

文章编号: 1000-4734(2018) 03-0280-10

都龙锡锌多金属矿床成矿温度场研究

刘仕玉^{1,2}, 刘玉平^{1*}, 叶霖¹, 苏根利¹

(1.中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室,贵州 贵阳 550081; 2.中国科学院大学,北京 100049)

摘 要: 云南都龙锡锌多金属矿床,与矿区深部燕山晚期隐伏花岗岩体密切相关。矿区隐伏花岗岩侵入扰动了正常围岩的温度,从而造成矿区范围的温度场异常,导致流体活动及成矿元素迁移、沉淀、富集。因此,恢复都龙矿区燕山晚期花岗岩侵入后形成的温度场,可以深化对矿床成因的认识,指导深部及外围找矿。本文利用有限元软件 Comsol Multiphysics 数值模拟和绿泥石温度计 2 种手段进行温度场的恢复工作。数值模拟研究表明,等温线围绕隐伏岩体呈环带状分布,其中第一期持续时间约 10 Ma,影响范围达 2.5 km;第二期持续时间约 5 Ma,影响范围达 1.5 km;第三期持续时间约 50 ka,影响范围约 500 m。都龙矿区的绿泥石为富铁种属的蠕绿泥石(铁绿泥石)、镁铁绿泥石和少量密绿泥石,形成温度在 209~277 °C,属于中-低温热液蚀变范围,绿泥石温度范围与模拟结果温度场范围一致。上述研究表明,在第二期岩体外围约 600 m、第三期岩体外围约 300 m 空间范围内可能是成矿找矿的最有利位置。

关键词: 燕山晚期花岗岩; 温度场; Comsol Multiphysics; 数值模拟; 绿泥石温度计; 都龙锡锌多金属矿床

中图分类号: P579; P612 文献标识码: A doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2018.031

作者简介: 刘仕玉,男,1993 年生,硕士研究生,从事矿床地球化学研究。E-mail: liushiyu@mail.gyig.ac.cn

A Study on Metallogenic Temperature Field of The Dulong Sn-Zn Polymetallic Deposit

LIU Shi-yu^{1,2}, LIU Yu-ping^{1*}, YE Lin¹, SU Gen-li¹

(1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academic of Science, Guiyang 550081, China; 2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The Dulong Sn-Zn polymetallic deposit is closely related to the Late Yanshannian granite body concealed in depth of the deposit. The intrusion of the hidden granite magma in deposit area had resulted in the temperature disturbance of the normal surrounding rocks, the abnormal temperature field in the deposit area, and the activity of fluids and the migration, precipitation, and enrichment of metallogenic elements. Therefore, the restoration of the temperature field caused by the intrusion of Late Yanshannian granite magma could let us deeply understand the metallogenesis of the deposit and guide the exploration in depth and its periphery of the deposit. In this paper, the restoration of the temperature field has been carried out by using a finite element simulation software platform named Comsol Multiphysics and the chlorite geothermometer. The studies of the numerical simulation show that the isotherm is zonally distributed around the hidden granite body. The durations of thermal disturbance of the early stage granite, the middle stage granite, and the late stage granite are about 10 Ma, 5 Ma, and 50 ka, respectively, with the thermal disturbance distances of 2.5 km, 1.5 km, and 500 m, respectively, from the granite body. Chlorites in the Dulong Sn-Zn polymetallic deposit are mainly Fe-rich chlorites including prochlorite, brunsvigite and a small amount of pycnochlorite, with forming temperature of 209-277 °C, corresponding to the range of low-to-moderate temperature hydrothermal alteration. The temperatures of sampling locations obtained through the chlorite geothermometry are consistent with temperature ranges of the simulated temperature field. The above research indicates that the sites about 600 m away from the middle stage granite body and/or about 300 m away from the late stage granite body could be the

收稿日期: 2018-01-17

基金项目: 国家重点研发项目(2016YFC0600503); 华联锌铟公司委托项目(KY20120910)

*通讯作者, E-mail: liuyuping@vip.gyig.ac.cn

most advantageous positions for mineral exploration in the area.

Keywords: the Late Yanshannian granite; temperature field; Comsol Multiphysics; numerical simulation; chlorite geothermometer; The Dulong Sn-Zn polymetallic deposit

都龙锡锌多金属矿床位于滇东南老君山西南部,是继个旧、大厂之后我国最重要的锡金属资源基地之一^[1]。矿区累计已探明 Zn $>500 \times 10^7$ kg、Sn 约 40×10^7 kg、In 约 6×10^6 kg 并伴生 Pb、Ag、Cu、In 和 Cd 等多种有益组分^[2]。自上个世纪 80 年代以来,大量学者对其进行了深入研究并取得了丰富的成果,极大的促进了地质找矿工作的深入。由于矿区经历的地质作用复杂,长期以来对该矿床成因认识存在分歧,存在岩浆热液成因^[3]、热水-热液改造成因^[4]、沉积-变质-热液改造成因^[5]等不同观点。近期从成矿地质特征、成矿物质来源,以及成矿年代学等地质地球化学研究揭示,矿区深部燕山晚期花岗岩是锡多金属成矿的关键因素^[6-9],深部花岗岩体侵入造成的温度场异常,导致流体的活动和成矿元素迁移及沉淀富集^[10]。因此,在地质-地球化学研究和找矿勘查所获大量数据的基础上,通过数值模拟与蚀变矿物温度计研究燕山晚期花岗岩体的温度场分布及其演化,可以进一步丰富和完善成矿模式,指导深部及外围找矿工作。

1 都龙矿区地质概况

都龙锡锌多金属矿床位于老君山变质杂岩的西南部,大地构造背景为华南褶皱系西端与扬子地块、哀牢山褶皱系等三大构造单元交接部位^[11]。矿区出露的地层主要为新元古界一下寒武统新寨岩组片岩、大理岩,中寒武统田蓬组片岩或千枚岩、大理岩,以及矿区东南部的元古界猛洞岩群片岩、片麻岩。马关-都龙大断裂呈弧形展布于都龙矿床北东侧,矿区内主要的控矿构造为 NW 向马关-都龙断裂派生出的一系列 SN 向次级断裂^[12]。岩浆岩主要为矿区北部的燕山期老君山花岗岩,以及东部的遭受了印支期变形-变质改造的加里东期南温河花岗岩。老君山花岗岩为一复式岩体,地表出露面积约 150 km^2 ,年代学研究表明其形成于白垩纪中-晚期(85~120 Ma)^[8]。其中,第 1 期($\gamma 5^{3a}$)约占复式岩体面积的 1/3;第 2 期($\gamma 5^{3b}$)约占复式岩体面积的 2/3;第 3 期($\gamma 5^{3c}$)规模较小,呈岩脉状侵入前两期和外接触带变质盖层中^[13]。

