

粤东新寮崇铜多金属矿床绿泥石特征及其地质意义

王小雨¹, 毛景文², 程彦博², 张兴康¹, 刘鹏¹, 刘石华³, 方思傑¹

(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, 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 3. 广东省地质局第二地质大队, 广东 汕头 515021)

摘要: 新寮崇铜多金属矿是近年来在粤东地区新发现的一个铜矿床, 在该矿区绿泥石化十分强烈, 并与铜矿化关系密切。按照矿物共生组合关系, 矿区绿泥石可分为与硫化物共(伴)生及未与硫化物共(伴)生呈单独产出两类, 两类绿泥石主要呈叶片状、纤维状、蠕虫集合体状等形态产出。本文在岩矿鉴定的基础上, 以矿区绿泥石为研究对象, 利用电子探针技术, 对其微区化学成分进行了研究。结果表明: 随着孔深的增加, 与矿化有关绿泥石的 Si 和 Mg 元素含量逐渐升高, Al、Fe、Mn 元素含量逐渐降低, 而与矿化无关的绿泥石成分变化规律不明显。两类绿泥石主要为富铁种属的蠕绿泥石、铁镁绿泥石; 绿泥石为泥质岩或者铁镁质岩受热液交代蚀变的产物, 绿泥石结构的离子置换主要体现为 Fe 对 Mg 的置换, 反映其可能形成于富铁及相对酸性环境; 由绿泥石地质温度计估算得出两类绿泥石形成温度为 166.32~245.62℃, 平均为 219.15℃, 且与硫化物共(伴)生的绿泥石的形成温度相对较高, 但两者均属中-低温范围。绿泥石的形成机制主要表现为溶蚀-结晶和溶蚀-迁移-沉淀结晶 2 种。

关键词: 绿泥石; 电子探针; 地质意义; 新寮崇铜多金属矿床; 粤东

中图分类号: P578.962; P618.41

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)05-0885-21

Characteristics of chlorite from the Xinliaodong Cu polymetallic deposit in eastern Guangdong Province and their geological significance

WANG Xiao-yu¹, MAO Jing-wen², CHENG Yan-bo², ZHANG Xing-kang¹, LIU Peng¹,
LIU Shi-hua³ and FANG Si-jie¹

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. MRL Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. No. 2 Geological Party, Guangdong Bureau of Geology, Shantou 515021, China)

Abstract: The Xinliaodong Cu polymetallic deposit is a newly-discovered copper ore deposit in eastern Guangdong Province. Chlorite is one of the main hydrothermal alteration minerals genetically related to copper mineralization in this ore district. According to the mineral intergrowth association, the chlorites of Xinliaodong Cu polymetallic ore district can be classified into two types: the chlorite which coexists with sulfide and the chlorite which occurs individually. Both chlorites exhibit foliate, fibrous or vermicular aggregation forms. By means of microscopic and electron microprobe analysis, the authors investigated chemical composition and texture of the chlorite and concluded that chlorites in the Xinliaodong Cu polymetallic deposit have the following characteristics: ① with the increasing altitude, the Si and Mg components of the chlorite related to mineralization increase gradually, the Al, Fe and Mn components gradually decrease, but the regularity is not apparent for the chlorite which had nothing to do with mineralization; ② the two types of chlorite are mainly Fe-rich chlorites composed

收稿日期: 2014-02-10; 修订日期: 2014-08-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41302055); 北京市优秀博士学位论文奖励项目(519002650744)

作者简介: 王小雨(1989-), 男, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: xiaoyuwang_cdut@163.com。

of prochlorite and brunsvigite; ③ they were formed by hydrothermal alteration of pelitic or mafic rocks, and the phenomenon that Fe-Mg substitution dominates the octahedral substitution suggests that their formation had to do with the iron-rich and relatively acid environment; ④ according to the chlorite geothermometer, the two types of chlorites were formed at temperatures of 166.32~245.62°C (averagely 219.15°C) and the chlorite coexistent with sulfide had a relatively higher formation temperatures, but both of them were in the range of low-moderate temperature; ⑤ the main formation mechanisms of the two types of chlorites were dissolution-crystallization and dissolution-migration-crystallization.

Key words: chlorite; electron microprobe; geological significance; Xinliadong Cu polymetallic deposit; eastern Guangdong Province

绿泥石在自然界广泛分布,通常是热液蚀变作用和低级变质作用的产物,并与铜、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(郑伟等,2013)。由于绿泥石结构以及成分上的复杂性,历来众多学者都十分重视绿泥石化学成分与结构、形成的物理化学条件、与其共生的矿物组合及形成绿泥石的原岩成分等方面的研究,如 Cathelineau 等(1985)在研究 Los Azufres 和 Salton Sea 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;肖志峰等(1993)运用绿泥石地质温度计计算了海南抱板金矿田围岩蚀变带中绿泥石的形成温度和氧逸度;郑作平等(1997)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(温度、氧逸度、硫逸度);艾永富等(1998)认为绿泥石含铁度($Fe/(Fe+Mg+Mn+Ca)$)可以用来标志矿床的不同金属组合;梁婉娟等(2013)通过对甘肃白银厂矿床绿泥石的研究,认为绿泥石的形成可以作为成矿物质发生沉淀的一种标志;华仁民等(2003)利用绿泥石地质温度计研究了金山金矿热液蚀变黏土矿物的特征、热液蚀变机制及水-岩反应环境;赵明等(2007)运用绿泥石地质温度计探讨了济阳拗陷古近系原型盆地的热历史。迄今绿泥石地质温度计在地热体系、矿床学研究和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。

新寮崇铜多金属矿床围岩蚀变类型多样,主要有硅化、绢云母化、绿泥石化、碳酸盐化等,其中以硅化和绿泥石化最为普遍,且与成矿关系密切。一般来讲,绿泥石化强的部位矿化亦较强。由于新寮崇铜多金属矿是近年来新发现的一个矿床,因此该矿床的研究程度相对较低,目前未见有任何研究及报道。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,对新寮崇铜多金属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,并初步探讨了绿泥石与成矿的关系。

1 地质背景

华南地区是我国重要的有色、稀有和贵金属矿产资源产地,是我国乃至全球高密度成矿区(毛景文等,2008),目前研究程度相对较高(毛景文等,1999,2004,2009;张旗等,2009;程彦博等,2009,2010;杨明桂等,2009;华仁民等,2010;舒良树,2012)。粤东地区位于华南东南部,为我国东南沿海锡、钨、铜、铅锌矿产的重要产地,沿着莲花山深大断裂带发育有大量的锡、钨、铜、银、金多金属矿床(点),构成了莲花山锡多金属成矿带(图1)。粤东地区出露的地层比较简单,主要为上三叠统小坪组和下侏罗统金鸡组砂页岩及第四系沉积物。区内岩浆活动强烈,侵入岩多为燕山期花岗岩闪长岩、花岗岩和喜马拉雅期基性橄榄岩、玄武岩,喷出岩主要为晚侏罗世火山熔岩、次火山岩,其中尤以中生代岩浆活动最为频繁。徐晓春等(1994)将其称之为 I-S 过渡型花岗岩质火山-侵入杂岩。区内断裂构造发育,主要由北东向海丰-丰顺断裂、普宁-潮州断裂及惠来-饶平断裂构成莲花山深大断裂带的主体,其次还有一些次级断裂,这些断裂系统控制着粤东地区岩浆活动及其矿床(点)的空间分布。

新寮崇铜多金属矿区位于揭阳市揭东县与梅州市市丰顺县交界处,大地构造位置位于南岭东西向构造岩浆带和中国东南沿海火山岩带的交汇部位(徐晓春等,1999),整体上属华南褶皱系,区域上位于粤东隆起区西缘北东向新华夏系莲花山断裂挤压带的南东侧(图1)。矿区出露地层比较简单(图2),主要

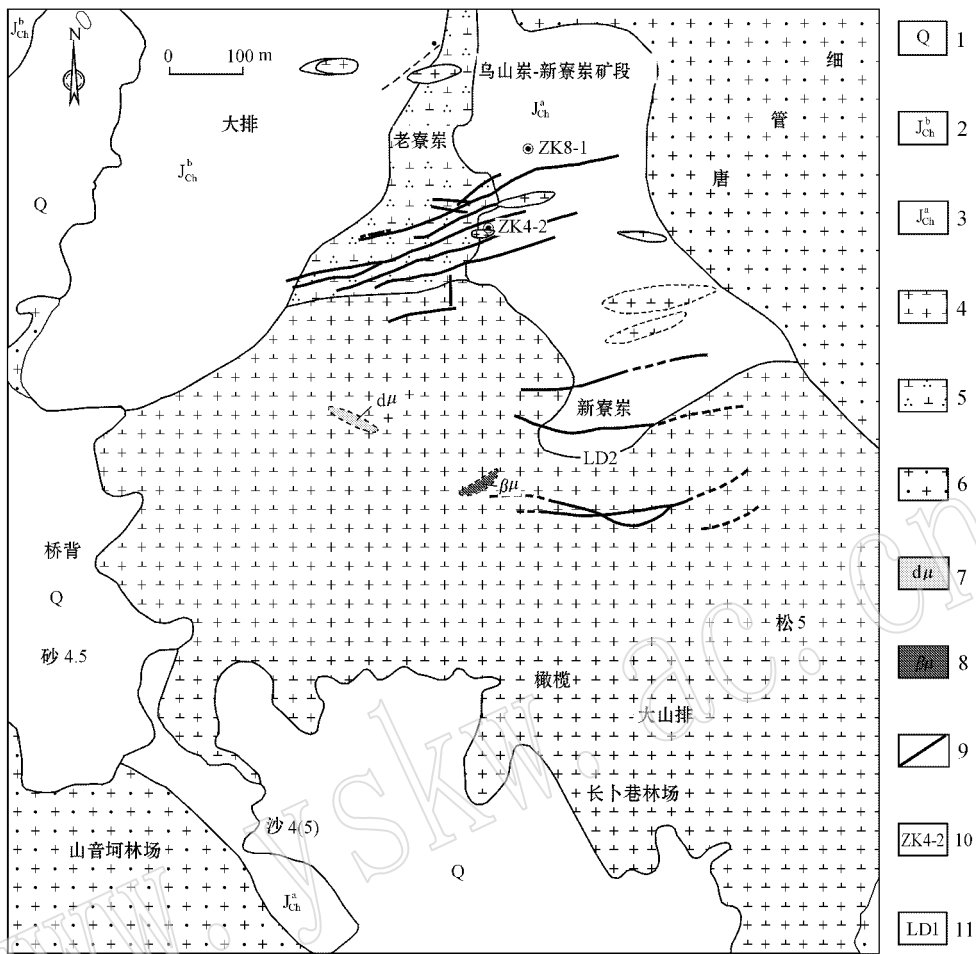


图 2 新寮崇铜多金属矿区地质简图(据广东省地质局第二地质大队, 2012^① 修编)

Fig. 2 Simplified geological map of the Xinliaodong Cu polymetallic ore district (modified after No. 2 Geological Party, Guangdong Bureau of Geology, 2012^①)

1—第四系沉积物; 2—下侏罗统长埔组上段泥质砂岩、粉砂质泥岩夹长石石英砂岩; 3—下侏罗统长埔组下段粉砂岩、泥质粉砂岩夹长石石英砂岩、粉砂质页岩; 4—燕山五期花岗闪长斑岩; 5—燕山四期石英闪长岩; 6—燕山三期黑云母花岗岩; 7—时代不明的英安玢岩; 8—时代不明的辉绿岩; 9—断裂; 10—钻孔及其编号; 11—老窿

1—Quaternary; 2—upper member of Lower Jurassic Changpu Formation: shaly sandstone, silty mudstone and feldspathic quartz sandstone; 3—lower member of Lower Jurassic Changpu Formation: siltstone, muddy siltstone, feldspathic quartz sandstone and silty shale; 4—the fifth stage Yanshanian granodiorite porphyry; 5—the fourth stage Yanshanian quartz diorite; 6—the third stage Yanshanian biotite granite; 7—dacite porphyrite of unknown age; 8—diabase of unknown age; 9—fault; 10—drill hole and its serial number; 11—old gallery

针片,在详细的镜下观察鉴定的基础上,按照钻孔深度及其矿物共生组合由浅至深选取绿泥石化比较典型的样品,对每个样品选择若干分散的绿泥石颗粒进行电子探针分析(38个样品共分析了105个绿泥石颗粒)。绿泥石化成分分析在中国地质科学院矿产资源研究所电子探针室完成,测试仪器为JEOL-JXA-8230型电子探针,加速电压为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%。

3 绿泥石矿物学特征

根据绿泥石与黄铜矿、黄铁矿等硫化物的共(伴)生关系,本次研究将矿床中的绿泥石分为两类,

① 广东省地质局第二地质大队. 2012. 广东省揭东县新寮崇铜多金属矿详查中间性地质报告(内部资料).

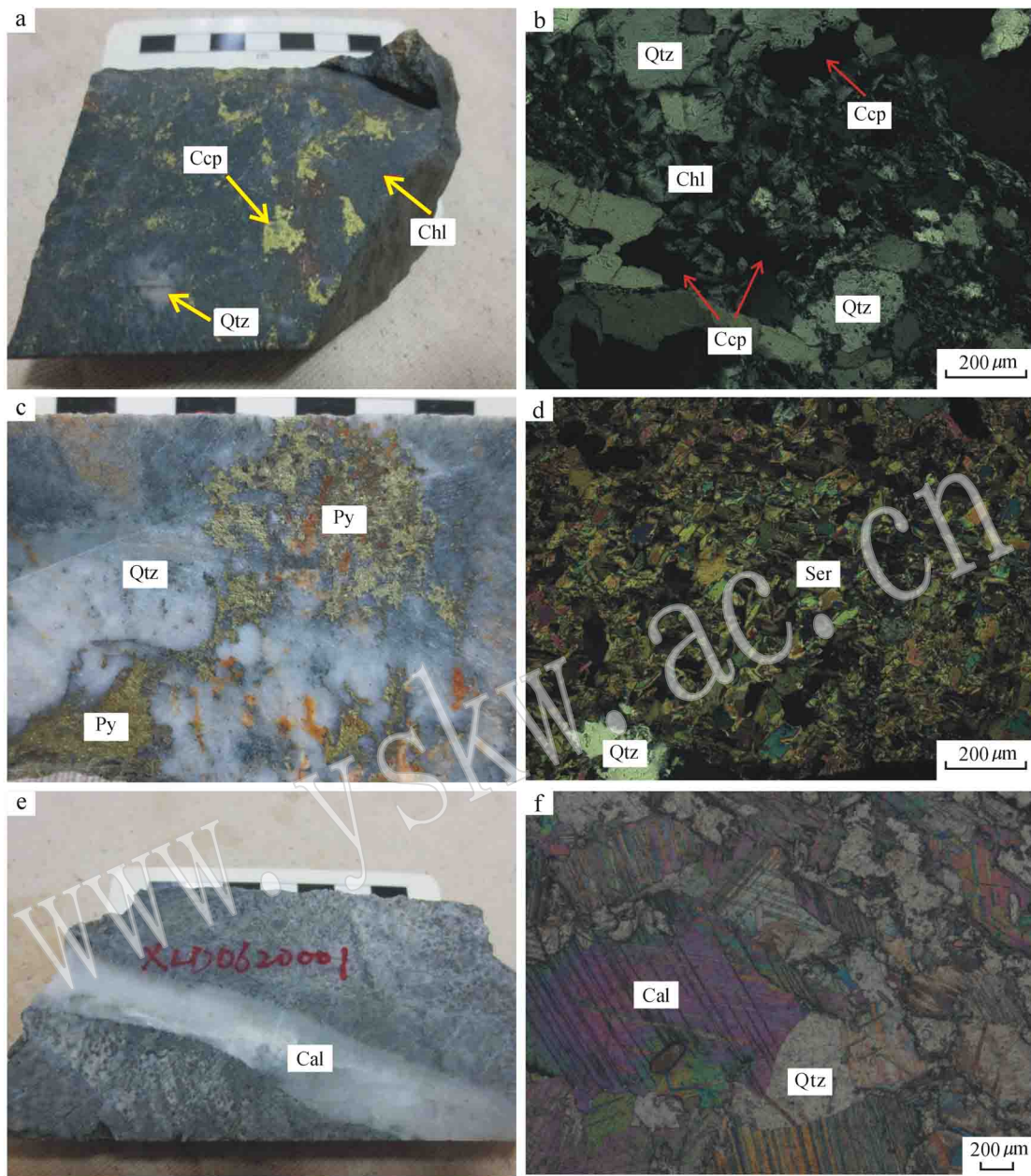


图 3 新寮崇铜多金属矿床主要围岩蚀变类型、特征

Fig. 3 Photographs showing types and characteristics of wall rock alteration in the Xinliaodong Cu polymetallic deposit
 a—绿泥石化, 绿泥石与黄铜矿密切共生; b—绿泥石与黄铜矿共生呈浸染状产出(正交偏光); c—硅化, 黄铁矿呈浸染状产于石英中; d—绢云母化, 绢云母呈鳞片状产出(正交偏光); e—碳酸盐化, 方解石脉; f—方解石沿矿物颗粒间裂隙充填(正交偏光); Chl—绿泥石; Ccp—黄铜矿; Qtz—石英; Py—黄铁矿; Ser—绢云母; Cal—方解石

