

绿泥石在金属矿成矿中的指示意义综述

任蕊, 海连富, 何昌浩, 吴星苇

宁夏回族自治区矿产地质调查院(自治区矿产地质研究所), 宁夏 银川

收稿日期: 2026年6月7日; 录用日期: 2026年7月16日; 发布日期: 2026年7月27日

摘要

绿泥石是热液蚀变系统中广泛发育的含水层状硅酸盐矿物, 其化学成分和晶体结构对成矿物理化学条件敏感, 是矿床学和找矿勘查领域的重要指示矿物。本文梳理了绿泥石的晶体化学特征与分类体系, 总结其对成矿温度、氧逸度、硫逸度等物理化学条件的指示意义, 阐明了绿泥石微量元素的空间变化规律及其对矿化中心和矿床类型的指示作用, 揭示了绿泥石化过程与成矿作用的耦合机制。研究表明, 多数绿泥石的形成温度与其 Al^{IV} 含量和面网间距呈良好线性关系, $Fe/(Fe + Mg)$ 比值和Walshe模型可有效约束成矿系统的氧化还原状态。绿泥石通过改变岩石物理性质、活化迁移成矿元素、提供还原环境等方式积极参与成矿作用, 其类型、成分和空间分布特征可有效示踪成矿流体的演化和矿化中心位置。绿泥石可作为斑岩型、矽卡岩型、热液脉型和花岗岩型矿床的有效找矿指示矿物。

关键词

绿泥石, 矿物地球化学, 地质温度计, 成矿指示, 找矿勘查

Review of the Indicative Significance of Chlorite in Metallic Mineralization

Rui Ren, Lianfu Hai, Changhao He, Xingwei Wu

Ningxia Institute of Mineral Geological Survey (Autonomous Region Institute of Mineral Geology), Yinchuan
Ningxia

Received: June 7, 2026; accepted: July 16, 2026; published: July 27, 2026

Abstract

Chlorite is a widely developed hydrous phyllosilicate mineral in hydrothermal alteration systems. Its chemical composition and crystal structure are sensitive to the physicochemical conditions of mineralization, making it an important indicator mineral in ore deposit geology and mineral exploration. This paper systematically reviews the crystal-chemical characteristics and classification

文章引用: 任蕊, 海连富, 何昌浩, 吴星苇. 绿泥石在金属矿成矿中的指示意义综述[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(7): 1099-1108. DOI: 10.12677/ag.2026.167098

schemes of chlorite, summarizes its indicative significance for physicochemical parameters such as ore-forming temperature, oxygen fugacity, and sulfur fugacity, elucidates the spatial variation patterns of trace elements in chlorite and their implications for locating mineralization centers and discriminating deposit types, and reveals the coupling mechanism between chloritization and mineralization. Studies indicate that the formation temperature of most chlorites shows a good linear relationship with their tetrahedral aluminum (Al^{IV}) content and d-spacing, while the $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ ratio and the Walshe model can effectively constrain the redox state of the ore-forming system. Chlorite actively participates in mineralization by altering rock physical properties, mobilizing and transporting ore-forming elements, and providing reducing environments. Its type, composition, and spatial distribution characteristics can effectively trace the evolution of ore-forming fluids and the location of mineralization centers. Chlorite can serve as an effective prospecting indicator mineral for porphyry, skarn, hydrothermal vein, and granite-type deposits.

Keywords

Chlorite, Mineral Geochemistry, Geothermometer, Metallogenic Indicator, Mineral Exploration

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

绿泥石(Chlorite)是一族 2:1:1 型层状结构的含水镁铁铝硅酸盐矿物,广泛形成于热液蚀变、中-低温变质作用和成岩过程中[1]。绿泥石常与铜、金、铀、钨、锡、铅锌等金属成矿作用密切相关,是热液蚀变系统中重要的蚀变矿物之一。受绿泥石结构可变性、成分非计量性特征控制,其化学成分和晶体结构对形成时的温度、压力、氧逸度、硫逸度、pH 值等物理化学条件极为敏感[2]-[4]。这一特性使绿泥石成为记录成矿过程信息的天然“探针”。随着电子探针、激光剥蚀电感耦合等离子体质谱、短波红外光谱等原位微区分析技术的快速发展,绿泥石研究在矿床成因和找矿勘查中发挥着越来越重要的作用。

本文通过梳理了朱溪钨铜矿床、羊拉铜矿床、拿若斑岩型铜矿床、沙溪斑岩型铜金矿床、茶溪金矿床、302 铀矿床、居隆庵铀矿床、上窖铀矿床、小山铀矿床、焦里钨铅锌银矿床、甲玛铜多金属矿床、个旧锡矿等典型金属矿床中绿泥石研究成果,从矿物学、成矿物理化学条件、微量元素与光谱特征、成矿作用机制及找矿应用方面进行综述。

2. 绿泥石矿物学特征与成因分类

绿泥石的晶体结构由 2:1 型结构单元层(TOT)与层间氢氧化物八面体片交替排列构成。四面体片中的 Si 常被 Al 类质同相置换形成 Al^{IV} ,八面体片中的 Mg、 Fe^{2+} 可被 Al、 Fe^{3+} 等置换[5][6]。这种离子类质同相置换的多样性导致绿泥石成分变化范围较大,也使其成为记录成矿环境信息的良好载体。绿泥石中 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 的类质同象替代最为普遍,二者含量常负相关。随着成分的变化,矿物颜色也不同,富 Mg 时常呈浅蓝绿色,富 Fe 时则呈深绿至墨绿色[7]。