根据多年的地质勘探成果,表明该矿床隐伏花岗岩体为老君山花岗岩体向南的倾伏延伸,东侧隐伏于南温河片麻状花岗岩之下,西侧隐伏于新寨岩组片岩、大理岩之下。矿区近几十年工程钻探资料显示^[14],隐伏岩体以 $20^\circ \sim 35^\circ$ 倾伏角呈脊条状由北向南延伸。由铜街-曼家寨矿段延伸至辣子寨矿段南部,南北向长延伸约 6 km。东西向宽约 2.5 km。隐伏深度从北部的地表露头至南部辣子寨矿段大于 1.2 km。隐伏岩体与地表岩体对应,分为 3 期:第 1 期岩性为中粗粒含斑黑云-二云二长花岗岩,与围岩接触带普遍发育硅化壳,厚度 0.64~76.66 m、平均 15.4 m,在穿切硅化壳的裂隙中,可见钨锡矿化;第 2 期岩性以中细粒含斑二云二长花岗岩为主,与围岩接触部位以及其突起上方 100 m 范围内,偶见硅化壳(不超过 20 个钻孔,厚度一般 <5 m),常形成“干夕卡岩”(钙质夕卡岩:石榴子石+透辉石+符山石为主;镁质夕卡岩:橄榄石+透辉石为主),100~500m 范围,常形成“湿夕卡岩”(钙质夕卡岩:阳起石+绿泥石+黑云母+绿帘石为主;镁质夕卡岩:蛇纹石+绿泥石+金云母为主),都龙矿区 70% 以上的矿体均集中在“湿夕卡岩”之中及附近,形成大致顺层产出的中温-中低温锡锌铜多金属矿化;第 3 期岩性为花岗斑岩、石英斑岩及花岗细晶岩组合,与围岩接触部位常形成硅化-碳酸盐化-萤石化,以及相关的小而富的中低温锡铜钨多金属脉状矿化。

2 都龙矿区古温度场数值模拟

正常的岩石圈温度场取决于地球内热、岩石放射性热源、底层导热性质以及地表温度,其通常为稳态,等温面大致呈水平分布,地温梯度约为 $30^\circ\text{C}/\text{km}$ 。构造活动、岩浆侵入等地质作用,会使得这种区域稳态地温场发生变化^[15]。都龙矿区成矿古温度场,即是正常地温场与燕山晚期花岗岩浆侵入形成的岩浆热场的总和。

2.1 计算方法

研究温度场的变化就是研究热量传递问题。热量传递的方式有 3 种:传导、对流和辐射。本文



1.个旧; 2.白牛厂; 3.都龙; 4.大厂;
 ASSR: 哀牢山-红河剪切带; SMS-Song Ma: 缝合带
 图1 都龙锡锌矿床地质简图(据文献[7]修改)

Fig.1. The sketch geological map for the Dulong Sn-Zn polymetallic deposit.

模拟的温度场即是传热问题,研究的是温度在空间的分布随时间的变化,用 $T(x, y, z, t)$ 表示。经过前人的大量研究,可用热传导定律来计算:

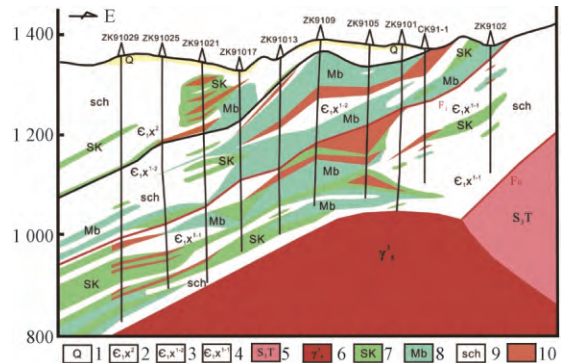
$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) + \rho C_p u \cdot \nabla T = Q$$

上述方程中 ρ 为岩石密度, C_p 为岩石热容, Q 为源项即热流密度, k 为热传导系数, u 为外场因变量。

2.2 模型及参数设定

苏航等^[14]根据都龙地区揭露燕山晚期隐伏花岗岩体的勘探工程资料以及区域重力异常资料^[16]总结了矿区隐伏岩体的地质特征,即岩体以 $20^\circ \sim 35^\circ$ 倾伏角呈脊条状向南延伸,由铜街-曼家寨矿段延伸至辣子寨矿段南部,南北向长延伸约 6 km。东西向宽约 2.5 km。隐伏深度从北部的地表露头至南部辣子寨矿段大于 1.2 km。根据

都龙矿区 91 勘探线剖面(图 2)及勘探工程资料揭露的第 1、2 期岩体规模及范围(数据未发表),拟合出图 3 所示的二维地质模型,为了便于模拟计算将其看成封闭的等容体系,第 1 期岩体为由北向南倾伏的直径 4 km 的圆柱体,第 2 期岩体为侵入第 1 期之中的直径 2 km 的圆柱体。第 3 期呈小斑岩脉体穿切前两期岩体。我们选取它的 1 个横向截面为例进行研究,岩体位于求解域中心,相关各地质体的参数见图 3。



1-第四系堆积-残积物; 2-下寒武统新寨岩组第二段石英云母片岩夹大理岩; 3-下寒武统新寨岩组第一段第二亚段大理岩夹片岩; 4-下寒武统新寨岩组第一段第一亚段石英云母片岩夹大理岩; 5-南温河片麻状花岗岩; 6-燕山晚期花岗岩; 7-夕卡岩; 8-大理岩; 9-石英云母片岩; 10-矿体

图2 都龙锡锌多金属矿床 91 勘探线剖面图(据苏航^[14] 2016)

Fig.2. The profile of the No.91 exploration line from the Dulong Sn-Zn polymetallic deposit.