a—chloritization, mineral association of chlorite and chalcopyrite; b—disseminated chlorite which coexists with chalcopyrite(crossed nicols); c—silicification, pyrite in the quartz assuming disseminated forms; d—sericitization, sericite assuming scaly forms(crossed nicols); e—carbonation, calcite vein; f—calcite filling along the fissure(crossed nicols); Chl—chlorite; Ccp—chalcopyrite; Qtz—quartz; Py—pyrite; Ser—sericite; Cal—calcite

两类绿泥石单偏光下均为浅灰绿色至浅黄绿色(图 4b、4e), 正交偏光下显示一级灰干涉色, 个别颗粒显靛蓝异常干涉色; 其中第 1 类绿泥石与矿化无关, 呈单独产出, 未见与黄铜矿、黄铁矿和毒砂等硫化物共

(伴)生, 本文简称 I 型绿泥石(对应 ZK4-2 和 ZK8-1 中分别记为 I -2、I -1), 此类绿泥石手标本上呈浅绿色, 常沿岩石裂隙呈脉状充填(图 4a)或包裹着石英颗粒呈筛状构造(图 4b), 有时可见呈假像交代结构

的绿泥石(图 4c),该类绿泥石主要呈蠕虫集合体状(图 4h)、细小的鳞片集合体状(图 4i)或交代长石、黑云母等矿物后保留原矿物晶形呈假像交代结构的团块状(图 4c);第 2 类绿泥石与黄铜矿、黄铁矿等硫化物共(伴)生,与成矿关系较密切,本文简称 II 型绿泥

石(对应 ZK4-2 和 ZK8-1 中分别记为 II-2、II-1),该类绿泥石手标本上整体呈墨绿色,主要呈浸染状与黄铜矿、黄铁矿、毒砂等硫化物共(伴)生(图 4d);该类绿泥石主要呈细小的放射状、菊花状(图 4f)或叶片状(图 4g)产出。

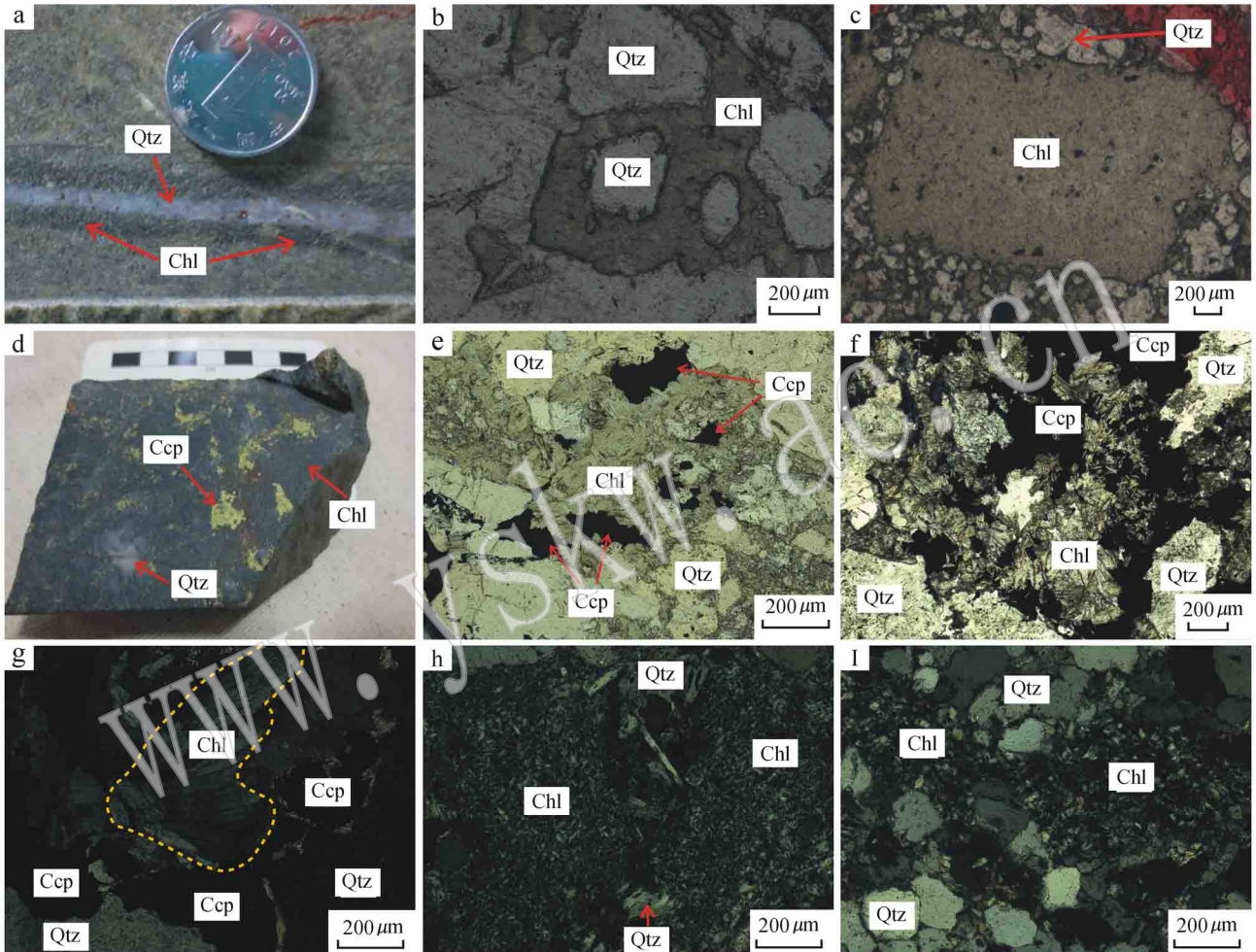


图 4 新寮崇铜多金属矿床典型绿泥样品手标本及显微镜下照片

Fig. 4 Hand specimens and microscopic photographs of typical chlorites from the Xinliaodong Cu polymetallic deposit

a—脉状绿泥石,绿泥石呈脉状产于石英脉两侧;b—绿泥石环绕着石英呈筛状构造(单偏光);c—团块状绿泥石,绿泥石交代长石呈假像交代结构(单偏光);d—绿泥石与黄铜矿呈浸染状密切共生;e—浅灰绿色绿泥石,绿泥石与黄铜矿共生(单偏光);f—菊花状绿泥石,绿泥石与硫化物共生(单偏光);g—叶片状绿泥石,与黄铜矿共生(正交偏光);h—绿泥石呈蠕虫集合体状,正交偏光下一级灰干涉色(正交偏光);i—绿泥石呈鳞片状产于石英颗粒间(正交偏光);Chl—绿泥石;Ccp—黄铜矿;Qtz—石英

a—chlorite vein, chlorite distributed on both sides of the quartz vein; b—chlorite surrounding quartz assuming sieve structure (plainlight); c—crumby chlorite, feldspar replaced by chlorite assuming pseudomorphism metasomatic texture (plainlight); d—disseminated copper mineralization, chlorite coexistent with chalcopyrite; e—light gray-green chlorite, chlorite coexistent with chalcopyrite (plainlight); f—chrysanthemum shaped chlorite, chlorite coexistent with sulfide (plainlight); g—foliate chlorite, chlorite coexistent with chalcopyrite (crossed nicols); h—chlorite showing the appearance of vermicular aggregation, chlorite showing gray interference color (crossed nicols); i—chlorite produced in the quartz particles assuming scale-like shape (crossed nicols); Chl—chlorite; Ccp—chalcopyrite; Qtz—quartz

4 绿泥石化学成分特征

绿泥石电子探针分析结果见表 1 绿泥石特征值和相关参数采用郑巧荣(1983)电价差值法计算得出

(表 2)。由于绿泥石颗粒细小,加上其结构复杂,尤其是绿泥石中其他矿物的微细包裹体、衬里、混层结构以及矿物之间的复杂共生关系,导致在利用电子探针分析绿泥石成分时产生误差,因此在分析绿泥石测试数据之前需先剔除因混染而产生误差的测

表 1 绿泥石化学成分电子探针分析结果

$w_B/\%$

Table 1 Electronic microprobe analyses of chlorites

类型	样品编号	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	P ₂ O ₅	FeO	TiO ₂	V ₂ O ₃	NiO	MnO	Cr ₂ O ₃	Total	高程/m
	XLD0609021-1-1	0.00	9.09	21.22	24.76	0.00	0.01	0.00	31.61	0.01	0.00	0.00	0.29	0.00	86.99	194.00
	XLD0609021-2-1	0.00	8.18	21.21	25.60	0.01	0.02	0.01	33.70	0.07	0.06	0.00	0.25	0.13	89.24	194.00
	XLD0609021-2-2	0.00	8.05	20.33	24.53	0.00	0.02	0.01	34.48	0.02	0.04	0.03	0.28	0.09	87.88	194.00
	XLD0609021-2-3	0.00	9.42	22.03	25.80	0.00	0.00	0.00	34.05	0.10	0.03	0.02	0.32	0.10	91.87	194.00
	XLD0610019-3-1	0.00	5.43	21.29	23.90	0.00	0.01	0.02	36.00	0.14	0.01	0.05	0.48	0.23	87.56	124.30
	XLD0610023-1-1*	0.14	4.92	20.89	27.94	0.38	0.29	0.00	32.74	0.04	0.00	0.17	0.30	0.40	88.21	117.50
	XLD0610024-1-1	0.01	6.05	21.63	23.82	0.02	0.02	0.00	37.42	0.00	0.04	0.00	0.51	0.21	89.73	115.10
	XLD0610024-2-1	0.00	6.36	21.48	23.59	0.00	0.03	0.01	37.25	0.03	0.01	0.00	0.58	0.19	89.53	115.10
	XLD0610024-3-1	0.02	5.95	22.15	24.00	0.01	0.02	0.00	37.88	0.04	0.00	0.00	0.58	0.41	91.06	115.10
	XLD0610025-1-1	0.06	7.25	21.80	22.84	0.00	0.03	0.01	34.22	0.10	0.00	0.00	0.55	0.24	87.10	112.00
	XLD0610030-1-1	0.01	6.22	21.63	22.84	0.01	0.00	0.01	34.54	0.18	0.00	0.02	0.45	0.23	86.14	99.00
	XLD0610030-1-2	0.04	5.84	18.36	24.66	0.20	0.00	0.00	35.80	0.21	0.01	0.00	0.41	0.18	85.71	99.00
	XLD0610030-2-1	0.03	6.81	20.65	24.34	0.00	0.00	0.01	35.52	0.15	0.00	0.00	0.43	0.01	87.95	99.00
	XLD0610030-3-1	0.02	6.44	20.96	22.85	0.01	0.01	0.00	35.69	0.08	0.04	0.00	0.47	0.11	86.68	99.00
	XLD0630002-1-1	0.00	6.28	21.58	23.47	0.00	0.01	0.02	36.37	0.02	0.00	0.00	0.44	0.10	88.29	83.50
ZK4-2 I-2型	XLD0630002-2-1	0.01	6.17	22.29	23.34	0.00	0.00	0.00	37.05	0.21	0.02	0.00	0.45	0.21	89.75	83.50
	XLD0630002-3-1	0.03	6.01	22.31	23.02	0.01	0.00	0.00	35.70	0.04	0.03	0.00	0.40	0.14	87.69	83.50
	XLD0630002-3-2	0.02	6.15	21.65	23.06	0.00	0.03	0.00	36.67	0.00	0.00	0.00	0.43	0.20	88.21	83.50
	XLD0611003-1-1	0.03	9.24	20.45	27.47	0.34	0.02	0.01	30.64	0.85	0.07	0.01	0.44	0.14	89.71	54.00
	XLD0611003-2-1	0.05	9.45	19.98	25.77	0.10	0.06	0.02	30.40	0.10	0.01	0.00	0.45	0.23	86.62	54.00
	XLD0611003-3-1	0.00	8.33	21.03	27.49	0.24	0.03	0.00	31.26	0.29	0.04	0.00	0.47	0.19	89.37	54.00
	XLD0611006-1-1	0.01	8.23	22.21	23.63	0.07	0.01	0.00	32.26	0.03	0.01	0.00	0.51	0.18	87.15	45.50
	XLD0611006-4-1	0.00	7.89	21.63	23.34	0.02	0.01	0.00	32.20	0.07	0.04	0.00	0.45	0.16	85.81	45.50
	XLD0611006-4-2	0.04	7.81	21.67	24.09	0.24	0.04	0.01	32.06	0.13	0.00	0.00	0.50	0.21	86.80	45.50
	XLD0611006-5-1	0.01	8.71	22.63	23.94	0.01	0.00	0.00	31.83	0.13	0.00	0.01	0.48	0.08	87.83	45.50
	XLD0611013-1-1	0.00	13.70	19.99	25.72	0.02	0.01	0.00	26.09	0.07	0.00	0.02	0.56	0.14	86.32	19.00
	XLD0611013-2-1	0.02	12.55	19.60	27.42	0.22	0.05	0.03	25.03	0.04	0.04	0.00	0.33	0.21	85.54	19.00
	XLD0611013-3-1	0.02	13.42	19.62	27.09	0.16	0.05	0.03	26.24	0.10	0.03	0.02	0.48	0.24	87.50	19.00
	XLD0611024-2-1	0.04	8.36	21.02	24.24	0.05	0.05	0.00	33.07	0.10	0.00	0.00	0.23	0.19	87.35	-26.60
	XLD0611024-3-1	0.00	8.46	20.46	24.04	0.00	0.00	0.00	33.48	0.16	0.00	0.00	0.18	0.06	86.84	-26.60
	XLD0612003-1-1*	0.04	11.24	21.44	31.45	1.35	0.04	0.00	22.81	0.03	0.04	0.00	0.37	0.21	89.02	-51.00
	XLD0612003-2-1*	0.00	10.84	21.69	31.60	1.62	0.05	0.02	22.22	0.36	0.01	0.00	0.29	0.07	88.77	-51.00
	XLD0612003-3-1	0.02	12.25	19.67	25.89	0.02	0.04	0.01	27.09	0.11	0.00	0.00	0.40	0.07	85.57	-51.00
	XLD0609008-1-1	0.03	6.26	22.34	22.93	0.01	0.00	0.03	38.15	0.00	0.05	0.03	0.50	0.09	90.42	174.00
	XLD0609008-2-1	0.00	5.46	22.98	22.03	0.00	0.00	0.00	36.97	0.05	0.00	0.00	0.54	0.12	88.15	174.00
	XLD0609008-2-2	0.00	5.64	23.30	22.54	0.02	0.00	0.00	36.77	0.00	0.00	0.05	0.54	0.29	89.15	174.00
	XLD0609008-3-1	0.02	6.47	23.56	23.30	0.00	0.01	0.00	35.93	0.00	0.01	0.07	.49	0.27	90.13	174.00
ZK4-2 II-2型	XLD0610019-1-1	0.04	5.50	21.57	23.17	0.01	0.02	0.00	37.20	0.11	0.10	0.00	0.48	0.19	88.39	124.30
	XLD0610019-2-1	0.00	5.77	22.99	23.42	0.01	0.03	0.00	37.55	0.05	0.00	0.01	0.56	0.32	90.71	124.30
	XLD0610019-4-1	0.07	5.78	21.25	23.57	0.01	0.00	0.00	37.93	0.08	0.02	0.01	0.51	0.21	89.44	124.30
	XLD0610023-3-1	0.08	5.25	22.18	26.74	0.29	0.05	0.00	34.72	0.08	0.06	0.00	0.37	0.14	89.96	117.50
	XLD0610023-2-1	0.08	6.29	21.02	24.16	0.04	0.05	0.01	37.11	0.00	0.03	0.01	0.49	0.28	89.57	117.50
	XLD0610025-3-1	0.00	3.87	20.70	23.03	0.01	0.00	0.00	37.75	0.18	0.00	0.00	0.59	0.04	86.17	112.00
	XLD0610025-2-1	0.00	6.10	21.07	23.13	0.01	0.01	0.00	36.14	0.14	0.02	0.05	0.60	0.29	87.56	112.00

