

豫西康山金银铅锌矿床绿泥石电子 探针成分特征及其地质意义

周栋¹ 赵太平² 赵鹏彬³ 张晓团¹

(1. 陕西省地质调查院, 西安 710054;
2. 中国科学院广州地球化学研究所矿物学与成矿学重点实验室, 广州 510640;
3. 陕西省地质调查中心, 西安 710016)

摘要 康山构造蚀变岩型和石英脉型金银铅锌矿床绿泥石电子探针成分分析显示, 矿床中的绿泥石有两种成因类型: ① 围岩中铁镁矿物发生交代形成(围岩中的绿泥石); ② 直接从热水溶液中沉淀(与成矿有关的绿泥石)。其中, 围岩中的绿泥石呈细小的放射状、菊花状, 与成矿有关的绿泥石呈鳞片状、团块状。围岩中的绿泥石和与成矿有关的绿泥石的 $Fe/(Fe+Mg)$ 比值和 Al^{IV} 含量分别变化于 0.53~0.67 和 0.65~0.71, 2.21~2.75 和 1.89~2.69, 暗示形成绿泥石的流体来源具有多源性。绿泥石的地质温度计显示, 围岩中的绿泥石和与成矿有关的绿泥石的温度分别变化于 250°C~310°C 和 220°C~310°C, 暗示从围岩到矿化带温度逐渐升高。综合前人同位素研究成果, 文章认为康山矿床成矿流体有岩浆热液、太华岩群和官道口群物质的贡献, 成矿热液可能来源于区域上的岩浆热液和地层物质脱碳脱水的混合。该脱碳脱水作用可能由区域隐伏岩体的侵位及马超营断裂带的活动引起。

关键词 绿泥石 电子探针 地质意义 康山金银铅锌矿床 豫西

中图分类号: P618.51; P618.52; P618.2 文献标识码: A 文章编号: 1674-7801(2018)05-0803-22

0 引言

绿泥石是自然界中广泛存在的一种矿物, 常发育在沉积岩、低级变质岩和热液蚀变岩石中(Deer et al., 1966)。并与 Cu、Au、U 等矿床成矿作用密切相关(Cathelineau and Nieva, 1985; Lowell and Guilbert, 1970)。绿泥石的成分复杂, 不同的地质环境中, 绿泥石化学成分和晶体结构常会发生规律性变化, 常用通式 $(R^{2+u}R^{3+y}Q_z)^{VI}(Si_{4-x}Al_x)^{IV}O_{10+w}(OH)_{8w}$ 表示其化学成分(Wiewióra and Weiss, 1990; Caritat P., 1993)。其中 $u+y+z=6$, $z=(y-w-x)/2$, μ 通常为零或者是个很小的数字; R^{2+} 代表 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} , 可能还有 Mn^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Ni^{2+} 等; R^{3+} 代表 Al^{3+} 、 Fe^{3+} , 可能还有 Cr^{3+} 等; Q 代表晶体结构空缺位置。绿泥石的沉淀主要有两种方式, 一是直接从热水溶液中沉淀, 另一

种是与围岩中的铁镁矿物交代发生沉淀(De Caritat et al., 1993; Parry and Downey, 1982)。由于绿泥石化学成分的变化能反映矿床形成的物理化学条件及模式, 从而使绿泥石成为研究矿床形成的物理化学条件和成因模型的有效探针(Inoue et al., 2010)。绿泥石的化学性质被广泛应用在研究热液蚀变过程的特征、探讨流体化学成分及建立矿化温度等方面(Halter et al., 1998; Higashi, 2003; Panigrahi et al., 2008; Walshe, 1986)。如 Dora and Randive (2015) 通过对 Thanewasna 铜金矿床绿泥石温度研究发现, 从围岩到矿化带再到钾化蚀变带温度逐渐升高, 符合高硫型浅成低温热液矿床特征。Randive et al. (2015) 利用绿泥石化学成分特征讨论了印度 Saigaon-Palasaon 区域铬云母石英岩中富 Cr 绿泥石变成富铬云母的机制是富 Cr 沉积岩的变

[收稿日期] 2018-01-04

[基金项目] 国家自然科学基金(编号: 41402047) 和陕西省公益性地质调查项目(编号: 20170102、20180310) 联合资助。

[第一作者简介] 周栋, 男, 1989 年生, 博士, 工程师, 从事矿产地质勘查及研究工作; E-mail: 781821834@qq.com。

[通讯作者简介] 赵太平, 男, 1963 年生, 博士, 研究员, 从事矿床学研究工作; E-mail: tpzhao@gig.ac.cn。

质程度不断加深。同时,绿泥石成分和晶体结构与形成温度间的变化关系一直备受关注,研究发现随着形成温度的升高,绿泥石 Al^{IV} 、 Fe^{2+} 含量、 $Fe/(Fe+Mg)$ 值变大,绿泥石晶体层间面网间距 d_{001} 变大 (Cathelineau and Nieva, 1985; Walshe, 1986)。因此,绿泥石常被用作地质温压计。近年来,有学者提出了绿泥石除了能作为地质温压计外,在热液矿床中形成的绿泥石还能指示矿化程度(廖震等, 2010; 梁婉娟等, 2013)。陈华勇(2012)、常召山(2013)也提出可以通过绿泥石的地球化学指针指导矿床勘查方向。

康山金银铅锌矿床位于河南省栾川县白土乡。在成因类型上属于构造蚀变岩型和热液脉型。Au 储量为 15 t, 平均品位为 15×10^{-6} , Ag 储量为 14 t, 平均品位为 36×10^{-6} (Chen et al., 2004)。前人的研究仅仅对蚀变进行简单的描述,而对矿床的蚀变特征缺乏系统的研究,对矿床的绿泥石也未开展过比较系统的研究,这在一定程度上制约了对矿床成因认识的深化。关于成矿流体和成矿物质来源,前人对该矿床进行了流体包裹体和同位素的研究:范宏瑞等(1994)认为成矿流体和成矿物质主要来源于岩浆热液的贡献,而王海华等(2001)则倾向于认为成矿流体主要为变质热液,成矿物质来源于围岩地层官道口群的贡献。因此,目前尚不清楚岩浆热液和变质热液在康山矿床成矿过程中究竟扮演了怎样的角色,围岩对成矿物质是否具有贡献。为了系统地研究康山矿床中绿泥石化蚀变在成矿过程中的作用,本文采集了具有不同产状和成因的代表性岩(矿)石样品,进行详细的岩相学观察和电子探针微区分析。

1 矿床地质背景

康山矿床大地构造位置处于华北克拉通南缘熊耳山地区,邻近马超营断裂南侧(图1)。区内地层主要出露太华岩群结晶基底和由中元古界熊耳群火山岩、少量的中元古界官道口群碳酸盐岩等组成的盖层。区域性构造以近东西向为主,叠加北东向构造,其次为近南北向和北西向构造。近东西向断裂有马超营断裂带,北东向断裂主要有上官断裂、青岗坪断裂、焦园断裂带等。同时,熊耳山的北坡分布着

呈北北东向长垣状展现的变质核杂岩,由太华岩群深变质岩系组成结晶基底,熊耳群未变质的火山岩系和新生代红层组成盖层。核杂岩体顶部由滑脱拆离断层把基底与盖层分隔开来,该断层为熊耳山地区脉状金矿及银铅锌矿的控矿构造(李永峰, 2005)。岩浆岩主要为新太古代中基性火山岩和花岗岩,经区域变质作用成为该区结晶基底太华岩群各类片麻岩和片麻状花岗岩;中元古界熊耳群裂谷型中基性—中酸性火山岩;侏罗纪五丈山花岗岩基,早白垩世花山花岗岩基、合峪花岗岩基、蒿坪沟花岗斑岩、雷门沟花岗斑岩及祁雨沟等隐爆角砾岩体。区内主要以钼金银铅锌矿床为主,有雷门沟、石瑶沟、鱼池岭等斑岩型钼矿,前范岭石英脉型钼矿,祁雨沟和店房隐爆角砾岩型金矿,上官、康山、潭头、崔香洼、公峪、瑶沟、前河、庙岭等破碎带蚀变岩型金矿,铁炉坪、蒿坪沟、沙沟等破碎带蚀变岩型银铅矿。

2 矿床地质特征

康山矿床矿体主要赋存在太古宇太华群和元古宇熊耳群中。矿区断裂广泛发育(图2)。矿体主要以803号脉和1101号脉为主。其产出严格受北东向断裂控制,矿体形态与断裂带的形态基本一致,多呈薄脉状、透镜状、长条状、豆荚状等(图3)。其中803号脉以黄铁绢英岩化的矿体为主,1101号脉以石英脉型矿体为主。矿区出露岩浆岩主要为太古宇太华岩群正长斑岩。其中,在整个矿区均发育绿泥石化蚀变,且绿泥石主要呈两种形态产出,多呈鳞片状、团块状、放射状或菊花状。

3 样品采集与分析测试

3.1 样品采集

本次研究选择矿床中的两种不同类型的绿泥石用于电子探针成分分析,采样位置为图3的ZK183钻孔。样品的详细特征见图4。样品类型主要包括石英黄铁矿化中的绿泥石(xes148)、围岩中的绿泥石(编号xes172(2)),矿化中的绿泥石呈鳞片状或团块状(图4a、b),围岩中的绿泥石呈细小的放射状、菊花状(图4c、d)。

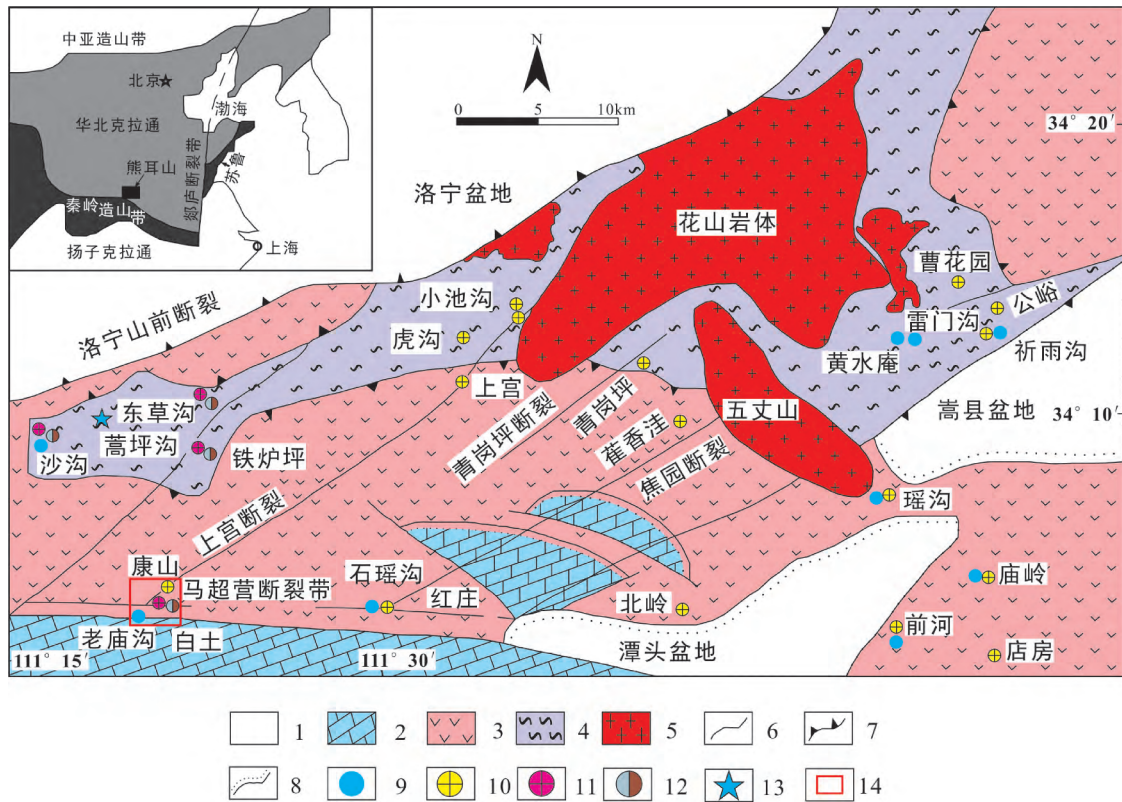


图1 华北克拉通南缘熊耳山地区地质矿产简图(改自李占轲, 2013)

1—古近系—新近系地层; 2—官道口群沉积岩; 3—熊耳群安山岩; 4—太华群变质岩; 5—中生代花岗岩类; 6—正断层; 7—拆离断层; 8—不整合地质界线; 9—铜矿床(点); 10—金矿床; 11—银矿床; 12—铅锌矿床; 13—金银铅锌矿床; 14—研究区

3.2 分析方法

本次研究采集的2件样品,通过野外观察和显微镜下鉴定后,进行电子探针(EPMA)分析测试。在2件样品中,每件样品挑选1个绿泥石作单矿物分析,为了提高数据的可靠程度,每件样品选取6个测点分析求其平均值。电子探针测试工作由中国科学院广州地球化学研究所矿物学与成矿学重点实验室完成。电子探针分析所用仪器为JEOL JXA-8230型电子显微探针,实验条件为加速电压20 kv,电流20 nA,束斑直径1 μm,检测限 $100 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$ 。

4 绿泥石化学成分特征

4.1 绿泥石类型

绿泥石化学成分数据(表1)通过微区电子探针(EPMA)分析测得。绿泥石的特征值和相关参数是基于28个氧原子计算得出的,数据见表2。考虑

到由于绿泥石颗粒细小,结构复杂及含有其他矿物的微细包裹体导致的绿泥石电子探针成分分析时产生的误差,本文在对绿泥石进行特征值和相关参数计算前剔除了因混染而产生误差的分析点。剔除的标准参照 Foster(1962)提出的以质量分数($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO}$) < 0.5%作为标准判断分析点数据是否符合要求,即:如果($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO}$) > 0.5%,则该测点需要剔除。在图解(图5A)中,康山金银铅锌矿床的两类绿泥石主要为富铁种属的蠕绿泥石(铁绿泥石)和铁镁绿泥石,与矿化相关的绿泥石位于铁绿泥石区域,围岩中绿泥石部分位于铁镁绿泥石区域。绿泥石的化学成分主要有Type I和Type II两种类型(Zane and Weiss, 1998)。Type I = $X_{\text{Mg}} + X_{\text{Fe}_{\text{tot}}} \geq X_{\text{Al}} + X_{\square}$ (X in apfu); Type II = $X_{\text{Mg}} + X_{\text{Fe}_{\text{tot}}} < X_{\text{Al}} + X_{\square}$ 。康山绿泥石主要显示Type I的化学成分特征(富铁贫镁)(图5B)(Wiewióra and Weiss, 1990)。

