

电子探针技术在岩石学中的应用 ——以沙峪口岩体为例

张茜, 李壮, 秦明硕

(中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102200)

摘要: 以沙峪口岩体的花岗闪长岩样品单矿物地球化学数据为例, 揭示了电子探针在岩石学研究方面的应用, 包括矿物种类鉴定、矿物环带结构研究、厘定岩浆过程等。电子探针数据显示: 磷灰石的 MgO 含量由核到边先减小后增加随后又减小, 呈震荡变化规律; 黑云母的 MgO 含量为 9.07%~9.33%, FeO 含量为 21.56%~22.06%, Na₂O 含量为 0.1%~0.18%, 全碱 (Na₂O+K₂O) 含量为 7.57%~9.48%, Fe²⁺/(Fe²⁺+Mg) 的比值为 0.75, 应归类为铁质黑云母; 斜长石的 An 含量变化为 13.78%~28.39%, 变化范围较小, 与典型岩浆混合过程中结晶的斜长石特征不一致。磷灰石的元素含量变化和矿物学特征指示其形成于岩浆演化过程早期; 黑云母属于再平衡原生黑云母, 且具有壳幔混合源区属性, 指示其形成于岩浆混合作用过程中, 与沙峪口花岗闪长岩体中暗色微粒包体和中性同深成岩墙广泛出露的现象相符合; 斜长石由核到边的 An 含量整体较为均一, 指示岩浆演化晚期的均一化过程。

关键词: 电子探针组成; 电子探针原理; 沙峪口岩体; 矿物地球化学; 岩浆混合

Electron probe X-ray in petrological analysis: a case study of Shayukou Village

ZHANG Xi, LI Zhuang, QIN Mingshuo

(College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102200, China)

Abstract: With the help of the geochemical data of single mineral from the Shayukou granodiorite samples, we revealed the usage of the electron microprobe in geological research, including mineral identification, mineral zonal structure analysis and major element determination used in the magma processes. The electron probe data showed that the MgO content of apatite first decreased in the core, then increased in the mantle and finally decreased in the edge, showing an oscillation variation pattern. The biotite has a MgO content of 9.07%~9.33%, FeO of 21.56%~22.06%, Na₂O of 0.1%~0.18%, total alkali (Na₂O + K₂O) of 7.57%~9.48%, and Fe²⁺/(Fe²⁺ + Mg) of 0.75, belonging to the iron biotite. The An content in plagioclase is 13.78%~28.39%, which is relatively uniform overall and inconsistent with the characteristics of plagioclase formed by the typical magma mixing process. The element content and mineralogy characteristics of apatite indicate that it was formed in the early stage of magmatic evolution. Biotite belongs to the re-balanced primary biotite and has the attribute of crust-mantle mixing source area, indicating a

收稿日期: 2023-02-15; 修回日期: 2023-05-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42002238, 41804045)、中国石油大学(北京)科研基金项目 (2462017YJRC032, 2462021YXZZ04)、自然资源部东北亚矿产资源评价重点实验室开放课题基金项目 (DBY-KF-19-03) 联合资助

第一作者简介: 张茜 (2002-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 岩石学与储层地质学。E-mail: 19939785110@163.com

通信作者简介: 李壮 (1989-), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事岩石学和前寒武纪地质学研究工作。E-mail: lizhuangcc@pku.edu.cn

引用格式: 张茜, 李壮, 秦明硕, 2023. 电子探针技术在岩石学中的应用: 以沙峪口岩体为例 [J]. 城市地质, 18 (3): 100-111

production of magma mixing process, which is consistent with the common exposure of mafic microgranular enclaves and neutral to basic syn-plutonic dyke in Shayukou granodiorite. The An contents in the Plagioclase are relatively uniform, indicating the homogenization process in the late stage of magma evolution.

Keywords: electron probe composition; theory of electron probe; Shayukou Intrusion; mineral geochemistry; magma mixing

花岗岩是地壳大陆的主体,其成因研究对揭示地壳的形成和演化具有重要意义。花岗岩的造岩矿物(如斜长石、黑云母等)的化学成分特征可以有效地用来追踪壳幔岩浆混合的过程,进一步反映岩浆形成过程的物理化学性质及岩浆演化特征(Kuscu, 2001; 徐夕生等, 2010)。岩浆中矿物颗粒形成多种不同的结构,其中又尤以斜长石成分与结构的变化受到周围岩浆影响最为明显。黑云母是花岗岩分布最广的铁镁质矿物,其化学成分受到岩浆结晶时的物化条件,如温度、压力及氧逸度条件的限制,因此,黑云母可以记载岩浆演化及其来源等成岩信息。除了典型的造岩矿物黑云母,这种常见的副矿物磷灰石,作为早期结晶相,其结构、元素等特征也可指示岩浆岩源区、演化和热液作用等过程。华北克拉通发育的大规模中生代花岗岩是研究岩浆演化的天然载体。近年来,如北京云蒙山和怀柔地区长园杂岩体的年代学研究表明(姬广义等, 2004),其形成年代大致处于燕山晚期,而长园杂岩体和围岩的构造变形特征又表明,中、晚侏罗世构造应力场的改变是影响该地区岩体结构的重要因素。作为研究岩浆起源、成因及演化重要证据之一的暗色微细粒闪长质包体在北京市怀柔区沙峪口一带岩石中普遍出露,但并没有引起足够的重视。Chen等(2009)通过研究中国华北克拉通太行中生代花岗岩中暗色微细粒闪长质包体的成因提出了一个经典模型,演化的玄武质岩浆首先在深部与壳源花岗质岩浆混合,然后混合岩浆在进入花岗质岩浆房时分裂成离散的球状体,通过对流运动或在花岗质岩浆中强制注入形成了暗色微细粒闪长质包体。紧接着是在两类岩浆接触处发生了斜长石晶体的双重机械转移,以及流动元素从花岗质岩浆向形成包体的岩浆处扩散,揭示出了两种岩浆在混合时的演化过程。那么京西怀柔沙峪口地区花岗岩是否也经历了同样的岩浆混合过程,其详细的岩浆演化又是如何呢?本研究试图从矿物化学角度对以上科学问题进行探讨。

电子探针作为现代分析测试技术之一,在岩石学方

面对岩浆演化具有重要意义(李祥等, 2016; 林霖, 2019; 李小犁, 2021; 张迪, 2019)。电子探针分析中矿物的微量元素含量都具有大型标定意义,反映出重要的地质成因环境,是物质科学重要的研究分析对象,近年来电子探针能够在极小微区条件下对微量元素进行分析,具有显著的技术优势(李小犁, 2021)。本文通过对电子探针技术的介绍以及对沙峪口花岗闪长岩岩体的宏观、微观特征和磷灰石、黑云母及斜长石地球化学数据的研究,揭示电子探针技术在岩石学方面的应用,进而为沙峪口花岗闪长岩的成因提供了重要的岩石学证据。

