0.007	0.187	0.003	27.883	0.151	0.016	0	0.119	0.12	87.836
	BGM-158	3-1	0.01	14.912	20.514	26.292	0.003	0.047	0.023	26.652	0	0	0.008	0.146	0.068	88.675
	BGM-158	3-2	0.01	15.102	20.604	26.112	0.003	0.057	0.023	27.002	0.008	0	0.006	0.139	0.068	89.134
	BGM-158	3-3	0.01	14.582	20.494	26.542	0.003	0.049	0.018	26.692	0.002	0	0.007	0.181	0.07	88.65

表 3 八卦庙金矿床中绿泥石的特征值(以 14 个 O 原子为基准计算)
Table 3 Estimation of structural formulae and characteristic values of chlorites from the Baguamiao gold deposit(based on 14 oxygen atoms)

类 型	样 品 号	测 试 号	原子数														$n(\text{Fe})/$ $n(\text{Fe}+\text{Mg}$ $+\text{Ca})$	$n(\text{Al})/$ $n(\text{Al}+\text{Mg}$ $+\text{Fe})$	$n(\text{Mg})/$ $n(\text{Fe}$ $+\text{Mg})$	$n(\text{Fe})/$ $n(\text{Fe}$ $+\text{Mg})$	d_{001} (0.1 nm)	$T/$ °C	
			Na	Mg	Al	Si	K	Ca	P	Fe	Ti	V	Ni	Mn	Cr	Al ^{IV}							Al ^{VI}
I a	BGM-139	1-1	0.00	2.35	2.88	2.67	0.00	0.01	0.00	1.97	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	1.33	1.54	0.46	0.40	0.54	0.46	14.15	232.87
	BGM-139	1-2	0.00	2.37	2.90	2.63	0.00	0.01	0.00	1.98	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	1.37	1.53	0.45	0.40	0.54	0.46	14.14	236.90
	BGM-56	1-3	0.01	2.24	2.84	2.60	0.00	0.01	0.00	2.22	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	1.40	1.44	0.50	0.39	0.50	0.50	14.13	245.21
	BGM-56	1-4	0.01	2.19	2.86	2.63	0.00	0.00	0.00	2.20	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	1.37	1.49	0.50	0.39	0.50	0.50	14.14	241.12
	BGM-193	1-2	0.00	1.81	2.75	2.65	0.01	0.00	0.00	2.72	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	1.35	1.41	0.60	0.38	0.40	0.60	14.13	249.77
	BGM-193	1-3	0.00	1.73	2.75	2.67	0.01	0.00	0.00	2.78	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	1.33	1.42	0.62	0.38	0.38	0.62	14.13	249.10
	BGM-193	1-4	0.00	1.82	2.73	2.73	0.01	0.00	0.00	2.60	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	1.27	1.46	0.59	0.38	0.41	0.59	14.14	237.77
	BGM-17	1-1	0.01	1.54	2.64	2.78	0.00	0.02	0.00	2.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	1.22	1.42	0.65	0.37	0.35	0.65	14.14	238.38
	BGM-17	1-2	0.01	1.47	2.66	2.77	0.00	0.02	0.00	2.94	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	1.23	1.43	0.66	0.38	0.33	0.67	14.14	240.12
	BGM-17	1-3	0.01	1.56	2.62	2.79	0.00	0.02	0.00	2.88	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	1.21	1.41	0.65	0.37	0.35	0.65	14.14	236.93
I b	BGM-49	1-1	0.01	2.30	2.76	2.67	0.00	0.00	0.00	2.17	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	1.33	1.43	0.49	0.38	0.51	0.49	14.14	236.82
	BGM-49	1-2	0.00	2.21	2.66	2.76	0.00	0.01	0.00	2.24	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	1.24	1.42	0.50	0.37	0.50	0.50	14.15	227.86
	YK-3	1-1	0.01	2.13	2.65	2.77	0.00	0.01	0.00	2.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.23	1.42	0.52	0.37	0.48	0.52	14.15	227.68
	YK-3	1-2	0.01	2.14	2.63	2.80	0.00	0.01	0.00	2.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.20	1.43	0.52	0.37	0.48	0.52	14.15	224.71
	YK-3	1-4	0.02	2.20	2.70	2.71	0.00	0.01	0.00	2.26	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	1.29	1.41	0.50	0.38	0.49	0.51	14.14	234.26
	YK-3	1-5	0.02	2.20	2.68	2.76	0.00	0.01	0.00	2.20	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	1.24	1.43	0.50	0.38	0.50	0.50	14.15	227.26
	YK-1	1-1	0.01	2.78	2.66	2.73	0.00	0.02	0.00	1.73	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	1.27	1.39	0.38	0.37	0.62	0.38	14.16	221.19
	YK-1	1-2	0.01	2.72	2.67	2.79	0.00	0.02	0.00	1.65	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	1.21	1.46	0.38	0.38	0.62	0.38	14.17	212.56
	YK-5	1-1	0.00	2.68	2.49	2.89	0.00	0.00	0.00	1.79	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	1.11	1.38	0.40	0.36	0.60	0.40	14.18	203.87
	YK-5	1-2	0.00	2.62	2.53	2.92	0.00	0.00	0.00	1.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.08	1.45	0.39	0.37	0.60	0.40	14.18	198.16
	YK-8	1-1	0.00	2.27	2.85	2.62	0.01	0.00	0.00	2.18	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	1.38	1.47	0.49	0.39	0.51	0.49	14.14	242.46
	YK-8	1-2	0.00	2.16	2.88	2.68	0.01	0.00	0.00	2.13	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	1.32	1.55	0.50	0.40	0.50	0.50	14.14	235.23

