

长白山碱性岩体矿物组成与岩浆演化序列研究

李殿春^{1,2}, 白志杰^{1,2*}, 魏海峰^{1,2}, 唐雪峰^{1,2}, 柳俊乾^{1,2}, 范仲洲^{1,2}, 马跃^{1,2}, 李涛涛^{1,2}

1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 黑龙江 哈尔滨 150086

2. 自然资源部哈尔滨黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 黑龙江 哈尔滨 150086

DOI:10.61369/ME.2026070012

摘 要 : 本文以长白山碱性岩体为研究对象, 系统探讨其矿物组成、微观结构、地球化学及年代学特征, 反演岩浆演化序列与物理化学条件。该岩体以碱性长石、霞石、霓石等为主要造岩矿物, 发育深源捕虏晶/捕虏体及熔体—流体包裹体, 记录了岩浆深部起源与上升过程信息。结合矿物结晶顺序与环带高分辨率原位分析, 重建岩浆演化四阶段序列, 明确地幔部分熔融、结晶分异、岩浆补给混合及脱气作用共同控制岩体形成, 矿物环带记录的非稳态岩浆过程与火山喷发机制密切相关。研究成果为揭示长白山地区岩石圈性质、地幔动力学过程及火山活动规律提供了矿物学与地球化学依据。

关 键 词 : 长白山碱性岩体; 矿物组成; 岩浆演化; 锆石 U-Pb 定年

Study on Mineral Composition and Magma Evolution Sequence of Changbai Mountain Alkaline Rock Mass

Li Dianchun^{1,2}, Bai Zhijie^{1,2*}, Wei Haifeng^{1,2}, Tang Xuefeng^{1,2}, Liu Junqian^{1,2}, Fan Zhongzhou^{1,2}, Ma Yue^{1,2}, Li Taotao^{1,2}

1. Harbin Natural Resources Comprehensive Survey Center of China Geological Survey, Harbin, Heilongjiang 150086

2. Harbin Black Soil Earth Key Zone Field Scientific Observation and Research Station of the Ministry of Natural Resources, Harbin, Heilongjiang 150086

Abstract : This article takes the Changbai Mountain alkaline rock mass as the research object, systematically explores its mineral composition, microstructure, geochemical and chronological characteristics, and inverts the magma evolution sequence and physicochemical conditions. The rock mass is mainly composed of alkaline feldspar, nepheline, aegirine and other rock forming minerals, and develops deep-seated xenoliths/xenoliths and melt fluid inclusions, recording information on the deep origin and uplift process of magma. By combining mineral crystallization sequence and high-resolution in-situ analysis of zoning, the four stage sequence of magma evolution is reconstructed to clarify that partial melting of the mantle, crystallization differentiation, magma supply mixing, and degassing jointly control the formation of rock masses. The non steady state magma process recorded by mineral zoning is closely related to the mechanism of volcanic eruption. The research results provide mineralogical and geochemical basis for revealing the lithospheric properties, mantle dynamics, and volcanic activity patterns in the Changbai Mountain area.

Keywords : Changbai Mountain alkaline rock mass; mineral composition; magma evolution; Zircon U-Pb dating

引言

长白山地处滨太平洋构造域东北缘, 是我国东北地区新生代火山活动最强烈、最具代表性的区域之一, 发育有胞胎山、望天鹅、天池三座大型破火山口及一系列小型火山锥体, 构成了完整的火山群演化体系。基于此, 本文以长白山碱性岩体为研究对象, 系统开展矿物组成与微观结构特征研究, 精准识别主要造岩矿物、深源捕虏晶及熔体—流体包裹体的特征与分布规律; 通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年、全岩主量、微量、稀土元素及 Sr-Nd-Pb 同位素分析, 构建岩体年代学格架, 揭示其地球化学特征及岩浆源区属性; 结合矿物结晶顺序、环带高分辨率原位解析, 重建岩浆演化完整序列, 反演岩浆演化的物理化学条件, 明确岩浆演化的关键过程与驱动机制; 阐明长白山碱性岩体的形成过程与区域构造动力学背景的内在关联。研究成果不仅可完善长白山地区碱性岩浆作用的研究体系, 填补现有研究缺口, 还能为揭示东北亚岩石圈地幔性质、地幔动力学过程及火山活动触发机制提供重要的矿物学与地球化学依据, 同时为同类碱性岩体的研究提供参考范式。