1 电子探针结构组成

电子探针的全称为电子探针X射线显微分析仪,英文 Electron Probe X-ray Micro-Analyzer,简称 EPMA (Castaing, 1956),是常见的一种分析化学的仪器。电子探针主要由电子光学系统、X射线谱仪(分光色散)系统和信息记录显示系统组成(龚玉爽等, 2011)。电子探针系统中探针是指加速和聚焦的极窄的电子束。其工作原理为利用特定的电子束激发选定的试样中某一微小区域,使其发射特征X射线。通过仪器测定该X射线的波长和强度,就能对该区域的元素做定性或定量分析(周剑雄, 1988)。定性分析的元素范围除了H、He、Li、Be等几个较轻元素、U元素以后的元素,其余元素都能进行;定量分析的元素范围一般为Na-U元素(朱和国等, 2013)。本文所采集的样品来自北京北部燕山地区怀柔沙峪口岩体的花岗闪长岩,对编号为SYK2-6的薄片进行了电子探针实验研究。

1.1 电子光学系统

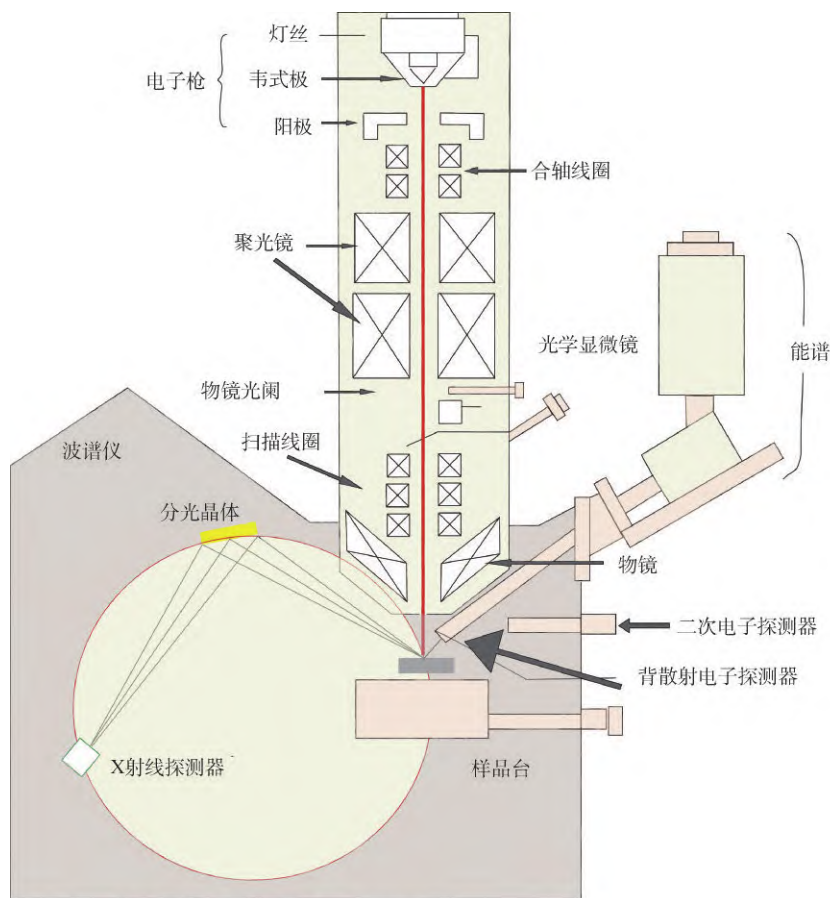
电子光学系统由电子枪、小物镜、消像散器、电磁透镜、扫描线圈组成(周建雄, 1988)(图1)。其中,电子枪由阴极灯丝、栅极和阳极组成,产生电子束,激发稳定X射线;物镜和会聚透镜组成电磁透镜,其可以

用于会聚电子束；利用小物镜可以在物镜和试样之间安置更多的信号探测器；消像散器可用于消除像散；双偏线圈组成扫描线圈，可在试样和显像管上同步扫描电子束；电子探针镜筒部分与扫描电镜所不同的地方在于光学显微镜（李祥等，2016；朱和国等，2013）。电子探针分析过程中，光学系统会在样品表面提供电子束，并且电子束有足够高的能量、足够大的光束、足够小的光斑直径，以此作为X射线的激发源。为了提高X射线信号强度，电子探针必须使用比扫描电子显微镜更高的入射电子束。电子探针常用的加速电压为10~30 kV，常见的光束光斑直径约为0.5 μm 。在显微镜下可以观察到受到电子束轰击的位置通过样品转移到移动设备光学显微镜目镜十字线交叉点，轰击点位正好在分析X点上，也确保了分析点在X射线分光谱仪的正确位置。通常用于电子探针的光学显微镜多为同轴反射式物镜，具有光学观测和X射线分析同时进行的优点，可放大

100~500 倍（朱和国等，2013；林霖等，2019；李小型，2021）。

1.2 X射线谱仪(分光色散)系统

X 光谱仪的工作特性决定了其灵敏度和分辨能力，其主要功能是测定X射线的波长和强度。X射线是一种具有波粒二象性的电磁波，其表征方法有2种。X射线是一种连续的电磁波，它的波长是固定的，不同元素对应不同的特征X射线波长，如果不同波长的X射线入射到晶体上，就会产生衍射（郑巧荣，1983）。根据Bragg公式 $2d\sin\theta=n\lambda$ 可知，通过选用已知面间距 d 的合适晶体分光，求其波长 λ ，只要测出不同特征X射线所产生的衍射角 θ 即可。再根据Moseley公式： $V^{1/2}=K(Z-\sigma)$ 可得出所分析的元素（Z）种类，由波谱仪的探测器（正比计数管）测得特征X射线的强度（李香庭，1980；毛水和，1992）。



资料来源：底图据（姚立，2008）修改

图1 电子光学系统

Fig. 1 Electron optical system

1.3 信号记录显示系统

信号记录系统由电磁透镜系统、样品台驱动系统、X射线分光器运行系统、X射线检测系统组成,用于各种信号的采集,各种定性和定量分析的物理校正,各种图像处理,各种计算表面分析等。在大量的面分析数据中,需要用到大型的计算机。计算机技术的快速发展使得复杂的修正计算可以在一刹那完成。该系统能用彩色显示器进行连续无人值守的自动检测和分析(李祥等,2016)。

2 电子探针分析方法

电子探针有3种基本工作方式,包括点分析、线分析和面分析。点分析用于选定点的全谱定性分析或定量分析,以及对其中所含元素进行定量分析;线分析用于显示元素沿选定直线方向上的浓度变化;面分析用于观察元素在选定微区内浓度分布(郑巧荣,1983;朱和国等,2013)。