续表 3

类 型	样 品 号	测 试 号	原子数											$n(\text{Fe})/$ $n(\text{Fe}+\text{Mg}+\text{Ca})$		$n(\text{Al})/$ $n(\text{Al}+\text{Mg}+\text{Fe})$		$n(\text{Mg})/$ $n(\text{Fe}+\text{Mg})$		$n(\text{Fe})/$ $n(\text{Fe}+\text{Mg})$		d_{001} (0.1 nm)	T/ °C
			Na	Mg	Al	Si	K	Ca	P	Fe	Ti	V	Ni	Mn	Cr	Al ^{IV}	Al ^V						
II ^a	BGM-230	2-2	0.00	2.38	2.83	2.65	0.00	0.00	0.00	2.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.35	1.49	0.46	0.39	0.54	0.46	14.14	235.78
	BGM-230	2-3	0.00	2.46	2.75	2.68	0.00	0.00	0.00	2.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.32	1.42	0.45	0.38	0.55	0.45	14.15	232.94
	BGM189	3-1	0.00	2.53	2.71	2.74	0.00	0.00	0.00	1.91	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	1.26	1.44	0.43	0.38	0.57	0.43	14.16	223.63
	BGM189	3-2	0.00	2.54	2.74	2.70	0.00	0.00	0.00	1.91	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	1.30	1.44	0.43	0.38	0.57	0.43	14.15	227.55
	BGM189	3-3	0.00	2.50	2.71	2.72	0.00	0.00	0.00	1.96	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	1.28	1.43	0.44	0.38	0.56	0.44	14.15	227.04
II ^b	BGM189	3-4	0.00	2.60	2.67	2.73	0.00	0.00	0.00	1.91	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	1.27	1.40	0.42	0.37	0.58	0.42	14.15	224.57
	BGM-116	2-1	0.00	1.29	2.76	2.77	0.00	0.00	0.00	3.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	1.23	1.53	0.70	0.39	0.30	0.70	14.14	242.08
	BGM-116	2-2	0.00	1.29	2.72	2.80	0.00	0.01	0.00	3.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	1.20	1.52	0.70	0.39	0.30	0.70	14.14	238.51
	BGM-138	2-1	0.01	2.43	2.84	2.62	0.01	0.01	0.00	2.04	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	1.38	1.45	0.46	0.39	0.54	0.46	14.14	240.16
	BGM-138	2-2	0.01	2.42	2.86	2.61	0.01	0.01	0.00	2.02	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	1.39	1.47	0.45	0.39	0.54	0.46	14.14	240.28
III	BGM-138	2-3	0.01	2.36	2.82	2.64	0.01	0.01	0.00	2.08	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	1.36	1.46	0.47	0.39	0.53	0.47	14.14	238.78
	BGM-138	2-4	0.01	2.43	2.82	2.64	0.01	0.01	0.00	2.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	1.36	1.46	0.45	0.39	0.55	0.45	14.14	236.76
	BGM-138	3-1	0.00	2.28	2.78	2.70	0.00	0.00	0.00	2.12	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	1.30	1.48	0.48	0.39	0.52	0.48	14.15	231.48
	BGM-138	3-2	0.00	2.34	2.76	2.66	0.00	0.00	0.00	2.15	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	1.34	1.42	0.48	0.38	0.52	0.48	14.14	237.37
	BGM-138	3-3	0.00	2.26	2.77	2.73	0.00	0.00	0.00	2.11	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	1.27	1.49	0.48	0.39	0.52	0.48	14.15	229.09
IV	BGM-137	1-1	0.00	2.30	2.90	2.54	0.00	0.00	0.00	2.24	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	1.46	1.44	0.49	0.39	0.51	0.49	14.13	252.61
	BGM-137	1-2	0.00	2.27	2.95	2.52	0.00	0.00	0.00	2.24	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	1.48	1.47	0.50	0.40	0.50	0.50	14.12	254.76
	BGM-137	1-3	0.00	2.30	2.86	2.55	0.00	0.00	0.00	2.28	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	1.45	1.41	0.50	0.38	0.50	0.50	14.13	252.82
	BGM-158	2-1	0.01	1.98	2.41	2.91	0.00	0.02	0.00	2.52	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	1.09	1.32	0.56	0.35	0.44	0.56	14.16	216.33
	BGM-158	2-2	0.01	1.97	2.38	2.90	0.00	0.02	0.00	2.58	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	1.10	1.28	0.57	0.34	0.43	0.57	14.16	217.96
IV	BGM-158	2-3	0.01	2.13	2.39	2.86	0.00	0.02	0.00	2.48	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	1.14	1.25	0.54	0.34	0.46	0.54	14.16	220.53
	BGM-158	3-1	0.00	2.33	2.53	2.75	0.00	0.01	0.00	2.33	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	1.25	1.29	0.50	0.35	0.50	0.50	14.15	230.31
	BGM-158	3-2	0.00	2.35	2.54	2.73	0.00	0.01	0.00	2.36	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	1.27	1.26	0.50	0.35	0.50	0.50	14.15	233.87
	BGM-158	3-3	0.00	2.28	2.53	2.78	0.00	0.01	0.00	2.34	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	1.22	1.31	0.51	0.35	0.49	0.51	14.15	227.43

含量的降低而升高,而 SiO_2 、 Al_2O_3 含量随 MgO 含量无明显变化,Ⅲ型、Ⅳ型绿泥石中 MnO 含量较高,且分布较集中,其他类型绿泥石的 MnO 含量变化范围较大(图4)。在各主量元素与 MgO 相关图解中,Ⅲ型和Ⅳ型绿泥石分布于不同的区域,而Ⅰ型、Ⅱ型绿泥石在Ⅲ型和Ⅳ型绿泥石的分布区域均有分布,除 MnO 外,分布于不同类型绿泥石范围内的Ⅰ型、Ⅱ型绿泥石均与该类型绿泥石表现出很好的相关性,说明石英硫化物在成矿作用过程中起到重要作用,这与野外普遍发育石英硫化物脉的观察结果一致。4种类型绿泥石中铁、镁含量均变化较大,且此消彼长,反映了两者在绿泥石结构中的置换较普遍。

目前常采用绿泥石的 Fe/Si 图解进行分类和命名^[1,30]。投图显示,八卦庙金矿床中不同成因和产状绿泥石类型不同,绝大部分绿泥石主要归为蠕绿泥石(铁绿泥石),部分Ⅰb型绿泥石落入密绿泥石的范围,部分Ⅳ型绿泥石则落入铁镁绿泥石的范围(图5)。

4.1 绿泥石的 $n(\text{Al})/n(\text{Al}+\text{Mg}+\text{Fe})$ 与 $n(\text{Mg})/n(\text{Fe}+\text{Mg})$ 值

众多学者对绿泥石的化学成分与母岩之间的

关系进行了研究^[33,35-36]。Lair^[36]提出的 $n(\text{Mg})/n(\text{Fe}+\text{Mg})-n(\text{Al})/n(\text{Al}+\text{Mg}+\text{Fe})$ 图解,被广泛用于判别绿泥石与其母岩的关系。一般由镁铁质岩石形成的绿泥石的 $n(\text{Al})/n(\text{Al}+\text{Mg}+\text{Fe})$ 值较低(<0.35),而由泥质岩石形成的绿泥石 $n(\text{Al})/n(\text{Al}+\text{Mg}+\text{Fe})$ 值较高(>0.35)。

由表3可见,所有Ⅰ型、Ⅱ型、Ⅲ型绿泥石的 $n(\text{Al})/n(\text{Al}+\text{Mg}+\text{Fe}) > 0.35$,所有Ⅳ型绿泥石 $n(\text{Al})/n(\text{Al}+\text{Mg}+\text{Fe}) \leq 0.35$,而Ⅰ型、Ⅱ型、Ⅲ型中受成矿流体影响较大的绿泥石,其 $n(\text{Al})/n(\text{Al}+\text{Mg}+\text{Fe})$ 略低于受成矿流体影响小的绿泥石的值,表明Ⅰ型、Ⅱ型、Ⅲ型绿泥石化学成分主要受泥质粉砂岩原岩控制,Ⅳ型绿泥石主要受铁镁质原岩控制,而在围岩蚀变过程中,成矿流体与围岩的水岩反应使Ⅰ型、Ⅱ型、Ⅲ型绿泥石的铁镁成分发生了变化。

一般产于基性岩中的绿泥石的 $n(\text{Mg})/n(\text{Fe}+\text{Mg})$ 值较高,而产于含铁建造中的绿泥石的 $n(\text{Mg})/n(\text{Fe}+\text{Mg})$ 值较低^[33,36]。Ⅰa型、Ⅰb型、Ⅱa型、Ⅱb型、Ⅲ型和Ⅳ型绿泥石的 $n(\text{Mg})/n(\text{Fe}+\text{Mg})$ 值分别为 $0.33\sim 0.54$ 、 $0.48\sim 0.60$ 、 $0.54\sim 0.58$ 、 $0.30\sim 0.55$ 、 $0.50\sim 0.52$ 和 $0.43\sim 0.50$ 。这些数