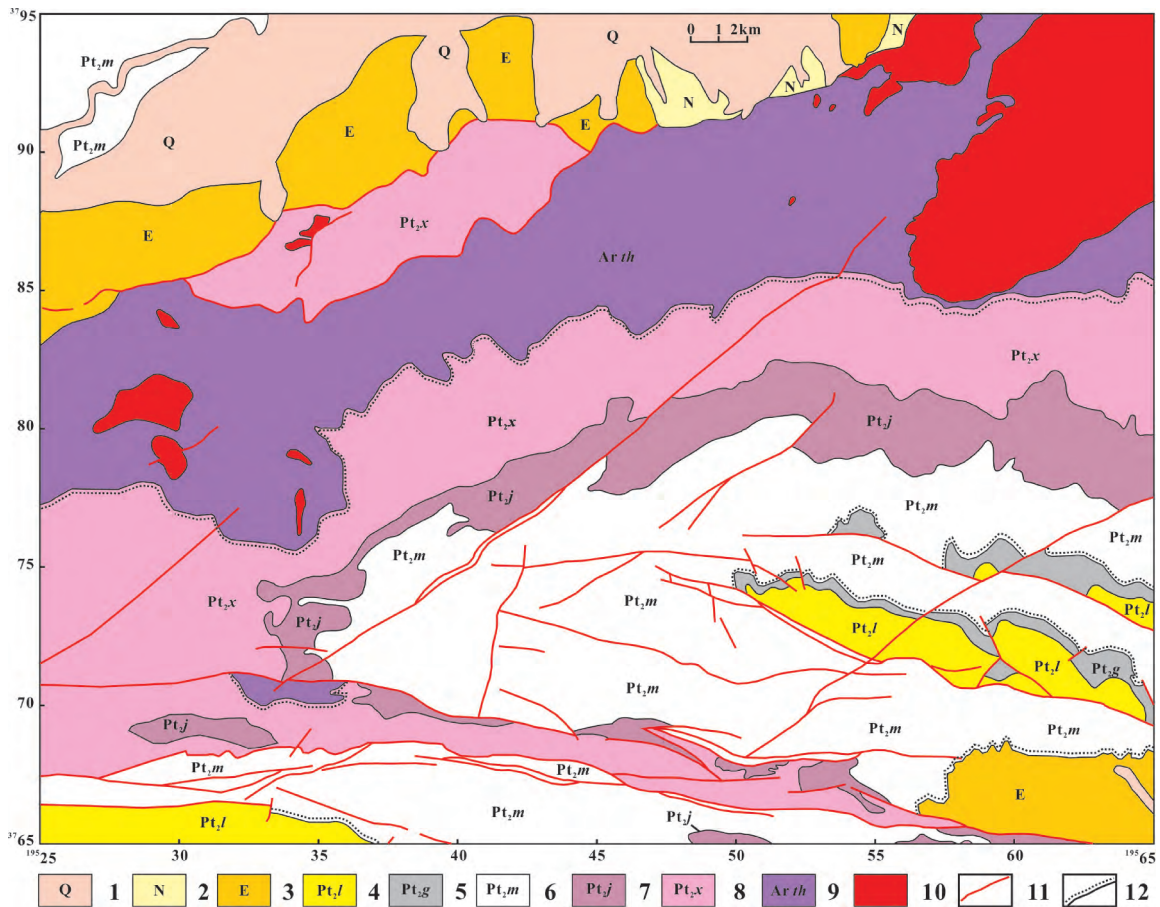


图2 康山金银铅锌矿床地质图(改自叶会寿等, 2011)

1—第四系砂砾亚砂土及砂砾石粘土; 2—新近系上部砖红色砂质粘土类钙质结核层, 下部紫红、灰黄半固结状砾石层; 3—古近系紫红色砂砾岩夹紫红色泥质细砂岩、泥质粉砂岩及石灰岩透镜体; 4—中元古界龙家园组含燧石条带白云质大理岩; 5—中元古界高山河组石英砂岩; 6—中元古界马家河组安山岩为主夹玄武安山岩及粗面岩; 7—中元古界鸡蛋坪组英安斑岩、流纹斑岩、英安斑岩夹安山岩; 8—中元古界许山组玄武安山岩、安山玢岩、安山岩; 9—太古宇角闪斜长片麻岩夹黑云斜长片麻岩、大理岩; 10—正长斑岩; 11—断层; 12—不整合地层界线

4.2 绿泥石的离子(团)置换反应

绿泥石成分重要参数的复杂性, 主要是由于随着物理化学环境的改变, 绿泥石可能会发生一些离子置换作用。如四面体位置的 Si 和 Al^{IV} 及八面体位置的 Al^{VI}、Mg、Fe²⁺、Fe³⁺ 相互之间均能发生替代。绿泥石的八面体位置也可以被 Cr、Ti、Ni、Mn、V、Cu 和 Li 占据, 从而引起绿泥石的成分变化(Deer et al., 1966; De Caritat et al., 1993; Walshe, 1986; Blumenthal, 2010)。在康山矿区的 Al^{IV}-Al^{VI} 散点图(图 6A) 上可以看出, 与矿化相关的绿泥石 Al^{IV} 和 Al^{VI} 存在着一定的正相关性(图 6A), 相关关系为 $Al^{VI} = 0.1247Al^{IV} + 2.0961$ ($R^2 = 0.02$), 而围岩中绿

泥石 Al^{IV} 和 Al^{VI} 存在着一定的负相关性(图 6A) 相关关系为 $Al^{VI} = -0.1318Al^{IV} + 2.703$ ($R^2 = 0.0761$)。表明更复杂的置换反应在围岩中绿泥石形成过程中发生(Foster, 1962)。在 Al^{IV}-Fe/(Fe+Mg) 图解中, 与矿化相关绿泥石随着 Fe/(Fe+Mg) 值的增加, Al^{IV} 值也在增加(图 6B), 而围岩中绿泥石随着 Fe/(Fe+Mg) 值的增加, Al^{IV} 值在减少(图 6B); 两类绿泥石均具有较低的 Al/(Al+Mg+Fe) 比值(<0.35)。由表 2 可知, 除 5 个分析点(xes148-1-1、xes148-1-3、xes148-1-37、xes148-1-40、xes174(2)-2-22) 大于 0.35 外, 几乎所有分析点 Al/(Al+Mg+Fe) 比值均小于或等于 0.35。在 Al/(Al+Mg+Fe) - Mg/(Fe+Mg) 图解(图 6C) 中, 与矿化相关绿泥石 Al/(Al+Mg+

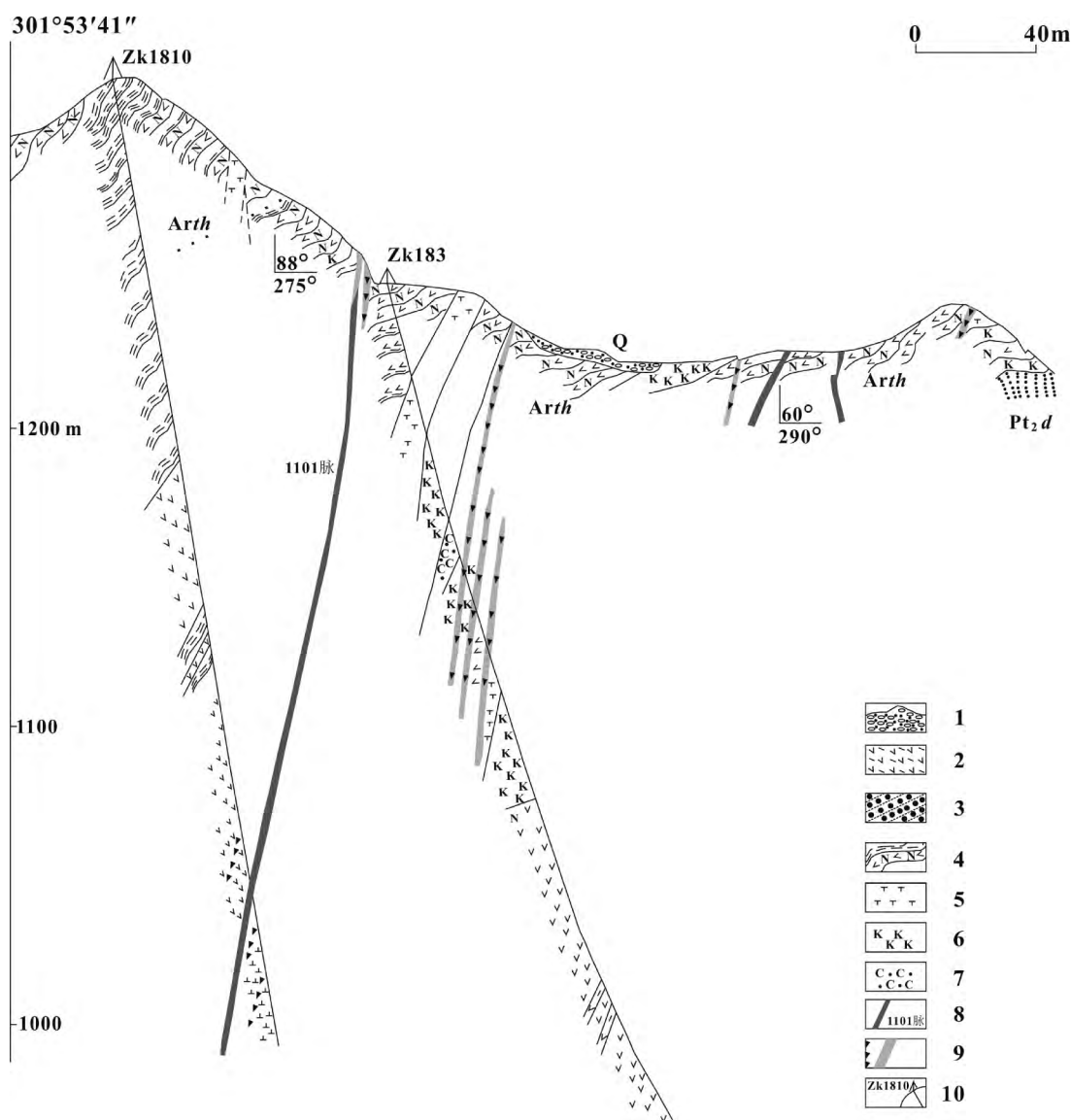


图3 康山矿床第18勘探线剖面图(据叶会寿等, 2011)

1—Q 第四系黄土、砂砾石、卵石等; 2—Pt₂x 中元古界熊耳群许山组安山岩、杏仁状安山岩, 局部夹砂岩透镜体; 3—Pt₂d 中元古界熊耳群太古石组砂岩、安山岩、粉砂质千枚岩; 4—Arth 太古宇太华群斜长角闪片麻岩、黑云片麻岩; 5—正长斑岩; 6—钾长岩; 7—黄铁绢英岩; 8—矿脉位置及编号; 9—构造带; 10—钻孔位置及编号

Fe) 与 $Mg/(Fe+Mg)$ 值总体上显示负相关性, 围岩中绿泥石 $Al/(Al+Mg+Fe)$ 值与 $Mg/(Fe+Mg)$ 值总体上显示正相关性; 在 $Fe+Al^{VI}-Mg$ 、 $Fe-Mg$ 、 $Al^{VI}-Mg$ 的关系图解(图 6D)中, 与矿化相关绿泥石阳离子之间的相关关系分别为 $Fe+Al^{VI} = -0.9886Mg + 11.843$ ($R^2=0.92$), 呈近 1:1 的负相关关系, $Fe = -0.8983Mg + 9.1158$ ($R^2=0.7425$) (图 6E), $Al^{VI} = -0.0903Mg + 2.7276$ ($R^2=0.0925$) (图 6F)。围岩中绿泥石阳离子之间的相关关系分别为 $Fe+Al^{VI} =$

$-0.3837Mg + 9.8456$ ($R^2 = 0.1445$) (图 6D), $Fe = -0.3904Mg + 7.4843$ ($R^2 = 0.0725$) (图 6E), $Al^{VI} = 0.0067Mg + 2.3613$ ($R^2 = 0.0001$) (图 6F)。

4.3 绿泥石的形成温度

尽管由于绿泥石化学成分受到水岩比例、氧逸度和硫逸度、pH 值以及围岩和热液流体成分的影响 (De Caritat, 1993; Klein, 2007), 导致基于绿泥石成分计算出的温度具有一定的不确定性。但基于绿