1) 点分析

首先使用定性分析的方法对待测试样进行全谱分析,确认能够检出的所有元素。其原理为构成的元素(相应的原子序数 Z)与其所生成的特征X射线波长(λ)呈单值关系,即每一种元素都有相应特定波长的特征X射线,并且不随入射电子的能量而改变。如果用X射线的波谱仪测量电子激发试样所产生的特征X射线波长的种类,即可确定试样中所存在元素的种类。定性分析的基础是Moseley关系式: $V^{1/2} = K(Z - \sigma)$ ($\lambda = C/V$),式中 V 为元素的特征X射线频率, Z 为原子序数, K 与 σ 均为常数, C 为光速。当 $\sigma \rightarrow 1$ 时, λ 与 Z 的关系式可写成: $\lambda = (1.21 \times 10^3)/(Z - 1)^2$ 。定量分析为ZAF修正法,即对接收到的特征X射线信号强度必须进行原子序数修正(Z)、吸收修正(A)和荧光修正(F)(朱和国等,2013;郭国林等,2005;李德忍,1982)。

2) 线分析

沿着选定的直线在样品表面进行扫描,谱仪固定接收特定元素的特征X射线信号,该X射线信号的强度在该线上的变化曲线能够反映该测量元素的密度分布(王汝成等,2006;王军鹏等,2020)。

3) 面分析

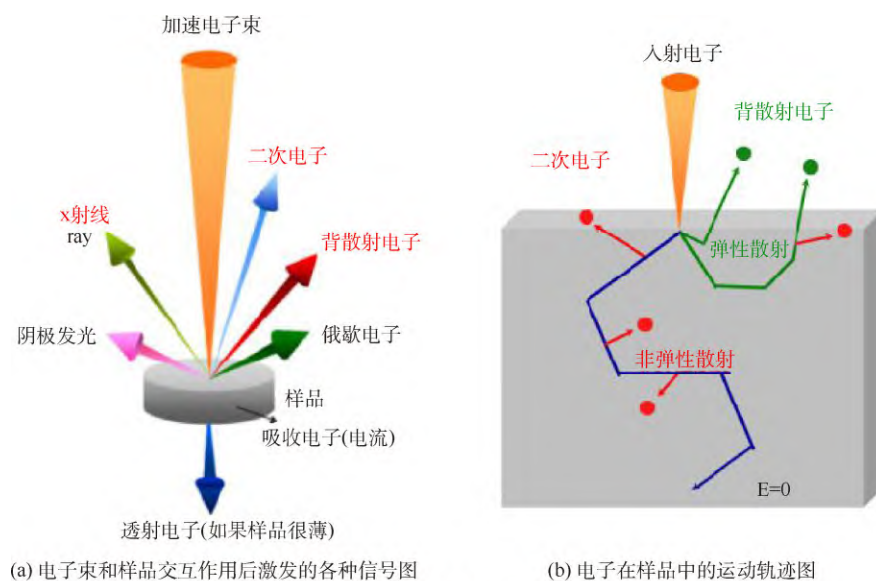
通过对样品表面选定的微区入射电子束进行光栅扫描,谱仪可以固定接收某一元素的特征X射线信号,并以此调制荧光屏的亮度,从而获得样品微区内被测元素的分布情况。

3 电子探针原理

电子探针原理(图2)是利用一束可聚焦到无穷细小的高能量加速电子(10~30 kV),来对试样微区进行轰击从而激发出不同的X射线能量(光子),经过探测系统的捕捉以及后期计算机软件分析处理,将其转换为相应的元素类型和含量信息(张文兰等,2003;张迪等,2019;李小犁等,2017)。同时,电子的轰击还会产生其他能量(背散射电子、二次电子、透射电子、吸收电子、阴极发光等),可以提供相应的电子图像信息。该设备最大的优点在于能够对样品的某个微小区域进行定性和定量分析,而不造成明显的物理化学损坏。电子探针分析可以在非常高的空间分辨率(二次电子图像,10 nm)条件下,获取微区的形貌和成分图像信息,并且不破坏样品的原结构,其所能完成的分析测试工作是其他分析化学仪器不可替代的。电子探针是现代科技发展的重要技术支撑,在物理、化学、化工、地质、冶金、机械、环境以及微电子、生物医学等领域都有广阔的应用(姚立,2008;张迪等,2019;陈灵泉等,2020)。

尽管电子探针功能强大,但是电子探针技术也面临诸多挑战,如理论上可分析的元素种类非常多,但并不是每种元素都得以高质量、高精度的测试(陈意等,2020)。分析测试过程中,虽然无法对所有的微量元素定量分析,但是可以尽量减少待测元素的种类以获取相应的数据,是目前比较稳妥和合理的电子探针分析方案(李小犁等,2017)。相比LA-ICP-MS方法,电子探针测试某些微量元素含量中具有显著技术优势,如李小犁(2023)利用电子探针分析钻石的微量元素时发现,其Hf和Ti测试结果更精准,这在研究元素行为特征中具有重要意义。

最后,在电子探针定量分析中,测试分析的样品数量对于地质样品分析尤其重要,因为大多数的地质样品都存在局部/微区范围的成分不均匀,导致每次分析结



(a) 电子束和样品交互作用后激发的各种信号图

(b) 电子在样品中的运动轨迹图

资料来源：据（李香庭，1980）

图2 电子探针系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the electron probe system

果都会有一定的波动，特别是对微量元素的分析，将影响到矿物中微量元素平均含量的评估（徐萃章，1990）。为解决这个问题，可采用迭代计算方法，避免因单个测试所得一个极大或极小值最后影响到平均含量的正确考量，同时避免了海量数据测试的浪费和非必要性（张迪，2019；李小平，2021）。

4 电子探针的应用——矿物环带结构研究

4.1 沙峪口区域地质概况

北京怀柔沙峪口地区属华北地层分区，为云蒙山岩体的一部分（郁建华等，1994；Zhu et al., 2015）。云蒙山地区岩性主体为早白垩世花岗闪长岩基，并为多期花岗质岩脉所穿切，围岩由太古宙基底片麻岩、中晚元古代及古生代的碳酸盐岩和碎屑岩、侏罗纪的火山岩和火山碎屑岩、稍早侵位于中元古代变质沉积岩组成（Zhu et al., 2015；陈灵泉等，2020）（图3）。四合堂岩群以各种黑云、角闪、辉石斜长片麻岩和各种变粒岩为主；密云岩群下部为黑云角闪二辉斜长片麻岩和二辉麻粒岩，中部为黑云斜长片麻岩、变粒岩和石榴角闪二辉麻粒岩，上部为榴辉黑云变粒岩和石榴斜长辉石（角闪）岩。云蒙山地区寒武系以浅水陆表沉积的碳酸盐岩为主，夹部分陆源碎屑岩。侏罗系广泛出露于云蒙山的北缘和零星出露于南东方向，以盖层的方式覆盖在云蒙