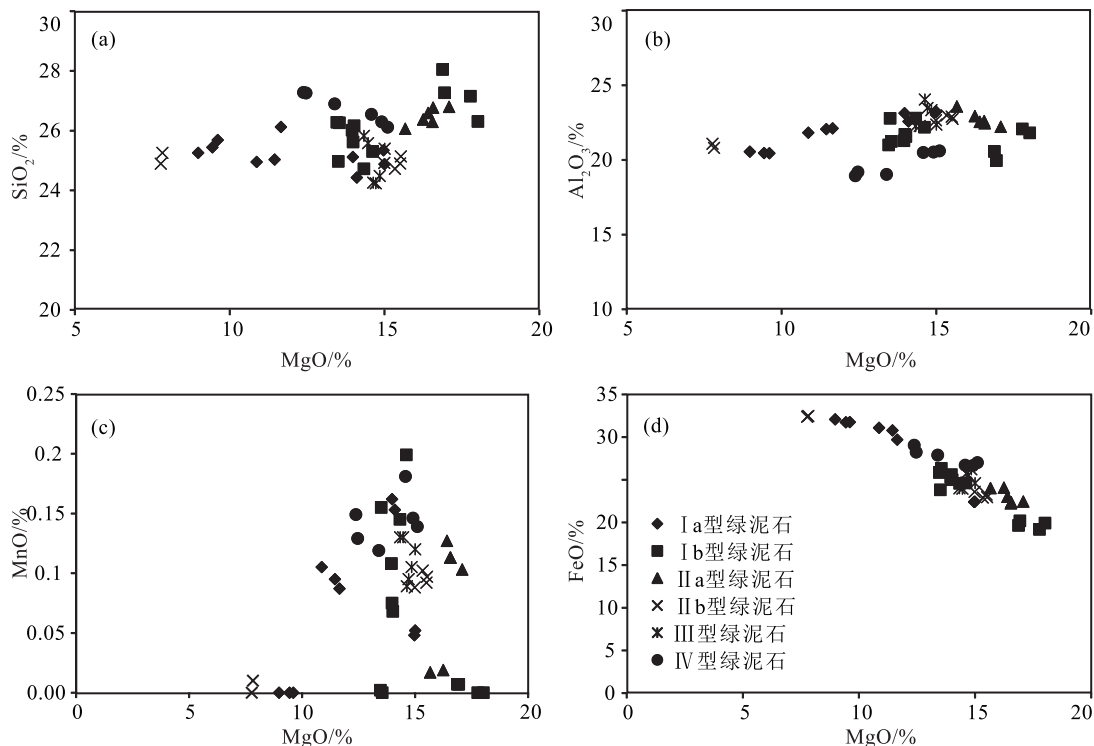


图4 绿泥石 SiO_2 、 Al_2O_3 、 MnO 、 FeO 对 MgO 含量投点图

Fig. 4 SiO_2 、 Al_2O_3 、 MnO 、 FeO vs. MgO of four types of chlorites from the Baguamiao gold deposit

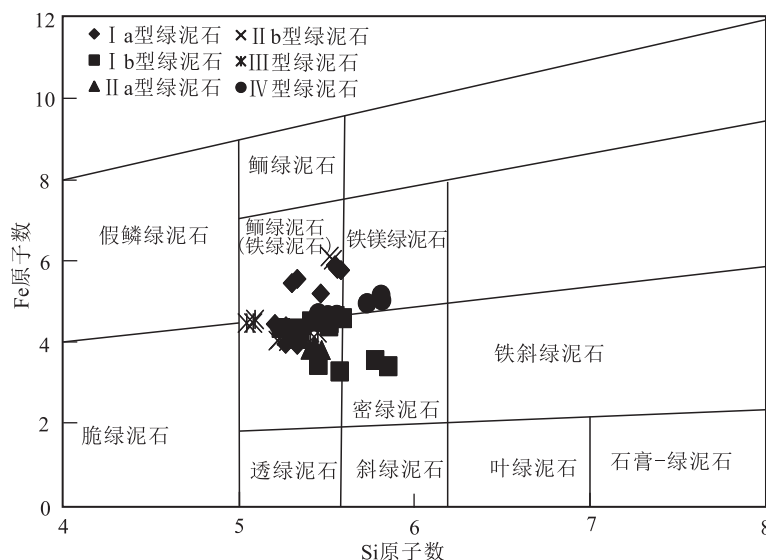
图5 八卦庙金矿床绿泥石的分类图解^[1]

Fig. 5 Classification of chlorites from the Baguamiao gold deposit

据均接近或小于 0.5, 相对偏低, 指示各种类型绿泥石的形成环境与基性岩关系不大, 接近于含铁建造。此外, 各类绿泥石均具有与硫化物共(伴)生的特点, 因此 4 类绿泥石可能来源于对围岩或石英硫化物脉中 Fe 元素的萃取。而 II 型绿泥石、III 型绿泥石的 $n(\text{Mg})/n(\text{Fe}+\text{Mg})$ 值略高于其他类型绿泥石的值, 表明其中绿泥石可能受成矿 II 阶段的流体成分的影响, 带入了部分 Mg 元素。

在 $n(\text{Al})/n(\text{Al}+\text{Mg}+\text{Fe})-n(\text{Mg})/n(\text{Fe}+\text{Mg})$ 图解(图 6-a)中, 绿泥石样品的投影点较分散, 但总体显示较弱的正相关关系。可能与绿泥石部分来自于泥质碎屑岩围岩, 并受富铁、镁的成矿流体影响有关。

4.2 绿泥石的 Al^{IV} 、 Al^{VI} 值及 $n(\text{Fe})/n(\text{Fe}+\text{Mg})$ 、 $n(\text{Mg})/n(\text{Fe}+\text{Mg})$ 值

绿泥石的 Al^{IV} 、 Al^{VI} 值及 $n(\text{Al}^{\text{VI}}+\text{Fe})-n(\text{Mg})$ 关系图常用来说明绿泥石在四面体及八面体位置上的替换关系。Xie 等^[2]研究表明, 当绿泥石在四面体位置的离子替代关系是完全的钙镁闪石型替代时, Al^{IV} 与 Al^{VI} 之间的线性关系近于 1:1 (相关系数 = 0.95)。

八卦庙金矿床各类型绿泥石的 $n(\text{Al}^{\text{IV}})$ 值和 $n(\text{Al}^{\text{VI}})$ 值如表 3 所示, 在 $n(\text{Al}^{\text{IV}})-n(\text{Al}^{\text{VI}})$ 关系图(图 6-b)中, 二者存在一定的正相关性, 说明在 Al^{IV} 对 Si 的替换过程中, 伴随着 Al^{VI} 在八面体位置上对 Fe 或 Mg 的置换。该矿床绿泥石 $n(\text{Al}^{\text{IV}})$ 与 $n(\text{Al}^{\text{VI}})$