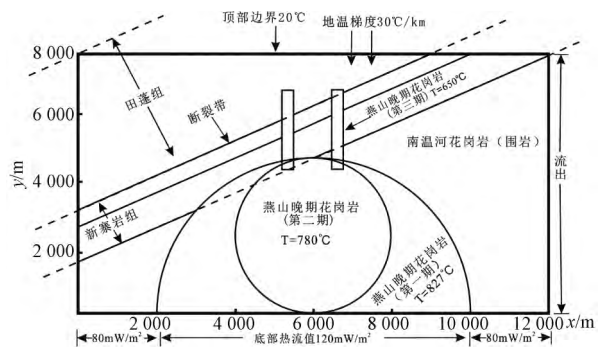


图3 模型几何形态及边界条件

Fig.3. The geometry and conditions of the model.

数值模拟采用的边界条件及初始条件设定如下:模型下边界为恒热流边界,参考 Geiger 等人建立的模拟模型数据^[17]热流值分别为 120 mW/m^2 、 90 mW/m^2 。上边界为恒定温度边界,基准面地表温度 20°C 。侧面边界为恒定温度边界,温度随高程的变化率为 30°C/km ,地热梯度为 30°C/km 。

第 1 期侵入体初始温度为 827 °C, 第 2 期岩体初始温度为 780 °C, 第 3 期初始温度为 650 °C。在计算模型的热物性参数取值方面, 参考於崇文院士所著《热液成矿作用动力学》中的数据(表 1)^[18]。

表 1 本文采用的岩石热物性参数

Table 1. Thermal physical properties of rocks used in this study

地质体	密度 / (kg/m ³)	热导率 / (W/m·K)	比热容 / (μW/m ³)
田蓬组	2700	2.9	790
新寨岩组	2500	2.0	800
加里东期花岗岩	2700	2.6	766
燕山晚期花岗岩	2300	2.0	1400
断裂	2300	2.5	1000

2.3 模拟计算结果

3 期岩体侵入后温度场数值模拟结果显示(图 4), 温度场围绕花岗岩体呈环带状分布, 第 1 期岩体对围岩的热扰动时间约 10 Ma 年, 对围岩的热影响范围约 2.5 km; 第 2 期岩体对围岩的热扰动时间约为 5 Ma 年, 影响范围约 1.5 km; 第 3 期岩体由于规模较小, 主要呈岩脉侵入前 2 期岩体及附近变质围岩中, 形成的温度场的范围较小, 仅在岩脉 500 m 左右的范围内对围岩造成热扰动, 温度场存在时间较短, 约 50 ka 后恢复至正常地温梯度。

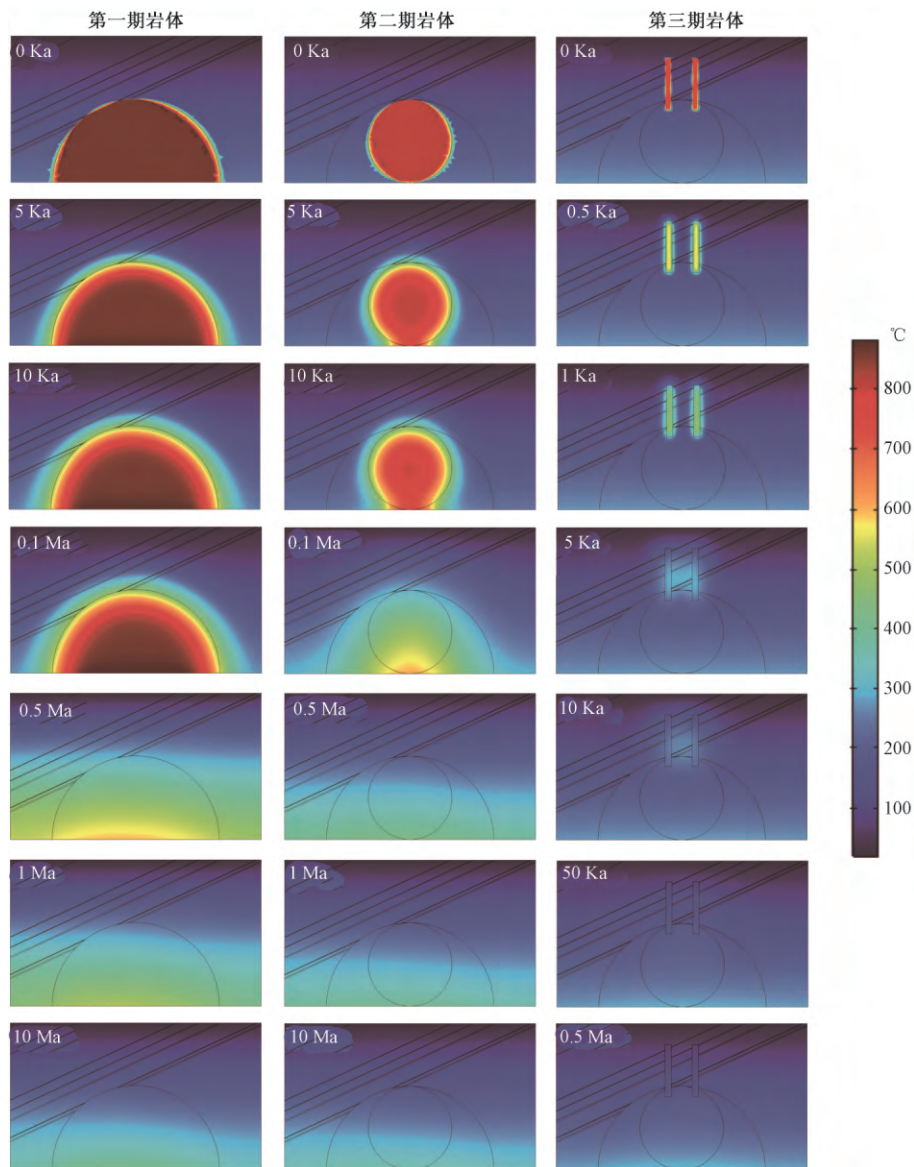


图 4 三期岩体侵位后 T(温度) -t(时间) 演化情况

Fig.4. Variation of T(temperature) -t(time) after Three-stage granite intrusions.