续表 1-1

Continued Table 1-1

类型	样品编号	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	P ₂ O ₅	FeO	TiO ₂	V ₂ O ₃	NiO	MnO	Cr ₂ O ₃	Total	高程/m
	XLD0610033-1-1	0.01	5.92	22.12	22.26	0.00	0.00	0.00	35.08	0.12	0.00	0.00	0.39	0.08	85.98	87.90
	XLD0610033-2-1	0.03	6.10	21.40	23.19	0.02	0.00	0.00	35.47	0.00	0.03	0.05	0.42	0.11	86.82	87.90
	XLD0610033-3-1	0.01	5.74	21.88	22.29	0.00	0.22	0.00	35.50	0.03	0.02	0.00	0.40	0.34	86.43	87.90
	XLD0610033-4-1	0.01	6.05	20.97	23.17	0.00	0.00	0.00	35.77	0.05	0.00	0.00	0.40	0.04	86.46	87.90
	XLD0610037-1-1	0.04	6.50	21.66	23.68	0.01	0.00	0.01	36.78	0.13	0.00	0.01	0.39	0.12	89.33	79.00
	XLD0610037-1-2	0.03	6.26	22.26	23.13	0.00	0.01	0.00	35.74	0.17	0.06	0.00	0.40	0.11	88.17	79.00
	XLD0610037-3-1	0.03	6.32	21.51	23.71	0.00	0.02	0.00	36.17	0.09	0.02	0.00	0.40	0.15	88.42	79.00
	XLD0610037-3-2	0.03	6.25	22.79	22.62	0.00	0.00	0.00	35.08	0.04	0.03	0.01	0.43	0.07	87.35	79.00
ZK4-2 II-2 型	XLD0610037-2-1	0.05	5.72	22.68	22.67	0.01	0.03	0.00	35.86	0.10	0.08	0.00	0.42	0.20	87.82	79.00
	XLD0630005-1-1	0.03	8.48	20.11	25.07	0.07	0.00	0.00	34.61	0.11	0.06	0.04	0.42	0.19	89.19	74.70
	XLD0630005-3-1	0.03	8.30	20.32	23.97	0.01	0.00	0.00	34.49	0.13	0.00	0.00	0.39	0.07	87.71	74.70
	XLD0630005-2-1	0.02	7.84	20.61	24.67	0.01	0.00	0.00	35.08	0.08	0.07	0.00	0.44	0.06	88.88	74.70
	XLD0610038-1-1	0.03	6.11	20.84	23.45	0.00	0.02	0.00	37.19	0.24	0.00	0.03	0.41	0.13	88.45	69.00
	XLD0610038-2-1	0.00	5.58	22.43	22.26	0.01	0.01	0.00	36.30	0.14	0.00	0.00	0.34	0.13	87.20	69.00
	XLD0610038-3-1	0.00	6.28	22.11	23.80	0.02	0.00	0.00	37.48	0.08	0.02	0.00	0.40	0.10	90.29	69.00
	XLD0610038-4-1	0.00	6.57	20.61	24.21	0.00	0.00	0.00	36.76	0.06	0.01	0.00	0.38	0.07	88.67	69.00
	XLD0611024-1-1	0.01	8.75	20.15	24.78	0.00	0.03	0.00	33.11	0.08	0.02	0.00	0.16	0.19	87.28	-26.60
	XLD0612023-1-1	0.01	3.79	19.13	24.65	0.00	0.02	0.03	39.51	0.00	0.01	0.00	0.21	0.05	87.41	-136.00
	XLD0612023-1-2	0.00	3.78	19.26	25.07	0.00	0.03	0.02	41.34	0.06	0.00	0.00	0.16	0.14	89.86	-136.00
	XLD0613021-1-1	0.08	12.92	20.77	25.32	0.03	0.10	0.00	27.07	0.06	0.06	0.00	0.52	0.49	87.41	122.22
	XLD0613021-1-2	0.01	11.91	20.11	27.64	0.02	0.04	0.02	28.40	0.03	0.05	0.00	0.44	0.20	88.88	122.22
	XLD0613021-2-1	0.14	13.42	19.88	27.17	0.04	0.03	0.02	27.12	0.04	0.02	0.02	0.50	0.19	88.59	122.22
	XLD0613021-2-2	0.02	12.62	19.93	25.70	0.00	0.02	0.01	28.09	0.09	2.07	0.00	0.59	0.13	87.27	122.22
	XLD0613026-1-1	0.06	10.51	19.30	26.09	0.01	0.06	0.03	30.38	0.15	0.00	0.01	0.50	0.40	87.49	97.22
	XLD0613026-2-1	0.04	15.05	18.85	26.76	0.00	0.05	0.02	24.60	0.16	0.05	0.02	0.79	0.18	86.58	97.22
	XLD0613026-2-2	0.02	13.54	19.80	29.06	0.01	0.10	0.00	24.93	0.07	0.11	0.01	0.56	0.20	88.41	97.22
	XLD0613027-1-1	0.00	13.42	22.00	24.99	0.02	0.01	0.00	25.55	0.09	0.09	0.00	0.40	0.04	86.60	96.22
	XLD0613027-2-1	0.04	14.46	19.81	28.80	0.00	0.05	0.03	25.38	0.12	0.01	0.02	0.30	0.20	89.20	96.22
	XLD0613027-3-1	0.00	13.27	22.33	26.14	0.01	0.00	0.00	26.23	0.09	0.11	0.03	0.33	0.22	88.76	96.22
	XLD0613028-1-1	0.01	11.67	25.29	24.48	0.00	0.01	0.00	28.62	0.15	0.01	0.00	0.29	0.23	90.75	92.22
	XLD0613028-2-1*	0.59	12.35	22.41	25.84	0.32	0.08	0.00	27.65	0.04	0.03	0.02	0.30	0.15	89.77	92.00
	XLD0613028-3-1	0.18	11.46	23.76	25.53	0.10	0.02	0.00	26.65	0.04	0.10	0.00	0.27	0.20	88.31	92.22
	XLD0613030-1-1	0.01	15.40	20.46	27.48	0.02	0.02	0.00	24.64	0.17	0.17	0.04	0.28	0.14	88.81	82.22
	XLD0613030-2-1	0.00	14.77	18.77	27.31	0.02	0.02	0.00	24.73	0.08	0.08	0.00	0.30	0.34	86.41	82.22
ZK8-1 I-1 型	XLD0613031-1-1	0.03	11.85	21.77	23.09	0.01	0.03	0.00	27.25	0.09	0.00	0.00	0.30	0.27	84.67	77.22
	XLD0613031-2-1	0.04	11.58	21.91	24.03	0.01	0.01	0.01	28.23	0.03	0.03	0.00	0.26	0.15	86.29	77.22
	XLD0613032-1-1	0.00	13.59	21.96	27.03	0.01	0.01	0.00	26.81	0.02	0.05	0.00	0.26	0.17	89.92	72.22
	XLD0613032-1-2	0.03	13.17	20.75	25.82	0.05	0.00	0.01	26.52	0.08	0.03	0.00	0.28	0.21	86.95	72.22
	XLD0613032-1-3	0.03	13.96	19.86	26.38	0.00	0.05	0.03	6.58	0.04	0.03	0.02	0.30	0.38	87.66	72.22
	XLD0613036-1-1	0.00	10.56	20.70	25.62	0.03	0.01	0.01	31.28	0.10	0.03	0.00	0.33	0.15	88.83	52.22
	XLD0613036-1-2	0.00	10.07	21.04	24.98	0.03	0.08	0.00	30.43	0.10	0.01	0.03	0.32	0.13	87.23	52.22
	XLD0614011-1-1	0.00	13.13	23.35	24.31	0.00	0.09	0.00	28.20	0.01	0.07	0.00	0.42	0.33	89.91	-27.78
	XLD0614011-2-1	0.01	12.59	20.81	24.90	0.00	0.00	0.00	28.10	0.03	0.01	0.01	0.38	0.13	86.99	-27.78
	XLD0614011-3-1	0.00	13.05	20.08	24.15	0.00	0.04	0.00	27.66	0.01	0.15	0.00	0.40	0.14	85.67	-27.78
	XLD0614015-1-1	0.02	10.74	18.58	24.91	0.00	0.02	0.02	32.63	0.01	0.00	0.02	0.28	0.41	87.63	-47.78
	XLD0614015-2-1	0.16	10.81	19.91	25.35	0.04	0.04	0.00	32.43	0.01	0.00	0.00	0.27	0.19	89.21	-47.78
	XLD0614017-1-1	0.00	12.41	21.34	24.36	0.00	0.08	0.00	29.96	0.10	0.11	0.02	0.15	0.26	88.79	-57.78
	XLD0614017-2-1	0.01	12.42	18.50	26.34	0.01	0.03	0.03	29.06	0.06	0.00	0.00	0.10	0.08	86.62	-57.78
	XLD0614017-3-1	0.00	12.46	19.81	25.58	0.00	0.04	0.02	29.57	0.07	0.07	0.02	0.16	0.34	88.15	-57.78
	XLD0614024-1-1	0.01	13.94	19.61	26.58	0.06	0.03	0.05	28.51	0.04	0.13	0.08	0.28	0.20	89.51	-87.78
	XLD0614024-1-2	0.01	13.54	19.30	26.06	0.02	0.01	0.01	28.05	0.01	0.10	0.05	0.28	0.18	87.60	-87.78

续表 1-2

Continued Table 1-2

类型	样品编号	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	P ₂ O ₅	FeO	TiO ₂	V ₂ O ₃	NiO	MnO	Cr ₂ O ₃	Total	高程/m
	XLD0613022-1-1	0.04	7.16	20.76	25.39	0.01	0.03	0.02	34.28	0.00	0.00	0.00	0.43	0.27	88.38	117.22
	XLD0613022-1-2	0.04	6.55	20.34	25.36	0.02	0.03	0.00	32.97	0.01	0.01	0.00	0.45	0.27	86.04	117.22
	XLD0613035-1-1	0.01	8.12	26.06	23.68	0.00	0.01	0.00	33.91	0.11	0.00	0.00	0.56	0.20	92.65	57.22
	XLD0613035-1-2	0.09	8.83	22.53	24.88	0.03	0.04	0.03	32.93	0.10	0.02	0.02	0.62	0.43	90.54	57.22
ZK8-1	XLD0613035-1-3	0.02	8.73	21.47	25.64	0.02	0.00	0.01	33.85	0.13	0.00	0.07	0.60	0.15	90.69	57.22
II-1 型	XLD0613038-1-1	0.05	6.85	23.57	22.87	0.01	0.00	0.03	35.17	0.03	0.05	0.00	0.38	0.11	89.12	42.22
	XLD0613038-1-2	0.02	7.74	20.93	23.24	0.00	0.00	0.00	34.97	0.09	0.00	0.01	0.36	0.07	87.42	42.22
	XLD0613042-1-1*	0.04	7.26	19.86	24.91	0.54	0.02	0.00	33.77	0.11	0.00	0.03	0.32	0.27	87.13	22.00
	XLD0613042-1-2*	0.00	7.34	19.88	24.98	0.63	0.01	0.00	32.51	0.21	0.02	0.06	0.35	0.18	86.16	22.00
	XLD0613042-1-3	0.08	7.44	22.09	26.67	0.17	0.02	0.00	31.09	0.06	0.03	0.00	0.39	0.10	88.13	22.00

注: * 为绿泥石成分存在混染需要剔除的异常测点, 0.00 为低于检测限, 分析误差小于 0.01%, FeO 为 FeT, 分析者 陈振宇、陈小丹。

点。本文采用 Foster(1962)提出的以质量分数 $(Na_2O + K_2O + CaO) < 0.5\%$ 作为标准来判断测点数据是否符合要求, 如果 $(Na_2O + K_2O + CaO) > 0.5\%$, 则表明绿泥石成分存在混染, 需要剔除。据此, ZK4-2 中 XLD0610023-1-1、XLD0612003-1-1、XLD0612003-2-1 及 ZK8-1 中 XLD0613028-2-1、XLD0613042-1-1、XLD0613042-1-2 共 6 个测点不合要求, 分别予以剔除。尽管 Fe^{2+} 不能通过电子探针分析直接获得, 但大量的研究表明绿泥石中 Fe^{3+} 含量一般小于全铁含量的 5% (Deer *et al.*, 1962; Shirozu, 1978), 本文近似地用表 2 中的全铁来代表 Fe^{2+} 含量。