之间的相关关系为 $n(\text{Al}^{\text{VI}}) = 0.3275 n(\text{Al}^{\text{IV}}) + 1.0084 (R^2 = 0.1957)$ 。因此, 本区绿泥石的 Al 与 Si 置换不属于单纯的钙镁闪石型替代, Al^{VI} 对八面体上 Fe 或 Mg 的置换要多于 Al^{IV} 对四面体上 Si 的置换, 同时也反映了绿泥石中的 Fe^{3+} 含量很少。除 IV 型绿泥石外, 对比 I 型、II 型、III 型绿泥石的取样位置及蚀变强度特征, 可知此 3 类绿泥石的 $n(\text{Al}^{\text{IV}})$ 值和 $n(\text{Al}^{\text{VI}})$ 值随着蚀变的增强均略有增加, Al 元素对被蚀变矿物中 Fe、Mg、Si 等元素的置换更加强烈。

在 $n(\text{Al}^{\text{IV}})-n(\text{Fe})/n(\text{Fe}+\text{Mg})$ 和 $n(\text{Al}^{\text{IV}})-n(\text{Mg})/n(\text{Fe}+\text{Mg})$ 图解(图 6-c、d)中, 各类绿泥石的相关性较差, 但仍可显示一定的相关关系。对比表 2 与表 3 显示, 4 类绿泥石中蚀变围岩受成矿阶段

I、II、IV 热液流体的影响, 绿泥石的 $n(\text{Al}^{\text{IV}})$ 与 $n(\text{Fe})/n(\text{Fe}+\text{Mg})$ 呈较弱的正相关关系, 与 $n(\text{Mg})/n(\text{Fe}+\text{Mg})$ 呈较弱的负相关关系, 表明随着四面体位上 Al^{IV} 对 Si 的置换, 在八面体位上发生了 Fe 对 Mg 的置换, 使得 Fe 增加而 Mg 相对减少。而蚀变煌斑岩、受成矿阶段 III 热液流体影响的绿泥石, $n(\text{Al}^{\text{IV}})$ 与 $n(\text{Fe})/n(\text{Fe}+\text{Mg})$ 呈较弱的负相关关系, 与 $n(\text{Mg})/n(\text{Fe}+\text{Mg})$ 呈较弱的正相关关系, 表明随着四面体位上 Al^{IV} 对 Si 的置换, 在八面体位上发生了 Mg 对 Fe 的置换, 使得 Mg 增加而 Fe 相对减少。

4.3 绿泥石的 $n(\text{Al}^{\text{IV}}+\text{Fe})-n(\text{Mg})$ 、 $n(\text{Fe})-n(\text{Mg})$ 、 $n(\text{Al}^{\text{VI}})-n(\text{Mg})$ 关系

八卦庙金矿床各类型绿泥石在 $n(\text{Al}^{\text{IV}}+\text{Fe})-n(\text{Mg})$ 图解上均具有良好的线性负相关关系(图 6-e), 线性方程为 $n(\text{Al}^{\text{IV}}+\text{Fe}) = -0.9655n(\text{Mg}) + 5.8113 (R^2 = 0.9832)$, 呈近 1:1 的负相关关系, 说明在八面体位置上主要发生 Mg 被 Al^{IV} 和 Fe 的置换。在 $n(\text{Fe})-n(\text{Mg})$ 图解(图 5-f)上, 各类型绿泥石也具有较好的线性负相关关系, 线性方程为 $\text{Fe} = -0.9501\text{Mg} + 4.3485 (R^2 = 0.9354)$, 呈近 1:1 的负相关关系; 而在 $n(\text{Al}^{\text{VI}})-n(\text{Mg})$ 图解(图 5-g)上, 线性方程为 $n(\text{Al}^{\text{VI}}) = -0.0154n(\text{Mg}) + 1.4628 (R^2 = 0.0061)$, 相关关系不明显。这说明在绿泥石八面体位置上主要发生了 Fe 和 Mg 之间的置换, 而 Al^{VI} 和 Mg 之间的置换不明显。

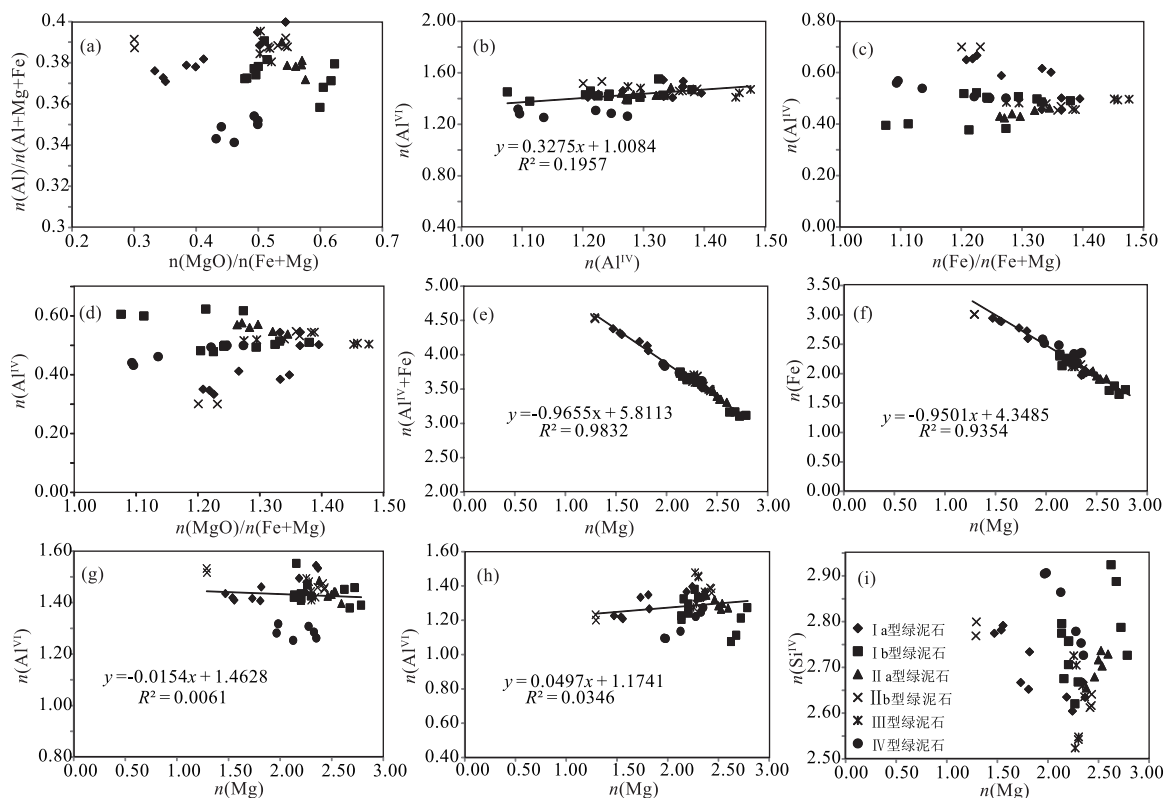


图 6 绿泥石中主要阳离子间的相关关系图解

Fig. 6 Correlation of main cations in chlorites from the Baguamiao gold deposit

4.4 绿泥石中主要阳离子与 $n(\text{Mg})$ 的关系图解

前人通过研究 Barberton 绿岩带绿泥石的主要阳离子与镁的关系总结出,由一次变质作用形成的绿泥石中,阳离子与镁应具有较好的线性相关性^[2]。八卦庙金矿床的主要阳离子与镁的关系图(图 4)中,仅 Fe 与 Mg 具较好的线性相关性,而 Al^{VI} 、Si 和 Al^{IV} 与 Mg 之间的相关性不明显(图 6-g、h、i),说明本区绿泥石经历了多期次的变质作用。