3 绿泥石地质温度计

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、锡等矿床密切相关,其成分复杂,不同的地质环境中,化学成分和晶体结构常会发生规律性变化。研究发现随着形成温度的升高,绿泥石 $w(\text{Al}^{+3})$ 、 $w(\text{Fe}^{2+})$ 、 $w(\text{Fe})/w(\text{Fe}+\text{Mg})$ 值变大,晶体层间面网间距 d_{001} 变大,因此,绿泥石的这种成分随温度变化规律常被用作地质温度计^[19]。廖震等^[20]对都龙锡锌多金属矿床的绿泥石进行系统研究发现绿泥石作为该矿床最重要普遍的蚀变矿物之一,在矿区隐伏花岗岩和岩脉附近,以及含矿夕卡岩及片岩中大量产出,绿泥石化与矿化关系密切,在绿泥石化强的地段,矿化强度也相对较高,通过其矿物组构显示绿泥石形成与热液流体密切相关。刘玉平等^[7]研究表明都龙矿床锡多金属矿化主要与燕山晚期的岩浆热液活动有关,与绿泥石同属岩浆热液作用的产物,可以通过绿泥石温度计来计算恢复岩浆热液成矿温度。

3.1 样品采集

本次研究选择都龙矿区铜街—曼家寨矿段露天采场的绿泥石作为研究对象,在平面上按 200 m×200 m 网度取样,所有样品均采自矿体之中或附近。

3.2 分析方法

在野外观察和显微鉴定基础上,对 19 件样品进行电子探针(EPMA)分析测试。每件样品选取 6~10 个点分析绿泥石化学成分并计算其平均值。测试工作在中国冶金地质总局山东测试中心完成,仪器为日本 JXA-823 型电子探针分析仪,实验中加速电压为 15 kV,束流为 2.0×10^{-8} ,束斑大小为 5 μm 。

通过野外观察和显微鉴定该区的绿泥石,从产状及成因类型将其分成 2 种类型:第 I 类主要与锡石闪锌矿黄铜矿黄铁矿等硫化物共(伴)生,该类绿泥石主要呈叶片状或鳞片状集合体,主要采自于层状,似层状夕卡岩内,与成矿最为密切;第 II 类绿泥石主要与方解石硫化物脉紧密伴生,该类绿泥石呈细小鳞片状或片状(图 5),矿化相对于第 I 类绿泥石较弱(表 2),该类绿泥石主要

采自于斑岩体附近。

绿泥石电子探针分析结果见表 3,特征值和相关参数采用郑巧荣等^[22]的电价差法计算得出(表 4),其成分及温度结果均取每个样品各测点的平均值。由于绿泥石矿物颗粒细小,结构复杂,在利用电子探针分析成分时容易产生误差,因此在分析测试数据前应先剔除因混染产生的测点。本文以 $w(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}+\text{CaO}) < 0.5\%$ 作为判断测点是否符合要求。剔除混染测点后,2 类绿泥石主要化学成分具有如下特点: I 类绿泥石 $w(\text{SiO}_2)$ 为 23.39%~28.13%,平均值为 25.02%; $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 17.27%~20.44%,平均值为 18.72%; $w(\text{MgO})$ 为 4.33%~15.86%,平均值为 7.89%; $w(\text{FeO})$ 为 23.53%~37.86%,平均值为 32.93%。II 类绿泥石, $w(\text{SiO}_2)$ 为 25.27%~28.69%,平均值为 26.66%; $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 14.93%~19.83%,平均值为 17.88%; $w(\text{MgO})$ 为 8.13%~15.39%,平均值为 11.69%; $w(\text{FeO})$ 为 23.21%~33.06%,平均值为 28.88%。对绿泥石种属的分类方案较多,本文采用应用广泛的 Fe-Si 分类方案^[23]对该矿床中的绿泥石进行投图(图 6, Fe、Si 原子数以 28 个氧原子为标准计算)。在 Fe-Si 图解中,所测绿泥石主要为富铁种属的蠕绿泥石(铁绿泥石)、镁铁绿泥石和少量密绿泥石。Inoue 等^[24]认为,在相对还原的环境中有利于形成富铁绿泥石,而在低氧逸度和低 pH 值的环境中有利于形成富镁绿泥石。该矿床的绿泥石,主要为富铁种属的蠕绿泥石(铁绿泥石)和镁铁绿泥石,指示其可能形成于还原环境。

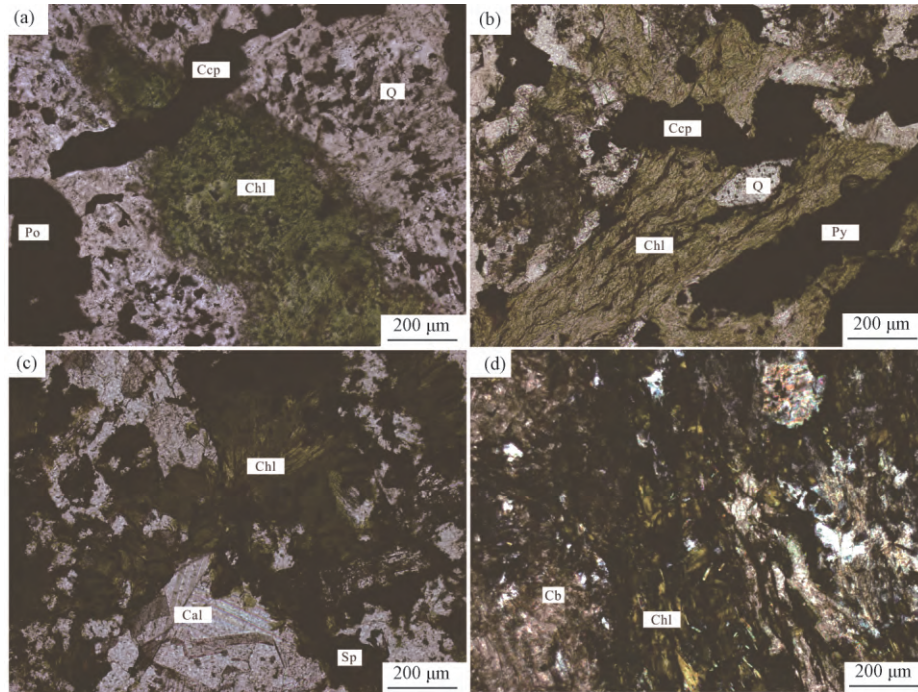
3.3 绿泥石形成温度

绿泥石作为中低温环境下常见的蚀变矿物,其矿物成分、晶体结构的可变性和非计量性等参数,与形成温度之间存在一定的函数关系。因此,被广泛用作地质温度计。国外许多学者对绿泥石形成温度进行了大量研究并总结出几种适用于不同化学种属和温度范围的计算公式。最早, Cathelineau^[25] 1985 年最早提出的利用绿泥石 Al^{IV} 与形成温度间的正相关关系拟合出的温度方程:

$$t/^{\circ}\text{C} = 212n(\text{Al}^{+3}) + 18 \quad (1)$$

此后,他在之前研究基础上提出了修正公式:

$$t/^{\circ}\text{C} = -61.92 + 321.98n(\text{Al}^{+3}) \quad (2)$$



a-片状绿泥石与黄铜矿共生(单偏光); b-绿泥石与黄铜矿,黄铁矿共生(单偏光); c-绿泥石与方解石共生,交代闪锌矿(单偏光); d-绿泥石交代碳酸盐矿物(正交偏光) Chl-绿泥石; Ccp-黄铜矿; Py-黄铁矿; Po-磁黄铁矿; Q-石英; Cal-方解石; Cb-碳酸盐矿物