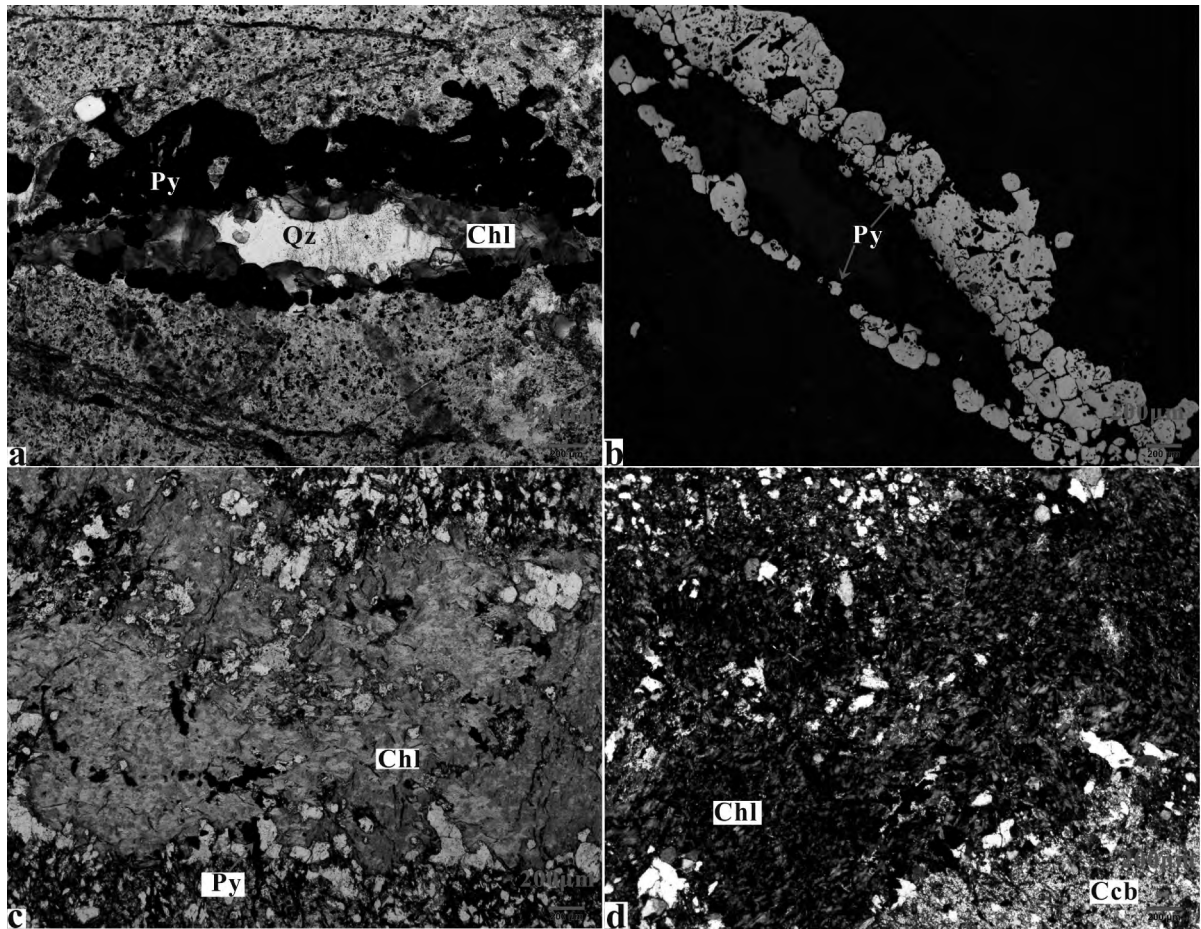


图4 康山矿床用于电子探针分析的代表性样品绿泥石镜下照片

a—石英—黄铁矿脉中的鳞片状或团块状绿泥石(单偏光镜下); b—石英—黄铁矿脉中的黄铁矿(反射光下); c—围岩中呈细小放射状、菊花状绿泥石(单偏光镜下); d—围岩中呈细小放射状、菊花状绿泥石(正交偏光); 矿物缩写: Qz—石英; Chl—绿泥石; Py—黄铁矿; Ccb—碳酸盐

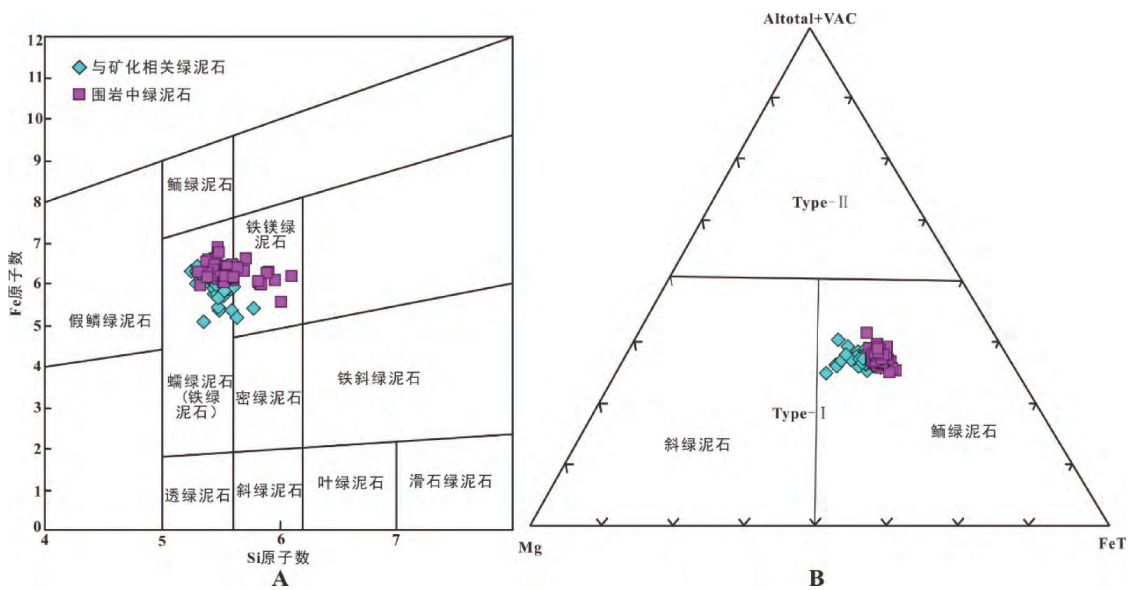


图5 绿泥石化学成分变化图解

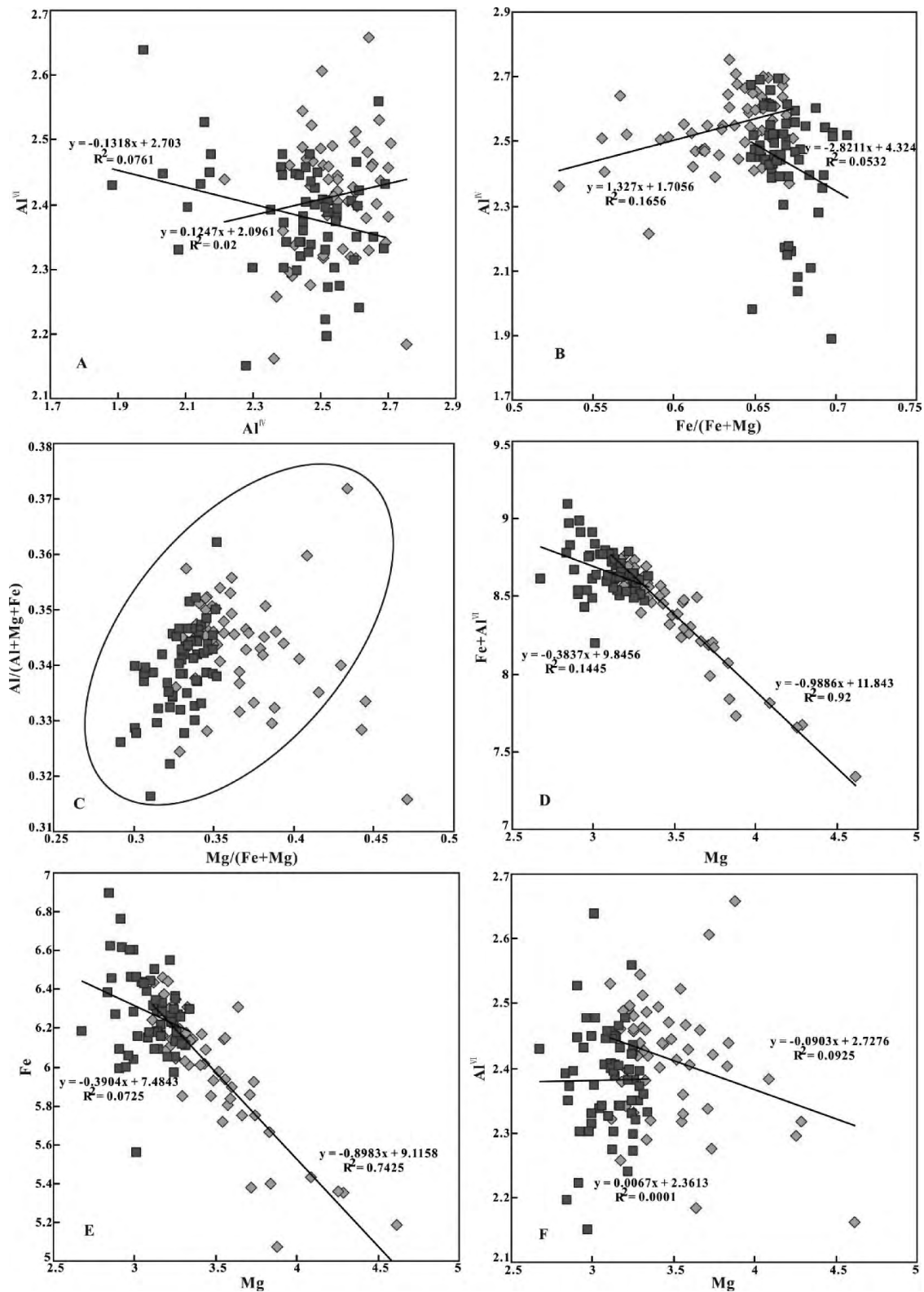


图 6 绿泥石中主要阳离子间的相关关系图解(图例同图 5)

绿泥石化学成分计算绿泥石温度的经验公式得到广泛应用 (Klein , 2007) 。绿泥石中的 Al^{IV} 与形成时的温度有很强的相关性 , 其关系式可表示为: $T(^\circ C) = 106.2Al^{IV} + 17.5$ 。运用该公式必须注意到 Al^{IV} 值会随着 $Fe/(Fe+Mg)$ 比值的 变化而变化 , 如果该公式没有经过任何校正 , 那些 $Fe/(Fe+Mg)$ 比值高的绿泥石计算出的温度就会偏高 (Zang and Fyfe , 1995) 。基于以上几点认识 , 本文依据 Cathelineau 和 Nieva (1985) , Kranidiotis 和 MacLean (1987) 提出的根据 Al^{IV} 和 $Fe/(Fe+Mg)$ 的线性关系进行校正 , 得到康山金银铅锌矿床与矿化相关绿泥石和围岩中绿泥石 Al^{IV} 校正公式分别为: $Al^{IV} \text{ corrected} = Al^{IV} \text{ measured} + 0.0268 [Fe/(Fe+Mg) - 0.65]$ 。通过计算 , 与矿化绿泥石形成的温度变化范围为 250 ~ 310 $^\circ C$ (图 7 , 表 2) , 围岩中绿泥石的温度变化范围为 220 ~ 300 $^\circ C$ (图 7 , 表 2) 。两种样品中绿泥石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 $^\circ C$ 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 8A 和图 8B 为康山金银铅锌矿床绿泥石形成温度与 Si 和 Al^{IV} 的相关图解 , 从图中可以看出 , Al^{IV} 与温度呈正相关

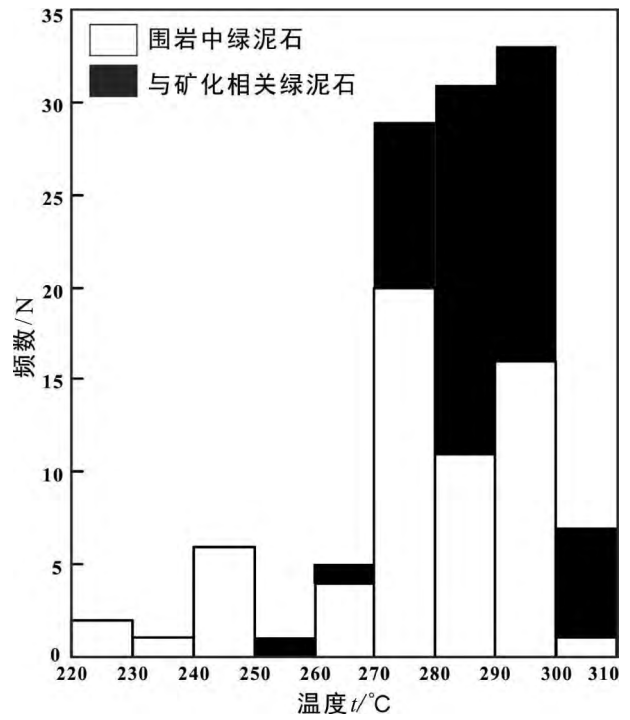


图 7 两类绿泥石温度频率分布图

趋势 , 而 Si 则恰好相反。这与 Cavaretta 等 (1982) 和 Cathelineau 等 (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遍性。

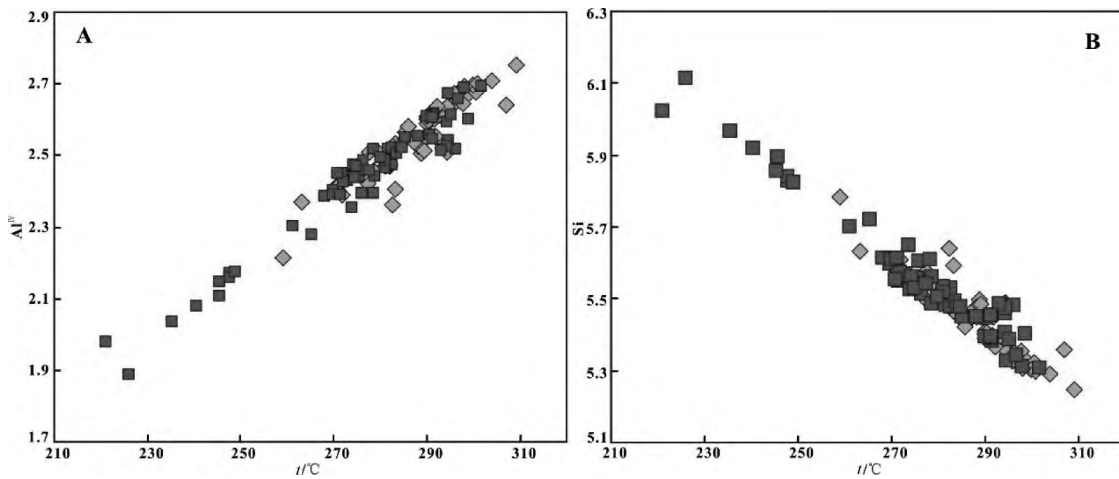


图 8 绿泥石形成温度 t 与 Al^{IV} 和 Si 相关性图解 (图例同图 5)

