https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.029



北京房山岩体黑云母矿物化学特征 及其对岩石成因的指示意义

邵 航,王军鹏*,肖 登

中国地质大学地球科学学院,湖北武汉 430074

摘 要:房山岩体位于华北克拉通燕山构造带内,在平面上为不对称环状分布的复式侵入体.其主要由多期侵入的花岗闪 长质岩石组成,被划分为中央相、过渡相和边缘相3个岩相带,岩体内部分布大量的暗色镁铁质微粒包体.黑云母作为中酸 性火成岩中重要的镁铁质矿物,其矿物化学特征可以记录岩浆属性以及岩石形成时的物理化学条件.本研究对房山花岗岩 体和暗色镁铁质微粒包体中的黑云母进行了系统的岩相学观察,并通过电子探针分析对黑云母的化学组成进行了详细研 究,从而探讨房山花岗岩体的岩浆来源以及岩浆混合作用过程.结果表明,花岗岩体和暗色镁铁质微粒包体中的黑云母具 有相似的矿物化学成分.花岗岩体中的黑云母富 Mg,贫Fe,属于镁质黑云母.从外向内3个相带的花岗岩中黑云母的含铁 系数[(Fe³⁺+Fe²⁺)/(Fe³⁺+Fe²⁺+Mg²⁺)]分别为0.42~0.47,0.45~0.47,0.41~0.46.FeO^T/MgO均接近0.60.*MF*值[2× Mg/(Fe²⁺+Mg+Mn)]分别为1.05~1.21,1.06~1.15,1.12~1.23,指示3个相带的花岗岩的物质来源均发生了壳幔混染. 从外向内3个相带中的暗色镁铁质微粒包体中的黑云母富 Mg,贫Fe,属于镁质黑云母,含铁系数[(Fe³⁺+Fe²⁺)/(Fe³⁺+ Fe²⁺+Mg²⁺)]分别为0.44~0.48,0.45~0.50,0.44~0.52.FeO^T/MgO均接近0.60.*MF*值[2×Mg/(Fe²⁺+Mg+Mn)]分别 为1.00~1.16,1.03~1.15,1.10~1.18,说明包体的岩浆受到了中酸性岩浆的影响,发生了岩浆混合.花岗岩体与暗色镁铁质 微粒包体中的黑云母矿物化学特征相似,但不同岩相带之间存在差异,推测该区域发生了一个多阶段的岩浆相互作用过 程,可能为幔源基性岩浆注入壳源酸性岩浆,在岩浆房内以不同程度进行了岩浆混合. **关键词:**黑云母;矿物化学;岩浆混合作用;房山岩体;华北克拉通;大地构造.

中图分类号: P54 **文章编号:** 1000-2383(2021)11-4006-11 **收稿日期:** 2021-01-23

Mineral Chemistry of Biotite and Its Petrogenesis Implications in Fangshan Granite, Beijing

Shao Hang, Wang Junpeng*, Xiao Deng

School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The Fangshan granite is located in the Yanshan tectonic belt of the North China craton, and is an asymmetric annular intrusive body. It is mainly composed of multi-stage intrusive granodiorites which are divided into three lithofacies belts including central facies, transitional facies and marginal facies. In addition, there are a lot of mafic microgranular enclaves (MMEs) distributed within the pluton. Biotite is one of the main minerals in intermediate acid igneous rocks, and its mineral geochemical characteristics record the properties of host magma and the physical and chemical conditions of petrogenesis. In this study, the biotite in the granite and MMEs was systematically observed. The chemical composition of biotite was studied in detail by electron probe microanalysis (EPMA). Finally, the magma source and mixing process of the Fangshan granite are discussed. The results

基金项目:国家自然科学基金项目(Nos.42072222,41602234);中国地质大学(武汉)中央高校基金项目(No.GUGL180406).

作者简介:邵航(1999-),男,构造地质学专业.ORCID:0000-0002-2725-1737. E-mail: shaohang@cug.edu.cn

^{*}通讯作者:王军鹏, ORCID:0000-0003-2174-2428. E-mail: wangjp@cug. edu. cn

引用格式:邵航,王军鹏,肖登,2021.北京房山岩体黑云母矿物化学特征及其对岩石成因的指示意义.地球科学,46(11):4006-4016.

show that the biotite in the granite and the MMEs have similar chemical compositions. The biotite in the granite is rich in Mg and poor in Fe, which belongs to magnesian biotite. The iron content coefficients $[(Fe^{3+}+Fe^{2+})/(Fe^{3+}+Fe^{2+}+Mg^{2+})]$ of granite in three facies zones from the outside to the inside are 0.42-0.47, 0.45-0.47 and 0.41-0.46, respectively. The FeO^T/MgO ratio is close to 0.60. The *MF* values $[2 \times Mg/(Fe^{2+}+Mg+Mn)]$ are 1.05-1.21, 1.06-1.15 and 1.12-1.23, indicating the source material were derived from crust-mantle mixed rocks. The biotite's *MF* values of MMEs in three lithofacies belts from the outside to the inside are 1.00-1.16, 1.03-1.15 and 1.10-1.18. The biotite is magnesia biotite, suggesting that primitive magma was influenced by intermediate-acid magma. The above results show that biotite from both the granite and MMEs has similar chemical characteristics. However, there are some differences among different lithofacies. Therefore, it speculates that magma mixing has occurred in the Fangshan granite. The magma mixing is a multi-stage interaction process and may be caused by the mantle-derived magma which is injected into the crustal-derived acid magma during multiple stages.

Key words: biotite; mineral chemistry; magma mixing; Fangshan granite; North China craton; tectonics.