根据产出状态和成因机制,金属矿床中的绿泥石主要有黑云母(长石)蚀变型、裂隙充填型、硫化物(铀矿物)共生型及交代矽卡岩矿物型四类。黑云母蚀变型由热液交代黑云母蚀变而成,常保留黑云母假象,是花岗岩类和变质岩中最常见的类型,常含有锆石、磷灰石、独居石等副矿物包裹体。在朱溪钨铜矿床中,黑云母蚀变型绿泥石位于矿体顶部和底部,与围岩赋存一起,与成矿无关[7];但在铀矿床中,黑云母蚀变可促使含铀副矿物中的铀活化释放,为成矿提供铀源[8][9]。长石蚀变型绿泥石由含铁镁质热液流

体交代长石形成,常以星点状、蠕虫状分布于长石颗粒中,颗粒细小破碎,该类绿泥石通常与铀成矿无关[6] [10]。裂隙充填型绿泥石由热液流体直接沉淀结晶而成,常呈脉状充填于矿物裂隙中。该类绿泥石多与铀矿化关系密切,常与沥青铀矿等铀矿物共生[8] [9],是成矿期热液活动的直接产物。与铀矿物共生型的绿泥石常为细小鳞片状,是主成矿期的产物,形成于中低温条件,可作为铀矿床的重要找矿标志[6] [10] [11]。与黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等硫化物共生型绿泥石,主要发育于矽卡岩型和斑岩型矿床的硫化物阶段[12] [13]。交代矽卡岩矿物型绿泥石为退蚀变阶段热液交代石榴子石或透辉石形成,在朱溪钨铜矿床中,交代透辉石形成的绿泥石经历了“透辉石→蛇纹石→绿泥石”的演变过程,与大量矿体具有显著的空间依存关系[7]。

根据 Fe-Si 原子数关系[1] [14],绿泥石可划分为蠕绿泥石(铁绿泥石)、铁镁绿泥石、密绿泥石、斜绿泥石、鲕绿泥石等多种类型(图 1)。不同类型的绿泥石通常会出现在不同类型的矿床中,矽卡岩型矿床以铁镁绿泥石和蠕绿泥石为主[7] [13];斑岩型矿床以富铁斜绿泥石和铁镁绿泥石为主[15];花岗岩型铀矿床以蠕绿泥石和铁镁绿泥石为主[6] [8];造山型金矿床则显示从铁绿泥石向镁绿泥石演变的特征[16]。

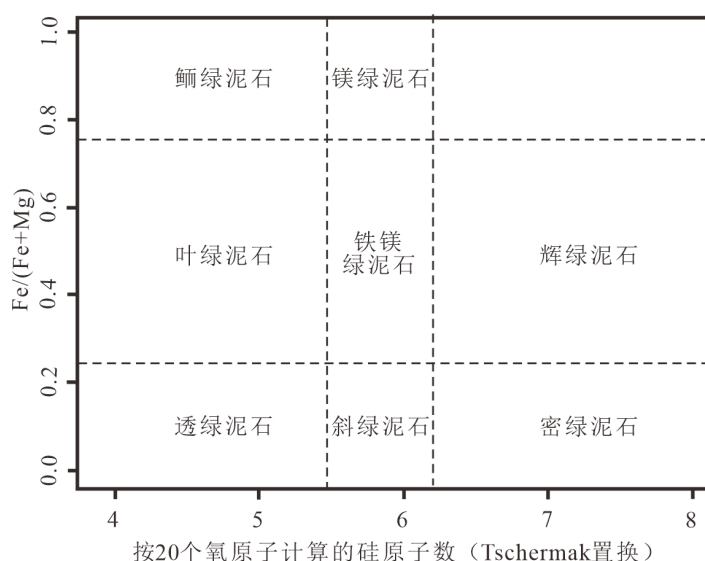


Figure 1. Chlorite classification (according to reference [14])
图 1. 绿泥石的分类(据文献[14])

3. 绿泥石对成矿物理化学条件的约束

3.1. 成矿温度的反演

绿泥石地质温度计的原理是:绿泥石中 Al^{IV} 含量与其形成温度呈正相关, Al^{IV} 对 Si 的替代程度随温度升高而增强[2] [3]。Kranidiotis 和 MacLean [17]发现 $Fe/(Fe + Mg)$ 比值对 Al^{IV} 也有影响,并提出了校正公式。Jowett [18]在综合前人研究基础上,给出了更完善的经验公式。此外,由于温度升高会使绿泥石层间距增大,故绿泥石晶体层间距也可以作为温度计,且不受绿泥石化学成分的影响[19]-[20]。大量文献表明,绿泥石形成的温度可以反演成矿温度条件,如朱溪钨铜矿床与成矿相关的绿泥石形成温度约 $164^{\circ}C \sim 244^{\circ}C$ [7]、焦里矽卡岩型钨铅锌银矿约 $232^{\circ}C \sim 279^{\circ}C$ [13]、羊拉铜矿约为 $140^{\circ}C \sim 281^{\circ}C$ [12]。拿若斑岩型铜(金)矿约 $199^{\circ}C \sim 231^{\circ}C$ [15]、沙溪斑岩型铜金矿约 $199^{\circ}C \sim 272^{\circ}C$ [21]、东天山铜沟热液脉型铜多金属矿约 $233^{\circ}C \sim 280^{\circ}C$ [22]、302 铀矿床中成矿期浸染型绿泥石平均形成温度约 $205^{\circ}C$ [8]、居隆庵矿床与铀矿物共生型绿泥石平均形成温度约 $215^{\circ}C$ [6]、上窖矿床与铀矿物密切共生型绿泥石平均形成温度约 $215^{\circ}C$ 。