图 5 都龙锡锌矿床中绿泥石显微照片

Fig.5. Microphotographs of chlorites from the Dulong Sn-Zn polymetallic deposit.

表 2 都龙矿区绿泥石矿相学特征

Table 2. Mineralographic characteristics of chlorites from the Dulong Sn-Zn polymetallic deposit

类型	样品号	岩石性质及描述	主要矿物组合	绿泥石特征
I	22-1, 22-2, 22-16, 24-1, 22-7, 24-11, 24-8, 24-5, 22-15, 22-14, 22-9, 24-4	与石英硫化物共(伴)生的绿泥石	锡石, 闪锌矿, 黄铜矿, 黄铁矿, 绿帘石, 石英, 绿泥石, 阳起石, 萤石, 黑云母	绿泥石呈叶片状, 鳞片状交代黑云母, 阳起石及各种石英硫化物, 或沿其矿物裂隙充填分布
II	25-6, 25-5, 23-3, 25-2, 23-2, 23-6, 22-3	与方解石硫化物共(伴)生的绿泥石	闪锌矿, 黄铜矿, 黄铁矿, 绿泥石, 方解石, 绿帘石	绿泥石呈细小鳞片状或片状与碳酸盐矿物共生或呈脉体形式充填

表 3 都龙锡锌矿床绿泥石电子探针分析结果 (w_B / %)

Table 3. Electron microprobe analyses of chlorites from the Dulong Sn-Zn polymetallic deposit (%)

样品号	高程 (m)	点数	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	FeO	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	NiO	P ₂ O ₅	Total
22-1	1281	8	0.01	9.08	20.4	25.8	30.7	0.46	0.03	0.05	0.01	0.03	0.02	0.01	86.6
22-2	1265	8	0.02	4.33	20.2	23.4	37.8	0.43	0.09	0.07	0.01	0.03	0.01	0.01	86.4
22-3	1266	8	0.01	11.3	19.1	25.6	30.9	0.39	0.02	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	87.3
22-7	1105	8	0.03	7.54	19.1	25.2	33.2	1.05	0.02	0.05	0.02	0.02	0.02	0.00	86.2
22-9	1099	8	0.01	6.68	18.0	25.2	34.8	0.83	0.02	0.11	0.01	0.03	0.01	0.01	85.7
22-14	1096	7	0.01	15.9	17.3	28.1	23.5	1.09	0.00	0.15	0.02	0.01	0.04	0.01	86.1
22-15	1048	5	0.01	5.87	18.2	24.3	37.1	0.80	0.01	0.07	0.09	0.02	0.01	0.01	86.4
22-16	1048	8	0.02	5.28	18.4	23.6	35.6	1.26	0.01	0.08	0.02	0.02	0.01	0.01	84.2
23-2	1044	8	0.01	8.13	18.6	25.4	33.1	1.28	0.01	0.04	0.00	0.02	0.01	0.01	86.5
23-3	1280	8	0.01	13.9	16.8	28.7	27.1	0.57	0.03	0.14	0.07	0.02	0.01	0.01	87.3
23-6	1291	7	0.02	12.1	16.5	26.8	28.5	1.39	0.01	0.06	0.02	0.02	0.03	0.02	85.6
24-1	1280	8	0.01	9.86	20.1	24.9	29.9	0.88	0.07	0.05	0.06	0.01	0.01	0.00	85.8
24-4	919	6	0.02	9.87	17.8	26.7	32.3	0.68	0.01	0.18	0.02	0.02	0.01	0.00	87.6
24-5	936	2	0.00	5.10	19.5	23.9	31.3	5.84	0.00	0.06	0.04	0.01	0.01	0.00	85.8
24-8	914	8	0.01	8.85	18.2	25.1	32.7	0.29	0.01	0.04	0.01	0.02	0.01	0.02	85.1
24-11	970	6	0.04	6.42	17.6	24.2	35.8	0.57	0.03	0.06	0.07	0.02	0.03	0.01	84.9
25-2	1283	7	0.00	9.82	19.8	25.3	30.0	0.69	0.29	0.04	0.06	0.02	0.02	0.01	86.1
25-5	1316	10	0.01	15.4	19.4	26.8	23.2	1.11	0.01	0.05	0.03	0.03	0.02	0.01	86.0
25-6	1318	5	0.03	11.2	14.9	27.9	29.2	1.60	0.01	0.34	0.10	0.01	0.01	0.01	85.4

表 4 都龙矿床中绿泥石结构式及特征值计算(以 14 个 O 原子为基准)

Table 4. Estimated structural formulae and calculated characteristic values of chlorites from the Dulong Sn-Zn polymetallic deposit (based on 14 oxygen atoms)