表1 康山金银铅锌矿床绿泥石化学成分电子探针分析结果

 $\omega_B / \%$

探针点号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl	NiO	MoO ₃	Total
xes148-1-1	24.92	0.04	19.63	29.16	1.02	11.31	-	-	-	-	-	-	86.09
xes148-1-2	24.01	0.04	19.00	33.23	0.99	11.18	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	-	88.50
xes148-1-3	24.35	0.07	20.41	27.55	0.83	11.83	0.02	0.03	0.01	-	-	-	85.10
xes148-1-4	25.21	0.04	17.53	34.34	0.66	9.52	0.07	0.03	0.04	-	-	-	87.44
xes148-1-5	24.90	0.07	19.33	32.21	0.89	10.68	-	0.02	-	-	-	-	88.10
xes148-1-6	24.17	0.04	19.57	32.94	0.80	10.03	-	0.02	-	0.04	-	-	87.60
xes148-1-7	25.67	0.01	19.09	29.51	0.64	13.46	-	0.03	-	0.02	0.01	-	88.43
xes148-1-8	24.44	0.06	19.73	33.13	0.85	10.20	-	0.02	0.02	-	-	-	88.44
xes148-1-9	24.66	0.05	18.91	33.11	0.72	10.27	-	0.02	0.04	0.03	-	0.01	87.80
xes148-1-10	24.83	0.03	19.14	33.18	0.79	10.95	-	-	0.02	0.01	-	-	88.95
xes148-1-11	25.46	0.02	18.41	31.76	0.75	11.37	0.01	0.01	-	-	-	-	87.78
xes148-1-12	24.99	0.07	19.20	32.64	0.77	10.14	-	0.02	0.02	-	-	-	87.85
xes148-1-13	25.54	0.04	18.22	34.17	0.72	10.22	-	0.03	-	-	-	-	88.93
xes148-1-14	25.31	0.06	18.35	32.00	0.74	11.45	-	0.04	0.01	0.01	0.01	-	88.00
xes148-1-15	24.92	0.05	19.09	30.80	0.79	10.70	0.02	0.01	0.02	0.03	-	0.01	86.42
xes148-1-16	24.39	0.07	19.21	33.08	0.85	9.95	0.06	0.02	0.05	0.01	0.01	-	87.70
xes148-1-17	24.01	0.02	19.25	32.60	0.71	10.31	0.10	0.01	0.02	0.01	0.01	-	87.05
xes148-1-18	24.54	0.08	19.13	32.76	0.83	9.71	0.01	0.01	0.02	0.01	-	-	87.10
xes148-1-19	24.57	0.07	18.96	32.85	0.77	10.10	0.01	-	-	0.01	-	-	87.35
xes148-1-20	24.62	0.04	19.04	30.83	0.74	11.33	0.04	-	-	0.02	-	-	86.66
xes148-1-21	24.18	0.03	18.94	32.46	0.67	10.77	-	0.04	0.03	-	-	-	87.12
xes148-1-22	25.16	0.07	19.15	31.71	0.84	10.01	0.03	0.02	0.17	0.02	-	-	87.18
xes148-1-23	24.89	0.08	18.89	31.27	0.62	10.81	0.04	0.01	0.01	-	0.01	0.01	86.63
xes148-1-24	24.12	0.06	19.60	32.51	0.80	10.46	-	-	0.02	0.01	-	0.01	87.58
xes148-1-25	24.47	0.07	19.77	33.27	0.86	9.97	-	0.02	0.02	0.01	-	-	88.47
xes148-1-26	24.34	0.08	19.55	32.36	0.87	10.00	0.02	0.02	-	0.01	0.01	-	87.26
xes148-1-27	25.70	0.05	18.30	29.21	0.67	13.12	0.04	-	0.02	-	-	-	87.11
xes148-1-28	24.94	0.04	19.13	33.39	1.15	9.66	-	-	-	-	0.01	-	88.32
xes148-1-29	25.30	0.04	19.16	29.68	0.75	12.67	0.07	0.02	0.01	-	-	0.02	87.71
xes148-1-30	23.63	0.06	19.43	32.97	0.71	9.72	-	-	-	0.01	0.02	-	86.55
xes148-1-31	24.46	0.06	18.97	32.07	0.77	10.32	-	0.04	-	0.01	-	-	86.69
xes148-1-32	24.90	0.04	18.77	31.44	0.94	10.45	-	-	-	0.02	-	0.01	86.56
xes148-1-33	25.07	0.08	18.51	32.41	0.82	9.80	-	0.02	0.02	-	0.01	-	86.73
xes148-1-34	24.81	0.04	18.45	34.32	1.15	9.43	-	0.02	0.03	-	-	-	88.26
xes148-1-35	24.39	0.07	19.49	32.97	0.84	9.79	-	0.02	0.01	-	-	-	87.57
xes148-1-36	24.85	0.05	19.09	33.18	0.84	10.02	-	-	0.01	-	-	-	88.03
xes148-1-37	23.82	0.05	19.69	33.06	0.92	9.33	-	0.01	0.03	-	-	-	86.91
xes148-1-38	24.71	0.06	19.02	31.69	0.81	10.95	-	0.01	-	0.02	-	-	87.28
xes148-1-39	24.42	0.05	18.84	30.57	0.73	10.95	0.03	0.01	0.01	0.01	-	-	85.61

续表1

探针点号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl	NiO	MoO ₃	Total
xes148-1-40	23.93	0.05	19.89	32.07	0.98	10.33	-	0.02	0.01	0.02	-	0.01	87.32
xes148-1-41	23.96	0.04	18.93	33.49	1.07	9.52	-	0.01	-	0.01	0.02	-	87.04
xes148-1-42	24.49	0.03	18.64	33.70	0.91	9.84	-	0.04	-	0.02	-	0.01	87.69
xes148-1-43	24.84	0.04	18.72	32.54	1.00	9.57	-	-	-	0.01	-	-	86.73
xes148-1-44	23.72	0.04	19.21	33.09	0.83	9.98	-	0.01	-	0.01	0.01	-	86.91
xes148-1-45	23.80	0.05	19.04	33.75	1.05	9.63	-	0.02	0.01	0.01	-	-	87.37
xes148-1-46	24.21	0.06	19.04	32.73	0.77	9.98	-	0.02	-	0.01	-	0.01	86.84
xes148-1-47	23.85	0.04	18.73	32.88	0.85	9.53	0.16	-	0.02	-	0.01	0.01	86.06
xes148-1-48	26.12	0.03	17.71	28.23	0.64	14.34	0.05	0.02	0.06	-	0.01	-	87.21
xes148-1-49	24.21	0.04	18.84	33.46	1.09	9.36	0.03	-	0.05	0.01	-	-	87.07
xes148-1-50	25.05	0.05	19.02	30.72	0.79	11.73	0.01	0.01	-	0.01	-	-	87.38
xes148-1-51	24.84	0.03	18.64	31.25	0.82	10.82	-	-	0.01	-	-	-	86.41
xes148-1-52	26.04	0.02	17.73	29.06	0.59	11.59	0.10	0.03	0.06	-	-	-	85.22
xes148-1-53	25.15	0.04	18.05	31.78	0.75	10.70	-	-	0.01	-	-	-	86.49
xes148-1-54	24.70	0.05	18.96	32.06	0.65	10.67	0.06	0.02	0.03	0.01	-	-	87.20
xes174(2)-2-1	24.77	0.05	18.52	33.55	1.22	9.83	-	0.02	-	0.01	-	-	87.96
xes174(2)-2-2	24.85	0.04	18.38	34.01	1.24	9.91	-	-	0.02	0.03	-	0.01	88.49
xes174(2)-2-3	24.65	0.03	18.47	34.61	1.29	9.49	-	0.01	-	0.04	-	-	88.59
xes174(2)-2-4	25.00	0.04	18.87	33.09	1.11	9.89	-	0.03	-	-	-	0.01	88.04
xes174(2)-2-5	24.92	0.03	18.38	33.03	1.09	9.82	-	0.01	-	-	-	-	87.28
xes174(2)-2-6	23.92	0.05	18.94	32.67	1.06	9.67	-	0.02	-	0.01	-	-	86.33
xes174(2)-2-8	25.79	0.14	17.63	34.12	0.65	9.51	-	0.03	0.27	0.02	-	-	88.16
xes174(2)-2-9	24.56	0.01	17.83	36.23	1.32	8.56	-	-	-	0.01	-	-	88.52
xes174(2)-2-10	24.36	0.02	18.25	34.70	1.34	8.75	-	0.11	0.03	0.02	-	-	87.58
xes174(2)-2-11	24.25	0.03	18.62	34.80	1.26	9.02	-	0.03	0.01	0.03	-	-	88.03
xes174(2)-2-12	24.35	0.00	19.03	33.95	1.14	9.29	0.02	0.04	0.03	0.01	0.01	-	87.86
xes174(2)-2-13	24.96	0.04	18.91	34.13	1.04	9.50	-	-	0.02	0.02	-	-	88.62
xes174(2)-2-14	24.89	0.02	18.34	34.38	1.24	9.20	-	0.01	0.02	0.05	-	-	88.14
xes174(2)-2-15	25.07	0.02	17.79	34.35	1.57	8.94	0.03	-	-	-	0.01	-	87.79
xes174(2)-2-16	24.74	0.02	18.84	33.73	1.19	9.51	-	-	-	0.01	-	-	88.04
xes174(2)-2-17	24.30	0.01	18.30	34.79	1.39	8.49	-	0.01	-	0.03	-	-	87.32
xes174(2)-2-18	25.07	0.04	18.17	33.51	1.04	9.89	-	0.03	-	-	-	-	87.74
xes174(2)-2-19	24.78	0.04	18.97	33.68	1.14	9.84	-	0.02	0.01	-	-	-	88.48
xes174(2)-2-20	24.24	0.02	18.43	34.43	1.08	9.72	-	0.01	-	0.03	-	-	87.94
xes174(2)-2-21	24.77	0.02	18.79	33.85	1.15	9.52	-	0.02	0.01	0.01	0.03	-	88.17
xes174(2)-2-22	24.40	0.04	20.25	32.33	1.16	9.97	-	0.02	0.27	0.01	-	-	88.46
xes174(2)-2-23	25.24	0.05	18.14	34.12	0.80	9.88	-	0.01	0.04	0.01	0.02	-	88.29
xes174(2)-2-24	25.10	0.03	17.95	32.86	0.86	9.51	-	0.31	0.07	0.21	-	-	86.89
xes174(2)-2-25	25.10	0.04	18.29	33.96	1.05	9.61	-	0.01	0.02	0.02	-	-	88.08

续表1

探针点号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl	NiO	MoO ₃	Total
xes174(2)-2-26	24.77	0.00	18.06	35.85	1.44	8.83	-	0.01	0.02	-	-	-	88.97
xes174(2)-2-28	25.04	0.02	18.36	34.52	1.07	9.41	-	0.04	-	-	-	-	88.46
xes174(2)-2-29	24.89	0.04	18.67	33.93	1.00	9.45	0.01	0.02	-	0.01	-	-	88.03
xes174(2)-2-30	24.51	0.01	18.70	34.33	1.33	9.08	-	-	-	0.01	-	-	87.98
xes174(2)-2-31	25.01	0.03	18.01	34.36	1.47	8.56	0.03	0.05	0.04	0.01	-	-	87.58
xes174(2)-2-32	25.19	0.02	18.53	33.09	1.21	10.03	-	0.03	-	0.01	-	-	88.11
xes174(2)-2-33	25.69	0.02	16.83	35.16	1.74	8.96	-	0.03	0.01	-	-	-	88.43
xes174(2)-2-34	24.98	0.02	18.20	34.33	1.15	9.22	-	-	0.01	0.02	0.01	-	87.94
xes174(2)-2-35	24.61	0.02	18.90	33.91	1.15	9.50	-	-	0.01	0.01	-	-	88.09
xes174(2)-2-36	25.02	0.05	18.57	33.42	0.94	9.58	0.05	0.07	0.05	0.02	-	-	87.76
xes174(2)-2-37	24.25	0.05	19.04	33.01	1.11	9.74	0.02	0.06	0.08	0.02	-	-	87.38
xes174(2)-2-38	24.33	0.04	18.88	33.12	1.08	9.94	0.05	0.07	0.07	0.02	-	-	87.59
xes174(2)-2-40	26.17	0.11	17.53	32.42	1.16	9.02	0.03	0.05	0.08	0.05	-	-	86.61
xes174(2)-2-41	25.12	0.04	18.62	32.82	1.34	9.52	0.03	0.05	0.04	-	-	-	87.58
xes174(2)-2-42	24.27	0.05	19.35	33.60	1.18	10.24	-	0.01	0.03	0.02	-	-	88.74
xes174(2)-2-44	25.03	0.06	18.30	32.48	1.09	9.34	0.06	0.03	0.09	0.01	0.01	-	86.50
xes174(2)-2-47	25.27	0.05	18.53	33.03	1.19	10.13	-	0.04	0.06	0.01	-	-	88.31
xes174(2)-2-50	24.83	0.08	18.83	32.87	1.18	10.01	-	0.03	0.03	-	-	-	87.86
xes174(2)-2-51	24.69	0.07	18.77	33.03	1.09	9.46	-	0.01	0.07	0.01	-	-	87.19
xes174(2)-2-53	25.07	0.04	18.86	32.70	1.33	9.89	-	0.04	0.05	-	-	-	87.98
xes174(2)-2-54	24.25	0.09	19.19	33.51	1.36	9.88	-	0.03	0.04	-	-	-	88.35
xes174(2)-2-55	25.16	0.07	18.72	33.40	1.03	9.49	-	0.04	0.03	0.01	-	-	87.95
xes174(2)-2-56	24.95	0.07	18.91	32.62	1.10	9.69	0.04	0.02	0.07	0.01	-	-	87.47
xes174(2)-2-60	24.80	0.05	18.10	32.50	0.86	9.15	0.14	0.14	0.08	0.02	-	-	85.82
xes174(2)-2-62	24.88	0.04	18.72	33.17	1.18	9.32	-	0.03	0.05	0.03	0.01	-	87.43
xes174(2)-2-76	25.28	0.27	17.97	34.17	0.86	8.53	0.07	0.03	0.27	0.01	-	-	87.44
xes174(2)-2-80	23.87	0.04	19.44	33.13	1.05	9.56	0.07	0.08	0.08	-	0.01	-	87.32
xes174(2)-2-88	23.43	0.02	18.62	31.61	1.11	9.23	0.11	0.09	0.06	0.01	-	-	84.27
xes174(2)-2-89	27.48	0.07	17.72	30.32	0.94	9.22	0.11	0.15	0.12	0.05	-	-	86.18
xes174(2)-2-90	26.07	0.09	15.50	31.50	1.06	7.65	0.06	0.12	0.09	0.01	-	-	82.15
xes174(2)-2-94	26.41	0.05	16.63	33.50	0.58	8.98	0.07	0.03	0.24	0.01	-	-	86.50
xes174(2)-2-95	26.11	0.05	16.55	31.86	0.98	8.53	0.05	0.07	0.08	-	-	-	84.27
xes174(2)-2-97	25.90	0.09	16.72	32.95	0.84	8.51	0.01	0.04	0.12	-	-	-	85.19
xes174(2)-2-98	25.51	0.40	16.83	31.25	0.92	8.62	0.04	0.04	0.24	-	-	0.02	83.87
xes174(2)-2-103	25.40	0.05	18.65	33.33	1.19	9.17	0.00	0.05	0.10	0.01	-	-	87.95
xes174(2)-2-104	25.79	0.08	17.41	32.06	1.07	8.80	0.03	0.07	0.08	0.01	0.01	-	85.40