基金项目或经费来源: 中国地质调查局地质调查项目 (DD202606301603)。

通讯作者: 白志杰 1532408345@qq.com

一、碱性岩体矿物组成与微观结构特征

（一）主要造岩矿物学特征

碱性岩是指在岩石化学上相对贫硅富铝高碱的岩石，主要包括正长岩、霞石

正长岩、辉石正长岩、霓霞正长岩、闪石正长岩等^[1]。长白山碱性岩体主要造岩矿物以碱性长石、霞石、暗色矿物为核心，次要矿物包括斜长石、黑云母、锆石、磷灰石等，属典型碱性岩矿物组合，不同岩性单元的矿物组成与含量差异反映了岩浆分异程度^[2]。其中碱性长石含量最高，达45%~60%，以钾钠长石为主，富碱且成分随岩浆分异 Na_2O 含量升高；霞石含量15%~25%，是碱性岩浆的重要标志，富碱贫硅，常与碱性长石共生且含流体包裹体，可为研究岩浆挥发分提供线索；暗色矿物含量10%~20%，主要为霓石、霓辉石，成分反映岩浆氧化还原条件，黑云母少量分布于岩体边缘；次要矿物中斜长石含量低，锆石可用于年代学测试，磷灰石是岩浆中磷元素的主要载体。

（二）深源捕虏晶与地幔/下地壳捕虏体

长白山碱性岩体的碱性玄武岩、粗面岩中广泛发育深源捕虏晶与地幔/下地壳捕虏体，是岩浆上升时捕获的深部物质，携带深部岩石圈信息，为研究岩浆起源与上升过程提供重要依据^[3]。深源捕虏晶以橄榄石最常见（Fo值80~88，镁质，源于地幔橄榄岩），还有斜方辉石、单斜辉石、尖晶石（铬尖晶石，指示地幔部分熔融程度），部分可见熔蚀边，经历过熔融作用^[4]。地幔捕虏体以尖晶石二辉橄榄岩为主，还有辉石岩，多为块状，成分与地幔物质相关；下地壳捕虏体主要为麻粒岩、片麻岩，成分接近下地壳平均水平，反映岩浆与下地壳的相互作用。这些捕虏晶与捕虏体表明，长白山碱性岩浆起源于地幔，上升时穿过下地壳并捕获深部物质，经历熔融、蚀变等过程，为研究该地区岩石圈地幔性质与下地壳结构提供了直接实物证据。

（三）矿物内的熔体/流体包裹体特征

长白山碱性岩体主要造岩矿物（霞石、碱性长石、霓辉石等）中普遍发育熔体与流体包裹体，是研究岩浆形成与演化的微观探针^[5]。熔体包裹体多赋存于矿物内部，呈圆或椭圆形（5~20 μm ），成分与全岩相近，含 H_2O 、 CO_2 等挥发分，不同矿物中成分有差异，反映岩浆分异特征；流体包裹体多分布于矿物裂隙或熔体包裹体内，呈圆或长条状（2~10 μm ），分气液两相与纯气相，记录了相应温压及盐度数据^[6]。这些包裹体表明，长白山碱性岩浆结晶时含丰富挥发分，上升过程中发生强烈脱气作用，影响岩浆黏度与矿物结晶，其温压、盐度及成分特征，为反演岩浆演化物理化学条件提供了重要微观证据，且与全岩地球化学特征印证，说明岩浆演化以结晶分异为主、伴少量流体交代。

二、全岩地球化学与年代学特征

（一）岩石年代学格架

为明确长白山碱性岩体形成时代及构建年代学格架，本文采用LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年方法，对碱性玄武岩、粗面岩等

不同岩性单元锆石样品进行测试，并结合已有研究^[7]。岩相学观察及Th/U比值（0.5~1.2，均>0.1）证实，锆石为原生岩浆锆石，适用于年代学测试。测年结果显示，岩体形成于新生代，呈多次岩浆活动特征：早期（4.5~1.48 Ma）碱性玄武岩对应造盾阶段，为碱性岩浆活动起始；中期（1.4~0.02 Ma）粗面岩、霞石正长岩对应造锥阶段，是岩浆分异主要阶段；晚期（50.6 ka 至今）碱流岩对应爆炸式喷发阶段，岩浆分异达顶峰。结合区域地质背景，岩浆活动可划分为上新世末期—早更新世造盾、更新世造锥、第四纪爆炸式喷发三个阶段，其持续时间长、多期次叠加，与区域岩石圈伸展及地幔动力学过程密切相关。