表 3 为 ZK4-2 和 ZK8-1 中两类绿泥石主要成分含量的平均值及范围, 由表 3 可知, ZK4-2 绿泥石化学成分具有如下特点: 与成矿无关呈单独产出的 I-2 型绿泥石: SiO_2 为 22.84% ~ 27.49%, 平均值为 24.55%; Al_2O_3 为 18.36% ~ 22.63%, 平均值为 21.08%; FeO 为 25.03% ~ 37.88%, 平均值为 33.19%; MgO 为 5.43% ~ 13.70%, 平均值为 8.14%; MnO 为 0.18% ~ 0.58%, 平均值为 0.43%。与成矿关系密切的 II-2 型绿泥石: SiO_2 为 22.03% ~ 26.74%, 平均值为 23.56%; Al_2O_3 为 19.13% ~ 23.56%, 平均值为 21.53%; FeO 为 33.11% ~ 41.34%, 平均值为 36.45%; MgO 为 3.78% ~ 8.75%, 平均值为 6.09%; MnO 为 0.16% ~ 0.60%, 平均值为 0.42%。两种类型绿泥石中铁、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相互置换比较普遍, 并且与成矿有关的 II-2 型绿泥石较与成矿无关呈单独产出的 I-2 型绿泥石相对富铁贫镁; 两种类型绿泥石 SiO_2 、 Al_2O_3 、

MnO 含量差别不明显。

ZK8-1 绿泥石化学成分具有如下特点: 与成矿无关呈单独产出的 I-1 型绿泥石: SiO_2 为 23.09% ~ 29.06%, 平均值为 25.87%; Al_2O_3 为 18.50% ~ 25.29%, 平均值为 20.66%; FeO 为 24.60% ~ 32.63%, 平均值为 27.86%; MgO 为 10.07% ~ 15.40%, 平均值为 12.72%; MnO 为 0.10% ~ 0.79%, 平均值为 0.35%。与成矿关系密切的 II-1 型绿泥石: SiO_2 为 22.87% ~ 26.67%, 平均值为 24.72%; Al_2O_3 为 20.34% ~ 26.06%, 平均值为 22.22%; FeO 为 31.03% ~ 34.97%, 平均值为 33.65%; MgO 为 6.55% ~ 8.83%, 平均值为 7.68%; MnO 为 0.36% ~ 0.62%, 平均值为 0.47%。同样, 与成矿有关的 II-1 型绿泥石较单独产出的 I-1 型绿泥石相对富铁贫镁, 而两者 SiO_2 、 Al_2O_3 、 MnO 含量差别不明显。

通过野外详细的钻孔编录发现, 从矿化部位开始, 随着孔深的增加, 绿泥石化强度有逐渐减弱的趋势, 在绿泥石 SiO_2 、 Al_2O_3 、 FeO 、 MgO 、 MnO 与产出高程 H 的关系图解中(图 5), 随着 H 的降低, 绿泥石化程度减弱, 与硫化物共(伴)生的 II 型绿泥石 SiO_2 和 MgO 含量有逐渐增加的趋势, Al_2O_3 、 FeO 和 MnO 含量有逐渐降低的趋势, 而呈单独产出的 I 型绿泥石, 其主要成分与高程 H 的关系不太明显, 测点在图上分布较分散, 说明与成矿关系密切的 II 型强绿泥石化具有相对低 Si、Mg, 高 Al、Fe、Mn 的特点, 此外, 绿泥石 SiO_2 含量逐渐降低, 可能与绿泥石化阶段流体中存在 F 有关 (Cerny and Povondra, 1972; Sadoon *et al.*, 2009)。胡受奚等(2004)认为, 流体中只有存在 F 离子才能打断硅酸盐中的 O—Si—O

表 2 绿泥石结构式和特征值计算(以 14 个氧原子为基准)
Table 2 Estimation of structural formulae and characteristic values of chlorites(based on 14 oxygen atoms)

类型	样品编号	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	P	Fe	Ti	V	Ni	Mn	Cr	Al ^{IV}	Al ^{VI}	Fe/(Fe+Mg+Ca)	Al/(Al+Mg+Fe)	Mg/(Fe+Mg)	Fe/(Fe+Mg)	t ₄₀₀₁	d ₄₀₀₁ (0.1 nm)
	XLD0609021-1-1	0.00	1.49	2.75	2.72	0.00	0.00	0.00	2.91	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	1.28	1.47	0.66	0.38	0.34	0.66	205.94	14.133
	XLD0609021-2-1	0.00	1.32	2.70	2.76	0.00	0.00	0.00	3.04	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	1.24	1.46	0.70	0.38	0.30	0.70	203.93	14.135
	XLD0609021-2-2	0.00	1.33	2.66	2.72	0.00	0.00	0.00	3.20	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	1.28	1.37	0.71	0.37	0.29	0.71	212.24	14.127
	XLD0609021-2-3	0.00	1.47	2.72	2.70	0.00	0.00	0.00	2.98	0.01	0.00	0.00	0.03	0.01	1.30	1.42	0.67	0.38	0.33	0.67	209.87	14.129
	XLD0610019-3-1	0.00	0.91	2.82	2.68	0.00	0.00	0.00	3.38	0.01	0.00	0.00	0.05	0.02	1.32	1.50	0.79	0.40	0.21	0.79	219.94	14.119
	XLD0610024-1-1	0.00	1.00	2.81	2.63	0.00	0.00	0.00	3.45	0.00	0.00	0.00	0.05	0.02	1.37	1.44	0.78	0.39	0.22	0.78	227.94	14.111
	XLD0610024-2-1	0.00	1.05	2.80	2.61	0.00	0.00	0.00	3.44	0.00	0.00	0.00	0.05	0.02	1.39	1.41	0.77	0.38	0.23	0.77	230.01	14.109
	XLD0610024-3-1	0.00	0.96	2.84	2.61	0.00	0.00	0.00	3.44	0.00	0.00	0.00	0.05	0.03	1.39	1.45	0.78	0.39	0.22	0.78	229.92	14.109
	XLD0610025-1-1	0.01	1.21	2.89	2.57	0.00	0.00	0.00	3.21	0.01	0.00	0.00	0.05	0.02	1.43	1.45	0.73	0.39	0.27	0.73	230.31	14.109
	XLD0610030-1-1	0.00	1.05	2.90	2.60	0.00	0.00	0.00	3.29	0.02	0.00	0.00	0.04	0.02	1.40	1.50	0.76	0.40	0.24	0.76	227.97	14.111
	XLD0610030-1-2	0.01	1.00	2.49	2.84	0.03	0.00	0.00	3.45	0.02	0.00	0.00	0.04	0.02	1.16	1.34	0.77	0.36	0.23	0.77	203.09	14.136
	XLD0610030-2-1	0.01	1.13	2.71	2.71	0.00	0.00	0.00	3.31	0.01	0.00	0.00	0.04	0.01	1.29	1.42	0.75	0.38	0.25	0.75	215.42	14.124
	XLD0610030-3-1	0.00	1.09	2.81	2.60	0.00	0.00	0.00	3.40	0.01	0.00	0.00	0.05	0.01	1.40	1.42	0.76	0.39	0.24	0.76	229.73	14.109
	XLD0630002-1-1	0.00	1.05	2.84	2.62	0.00	0.00	0.00	3.39	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01	1.38	1.46	0.76	0.39	0.24	0.76	227.74	14.111
ZK4-2	XLD0630002-2-1	0.00	1.01	2.89	2.57	0.00	0.00	0.00	3.41	0.02	0.00	0.00	0.04	0.02	1.43	1.46	0.77	0.40	0.23	0.77	233.92	14.105
I-2 型	XLD0630002-3-1	0.01	1.00	2.95	2.58	0.00	0.00	0.00	3.35	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01	1.42	1.53	0.77	0.40	0.23	0.77	231.31	14.108
	XLD0630002-3-2	0.00	1.03	2.86	2.59	0.00	0.00	0.00	3.44	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	1.41	1.45	0.77	0.39	0.23	0.77	232.53	14.106
	XLD0611003-1-1	0.01	1.45	2.54	2.90	0.05	0.00	0.00	2.70	0.07	0.01	0.00	0.04	0.01	1.10	1.44	0.65	0.38	0.35	0.65	181.59	14.157
	XLD0611003-2-1	0.01	1.55	2.59	2.83	0.01	0.01	0.00	2.79	0.01	0.00	0.00	0.04	0.02	1.17	1.42	0.64	0.37	0.36	0.64	191.08	14.148
	XLD0611003-3-1	0.00	1.32	2.63	2.92	0.03	0.00	0.00	2.77	0.02	0.00	0.00	0.04	0.02	1.08	1.54	0.68	0.39	0.32	0.68	181.00	14.158
	XLD0611006-1-1	0.00	1.36	2.90	2.61	0.01	0.00	0.00	2.98	0.00	0.00	0.00	0.05	0.02	1.39	1.51	0.69	0.40	0.31	0.69	219.98	14.119
	XLD0611006-4-1	0.00	1.32	2.87	2.63	0.00	0.00	0.00	3.03	0.01	0.00	0.00	0.04	0.01	1.37	1.50	0.70	0.40	0.30	0.70	219.44	14.120
	XLD0611006-4-2	0.01	1.29	2.84	2.68	0.03	0.00	0.00	2.98	0.01	0.00	0.00	0.05	0.02	1.32	1.51	0.70	0.40	0.30	0.70	212.81	14.126
	XLD0611006-5-1	0.00	1.42	2.91	2.61	0.00	0.00	0.00	2.91	0.01	0.00	0.00	0.04	0.01	1.39	1.53	0.67	0.40	0.33	0.67	218.52	14.120
	XLD0611013-1-1	0.00	2.20	2.54	2.77	0.00	0.00	0.00	2.35	0.01	0.00	0.00	0.05	0.01	1.23	1.31	0.52	0.36	0.48	0.52	188.95	14.150
	XLD0611013-2-1	0.00	2.01	2.49	2.95	0.03	0.01	0.00	2.25	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	1.05	1.44	0.53	0.37	0.47	0.53	166.32	14.173
	XLD0611013-3-1	0.00	2.12	2.45	2.87	0.02	0.01	0.00	2.33	0.01	0.00	0.00	0.04	0.02	1.13	1.33	0.52	0.36	0.48	0.52	176.86	14.162
	XLD0611024-2-1	0.01	1.38	2.74	2.68	0.01	0.01	0.00	3.06	0.01	0.00	0.00	0.02	0.02	1.32	1.43	0.69	0.38	0.31	0.69	213.57	14.125
	XLD0611024-3-1	0.00	1.41	2.69	2.69	0.00	0.00	0.00	3.13	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	1.31	1.38	0.69	0.37	0.31	0.69	214.71	14.124
	XLD0612003-3-1	0.00	1.99	2.53	2.83	0.00	0.00	0.00	2.48	0.01	0.00	0.00	0.04	0.01	1.17	1.36	0.55	0.36	0.45	0.55	185.08	14.154
	XLD0609008-1-1	0.01	1.03	2.90	2.52	0.00	0.00	0.00	3.51	0.00	0.00	0.00	0.05	0.01	1.48	1.42	0.77	0.39	0.23	0.77	241.25	14.098
	XLD0609008-2-1	0.00	0.92	3.05	2.48	0.00	0.00	0.00	3.48	0.00	0.00	0.00	0.05	0.01	1.52	1.53	0.79	0.41	0.21	0.79	245.62	14.093
ZK4-2	XLD0609008-2-2	0.00	0.93	3.05	2.50	0.00	0.00	0.00	3.41	0.00	0.00	0.00	0.05	0.02	1.50	1.54	0.79	0.41	0.21	0.79	241.96	14.097
II-2 型	XLD0609008-3-1	0.01	1.05	3.02	2.53	0.00	0.00	0.00	3.27	0.00	0.00	0.01	0.05	0.02	1.47	1.55	0.76	0.41	0.24	0.76	235.05	14.104
	XLD0610019-1-1	0.01	0.92	2.85	2.60	0.00	0.00	0.00	3.49	0.01	0.01	0.00	0.05	0.02	1.40	1.45	0.79	0.39	0.21	0.79	231.87	14.107
	XLD0610019-2-1	0.00	0.94	2.95	2.55	0.00	0.00	0.00	3.42	0.00	0.00	0.00	0.05	0.03	1.45	1.51	0.78	0.40	0.22	0.78	236.05	14.103
	XLD0610019-4-1	0.02	0.96	2.78	2.62	0.00	0.00	0.00	3.53	0.01	0.00	0.00	0.05	0.02	1.38	1.40	0.79	0.38	0.21	0.79	230.31	14.109