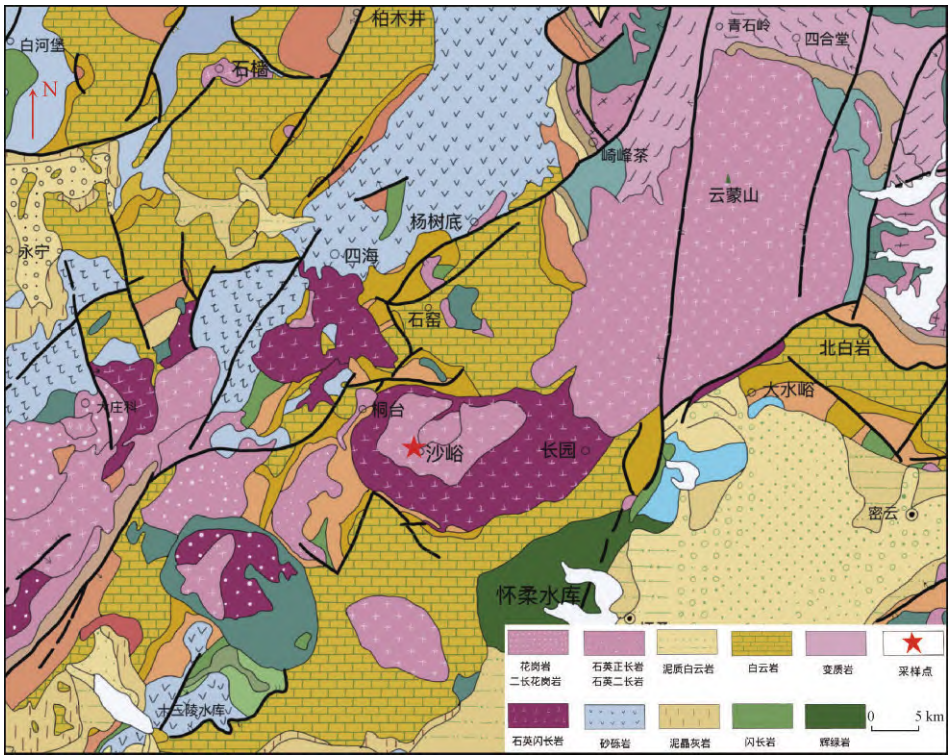
山以北的中元古界之上（Zhu et al., 2015；Davis et al., 1996）。Davis等（1996）基于云蒙山地区北缘发育一套北倾的岩层和构造判断出此处变质的长城系和蓟县系倒转，而以北10 km处长城系与蓟县系层序正常，与太古宙基底呈不整合接触，且变形变质的强度很低，为四合堂推覆体。云蒙山岩体北缘及其北太古宙基底与中元古代盖层中发育一条3~8 km宽的韧性剪切带，称为四合堂韧性剪切带。

岩浆活动的高峰时期出现在晚三叠纪、晚侏罗纪和早白垩纪，晚侏罗纪更为常见，岩体形成年龄为141~159 Ma（Davis et al., 1998），长约20 km，宽约12 km，面积约240 km²，呈北东-南西展布的不规则穹隆形态，称为云蒙山岩基。岩浆岩主要类型为花岗闪长岩，矿物组成为斜长石、钾长石、石英、黑云母和角闪石，副矿物为石榴子石和榍石等（Zhu et al., 2015）。本文所采集的花岗闪长岩来自沙峪口岩体，沙峪口岩体位于云蒙山西南部，属于云蒙山岩体的一部分，对具有指示岩浆演化特征的重要矿物——黑云母、磷灰石、斜长石进行了电子探针数据分析处理。电子探针分析测试在南京宏创地质勘查技术服务有限公司电子探针与电镜实验室日本岛津公司EMPA-1600型电子探针仪上完成。工作电压为15 kV，加速电流为20 nA，束斑直径为2~5 μm，以天然样品和人工合成氧化物为标准样品，分析精确度优于2%。

在本研究区中普遍见暗色微粒包体和中基性岩墙，宏观上可以看到，沙峪口花岗闪长岩岩体中暗色微粒包体形态多呈浑圆的外形（图4-a），显示出明显的塑性流变特点，具有明显的岩浆混合成因的包体特征；岩体的中—基性岩脉与花岗闪长岩的界面或呈小波浪状或呈弯曲状（图4-b），并见寄主岩长石斑晶，表现出壳幔混合作用形成的同深成岩墙群特征。

4.2 磷灰石——早期结晶

磷灰石是岩浆岩、变质岩、沉积岩中一种常见的副矿物，并且因其含有较多对物理化学条件极为敏感的元素且形成后化学性质稳定，能够很好地记录保存原始的岩浆信息（徐夕生等，2010；梁贤等，2020）。磷灰石的形态特征能指示不同的成因，岩浆早期结晶的磷灰石无色透明，细小六方柱，糙面明显无裂纹（刘羽，



资料来源：据（Zhu et al., 2015）修改

图3 北京市怀柔区沙峪口一带岩性分布图

Fig. 3 Lithological distribution map of the Shayukou area in Huairou District, Beijing



(a) 暗色微粒包体野外露头 (b) 中基性同深成岩脉野外露头

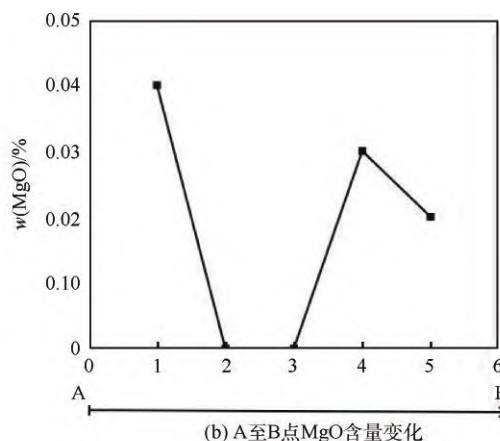
图4 北京市沙峪口花岗闪长岩野外露头

Fig. 4 Outcrop photos of the granodiorite in Shayukou, Beijing

1992; 仲亚雄, 1980), 总体来看研究区花岗闪长岩中含有的磷灰石大多为岩浆早期结晶。而磷灰石中的 MgO 含量也是一个潜在的关键成分, 在岩浆演化中具有重要作用, 前人研究表明在岩浆结晶过程中磷灰石中的 MgO 含量会逐渐降低 (翟淳, 1987; 徐夕生等, 2010; Zhan et al., 2022; 桑隆康等, 2022; 梁贤等, 2020; 刘羽, 1992; 仲亚雄, 1980), 沙峪口花岗闪长岩中磷灰石的 MgO 含量呈现先减小后增加随后又减小 (图 5), 可排除磷灰石在岩浆演化中期形成, 可能形成于岩浆演化早期或晚期结晶。显微镜下磷灰石特征呈自形, 黑云母和斜长石呈半自形, 证实磷灰石先于黑云母和斜长石结晶, 因此可确定磷灰石形成于岩浆早期结晶。