[10]、小山铀矿床深部与铀成矿相关的绿泥石形成温度约为 355℃~410℃ [9]、茶溪斑岩型铜金矿与成矿相关的绿泥石形成温度约 153℃~211℃ [16]、云南个旧锡矿中锡多金属矿床硫化物阶段绿泥石形成温度约 171℃~261℃ [23]。花岗岩型铀矿中绿泥石的形成温度变化表明较低温度有利于铀的富集[24]。整体来看,从成矿早期到晚期,绿泥石形成温度通常呈现逐渐降低的趋势,这一规律可用于约束成矿流体的演化路径。综合前人已发表数据[5][12][13][15][25][26]-[38][39][40],绘制了斑岩型矿床、矽卡岩型矿床、VMS 型矿床、造山型金矿、热液铀矿和砂岩型铀矿绿泥石形成温度箱线图(图 2),图 2 显示 VMS 型、矽卡岩型矿床中绿泥石形成的温度整体偏高且离散度大,对应高温岩浆流体体系;热液型铀矿、斑岩型矿床、造山型金矿中绿泥石形成温度居中;砂岩型铀矿中绿泥石形成的温度最低且数据集中,为低温流体成因。各类矿床中绿泥石形成的温度差异受控于成矿流体来源,可作为区分不同成因矿床的指标。

综上所述,绿泥石在金属矿床中分布广泛,能够在较大的温压范围内稳定存在,且其化学成分(尤其是 Al^{IV} 含量)与形成温度具有良好的相关性,是反演中低温热液成矿温度的重要矿物。然而,应用绿泥石温度计时存在多方面的挑战:① 温度适用范围主要限于中低温条件(<350℃),在超过此温度时, Al^{IV} 含量可能达到饱和, Tschermak 替代机制与温度之间的关系趋于复杂;② $Fe^{3+}/\Sigma Fe$ 比值是热力学温度计和氧逸度计算的关键参数,但常规电子探针难以区分 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} , μ -XANES 等高精度方法又难以普及,构成了当前核心技术瓶颈;③ 对 $Fe/(Fe + Mg)$ 值进行校正的必要性存在争议,有学者认为在铝饱和条件下校正并不能提高温度估算的准确性;④ 绿泥石颗粒细小、结构复杂且常含包裹体,微区精确分析存在困难,如何从多期叠加的信号中识别出主成矿事件的温度信息是一大难点。因此,建议在使用绿泥石温度计反演成矿温度时,优先选取同一矿床中与目标成矿事件具有明确时空关系的绿泥石样品,结合流体包裹体测温等方法进行交叉验证,并综合考虑研究对象的温度范围、共生矿物组合及数据质量,以提高温度估算的可靠性。

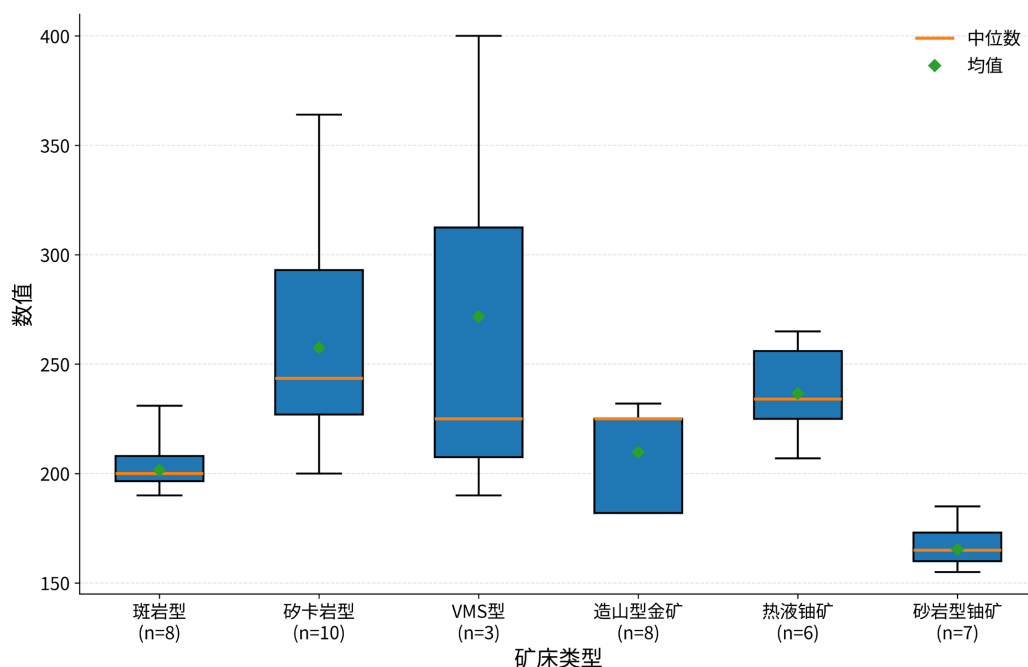


Figure 2. Boxplot of formation temperatures of chlorite in different types of deposits (vertical axis represents temperature, n represents the number of statistical deposits)

图 2. 不同类型矿床绿泥石形成温度箱线图(纵坐标为温度, n 为统计矿床数量)