续表 2-1
Continue Table 2-1

类型	样品编号	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	P	Fe	Ti	V	Ni	Mn	Cr	Al ^{IV}	Al ^{VI}	Fe/(Fe+Mg+Ca)	Al/(Al+Mg+Fe)	Mg/(Fe+Mg)	Fe/(Fe+Mg)	t ₉₀₀₁	d ₀₀₁ (0.1 nm)
	XLD0610023-3-1	0.02	0.84	2.80	2.87	0.04	0.01	0.00	3.11	0.01	0.00	0.00	0.03	0.01	1.13	1.67	0.79	0.41	0.21	0.79	193.39	14.146
	XLD0610023-2-1	0.02	1.03	2.73	2.67	0.01	0.01	0.00	3.43	0.00	0.00	0.00	0.05	0.02	1.33	1.40	0.77	0.38	0.23	0.77	222.87	14.116
	XLD0610025-3-1	0.00	0.67	2.83	2.67	0.00	0.00	0.00	3.66	0.02	0.00	0.00	0.06	0.00	1.33	1.50	0.85	0.40	0.15	0.85	227.38	14.112
	XLD0610025-2-1	0.00	1.03	2.80	2.61	0.00	0.00	0.00	3.41	0.01	0.00	0.00	0.06	0.03	1.39	1.42	0.77	0.39	0.23	0.77	228.93	14.110
	XLD0610033-1-1	0.00	1.01	2.98	2.55	0.00	0.00	0.00	3.36	0.01	0.00	0.00	0.04	0.01	1.45	1.53	0.77	0.41	0.23	0.77	235.35	14.104
	XLD0610033-2-1	0.01	1.03	2.86	2.63	0.00	0.00	0.00	3.36	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01	1.37	1.48	0.77	0.39	0.23	0.77	226.12	14.113
	XLD0610033-3-1	0.00	0.98	2.95	2.55	0.00	0.03	0.00	3.39	0.00	0.00	0.00	0.04	0.03	1.45	1.49	0.77	0.40	0.22	0.78	236.11	14.103
	XLD0610033-4-1	0.00	1.03	2.82	2.64	0.00	0.00	0.00	3.41	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	1.36	1.46	0.77	0.39	0.23	0.77	225.52	14.113
	XLD0610037-1-1	0.01	1.07	2.82	2.61	0.00	0.00	0.00	3.39	0.01	0.00	0.00	0.04	0.01	1.39	1.43	0.76	0.39	0.24	0.76	228.37	14.111
	XLD0610037-1-2	0.01	1.04	2.92	2.58	0.00	0.00	0.00	3.33	0.01	0.01	0.00	0.04	0.01	1.42	1.50	0.76	0.40	0.24	0.76	231.27	14.108
ZK4-2	XLD0610037-3-1	0.01	1.05	2.82	2.64	0.00	0.00	0.00	3.37	0.01	0.00	0.00	0.04	0.01	1.36	1.46	0.76	0.39	0.24	0.76	225.01	14.114
II-2型	XLD0610037-3-2	0.01	1.05	3.01	2.54	0.00	0.00	0.00	3.29	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01	1.46	1.55	0.76	0.41	0.24	0.76	234.97	14.104
	XLD0610037-2-1	0.01	0.96	3.00	2.54	0.00	0.00	0.00	3.36	0.01	0.01	0.00	0.04	0.02	1.46	1.54	0.78	0.41	0.22	0.78	236.00	14.103
	XLD0630005-1-1	0.01	1.38	2.59	2.74	0.01	0.00	0.00	3.16	0.01	0.01	0.00	0.04	0.02	1.26	1.33	0.70	0.36	0.30	0.70	209.35	14.130
	XLD0630005-3-1	0.01	1.38	2.67	2.67	0.00	0.00	0.00	3.21	0.01	0.00	0.00	0.04	0.01	1.33	1.34	0.70	0.37	0.30	0.70	218.29	14.121
	XLD0630005-2-1	0.00	1.28	2.67	2.71	0.00	0.00	0.00	3.22	0.01	0.01	0.00	0.04	0.00	1.29	1.38	0.72	0.37	0.28	0.72	213.84	14.125
	XLD0610038-1-1	0.01	1.02	2.75	2.63	0.00	0.00	0.00	3.49	0.02	0.00	0.00	0.04	0.01	1.37	1.38	0.77	0.38	0.23	0.77	228.47	14.111
	XLD0610038-2-1	0.00	0.94	3.00	2.52	0.00	0.00	0.00	3.44	0.01	0.00	0.00	0.03	0.01	1.48	1.52	0.78	0.41	0.22	0.78	239.83	14.099
	XLD0610038-3-1	0.00	1.02	2.85	2.60	0.00	0.00	0.00	3.43	0.01	0.00	0.00	0.04	0.01	1.40	1.45	0.77	0.39	0.23	0.77	230.28	14.109
	XLD0610038-4-1	0.00	1.09	2.70	2.69	0.00	0.00	0.00	3.42	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01	1.31	1.39	0.76	0.37	0.24	0.76	219.82	14.119
	XLD0611024-1-1	0.00	1.44	2.63	2.74	0.00	0.00	0.00	3.07	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	1.26	1.37	0.68	0.37	0.32	0.68	206.81	14.132
	XLD0612023-1-1	0.00	0.65	2.58	2.82	0.00	0.00	0.00	3.79	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	1.18	1.41	0.85	0.37	0.15	0.85	211.84	14.127
	XLD0612023-1-2	0.00	0.63	2.55	2.81	0.00	0.00	0.00	3.88	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	1.19	1.36	0.86	0.36	0.14	0.86	215.27	14.124
	XLD0613021-1-1	0.02	2.06	2.62	2.71	0.00	0.01	0.00	2.43	0.00	0.01	0.00	0.05	0.04	1.29	1.34	0.54	0.37	0.46	0.54	197.37	14.142
	XLD0613021-1-2	0.00	1.87	2.49	2.91	0.00	0.00	0.00	2.50	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	1.09	1.40	0.57	0.36	0.43	0.57	176.62	14.162
	XLD0613021-2-1	0.03	2.10	2.46	2.86	0.01	0.00	0.00	2.38	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	1.14	1.32	0.53	0.35	0.47	0.53	180.02	14.159
	XLD0613021-2-2	0.00	2.03	2.53	2.77	0.00	0.00	0.00	2.53	0.01	0.01	0.00	0.05	0.01	1.23	1.30	0.55	0.36	0.44	0.56	192.90	14.146
	XLD0613026-1-1	0.01	1.71	2.47	2.84	0.00	0.01	0.00	2.76	0.01	0.00	0.00	0.05	0.03	1.16	1.31	0.62	0.36	0.38	0.62	189.79	14.149
	XLD0613026-2-1	0.01	2.40	2.37	2.86	0.00	0.01	0.00	2.20	0.01	0.00	0.00	0.07	0.02	1.14	1.23	0.48	0.34	0.52	0.48	176.34	14.163
ZK8-1	XLD0613026-2-2	0.00	2.09	2.42	3.01	0.00	0.01	0.00	2.16	0.01	0.01	0.00	0.05	0.02	0.99	1.42	0.51	0.36	0.49	0.51	157.92	14.181
I-1型	XLD0613027-1-1	0.00	2.14	2.77	2.67	0.00	0.00	0.00	2.29	0.01	0.01	0.00	0.04	0.00	1.33	1.45	0.52	0.39	0.48	0.52	199.20	14.140
	XLD0613027-2-1	0.01	2.21	2.40	2.96	0.00	0.00	0.00	2.18	0.01	0.00	0.00	0.03	0.02	1.04	1.36	0.50	0.35	0.50	0.50	164.06	14.175
	XLD0613027-3-1	0.00	2.06	2.74	2.72	0.00	0.00	0.00	2.29	0.01	0.01	0.00	0.03	0.02	1.28	1.47	0.53	0.39	0.47	0.53	193.29	14.146
	XLD0613028-1-1	0.00	1.79	3.07	2.52	0.00	0.00	0.00	2.47	0.01	0.00	0.00	0.03	0.02	1.48	1.60	0.58	0.42	0.42	0.58	220.07	14.119
	XLD0613028-3-1	0.04	1.79	2.94	2.68	0.01	0.00	0.00	2.34	0.00	0.01	0.00	0.02	0.02	1.32	1.62	0.57	0.42	0.43	0.57	199.48	14.140
	XLD0613030-1-1	0.00	2.37	2.49	2.84	0.00	0.00	0.00	2.13	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	1.16	1.33	0.47	0.36	0.53	0.47	177.07	14.162
	XLD0613030-2-1	0.00	2.35	2.36	2.91	0.00	0.00	0.00	2.20	0.01	0.01	0.00	0.03	0.03	1.09	1.27	0.48	0.34	0.52	0.48	170.29	14.169

续表 2-2
Continue Table 2-2

类型	样品编号	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	P	Fe	Ti	V	Ni	Mn	Cr	Al ^{IV}	Al ^{VI}	Fe/(Fe+ Mg+Ca)	Al/(Al+ Mg+Fe)	Mg/(Fe+ Mg)	Fe/(Fe+ Mg)	t ₈₀₀₁	d ₀₀₁ (0.1 nm)
	XLD0613031-1-1	0.01	1.96	2.85	2.57	0.00	0.00	0.00	2.53	0.01	0.00	0.00	0.02	0.02	1.43	1.42	0.56	0.39	0.44	0.56	216.36	14.123
	XLD0613031-2-1	0.01	1.89	2.82	2.62	0.00	0.00	0.00	2.58	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	1.38	1.44	0.58	0.39	0.42	0.58	210.80	14.128
	XLD0613032-1-1	0.00	2.08	2.66	2.78	0.00	0.00	0.00	2.31	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	1.22	1.44	0.53	0.38	0.47	0.53	187.72	14.152
	XLD0613032-1-2	0.01	2.10	2.62	2.76	0.01	0.00	0.00	2.37	0.01	0.00	0.00	0.03	0.02	1.24	1.38	0.53	0.37	0.47	0.53	190.72	14.148
	XLD0613032-1-3	0.01	2.21	2.49	2.80	0.00	0.01	0.00	2.36	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	1.20	1.29	0.52	0.35	0.48	0.52	186.04	14.153
	XLD0613036-1-1	0.00	1.69	2.62	2.75	0.00	0.00	0.00	2.81	0.01	0.00	0.00	0.03	0.01	1.25	1.37	0.62	0.37	0.38	0.62	200.81	14.138
	XLD0613036-1-2	0.00	1.64	2.71	2.73	0.00	0.01	0.00	2.78	0.01	0.00	0.00	0.03	0.01	1.27	1.43	0.63	0.38	0.37	0.63	203.04	14.136
	XLD0614011-1-1	0.00	2.05	2.88	2.54	0.00	0.01	0.00	2.46	0.00	0.01	0.00	0.04	0.03	1.46	1.41	0.55	0.39	0.45	0.55	218.20	14.121
ZK8-1	XLD0614011-2-1	0.00	2.03	2.65	2.69	0.00	0.00	0.00	2.54	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	1.31	1.35	0.56	0.37	0.44	0.56	202.04	14.137
I-1 型	XLD0614011-3-1	0.00	2.14	2.61	2.66	0.00	0.00	0.00	2.55	0.00	0.01	0.00	0.04	0.01	1.34	1.27	0.54	0.36	0.46	0.54	206.03	14.133
	XLD0614015-1-1	0.00	1.77	2.42	2.75	0.00	0.00	0.00	3.01	0.00	0.00	0.00	0.03	0.04	1.25	1.17	0.63	0.34	0.37	0.63	204.83	14.134
	XLD0614015-2-1	0.03	1.74	2.53	2.73	0.01	0.00	0.00	2.92	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	1.27	1.26	0.63	0.35	0.37	0.63	205.03	14.134
	XLD0614017-1-1	0.00	1.98	2.69	2.61	0.00	0.01	0.00	2.68	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02	1.39	1.30	0.57	0.37	0.42	0.58	214.83	14.124
	XLD0614017-2-1	0.00	2.02	2.37	2.87	0.00	0.00	0.00	2.65	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	1.13	1.24	0.57	0.34	0.43	0.57	183.98	14.155
	XLD0614017-3-1	0.00	2.00	2.51	2.75	0.00	0.00	0.00	2.66	0.01	0.01	0.00	0.01	0.03	1.25	1.26	0.57	0.35	0.43	0.57	197.99	14.141
	XLD0614024-1-1	0.00	2.18	2.43	2.79	0.01	0.00	0.00	2.50	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	1.21	1.21	0.53	0.34	0.47	0.53	190.12	14.149
	XLD0614024-1-2	0.00	2.16	2.44	2.79	0.00	0.00	0.00	2.52	0.00	0.01	0.00	0.03	0.02	1.21	1.23	0.54	0.34	0.46	0.54	189.80	14.149
	XLD0613022-1-1	0.01	1.17	2.68	2.79	0.00	0.00	0.00	3.15	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	1.21	1.47	0.73	0.38	0.27	0.73	203.49	14.136
	XLD0613022-1-2	0.01	1.10	2.69	2.84	0.00	0.00	0.00	3.09	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	1.16	1.53	0.74	0.39	0.26	0.74	195.69	14.143
	XLD0613035-1-1	0.00	1.26	3.19	2.46	0.00	0.00	0.00	2.95	0.01	0.00	0.00	0.05	0.02	1.54	1.65	0.70	0.43	0.30	0.70	237.17	14.102
ZK8-1	XLD0613035-1-2	0.02	1.40	2.82	2.64	0.00	0.00	0.00	2.93	0.01	0.00	0.00	0.06	0.04	1.36	1.47	0.68	0.39	0.32	0.68	215.40	14.124
II-1 型	XLD0613035-1-3	0.00	1.38	2.69	2.73	0.00	0.00	0.00	3.01	0.01	0.00	0.01	0.05	0.01	1.27	1.42	0.69	0.38	0.31	0.69	207.38	14.132
	XLD0613038-1-1	0.01	1.12	3.05	2.51	0.00	0.00	0.00	3.22	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01	1.49	1.55	0.74	0.41	0.26	0.74	237.24	14.102
	XLD0613038-1-2	0.00	1.29	2.77	2.61	0.00	0.00	0.00	3.28	0.01	0.00	0.00	0.03	0.01	1.39	1.37	0.72	0.38	0.28	0.72	226.88	14.112
	XLD0613042-1-3	0.02	1.19	2.80	2.87	0.02	0.00	0.00	2.79	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01	1.13	1.67	0.70	0.41	0.30	0.70	187.07	14.152

注: 数据处理采用郑巧荣(1983)电价差值法计算。

表 3 ZK4-2 和 ZK8-1 中两类绿泥石主要成分含量的平均值及范围

$\omega_B/\%$

Table 3 Mean values and ranges of main components contents for the two types of chlorite from ZK4-2 and ZK8-1

成分	I-Ⅱ(ZK4-2)		II-Ⅱ(ZK4-2)		I-I(ZK8-1)		II-I(ZK8-1)	
	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
SiO ₂	22.84~27.49	24.55	22.03~26.74	23.56	23.09~29.06	25.87	22.87~26.67	24.72
Al ₂ O ₃	18.36~22.63	21.08	19.13~23.56	21.53	18.50~25.29	20.66	20.34~26.06	22.22
FeO	25.03~37.88	33.19	33.11~41.34	36.45	24.60~32.63	27.86	31.03~34.97	33.65
MgO	5.43~13.70	8.14	3.78~8.75	6.09	10.07~15.40	12.72	6.55~8.83	7.68
MnO	0.18~0.58	0.43	0.16~0.60	0.42	0.10~0.79	0.35	0.36~0.62	0.47