0 引言

房山复式岩体是北京周口店地区重要的地质 单元,具有很长的研究历史.房山花岗岩体由中心 相的斑状花岗闪长岩、过渡相的似斑状花岗闪长岩 以及边缘相的花岗闪长岩三部分组成(周正国等, 1992).房山花岗岩体的主体岩性为闪长质岩石,且 岩体内部含有大量暗色镁铁质微粒包体.暗色镁铁 质微粒包体存在于中酸性花岗岩体中,常作为两种 或两种以上不同性质的岩浆发生混合作用的标志. 房山花岗岩体不同相带中均存在大量的镁铁质微 粒包体,是研究岩浆混合作用的良好对象(Jean, 1987;马昌前等,1992;陶继东等,2009;续海金 等,2012;陈兵等,2021).前人对房山花岗岩体的 研究侧重于岩体及包体的成因和演化过程(马昌 前等,1992;阎国翰等,1995;蔡剑辉等,2005;覃 锋等,2006;陶继东等,2009;续海金等,2012),认 为房山岩体的形成机制是岩浆混合作用(马昌前 等,1992),或者是平衡结晶作用以及批式熔融作 用两种过程共同作用的结果(阎国翰等,1995). 同时提出房山岩体的岩浆来源是幔源岩浆底侵 引发的壳幔相互作用(续海金等,2012).

中酸性岩浆岩中的矿物化学组成可以为岩浆 的来源、上升侵位和固结演化等地质过程提供依 据,可以反映矿物结晶时的物理化学条件(压力、温 度和氧逸度等)、生长历史和岩浆物质来源等信息 (Temizel et al., 2014).黑云母的化学成分很好地 记录了其寄主岩浆的属性,它的成分变化可以反映 寄主岩浆结晶时不同的地质环境和物理化学条件, 对其成分的研究近年来已经被应用到与岩浆混合 作用相关的研究领域(吕志成等, 2003; Gao et al., 2016).通过对黑云母矿物化学组成的研究,可以反 演出寄主岩体成岩时的条件、演化过程及岩浆的物质来源等信息(Burkhard, 1991; El Sheshtawi et al., 1993; Abdel-Rahman, 1994; 蒋少涌等, 2006; Xu et al., 2015; 赵沔等, 2015; 李响等, 2021).

为了进一步研究房山花岗岩和暗色镁铁质 微粒包体的岩石成因,进而约束房山花岗岩在形 成过程中是否发生岩浆混合作用,本文对房山花 岗岩和暗色镁铁质微粒包体进行了详细的岩相 学研究,并对其中的黑云母矿物地球化学特征进 行了详细分析.通过对比不同岩相带内花岗岩和 镁铁质微粒包体中的黑云母,结合前人已有的数 据,探讨房山岩体的岩石成因和岩浆演化过程.

1 地质背景

华北克拉通包括中国华北、东北部、内蒙古等 区域,南以秦岭-大别带为界,北以中亚造山带为 界, 西以祁连造山带为界, 东以胶辽带为界(Bai and Dai, 1996; Kusky and Li, 2003). 房山岩体位 于华北克拉通北缘燕山构造活动带内,地理位置 上位于北京市西南约50~60 km的房山县城边缘, 总体形态呈不对称的椭圆形,是一个由多次岩浆 侵入作用所形成的中等规模的复式岩株,出露面 积约为54 km²(图1).房山岩体边缘零星出露的细 粒石英二长闪长岩是第一次侵入的产物,主体为 第二次侵入的花岗闪长岩,二者之间具有清晰的 侵入接触关系.花岗闪长岩岩体主体从边缘向中 央依次划分为边缘相(粗粒花岗闪长岩)、过渡相 (粗斑花岗闪长岩)和中央相(巨斑花岗闪长岩), 其间为渐变关系,岩体整体上与围岩呈侵入接触 关系,内部普遍发育闪长质包体.

周正国等(1992)将房山岩体划分成4个岩性单



Fig. 1 Geological map of Fangshan intrusion 改自陈能松等(2018)

位:边缘到中央依次分为细粒石英二长闪长岩单 元、中粗粒花岗闪长岩单元、似斑状粗粒花岗 闪长岩单元和巨晶似斑状中细粒花岗闪长岩 单元.黑云母K-Ar法测年结果表明,岩体边缘 形成年龄约为145 Ma, 岩体中央形成年龄约为 134.4 Ma(马昌前等, 1992). 蔡剑辉等(2005) 采用高分辨二次离子质谱计 SHRIMP [],对 13 个锆石颗粒进行了测定,首次报道了该岩体 中心部位的高精度锆石测年结果(130.7± 1.4 Ma),证明房山岩体形成于早白垩世.房山 岩体主要由闪长质的岩石组成,虽然岩体的 岩性较为单一,但仍具有特殊的岩石化学特 征. 阎国翰等(1995)和马昌前等(1992)对房 山花岗岩体进行了详细的岩石地球化学研 究,表明闪长质围岩以及暗色微粒包体中的 同种矿物具有相似的地球化学特征.

2 样品野外和岩相学特征

本研究从房山岩体的边缘到中央采集了3个 不同岩相带中的花岗岩和暗色镁铁质微粒包体样 品(图2a~2c).花岗岩体从边缘到中央,粒度逐渐 变粗,分别具有似斑状、斑状结构和块状构造.房 山花岗岩体中包体的形态不规则,近似纺锤型,大 小不一.从边缘相到过渡相,再到中央相,包体的 大小呈递增趋势,密度逐渐减小.包体为半自形的 微粒状结构,镁铁质微粒包体中暗色矿物主要由 普通角闪石(~30%)和黑云母(~15%)组成.此 外,在过渡相以及中央相的暗色镁铁质微粒包体 中经常可见发育良好的巨大斜长石斑晶甚至是 长石巨晶(图2d).镜下常可观察到发育明显环带 的斜长石以及针状磷灰石(图2e),而在边缘相中 的微粒包体内部较少见长石斑晶以及巨晶.