3.2. 氧化还原环境与酸碱度

绿泥石中 $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ 比值是反映成矿系统氧逸度的重要指标。一般而言, 还原环境有利于富铁绿泥石的形成, 低氧逸度、低 pH 条件有利于富镁绿泥石的形成[41]。利用 Walshe [4] 提出的模型, 结合绿泥石-石英-硫化物矿物组合, 可定量计算绿泥石形成时的氧逸度和硫逸度。文献资料显示, 华南产铀花岗岩中绿泥石的氧逸度值为 $-19.5 \sim -18$, 低于非产铀花岗岩的氧逸度 $-18.5 \sim -17.5$ [24]; 书楼丘铀矿床绿泥石氧逸度为 $-47.74 \sim -43.69$ [42]; 上窖铀矿床绿泥石氧逸度为 $-45.28 \sim -42.65$, 硫逸度为 $-6.76 \sim -2.08$ [10]; 小山铀矿床与铀成矿相关绿泥石氧逸度为 $-50.9 \sim -41.9$ [9]。在个旧锡矿中, 从氧化物阶段到硫化物阶段, 绿泥石氧逸度从 $-40.4 \sim -34.7$ 降至 $-57.3 \sim -44.7$ [23]。绿泥石中 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 的置换关系可指示流体酸碱度: Fe 置换 Mg 反映相对酸性环境, Mg 置换 Fe 反映相对碱性环境[43]。从成矿早期到晚期, 绿泥石的 $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ 值通常呈现降低趋势, 指示流体 pH 值从酸性向近中性或弱碱性演化。在茶溪金矿床中, 绿泥石类型由铁绿泥石 $\rightarrow$ 铁镁绿泥石 $\rightarrow$ 镁绿泥石演变, $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ 值从 $0.48 \sim 0.63$ 降至 $0.36 \sim 0.45$, 指示流体由弱酸性向近中性演化[16]。在沙溪斑岩铜金矿床中, 成矿流体早期呈酸性, 后期有大气降水混入并逐渐向中性转变[21]。综上所述, 成矿前期绿泥石的氧逸度和硫逸度及 $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ 值要高于成矿期。由于氧逸度和硫逸度的计算过程与 Fe^{3+} 和全铁的比值关系密切, 如何精确获取这一参数也成为当前研究的重点。

4. 绿泥石微量元素与光谱特征的勘查指示

4.1. 微量元素的空间分布规律

绿泥石中微量元素的含量和比值随着与热液中心距离的变化呈现系统性变化[44] [45]。主要原因是 Ti、V、Sc、Ga 等元素在高温条件下更易进入绿泥石晶格; 而 Zn、Mn、Co、Ni、Sr 等元素在低温条件下更易富集。沙溪斑岩型铜金矿床中, 绿泥石的 Ti、Ba、Co、K、Pb、Sr、Fe 元素含量和 V/Ni 比值在靠近矿化中心的位置明显升高, 而 Mn、Mg 元素含量降低[21]。羊拉铜矿床中, 从成矿早期到晚期, 绿泥石中 Sc、Ti、Ga、V 含量逐渐降低, 与成矿温度降低趋势一致[12]。甲玛铜多金属矿床中, 靠近矽卡岩富矿体和侵入岩等矿化中心的绿泥石中 V、Li、Co、Zn 元素含量较高, 而 Sr、Ni、Ti 元素含量较低[39]。基于绿泥石微量元素的矿床类型判别研究取得了重要进展。侯霖莉等[46]收集了来自 11 个矿床的 2806 条绿泥石微量元素数据, 利用随机森林、朴素贝叶斯、支持向量机、逻辑回归和人工神经网络、5 种监督机器学习算法建立了斑岩型和浅成低温热液型矿床的判别模型。研究表明, Ni 是区分两种不同矿床类型最关键的判别元素。斑岩型矿床中的绿泥石相对于浅成低温热液型矿床通常具有高 Ni、高 Cr、高 Co 含量特征。铜矿、铜钼矿、铜金矿和银金铅锌矿中: 铜矿具有高 Ni、低 Zn 特征; 铜金矿 Ni 含量仅高于银金铅锌矿而 Zn 含量显著高于铜矿; 铜钼矿 Ni 含量仅低于铜矿; 银金铅锌矿具有低 Ni、高 Zn 特征。支持向量机(SVM)模型在分类预测中表现最优, 成因分类模型加权平均准确率达 98% [46]。目前绿泥石微量元素的研究主要集中在斑岩型矿床, 对矽卡岩型、VMS 型、造山型金矿和铀矿床的系统研究有限, 绿泥石微量元素的空间变化规律是否普遍适用于所有金属矿床类型, 还需在今后的研究中进一步验证。

4.2. 短波红外光谱特征

绿泥石在短波红外光谱中具有以 2250 nm 为中心的 Fe-OH 和以 2335 nm 为中心的 Mg-OH 吸收特征[47]。Fe-OH 吸收峰值(Pos2250)与绿泥石中 Fe 含量正相关, 与 $\text{Mg}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ 值负相关[48] [49], 原因是 Fe-OH 键的振动频率随 Fe 含量增加而降低, 会导致吸收峰向长波方向移动。在矿床勘查中, 高 Pos2250 值的绿泥石通常靠近矿化中心, 可作为快速勘查标志。东天山铜沟热液脉型矿床中, 矿体附近绿泥石 $\text{Pos2250} > 2252 \text{ nm}$, 从矿体向围岩方向 Pos2250 值逐渐降低, 绿泥石类型由铁绿泥石/铁镁绿泥石向镁绿