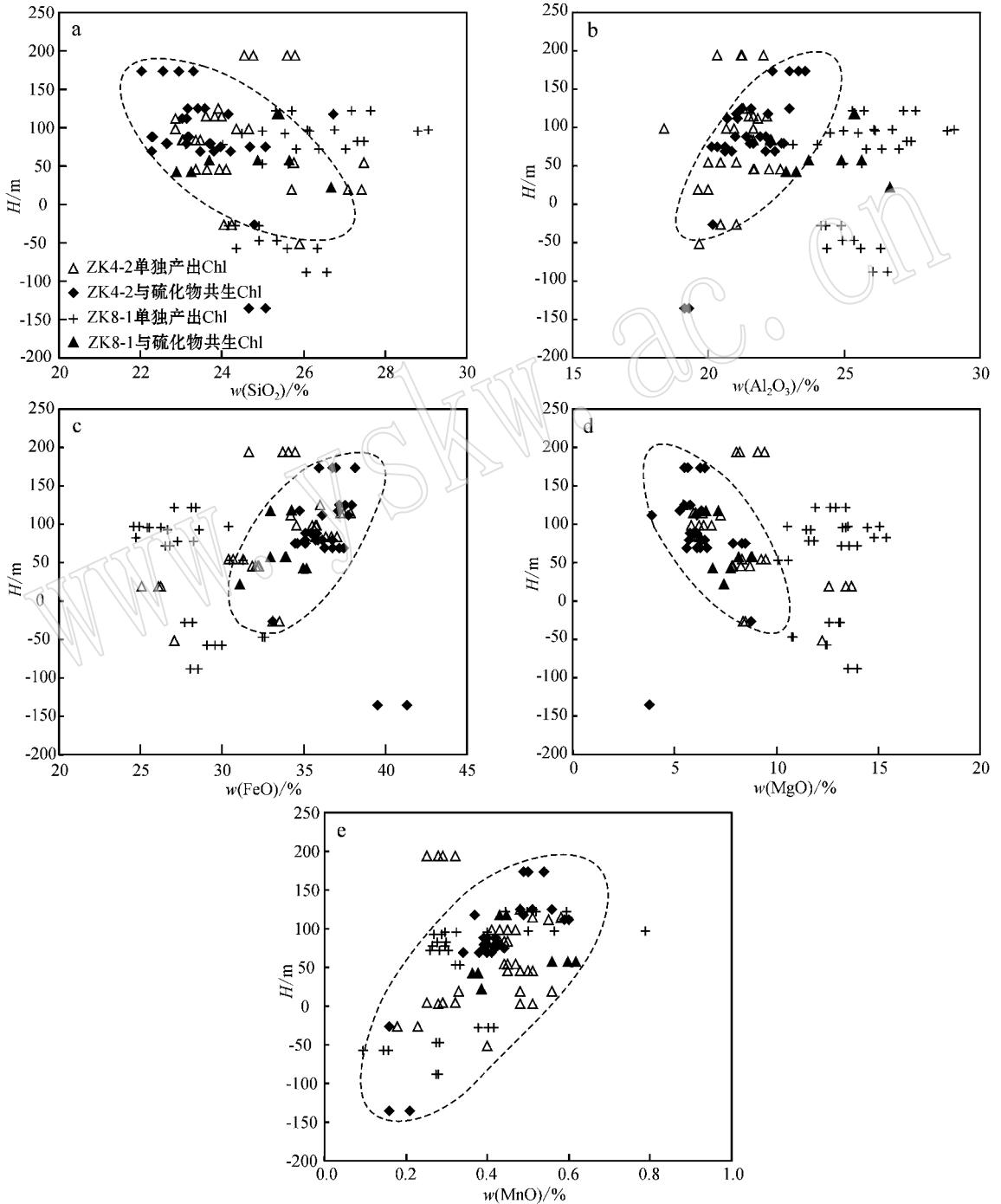


图 5 两类绿泥石主要成分 SiO₂、Al₂O₃、FeO、MgO、MnO 与产出高程 H 的相关图解

Fig. 5 SiO₂, Al₂O₃, FeO, MgO, MnO versus H plots for the chlorites from the Xinliaodong Cu polymetallic deposit

的“桥键”,使硅酸盐格架破坏而变得容易活化迁移,而 F 是良好的地质溶剂,是 Cu、Sn、Ag 等元素迁移的载体,有利于 Cu、Sn、Ag 等成矿元素从深部向浅部运移至合适的部位沉淀成矿,这与实际情况也较为相符。

4.1 绿泥石种属判断

绿泥石是一个矿物族,绿泥石族与高岭土族、埃洛石族、蒙脱石族、水云母族、海泡石族同属于粘土矿物类。目前对绿泥石种属的分类方案较多,不同研究者使用不同的划分标准(Hey, 1954; Deer *et al.*, 1962; 赵杏媛等, 1990),本文采用应用较为广泛的 Fe-Si 分类方案(Deer *et al.*, 1962),对矿床中绿泥石进行投图(图 6, Fe、Si 原子数以 28 个氧原子为标准计算),在 Fe-Si 分类图解中,矿区两类绿泥石主要为富铁种属的蠕绿泥石(铁绿泥石)、铁镁绿泥石,少量的密绿泥石和假鳞绿泥石。Inoue(1995)认为,在低氧逸度和低 pH 值的环境下有利于镁质绿泥石的形成,而在相对还原的环境中则有利于富铁绿泥石的形成。新寮铜多金属矿床中两类绿泥石主要为富铁种属的蠕绿泥石, $Fe/(Fe+Mg)$ 值变化于 0.47~0.86, 平均值 0.68, 指示其形成于相对还原的环境中,并且铁绿泥石的形成还可能与流体的沸腾作用有关(Inoue, 1995)。流体的沸腾作用会改变成矿流体的温度、盐度、氧化还原状态以及 pH 值等,降低 Cu 在热液体系中的稳定性和溶解度,从而导致 Cu 的沉淀(Heinrich, 1990; Muller *et al.*, 2001)。

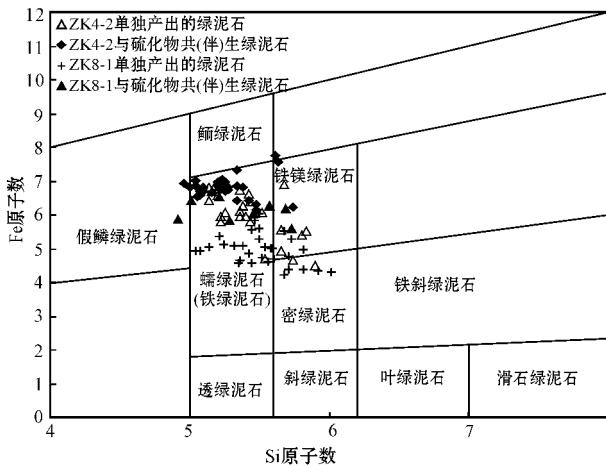


图 6 绿泥石分类图解(底图据 Deer *et al.*, 1962)

Fig. 6 Classification of chlorites from the Xinliaodong Cu polymetallic deposit (after Deer *et al.*, 1962)

4.2 绿泥石的 Al^{IV} 、 Al^{VI} 、 $Fe/(Fe+Mg)$ 、 $Mg/(Fe+Mg)$ 和 $Al/(Al+Mg+Fe)$ 值

绿泥石的 Al^{IV} 、 Al^{VI} 值及 $(Fe+Al^{VI})$ 对 Mg 的关系图解常被用来说明绿泥石四面体和八面体位置上的替代关系。前人研究表明(Xie, 1997),当绿泥石四面体位置的离子替代关系是完全的钙镁闪石型替代(tschermakite replacement)时, Al^{IV} 与 Al^{VI} 值之间的线性关系接近于 1:1 (相关系数 = 0.95)。从表 2 中可以看出,新寮铜多金属矿床中两类绿泥石 Al^{IV} 值为 0.99~1.54, 平均为 1.31, Al^{VI} 值为 1.17~1.67, 平均为 1.42, Al^{VI} 值绝大多数大于 Al^{IV} 值(仅 XLD0609008-1-1、XLD0613031-1-1、XLD0614011-1-1、XLD0614011-3-1、XLD0614015-1-1、XLD0614015-2-1、XLD0614017-1-1、XLD0613038-1-2 这 8 个测点除外),这可能与四面体上 Fe^{3+} 对 Al 的置换有关。 Al^{IV} - Al^{VI} 关系图显示(图 7a), Al^{VI} 与 Al^{IV} 存在着一定的正相关性,说明在 Al^{IV} 对 Si 的置换过程中,同时也伴随着八面体位置上 Al^{VI} 对 Fe 或 Mg 的替换。 Al^{IV} 与 Al^{VI} 之间的相关关系为 $Al^{VI} = 0.3435 Al^{IV} + 0.9761$ ($R^2 = 0.1798$),因此本文中绿泥石 Al 与 Si 的置换不属于 Al^{IV} 与 Al^{VI} 间接近于 1:1 的单纯钙镁闪石型置换(Xie, 1997)。

Al^{IV} - $Fe/(Fe+Mg)$ 图解显示(图 7b),随着 $Fe/(Fe+Mg)$ 值的增加, Al^{IV} 值也增加,这说明在 Fe 替换 Mg 的过程中,由于绿泥石结构的调整,允许更多的 Al^{IV} 置换 Si (Kranidiotis and Maclean, 1987; Xie, 1997)。实验研究表明(Bryndzia *et al.*, 1987a, 1987b),绿泥石 $Fe/(Fe+Mg)$ 的变化与系统的氧逸度有关,系统越还原,其形成的绿泥石 $Fe/(Fe+Mg)$ 值越大。从表 2 可知, I 型绿泥石 $Fe/(Fe+Mg)$ 比值为 0.47~0.79 (平均值 0.62), II 型绿泥石 $Fe/(Fe+Mg)$ 比值为 0.68~0.86 (平均值 0.76),绿泥石这种成分特征指示其形成时热液流体具有还原性的特征,这也印证了前文还原环境有助于富铁绿泥石的形成这一结论。Hillier(1993)认为在活动的地热体系以及镁铁质岩石的低级变质作用过程中,粘土矿物、云母等向绿泥石转化时往往伴随着 Al 对 Si 的替代,因此,本文中绿泥石 Fe 置换 Mg 有利于绿泥石成熟度的提高。

$Al/(Al+Mg+Fe)$ - $Mg/(Fe+Mg)$ 图解被广泛地用于判别绿泥石与其母岩的关系(Laird, 1988),一般认为,由泥质岩石蚀变形成的绿泥石,比由镁铁

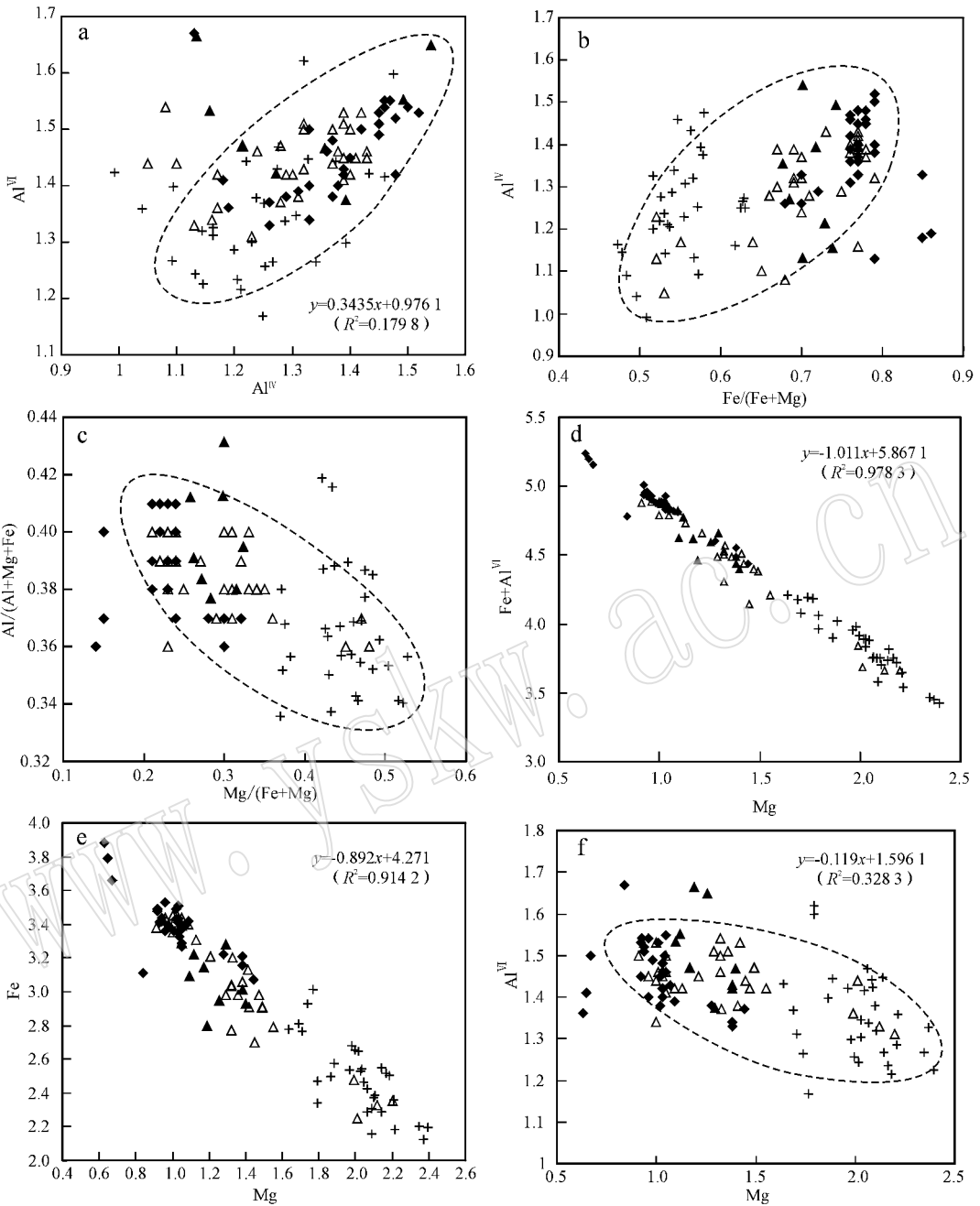


图 7 绿泥石中主要阳离子间的相关关系图解(符号同图 5)

Fig. 7 Correlation of main cations in chlorites from the Xinliaodong Cu polymetallic deposit (symbols as for Fig. 5)

质岩石转化而成的绿泥石具有较高的 $Al/(Al + Mg + Fe)$ 比值 (>0.35) (廖震等 2010)。由表 2 可知, 几乎所有测点 $Al/(Al + Mg + Fe)$ 比值均大于或等于 0.35, 仅 XLD0613026-2-1、XLD0613030-2-1、XLD0614015-1-1、XLD0614017-2-1、XLD0614024-1-1、XLD0614024-1-2 这 6 个测点小于 0.35, 反映矿区绿泥石的化学成分主要来源于泥质岩类, 极少数由镁铁质岩石转化而来。

高 $Mg/(Fe + Mg)$ 比值的绿泥石一般产于基性

岩中, 而低 $Mg/(Fe + Mg)$ 比值的绿泥石产于含铁建造中 (Laird, 1988; Zang and Fyfe, 1995)。矿床绿泥石的 $Mg/(Fe + Mg)$ 比值为 0.14 ~ 0.53, 平均为 0.32, 相对偏低, 指示其形成于富铁环境中。

在 $Al/(Al + Mg + Fe) - Mg/(Fe + Mg)$ 图解中 (图 7c), $Al/(Al + Mg + Fe)$ 值与 $Mg/(Fe + Mg)$ 值总体上显示负相关性, 这与绿泥石化学成分主要来源于泥质岩类, 部分来自镁铁质岩石有关, 负相关性可

能反映了混合比例的变化(廖震等 2010)。

4.3 绿泥石的 Fe+Al^{VI}-Mg Fe-Mg, Al^{VI}-Mg 关系

Mg-(Fe+Al^{VI})关系图解可以用来说明绿泥石八面体位置的相互置换关系(Xie *et al.*, 1997),本文中绿泥石 Fe+Al^{VI}与 Mg 的相关关系为: $Fe+Al^{VI} = -1.011 Mg + 5.8671$ ($R^2 = 0.9783$) (图 7d), 呈近 1:1 的负相关关系, 表明绿泥石八面体位置主要为 Fe, Al, Mg 等 3 种元素占据, 该位置上主要发生 Fe+Al^{VI}对 Mg 的置换。结合 Fe 与 Mg 的关系(图 7e): $Fe = -0.892 Mg + 4.271$ ($R^2 = 0.9142$), 以及 Al^{VI}与 Mg 的关系(图 7f): $Al^{VI} = -0.119 Mg + 1.5961$ ($R^2 = 0.3283$), 表明绿泥石八面体位置上 Fe 对 Mg 的置换占主导, Al^{VI}对 Mg 的置换处于次要地位。一般认为在绿泥石成分中, 若 Fe 取代 Mg, 表征其形成于相对酸性的环境中, 反之, 如果 Mg 取代 Fe 则表征其形成于相对碱性的环境中(艾永富等, 1998), 因此本文中两类绿泥石形成过程中以 Fe 取代 Mg 为主, 应形成于相对酸性的环境中, 同时也反映了绿泥石可能产于含铁高的背景中, 即其可能形成于富铁环境。