(a) 磷灰石偏光镜下特征

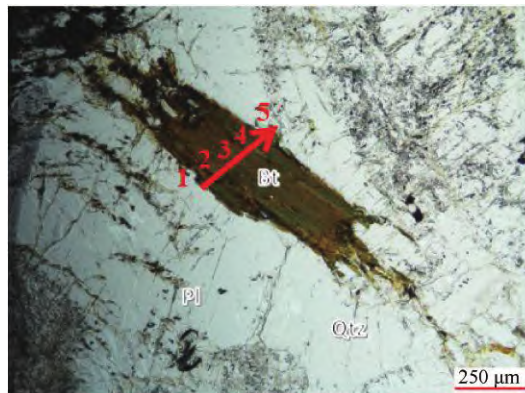


(b) A至B点MgO含量变化

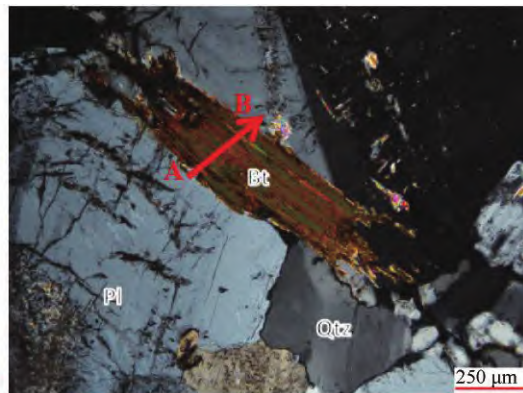
Ap-磷灰石; (-) -单偏光

图 5 磷灰石特征图解

Fig. 5 Plot of apatite features



(a) 黑云母单偏光镜下特征



(b) 黑云母正交偏光镜下特征

Bi-黑云母; Qtz-石英; Pl-斜长石; (-) -单偏光; (+) -正交偏光

图 6 黑云母镜下特征

Fig. 6 Microscope Characteristics of biotite

4.3 黑云母——岩浆混合作用

黑云母的化学组分主要受物质来源的影响, 因此分析其化学组分可以指示其寄主岩石的源区性质及成岩环境等特征 (Burkhard, 1991; René et al., 2008; Stone, 2000)。后期结晶的黑云母有相对富镁、铝、贫钛的特点 (周作侠, 1988)。黑云母组分的特点也能反映出岩浆的温度、压力、氧逸度等物理和化学条件。根据高温高压试验, 黑云母中 Ti 元素含量明显受岩浆结晶时的温度的影响, 可作为估计岩浆结晶温度的地质温度计 (Stone, 2002)。通过电子探针实验数据分析 (图 6、表 1), 可以得到黑云母中元素的含量: SiO₂ 含量为 36.28%~37.91%, MgO 含量为 9.07%~9.33%, FeO 含量为 21.56%~22.06%, Al₂O₃ 含量为 14.5%~14.82%, Na₂O 含量为

0.1%~0.18%，K₂O 含量为 7.39%~9.35%，TiO₂ 含量为 1.65%~2.05%，全碱（Na₂O+K₂O）含量为 7.57%~9.48%，由此看出，花岗闪长岩中黑云母呈高 Si，富 Mg、Fe、Al、Na₂O+K₂O，低 Ti 的特征。前人研究表明，Fe²⁺/(Fe²⁺+Mg) 的比值是氧化态岩浆的重要标志，若比值较为均一，则表明岩浆未经过后期流体的改造。

实验数据显示，黑云母的 Fe²⁺/(Fe²⁺+Mg) 的均值为 0.75，根据 Ieder（1988）提出的黑云母命名方法并结合 Foster（1960）的 Mg-Al^{VI}+Fe³⁺+Ti-Fe²⁺+Mn 云母分类图解（图 7-a），可分为金云母、镁质黑云母、铁质黑云母、铁叶云母、铁白云母、白云母，黑云母分析点落入铁质黑云母，较为均一，表明黑云母没有遭受后

表1 黑云母化学组分电子分析结果(w/%)
Tab. 1 EMPA results of the biotite chemical composition

| 点号 | Line1 | Line 2 | Line 3 | Line 4 | Line 5 |
|--------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|
| SiO ₂ | 37.91 | 36.28 | 36.78 | 37.3 | 37.59 |
| TiO ₂ | 1.65 | 1.69 | 1.95 | 2.05 | 1.74 |
| Al ₂ O ₃ | 14.69 | 14.55 | 14.82 | 14.6 | 14.5 |
| Cr ₂ O ₃ | 0.03 | 0.06 | 0 | 0 | 0.07 |
| FeO | 21.65 | 21.8 | 21.99 | 21.56 | 22.06 |
| MnO | 0.34 | 0.43 | 0.37 | 0.39 | 0.39 |
| NiO | 0.05 | 0 | 0.01 | 0 | 0.03 |
| MgO | 9.15 | 9.14 | 9.33 | 9.29 | 9.07 |
| CaO | 0.06 | 0.03 | 0.11 | 0.02 | 0.02 |
| Na ₂ O | 0.11 | 0.13 | 0.18 | 0.13 | 0.1 |
| K ₂ O | 9.05 | 9.35 | 7.39 | 8.49 | 8.72 |
| Total | 94.69 | 93.46 | 92.93 | 93.83 | 94.29 |
| Si | 7.79 | 7.62 | 7.66 | 7.72 | 7.77 |
| Ti | 0.26 | 0.27 | 0.31 | 0.32 | 0.27 |
| Al | 3.56 | 3.6 | 3.64 | 3.56 | 3.53 |
| Cr | 0.01 | 0.01 | 0 | 0 | 0.01 |
| Fe ³⁺ | 1.49 | 1.53 | 1.53 | 1.49 | 1.53 |
| Fe ²⁺ | 2.23 | 2.3 | 2.3 | 2.24 | 2.29 |
| Mn | 0.06 | 0.08 | 0.07 | 0.07 | 0.07 |
| Mg | 2.8 | 2.86 | 2.9 | 2.87 | 2.79 |
| Ca | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0 | 0 |
| Na | 0.04 | 0.05 | 0.07 | 0.05 | 0.04 |
| K | 2.37 | 2.5 | 1.96 | 2.24 | 2.3 |