样品号	高程/m	点数	Na	Mg	Al	Si	Fe	Mn	Ti	Ca	K	Cr	Ni	P	^{IV} Al	^{VI} Al	<i>d</i> ₀₀₁	<i>t</i> /°C
22-1	1281	8	0.00	1.53	2.71	2.72	2.89	0.04	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	1.28	1.44	14.1	245.4
22-2	1265	8	0.00	0.76	2.81	2.60	3.75	0.04	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	1.40	1.41	14.1	277.2
22-3	1266	8	0.00	1.86	2.43	2.75	2.94	0.04	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	1.25	1.18	14.1	243.1
22-7	1105	8	0.01	1.29	2.60	2.73	3.22	0.10	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	1.27	1.33	14.1	251.4
22-9	1099	8	0.00	1.17	2.49	2.78	3.42	0.08	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	1.22	1.27	14.1	249.4
22-14	1096	7	0.00	2.59	2.23	2.89	2.16	0.10	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	1.11	1.12	14.1	211.2
22-15	1048	5	0.00	1.03	2.53	2.70	3.67	0.08	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	1.30	1.23	14.1	264.4
22-16	1044	8	0.01	0.95	2.62	2.68	3.61	0.13	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	1.32	1.30	14.1	265.0
23-2	1280	8	0.00	1.40	2.53	2.74	3.19	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.26	1.27	14.1	249.2
23-3	1291	8	0.00	2.27	2.17	2.95	2.49	0.05	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	1.05	1.12	14.1	211.0
23-6	1280	7	0.00	2.06	2.22	2.87	2.72	0.13	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	1.13	1.09	14.1	225.6
24-1	919	8	0.00	1.67	2.69	2.66	2.85	0.08	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	1.34	1.36	14.1	252.0
24-4	936	6	0.00	1.66	2.36	2.82	3.05	0.07	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	1.18	1.18	14.1	237.1
24-5	934	2	0.00	0.90	2.72	2.66	3.10	0.59	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	1.34	1.38	14.1	257.2
24-8	914	8	0.00	1.54	2.50	2.74	3.19	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.26	1.24	14.1	249.7
24-11	970	6	0.01	1.15	2.49	2.72	3.59	0.06	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	1.28	1.21	14.1	259.8
25-2	1283	7	0.00	1.66	2.65	2.69	2.85	0.07	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	1.31	1.34	14.1	248.7
25-5	1316	10	0.00	2.51	2.50	2.75	2.12	0.10	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	1.25	1.25	14.15	226.7
25-6	1318	5	0.01	1.92	2.03	3.02	2.79	0.16	0.00	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.98	1.05	14.17	209.5

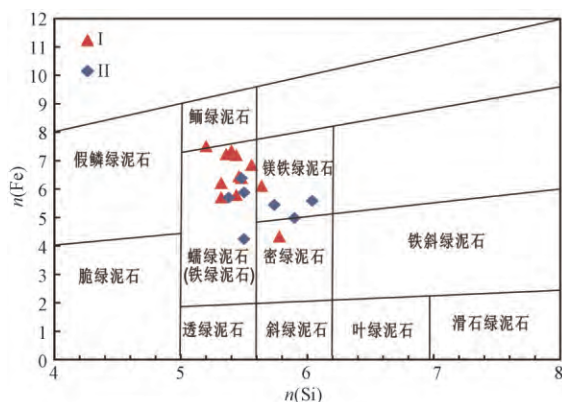


图 6 都龙锡锌矿床绿泥石分类图解(据 Deer 等, 1962)

Fig.6. Classification of chlorites from the Dulong Sn-Zn polymetallic deposit (after Deer et al. , 1962).

1987 年, Kranidiotis 和 MacLean^[26] 认为 Cathelineau 的温度计只注重 Al^{IV} 与温度之间的关系, 没考虑全岩组分的变化, 主要是 $Fe/(Fe+Mg)$ 值对 Al^{IV} 的影响, 因此, 提出了修正公式:

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

他们还强调该公式的适用条件为 Al 饱和型绿泥石。随后 Jowett^[27] 在 1991 年同样考虑 Mg、Fe 值对温度计影响的基础上对公式(3)进行了修正, 拟合出方程:

$$t = 319(n(Al^{+3}) + 0.1 [n(Fe) / n(Fe + Mg)]) - 69 \quad (4)$$

此公式适用于 $n(Fe) / n(Fe+Mg) < 0.6$ 、温度

在 150~325 °C 的地热体系。之后 Stefano^[28] 1999 年提出应用 X 射线数据计算绿泥石形成温度的新思路, 拟合出绿泥石面网间距与形成温度的关系式:

$$d_{001} / 0.1 \text{ nm} = 14.379 - 0.001t / ^{\circ}C \quad (5)$$

此后不久, 在缺失 XRD 数据的情况下 Nieto^[29] 对上述公式进行修正

$$d_{001} / 0.1 \text{ nm} = 14.339 - 0.1155n(Al^{+3}) - 0.0201n(Fe^{2+}) \quad (6)$$

根据表 4 都龙矿区的绿泥石 $n(Fe) / n(Fe + Mg) > 0.6$, 显微镜下观察矿区绿泥石主要与石英或者黄铜矿、黄铁矿等硫化物共生或伴生, 很少见到富 Al 矿物共生, 因此, 根据本文的实际情况, 采用多数研究者广泛认可的公式(5)、(6) 计算绿泥石形成温度(见表 4)。由表 4 可见曼家寨矿段的绿泥石温度范围在 209 ~ 277 °C, 平均温度 249 °C, 属于中低温热液蚀变范围。

4 讨 论

4.1 绿泥石温度-岩体距离的关系

前人对都龙矿区的研究表明, 矿区绿泥石与锡多金属矿化同属岩浆热液的产物, 绿泥石形成温度可指示成矿温度。鲍谈^[30] 等人将该矿床划分为以下几个矿化阶段: (1) 进变质夕卡岩阶段(以石榴石、辉石、绿帘石等为主), 该阶段萤石包

裹体均一温度变化范围为 320~400 °C; (2) 磁铁矿阶段(以磁铁矿、锡石和白钨矿为主), 该阶段白云石均一温度变化范围为 260~350 °C; (3) 硫化物阶段(早期硫化物阶段, 以黄铜矿、磁黄铁矿、毒砂、石英、萤石等为主, 晚期硫化物阶段, 以闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、石英、萤石、方解石为主), 该阶段石英、萤石包裹体均一温度变化范围为 200~280 °C; (4) 碳酸盐阶段(以闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、方解石为主), 该阶段方解石均一温度变化范围为 180~230 °C。整个成矿温度在 180~400 °C。本次研究的 19 个绿泥石样品温度为 209~277 °C, 属于中低温范围, 与鲍谈对该矿床系统的流体包裹体显微测温范围 180~400 °C 基本一致。其中, 第 I 类绿泥石形成温度在 220~277 °C, 平均温度 253 °C, 如图 5 中的 a、b 绿泥石, 与黄铜矿闪锌矿等硫化物共生, 通过镜下观察, 可见黄铜矿等硫化物脉体穿插绿泥石, 绿泥石应早于黄铜矿等硫化物, 代表了一期主要的成矿事件, 可能形成于成矿较早期。而第 II 类绿泥石如图 5 中的 c、d 绿泥石, 主要与方解石等碳酸盐矿物共生, 且矿化较第 I 类绿泥石弱, 形成温度在 209~249 °C, 平均温度 228 °C, 可能形成于成矿较晚期。