房山岩体边缘相中粒花岗闪长岩的主要矿物



图 2 房山花岗岩和镁铁质微粒包体的野外特征(a, b, c, d)及正交镜下矿物组成(e, f, g, h) Fig. 2 Field photographs of Fangshan granite and mafic microenclaves (a, b, c, d) and photomicrographs under orthogonal microscope (e, f, g, h) a, f.边缘相;b, g.过渡相;c, h. 中央相. Pl. 斜长石;Hb. 普通角闪石;Qtz. 石英;Bt. 黑云母;Kfs. 钾长石;Ap. 磷灰石

为斜长石(35%),钾长石(30%),石英(20%), 黑云母(10%),角闪石(5%)(图 2f).过渡相似 斑状花岗岩主要矿物为斜长石(40%),钾长石 (25%),石英(20%),黑云母(15%),角闪石 (5%)(图 2g).中央相斑状花岗岩主要矿物为 斜长石(35%),钾长石(25%),石英(25%),黑 云母(10%),角闪石(5%)(图 2h).

3 分析方法

矿物化学分析在中国地质大学(武汉)地球科学学院全球大地构造中心进行,采用仪

器为 JEOL JXA-8230 电子探针仪.工作条件: 加速电压为 15 kV,束斑电流为 20 nA,束斑直 径为 3~5 μ m,所有测试数据均进行了 ZAF 校 正处理,元素特征峰的测量时间为 10 s,背景 测量时间为 5 s(Ti和 Mn的特征峰测量时间 和背景测量时间分别是 20 s和 10 s),所使用 的标样为 SPI公司提供的橄榄石(Si)、金红石 (Ti)、镁铝榴石(Al、Fe)、蔷薇辉石(Mn)、透 辉石(Mg、Ca)、硬玉(Na)、透长石(K)、萤石 (F).具体实验方法和测试条件介绍见 Ning *et al.* (2019)和 Wang *et al.* (2019).

4 测试结果

从表1对黑云母的电子探针分析结果及图3黑 云母成分变化趋势图来看,3个岩相带的花岗岩均 具有富镁,富铝,贫铁,贫钛的特征.边缘相中粒花 岗闪长岩的黑云母 FeO^{T} (全铁,下同)的质量分数 为16.27%~18.58%,MgO的质量分数为11.98%~ 13.35%,含铁系数[($Fe^{3+}+Fe^{2+}$)/($Fe^{3+}+Fe^{2+}+$ Mg)]为0.41~0.46.过渡相中粗粒似斑状花岗闪长 岩的黑云母 FeO^{T} 的质量分数为18.13%~19.96%, MgO的质量分数为11.43%~12.71%,含铁系数 [(Fe³⁺+Fe²⁺)/(Fe³⁺+Fe²⁺+Mg)]为0.42~ 0.50.中央相粗粒斑状花岗闪长岩的黑云母FeO^T的 质量分数为17.25%~20.14%,MgO的质量分数为 11.24%~13.52%,含铁系数[(Fe³⁺+Fe²⁺)/ (Fe³⁺+Fe²⁺+Mg)]为0.42~0.50.因此,虽然在空 间上根据其野外观察划分为3个岩相带,但不同岩 相带中黑云母化学成分差异并不十分明显.不同岩 相带所含的镁铁质微粒包体中,边缘相中包体的黑 云母FeO^T的质量分数为17.38%~19.39%,MgO的

	表1	房山花岗岩及包体中黑云母的化学组成(%)	
Table 1	Biotite d	emical composition of the Eangeban granite and MMEs ((۵