注“-”为检测限以下。

表2 绿泥石结构式和特征值计算(以28个氧原子为基准)

探针点号	Si	Al ^{IV}	Al ^{VI}	Ti	Cr	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ni	Ca	Na	K
xes148-1-1	5.50	2.50	2.61	0.01	0.01	0.07	5.31	0.19	3.72	0.00	0.00	0.00	0.00
xes148-1-2	5.25	2.75	2.18	0.01	0.00	0.00	6.31	0.18	3.64	0.00	0.00	0.02	0.01
xes148-1-3	5.36	2.64	2.66	0.01	0.11	0.07	5.00	0.15	3.88	0.00	0.00	0.03	0.01
xes148-1-4	5.63	2.37	2.26	0.01	0.00	0.00	6.46	0.12	3.17	0.00	0.02	0.03	0.02
xes148-1-5	5.45	2.55	2.45	0.01	0.00	0.00	5.93	0.16	3.48	0.00	0.00	0.02	0.00
xes148-1-6	5.35	2.65	2.46	0.01	0.00	0.00	6.16	0.15	3.31	0.00	0.00	0.01	0.00
xes148-1-7	5.49	2.51	2.32	0.00	0.01	0.00	5.35	0.12	4.29	0.00	0.00	0.02	0.00
xes148-1-8	5.35	2.65	2.46	0.01	0.00	0.00	6.14	0.16	3.33	0.00	0.00	0.01	0.01
xes148-1-9	5.41	2.59	2.32	0.01	0.11	0.00	6.14	0.13	3.36	0.00	0.00	0.02	0.02
xes148-1-10	5.39	2.61	2.32	0.01	0.00	0.00	6.15	0.15	3.55	0.00	0.00	0.00	0.01
xes148-1-11	5.58	2.42	2.34	0.00	0.00	0.00	5.85	0.14	3.71	0.00	0.00	0.01	0.00
xes148-1-12	5.50	2.50	2.49	0.01	0.00	0.00	6.01	0.14	3.33	0.00	0.00	0.02	0.01
xes148-1-13	5.58	2.42	2.29	0.01	0.00	0.00	6.30	0.13	3.33	0.00	0.00	0.02	0.00
xes148-1-14	5.53	2.47	2.28	0.01	0.00	0.00	5.93	0.14	3.73	0.00	0.00	0.03	0.01
xes148-1-15	5.53	2.47	2.52	0.01	0.00	0.04	5.67	0.15	3.54	0.00	0.01	0.00	0.01
xes148-1-16	5.40	2.60	2.42	0.01	0.00	0.00	6.19	0.16	3.28	0.00	0.01	0.02	0.03
xes148-1-17	5.34	2.66	2.40	0.00	0.00	0.00	6.17	0.13	3.41	0.00	0.02	0.01	0.01
xes148-1-18	5.47	2.53	2.49	0.01	0.00	0.00	6.11	0.16	3.22	0.00	0.00	0.01	0.01
xes148-1-19	5.45	2.55	2.42	0.01	0.00	0.00	6.14	0.15	3.34	0.00	0.00	0.00	0.00
xes148-1-20	5.45	2.55	2.42	0.01	0.00	0.00	5.75	0.14	3.74	0.00	0.01	0.00	0.00
xes148-1-21	5.36	2.64	2.33	0.00	0.00	0.00	6.15	0.13	3.56	0.00	0.00	0.03	0.02
xes148-1-22	5.55	2.45	2.54	0.01	0.00	0.05	5.81	0.16	3.29	0.00	0.01	0.02	0.10
xes148-1-23	5.52	2.48	2.47	0.01	0.00	0.01	5.80	0.12	3.58	0.00	0.01	0.01	0.01
xes148-1-24	5.32	2.68	2.44	0.01	0.00	0.00	6.09	0.15	3.44	0.00	0.00	0.00	0.01
xes148-1-25	5.36	2.64	2.48	0.01	0.00	0.00	6.16	0.16	3.26	0.00	0.00	0.02	0.01
xes148-1-26	5.40	2.60	2.51	0.01	0.00	0.00	6.03	0.16	3.31	0.00	0.00	0.02	0.00
xes148-1-27	5.59	2.41	2.30	0.01	0.00	0.00	5.36	0.12	4.26	0.00	0.01	0.00	0.01
xes148-1-28	5.49	2.51	2.46	0.01	0.00	0.00	6.16	0.21	3.17	0.00	0.00	0.00	0.00
xes148-1-29	5.48	2.52	2.38	0.01	0.00	0.00	5.43	0.14	4.09	0.00	0.02	0.02	0.00
xes148-1-30	5.30	2.70	2.46	0.01	0.00	0.00	6.28	0.14	3.25	0.00	0.00	0.00	0.00
xes148-1-31	5.45	2.55	2.44	0.01	0.00	0.00	6.02	0.15	3.43	0.00	0.00	0.03	0.00
xes148-1-32	5.54	2.46	2.47	0.01	0.00	0.02	5.83	0.18	3.47	0.00	0.00	0.00	0.00
xes148-1-33	5.59	2.41	2.46	0.01	0.00	0.04	6.01	0.16	3.26	0.00	0.00	0.02	0.01
xes148-1-34	5.49	2.51	2.32	0.01	0.00	0.00	6.43	0.22	3.11	0.00	0.00	0.02	0.02
xes148-1-35	5.40	2.60	2.50	0.01	0.00	0.00	6.14	0.16	3.23	0.00	0.00	0.02	0.01
xes148-1-36	5.48	2.52	2.44	0.01	0.00	0.00	6.15	0.16	3.29	0.00	0.00	0.00	0.00
xes148-1-37	5.33	2.67	2.53	0.01	0.00	0.00	6.24	0.17	3.11	0.00	0.00	0.01	0.02
xes148-1-38	5.45	2.55	2.41	0.01	0.00	0.00	5.90	0.15	3.60	0.00	0.00	0.01	0.00
xes148-1-39	5.48	2.52	2.46	0.01	0.00	0.00	5.75	0.14	3.66	0.00	0.01	0.01	0.00

续表2

探针点号	Si	Al ^{IV}	Al ^{VI}	Ti	Cr	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ni	Ca	Na	K
xes148-1-40	5.29	2.71	2.49	0.01	0.00	0.00	6.01	0.18	3.40	0.00	0.00	0.02	0.01
xes148-1-41	5.36	2.64	2.38	0.01	0.00	0.00	6.37	0.20	3.18	0.00	0.00	0.01	0.00
xes148-1-42	5.44	2.56	2.33	0.00	0.00	0.00	6.35	0.17	3.25	0.00	0.00	0.04	0.00
xes148-1-43	5.55	2.45	2.49	0.01	0.00	0.03	6.05	0.19	3.19	0.00	0.00	0.00	0.00
xes148-1-44	5.30	2.70	2.38	0.01	0.00	0.00	6.31	0.16	3.32	0.00	0.00	0.01	0.00
xes148-1-45	5.31	2.69	2.34	0.01	0.00	0.00	6.44	0.20	3.20	0.00	0.00	0.02	0.01
xes148-1-46	5.40	2.60	2.43	0.01	0.00	0.00	6.17	0.15	3.32	0.00	0.00	0.02	0.00
xes148-1-47	5.39	2.61	2.40	0.01	0.00	0.00	6.30	0.16	3.21	0.00	0.04	0.00	0.01
xes148-1-48	5.64	2.36	2.16	0.00	0.00	0.00	5.18	0.12	4.61	0.00	0.01	0.02	0.03
xes148-1-49	5.42	2.58	2.41	0.01	0.00	0.00	6.34	0.21	3.12	0.00	0.01	0.00	0.03
xes148-1-50	5.48	2.52	2.40	0.01	0.00	0.00	5.67	0.15	3.83	0.00	0.00	0.01	0.00
xes148-1-51	5.53	2.47	2.43	0.01	0.00	0.00	5.83	0.15	3.59	0.00	0.00	0.00	0.01
xes148-1-52	5.79	2.21	2.44	0.00	0.00	0.11	5.28	0.11	3.84	0.00	0.02	0.02	0.03
xes148-1-53	5.61	2.39	2.36	0.01	0.00	0.00	5.94	0.14	3.56	0.00	0.00	0.00	0.01
xes148-1-54	5.46	2.54	2.41	0.01	0.00	0.00	5.98	0.12	3.52	0.00	0.01	0.01	0.02
xes174(2)-2-1	5.48	2.52	2.33	0.01	0.00	0.00	6.29	0.23	3.25	0.00	0.00	0.02	0.00
xes174(2)-2-2	5.48	2.52	2.27	0.01	0.00	0.00	6.36	0.23	3.26	0.00	0.00	0.00	0.01
xes174(2)-2-3	5.44	2.56	2.27	0.00	0.00	0.00	6.50	0.24	3.12	0.00	0.00	0.01	0.00
xes174(2)-2-4	5.51	2.49	2.43	0.01	0.00	0.00	6.13	0.21	3.25	0.00	0.00	0.03	0.00
xes174(2)-2-5	5.55	2.45	2.38	0.00	0.00	0.00	6.18	0.21	3.26	0.00	0.00	0.01	0.00
xes174(2)-2-6	5.38	2.62	2.42	0.01	0.00	0.00	6.23	0.20	3.24	0.00	0.00	0.01	0.00
xes174(2)-2-8	5.70	2.30	2.30	0.02	0.00	0.00	6.31	0.12	3.13	0.00	0.00	0.02	0.15
xes174(2)-2-9	5.48	2.52	2.20	0.00	0.00	0.00	6.90	0.25	2.85	0.00	0.00	0.00	0.00
xes174(2)-2-10	5.46	2.54	2.30	0.00	0.00	0.00	6.61	0.25	2.92	0.00	0.00	0.09	0.01
xes174(2)-2-11	5.40	2.60	2.31	0.00	0.00	0.00	6.60	0.24	2.99	0.00	0.00	0.03	0.00
xes174(2)-2-12	5.41	2.59	2.40	0.00	0.00	0.00	6.39	0.21	3.08	0.00	0.00	0.04	0.02
xes174(2)-2-13	5.49	2.51	2.41	0.01	0.00	0.00	6.32	0.19	3.12	0.00	0.00	0.00	0.01
xes174(2)-2-14	5.53	2.47	2.34	0.00	0.00	0.00	6.43	0.23	3.04	0.00	0.00	0.01	0.01
xes174(2)-2-15	5.61	2.39	2.30	0.00	0.00	0.00	6.46	0.30	2.98	0.00	0.01	0.00	0.00
xes174(2)-2-16	5.48	2.52	2.41	0.00	0.00	0.00	6.29	0.22	3.14	0.00	0.00	0.00	0.00
xes174(2)-2-17	5.48	2.52	2.35	0.00	0.00	0.00	6.62	0.26	2.85	0.00	0.00	0.01	0.00
xes174(2)-2-18	5.56	2.44	2.32	0.01	0.00	0.00	6.27	0.19	3.27	0.00	0.00	0.03	0.00
xes174(2)-2-19	5.45	2.55	2.38	0.01	0.00	0.00	6.26	0.21	3.23	0.00	0.00	0.01	0.00
xes174(2)-2-20	5.39	2.61	2.24	0.00	0.00	0.00	6.55	0.20	3.22	0.00	0.00	0.01	0.00
xes174(2)-2-21	5.48	2.52	2.39	0.00	0.00	0.00	6.32	0.22	3.14	0.01	0.00	0.02	0.00
xes174(2)-2-22	5.33	2.67	2.56	0.01	0.00	0.00	5.97	0.21	3.24	0.00	0.00	0.02	0.15
xes174(2)-2-23	5.57	2.43	2.30	0.01	0.00	0.00	6.35	0.15	3.25	0.00	0.00	0.01	0.02
xes174(2)-2-24	5.60	2.40	2.34	0.00	0.00	0.00	6.16	0.16	3.16	0.00	0.00	0.26	0.04
xes174(2)-2-25	5.56	2.44	2.34	0.01	0.00	0.00	6.33	0.20	3.17	0.00	0.00	0.00	0.01