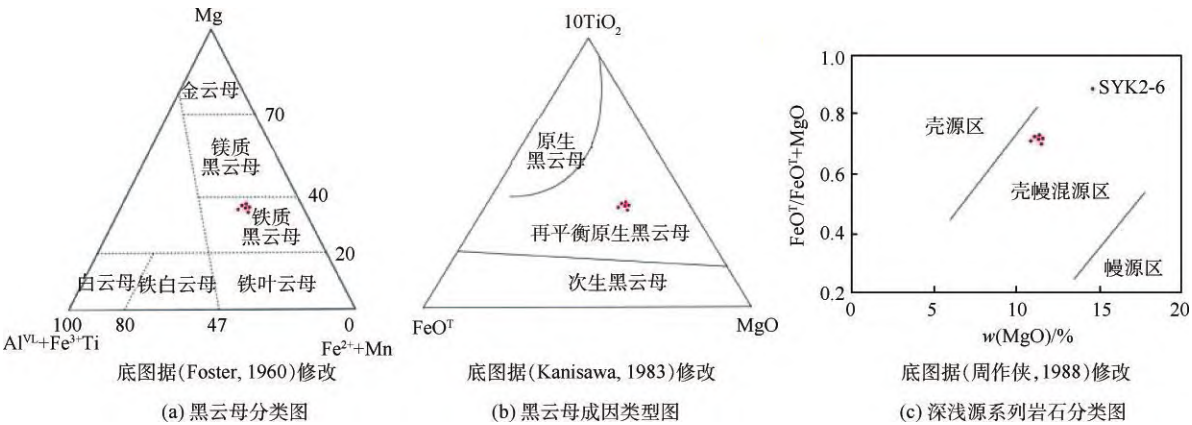


图7 黑云母矿物化学分类图解

Fig. 7 Mineral chemical classification of Biotite Mineral Chemical

期的流体改造。在成因分类图（图 7-b）中，落入了再平衡原生区域，说明其形成于较低的氧逸度条件（Kanisawa, 1983）。将黑云母电子探针数据投到 $\text{MgO}-\text{FeO}^{\text{T}}/(\text{FeO}^{\text{T}}+\text{MgO})$ 图解上，显示数据点落入壳幔混源区范围内（图 7-c），揭示沙峪口花岗闪长岩起源非单

一源区（壳源区或幔源区）而是来源于壳幔混源区。

4.4 斜长石——均一化阶段

岩浆在混合过程中，不同熔体间发生物理和化学相互作用，存在不平衡的结晶条件，影响矿物晶体成核、生长以及形成一些不平衡的复杂矿物内部结构或环带结构

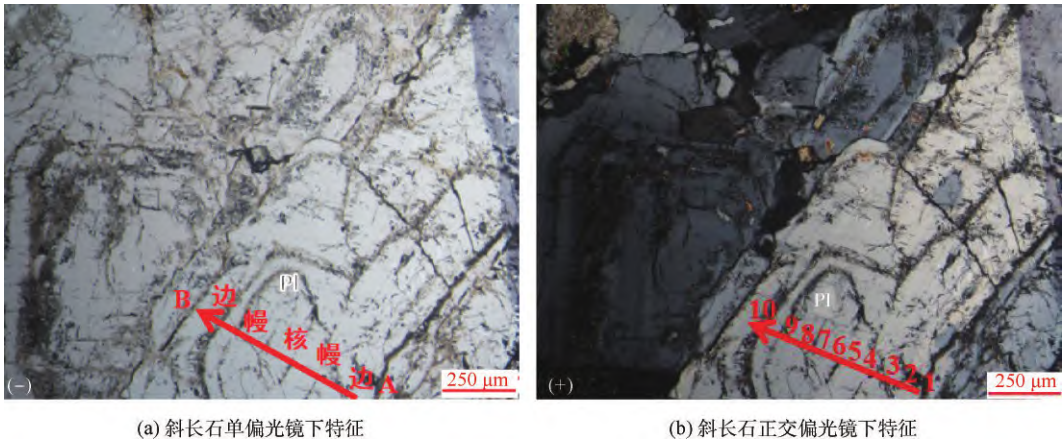


图 8 斜长石镜下特征
Fig. 8 Characteristics of the plagioclase; Pl-plagioclase

表 2 斜长石矿物化学成分表(w/%)

Tab. 2 Chemical composition of the plagioclase

| 点号 | Line 01 | Line 02 | Line 03 | Line 04 | Line 05 | Line 06 | Line 07 | Line 08 | Line 09 | Line 10 |
|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| SiO ₂ | 65.14 | 64.88 | 65.14 | 64.63 | 64.17 | 64.43 | 64.4 | 64.12 | 64.8 | 65.73 |
| TiO ₂ | 0 | 0.02 | 0.07 | 0.03 | 0.08 | 0.03 | 0.05 | 0.04 | 0.06 | 0.04 |
| Al ₂ O ₃ | 22.17 | 22.62 | 22.27 | 22.74 | 23.13 | 22.76 | 22.75 | 23.09 | 22.49 | 22.12 |
| Cr ₂ O ₃ | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.05 | 0.00 | 0.00 | 0.06 | 0.02 |
| FeO | 0.10 | 0.08 | 0.09 | 0.12 | 0.14 | 0.08 | 0.11 | 0.12 | 0.09 | 0.10 |
| MnO | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.05 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| NiO | 0.04 | 0.02 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.04 |
| MgO | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 0.04 | 0.00 | 0.01 |
| CaO | 3.72 | 4.24 | 3.28 | 3.72 | 4.40 | 4.16 | 4.17 | 4.47 | 3.81 | 3.42 |
| Na ₂ O | 8.93 | 8.66 | 9.01 | 8.24 | 8.68 | 8.90 | 8.88 | 8.32 | 8.86 | 9.06 |
| K ₂ O | 0.15 | 0.15 | 0.17 | 0.30 | 0.26 | 0.19 | 0.26 | 0.31 | 0.22 | 0.23 |
| Total | 100.28 | 100.68 | 100.03 | 99.79 | 100.94 | 100.61 | 100.62 | 100.52 | 100.42 | 100.77 |
| Si | 30.62 | 30.49 | 30.62 | 30.38 | 30.16 | 30.28 | 30.27 | 30.14 | 30.46 | 30.89 |
| Ti | 0.00 | 0.01 | 0.04 | 0.02 | 0.05 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.04 | 0.02 |
| Al | 11.75 | 11.99 | 11.80 | 12.05 | 12.26 | 12.06 | 12.06 | 12.24 | 11.92 | 11.72 |
| Cr | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.01 |
| Fe ³⁺ | 0.08 | 0.06 | 0.07 | 0.09 | 0.11 | 0.06 | 0.09 | 0.09 | 0.07 | 0.08 |
| Fe ²⁺ | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Mn | 0.03 | 0.02 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.03 |
| Mg | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.01 |
| Ca | 2.08 | 2.37 | 1.84 | 2.08 | 2.46 | 2.33 | 2.34 | 2.50 | 2.13 | 1.92 |
| Na | 6.61 | 6.41 | 6.67 | 6.10 | 6.42 | 6.59 | 6.57 | 6.16 | 6.56 | 6.70 |
| K | 0.12 | 0.12 | 0.14 | 0.25 | 0.22 | 0.16 | 0.22 | 0.26 | 0.18 | 0.19 |

(阳杰华等, 2017; 刘行等, 2020)。本次研究选取沙峪口花岗闪长岩中的具有典型环带结构的斜长石进行电子探针实验分析(图8、表2)。

据斜长石中Ab、An含量不同, 斜长石可划分为钠长石($Ab=90\%\sim 100\%$, $An=0\%\sim 10\%$)、奥长石($Ab=70\%\sim 90\%$, $An=10\%\sim 30\%$)、中长石($Ab=50\%\sim 70\%$, $An=30\%\sim 50\%$)、拉长石($Ab=30\%\sim 50\%$, $An=50\%\sim 70\%$)、培长石($Ab=10\%\sim 30\%$, $An=70\%\sim 90\%$)和钙长石($Ab=0\%\sim 10\%$, $An=90\%\sim 100\%$)(Crawford et al., 1987)。沙峪口花岗闪长岩斜长石的An含量在13.78%~