		1 ubic	1 D	ionic c	menne	ai con	positi	511 01 1	ne i ai	igonan	Stann	c and		3(70)				
岩性	边缘相(中粒			过渡相(似斑			中央相(斑状			边缘相包体			过渡相包体			中央相包体		
11 11.	花岗闪长岩)		状花岗闪长岩)		花岗闪长岩)													
GPS	39°42′26″N,		39°42′40″N,		39°43′28″N,			39°42′40″N,			39°43′32″N,			39°43′28″N,				
0.0	115°56′38″E		115°56′34″E		115°56′8″E			115°56′34″E		115°56′23″ E			115°56′8″E					
样品编号	19FS3-1,		19FS2-1, 19FS2-		19FS1-1,			19FS3-1,		19FS2-1,		19FS1-1,						
	19FS3-3		2,19FS2-3		19FS1-3			19FS3-3			19FS2-2,19FS2-3			19FS1-3				
测试点数量	n=19		<i>n</i> =66		<i>n</i> =64			<i>n</i> =41			<i>n</i> =64			n=62				
	最小	最大	平均	最小	最大	平均	最小	最大	平均	最小	最大	平均	最小	最大	平均	最小	最大	平均
	值	值	值	值	值	值	值	值	值	值	值	值	值	值	值	值		值
SiO_2	36.91	38.06	37.57	36.89	38.20	37.49	35.56	38.19	37.04	37.32	38.26	37.71	36.30	37.99	37.27	35.88	38.34	36.94
TiO_2	0.78	1.79	1.33	1.01	1.87	1.43	1.34	3.07	2.09	1.25	1.79	1.54	1.51	2.00	1.74	0.97	3.17	2.20
Al_2O_3	14.58	15.75	15.17	13.79	14.86	14.24	13.71	15.23	14.21	14.41	15.31	14.83	13.72	14.45	14.14	13.78	15.14	14.37
FeO	16.27	18.58	17.30	18.13	19.96	19.26	17.25	20.14	18.92	17.38	19.39	18.32	18.27	19.97	19.27	18.02	20.51	19.08
MnO	0.21	0.32	0.25	0.12	0.32	0.22	0.10	0.31	0.22	0.20	0.29	0.24	0.15	0.31	0.21	0.13	0.30	0.20
MgO	11.98	13.35	12.77	11.43	12.71	12.07	11.24	13.52	12.07	11.93	12.69	12.31	11.30	12.41	11.94	10.49	12.69	11.79
CaO	0.00	0.04	0.01	0.00	0.06	0.01	0.00	0.06	0.02	0.00	0.05	0.01	0.00	0.24	0.01	0.00	0.12	0.01
Na_2O	0.03	0.11	0.06	0.01	0.10	0.06	0.01	0.11	0.06	0.03	0.10	0.06	0.00	0.75	0.06	0.03	0.17	0.07
K_2O	9.96	10.46	10.28	9.73	10.47	10.14	9.66	10.47	10.11	9.76	10.53	10.22	9.83	10.73	10.22	9.70	10.52	10.17
F	0.00	0.93	0.50	0.14	1.29	0.62	0.22	1.17	0.73	0.02	0.84	0.46	0.27	1.18	0.70	0.20	1.29	0.72
Total	94.30	95.52	95.03	94.60	96.68	95.28	94.61	95.87	95.16	94.62	96.26	95.51	93.88	96.36	95.28	94.50	96.29	95.25
Si	5.65	5.73	5.70	5.67	5.79	5.73	5.51	5.78	5.67	5.65	5.75	5.71	5.65	5.76	5.71	5.52	5.80	5.65
Ti	0.09	0.21	0.15	0.11	0.22	0.16	0.15	0.36	0.24	0.14	0.20	0.18	0.17	0.23	0.20	0.11	0.37	0.25
Al	2.62	2.80	2.71	2.48	2.68	2.56	2.48	2.72	2.56	2.58	2.72	2.65	2.48	2.63	2.55	2.49	2.76	2.59
Fe^{3+}	0.20	0.27	0.25	0.18	0.30	0.25	0.21	0.32	0.26	0.22	0.29	0.26	(0.05)	0.28	0.24	0.22	0.29	0.26
Fe^{2+}	1.79	2.12	1.95	2.06	2.39	2.22	1.95	2.36	2.17	1.94	2.18	2.06	2.06	2.56	2.23	2.01	2.42	2.18
Mn	0.03	0.04	0.03	0.02	0.04	0.03	0.01	0.04	0.03	0.02	0.04	0.03	0.02	0.04	0.03	0.02	0.04	0.03
Mg	2.73	2.99	2.89	2.60	2.88	2.75	2.59	3.06	2.75	2.70	2.87	2.78	2.61	2.82	2.73	2.42	2.87	2.69
Ca	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.02	0.00
Na	0.01	0.03	0.02	0.00	0.03	0.02	0.00	0.03	0.02	0.01	0.03	0.02	0.00	0.23	0.02	0.01	0.05	0.02
Κ	1.94	2.03	1.99	1.89	2.04	1.98	1.88	2.04	1.97	1.90	2.03	1.97	1.93	2.13	2.00	1.90	2.05	1.99
Al (IV)	2.27	2.35	2.30	2.21	2.33	2.27	2.22	2.49	2.33	2.25	2.35	2.29	2.24	2.35	2.29	2.20	2.48	2.35
FeO ^T /	0.50	0.01	0.50	0.50	0.64	0.09	0.50	0.64	0.61	0 50	0.09	0.00	0.00	0.64	0.09	0.50	0.00	0.00
$(\mathrm{FeO}^{\mathrm{T}} + \mathrm{MgO})$	0.00	0.61	0.58	0.59	0.64	0.62	0.56	0.64	0.61	0.58	0.62	0.60	0.60	0.64	0.62	0.59	0.66	0.62
MF	1.12	1.23	1.19	1.06	1.15	1.10	1.05	1.21	1.11	1.10	1.18	1.14	1.03	1.15	1.10	1.00	1.16	1.10
今姓玄粉	0.41	0.46	0.43	0.45	0.49	0.47	0.42	0.50	0.47	0.44	0.48	0.46	0.45	0.50	0.48	0.44	0.52	0.48



Fig. 3 Composition variations of biotite in granite and mafic microgranular enclaves

质量分数为11.93%~12.69%,含铁系数[(Fe³⁺+Fe²⁺)/(Fe³⁺+Fe²⁺+Mg)]为0.44~0.48.过渡 相中包体的黑云母FeO^T的质量分数为18.27%~ 19.97%,MgO的质量分数为11.30%~12.41%,含 铁系数[(Fe³⁺+Fe²⁺)/(Fe³⁺+Fe²⁺+Mg)]为 0.45~0.50.中央相中包体的黑云母FeO^T的质量 分数为18.02%~20.51%,MgO的质量分数为 10.49%~12.69%,含铁系数[(Fe³⁺+Fe²⁺)/ (Fe³⁺+Fe²⁺+Mg)]为0.44~0.52.与花岗岩体相 比,包体中的Mg含量相近,Fe含量相差不 大.3个岩相带的花岗岩岩体及其对应的暗色镁 铁质微粒包体中的黑云母相似.边缘相岩体、 过渡相岩体、中央相岩体和镁铁质微粒包体的 $MF[2 \times Mg/(Fe^{2+}+Mg+Mn)]平均值均在同$ 一水平(分别为0.43、0.47、0.47和0.47).