5 讨论

5.1 绿泥石形成温度

绿泥石作为中低温、中低压环境中稳定存在的矿物,由于其结构上的可变性和成分上的非计量性,其成分和结构的变化与形成温度之间的关系一直受到国内外学者的关注^[35,37]。

Hey^[38] 注意到绿泥石的多型与其形成温度间具有定性关系; Cathelineau^[3] 通过研究墨西哥 Los Azufres 和 Salton Sea 地热系统中绿泥石的成分-温度间的关系,发现绿泥石中的 Al^{IV} 与温度间存在正相

关关系,并提出了绿泥石固溶体地质温度计; Kranidiotis^[8] 根据研究对 Cathelineau^[3] 提出的温度计进行了修正,并强调该公式适用于 Al 饱和型绿泥石。Jowett^[39] 则对 Kranidiotis^[8] 修正后的温度计再次进行修正,并限定公式适用的前提是温度为 150~325℃, $n(\text{Fe})/n(\text{Fe} + \text{Mg}) < 0.6$ 的地热系统。Battaglia^[37] 运用 XRD 结果计算绿泥石形成时的温度。以上研究表明,绿泥石的形成温度与绿泥石的结构、化学组成及多型等之间的关系已得到较深入的研究和越来越广泛的认同^[13]。

八卦庙金矿床中 4 类绿泥石的 $n(\text{Fe})/n(\text{Fe} + \text{Mg}) \leq 0.7$, 其 Al_2O_3 含量为 18.939%~24.032%, 均值为 21.834%, 在显微镜下可见绿泥石主要与石英、铁白云石或者磁黄铁矿、黄铁矿等硫化矿物共(伴)生,并未见与富 Al 的矿物共生,故该矿床的绿泥石并非 Al 饱和型。因此,本文利用 Raused-Colom 等提出,后经 Nieto 修改的关系式计算面网间距 d_{001} 值,计算公式为: $d_{001} (/0.1\text{nm}) = 14.339 - 0.115 n(\text{Al}^{\text{IV}}) - 0.0201 n(\text{Fe}^{2+})$ (该计算公式中绿泥石的结

构式按 14 个氧原子计算),然后根据 Battaglia 提出的 d_{001} 与温度之间的关系方程 $T/^{\circ}\text{C} = (14.379 - d_{001} (0.1\text{nm})) / 0.001$, 计算绿泥石的形成温度(表 3)。

I a 型、I b 型、II a 型、II b 型、III 型、IV 型绿泥石的形成温度分别为 236.90 ~ 249.77 $^{\circ}\text{C}$ (平均 240.82 $^{\circ}\text{C}$)、198.16 ~ 236.82 $^{\circ}\text{C}$ (平均 224.34 $^{\circ}\text{C}$)、223.63 ~ 235.78 $^{\circ}\text{C}$ (平均 228.59 $^{\circ}\text{C}$)、236.76 ~ 242.08 $^{\circ}\text{C}$ (平均 239.43 $^{\circ}\text{C}$)、229.09 ~ 254.76 $^{\circ}\text{C}$ (平均 243.02 $^{\circ}\text{C}$)、216.33 ~ 233.87 $^{\circ}\text{C}$ (平均 224.40 $^{\circ}\text{C}$)。以上 4 种类型绿泥石的形成温度都属于中-低温热液蚀变范围。围岩中面状分布的绿泥石化温度高于以斑点结构存在的绿泥石的温度,呈大颗粒状与石英、铁白云石及硫化物组成脉状的绿泥石温度低于呈细小鳞片状与石英硫化物组成细脉状的绿泥石温度,呈蠕虫状分布于石英中的绿泥石温度较高,与呈细脉中细小鳞片状绿泥石的形成温度接近,煌斑岩蚀变形成的绿泥石温度较低,与叶片状颗粒呈脉状分布的绿泥石及斑点构造中的绿泥石形成温度接近。

蚀变围岩,成矿阶段 I、II、III、IV 含金石英脉旁,以及蚀变煌斑岩中绿泥石的形成温度分别为 212.56 ~ 245.21 $^{\circ}\text{C}$ (平均 231.79 $^{\circ}\text{C}$)、227.86 ~ 236.82 $^{\circ}\text{C}$ (平均 233.35 $^{\circ}\text{C}$)、223.63 ~ 254.76 $^{\circ}\text{C}$ (平均 237.34 $^{\circ}\text{C}$)、236.93 ~ 249.77 $^{\circ}\text{C}$ (平均 242.01 $^{\circ}\text{C}$)、198.16 ~ 203.87 $^{\circ}\text{C}$

(平均 201.01 $^{\circ}\text{C}$)、216.33 ~ 233.87 $^{\circ}\text{C}$ (平均 224.40 $^{\circ}\text{C}$) (图 7)。与八卦庙金矿床各成矿阶段流体的低温范围具有很好的对应性^[40],表明八卦庙各类绿泥石均是在各个成矿阶段热液流体演化的晚阶段形成的。结合表 1 中各类型绿泥石化矿石的品位数据可知,利于金矿化的绿泥石形成温度范围为 224.71 ~ 240.28 $^{\circ}\text{C}$,平均为 232.52 $^{\circ}\text{C}$ 。对应的高品位矿石分别产自主成矿阶段(阶段 II 和 III)流体作用下发育的蚀变围岩和含金石英脉体。4 类绿泥石的形成温度变化范围较大,可能主要与矿集区内热液活动的多期活动或不断演化有关。

绿泥石中的阳离子与温度之间显示出不同的变化特征。Cathelineau 等^[3]通过研究墨西哥 Los Azufres 和 SaltonSea 地热系统绿泥石的成分-温度关系,认为在 100 ~ 350 $^{\circ}\text{C}$ 范围,温度与绿泥石 Al^{IV} 、Fe、Fe/Mg 值呈正相关关系,而与八面体空穴和 Al^{VI} 呈负相关关系。在八卦庙金矿床中绿泥石的形成温度与 Al^{IV} 、 Si^{IV} 的关系图解(图 8)中, Al^{IV} 与温度呈正相关关系, Si^{IV} 与温度呈负相关关系。这与 Cavaretta 等^[41]和 Cathelineau 等^[3]对 Los Azufres 和 SaltonSea 地热系统中绿泥石的研究结果相似,也说明了上述理论的普适性。