28.39%变化, Ab含量为69.17%~78.90%, 整体呈酸性。沙峪口花岗闪长岩中斜长石的An含量呈核部较低($An=20\%\sim 23\%$), 幔部达到最大(28.39%), 边部(点位)逐渐降低, 但整体变化不大, 呈震荡变化特征, CaO、 Al_2O_3 、 Na_2O 含量由核部至边部也呈震荡变化特征(图9), 判断为震荡韵律环带, 与黑云母指示的壳幔混源区的特征一致。斜长石核部至边部An含量值较为均一, 说明从酸性壳源岩浆结晶出来的斜长石与基性岩浆发生混合, 指示基性岩浆和长英质岩浆混合均一化的晚期(图9-c)。

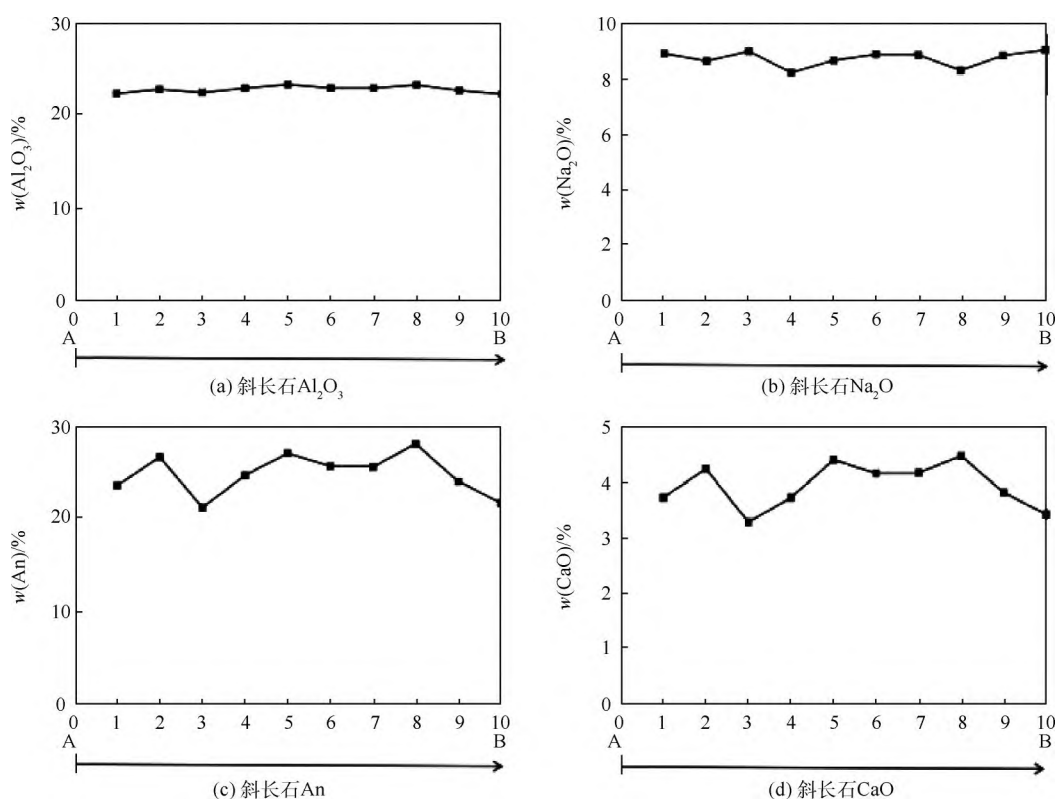


图9 斜长石化学成分变化图

Fig. 9 Composition zoning profiles for plagioclase

5 结论

电子探针技术在岩石学中的矿物种类识别、岩浆成因分析的重要手段。沙峪口岩体花岗闪长岩中磷灰石自形程度较好, 优于黑云母和斜长石, 磷灰石的MgO含量从0.04%先减小到0, 再增加到0.03%, 随后又减小到0.02%, 呈震荡变化, 表明其为岩浆演化早期阶段的产物; 黑云母厘定为铁质黑云母, 揭示了壳幔岩浆混

合过程; 斜长石主要为酸性斜长石, 由核部至边部An含量的变化范围较小, 记录了壳幔岩浆均一化过程。结合野外地质特征, 电子探针数据分析结果为沙峪口花岗闪长岩的岩浆演化过程提供了重要的岩石学制约。

参考文献

陈灵泉, 成宏涛, 张娟, 2020. 石油类高校大型仪器设备开放共享的探索与思考[J]. 实验室研究与探索, 39(3): 250-252.