边缘相、过渡相、中央相花岗岩体和三相中的 包体的黑云母的平均TiO₂含量变化范围较大, Al₂O₃含量变化不大.岩体和对应包体的TiO₂平均 含量变化范围分别为1.33~2.09和1.54~2.20.岩体 和对应包体的Al₂O₃平均含量变化范围分别为 14.21~15.17和14.14~14.83.总体看,镁铁质微粒 包体中黑云母的Ti含量变化范围大于Al含量变化 范围,这可能与镁铁质微粒包体岩浆和花岗质岩浆 的混合程度及黑云母的结晶环境变化有关(Temizel *et al.*, 2014).在Mg-(Al^{VI}+Fe³⁺+Ti)-(Fe²⁺+ Mn)黑云母分类图(图4)中,三相花岗岩以及对应 包体中的黑云母集中分布于镁质黑云母区域.

5 讨论

5.1 岩石成因

房山岩体边缘相、过渡相以及中间相的花岗岩体中的黑云母的MF值的变化范围分别为1.12~1.23,1.06~1.15,1.05~1.21.本区3个岩相带花岗岩中黑云母的MF值在1.0~1.3,均属于镁黑云母,是壳幔混合型花岗岩特有的标型矿物.边缘相、过渡相以及中央相的花岗岩均为中酸性,决定了三相带花岗岩体中黑云母的矿物化学特征相似,都为富镁贫铁的黑云母,且具有高度的一致性.FeO^T/(FeO^T+MgO)-MgO图解(图5)显示花岗岩体中的黑云母全部落在了壳幔混合区,表明三相带的花岗岩均具有壳幔混源型花岗岩的特征,并且成分较接





近包体岩浆中结晶的黑云母(周作侠,1988).花岗岩 体与包体中的黑云母集中分布在同一区域,这是镁 铁质包体岩浆与中酸性花岗质岩浆发生较高程度 岩浆混合作用的体现.边缘相、过渡相及中央相所 对应的暗色镁铁质包体中黑云母*MF*值变化范围分 别为1.10~1.18,1.03~1.15,1.00~1.16,主要为镁 黑云母,存在少量的富铁黑云母.镁黑云母(*MF*= 1~1.3)也是I花岗岩的标志特征(谢应雯和张玉泉,



Fig. 5 FeO^T / (FeO^T + MgO)-MgO diagrams of biotite in granite and mafic microgranular enclaves 据周作侠(1988)

1987).此外,Sun et al. (2010)通过对房山花岗岩与 镁铁质微粒包体中的磷灰石进行分析,结果表明样 品具有高La/Yb比值和Sr含量,低Yb含量.稀土元 素配分模式图反映出I型埃达克质花岗岩的特征, 认为房山岩体产生于加厚下地壳的部分熔融.

Abdel-Rahman(1994)对造山和非造山岩系中 的黑云母成分进行了系统研究,提出黑云母化学成 分有助于判别构造环境(图6),指出造山钙碱性岩 系黑云母相对富Mg(I型花岗岩,图6中C区),过 铝质岩系(S型花岗岩,P区)黑云母富Al,为铁叶云 母质的花岗岩.而非造山碱性岩系黑云母则相对富 Fe,为近铁云母(A型花岗岩,A区).研究区角闪石 黑云母花岗岩与黑云母花岗岩中的黑云母均表现 富镁特征,在Mg-(Al^{VI}+Fe³⁺+Ti)-(Fe²⁺+Mn)黑 云母分类图中,均落在镁质黑云母区域(图4),两者 的 FeO^T/MgO 比值均接近造山钙碱性岩系的值





(Abdel-Rahman, 1994). 综上,研究区的角闪 石黑云母花岗岩和黑云母花岗岩均具有 I型 花岗岩的矿物化学特征.

5.2 岩浆混合过程

花岗岩中包体的成因是多样的,可能是上升 侵位的岩浆所捕获的围岩碎块,可能是与花岗岩 同源的岩浆分离结晶作用的产物,也可能是不同 成分、不同种类的两种或多种岩浆不同程度混合 的产物.对于花岗岩中的包体成因一直以来存在 争议,但最新国内外研究表明岩浆混合作用是较 为被广泛接受的成因模式(Barbarin, 2005; Słaby and Martin, 2008; 张旗等, 2007; Zhao *et al.*, 2010; Temizel *et al.*, 2014; Weidendorfer *et al.*, 2014; Pignatelli *et al.*, 2016; 王孝磊, 2017).

野外观察发现镁铁质微粒包体与围岩之间 的接触关系呈现2种状态:(1)一部分镁铁质微 粒包体与围岩之间呈较为截然的接触关系,包体 的边界清晰;(2)另一部分包体与围岩之间呈渐 变过渡的接触关系,中间有一个颜色较浅的过渡 带(图2b).包体与围岩之间不截然的界限说明了 基性岩浆注入酸性岩浆时进行了缓慢持续的岩 浆混合作用(续海金等,2012).在岩浆混合作用 进行的初期,基性的包体岩浆与花岗质岩浆的 混合程度较低,岩浆之间的物质交换程度较弱, 包体与围岩之间的边界较为清晰,但随着岩浆 混合作用的进行,包体岩浆与花岗质岩浆不断 进行物质交换,包体与围岩的边界变得模糊.