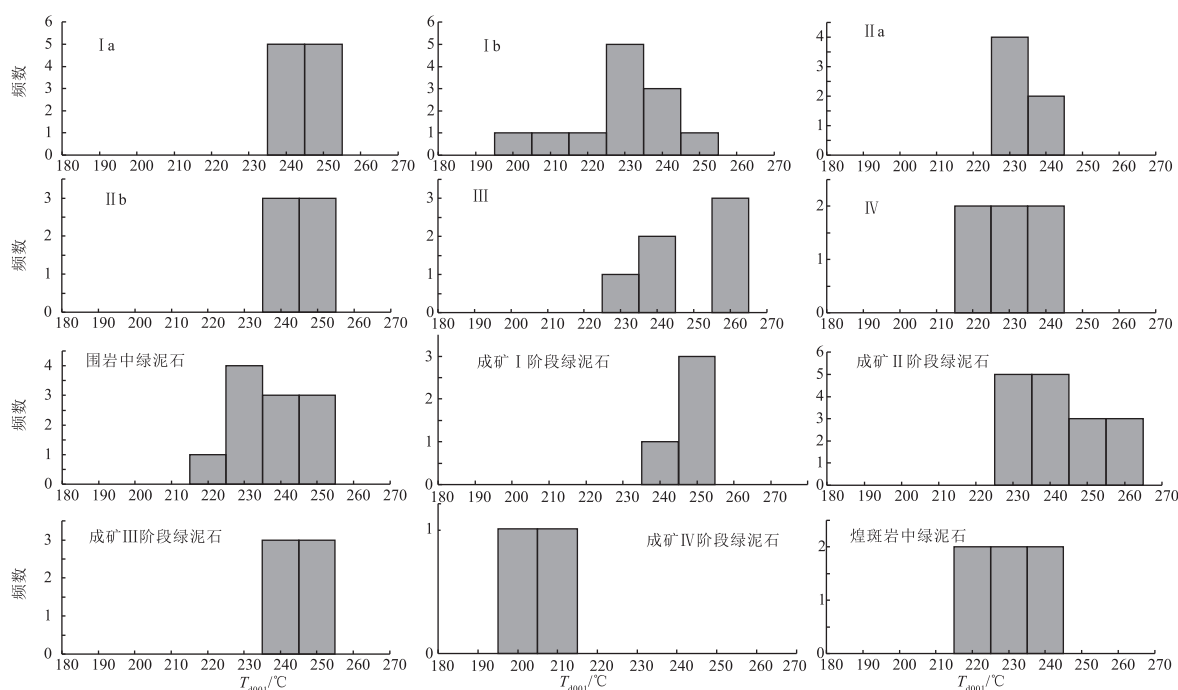
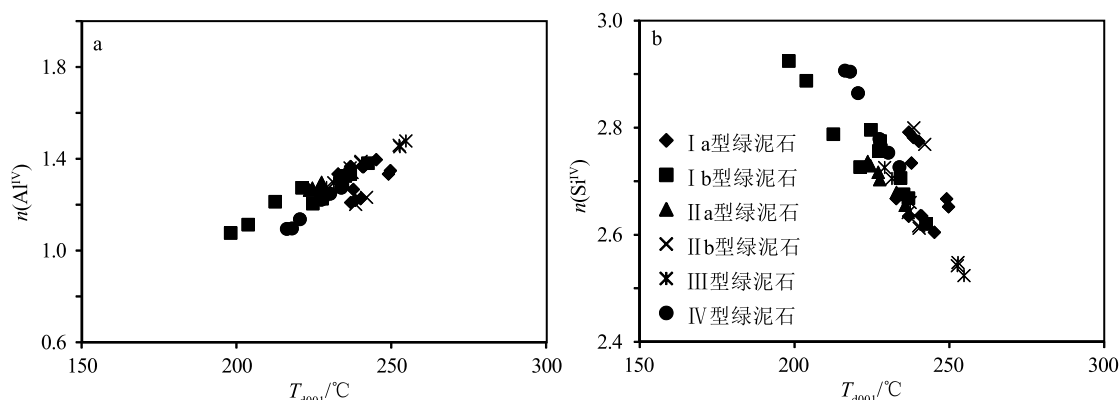


图 7 4 类绿泥石及不同产状绿泥石形成温度频率分布直方图

Fig. 7 Temperature histogram of four types of chlorites

图 8 绿泥石形成温度 T_{d001} 与 Al^{IV} 、 Si^{IV} 相关性图解 (符号同图 4)Fig. 8 Correlation of Al^{IV} 、 Si^{IV} with T_{d001} of chlorites from the Baguamiao gold deposit

5.2 绿泥石形成环境

绿泥石在反映动力学控制的水-岩反应过程中形成^[15]。地质学者认为,其主要受温度、压力、水-岩比、流体、岩石化学成分等因素制约。Inoue^[42]认为,在脉状矿床的热液蚀变中,低氧化、低 pH 值条件有利于形成富镁绿泥石,还原环境有利于形成富铁的绿泥石,富铁绿泥石的形成可能与流体的沸腾作用有关。本次研究表明,研究区 4 类绿泥石主要为蠕绿泥石(铁绿泥石),部分铁镁绿泥石和密绿泥石,可能主要形成于还原环境。

绿泥石成分的变化受形成环境控制,如温度、压力、酸碱度等。在温度条件相近的中温热液矿床形成过程中,溶液的酸碱度对矿物成分有明显影响,即在溶液酸度升高的条件下,有利于酸性组分取代相对碱性的组分,反之亦然^[17]。绿泥石中 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 主要为六次配位,二者形成广泛的类质同像替代。若 Fe 取代 Mg,表征其形成于相对酸性环境;反之,Mg 取代 Fe,则表征相对碱性环境。I a 型、I b 型、II a 型、II b 型、III 型、IV 型绿泥石的 $n(Fe)/n(Fe + Mg)$ 值分别为 0.46 ~ 0.67 (均值 0.57)、0.38 ~ 0.51 (均值 0.46)、0.42 ~ 0.46 (均值 0.44)、0.45 ~ 0.70 (均值 0.54)、0.48 ~ 0.50 (均值 0.49)、0.50 ~ 0.57 (均值 0.53),因此八卦庙金矿床中 4 类绿泥石均形成于弱酸性-近中性的还原环境。而八卦庙金矿床蚀变围岩、4 个成矿阶段(从早至晚)、蚀变煌斑岩中的绿泥石的 $n(Fe)/n(Fe + Mg)$ 值分别为 0.38 ~ 0.52 (均值 0.48)、0.46 ~ 0.50 (均值 0.48)、0.42 ~ 0.70 (均值 0.49)、0.59 ~ 0.67 (均值 0.63)、0.40、0.50 ~ 0.57 之间(均值 0.53)。表明蚀变围岩中绿泥石在弱酸性环境下形成;随着流体的演

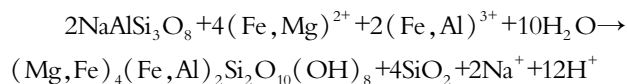
化,从成矿 I 阶段→III 阶段→IV 阶段随着温度不断下降,成矿流体逐渐由弱酸性→近中性→弱酸性演化;煌斑岩中的绿泥石相较于成矿 III 阶段的绿泥石偏酸性,相较于 I、II、IV 阶段的绿泥石则偏中性。结合八卦庙金矿床内金矿化与各阶段流体及蚀变围岩的关系,认为金矿化的有利形成环境为近中性。

5.3 绿泥石形成机制及其与成矿关系

绿泥石是八卦庙金矿中十分重要的动力变质或热液蚀变的产物之一,在矿区内低绿片岩相碎屑岩中广泛存在,尤其是在矿化强烈的部位,绿泥石十分发育。通过野外观察和显微镜下鉴定,绿泥石的产状主要有 4 类:①由黑云母蚀变而成的绿泥石,常部分或全部交代黑云母,并保持黑云母假象(I 型绿泥石,部分 II a 型绿泥石);②与热液矿物如石英、铁白云石、硫化物形成脉状,呈叶片状或鳞片状集合体(II a 型绿泥石)或呈细小鳞片状充填在石英裂隙中(II b 类);③呈蠕虫状包裹在石英硫化物脉石英颗粒中的绿泥石(III 型绿泥石);④由煌斑岩中的钠长石蚀变而成的绿泥石,一般颗粒较小(IV 型绿泥石)。I 型、II a 型、IV 型绿泥石常为发生水-岩作用的直接地质证据,而 II b 和 III 型绿泥石主要与各种构造热事件相关。绿泥石的这些显微组构特征及绿泥石产出具有近矿的特征,表明其形成与热液流体活动密切相关。通过电子探针分析结果可知,八卦庙金矿床绿泥石的化学类型主要为蠕绿泥石,说明热液流体中富含 Fe。刘英俊等^[43]认为,Fe 的运移与流体介质具有酸性和还原性特征有关,这与前文得出的八卦庙金矿的绿泥石形成于还原和弱酸性-近中性环境基本一致。结合本文 4 类绿泥石形成温度介于 198.16 ~ 254.76℃ 之间,提出本区