泥石转变[22]。铜绿山矽卡岩型矿床中, 绿泥石 Pos2250 值与 $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ 值呈正相关, 高 Pos2250 值可指示矿化中心[50]。朱溪钨铜矿床中绿泥石 Pos2250 值为 2240 nm~2257 nm, 主要集中于 2246 nm~2253 nm, 可能受富镁围岩影响波长值整体偏低[7]。值得注意的是绿泥石短波红外光谱技术受基质干扰影响显著, 不同岩石基质中绿泥石的光谱响应存在差异, 且缺少在不同矿床类型中的系统对比研究。

不同类型金属矿床中绿泥石在产状、种属、化学成分、形成温度及光谱特征等方面均有不同特点(表1)。绿泥石作为中低温热液成矿作用的标志性矿物, 其 $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ 比值、 Al^{IV} 含量及形成温度共同组合形成了表征成矿系统的重要指标。绿泥石的化学成分和温度特征本质上是对成矿系统温度 - 压力 - 流体成分 - 围岩性质等参数的综合响应, 其中温度是控制绿泥石晶体化学特征最重要的参数, 而 $\text{Fe-Mg-Al}^{\text{IV}}$ 的协同演变则精细刻画了不同成矿背景下流体演化的微观路径。因此, 绿泥石不仅可以作为区分矿床类型、反演成矿过程的可靠矿物“探针”, 更揭示了中低温热液系统中矿物晶体化学特征与矿床尺度的成矿环境之间存在跨尺度的内在联系, 为建立“宏观成矿系统 - 微观矿物响应”的量化勘查模型提供了坚实的矿物学理论基础, 对于指导隐伏矿体定位预测具有重要意义。

5. 绿泥石对成矿作用的指示

5.1. 绿泥石化与成矿的时空耦合关系

绿泥石化过程与成矿作用之间存在着密切的时空耦合关系。主要表现在时间上, 绿泥石的形成贯穿成矿前期、成矿期和成矿后期多个阶段。成矿前期的黑云母蚀变型和长石蚀变型绿泥石呈面状分布, 与矿体无直接空间关系, 但通过改变围岩性质、活化成矿元素为后期成矿做准备; 成矿期的裂隙充填型、与硫化物共生型和交代矽卡岩矿物型绿泥石与矿体密切共生; 成矿后期的绿泥石多与碳酸盐矿物伴生。在空间上, 成矿期形成的绿泥石与矿体具有显著的空间依存关系[7]; 不同产出状态绿泥石的 Al^{IV} 、 $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 参数值能够指示矿区不同的热源区[15]; 绿泥石温度、氧逸度、硫逸度的等值线中心常与元素富集中心对应, 指示多期次多中心的岩浆热液活动[39]。

5.2. 绿泥石化的成矿贡献

绿泥石化对成矿作用的贡献主要体现在四个方面, 即(1) 改变岩石物理化学性质: 绿泥石化过程中, 热液流体与围岩相互作用, 能大大增加岩石孔隙度和渗透性[6][8], 表现为岩石的含水率、吸水率、孔隙度逐渐增高, 而密度、硬度、抗压强度逐渐降低[40]。这种物理性质的改变为成矿热液的运移和矿物沉淀提供了有利空间。(2) 改变元素赋存状态: 铀矿在黑云母绿泥石化过程中, 赋存于黑云母中或含铀副矿物中的成矿元素会被释放形成活性元素, 这也得到了裂变径迹研究证实[51]。朱溪钨铜矿床中绿泥石释放 W 元素为白钨矿形成提供 W 源也说明这一点[7]。(3) 提供沉淀环境: 与成矿相关的富铁绿泥石常形成于还原环境, 当高氧逸度的含矿流体进入绿泥石化带时, 氧化还原条件的变化会促使金属元素沉淀富集, 这在铀矿、钨矿中均有表现[7]。(4) 指示流体演化: 绿泥石的成分变化序列能够记录成矿流体的演化路径[23]。

5.3. 绿泥石形成机制及其成矿意义

绿泥石的形成机制主要有两种[5][10][52]。第一种为溶蚀 - 结晶机制: 热液流体交代围岩中的黑云母、长石等矿物, 在原地重结晶形成绿泥石, 常保留原矿物的假象。该机制下形成的绿泥石铁镁组分主要来自被交代矿物本身, 多形成于成矿前期。此类绿泥石本身不含矿[7], 但其发育指示了热液流体的早期活动。第二种为溶蚀 - 迁移 - 结晶机制: 热液流体萃取围岩中的铁镁组分后, 经过一定距离的迁移, 在矿物裂隙或空隙中沉淀结晶形成绿泥石。该机制下形成的绿泥石铁镁组分主要由热液带入, 多形成于

成矿期，与成矿作用关系密切[8]-[10]，此类绿泥石常与硫化物、铀矿物等共生，是重要的找矿标志。

综上所述，绿泥石在金属矿反演成矿温度、氧化还原环境、指示矿化中心、矿体定位预测和约束成矿流体演化等方面扮演着重要角色。这些作用的发挥和绿泥石的化学成分密不可分，因此，基于机器学习的智能化 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 等元素精准测定技术，绿泥石化学成分与温度、压力、原岩成分、流体氧逸度、pH 值、水岩比等多因素耦合关系的定量分析，多方法融合的绿泥石地质温度计集成反演框架，以及基于不同矿床类型绿泥石的主微量元素、SWIR 光谱和温度等海量数据构建标准化开放共享的绿泥石矿物化学数据库，发展数据驱动的成分-温度-成因判别模型，建立金属矿中绿泥石 SWIR 光谱-成分-温度的定量关系模型，实现从光谱到成分到温度的快速、无损预测，为野外快速勘查和深部隐伏矿体定位提供实时决策支持的综合研究范式可以作为未来金属矿中绿泥石研究的重要方向。