- 陈意,胡兆初,贾丽辉,李金华,李秋立,李晓光,李展平,龙涛,唐旭,王建,夏小平,杨蔚,原江燕,张迪,李献华,2020.微束分析测试技术十年(2011~2020)进展与展望[J].矿物岩石地球化学通报,40(1):1-35.
- 龚玉爽,胡斌,付山岭,柳智,2011.电子探针分析技术(EPMA)在地学中的应用综述[J].化学工程与装备(6):166-168.
- 郭国林,潘家永,刘成东,郭福生,2005.电子探针化学测年技术及其在地学中的应用[J].东华理工学院学报(1):39-42.
- 姬广义,汪洋,孙永华,2004.北京云蒙山岩浆杂岩体的岩石学和构造变形特征[J].北京地质(3):1-11.
- 李德忍,1982.电子探针在新矿物分析中的作用及几个重要的技术问题[J].地质地球化学(7):53-55.
- 李祥,赵世杰,2016.开放大型精密仪器提升大学生科技创新能力[J].实验室科学,19(3):201-204.
- 李小型,2021.电子探针微量元素分析的一些思考[J].高校地质学报,27(3):306-316.
- 李小型,2023.电子探针分析锆石 Hf 和 Ti 含量的结果意义与技术优势[J].岩矿测试,42(1):89-101.
- 李小型,张立飞,魏春景,张贵宾,2017.俄罗斯白海地区太古代榴辉岩的金红石 Zr 温度计应用及其地质意义[J].岩石学报,33(10):3263-3277.
- 李香庭,1980.电子探针显微分析[J].硅酸盐(4):61-71.
- 梁贤,张聚全,卢静,张庆枝,吴伟哲,李清,白富生,金雅楠,范琳琳,2020.邯邢地区中生代侵入岩中磷灰石的成因矿物学研究[J].地质与勘探,56(5):969-984.
- 林霖,来志庆,韩宗珠,刘明,邵雪娇,张爱滨,2019.现代分析测试技术课程建设研究[J].实验室科学,22(3):119-121.
- 刘行,邹灏,李阳,李欣宇,蒋修末,张强,李蝶,2020.川西新元古代灯杆坪花岗岩成因与岩浆演化:来自斜长石和黑云母矿物学依据[J].现代地质,34(5):1043-1057.
- 刘羽,1992.几种成因类型磷灰石的矿物学研究[J].武汉化工学院学报(2):16-21.
- 毛水和,1992.电子探针分析技术的新进展及其应用[J].岩矿测试,11(Z1):101-108.
- 桑隆康,马昌前,2002.岩石学[M].2版.北京:地质出版社.
- 王军鹏,李福鹏,2020.地质学教学中普及大型仪器相关知识的探索和思考:以电子探针显微分析技术为例[J].中国地质教育,29(4):107-110.
- 王汝成,王硕,邱俭生,倪培,2006.东海超高压榴辉岩中绿帘石、褐帘石、磷灰石和锆石集合体的电子探针成分和化学定年研究[J].岩石学报(7):1855-1866.
- 徐萃章,1990.电子探针分析原理[M].北京:科学出版社.
- 徐夕生,邱俭生,2010.火成岩岩石学[M].北京:科学出版社.
- 阳杰华,刘亮,刘佳,2017.华南中生代大花岗岩省成岩成矿作用研究进展与展望[J].矿物学报,37(6):791-800.
- 姚立,2008.低含量、微量元素的电子探针分析方法研究与应用[D].长春:吉林大学.
- 郁建华,付会芹,张凤兰,1994.北京地区岩浆深成作用[M].北京:地质出版社.
- 翟淳,1987.岩石学简明教程[M].北京:地质出版社.
- 张文兰,王汝成,华仁民,陈小明,2003.副矿物的电子探针化学定年方法原理及应用[J].地质评论(3):253-260.
- 张迪,陈意,毛骞,苏斌,贾丽辉,郭顺,2019.电子探针分析技术进展及面临的挑战[J].岩石学报,35(1):261-274.
- 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.
- 仲亚雄,1980.莱芜燕山期杂岩体副矿物特征及其成岩成矿分析[J].地质与勘探(5):31-36.
- 周剑雄等,1988.电子探针分析[M].北京:地质出版社.
- 周作侠,1988.侵入岩的镁铁玄母化学成分特征及其地质意义[J].岩石学报(3):63-73.
- 朱和国,王新龙,2013.材料科学研究与测试方法[M].2版.南京:东南大学出版社.
- BURKHARD D J M, 1991. Temperature and redox path of biotite-bearing intrusive: a method of estimation applied to S-type and I-type granites from Australia [J]. Earth and Planetary Science Letters, 104(1):89-98.
- CASTAING R, 1956. Proceedings of the international conference on electron microscopy [M]. London: Royal Microscopical Society.
- CHEN B, CHEN Z, JAHN B, 2009. Origin of mafic enclaves from the Taihang Mesozoic orogen, north China craton [J]. Lithos, 110(1-4):343-358.
- CRAWFORD A J, FALLOON T J, EGGINS S, 1987. The origin of island arcs high-alumina basalts [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 97(3):417-430.
- DAVID R W, HANS P E, 1965. Stability of biotite: experiment, theory and application [J]. The American Mineralogist, 50(9):1228-1272.
- DAVIS G A, QIAN X, ZHENG Y, TONG H, WANG C, GEHRELS G E, SHAFIQUALLAH M, FRYXELL L E, 1996. Mesozoic deformation and plutonism in the Yunmeng Shan: a metamorphic core complex north of Beijing, China [C]//The Tectonics Evolution Asia. Cambridge: Cambridge University Press, 253-280.
- DAVIS G A, WANG Cong, ZHENG Yadong, ZHANG Jinjiang ,

- ZHANG Changhou, GEHRELS G E, 1998. The enigmatic Yinshan fold-and-thrust belt of northern China: new views on its intraplate contractional styles [J]. *Geology*, 26(1): 43–46.
- FOSTER M D, 1960. Interpretation of the composition of trioctahedral micas [J]. *US Geological Survey Professional Paper*, 354B: 1–49.
- KANISAWA S, 1983. Chemical characteristics of biotite and hornblends of Late Mesozoic to Early Tertiary granitic rocks in Japan [M].
- RENE M, HOLTZ F, LUO C, BEERMANN O, STELLING J, 2008. Biotite Stability in Peraluminous Granitic Melts: Compositional Dependence and Application to the Generation of Two-Mica Granites in the South Bohemian Batholith (Bohemian Massif, Czech Republic) [J]. *Lithos*, 102 (3–4): 538–553.
- STONE D, 2000. Temperature and pressure variations in suites of Archean felsic plutonic rocks, Berens River area, Northwest Superior Province, Ontario, Canada [J]. *The Canadian Mineralogist*, 38(2): 455–470.
- TSUCHIYANA A, 1985. Dissolution kinetics of plagioclase in the melt of the system diopside–albite–anorthite, and origin of dusty plagioclase in andesites [J]. *Contribution to Mineralogy Petrology*, 89(1): 1–16.
- ZHAN Qiongyao, ZHU Dicheng, WEINBERG R F, WANG Qing, XIE Jincheng, ZHANG Liangliang, ZHAO Dan, 2022. Cumulate granites: A perspective from new apatite MgO partition coefficients [J]. *Geology*, 50(6): 681–685.
- ZHU Guang, CHEN Yin, JIANG Dazhi, LIN Shaoze, 2015. Rapid

矿物宝石精品鉴赏

祖母绿(emerald)



产地: 哥伦比亚

规格: 6.5 cm × 6 cm × 3 cm

祖母绿尺寸: 4 cm × 2 cm × 2 cm

矿物名称: 绿柱石

化学式: $\text{Be}_3\text{Al}_2[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$

矿物学特征: 因含 Cr_2O_3 呈碧绿色, 六方晶系, 长柱状或短柱状, 玻璃光泽, 不完全解理, 硬度 7.5~8。

成因和产地: 绝大多数祖母绿矿床是酸性的花岗岩或花岗伟晶岩侵入超基性变质岩产生的结果。世界上最优质的祖母绿产自哥伦比亚, 除此之外, 俄罗斯、津巴布韦、印度、巴西、赞比亚、奥地利、澳大利亚、南非、坦桑尼亚、美国和巴基斯坦等地也产出祖母绿。

应用和寓意: 祖母绿是五月生辰石, 象征信心、忠诚和永恒。祖母绿是绿柱石族矿物的重要代表之一, 因含铬而呈绿色。绿柱石为铍的重要来源, 而铍是稀有金属和战略性关键金属, 广泛应用于国防业。

矿标简述: 这件祖母绿产自哥伦比亚的木佐, 晶形和纹岩配合得相当紧密, 凸显出颜色好、透明度高, 达到宝石级水准。

资料来源: 北京天龙垣矿物宝石馆提供



矿物二维码