包体形态不规则,部分包体呈等轴的椭圆形, 部分包体呈定向排列的椭球形.等轴状的包体表明 包体岩浆曾以液态的球滴状共存于花岗质的岩浆 中(王德滋和谢磊,2008),然而,定向排列的椭圆形 包体反映了岩浆流变学特征(续海金等,2012).部分 微粒包体的内部以及边缘可见明显的长石巨斑晶, 部分包体内部可见具明显环带结构的长石巨晶.混 合包体中巨大的长石巨晶(图2d)是岩浆混合的标 志(Hbbard, 1981),其巨大的长石斑晶很有可能是 岩浆混合作用中包体岩浆对花岗质岩浆的捕获(续 海金等,2012).覃锋等(2006)通过对房山岩体的镁 铁质微粒包体及其寄主花岗岩的全岩主量元素地 球化学分析提出,基性的镁铁质包体岩浆受到了一 定程度的酸性花岗质岩浆的岩浆混合作用的影响. 蔡剑辉等(2005)通过镁铁质微粒包体的岩相学特征 以及地球化学特征进行分析,房山岩体的镁铁质微 粒包体是与其寄主花岗岩同时代的岩浆作用产物.

从本研究区黑云母矿物化学特征来看,包体 中黑云母的镁含量随着铁含量的增加而逐渐降 低,呈现明显的负相关性(图 3e).包体中的黑云 母在分类图中分布区域较为集中,为镁质黑云 母,MF 值变化范围为 1.0~1.3.结合野外观察分 析,第一次岩浆侵入所形成的边缘相闪长岩中的 镁铁质微粒包体与围岩边界接近于截然的接触 关系,可能是因为岩浆不断快速侵入过程中,基 性镁铁质岩浆与酸性岩浆发生了不同程度的混 合,这与从边缘相到中央相包体的颜色呈现出由 深到浅的变化对应.此外,在过渡相以及中央相 的暗色镁铁质微粒包体中广泛出现长石斑晶和 长石巨晶,说明基性岩浆与中酸性岩浆的混合作 用相对较弱,可能发生于混合作用的后期阶段.

综上,结合前人研究成果,我们认为基性包体 岩浆与花岗质的酸性岩浆混合是一个非匀速注入 的过程,岩浆混合的速度与岩浆混合的程度呈负相 关.房山岩体中的岩浆混合作用可能处于花岗岩岩 浆演化的后期,包体岩浆受到花岗岩岩浆的混合作 用,导致包体中结晶出的黑云母与寄主花岗岩中的 黑云母成分接近,均具有富Mg、贫Fe特征.

6 结论

本文通过对房山岩体以及内部的镁铁质微粒 包体中的黑云母进行电子探针矿物化学成分分析, 讨论了房山岩体的岩石学成因和岩浆混合作用过 程,得出以下两点结论:

(1)房山岩体3个相带和内部镁铁质微粒包体中的黑云母均是富 Mg贫 Fe的镁质黑云母,且镁铁质微粒包体中的黑云母 Mg含量相对丰富.岩体以及包体中的黑云母类型表明房山花岗岩体为I型花岗岩,为壳幔混源的岩浆来源提供了依据.

(2)房山花岗岩发生了岩浆混合作用,闪长质花岗岩和镁铁质微粒包体中黑云母记录了岩浆混合作用的进程,镁铁质包体岩浆注入到花岗岩岩浆中是一多阶段注入过程.

致谢:感谢期刊编辑和两位审稿人提出的建 设性意见!

References

- Abdel-Rahman, A. F. M., 1994. Nature of Biotites from Alkaline, Calc-Alkaline, and Peraluminous Magmas. Journal of Petrology, 35(2): 525-541. https://doi.org/ 10.1093/petrology/35.2.525
- Bai, J., Dai, F.Y., 1996. The Early Precambrian Crustal Evolution of China. Journal of Southeast Asian Earth Sciences, 13: 205-214.
- Barbarin, B., 2005. Mafic Magmatic Enclaves and Mafic Rocks Associated with Some Granitoids of the Central Sierra Nevada Batholith, California: Nature, Origin, and Relations with the Hosts. *Lithos*, 80 (1-4): 155-177.
- Burkhard, D. J. M., 1991. Temperature and Redox Path of Biotite-Bearing Intrusives: A Method of Estimation Applied to S- and I-Type Granites from Australia. *Earth* and Planetary Science Letters, 104(1): 89-98.
- Cai, J.H., Yan, G.H., Mu, B.L., et al., 2005. Zircon U-Pb Age, Sr-Nd-Pb Isotopic Compositions and Trace Element of Fangshan Complex in Beijing and Their Petrogenesis Significance. Acta Petrologica Sinica, 21(3): 776-788 (in Chinese with English abstract).
- Chen, B., Xiong, F. H., Ma, C. Q., et al., 2021. Coupling Relationship between Magmatic Mixing and Igneous Diversity: A Case Study of the Baiqili Felsic Pluton in East Kunlun Orogenic Belt. *Earth Science*, 46(6): 2057-

2072 (in Chinese with English abstract).