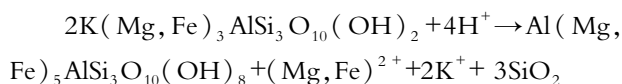
绿泥石形成机制可能主要有 2 种。

(1) 溶蚀-结晶和溶蚀-迁移-结晶。溶蚀-结晶为后期的热液进入岩石中,沿围岩构造裂隙及矿物间裂隙对围岩中的矿物(如黑云母、长石等)进行溶蚀交代,并在原地结晶形成绿泥石。母矿物常出现明显的蚀变特征,有的甚至被完全交代,呈假象交代结构(图版 I-a)。这种情况形成的绿泥石,其 Fe、Mg 组分往往较少从成矿溶液带入。其中长石蚀变成绿泥石可能的反应式如下^[44]:



由以上反应式可知,绿泥石蚀变为流体提供了 H^+ , 导致流体酸性增强。八卦庙金矿床成矿流体从早期至晚期从弱酸性演化至近中性,与 4 个成矿阶段矿石围岩中绿泥石化逐渐减弱的特征吻合。

黑云母蚀变为绿泥石的反应式如下^[45]:



(2) 溶蚀-迁移-结晶为流体溶蚀矿物(如黑云母、长石)后经过一定距离的搬运,在矿物裂隙中再沉淀结晶而形成绿泥石。这种机制下形成的绿泥石多沿矿物裂隙生长,常显示细脉状分布的特征,如在显微镜下常见绿泥石呈叶片状与磁黄铁矿、黄铁矿等矿物共(伴)生,有时甚至可见绿泥石细脉(图版 I-4)。该情况下绿泥石成分主要为流体带入 Fe、Mg 组分。

许多学者^[29, 46-48] 研究认为,八卦庙金矿是大型脆-韧性剪切带中的造山带金矿床。一般大型韧性剪切带型金矿床产出于剪切带的韧性转换位置^[49-50]。在剪切作用影响下,八卦庙地区发生了强烈的构造变形,使物理化学环境产生巨大变化,变质变形(尤其是深层次韧性变形)作用促使区内地层发生脱水,产生动力变质热液,同时地层中高含量的金被活化进入流体,形成含矿热液^[51]。这些含矿热液沿断裂不断向上运移,在较浅的部位(韧-脆性变形带中)与围岩中的黑云母、长石等矿物接触时,沿矿物的边部、解理、裂隙等对这些矿物进行交代并形成绿泥石;或者含矿流体萃取黑云母、长石等矿物中的 Fe、Mg 等元素后,沿断裂、裂隙继续运移至有利部位再结晶沉淀形成绿泥石,这一过程会引起成矿热液成分、物理化学性质的变化,从而引起成矿流体中成矿元素发生卸载并沉淀成矿。因

而,本文中绿泥石的形成温度至少可以代表金矿床成矿温度的下限。从八卦庙金矿床中各个成矿阶段流体的围岩蚀变可以看出,绿泥石化与金矿化密切相关,其成分特征不仅可以反映成矿流体的特征,指示成矿的环境和物理化学条件,也可作为一种重要的找矿标志,对加强矿床成矿机制和矿床成因的认识及下一步找矿勘探工作均具有重要的理论和现实意义。

6 结 论

(1) 八卦庙矿床中 4 种类型的绿泥石,主要为富铁种属的蠕绿泥石(铁绿泥石),少部分为铁镁绿泥石和密绿泥石,指示其形成于偏还原环境。

(2) 4 种类型绿泥石的化学成分主要受泥质围岩原岩控制,且受镁铁质流体的影响,经历了多期次的变质作用。

(3) 该矿床主成矿阶段的绿泥石形成温度为 198~255℃。与金矿化关系密切的绿泥石化在成矿Ⅱ阶段和成矿Ⅲ阶段含金石英脉及其蚀变围岩中发育。

(4) 4 类绿泥石均形成于相对还原环境,八卦庙金矿床金沉淀富集的有利形成环境为近中性环境。

致谢: 在本文成文过程中,中国地质大学(北京)孙军刚、王小雨硕士提供了热心的帮助,在此表示衷心感谢。

参考文献

- [1] Deer W A, Howie R A, Jussman J. Rock-forming minerals: Sheet silicates[M]. London: Longman, 1962: 1-270.
- [2] Xie X G, Byerly G R, Ferrel R E. Ilb trioctahedral chlorite from the Barberton greenstone belt: Crystal structure and rock composition constraints with implications to geothermometry[J]. Contribution to Mineralogy and Petrology, 1997, 126(3): 275-291.
- [3] Cathelineau M, Nieva D. A chlorite solid solution geothermometer the Los Azufres (Mexico) geothermal system [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1985, 91(3): 235-244.
- [4] 葛祥坤, 句海玉, 赵峰华, 等. 内蒙古上打井斑岩型铜矿床绿泥石特征及成矿意义[J]. 地质与勘探, 2020, 56(4): 704-713.
- [5] 戴佳良. 江西大湖塘石门寺钨铜矿床绿泥石矿物学特征与矿床成因[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2019.
- [6] 何光辉, 周涛发, 范裕, 等. 庐江沙溪斑岩型铜金矿床绿泥石的地球化学特征及找矿指示[J]. 矿床地质, 2018, 37(6): 1247-1259.
- [7] 刘萌, 王智琳, 许德如, 等. 湖南井冲钨铜多金属矿床绿泥石、黄铁矿和黄铜矿的矿物学特征及其成矿指示意义[J]. 大地构造与成矿学, 2018, 42(5): 862-879.
- [8] Kranidiotis P, MacLean W H. Systematics of chlorite alteration at the Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec [J]. Economic