（二）主量元素特征

长白山碱性岩体具典型碱性岩主量元素特征， SiO_2 含量53%~78%，随岩浆分异升高，分为基性、中性、酸性三个系列，构成完整分异序列； $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 含量13%~18%， $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值1.2~2.0，属钠质碱性岩，霞石正长岩富碱最明显。 Al_2O_3 含量14%~18%，随 SiO_2 先升后降，粗面岩中达峰值； $\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 MgO 、 CaO 随分异程度升高而降低，分别与暗色矿物、斜长石等结晶相关； MnO 含量稳定， P_2O_5 在分异高的碱流岩中较低。主量元素变异图解表明岩浆演化以结晶分异为主（边缘岩体除外），里特曼指数4.0~8.0（>3.3），进一步证实为碱性岩，且 σ 值随分异升高而上升。

（三）微量与稀土元素特征

长白山碱性岩体微量与稀土元素具典型碱性岩特征，整体轻稀土富集、重稀土亏损、Eu异常不明显，不同岩性单元含量差异反映岩浆分异程度不同^[8]。微量元素上，富含Rb、K等大离子亲石元素，相对亏损Nb、Zr等高场强元素，Cr、Ni含量较低，表明岩浆起源于地幔，经历地幔橄榄岩部分熔融，且与地壳有轻微相互作用。稀土元素总量200~800 $\mu\text{g/g}$ ，随岩浆分异升高，配分模式右倾， $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为10~30， Eu/Eu^* 为0.8~1.2，无明显异常。岩体演化以结晶分异为主，轻微地壳混染未改变整体趋势，稀土配分模式与OIB岩浆相似，地幔源区可能具相似地球化学特征。

（四）Sr-Nd-Pb 同位素特征

Sr-Nd-Pb 同位素测试及分析表明，长白山碱性岩体岩浆主要来源于亏损地幔。Sr 同位素比值（ $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 0.7045~0.7065）与亏损地幔相近，部分边缘岩体比值略高提示轻微地壳混染，且比值与 SiO_2 含量正相关^[9]。Nd 同位素（ $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 0.5128~0.5130， $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ +2.0~+4.0）均为正值，印证无明显古老地壳混染，岩浆分异以结晶分异为主。Pb 同位素比值落在亏损地幔演化线附近，进一步证实地幔来源。岩浆源于亏损地幔，上升过程经历轻微地壳混染，形成与地幔部分熔融及岩石圈伸展作用相关。

三、岩浆演化序列与物理化学条件反演

（一）矿物结晶顺序与演化序列重建

结合岩相学观察及矿物组成、微观结构、地球化学数据，重建长白山碱性岩体的矿物结晶顺序与岩浆演化序列，明确岩浆从

形成到结晶的完整过程^[10]。其演化主要分为四个阶段且各阶段矿物结晶顺序与岩性特征存在明显差异,造盾阶段(4.5~1.48 Ma)为岩浆起源与早期结晶阶段,碱性玄武岩岩浆源于地幔部分熔融,结晶顺序为橄榄石→斜方辉石→单斜辉石(霓辉石)→斜长石,形成斑状结构碱性玄武岩,深源捕虏晶含量高且无明显地壳混染。造锥早期(1.4~0.5 Ma)为岩浆分异中期阶段,岩浆上升至地壳浅部后发生初步分异,结晶顺序为霓辉石→碱性长石→霞石→黑云母,形成中粒结构的粗面岩、霞石正长岩,熔体包裹体挥发分高且degassing作用弱。造锥晚期(0.5~0.02 Ma)为岩浆分异晚期阶段,岩浆进一步分异,结晶顺序为碱性长石→霞石→霓石→锆石、磷灰石,形成细粒结构的粗面岩、碱性流纹岩,流体包裹体增多且degassing作用明显。50.6 ka至今为岩浆喷发阶段,岩浆分异达到顶峰,结晶顺序为碱性长石→霓石→少量石英,形成隐晶质-玻璃质结构的碱流岩,矿物环带特征明显,记录了岩浆喷发前的瞬态演化过程。

（二）岩浆演化过程探讨

长白山碱性岩浆演化主要分为四个关键阶段,核心驱动力为地幔部分熔融、结晶分异作用,同时伴随岩浆补给混合、热对流及轻微地壳混染作用。新生代受滨太平洋构造域影响,长白山地区岩石圈伸展减薄,地幔物质上升并部分熔融形成富碱贫硅的碱性玄武岩原始岩浆(源于亏损地幔,含深源捕虏晶与地幔捕虏体),随后原始岩浆在浮力作用下上升,捕获少量下地壳捕虏体发生轻微混染,温度压力降低并发生早期结晶形成碱性玄武岩,之后岩浆上升至地壳浅部形成岩浆房,经强烈结晶分异(核心阶段),矿物有序结晶、元素呈现规律性富集与亏损,形成粗面岩等岩性。同时伴随岩浆补给混合、热对流及挥发分释放,最后岩浆黏度达最高、挥发分大量聚集致岩浆房超压,发生爆炸式喷发,岩浆快速上升未充分结晶形成碱流岩,分异达顶峰。其演化是从地幔部分熔融、岩浆上升、浅部岩浆房分异到喷发的完整过程,多作用共同影响,形成长白山地区多期次、多岩性的碱性岩