- Chen, N.S., Chen, B.H., Roger, M., et al., 2018. Preliminary Identification of Magmatic Emplacement Mechanism of Fangshan Pluton in Beijing Using Contact Metamorphism Markers. *Earth Science*, 43(1): 99-108 (in Chinese with English abstract).
- El Sheshtawi, Y.A., Salem, A.K.A., Aly, M.M., 1993. The Geochemistry of Ferrous Biotite and Petrogenesis of Wadi-El-Sheikh Granitoid Rocks Southwestern Sinai, Egypt. Journal of African Earth Sciences (and the Middle East), 16(4): 489-498.
- Foster, M. D., 1960. Interpretation of the Composition of Trioctahedral Micas. *Geological Survey Professional Paper*, 354(B): 1–49.
- Gao, P., Zhao, Z. F., Zheng, Y. F., 2016. Magma Mixing in Granite Petrogenesis: Insights from Biotite Inclusions in Quartz and Feldspar of Mesozoic Granites from South China. Journal of Asian Earth Sciences, 123: 142-161.
- Hbbard, M.J., 1981. The Magma Mixing Origin of Mantled Feldspars. Contributions to Mineralogy and Petrology, 76:158-170.
- Jean, D., 1987. Contribution of Enclave Studies to the Understanding of Origin and Evolution of Granitic Magmas. *Geologische Rundschau*, 76(1): 41-50. https://doi. org/10.1007/BF01820572
- Jiang, S.Y., Zhao, K.D., Jiang, Y.H., et al., 2006. New Type of Tin Mineralization Related to Granite in South China: Evidence from Mineral Chemistry, Element and Isotope Geochemistry. Acta Petrologica Sinica, 22(10): 2509-2516 (in Chinese with English abstract).
- Kusky, T. M., Li, J. H., 2003. Paleoproterozoic Tectonic Evolution of the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22: 23-40.
- Li, X., Wang, L.Z., Tu, B., et al., 2021. Zircon Geochronology, Geochemistry and Petrogenesis of the Taibao Pluton in Northwest Guangdong Province. *Earth Science*, 46 (4): 1199-1216 (in Chinese with English abstract).
- Lü, Z. C., Duan, G. Z., Dong, G. H., 2003. Mineral Chemistry of Biotite from Granites Associated with Different Mineralization in Three Stages of Yanshanina Period in the Southern-Middle Parts of the Da Hinggan Ling Mountains and Its Petrogenetic and Metallogenic Significance. Acta Mineralogica Sinica, 23(2): 177-184 (in Chinese with English abstract).
- Ma, C.Q., Wang, R.J., Qui, J.X., 1992. Enclaves as Indicators of the Origin of Granitoid Magma and Repeater Magma Mingling: An Example from the Zhoukoudian Intrusion, Beijing. *Geological Review*, 38(2): 109-119

4015

(in Chinese with English abstract).

- Ning, W.B., Wang, J.P., Xiao, D., et al., 2019. Electron Probe Microanalysis of Monazite and Its Applications to U - Th - Pb Dating of Geological Samples. *Journal of Earth Science*, 30(5): 952-963.
- Pignatelli, I., Faure, F., Mosser-Ruck, R., 2016. Self-Mixing Magma in the Ruiz Peak Rhyodacite, New Mexico, USA: A Mechanism Explaining the Formation of Long Period Polytypes of Mica. *Lithos*, 266-267: 332-347.
- Qin, F., Xu, X.X., Luo, Z.H., 2006. Evidence of Magmatic Mixing during the Formation of Fangshan Pluton, Beijing. Acta Petrologica Sinica, 28(2): 2957– 2970 (in Chinese with English abstract).
- Słaby, E., Martin, H., 2008. Mafic and Felsic Magma Interaction in Granites: The Hercynian Karkonosze Pluton (Sudetes, Bohemian Massif). *Journal of Petrology*, 49(2): 353-391. https: //doi.org/10.1093/petrology/egm085
- Sun, J., Yang, J., Wu, F., et al., 2010. Magma Mixing Controlling the Origin of the Early Cretaceous Fangshan Granitic Pluton, North China Craton: In Situ U-Pb Age and Sr-, Nd-, Hf- and O-Isotope Evidence. *Lithos*, 120: 421-438.
- Tao, J.D., Ma, C.Q., Zhang, J.Y., et al., 2009. Evolution of Enclaves in Beijing Fangshan Granodiorite and Genesis of Dioritic Microgranular Enclaves. *Geological Science and Technology Information*, 28(2): 33-41 (in Chinese with English abstract).
- Temizel, İ., Arslan, M., Abdioğlu, E., et al., 2014. Mineral Chemistry and Thermobarometry of Eocene Monzogabbroic Stocks from the Bafra (Samsun) Area in Turkey: Implications for Disequilibrium Crystallization and Emplacement Conditions. *International Geology Re*view, 56(10): 1226-1245. https://doi.org/10.1080/ 00206814.2014.933363
- Wang, D. Z., Xie, L., 2008. Magma Mingling: Evidence from Enclaves. *Geological Journal of China Universities*, 14(1): 16-21 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J., Li, X., Ning, W., et al., 2019. Geology of a Neoarchean Suture: Evidence from the Zunhua Ophiolitic Mélange of the Eastern Hebei Province, North China Craton. GSA Bulletin, 131(11/12): 1943-1964.
- Wang, X. L., 2017. Some New Research Progresses and Main Scientific Problems of Granitic Rocks. Acta Petrologica Sinica, 33(5): 1445-1458 (in Chinese with English abstract).
- Weidendorfer, D., Mattsson, H. B., Ulmer, P., 2014. Dynamics of Magma Mixing in Partially Crystallized Mag-

ma Chambers: Textural and Petrological Constraints from the Basal Complex of the Austurhorn Intrusion (SE Iceland). *Journal of Petrology*, 55(9): 1865-1903. https://doi.org/10.1093/petrology/egu044