续表2

探针点号	Si	Al ^{IV}	Al ^{VI}	Ti	Cr	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ni	Ca	Na	K
xes174(2)-2-26	5.49	2.51	2.22	0.00	0.00	0.00	6.76	0.27	2.91	0.00	0.00	0.00	0.01
xes174(2)-2-28	5.53	2.47	2.33	0.00	0.00	0.00	6.44	0.20	3.10	0.00	0.00	0.04	0.00
xes174(2)-2-29	5.52	2.48	2.40	0.01	0.00	0.00	6.32	0.19	3.12	0.00	0.00	0.01	0.00
xes174(2)-2-30	5.45	2.55	2.37	0.00	0.00	0.00	6.46	0.25	3.01	0.00	0.00	0.00	0.00
xes174(2)-2-31	5.61	2.39	2.37	0.01	0.00	0.00	6.45	0.28	2.86	0.00	0.01	0.04	0.02
xes174(2)-2-32	5.55	2.45	2.37	0.00	0.00	0.00	6.13	0.23	3.30	0.00	0.00	0.03	0.00
xes174(2)-2-33	5.72	2.28	2.15	0.00	0.00	0.00	6.60	0.33	2.97	0.00	0.00	0.03	0.01
xes174(2)-2-34	5.56	2.44	2.34	0.00	0.00	0.00	6.43	0.22	3.06	0.00	0.00	0.00	0.00
xes174(2)-2-35	5.45	2.55	2.39	0.00	0.00	0.00	6.34	0.22	3.13	0.00	0.00	0.00	0.01
xes174(2)-2-36	5.54	2.46	2.40	0.01	0.00	0.00	6.22	0.18	3.17	0.00	0.01	0.06	0.03
xes174(2)-2-37	5.39	2.61	2.40	0.01	0.00	0.00	6.23	0.21	3.23	0.00	0.01	0.05	0.05
xes174(2)-2-38	5.39	2.61	2.35	0.01	0.00	0.00	6.25	0.20	3.28	0.00	0.01	0.06	0.04
xes174(2)-2-40	5.83	2.17	2.45	0.02	0.00	0.17	5.87	0.22	2.99	0.00	0.01	0.04	0.04
xes174(2)-2-41	5.57	2.43	2.45	0.01	0.00	0.00	6.09	0.25	3.15	0.00	0.01	0.04	0.02
xes174(2)-2-42	5.31	2.69	2.33	0.01	0.00	0.00	6.30	0.22	3.34	0.00	0.00	0.01	0.02
xes174(2)-2-44	5.61	2.39	2.46	0.01	0.00	0.04	6.06	0.21	3.12	0.00	0.01	0.02	0.05
xes174(2)-2-47	5.55	2.45	2.36	0.01	0.00	0.00	6.11	0.22	3.32	0.00	0.00	0.03	0.03
xes174(2)-2-48	5.84	2.16	2.53	0.02	0.00	0.14	5.84	0.12	2.91	0.00	0.00	0.02	0.36
xes174(2)-2-50	5.48	2.52	2.40	0.01	0.00	0.00	6.12	0.22	3.30	0.00	0.00	0.02	0.02
xes174(2)-2-51	5.51	2.49	2.45	0.01	0.00	0.00	6.18	0.21	3.14	0.00	0.00	0.01	0.04
xes174(2)-2-53	5.53	2.47	2.44	0.01	0.00	0.00	6.05	0.25	3.25	0.00	0.00	0.03	0.03
xes174(2)-2-54	5.34	2.66	2.35	0.02	0.00	0.00	6.30	0.25	3.24	0.00	0.00	0.02	0.02
xes174(2)-2-55	5.56	2.44	2.44	0.01	0.00	0.01	6.17	0.19	3.13	0.00	0.00	0.04	0.02
xes174(2)-2-56	5.53	2.47	2.48	0.01	0.00	0.01	6.04	0.21	3.20	0.00	0.01	0.02	0.04
xes174(2)-2-60	5.61	2.39	2.44	0.01	0.00	0.01	6.14	0.16	3.09	0.00	0.03	0.12	0.04
xes174(2)-2-62	5.54	2.46	2.46	0.01	0.00	0.00	6.18	0.22	3.09	0.00	0.00	0.02	0.03
xes174(2)-2-76	5.65	2.35	2.39	0.05	0.00	0.03	6.35	0.16	2.84	0.00	0.02	0.03	0.15
xes174(2)-2-80	5.31	2.69	2.43	0.01	0.00	0.00	6.28	0.20	3.17	0.00	0.02	0.07	0.04
xes174(2)-2-88	5.39	2.61	2.46	0.00	0.00	0.00	6.16	0.22	3.17	0.00	0.03	0.08	0.04
xes174(2)-2-89	6.02	1.98	2.64	0.01	0.00	0.35	5.21	0.17	3.01	0.00	0.03	0.13	0.07
xes174(2)-2-90	6.11	1.89	2.43	0.02	0.00	0.29	5.89	0.21	2.67	0.00	0.02	0.11	0.05
xes174(2)-2-94	5.92	2.08	2.33	0.01	0.00	0.12	6.17	0.11	3.00	0.00	0.02	0.03	0.13
xes174(2)-2-95	5.97	2.03	2.45	0.01	0.00	0.22	5.88	0.19	2.91	0.00	0.01	0.06	0.05
xes174(2)-2-97	5.89	2.11	2.39	0.01	0.00	0.15	6.12	0.16	2.89	0.00	0.00	0.04	0.07
xes174(2)-2-98	5.85	2.15	2.43	0.07	0.00	0.20	5.80	0.18	2.95	0.00	0.01	0.04	0.14
xes174(2)-2-103	5.61	2.39	2.48	0.01	0.00	0.04	6.12	0.22	3.02	0.00	0.00	0.04	0.06
xes174(2)-2-104	5.82	2.18	2.48	0.01	0.00	0.16	5.89	0.20	2.96	0.00	0.01	0.06	0.05

续表 2

探针点号	Al/(Al+Mg+Fe)	Mg/(Fe+Mg)	Fe/(Fe+Mg)	Al ^{IV} correct	t/°C	Al ^{Total} +VAC
xes148-1-1	0.36	0.41	0.59	2.56	288.86	5.27
xes148-1-2	0.33	0.37	0.63	2.75	309.26	4.61
xes148-1-3	0.37	0.43	0.57	2.73	307.10	5.49
xes148-1-4	0.32	0.33	0.67	2.31	263.25	4.60
xes148-1-5	0.35	0.37	0.63	2.55	288.25	4.95
xes148-1-6	0.35	0.35	0.65	2.63	296.31	5.03
xes148-1-7	0.33	0.44	0.56	2.61	294.47	4.74
xes148-1-8	0.35	0.35	0.65	2.62	296.14	5.01
xes148-1-9	0.34	0.35	0.65	2.57	290.07	4.84
xes148-1-10	0.34	0.37	0.63	2.60	293.58	4.76
xes148-1-11	0.33	0.39	0.61	2.45	277.41	4.72
xes148-1-12	0.35	0.36	0.64	2.48	280.95	5.00
xes148-1-13	0.33	0.35	0.65	2.38	270.75	4.64
xes148-1-14	0.33	0.39	0.61	2.49	281.91	4.66
xes148-1-15	0.35	0.38	0.62	2.49	281.88	5.11
xes148-1-16	0.35	0.35	0.65	2.57	290.77	4.96
xes148-1-17	0.35	0.36	0.64	2.65	298.48	4.94
xes148-1-18	0.35	0.35	0.65	2.50	283.22	5.03
xes148-1-19	0.34	0.35	0.65	2.52	285.51	4.91
xes148-1-20	0.34	0.39	0.61	2.58	291.89	4.92
xes148-1-21	0.34	0.37	0.63	2.64	297.81	4.81
xes148-1-22	0.35	0.36	0.64	2.43	276.02	5.18
xes148-1-23	0.35	0.38	0.62	2.49	282.05	4.97
xes148-1-24	0.35	0.36	0.64	2.66	300.52	4.99
xes148-1-25	0.35	0.35	0.65	2.61	294.23	5.05
xes148-1-26	0.35	0.35	0.65	2.58	291.67	5.09
xes148-1-27	0.33	0.44	0.56	2.50	283.30	4.66
xes148-1-28	0.35	0.34	0.66	2.47	279.54	4.95
xes148-1-29	0.34	0.43	0.57	2.60	293.48	4.85
xes148-1-30	0.35	0.34	0.66	2.66	300.01	5.02
xes148-1-31	0.35	0.36	0.64	2.54	287.39	4.95
xes148-1-32	0.35	0.37	0.63	2.46	278.75	4.97
xes148-1-33	0.34	0.35	0.65	2.38	270.41	4.97
xes148-1-34	0.34	0.33	0.67	2.45	277.66	4.74
xes148-1-35	0.35	0.34	0.66	2.57	289.99	5.06
xes148-1-36	0.34	0.35	0.65	2.50	282.55	4.92
xes148-1-37	0.36	0.33	0.67	2.62	296.00	5.14
xes148-1-38	0.34	0.38	0.62	2.56	289.61	4.89
xes148-1-39	0.35	0.39	0.61	2.55	288.19	4.97

续表2

探针点号	Al/(Al+Mg+Fe)	Mg/(Fe+Mg)	Fe/(Fe+Mg)	Al ^{IV} correct	t/°C	Al ^{Total} +VAC
xes148-1-40	0.36	0.36	0.64	2.70	303.91	5.10
xes148-1-41	0.34	0.33	0.67	2.59	292.13	4.88
xes148-1-42	0.34	0.34	0.66	2.52	285.41	4.78
xes148-1-43	0.35	0.34	0.66	2.41	273.75	5.01
xes148-1-44	0.35	0.34	0.66	2.67	300.79	4.90
xes148-1-45	0.34	0.33	0.67	2.64	298.08	4.84
xes148-1-46	0.35	0.35	0.65	2.57	290.32	4.94
xes148-1-47	0.34	0.34	0.66	2.57	290.04	4.93
xes148-1-48	0.32	0.47	0.53	2.49	282.46	4.44
xes148-1-49	0.35	0.33	0.67	2.53	285.88	4.91
xes148-1-50	0.34	0.40	0.60	2.56	289.29	4.87
xes148-1-51	0.34	0.38	0.62	2.48	281.16	4.88
xes148-1-52	0.34	0.42	0.58	2.28	259.14	4.98
xes148-1-53	0.33	0.37	0.63	2.40	271.94	4.74
xes148-1-54	0.34	0.37	0.63	2.54	287.15	4.92
xes174(2) -2-1	0.34	0.34	0.66	2.49	281.70	4.75
xes174(2) -2-2	0.33	0.34	0.66	2.50	282.76	4.66
xes174(2) -2-3	0.33	0.32	0.68	2.57	290.55	4.68
xes174(2) -2-4	0.34	0.35	0.65	2.44	276.51	4.89
xes174(2) -2-5	0.34	0.35	0.65	2.41	272.92	4.80
xes174(2) -2-6	0.35	0.34	0.66	2.58	291.63	4.94
xes174(2) -2-8	0.33	0.33	0.67	2.30	261.30	4.71
xes174(2) -2-9	0.33	0.29	0.71	2.63	296.30	4.52
xes174(2) -2-10	0.34	0.31	0.69	2.61	294.57	4.75
xes174(2) -2-11	0.34	0.31	0.69	2.65	298.86	4.76
xes174(2) -2-12	0.35	0.32	0.68	2.61	294.43	4.91
xes174(2) -2-13	0.34	0.33	0.67	2.51	283.54	4.87
xes174(2) -2-14	0.34	0.32	0.68	2.50	282.68	4.76
xes174(2) -2-15	0.33	0.32	0.68	2.43	276.04	4.65
xes174(2) -2-16	0.34	0.33	0.67	2.51	284.39	4.87
xes174(2) -2-17	0.34	0.30	0.70	2.61	294.32	4.78
xes174(2) -2-18	0.33	0.34	0.66	2.40	272.81	4.70
xes174(2) -2-19	0.34	0.34	0.66	2.52	285.32	4.84
xes174(2) -2-20	0.33	0.33	0.67	2.62	295.26	4.64
xes174(2) -2-21	0.34	0.33	0.67	2.52	284.74	4.85
xes174(2) -2-22	0.36	0.35	0.65	2.61	294.77	5.24
xes174(2) -2-23	0.33	0.34	0.66	2.41	273.11	4.67
xes174(2) -2-24	0.34	0.34	0.66	2.38	269.80	4.91
xes174(2) -2-25	0.33	0.33	0.67	2.43	275.59	4.74