5 讨论

5.1 绿泥石形成的温度

绿泥石是中-低温条件下稳定存在的一种常见热液蚀变矿物, 其结构上可变性大, 成分上又具有非计量性, 因此对于绿泥石结构、成分以及多型与其形成温度之间关系的研究历来受到地质学家们的高度关注(Cathelineau *et al.*, 1985, 1988; Walshe, 1986; Decaritat *et al.*, 1993; Stefano, 1999), 绿泥石俨然已成为研究围岩蚀变物理化学条件变化的标型矿物。

Cathelineau 等(1985)最早提出可以利用绿泥石成分的变化来计算其形成时的温度。他在研究墨西哥 Los Azufres 地热体系时发现绿泥石 Al^{IV}与绿泥石形成温度之间存在着良好的正相关性, 并由此拟合了温度方程:

$$t = 212 Al^{IV} + 18 \quad (1)$$

1988年 Cathelineau 在之前研究成果的基础上, 增加了 Salton Sea 地热体系的数据后修正了上述公式:

$$t = -61.92 + 321.98 Al^{IV} \quad (2)$$

Cathelineau 的温度计只注重 Al^{IV}与温度之间的

关系, 并没有考虑到全岩组分的变化, 特别是全岩 Fe/(Fe+Mg)值对 Al^{IV}的影响。鉴于此, Kranidiotis 和 MacLean(1987)在考虑到上述因素后提出了修正公式:

$$t = 106(Al^{IV} + 0.35[Fe/(Fe+Mg)]) + 18 \quad (3)$$

Kranidiotis 和 MacLean 还特别强调该公式的适用条件为: Al 饱和型绿泥石。

Jowett(1991)同样考虑到 Fe, Mg 值对绿泥石温度计的影响, 对公式(3)进行修正后拟合了如下方程:

$$t = 319(Al^{IV} + 0.1[Fe/(Fe+Mg)]) - 69 \quad (4)$$

该公式适用的前提是温度范围在 150~325℃、绿泥石中 Fe/(Fe+Mg) < 0.6 的地热系统。

Stefano(1999)提出了运用 X 射线衍射(XRD)数据探讨绿泥石形成温度的新思路, 并通过实践验证该方法的适用性, 由此拟合出绿泥石面网间距 d_{001} 与温度之间的关系式:

$$d_{001}(0.1 \text{ nm}) = 14.339 - 0.001t(^\circ\text{C}) \quad (5)$$

在缺失 XRD 数据的情形下, Stefano 建议可以运用 Rausell-Colom 等(1991)提出后经 Nieto(1997)修正的等式:

$$d_{001}(0.1 \text{ nm}) = 14.339 - 0.1155 Al^{IV} - 0.0201 Fe^{2+} \quad (6)$$

新寮崇铜多金属矿床中两类绿泥石 Fe/(Fe+Mg)值与 Al^{IV}呈较好的正相关关系(图 7b), 因此必须考虑 Fe, Mg 对绿泥石温度计的影响。此外, 从表 2 可以看出本文中大多数绿泥石 Fe/(Fe+Mg) > 0.6, 尤其是与硫化物共(伴)生的 II 型绿泥石 Fe/(Fe+Mg)值均大于 0.6。在显微镜下观察可见绿泥石主要与石英或者黄铜矿、黄铁矿等硫化物共(伴)生(图 4), 几乎未见与富 Al 的矿物共生, 两类绿泥石 Al₂O₃ 含量介于 18.36%~26.06%, 平均 21.18%, 故本文中的绿泥石并非 Al 饱和型。因此, 根据本文实际情况, 采用得到大多数研究者广泛认可的公式(5)(6)计算绿泥石形成温度(t_{d001}), 结果见表 2。由表 2 可知 ZK4-2 中与成矿无关呈单独产出的 I-2 型绿泥石的形成温度为 166.32~233.92℃, 平均为 211.39℃, 与成矿有关的 II-2 型为 193.39~245.62℃, 平均为 226.91℃; ZK8-1 中与成矿无关呈单独产出的 I-1 型绿泥石的形成温度为 157.92~220.07℃, 平均为 193.62℃, 与成矿有关的 II-1 型为 187.07~237.24℃, 平均为 213.79℃; 从两类绿泥石形成温度频率分布直方图(图 8)上可以看出,

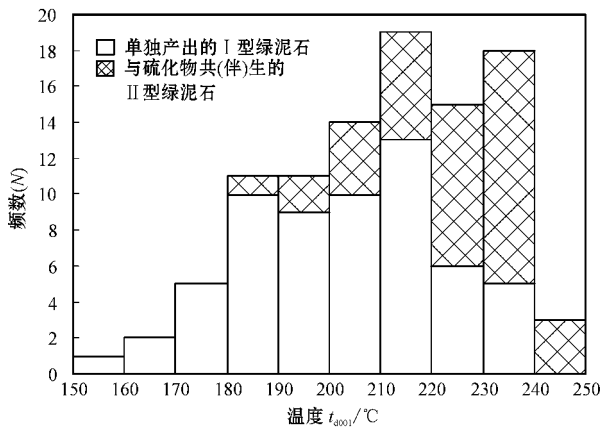


图 8 两类绿泥石形成温度频率分布直方图

Fig. 8 Histogram of formation temperatures of chlorites from the Xinliaodong Cu polymetallic deposit

与成矿有关的 II 型绿泥石峰值在 230~240℃, 与成矿无关呈单独产出的 I 型绿泥石峰值在 210~220℃, 整体上 II 型绿泥石比 I 型绿泥石形成温度稍高(约 20℃), 但两者均属中-低温热液蚀变范围, 两类绿泥石形成温度范围变化较大, 可能与该区复杂多变的热液活动有关。此外, 根据广东省地质局第二地质大队现有物化探资料推测^①, 矿区深部可能存在隐伏岩体, 目前已揭露的矿体应属岩体与围岩接触带的外带, 故本文研究的绿泥石形成温度相对较低, 可能属矿化较晚阶段的产物。

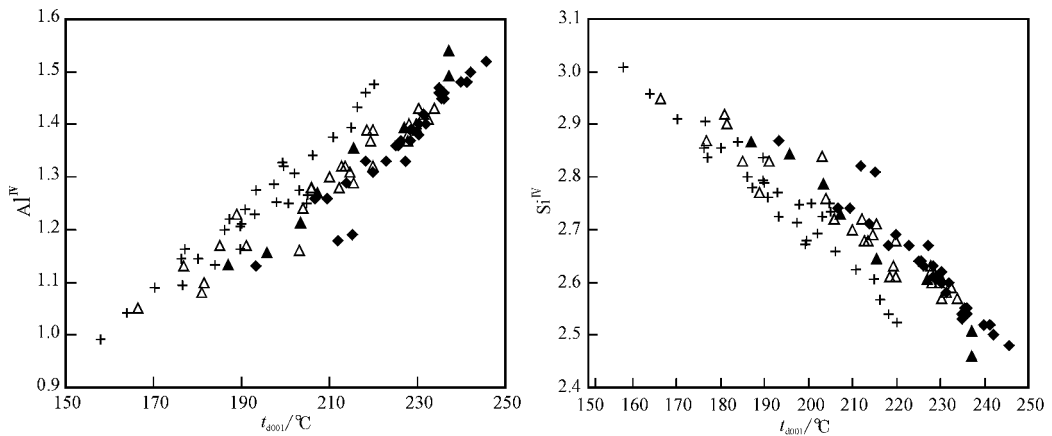


图 9 绿泥石形成温度 t_{001} 与 Si^{IV} 和 Al^{IV} 相关性图解(图例同图 6)

Fig. 9 Si^{IV} , Al^{IV} versus t_{001} plots for the chlorites from the Xinliaodong Cu polymetallic deposit (symbols as for Fig. 6)

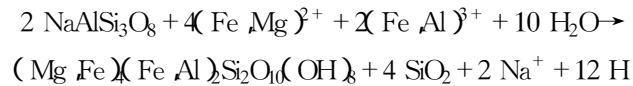
绿泥石中阳离子与温度之间显示出不同的变化特点。Cathelineau(1988)总结了随着温度的升高绿泥石中阳离子的变化问题, 他认为在 100~350° 的温度范围内, 温度与绿泥石 Al^{IV} 、Fe、Fe/Mg 值呈正相关, 与八面体空穴和 Al^{VI} 则呈负相关。这表明绿泥石中 Al^{IV} 取代 Si 产生的电荷亏损由 $R^{2+} - Al$ 替代来补偿(R^{2+} 代表绿泥石晶体结构中的 Mg^{2+} 、 Fe^{2+})。图 9 为研究区绿泥石形成温度与 Si^{IV} 和 Al^{IV} 的相关图解, 从图中可以看出, Al^{IV} 与温度呈正相关趋势, 而 Si^{IV} 则恰好相反。这与 Cavaretta 等(1982)和 Cathelineau(1985)对 LosAzufres 和 Larderello 地热体系绿泥石的研究结果相类似, 说明了上述结论的普适性。

5.2 绿泥石形成机制及其地质意义

新寮崇铜多金属矿床围岩蚀变发育, 尤其是宽广的绿泥石化蚀变带。显微镜下观察既可见呈团块状分布的绿泥石(图 4c)以及沿岩石、矿物裂隙呈脉状分布的绿泥石(图 4a、b), 还可见与黄铜矿、黄铁矿等硫化物共(伴)生呈浸染状分布的绿泥石(图 4e、f、g)。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均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, 该矿床绿泥石的化学类型主要是蠕绿泥石和铁镁绿泥石, 说明热液流体中富含 Fe。刘英俊等(1987)认为, Fe 的运移与流体介质具有酸性和还原性特征有关, 这与前文得出的矿区绿泥石形成于还原和相对酸性环境这一结论

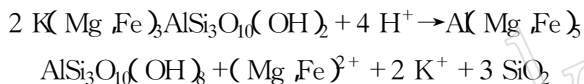
① 广东省地质局第二地质大队. 2012. 广东省揭东县新寮崇铜多金属矿详查中间性地质报告(内部资料).

也较为一致,结合本文两类绿泥石形成温度介于 $157.92\sim 245.62^{\circ}\text{C}$ 之间这一研究结果,提出本区绿泥石形成机制只要有2种:一是溶蚀-结晶,即热液流体沿围岩构造裂隙、节理以及矿物间裂隙等运移交代黑云母、长石等易蚀变矿物并原地重结晶形成绿泥石,这种机制形成的绿泥石往往保留有母矿物的晶形,出现明显的假像交代结构(图4c),且这种情况形成的绿泥石,其铁、镁组分往往较少从成矿溶液带入。其中斜长石蚀变成绿泥石可能的反应式如下(据杨献忠等,2002):



由以上反应式可知,绿泥石化蚀变为流体提供了 H^+ ,从而导致流体酸性增强。

黑云母蚀变为绿泥石的反应式如下(据李亮,2011):



绿泥石形成的另一种机制是溶蚀-迁移-结晶,即流体溶蚀黑云母、长石等矿物后迁移一定的距离,在矿物裂隙沉淀形成绿泥石,如在显微镜下常见绿泥石呈浸染状与黄铜矿、黄铁矿和毒砂等矿物共(伴)生(图4e、f),有时甚至可见绿泥石呈脉状分布于石英脉两侧(图4a),属于这种情况的绿泥石成分主要为流体带入铁、镁组分。

绿泥石的形成过程是一个由反应动力学控制的水-岩反应过程(张展适等,2007),根据矿体产状、矿石的组构特征、矿物共生组合等,对比不同类型铜矿床的特征,本文认为新寮寨铜多金属矿的形成与热液活动关系密切,与本区绿泥石同属热液流体活动的产物。当深部岩浆演化至晚期时分异出富含铜(锡、铅、锌、银)的热液流体,这些富含成矿元素的成矿溶液沿着构造薄弱带(岩石裂隙、节理等)运移,当流体与黑云母、角闪石、长石等矿物接触时,可沿矿物的解理、裂隙等交代这些矿物形成绿泥石;或者流体萃取黑云母、角闪石、长石等矿物中的铁、镁等元素迁移到合适的位置,如围岩裂隙、节理中,再沉淀结晶形成绿泥石,与此同时,由于流体成分的变化以及物理化学条件的改变,导致富含 Cu 、 Sn 、 Ag 等成矿元素的流体在合适的部位卸载成矿。因此,本文中绿泥石的形成温度至少可以代表矿床成矿温度的下限,结合矿体产状、矿床围岩蚀变特征、矿物共生

组合等以及广东省地质局第二地质大队物探资料,推测矿区深部可能存在隐伏斑岩体,初步研究认为目前已发现的铜矿体应属远离岩体与围岩接触带部位的细脉浸染型矿体,矿区深部可能存在斑岩型矿床。新寮寨铜多金属矿床中绿泥石化与黄铜矿化紧密相伴,其成分特征不仅可以反映成矿流体的特征,从而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以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)按照矿物共生组合关系,新寮寨铜多金属矿床中的绿泥石主要分为与硫化物共(伴)生及未与硫化物共(伴)生单独产出两类,两类绿泥石主要呈叶片状、纤维状、蠕虫集合体状等形态产出,随着孔深的增加,绿泥石蚀变强度减弱,与成矿有关绿泥石的成分中 Si 和 Mg 元素含量逐渐升高, Al 、 Fe 、 Mn 元素含量逐渐降低,与成矿无关呈单独产出的绿泥石随着孔深成分变化规律不明显。

(2)该矿床中绿泥石主要为富铁种属的蠕绿泥石、铁镁绿泥石及少量的密绿泥石和假鳞绿泥石,指示其形成于还原环境。

(3)该矿床中绿泥石化学成分主要来源于泥质岩类,绿泥石结构中八面体位置上的离子置换以 Fe 对 Mg 的替代为主,反映其可能形成于富铁及相对酸性的环境中。

(4)研究区绿泥石的形成温度为 $166.32\sim 245.62^{\circ}\text{C}$,平均为 219.15°C ,且与成矿有关的绿泥石形成温度相对较高,但两者均属中-低温热液蚀变范围。绿泥石形成机制主要为溶蚀-结晶和溶蚀-迁移-结晶两种。

致谢 本文在成文过程中得到了郑伟博士的指导,野外地质工作期间得到了广东省地质局第二地质大队的大力支持和帮助,中国地质科学院矿产资源研究所电子探针室陈振宇助理研究员和陈小丹研究实习员等在实验过程中给予了热情的指导和帮助,资料收集和数据分析过程中得到了中国地质大学(北京)杨阳、李正远、曹晶、姚通、张伟等同学的帮助,在此一并表示诚挚的谢意!