根据矿区多年来 300 多个钻孔资料揭露的隐伏岩体顶板等深资料, 拟合出每个采样点绿泥石形成温度与岩体的距离的关系如图 7, 可见 2 类绿泥石随着与岩体的距离增大, 绿泥石形成温度呈逐渐降低的趋势, 表明绿泥石的形成可能与隐伏花岗岩浆侵入活动密切相关, 与绿泥石同期形成的锡多金属矿矿化可能也受隐伏岩体温度场的影响。

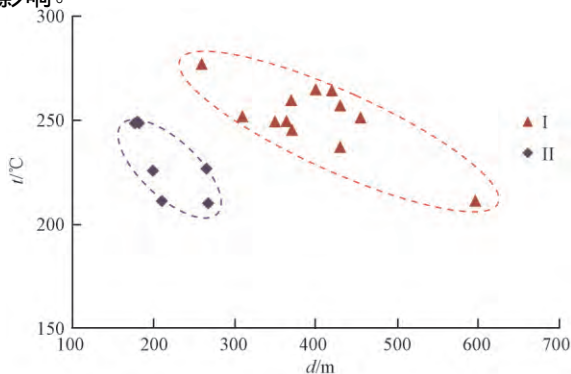


图 7 绿泥石温度-岩体距离关系图

Fig.7. The plot of the temperature for the chlorite versus the distance from the chlorite to the granite body.

4.2 绿泥石形成温度与温度场数值模拟的对比

隐伏岩体的地质特征表明, 第 1 期岩体与围岩接触带普遍发育较厚的硅化壳, 仅在穿切硅化壳的裂隙中, 见钨锡矿化; 第 2 期与围岩接触部位以及其突起上方 100 m 范围内, 偶见硅化壳, 常形成“干夕卡岩”, 100~500 m 范围, 常形成“湿夕卡岩”, 矿区 70% 以上的矿体均集中在“湿夕卡岩”之中及附近, 成矿元素以锡锌铜为主; 第 3 期与围岩接触部位常形成硅化-碳酸盐化-萤石化, 以及相关的小而富的中低温锡铜钨多金属脉状矿化。因此, 可见成矿主要与第 2、3 期岩体密切相关。这 2 期岩体岩浆侵位形成的温度场是驱使成矿元素活化迁移, 在有利的容矿空间聚集成矿的关键因素。本次所采绿泥石样品温度为 209~277 °C, 所处位置在距岩体 181~596 m 的范围, 为了验证绿泥石矿物温度与隐伏岩体数值模拟的温度场, 对比绿泥石温度场 200~300 °C 范围与模拟计算的第 2、3 期隐伏岩体 200~300 °C 温度场最大范围(图 8)。由图 8 可以看出, 绿泥石样品 200~300 °C 所处位置全部位于第 2 期岩体侵位后 200~300 °C 温度场范围内, 绿泥石温度场与温度场模拟结果吻合较好, 说明模拟结果能够一定程度反映真实温度场演化情况, 第 2 期岩浆侵位后, 高温岩浆与相对较冷的围岩进行热量与物质传递, 在较短的时间内形成一个局部的远远高于正常地温场的温度场, 使得流体运移成矿元素迁移到岩体附近有利的容矿空间汇聚成矿。由图 8 可见, 绿泥石 200~300 °C 温度场部分位于第 3 期岩体形成的 200~300 °C 温度场内。相对于第 2 期岩体, 第 3 期岩体的规模较小, 形成的温度场的范围小, 存在时间短。本次采集的绿泥石样品来自于整个铜街-曼家寨矿段, 绿泥石样品形成温度可能主要受第 2 期岩体温度场影响, 部分位于第 3 期岩体附近的样品可能受第 3 期岩体温度场影响。从采样位置与 2 期岩体温度场结果表明, 第 I 类绿泥石可能主要与第 2 期岩体有关, 第 II 类绿泥石可能主要与第 3 期岩体有关。因此, 对于本次研究的 2 类绿泥石, 其形成温度总体与距隐伏岩体的距离成正相关关系, 但部分样品距第 3 期岩体较近, 而距第 2 期岩体较远, 可能形成温度主要受第 3 期岩体影响, 所以导致部分绿泥石距第 2 期岩体距离远而形成温度较高的这种现象。

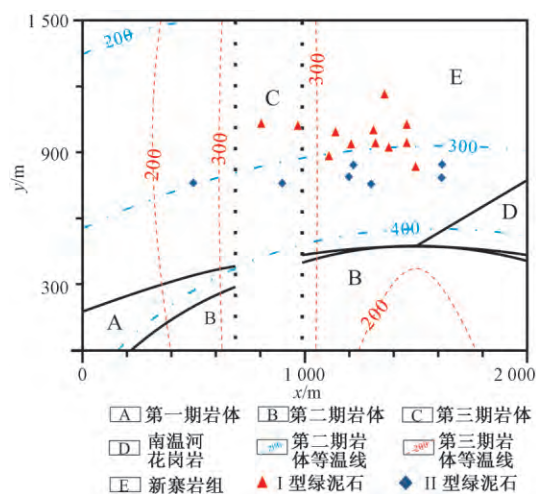


图 8 绿泥石形成温度与温度场数值模拟对比图

Fig.8. Comparison diagrams of temperatures for the chlorite with the numerical simulated temperature field.