Table 1. Comprehensive comparison of typical chlorite characteristics in different deposit types

表 1. 不同矿床类型绿泥石典型特征综合对比

特征参数	斑岩型矿床	矽卡岩型矿床	VMS 型矿床	造山型金矿	热液铀矿床	砂岩型铀矿床
主要产出位置	青磐岩化带、钾化带、绢英岩化带	退化蚀变阶段	热液蚀变晕、补给通道	绿片岩相围岩、蚀变带外围	铀矿体旁侧蚀变带、矿化裂隙	绿色-灰色砂岩过渡界面、含矿层砂岩中
典型产状	角砾岩胶结物、斑岩体中蚀变、长石英砂岩中充填	矽卡岩型矿石中、石英萤石脉内、碳酸盐型矿石中	脉状充填、热水沉积岩中	围岩中黑云母蚀变型、与石英硫化物共生脉状、石英中蠕虫状包裹体、钠长石假晶型	黑云母假象型、长石蚀变型、裂隙充填型、与铀矿物共生型	孔隙充填型、蚀变型
主要种属	辉绿泥石、斜绿泥石/鲕绿泥石、透绿泥石/蠕绿泥石	辉绿泥石/铁辉绿泥石、蠕绿泥石/铁镁绿泥石/密绿泥石	蠕绿泥石	蠕绿泥石(铁绿泥石)、铁镁绿泥石、镁绿泥石	铁镁绿泥石、蠕绿泥石、密绿泥石、鲕绿泥石	蠕绿泥石、密绿泥石、铁斜绿泥石、铁镁绿泥石
Fe/(Fe + Mg)范围	0.31~0.77 (从中心向外降低)	0.38~0.73	0.47~0.86	0.46~0.67	0.56~0.73	0.24~0.66
Al ^{IV} 范围	0.74~1.30 (靠近中心较高)	0.76~1.71	0.99~1.54	0.76~1.38	0.66~0.81	1.38~2.57
形成温度范围	111°C~350°C	140°C~468°C	157°C~400°C	153°C~330°C	173°C~295°C	110°C~208°C
关键微量元素	Ti、V、Cr、Sc、Ga (近中心升高); Li、Sr、Zn (远端升高)	Mn (交代锰质石榴子石时升高); Sc、Ti、Ga (近岩体升高)	$\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 、Sn、Hg (高温端富集)	—	U (与铀矿物共生时富集)	U (热液带入)、Fe、Ti (黑云母绿泥石化释放)
SWIR Pos2250	>2252 nm (近矿化中心); <2252 nm (远端)	>2250~2253 nm (近矿)	2249~2261 nm (平均 2255 nm)	—	—	—
找矿指示意义	微量元素空间变化指示热液中心; Al ^{IV} 、Fe/(Fe + Mg)、Cr/Ti 与 Cu、Au 品位正相关	Pos2250 高值指示矽卡岩矿化; 微量元素 Sc、Ti、Ga 变化指示距岩体远近	$\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 指示岩浆流体贡献	绿泥石化带作为外围蚀变标志	绿泥石化是铀矿重要找矿标志	灰绿色砂岩(富绿泥石)是重要找矿标志; 绿色-灰色砂岩界面控制矿体
数据来源	[15] [25] [26]	[12] [13] [27] [28] [39]	[29] [30]	[16] [32]	[5] [33] [34]	[35] [36]

6. 结论

(1) 金属矿中绿泥石的产出形态和成因类型与矿床类型和成矿阶段密切相关。黑云母蚀变型和长石蚀变型绿泥石多形成于成矿前期; 裂隙充填型与硫化物共生型及交代矽卡岩矿物型绿泥石多形成于主成矿阶段, 是重要的找矿标志; 绿泥石的 $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ 比值和 Al^{IV} 含量可有效指示成矿温度和氧化还原条件。

(2) 金属矿中绿泥石微量元素 Ti、V、Co、Ni 含量及 Ti/Sr、V/Ni 比值靠近矿化中心升高, 而 Mn、Sr、Zn 含量降低; 短波红外光谱中 Pos2250 高值区(>2252 nm)可指示矿化中心。

(3) 金属矿中绿泥石可以通过改变岩石物性、活化迁移成矿元素、提供还原环境等方式积极参与成矿作用; 绿泥石的形成机制(溶蚀-结晶与溶蚀-迁移-结晶)可区分成矿前期与成矿期蚀变, 对判断成矿阶段具有指导意义。

(4) 绿泥石研究未来应聚焦高精度 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 的智能精准测定技术开发、多方法融合的温度计反演框架建立、跨尺度多类型绿泥石大数据平台的构建及发展数据驱动的成分-温度-成因判别模型, 建立金属矿中绿泥石 SWIR 光谱-成分-温度的定量关系模型, 推动绿泥石研究从“单点定性”走向“系统定量”, 为建立“宏观成矿系统-微观矿物响应”的量化勘查模型提供坚实的矿物学基础。