续表2

探针点号	Al/(Al+Mg+Fe)	Mg/(Fe+Mg)	Fe/(Fe+Mg)	Al ^{IV} correct	t/°C	Al ^{Total} +VAC
xes174(2)-2-26	0.33	0.30	0.70	2.60	293.14	4.57
xes174(2)-2-28	0.33	0.32	0.68	2.48	281.05	4.72
xes174(2)-2-29	0.34	0.33	0.67	2.48	281.18	4.85
xes174(2)-2-30	0.34	0.32	0.68	2.58	291.38	4.82
xes174(2)-2-31	0.34	0.31	0.69	2.46	278.52	4.79
xes174(2)-2-32	0.34	0.35	0.65	2.39	271.71	4.79
xes174(2)-2-33	0.32	0.31	0.69	2.33	265.38	4.37
xes174(2)-2-34	0.34	0.32	0.68	2.46	278.86	4.73
xes174(2)-2-35	0.34	0.33	0.67	2.55	288.25	4.85
xes174(2)-2-36	0.34	0.34	0.66	2.44	276.26	4.89
xes174(2)-2-37	0.35	0.34	0.66	2.58	291.55	4.94
xes174(2)-2-38	0.34	0.34	0.66	2.57	290.18	4.86
xes174(2)-2-40	0.34	0.33	0.67	2.17	247.75	5.07
xes174(2)-2-41	0.35	0.34	0.66	2.40	271.99	4.93
xes174(2)-2-42	0.34	0.35	0.65	2.64	298.01	4.82
xes174(2)-2-44	0.34	0.34	0.66	2.36	268.21	4.99
xes174(2)-2-47	0.34	0.35	0.65	2.39	270.99	4.79
xes174(2)-2-48	0.35	0.33	0.67	2.17	247.76	5.26
xes174(2)-2-50	0.34	0.35	0.65	2.46	278.68	4.87
xes174(2)-2-51	0.35	0.34	0.66	2.47	280.08	4.95
xes174(2)-2-53	0.35	0.35	0.65	2.42	274.24	4.92
xes174(2)-2-54	0.34	0.34	0.66	2.63	296.85	4.85
xes174(2)-2-55	0.34	0.34	0.66	2.42	274.48	4.94
xes174(2)-2-56	0.35	0.35	0.65	2.42	274.87	5.01
xes174(2)-2-60	0.34	0.33	0.67	2.38	270.03	4.99
xes174(2)-2-62	0.35	0.33	0.67	2.45	277.56	4.96
xes174(2)-2-76	0.34	0.31	0.69	2.41	273.91	4.95
xes174(2)-2-80	0.35	0.34	0.66	2.68	301.77	5.03
xes174(2)-2-88	0.35	0.34	0.66	2.58	291.37	5.06
xes174(2)-2-89	0.35	0.35	0.65	1.92	221.08	5.57
xes174(2)-2-90	0.33	0.30	0.70	1.96	226.13	5.09
xes174(2)-2-94	0.32	0.32	0.68	2.10	240.49	4.80
xes174(2)-2-95	0.33	0.32	0.68	2.05	235.48	5.05
xes174(2)-2-97	0.33	0.32	0.68	2.15	245.59	4.92
xes174(2)-2-98	0.34	0.33	0.67	2.15	245.45	5.15
xes174(2)-2-103	0.35	0.33	0.67	2.39	271.44	5.02
xes174(2)-2-104	0.34	0.33	0.67	2.18	249.00	5.10

5 讨论

5.1 成矿流体性质

康山金银铅锌矿床绿泥石主要落于铁绿泥石和铁镁绿泥石范围,指示绿泥石形成于相对还原的环境中(Inoue, 1995)。同时绿泥石在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 et al., 1997),而系统氧逸度影响着Fe/(Fe+Mg)比值,系统越还原,其形成的绿泥石Fe/(Fe+Mg)比值越大(Bryndzia and Scott, 1987a, 1987b)。Al^{IV}-Fe/(Fe+Mg)图解(图6B)显示围岩中绿泥石比与矿化相关的绿泥石更还原。两种绿泥石为铁绿泥石,这种绿泥石可能与流体的沸腾作用有关(Inoue, 1995),而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(Heinrich, 1990; Muller et al., 2001)。从矿化相关的绿泥石到围岩中的绿泥石的Fe/(Fe+Mg)比值变化于0.53~0.76, Al^{IV}和Al^{VI}含量分别变化于1.89~2.75, 2.15~2.66,这与热液矿床中绿泥石一致(Carrillo-Rosua et al., 2009)。同时,两种绿泥石Na⁺、K⁺、Ca²⁺离子数在围岩和矿化带的变化区间分别为0.01~0.4和0.01~0.3,这些数值暗示热液来源的流体可能有变质热液的参与(Cathelineau and Nieva, 1985; Fulignati, 1997; Laird, 1988)。图6D显示与矿化相关绿泥石Fe+Al^{VI}-Mg呈近1:1的负相关关系,表明绿泥石八面体位置主要被Fe、Al、Mg等3种元素占据,且在该位置上主要发生Fe+Al^{VI}对Mg的置换。同时两种绿泥石Fe与Mg及Al^{VI}与Mg的线性关系(图6E, 6F)表明,绿泥石八面体位置上主要是Fe对Mg的置换,其次才是Al^{VI}对Mg的置换。部分学者认为绿泥石成分中,若Fe取代Mg,则绿泥石形成于相对酸性的环境中,反之,若Mg取代Fe,则绿泥石形成于相对碱性的环境中(艾永富和刘国平, 1998)。综上所述,康山矿床的流体是富铁且还原的酸性流体,且成矿相关的流体偏氧化。

5.2 成矿物质来源

一般情况下,由泥质岩石蚀变形成的绿泥石比由镁铁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),而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),康山金银铅锌矿床两种绿泥石的化学成分及Al/(Al+Mg+Fe)-Mg/(Fe+Mg)正相关性(6C)显示其主要由镁铁质岩石转化而来,极少数来源于泥质岩类(王小雨等, 2014)。成矿流体的温度主要集中在270~300℃,相对较高,暗示成矿热液可能有高温的岩浆热液的参与。黄铁矿的LA-ICP-MS微量元素分析结果显示,康山矿床黄铁矿Co、Ni元素含量均变化较大,Co、Ni元素比值都比较分散,黄铁矿Co/Ni比值位于火山成因矿床、矽卡岩矿床以及沉积矿床的范围,表明成矿物质可能具有多源性。黄铁矿中Bi和Te的异常富集代表了与酸性岩浆有关的岩浆-热液系统(White et al., 1981; Afifi et al., 1988; Thompson and Newberry, 2000; Mao et al., 2008, 2011)。同时,闪锌矿的电子探针成分分析也显示,Mo含量相对较高,最高达到0.63%,这种高温元素的富集进一步指示成矿流体中有岩浆流体的加入。在与其他热液绿泥石对比的图解(图9)中,康山绿泥石主要落入浅成低温脉状矿床(Walsh, 1986)及花岗质侵入体主导的中温矿床(Trumbull et al., 1996)。因此,绿泥石和硫化物成分特征显示康山矿床成矿流体有岩浆热液的特征并可能混合其他来源,但需要准确确定成矿热液流体的具体物质来源仍需要同位素数据如S-Pb-C-H-O的佐证。硫同位素特征表明,康山金银铅锌矿床具有深源硫(0~2‰)的特征(郑永飞和陈江峰, 2000; Hoefs, 2009),这种硫同位素组成与岩浆硫和变质硫均相似(Ohmoto and Rye, 1979)。同时,Pb同位素显示有太华群和官道口群物质的贡献。因此,S-Pb同位素暗示成矿流体来源具有多源性(王海华等, 2001),但不能排除岩浆热液的贡献。C-H-O同位素组成暗示康山的成矿流体可能是岩浆流体和变质流体的混合(范宏瑞等, 1994; 王海华等, 2001),因此作者认为康山矿床的形成可能主要与变质流体有关,但混合了岩浆热液的特征。而该变质流体可能是由于区域性马超营断裂在燕山期由北向南的逆冲推覆作用引起的区域上广泛分布的元古宙海相沉积岩的变质脱挥发分作用(陈衍景等, 2003; 燕建设, 2005)。

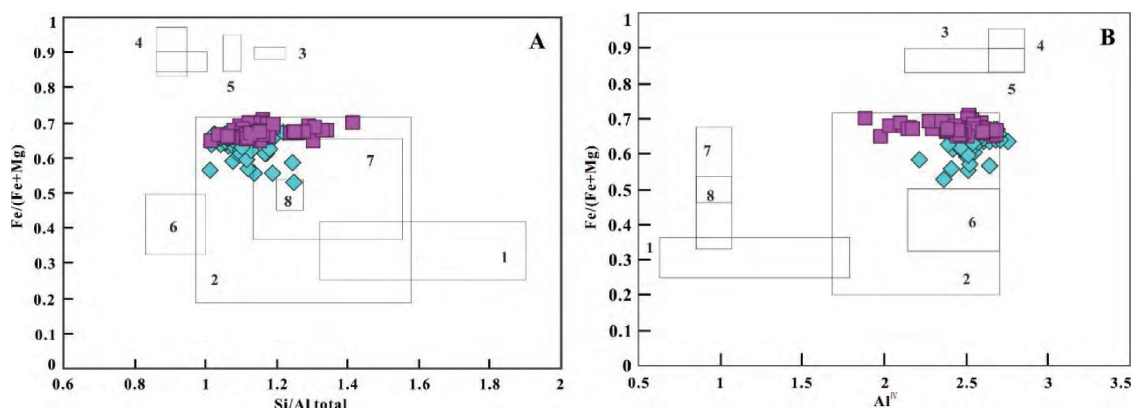


图9 康山矿床绿泥石化学成分与世界其他类型绿泥石化学成分对比图解

1—活动的地热系统; 2—数据来源于 Kranidiotis and Maclean(1987); 3—数据来源于 Zang and Fyfe(1995); 4—数据来源于文献 Xavier et al. (1991); 5—数据来源于文献 Dora and Randive(2015); 6—数据来源于文献 Randive et al(2015); 7—数据来源于与花岗质岩体相关的矿床(Trumbull et al., 1996); 8—数据来源于热液脉型矿床(Walshe, 1986)

5.3 热液蚀变过程

康山矿床从围岩到矿化蚀变的绿泥石的化学成分如 Fe、Mg、Si、Al 和 Mn 的含量会发生变化。图 6A 中, 与矿化相关绿泥石 Al^{IV} 的含量高于围岩中绿泥石 Al^{IV} 的含量, 这主要是温度上升的影响(Cathelineau and Nieva, 1985), 即与矿化相关绿泥石形成温度高于围岩中绿泥石形成温度。与矿化相关绿泥石 Al^{IV} 随着 $Fe/(Fe+Mg)$ 比值的增大而增大(图 6B), 而围岩中绿泥石 Al^{IV} 随着 $Fe/(Fe+Mg)$ 比值的增大而减小(图 6B)。该现象主要是受到绿泥石中阳离子大小和化学计量的影响: (1) Si^{4+} 的析出使 Al^{IV} 在热液系统中更加相容, 从而引起碱度的增加; (2) 在变化的环境中取代 Mg^{2+} 的富铁熔体的持续加入(Kranidiotis and Maclean, 1987)。因此, 康山矿床与矿化相关绿泥石形成过程中有 Si^{4+} 的析出和富铁熔体的加入。绿泥石作为热液系统中水岩反应的蚀变产物广泛存在于与 Cu (Mo)、Au、Ag、Pb、Zn 等矿化有关的地质环境中(Cathelineau and Nieva, 1985; Lowell and Guilbert, 1970)。在该矿床附近及深部有多期次的岩浆活动(如老庙沟二期岩脉)及隐伏岩体(张明亮等, 2008), Au-Ag-Pb-Zn 矿化可能与这些花岗质岩石引起的绿泥石化有关, 花岗岩沿着马超营断裂带和 NE-SW 向次级断裂的侵位引起热扰动, 触发高盐度流体对流、绿泥石化和围岩中金属元素的萃取(Barton, 2001), 这时成矿元素会从围岩中萃取并以脉状沉淀在断裂和剪切带中。随

着剪切带的发育, 渗透率会变大并有利于大量的流体渗入剪切带形成绿泥石和矿化。岩相学研究也表明, 绿泥石和其他层状硅酸盐是沿着剪切带直接从热水溶液中沉淀的, 或者由于水岩反应引起的围岩中角闪石/黑云母的交代。岩石的高渗透率和流体饱和度控制更可能去反映流体成分的变化以及蚀变带铁绿泥石的结晶(Surma and Geraud, 2003)。铁绿泥石也可以在热液和地热环境下沉淀(Zaccarini et al., 2003)。康山矿床出现的磁铁矿和钛铁矿可能是 Fe 从热水溶液中带出的结果(Mishima et al., 2006)。铁镁混合的绿泥石的形成是由于热液流体快速冷却的结果。康山金银铅锌矿床的成矿流体是富铁的酸性流体, 该性质的流体会萃取围岩中的钾质矿物形成泥化(Fialips et al., 1998; Reyes, 1990), 如绿泥石化和硅化被与矿化有关的泥化覆盖。这个过程与高硫化的热液系统一致(Hedenquist et al., 2000)。剧烈的流体变化暗示 pH 的升高和温度的下降导致如高岭土等粘土矿物的形成(Carrillo-Rosua et al., 2009)。石英-绿泥石脉顶部泥化蚀变的出现表明这些脉是在蒸汽加热的环境中形成的, 该环境是由于康山矿床上部沸腾的水蒸气的侵入(Partida et al., 2006; Pirajno, 2009; Sillitoe, 2002)。

6 结论

(1) 康山金银铅锌矿床中 2 种类型的绿泥石, 主要为富铁种属的蠕绿泥石(铁绿泥石)和铁镁绿

泥石 指示其均形成于偏还原的环境。

(2) 该矿床中 2 种类型的绿泥石的化学成分主要受铁镁质围岩或泥质岩等原岩控制。绿泥石结构的离子置换主要体现在 Fe 对 Mg 的置换,反映 2 种类型绿泥石的形成都与铁镁质围岩有关,并都经历了多期次地质变质作用。

(3) 该矿床与矿化相关的绿泥石的形成温度为 220~310℃,均值 287.42℃;围岩中的绿泥石的形成温度为 250~310℃,均值 275.98℃。均属于中—低温热液蚀变范围。