4.3 找矿启示

当前研究表明,都龙矿区锡多金属矿化主要与矿区深部燕山晚期隐伏花岗岩体(第2、3期岩体)密切相关,成矿温度在180~400 °C,矿区绿泥石与锡多金属矿化同属岩浆热液的产物,绿泥石温度可指示成矿温度。本文温度场数值模拟结果显示,该矿床温度场围绕岩体呈环带状分布,第2期岩体对围岩的热扰动持续时间约为5 Ma,影响范围约1.5 km,第3期岩体对围岩的热扰动持续时间约50 Ka,影响范围约500 m。在该矿床铜-曼矿段所采绿泥石温度计算结果与温度场数值模拟的采样位置的温度吻合较好。因此,在第2、3期岩体侵位后形成的温度场180~400 °C空间范围(第2期岩体外围1.2 km、第3期岩体外围400 m范围内)可能是成矿找矿的有利位置,特别是硫化物成矿阶段200~280 °C(第2期岩体外围600 m范围、第3期岩体外围300 m)空间范围可能是成矿找矿的最有利位置。

5 结论

通过对都龙矿区成矿温度场的数值模拟及绿泥石温度计研究,得到如下几点初步认识:

(1) 燕山晚期隐伏花岗岩体对围岩温度场的影响,第1期约10 Ma,影响范围达2.5 km;第2期约5 Ma,影响范围可达1.5 km;第3期约50 Ka,影响范围约500 m。

(2) 都龙矿床的绿泥石,主要为富铁种属的蠕绿泥石(铁绿泥石)和镁铁绿泥石,矿区绿泥石

的形成温度为209~277 °C,属于中低温热液蚀变范围。

(3) 温度场的数值模拟结果与绿泥石温度计结果基本吻合,在第2期岩体外围1.2 km、第3期岩体外围400 m范围内可能是成矿找矿的有利位置;在第2期岩体外围600 m、第3期岩体外围300 m空间范围内可能是成矿找矿的最有利位置。

参 考 文 献:

- [1] 周祖贵. 都龙矿区资源总价值[J]. 云南冶金, 2002, 31(5): 62-64.
- [2] 周建平, 徐克勤, 华仁民, 等. 滇东南锡多金属矿床成因商榷[J]. 云南地质, 1997, 16(4): 309-349.
- [3] 范承钧. 云南锡矿带之划分及其区域成矿地质特点[J]. 云南地质, 1988, 7(1): 1-12.
- [4] 周建平, 徐克勤, 华仁民, 等. 滇东南喷流沉积块状硫化物特征与矿床成因[J]. 矿物学报, 1998, 18(2): 158-168.
- [5] 刘玉平. 一个受后期改造和热液叠加的块状硫化物矿床——都龙超大型锡锌多金属矿床[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1998, 17(1): 24-26.
- [6] 刘玉平, 李朝阳, 谷团, 等. 都龙锡锌多金属矿床成矿物质来源的同位素示踪[J]. 地质地球化学, 2000, 28(4): 75-82.
- [7] 刘玉平, 李正祥, 李惠民, 等. 都龙锡锌矿床锡石和锆石U-Pb年代学: 滇东南白垩纪大规模花岗岩成岩-成矿事件[J]. 岩石学报, 2007, 23(5): 967-976.
- [8] 蓝江波, 刘玉平, 叶霖, 等. 滇东南燕山晚期老君山花岗岩的地球化学特征与年龄谱系[J]. 矿物学报, 2016, 36(4): 441-454.
- [9] 叶霖, 鲍谈, 刘玉平, 等. 云南都龙锡锌多金属矿床成矿阶段与成矿流体[J]. 矿物学报, 2016, 36(4): 503-509.
- [10] 张旗, 金惟浚, 李承东, 等. 岩浆热场与热液多金属成矿作用[J]. 地质科学, 2015, 50(1): 1-29.
- [11] 张世涛, 冯明刚, 吕伟. 滇东南南温河变质核杂岩解析[J]. 中国区域地质, 1998, 17(4): 390-397.
- [12] 忻建刚, 袁奎荣. 云南都龙隐伏花岗岩的特征及其成矿作用[J]. 桂林冶金地质学院学报, 1993, 13(2): 122-129.
- [13] 宋焕斌. 云南东南部都龙锡石-硫化物型矿床的成矿特征[J]. 矿床地质, 1989, 8(4): 29-38.
- [14] 苏航, 韦文彪, 陶志华, 等. 云南都龙矿区隐伏花岗岩地质地球化学特征与锡锌成矿作用[J]. 矿物学报, 2016, 36(4): 488-496.
- [15] 张旗, 金惟浚, 李承东, 等. 岩浆热场: 它的基本特征及其与地热场的区别[J]. 岩石学报, 2014, 30(2): 341-349.
- [16] 黄元有, 冉灿, 吕许朋. 云南元阳-马关地区布格重力异常及其找矿意义[J]. 云南地质, 2011, 30(3): 336-339, 331.
- [17] Geiger S, Driesner T, Heinrich C A, et al. Coupled heat and salt transport around cooling magmatic intrusions [J].

- Geochimica et Cosmochimica Acta Supplement* ,2005 ,69(10) : A739.
- [18] 於崇文,岑况,鲍征宇,等. 热液成矿作用动力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社,1993: 1-310.
- [19] 郑伟,陈懋弘,赵海杰,等. 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,2013,32(1): 23-40.
- [20] 廖震,刘玉平,李朝阳,等. 都龙锡锌矿床绿泥石特征及其成矿意义[J]. 矿床地质,2010,29(1): 169-176.
- [21] 郑巧荣. 由电子探针分析值计算 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} [J]. 矿物学报,1983(1): 55-62.
- [22] Deer W A , Howie R A , Zussman J. *Rock-forming Minerals. Sheet Silicates* [M]. New York: Wileys ,1962: 1-270.
- [23] Inoue A. Formation of clay minerals in hydrothermal environments [A]. Velde B. *Origin and Mineralogy of Clays* [M]. Berlin Heidelberg: Springer ,1995: 268-329.
- [24] Cathelineau M. Cation site occupancy in chlorites and illites as a function of temperature [J]. *Clay Minerals* ,1988 ,23(4) : 471-485.
- [25] Kranidiotis P , MacLean W H. Systematics of chlorite alteration at the Phelps Dodge massive sulfide deposit , Matagami , Quebec [J]. *Economic Geology* ,1987 ,82(7) : 1898-1991.
- [26] Jowett C. Fitting Iron and Magnesium into the Hydrothermal Chlorite Geothermometer [C]// Geological Association of Canada + Mac + Seg Joint Meeting ,1991: A62.
- [27] Battaglia S. Applying X-ray geothermometer diffraction to a chlorite [J]. *Clays and Clay Minerals* ,1999 ,47(1) : 54-63.
- [28] Nieto F. Chemical composition of metapelitic chlorites: X-ray diffraction and optical property approach [J]. *European Journal of Mineralogy* ,1997 ,9(4) : 829-842.
- [29] 鲍谈,叶霖. 都龙矽卡岩型锡锌多金属矿床成矿流体研究 [J]. 矿物学报,2013,33(S2): 426-427.