基金项目

本文受宁夏自然科学基金项目(项目编号: 2023AAC03775)资助。

参考文献

- [1] Deer, W.A., Howie, R.A. and Zussman, J. (1962) Rock-Forming Minerals: Sheet Silicates. Longman, 270.
- [2] Cathelineau, M. and Nieva, D. (1985) A Chlorite Solid Solution Geothermometer the Los Azufres (Mexico) Geothermal System. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **91**, 235-244. <https://doi.org/10.1007/bf00413350>
- [3] Cathelineau, M. (1988) Cation Site Occupancy in Chlorites and Illites as a Function of Temperature. *Clay Minerals*, **23**, 471-485. <https://doi.org/10.1180/claymin.1988.023.4.13>
- [4] Walshe, J.L. (1986) A Six-Component Chlorite Solid Solution Model and the Conditions of Chlorite Formation in Hydrothermal and Geothermal Systems. *Economic Geology*, **81**, 681-703. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.81.3.681>
- [5] 张展适, 华仁民, 季峻峰, 等. 201 和 361 铀矿床中绿泥石的特征及其形成环境研究[J]. 矿物学报, 2007, 27(2): 161-172.
- [6] 李海东, 潘家永, 刘文泉, 等. 江西乐安居隆庵铀矿床绿泥石特征及地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2017, 36(4): 535-548.
- [7] 龙沱江. 朱溪钨铜矿床绿泥石矿物特征及矿化指示性研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2022.
- [8] 郭国林, 刘晓东, 潘家永, 等. 302 铀矿床绿泥石特征及其与铀成矿的关系[J]. 铀矿地质, 2012, 28(1): 35-41.
- [9] 刘绪江, 余驰达, 等. 鹿井小山铀矿床深部绿泥石地球化学特征及其对铀成矿特征的指示[J]. 铀矿地质, 2025, 41(6): 1023-1042.
- [10] 吴德海, 潘家永, 夏菲, 等. 赣南上窖铀矿床绿泥石特征与形成环境[J]. 矿物学报, 2018, 38(4): 393-405.
- [11] 余驰达, 王凯兴, 刘晓东, 等. 芟岭铀矿床绿泥石特征与地质意义[J]. 矿物学报, 2020, 40(5): 628-638.
- [12] 吉彦冰, 杜丽娟, 黄智龙, 等. 滇西北羊拉铜矿床绿泥石成因矿物学[J]. 矿物学报, 2023, 43(3): 343-357.
- [13] 丁帝, 严冰, 高剑峰, 等. 赣南焦里矽卡岩型钨铅锌银矿床绿泥石地球化学特征及其勘查指示意义[J]. 大地构造与成矿学, 2026, 50(1): 131-147.
- [14] Hey, M.H. (1954) A New Review of the Chlorites. *Mineralogical Magazine and Journal of the Mineralogical Society*, **30**, 277-292. <https://doi.org/10.1180/minmag.1954.030.224.01>
- [15] 杨超, 唐菊兴, 宋俊龙, 等. 西藏拿若斑岩型铜(金)矿床绿泥石特征及其地质意义[J]. 地质学报, 2015, 89(5): 856-872.
- [16] 成玉亮, 张宇, 陈华勇, 等. 江南造山带湘西南段茶溪金矿床绿泥石特征及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2023, 47(3): 598-617.
- [17] Kranidiotis, P. and MacLean, W.H. (1987) Systematics of Chlorite Alteration at the Phelps Dodge Massive Sulfide Deposit, Matagami, Quebec. *Economic Geology*, **82**, 1898-1911. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.82.7.1898>
- [18] Jowett, E.C. (1991) Fitting Iron and Magnesium into the Hydrothermal Chlorite Geothermometer. *GAC/MAC/SEG Joint Annual Meeting, Program with Abstracts*, Vol. 16, A62.
- [19] Battaglia, S. (1999) Applying X-Ray Geothermometer Diffraction to a Chlorite. *Clays and Clay Minerals*, **47**, 54-63. <https://doi.org/10.1346/ccmn.1999.0470106>