- Geology, 1987, 82(7): 1898–1991.
- [9] Bryndzia L T, Scott S D. The composition of chlorite as a function of sulfur and oxygen fugacity; An experimental study [J]. American Journal of Science, 1987, 287(1): 50–76.
- [10] Cathelineau M. Cation site occupancy in chlorites and illites as a function of temperature [J]. Clay Minerals, 1988, 23(4): 471–485.
- [11] Bevens R E, Robinson D, Rowbotham G. Compositional variations in mafic phyllosilicates from regional low-grade metabasites and application of the chlorite geothermometer [J]. Journal of Metamorphic Geology, 1991, 9(6): 711–721.
- [12] 肖志峰, 欧阳自远, 卢焕章, 等. 海南抱板金矿田围岩蚀变带中绿泥石的特征及其意义 [J]. 矿物学报, 1993, 13(4): 319–324.
- [13] 华仁民, 李晓峰, 张开平, 等. 金山金矿热液蚀变黏土矿物特征及水-岩反应环境研究 [J]. 矿物学报, 2003, 23(1): 23–30.
- [14] 赵明, 陈小明, 季峻峰, 等. 济阳拗陷古近系原型盆地中绿泥石的成分演化特征及其盆地地温梯度 [J]. 中国科学(D 辑), 2007, 37(9): 1141–1149.
- [15] 张展适, 华仁民, 季峻峰, 等. 201 和 361 铀矿床中绿泥石的特征及其形成环境研究 [J]. 矿物学报, 2007, 27(2): 161–172.
- [16] 章卫星, 冯为华, 张宝松. 江西邹家山铀矿绿泥石形成温度及其成矿关系 [J]. 资源调查与环境, 2007, 28(4): 293–297.
- [17] 郭国林, 刘晓东, 潘家永, 等. 302 铀矿床绿泥石特征及其与铀成矿的关系 [J]. 铀矿地质, 2012, 28(1): 35–41.
- [18] 廖震, 刘玉平, 李朝阳, 等. 都龙锡锌矿床绿泥石特征及其成矿意义 [J]. 矿床地质, 2010, 29(1): 169–176.
- [19] 梁婉娟, 杜泽忠, 甄世军, 等. 甘肃白银厂矿床绿泥石特征及其成矿意义 [J]. 矿物学报, 2013, 33(增刊): 464–465.
- [20] 王小雨, 毛景文, 程彦博, 等. 粤东新寮铜多金属矿床绿泥石特征及其地质意义 [J]. 岩石矿物学杂志, 2014, 33(5): 885–905.
- [21] 孙军刚, 李洪英, 刘晓煌, 等. 山西铜矿峪铜矿床绿泥石特征及其地质意义 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(6): 1142–1154.
- [22] 郑作平, 陈繁荣, 于学元. 八卦庙金矿床的绿泥石特征及成岩成矿意义 [J]. 矿物学报, 1997, 17(1): 100–106.
- [23] 王瑞廷, 韩俊民, 毛景文, 等. 八卦庙超大型金矿床的铂族元素地球化学特征 [J]. 矿床地质, 2006, 25(增): 103–106.
- [24] 陈衍景, 张静, 张复新, 等. 西秦岭地区卡林-类卡林型金矿床及其成矿时间、构造背景和模式 [J]. 地质论评, 2004, 50(2): 134–152.
- [25] 朱赖民, 张国伟, 李森, 等. 马鞍桥金矿床中香沟岩体锆石 U-Pb 定年、地球化学及其与成矿关系研究 [J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2009, 39(6): 700–720.
- [26] 王相, 唐荣杨, 李实, 等. 秦岭造山与金属成矿 [M]. 冶金工业出版社, 1996, 187–230.
- [27] 王瑞廷, 王涛, 高章鉴, 等. 凤太多金属矿集区主要金属矿床成矿系列与找矿方向 [J]. 西北地质, 2007, 40(2): 77–84.
- [28] 胡乔青, 王义天, 王瑞廷, 等. 西秦岭凤太矿集区八方山-二里河铅锌(铜)矿床成矿地质特征与矿床成因探讨 [J]. 地质与勘探, 2013, 49(1): 99–112.
- [29] 刘协鲁, 王义天, 胡乔青, 等. 陕西省凤太矿集区柴蚂金矿床碳酸盐矿物的 Sm-Nd 同位素测年及意义 [J]. 岩石学报, 2014, 30(1): 271–280.
- [30] 郑巧荣. 由电子探针分析值计算 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} [J]. 矿物学报, 1983, (1): 55–62.
- [31] Foster M D. Interpretation of the composition and a classification of the chlorites, US Geology Survey Professional Paper, 414A, Washington [M]. DC: US Government Printing Office, 1962: 1–33.
- [32] Hillier S. Oring, diagenesis, and mineralogy of chlorite minerals in Devonian lacustrine mudrocks, Orcadian basin, Scotland [J]. Clays and Clay Minerals, 1993, 41(2): 240–259.
- [33] Zang W, Fyfe W S. Chloritization of the hydrothermally altered bedrock at the Igarapé Bahia gold deposit, Carajás, Brazil [J]. Mineralium deposita, 1995, 30(1): 30–38.
- [34] Shirozu H. Developments in sedimentology (Chlorite minerals) [M]. New York: Elsevier, 1978: 243–246.
- [35] Martínez-Serrano R G, Dubois M. Chemical variations in chlorite at the Los Hornos geothermal system, Mexico [J]. Clays and Clay Minerals, 1998, 46(6): 615–628.
- [36] Laird J. Chlorites: Metamorphic petrology [J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 1988, 19(1): 405–453.
- [37] Battaglia S. Applying X-ray geothermometer diffraction to a chlorite [J]. Clays and Clay Minerals, 1999, 47(1): 54–63.
- [38] Hey M H. A new review of the chlorites [J]. Mineralogical Magazine, 1954, 30: 277–292.
- [39] Jowett E C. Fitting iron and magnesium into the hydrothermal chlorite geothermometer [C]//GAC/MAC/SEG Joint Annual Meeting – Program with Abstracts, 1991, 16: A62.
- [40] 张娟. 陕西凤太矿集区八卦庙超大型金矿床成矿过程与成矿机制研究 [D]. 中国地质科学院博士学位论文, 2016.
- [41] Cavaretta G, Gianelli G, Puxeddu M. Formation of authigenic minerals and their use as indicators of the physicochemical parameters of the fluid in the Larderello – Trarele geothermal field [J]. Economic Geology, 1982, 77(5): 1071–1084.
- [42] Inoue A. Formation of clay minerals in hydrothermal environments [C]//Velde B. Origin and mineralogy of clays: Clays and the Environment [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 1995: 268–329.
- [43] 刘英俊, 曹励明. 元素地球化学导论 [M]. 北京: 地质出版社, 1987: 124–128.
- [44] 杨献忠, 杨祝良, 陶奎元, 等. 含油玄武岩中绿泥石的形成温度 [J]. 矿物学报, 2002, 22(4): 365–370.
- [45] 李亮. 河北省安妥岭辉钼矿黑云母、绿泥石特征研究 [D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2011.
- [46] Mao J W, Qiu Y M, Goldfarb R J, et al. Geology, distribution, and classification of gold deposits in the western Qinling belt, central China [J]. Mineralium Deposita, 2002, 37(1): 353–377.
- [47] 张作衡. 西秦岭地区造山型金矿成矿作用和成矿过程 [D]. 中国地质科学院博士学位论文, 2002.
- [48] 王义天, 李霞, 王瑞廷, 等. 陕西凤太矿集区丝毛岭金矿床成矿时代的 Ar-Ar 年龄证据 [J]. 地球科学与环境学报, 2014, 36(3): 61–72.
- [49] 朱永峰. 克拉通和古生代造山带中的韧性剪切带型金矿床: 成矿条件与成矿环境分析 [J]. 矿床地质, 2004, 23(4): 509–519.
- [50] 陈柏林, 杨农, 吴淦国, 等. 甘肃北山南带韧性剪切带型金矿床构造矿解析 [J]. 矿床地质, 2002, 21(2): 149–158.
- [51] 陈绍聪. 西秦岭凤太矿集区中生代构造变形与构造控矿研究 [D]. 中国地质科学院硕士学位论文, 2015.