(4) 该矿床中 2 类绿泥石均形成于相对弱酸性的还原环境,且在金成矿过程中,热液流体随着温度不断下降,其性质向酸性方向演化。

(5) 综合前人研究资料,康山的成矿流体可能是岩浆流体和变质流体的混合,且康山矿床的形成可能主要与变质流体有关,但混合了岩浆热液的特征。

致谢 感谢中国科学院广州地球化学研究所矿物学与成矿学重点实验室实验人员在实验过程中以及赵太平研究员在论文写作中给予的帮助。

参考文献

- Afifi A M, Kelly W C, Essene E J. 1988. Phase-Relations among Tellurides, Sulfides, and Oxides. 2. Applications to Telluride-Bearing Ore-Deposits [J]. *Economic Geology*, 83(2): 395-404.
- Barton M D. 2001. Sodic alteration and Fe-oxide-rich hydrothermal systems [C]. *Geol. Soc. Am. Abstr. Programs*, 33(6): 2001.
- Blumenthal V H. 2010. A Geochemical Study of the Mineralization at the Hopper Property, Yukon: A Case Study of an Atypical Copper Occurrence, Waterloo, Ontario, Canada [D].
- Bryndzia L T, Scott S D. 1987a. Application of Chlorite-Sulfide-Oxide Equilibria to Metamorphosed Massive Sulfide Ores, Snow Lake Area, Manitoba [J]. *Economic Geology*, 82(4): 963-970.
- Bryndzia L T, Scott S D. 1987b. The Composition of Chlorite as a Function of Sulfur and Oxygen Fugacity - an Experimental-Study [J]. *American Journal of Science*, 287(1): 50-76.
- Caritat P De. 1993. Chlorite Geothermometry: A Review [J]. *Clays & Clay Minerals*, 41(2): 219-239.
- Carrillo-Rosua J, Morales-Ruano S, Esteban-Arispe I, Hach-Ali P F. 2009. Significance of Phyllosilicate Mineralogy and Mineral Chemistry in an Epithermal Environment. Insights from the Palai-Islica Au-Cu Deposit (Almeria, Se Spain) [J]. *Clays and Clay Minerals*, 57(1): 1-24.
- Cathelineau M, Nieva D. 1985. A Chlorite Solid-Solution Geothermometer: the Los-Azufres (Mexico) Geothermal System [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 91(3): 235-244.
- Cathelineau M. 1988. Cation Site Occupancy in Chlorites and Illites as a Function of Temperature [J]. *Clay Minerals*, 23(4): 471-485.
- Cavaretta G, Gianelli G, 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]. *Economic Geology*, 77: 1071-1084.
- Chen Y J, Pirajno F, Sui Y H. 2004. Isotope geochemistry of the Tieluping silver-lead deposit, Henan, China: a case study of orogenic silver-dominated deposits and related tectonic setting [J]. *Mineralium Deposita*, 39: 560-575.
- De Caritat P D, Hutcheon I, Walshe J L. 1993. Chlorite geothermometry: a review [J]. *Clay Clay Miner*, 41(2): 219-239.
- Deer W A, Howie R A, Zussman J. 1966. An Introduction to the Rock Forming Minerals [M]. Longman, London, 528.
- Dora M L, Randive K R. 2015. Chloritisation along the Thanewasna shear zone, Western Bastar Craton, Central India: Its genetic linkage to Cu-Au mineralisation [J]. *Ore Geology Reviews*, 70: 151-172.
- Fialips C I, Petit S, Decarreau A, Beaufort D. 1998. Effects of temperature and PH on the kaolinite crystallinity. *Mineral. Mag*, 62 A: 452-454.
- Foster M D. 1962. Interpretation of the composition and classification of the chlorites [J]. *US Geology Survey Prof. Paper*, 414A: 1-33.
- Fulginiti P, Malfitano G, Sbrana A. 1997. The Pantelleria caldera geothermal system: Data from the hydrothermal minerals [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 75(3-4): 251-270.
- Halter W E, Williams-Jones A E, Kontak D J. 1998. Modeling fluid-rock interaction during greisenization at the East Kemptville tin deposit: implications for mineralization [J]. *Chemical Geology*, 150(1-2): 1-17.
- Hedenquist J W, Arribas M A, Gonzalez-Urrien E. 2000. Exploration for Epithermal Gold Deposits In: Hagemannand, S. G., Brown, P. E. (Eds.), *Gold in 2000* [J]. *Reviews in, Eco-nomic Geology*, 13: 45-277.
- Heinrich C A. 1990. The Chemistry of Hydrothermal Tin(-Tungsten) Ore Deposition [J]. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 85(3): 457-481.
- Higashi S. 2003. Clay mineral associated with gold and copper deposit in Papua New Guinea [J]. *Geology*, 21: 7-17.
- Hoefs J. 2009. Stable isotope geochemistry [M]. Springer Verlag.
- Inoue A, Kurokawa K, Hatta T. 2010. Application of Chlorite Geothermometry to Hydrothermal Alteration in Toyoha Geothermal System, Southwestern Hokkaido, Japan [J]. *Resource Geology*, 60(1): 52-70.
- Inoue A. 1995. Formation of Clay Minerals in Hydrothermal Environments [M]. *Origin and Mineralogy of Clays*, Springer Berlin Heidelberg, 268-330.
- Klein EL, Harris C, Giret A, Moura CAV. 2007. The Cipoero gold deposit, Gurupi Belt, Brazil: Geology, chlorite geochemistry, and stable isotope study [J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 23(2-3): 242-255.

- Kranidiotis P, Maclean W H. 1987. Systematics of Chlorite Alteration at the Phelps Dodge Massive Sulfide Deposit, Matagami, Quebec [J]. *Economic Geology*, 82(7): 1898-1911.
- Laird J. 1988. Chlorites: Metamorphic Petrology [J]. *Reviews in Mineralogy*, 19: 405-453.
- Lowell J D, Guilbert J M. 1970. Lateral and Vertical Alteration-Mineralization Zoning in Porphyry Ore Deposits [J]. *Economic Geology*, 65(4): 373-408.
- Mao J W, Pirajno F, Cook N. 2011. Mesozoic metallogeny in East China and corresponding geodynamic settings - An introduction to the special issue [J]. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 1-7.
- Mao J W, Xie G Q, Bierlein F, Qu W J, Du A D, Ye H S, Pirajno F, Li H M, Guo B J, Li Y F, Yang Z Q. 2008. Tectonic implications from Re-Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the East Qinling-Dabie orogenic belt [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 72(18): 4607-4626.
- Mishima T, Hirono T, Soh W, Song S R. 2006. Thermal history estimation of the Taiwan Chelungpu fault using rock-magnetic methods [J]. *Geophysical Research Letters*, 33(23).
- Muller B, Frischknecht R, Seward T M, Heinrich C A, Gallegos W C. 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.
- Ohmoto H, Rye R O. 1979. Isotopes of sulphur and carbon, in Barnes [J]. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, 509-567.
- Panigrahi M K, Naik R K, Pandit D, Misra K C. 2008. Reconstructing physico-chemical parameters of hydrothermal mineralization of copper at the Malankhand deposit, India, from mineral chemistry of biotite, chlorite and epidote [J]. *Geochemical Journal*, 42(5): 443-460.
- Parry W T, Downey L M. 1982. Geochemistry of hydrothermal chlorite replacing igneous biotite [J]. *Clay Clay Miner*, 302: 81-90.
- Partida E G, Camprubí A, González-Sánchez F, Sánchez-Torre J. 2006. Fluid inclusion study of the Plomositas - Los Arcos polymetallic epithermal vein tract, Plomositas district, Sinaloa, Mexico [J]. *J. Geochem. Explor*, 89: 143-148.
- Pirajno F. 2009. *Hydrothermal Processes and Mineral Systems* [M]. Springer, 133: 624.
- Randive K R, Korakoppa M M, Muley S V, Varade A M, Khandare H W, Lanjewar S G, Tiwari R R, Aradhi K K. 2015. Paragenesis of Cr-rich muscovite and chlorite in green-mica quartzites of Saigaon - Palasgaon area, Western Bastar Craton, India [J]. *J. Earth Syst. Sci*, 124(1): 213-225.
- Reyes A G. 1990. Petrology of Philippine Geothermal Systems and the Application of Alteration Mineralogy to Their Assessment [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 43(1-4): 279-309.
- Sillitoe R H. 2002. Some metallogenic features of gold and copper deposits related to alkaline rocks and consequences for exploration [J]. *Mineralium Deposita*, 37(1): 4-13.
- Surma F, Geraud Y. 2003. Porosity and thermal conductivity of the Soultz-sous-Forets granite [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 160(5-6): 1125-1136.
- Thompson J F H, Newberry R J. 2000. Gold deposits related to reduced granitic intrusions [J]. *Reviews in Economic Geology*, 13: 377-400.
- Trumbull R B, Hua L, Lehrberger G, Satir M, Wimbauer T, Morteani G. 1996. Granitoid-hosted gold deposits in the Anjiayingzi district of inner Mongolia, People's Republic of China [J]. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 91(5): 875-895.
- Walshe J L. 1986. A 6-Component Chlorite Solid-Solution Model and the Conditions of Chlorite Formation in Hydrothermal and Geothermal Systems [J]. *Economic Geology*, 81(3): 681-703.
- White W H, Bookstrom A A, Kamilli R J, Ganster M W, Smith R P, Ranta D E, Steininger R C. 1981. Character and origin of Climax-type molybdenum deposits [J]. *Economic Geology 75 th Anniversary Volume*, 270-316.
- Wiewióra A and Weiss Z. 1990. Crystallochemical classifications of phyllosilicates based on the unified system of projection of chemical composition: II. The chlorite group [J]. *Clay Minerals*, 25(1): 83-92.
- Xavier Aquilué, Xavier Dupré, Jaume Massó, Joaquín Ruiz de Arbuló. 1991. La cronología de les muralles de Tàrraco [J]. *Revista D'arqueologia De Ponent*, 271-304.
- Xie X G, Byerly G R, Ferrell R E. 1997. Ilb trioctahedral chlorite from the Barberton greenstone belt: Crystal structure and rock composition constraints with implications to geothermometry [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 126(3): 275-291.
- Zaccarini F, Garuti G, Rossi A, Carrillo Rosúa F J, Morales Ruano S, Fenollhach-Alí P. 2003. Application of chlorite and fluid-inclusion geothermometry to vein and strati-form Fe-Cu-Zn sulphide deposits of the northern appennine ophiolites (Emilia Romagna and Liguria, Italy) [J]. *AttiTicinensi di Scienzedella Terra*, 9: 109-111.
- Zane A and Weiss Z. 1998. A procedure for classifying rock-forming chlorites based on microprobe data [J]. *Rendiconti Lincei*, 9(1): 51-56.
- Zang W, Fyfe W S. 1995. Chloritization of the Hydrothermally Altered Bedrock at the Igarape-Bahia Gold Deposit, Carajas, Brazil [J]. *Mineralium Deposita*, 30(1): 30-38.
- 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.
- 常召山. 2013. 第十三届全国矿床会议报告 [R].
- 陈华勇. 2012. 第十二届全国矿床会议报告 [R].
- 陈衍景, 隋颖慧, Franco PIRAJNO. 2003. CMF 模式的排他性依据和造山型银矿实例: 东秦岭铁炉坪银矿同位素地球化学 [J]. *岩石学报*, 19(3): 551-568.
- 范宏瑞, 谢奕汉, 王英兰, 赵瑞. 1994. 康山金矿地质地球化学特征及其成因 [J]. *黄金*, 15(3): 1-6.
- 李永峰. 2005. 豫西熊耳山地区中生代花岗岩类时空演化与钼(金)成矿作用 [D]. 北京: 中国地质大学(北京).

- 李占轲. 2013. 华北克拉通南缘中生代银-铅-锌矿床成矿作用研究 [D]. 武汉: 中国地质大学(北京).
- 梁婉娟, 杜泽忠, 甄世军, 张志辉, 李永胜, 甄世民. 2013. 甘肃白银厂矿床绿泥石特征及其成矿意义 [J]. 矿物学报(增刊), (s2): 464-465.
- 廖震, 刘玉平, 李朝阳, 叶霖, 刘世荣, 郑文勤. 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.
- 王海华, 陈衍景, 高秀丽. 2001. 河南康山金矿同位素地球化学及其对成岩成矿及流体作用模式的印证 [J]. 矿床地质, 20(2): 190-196.
- 王小雨, 毛景文, 程彦博, 张兴康, 刘鹏, 刘石华, 方思傑. 2014. 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, 33(5): 885-905.
- 燕建设. 2005. 马超营断裂带流体系统地球化学特征 [J]. 物探与化探, 29(006): 487-492.
- 叶会寿, 韩平均, 何春芬, 何旭麒, 郎磊, 潘永, 何红召, 杨太航, 赵汀, 何铁, 叶会平, 孟刚, 王成强. 2011. 河南省栾川县康山金矿接替资源勘查(普查)报告 [R]. 栾川县金兴矿业有限责任公司.
- 张明亮, 梁海彬, 轩慎英. 2008. 河南省熊耳山地区金及多金属远景分析 [J]. 矿床地质, 27: 177-181.
- 郑永飞, 陈江峰. 2000. 稳定同位素地球化学 [M]. 北京: 科学出版社.

Chlorite EPMA characteristic and its geological significance of the Kangshan Au-Ag-Pb-Zn deposit in west of Henan

ZHOU Dong¹, ZHAO Tai-ping², ZHAO Peng-bin³, ZHANG Xiao-tuan¹

(1. Shaanxi Institute of Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi;

2. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640;

3. Shaanxi geological survey center, Xi'an 710016)

Abstract: The structural alteration type and the electronic probe component analysis of chlorites in Kangshan Au-Ag-Pb-Zn deposit show that the chlorites formed in two possible modes: 1) By replacing the ferromagnesian minerals in the host rock (chlorites in host rock); 2) Precipitated directly from hydrothermal fluids (chlorites related to mineralization). Among them, the chlorites in the host rock appeared as fine radial and chrysanthemum shape, and the chlorites relating to the mineralization show scale-like and massive shape. Fe/(Fe + Mg) ratios and the Al IV content in the chlorites of host rock vary in the ranges of 0.53~0.67 and 0.65~0.71 respectively, and in the chlorites relating to the mineralization vary in the ranges of 2.21~2.75 and 1.89~2.69 separately, suggesting that the formation of chlorite fluid has more than one source. Geological thermometer of chlorites shows that the formation temperatures of chlorites in host rock increased gradually from 220°C to 310°C, and the temperatures of chlorites relating to the mineralization increased from 250 to 310°C. Both of the chlorite EPMA characteristics and previous C-H-O-S-Pb isotopes studies demonstrate that the ore-forming fluids and materials of the Kangshan Au-Ag-Pb-Zn deposit were derived from the magmatic fluids, with the involvement of the materials coming from Taihua group and Guandaokou group, the ore-forming hydrothermal fluid may be derived from the mixing of magmatic hydrothermal fluid and stratum material decarbonization and dehydration in the region. The dehydration may be caused by the emplacement of regional concealed rock and the activities of Maochaoying fault zone.

Key words: chlorite, EPMA, geological significance, Kangshan Au-Ag-Pb-Zn deposit, western Henan