- [20] Nieto, F. (1997) Chemical Composition of Metapelitic Chlorites: X-Ray Diffraction and Optical Property Approach. *European Journal of Mineralogy*, **9**, 829-842. <https://doi.org/10.1127/ejm/9/4/0829>
- [21] 何光辉, 周涛发, 范裕, 等. 庐江沙溪斑岩型铜金矿床绿泥石的地球化学特征及找矿指示[J]. 矿床地质, 2018, 37(6): 1247-1259.
- [22] 张雪冰, 何固秦, 陈华勇, 等. 东天山铜沟热液脉型铜多金属矿床绿泥石特征及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2026, 50(1): 43-57.
- [23] 焦骞骞, 王星, 常华诚, 等. 云南个旧锡矿高松矿段成矿物理化学条件: 来自热液黑云母和绿泥石地球化学的新证据[J]. 地质学报, 2026, 100(3): 973-996.
- [24] 章健, 陈培荣, 王凯兴, 等. 华南产铈花岗岩蚀变矿物绿泥石与铈成矿的联系[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2018, 41(2): 134-142.
- [25] 李保亮, 王立强, 何逸飞, 等. 西藏角东黑云二长花岗斑岩中绿泥石矿物学特征及其地质意义[J]. 地球学报, 2025, 46(6): 1163-1172.
- [26] 孙军刚, 李洪英, 刘晓煌, 等. 山西铜矿峪铜矿床绿泥石特征及其地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(6): 1142-1154.
- [27] 刘仕玉, 刘玉平, 叶霖, 等. 云南马关都龙锡锌多金属矿床绿泥石成因矿物学[J]. 矿物学报, 2022, 42(1): 1-13.
- [28] 周炜坚, 邵拥军, 赵廉洁. 湖南黄沙坪钨-钼-铜多金属矿床绿泥石特征及其地质意义[J]. 矿物学报, 2022, 13(2): 157-173.
- [29] 张振龙, 杨富全, 等. 新疆阿尔泰阿舍勒铜锌矿床矿物学特征及其地质意义[J]. 矿床地质, 2020, 39(5): 905-925.
- [30] Xiao, B., Pan, Y., Deng, C., Feng, Y., Shakouri, M., Falkenberg, J.J., *et al.* (2026) Magmatic Volatile Influx Promotes Cu Mineralization in Volcanogenic Massive Sulfide Deposit Recorded by Fe³⁺-Rich Chlorite and Hg Isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **420**, 340-353. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2026.01.039>
- [31] 黄健瀚, 陈华勇, 韩金生, 等. 短波红外光谱技术在 VMS 矿床中的应用——以新疆东天山红海铜锌矿床为例[J]. 矿物学报, 2015, 35(S1): 477.
- [32] 张娟, 刘新星, 王义天, 等. 陕西凤太矿集区八卦庙金矿床绿泥石特征及其找矿意义[J]. 地质通报, 2021, 40(4): 586-603.
- [33] 章卫星, 冯为华, 张宝松. 江西邹家山铈矿绿泥石形成温度及其成矿关系[J]. 资源调查与环境, 2007, 28(4): 293-297.
- [34] 舒田田, 潘家永, 钟福军, 等. 南岭中段黄沙矿区 223 铈矿床绿泥石特征与铈成矿关系[J]. 矿物学报, 2017, 37(6): 737-745.
- [35] 丁波, 刘红旭, 许德如, 等. 鄂尔多斯盆地北缘砂岩型铈矿热液改造的铈成矿效应: 来自黑云母绿泥石化过程的制约[J]. 地球科学, 2024, 49(2): 625-638.
- [36] 孟繁敏, 聂逢君, 夏菲, 等. 海拉尔盆地克鲁伦凹陷伊敏组绿泥石特征及其与铈成矿关系[J]. 矿物岩石, 2024, 44(3): 78-89.
- [37] 夏菲, 孟华, 聂逢君, 等. 鄂尔多斯盆地纳岭沟铈矿床绿泥石特征及地质意义[J]. 地质学报, 2016, 90(12): 3473-3482.
- [38] 骆效能, 张玉燕, 易超, 等. 鄂尔多斯盆地巴音青格利铈矿床绿泥石特征及其与铈成矿的关系[J]. 世界核地质科学, 2021, 38(3): 311-320.
- [39] 郭朵朵. 西藏甲玛矿床绿泥石地球化学特征及其地质意义[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2025.
- [40] 许谱林, 唐湘生, 郭福生, 等. 华南鹿井矿田碎裂蚀变岩型铈矿床绿泥石特征及其地质意义: 以小山铈矿床为例[J]. 地质学报, 2023, 97(4): 1211-1227.
- [41] Inoue, A. (1995) Formation of Clay Minerals in Hydrothermal Environments. In: Velde, B., Ed., *Origin and Mineralogy of Clays*, Springer, 268-329. https://doi.org/10.1007/978-3-662-12648-6_7
- [42] 孙国权, 范洪海, 高永宝, 等. 粤北书楼丘矿床绿泥石成分特征及其指示意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2024, 43(5): 1313-1327.
- [43] 艾永富, 刘国平. 内蒙古大井矿床的绿泥石研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1998, 34(1): 97-105.
- [44] Wilkinson, J.J., Chang, Z.S., Cooke, D.R., Baker, M.J., Wilkinson, C.C., Inglis, S., *et al.* (2015) The Chlorite Proximitator: A New Tool for Detecting Porphyry Ore Deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, **152**, 10-26. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.01.005>
- [45] Xiao, B., Chen, H.Y., Hollings, P., Wang, Y., Yang, J. and Wang, F. (2018) Element Transport and Enrichment during

- Propylitic Alteration in Paleozoic Porphyry Cu Mineralization Systems: Insights from Chlorite Chemistry. *Ore Geology Reviews*, **102**, 437-448. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.09.020>
- [46] 侯霖莉, 吴松, 易建洲, 等. 基于机器学习的绿泥石微量元素判别矿床类型[J]. 地球科学, 2024, 49(12): 4303-4317.
- [47] Biel, C., Subías, I., Acevedo, R.D., *et al.* (2012) Mineralogical, IR-Spectral and Geochemical Monitoring of Hydrothermal Alteration in a Deformed and Mineralized Epithermal Vein System. *Journal of Geochemical Exploration*, **119-120**, 23-35.
- [48] 梁树能, 甘甫平, 闫柏琨, 等. 绿泥石矿物成分与光谱特征关系研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(7): 1763-1768.
- [49] Jones, S., Herrmann, W. and Gemmell, J.B. (2005) Short Wavelength Infrared Spectral Characteristics of the HW Horizon: Implications for Exploration in the Myra Falls Volcanic-Hosted Massive Sulfide Camp, Vancouver Island, British Columbia, Canada. *Economic Geology*, **100**, 273-294. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.100.2.273>
- [50] Zhang, S.T., Xiao, B., Long, X.P., Chu, G., Cheng, J., Zhang, Y., *et al.* (2020) Chlorite as an Exploration Indicator for Concealed Skarn Mineralization: Perspective from the Tonglushan Cu-Au-Fe Skarn Deposit, Eastern China. *Ore Geology Reviews*, **126**, Article ID: 103778. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103778>
- [51] 程华汉, 马汉峰. 利用裂变径迹方法研究碱交代作用中铀赋存状态的变化[J]. 铀矿地质, 2000, 16(5): 291-296.
- [52] 王凯迪, 张娟, 王红, 等. 太行山南段洪山沟铜金矿床白云母和绿泥石特征及其找矿意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2025, 44(4): 924-948.