体组合。

（三）矿物环带的高分辨率原位解析与瞬态岩浆过程

长白山碱性岩体中霓辉石、碱性长石等矿物普遍发育环带结构,天池火山气象站期碱流岩辉石的环带尤为明显,是岩浆结晶时物理化学条件变化的直接记录。通过电子探针线扫描、激光拉曼光谱等高分辨率原位解析,可揭示岩浆演化瞬态事件,为理解岩浆系统复杂性提供依据。矿物环带主要分为韵律环带和振荡环带,其中振荡环带最常见(以辉石为典型)。电子探针分析显示,辉石环带MgO与Na₂O含量呈剧烈振荡,核心MgO高、Na₂O低,边缘则相反;碱性长石环带K₂O与Na₂O反向变化,符合岩浆分异规律。非线性时间序列分析表明,辉石环带成分时间序列的相空间吸引子为混沌吸引子,反映岩浆系统高度复杂、非稳态,这主要由岩浆房补给混合、热对流导致。矿物环带记录的瞬态岩浆过程包括岩浆补给、热对流、脱气事件,冷却速度周期性变化也会影响环带形成。此外,辉石环带记录的岩浆系统非稳态演化,可能与天池火山喷发机制相关,其高分辨率原位解析可为火山喷发触发机制提供矿物学证据。

四、结束语

本文围绕长白山碱性岩体的矿物组成与岩浆演化序列开展系统研究,通过矿物学、年代学、地球化学及高分辨率原位分析等多手段结合,厘清了岩体的矿物组成特征、年代学格架及岩浆源区属性,重建了完整的岩浆演化序列,阐明了岩浆演化的关键过程与驱动机制。研究填补了长白山碱性岩体矿物系统解析、岩浆演化序列精准重建及瞬态岩浆过程刻画的研究缺口,完善了区域碱性岩浆作用的研究体系,为揭示东北亚岩石圈地幔性质、地幔动力学过程及火山活动规律提供了重要的实物证据与理论支撑。

参考文献

- [1] 杜秀玲. 安徽庐枞盆地黄梅尖碱性岩体年代学和矿物学研究: 成岩成矿指示 [D]. 安徽: 合肥工业大学, 2022.
- [2] 郭斌. 辽宁赛马碱性岩体矿物学研究及其对岩浆-热液演化的指示意义 [D]. 江苏: 南京大学, 2016.
- [3] 牛晓露, 冯光英, 刘飞, 等. 碱性岩中富钛钙铁榴石的成因及成岩成矿意义: 以河北矾山超镁铁岩-正长岩杂岩体中的石榴石为例 [J]. 岩石学报, 2022, 38(11): 3435-3454. DOI:10.18654/1000-0569/2022.11.11.
- [4] 任倩, 郭斌. 辽宁赛马碱性岩体煌斑岩脉特征及成因研究 [J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2024, 47(2): 146-163. DOI:10.3969/j.issn.1674-3504.2024.02.004.
- [5] 郭斌, 王汝成, 刘晓东, 等. 辽宁赛马碱性岩体差异性石化学成分特征及其蚀变组合对碱性岩浆-热液演化的指示意义 [J]. 岩石学报, 2018, 34(6): 1741-1757.
- [6] 李健. 南秦岭碱性岩--碳酸岩杂岩体的成因: 元素和同位素制约 [D]. 中国科学院大学, 2022.
- [7] 高楠. 赛马碱性岩 K 同位素组成及其对成因的指示意义 [D]. 中国科学院大学, 2022.
- [8] 唐文龙, 邹健, 张锋, 等. 胶东大疃刘家铍矿床碱性岩岩石成因及对成矿的制约: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学及 Sr-Nd-Hf 同位素证据 [J]. 岩石学报, 2024, 40(8): 2429-2449. DOI:10.18654/1000-0569/2024.08.09.
- [9] 李素欣. 攀西碱性岩型 Nb--Zr--REE 矿床的矿物学与地球化学研究 [D]. 中国科学院大学, 2022.
- [10] 牛晓露, 刘飞, 冯光英, 等. 华北克拉通北缘晚志留世-早泥盆世钾质碱性岩的成因及对区域构造演化的限定 [J]. 岩石矿物学杂志, 2021, 40(5): 835-858. DOI:10.3969/j.issn.1000-6524.2021.05.001.