- Xie, Y. W., Zhang, Y. Q., 1987. Typomorphic Characteristics of Biotite in Granitoids of Different Genetic Types in Hengduan Mountains. *Acta Mineralogica Sinica*, 7(3): 245-254 (in Chinese with English abstract).
- Xu, B., Jiang, S.Y., Wang, R., et al., 2015. Late Cretaceous Granites from the Giant Dulong Sn-Polymetallic Ore District in Yunnan Province, South China: Geochronology Geochemistry, Mineral Chemistry and Nd-Hf Isotopic Compositions. *Lithos*, 218-219: 54-72.
- Xu, H.J., Song, Y.R., Zhang, J.F., et al., 2012. Geological Field Practice Teaching of Magma Mixing in the Fangshan Pluton in Zhoukoudian District of Beijing. *Chinese Geological Education*, 21(4): 135-139 (in Chinese with English abstract).
- Yan, G. H., Xu, B. L., Mou, B. L., et al., 1995. REE Geochemistry of Diorite Inclusions in the Fangshan Pluton and Their Genesis. *Science in China (Series B: Chemistry*), 25(2): 219-224 (in Chinese).
- Zhang, Q., Pan, G.Q., Li, C.D., et al., 2007. Granitic Magma Mixing versus Basaltic Magma Mixing: New Viewpoints on Granitic Magma Mixing Process: Some Crucial Questions on Granite Study (1). Acta Petrologica Sinica, 23(5): 1141-1152 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, K. D., Jiang, S. Y., Zhu, J. C., et al., 2010. Hf Isotopic Composition of Zircons from the Huashan-Guposhan Intrusive Complex and Their Mafic Enclaves in Northeastern Guangxi: Implication for Petrogenesis. *Chinese Science Bulletin*, 55(6): 509-519. https://doi.org/ 10.1007/s11434-009-0314-0
- Zhao, M., Yang, S.Y., Zuo, R.G., et al., 2015. Magmatic Evolution Characteristics of Xiangshan Volcanic -Intrusive Complex from the Gan-Hang Belt: Studies on the Mineral Chemistry of Plagioclase and Biotite. Acta Petrologica Sinica, 31(3): 759-768 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Z.G., Luo, Z.H., He, M.Y., 1992. Preliminary Discussion on Mapping Units of Fangshan Rock Mass in Beijing. *Regional Geology of China*, (2):156-160 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Z.X., 1988. Chemical Composition of Mafic Mica in Intrusive Rocks and Their Geological Significance. Acta Petrologica Sinica, 4(3): 63-73 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蔡剑辉, 阎国翰, 牟保磊, 等, 2005. 北京房山岩体锆石 U-Pb年龄和 Sr、Nd、Pb 同位素与微量元素特征及成因探 讨. 岩石学报, 21(3): 776-788.
- 陈兵,熊富浩,马昌前,等,2021. 岩浆混合作用与火成岩多样 性的耦合关系:以东昆仑造山带白日其利长英质岩体 为例. 地球科学,46(6):2057-2072.
- 陈能松,陈冰寒,Roger,M.,等,2018.用接触变质作用标志 初步判别北京房山岩体的岩浆侵位机制.地球科学,43 (1):99-108.
- 蒋少涌,赵葵东,姜耀辉,等,2006.华南与花岗岩有关的一 种新类型的锡成矿作用:矿物化学、元素和同位素地球 化学证据.岩石学报,22(10):2509-2516.
- 李响, 王令占, 涂兵, 等, 2021. 粤西北印支期太保岩体的锆 石 U-Pb 年代学、地球化学及岩石成因. 地球科学, 46 (4): 1199-1216.
- 吕志成,段国正,董广华,2003.大兴安岭中南段燕山期三 类不同成矿花岗岩中黑云母的化学成分特征及其成岩 成矿意义.矿物学报,23(2):177-184.
- 马昌前,王人镜,邱家骧,1992.花岗质岩浆起源和多次岩 浆混合的标志:包体:以北京周口店岩体为例.地质论 评,38(2):109-119.
- 覃锋,徐晓霞,罗照华,2006.北京房山岩体形成过程中的岩 浆混合作用证据.岩石学报,28(2):2957-2970.
- 陶继东,马昌前,张金阳,等,2009.北京房山花岗闪长岩体

中包体的演化及闪长质微粒包体的成因.地质科技情报,28(2):33-41.

- 王德滋,谢磊,2008. 岩浆混合作用:来自岩石包体的证据. 高校地质学报,14(1):16-21.
- 王孝磊,2017.花岗岩研究的若干新进展与主要科学问题. 岩石学报,33(5):1445-1458.
- 谢应雯,张玉泉,1987.横断山不同成因类型花岗岩类岩石 中黑云母的标型特征.矿物学报,7(3):245-254.
- 续海金, 宋衍茹, 章军锋, 等, 2012. 北京周口店地区房山岩 体中岩浆混合作用的野外实践教学. 中国地质教育, 21(4):135-139.
- 阎国翰,许保良,牟保磊,等,1995.房山岩体中闪长岩质包体 的矿物稀土元素地球化学及其包体成因.中国科学(B 辑:化学),25(2):219-224.
- 张旗, 潘国强, 李承东, 等, 2007. 花岗岩混合问题: 与玄武 岩对比的启示:关于花岗岩研究的思考之一. 岩石学 报, 23(5): 1141-1152.
- 赵沔,杨水源,左仁广,等,2015.赣杭构造带相山火山侵入 杂岩的岩浆演化特征:来自斜长石和黑云母的化学成 分研究.岩石学报,31(3):759-768.
- 周正国,罗照华,何明跃,1992.对北京房山岩体填图单位的 初步探讨.中国区域地质,(2):156-160.
- 周作侠,1988. 侵入岩的镁铁云母化学成分特征及其地质意 义. 岩石学报,4(3):63-73.