References

- Ai Yongfu and Liu Guoping. 1998. The study of chlorite at Dajing deposit in Inner-Mongolia of China [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* , 34(1): 97~105 (in Chinese with English abstract).
- Bryndzia L T and Steven D S. 1987a. The composition of chlorite as a function of sulfur and oxygen fugacity : an experimental study [J]. *American Journal of Science* , 287 : 50~76.
- Bryndzia L T and Scott S D. 1987b. Application of chlorite-sulphide-oxide equilibria to metamorphosed sulphide ores , Snow Lake area , Manitob [J]. *Econ. Geol.* , 82 : 963~970.
- Cavaretta G , Gianelli G and Puxeddu M. 1982. Formation of authigenic minerals and their use as indicators of chemical-physical parameters of the fluid in the Larderello-Trarele geothermal field [J]. *Econ. Geol.* , 77 : 1 071~1 084.
- Cathelineau M. 1988. Cation site occupancy in chlorites and illites as function of temperature [J]. *Clay Minerals* , 23(4): 471~485.
- Cathelineau M and Nieva D. 1985. A chlorite solid solution geothermometer : the Los Azufres (Mexico) geothermal system [J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology* , 91 : 235~244.
- Cerny P and Povondra P. 1972. An Al , F-rich metamict titanite from Czechoslovakia [J]. *Neues Jahrb. Mineral. Monatsh.* , 400~406.
- Cheng Yanbo , Mao Jingwen , Xie Guiqing , *et al.* 2009. Zircon U-Pb dating of granites in Gejiu superlarge tin polymetallic orefield and its significance [J]. *Mineral Deposit* , 28(3) : 297~312 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Yanbo , Tong Xiang , Wu Junde , *et al.* 2010. Geochronology framework of the W-Sn mineralization granites in western South China and their geological significance [J]. *Acta Petrologica Sinica* , 26(3) : 809~818 (in Chinese with English abstract).
- Decaritat P , Hutchion I and Walshe J L. 1993. Chlorite geothermometry : A review [J]. *Clays and Clay Minerals* , 40 : 470~479.
- Deer W A , Howie R A and Iussman J. 1962. *Rock-forming Minerals : Sheet Silicates* [M]. London : Loongman , 1~270.
- Foster M D. 1962. Interpretation of the composition and classification of the chlorites [J]. *US Geology Survey Prof. Paper* , 414A : 1~33.
- Heinrich C A. 1990. The chemistry of hydrothermal tin (-tungsten) ore deposition [J]. *Economic Geology* , 85(3) : 457~481.
- Hey M H. 1954. A new review of the chlorites [J]. *Min. Mag.* , 30 : 277~292.
- Hillier S. 1993. Oring , diagenesis , and mineralogy of chlorite minerals in Devonian lacustrine mudrocks , Orcadian basin , Scotland [J]. *Clays and Clay Minerals* , 41 : 240~259.
- Hu Shouxi , Ye Ying and Fang Changquan. 2004. *Petrology of the Metasomatically Altered Rocks and Its Significance in Prospecting* [M]. Beijing : Geological Publishing House , 83~85 (in Chinese).
- Hua Renmin , Li Guanglai , Zhang Wenlan , *et al.* 2010. A tentative discussion on differences between large-scale tungsten and tin mineralizations in South China [J]. *Mineral Deposit* , 29(1) : 9~23 (in Chinese with English abstract).
- Hua Renmin , Li Xiaofeng , Zhang Kaiping , *et al.* 2003. Characteristics of clay minerals derived from hydrothermal alteration in Jinshan deposit : implication for the environment of water-rock interaction [J]. *Acta Mineralogica Sinica* , 23(1) : 23~30 (in Chinese with English abstract).
- Inoue A. 1995. *Formation of Clay Minerals in Hydrothermal Environment* [M]. *Origin and Mineralogy of Clays* , Springer Berlin Heidelberg : 268~330.
- Jowett E C. 1991. Fitting iron and magnesium into the hydrothermal chlorite geothermometer [J]. *GAC/MAC/SEG Joint Annual Meeting , Program with Abstracts* , 16 : A62.
- Kranidiotis P and Maclean W H. 1987. Systematics of chlorite alteration at the Phelps Dodge massive sulfide deposit , Matagami , Quebec [J]. *Econ. Geol.* , 82 : 1 898~1 991.
- Laird J. 1988. Chlorites : Metamorphic petrology [J]. *Reviews in Mineralogy* , 19 : 405~453.
- Li Liang. 2011. Study of Characters of Biotite and Chlorite of Molybdenum Deposit in Antuoling , Hebe [D]. Beijing : China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Liang Wanjuan , Du Zezhong , Zhen Shijun , *et al.* 2013. Characteristics of chlorites from Baiyinchang deposit in Gansu province and their metallogenic significance [J]. *Acta Mineralogica Sinica* , 33(2) supplement : 464~465 (in Chinese).
- Liao Zhen , Liu Yuping , Li Chaoyang , *et al.* 2010. Characteristics of chlorites from Dulong Sn-Zn deposit and their metallogenic implications [J]. *Mineral Deposit* , 29(1) : 169~176 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yingjun and Cao Liming. 1987. *Element Geochemistry Principle* [M]. Beijing : Geological Publishing House , 124~128 (in Chinese).
- Mao Jingwen , Hua Renmin and Li Xiaobo. 1999. A preliminary study of large-scale metallogenesis and large clusters of mineral deposits [J]. *Mineral Deposit* , 18(4) : 291~299 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen , Xie Guiqing , Li Xiaofeng , *et al.* 2004. Mesozoic large scale mineralization and multiple lithospheric extension in South China [J]. *Earth Science Frontiers* , 11(1) : 45~55 (in Chinese with

- English abstract).
- Mao Jingwen , Xie Guiqing , Cheng Yanbo , *et al.* 2009. Mineral deposit models of Mesozoic ore deposits in South China [J]. *Geological Review* , 55(3) : 347 ~ 354 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen , Xie Guiqing , Guo Chunli , *et al.* 2008. Spatial-Temporal distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their metallogenic settings [J]. *Geological Journal of China Universities* , 14 (4) : 510 ~ 526 (in Chinese with English abstract).
- Muller B , Frischknecht R , Seward T , *et al.* 2001. A fluid inclusion reconnaissance study of the Huanuni tin deposit (Bolivia) , using LA-ICP-MS micro-analysis [J]. *Mineralium Deposita* , 36(7) : 680 ~ 688.
- Nieto F. 1997. Chemical composition of metapelitic chlorites : X-ray diffraction and optical property approach [J]. *Eur. J. Mineral.* , 829 ~ 841.
- Rausell-Colom J A , Wiewiora A and Matesanz E. 1991. Relation between composition and d_{001} for chlorite [J]. *Am. Mineral.* , 76 : 1 373 ~ 1 379.
- Shirozu H. 1978. Developments in Sedimentology (chlorite minerals) [M]. New York : Elsevier , 243 ~ 246.
- Sadoon M , Mohamed A K , Miguel A C , *et al.* 2009. Hydrothermal alteration of magmatic titanite : evidence from proterozoic granitic rocks , Southeastern Sweden [J]. *The Canadian Mineralogist* , 47 : 801 ~ 811.
- Shu Liangshu. 2012. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block [J]. *Geological Bulletin of China* , 31(7) : 1 035 ~ 1 053 (in Chinese with English abstract).
- Stefano B. 1999. Applying X-ray geothermometer diffraction to a chlorite [J]. *Clays and Clay Minerals* , 47 : 54 ~ 63.
- Walshe J L. 1986. A six-component chlorite solid solution model and the conditions of chlorite formation in hydrothermal and geothermal systems [J]. *Econ. Geol.* , 81 : 681 ~ 703.
- Xiao Zhifeng , Ouyang Ziyuan , Lu Huanzhang , *et al.* 1993. The characteristics of chlorites in the wall-rock alteration zone in the Baoban gold field , Hainan island with hydrothermal alteration [J]. *Acta Mineralogica Sinica* , 13(4) : 319 ~ 324 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xiaochun and Yue Shucang. 1994. Genetic relationship and type of the mesozoic volcanic and intrusive rocks in eastern Guangdong , China [J]. *Journal of Hefei University of Technology* , 17(4) : 184 ~ 192 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xiaochun and Yue Shucang. 1999. Source material and metallization of Ti (Tungsten , Copper) polymetallic deposits in eastern Guangdong Province [J]. *Scientia Geologica Sinica* , 34(1) : 78 ~ 89 (in Chinese with English abstract).
- Xie X G. 1997. IIb trioctahedral chlorite from the Barberton greenstone belt : Crystal structure and rock composition constraints with implications to geothermometry [J]. *Contrib Mineral Petrol.* , 126 : 275 ~ 291.
- Xie X G , Byerly G R and Ferrel R E. 1997. IIb trioctahedral chlorite from the Barberton greenstone belt crystal structure and rock composition constraints with implications to geothermometry [J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology* , 126 : 275 ~ 291.
- Yang Minggui , Huang Shuibao , Lou Fasheng , *et al.* 2009. Lithospheric structure and large-scale metallogenic process in South China continental area [J]. *Geology in China* , 36(3) : 528 ~ 543 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xianzhong , Yang Zhuliang , Tao Kuiyuan , *et al.* 2002. Formation temperature of chloritien oil-bearing basal [J]. *Acta Mineralogica Sinica* , 22(4) : 365 ~ 370 (in Chinese with English abstract).
- Zang W and Fyfe W S. 1995. Chloritization of the hydrothermally altered bedrock at the Igarape Bahia gold deposit , Carajas , Brazil [J]. *Mineralium Deposita* , 30 : 30 ~ 38.
- Zhang Qi , Jin Weijun , Li Chengdong , *et al.* 2009. Yanshanian large-scale magmatism and lithosphere thinning in Eastern China : Relation to large igneous province [J]. *Earth Science Frontiers* , 16(2) : 21 ~ 51 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhanshi , Hua Renmin , Ji Junfeng , *et al.* 2007. Characteristics and formation conditions of chlorite in No. 201 and No. 306 uranium deposits [J]. *Acta Mineralogica Sinica* , 27(2) : 161 ~ 172 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Ming , Chen Xiaoming , Ji Junfeng , *et al.* 2007. Component evolution characteristics of the chlorite in the paleogene prototype basin of Jiyang depression and the basin paleogeothermal gradient [J]. *Science in China (Series D)* , 37(9) : 1 141 ~ 1 149 (in Chinese).
- Zhao Xingyuan and Zhang Youyu. 1990. *Clay Minerals and Analyses* [M]. Beijing : Ocean Press , 130 ~ 135 (in Chinese).
- Zheng Qiaorong. 1983. Calculation of the Fe^{3+} and Fe^{2+} contents in silicate and Ti-Fe oxide minerals from EPMA data [J]. *Acta Mineralogica Sinica* , 1 : 55 ~ 62 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Wei , Chen Maohong , Zhao Haijie , *et al.* 2013. Skarn mineral characteristics of the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit in Guangdong Province and geological significance [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica* , 32(1) : 23 ~ 40 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Zuoping , Chen Fanrong and Yu Xueyuan. 1997. Characteristics of chlorite in Baguamiao gold deposit and their geological significance [J]. *Acta Mineralogica Sinica* , 17(1) : 100 ~ 106 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 艾永富,刘国平. 1998. 内蒙大井矿床的绿泥石研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 34(1): 97~105.
- 程彦博,毛景文,谢桂青,等. 2009. 与云南个旧超大型锡矿床有关的花岗岩锆石 U-Pb 定年及意义[J]. 矿床地质, 28(3): 297~312.
- 程彦博,董祥,武俊德,等. 2010. 华南西部地区晚中生代与 W-Sn 矿有关花岗岩的年代学框架及地质意义[J]. 岩石学报, 26(3): 809~818.
- 胡受奚,叶瑛,方长泉. 2004. 交代蚀变岩岩石学及其找矿意义[M]. 北京:地质出版社, 83~85.
- 华仁民,李光来,张文兰,等. 2010. 华南钨和锡大规模成矿作用的差异及其原因初探[J]. 矿床地质, 29(1): 9~23.
- 华仁民,李晓峰,张开平,等. 2003. 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, 23(1): 23~30.
- 李亮. 2011. 河北省安义岭辉钼矿黑云母、绿泥石特征研究[D]. 北京:中国地质大学(北京).
- 梁婉娟,杜泽忠,甄世军,等. 2013. 甘肃白银厂矿床绿泥石特征及其成矿意义[J]. 矿物学报, 33(2)(增刊): 464~465.
- 廖震,刘玉平,李朝阳,等. 2010. 都龙锡锌矿床绿泥石特征及其成矿意义[J]. 矿床地质, 29(1): 169~176.
- 刘英俊,曹励明. 1987. 元素地球化学导论[M]. 北京:地质出版社, 124~128.
- 毛景文,华仁民,李晓波. 1999. 浅议大规模成矿作用与大型矿集区[J]. 矿床地质, 18(4): 291~299.
- 毛景文,谢桂青,程彦博,等. 2009. 华南地区中生代主要金属矿床模型[J]. 地质论评, 55(3): 347~354.
- 毛景文,谢桂青,郭春丽,等. 2008. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境[J]. 高校地质学报, 14(4): 510~526.
- 毛景文,谢桂青,李晓峰,等. 2004. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展[J]. 地学前缘, 11(1): 45~55.
- 舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报, 31(7): 1035~1053.
- 肖志峰,欧阳自远,卢焕章,等. 1993. 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, 13(4): 319~324.
- 徐晓春,岳书仓. 1994. 粤东地区中生代火山岩与侵入岩的成因关系及成因类型[J]. 合肥工业大学学报, 17(4): 184~192.
- 徐晓春,岳书仓. 1999. 粤东锡(钨、铜)多金属矿床的成矿物质来源和成矿作用[J]. 地质科学, 34(1): 78~89.
- 杨明桂,黄水保,楼法生,等. 2009. 中国东南陆区岩石圈结构与大规模成矿作用[J]. 中国地质, 36(3): 528~543.
- 杨献忠,杨祝良,陶奎元,等. 2002. 含油玄武岩中绿泥石的形成温度[J]. 矿物学报, 22(4): 365~370.
- 张旗,金惟俊,李承东,等. 2009. 中国东部燕山期大规模岩浆活动与岩石圈减薄:与大火成岩省的关系[J]. 地学前缘, 16(2): 21~51.
- 张展适,华仁民,季峻峰,等. 2007. 201和306铀矿床中绿泥石的特征及其形成环境研究[J]. 矿物学报, 27(2): 161~172.
- 赵明,陈小明,季峻峰,等. 2007. 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古地温梯度[J]. 中国科学(D辑), 37(9): 1141~1149.
- 赵杏媛,张有瑜. 1990. 粘土矿物与粘土矿物分析[M]. 北京:海洋出版社, 130~135.
- 郑巧荣. 1983. 由电子探针分析值计算 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} [J]. 矿物学报, (1): 55~62.
- 郑伟,陈懋弘,赵海杰,等. 2013. 广东省天堂铜铅锌多金属矿床矽卡岩矿物学特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 32(1): 23~40.
- 郑作平,陈繁荣,于学元. 1997. 八卦庙金矿床的绿泥石特征及成矿意义[J]. 矿物学报, 17(1): 100~106.