

doi:10.3799/dqkx.2013.007

周口店岩体矿物学、年代学、地球化学特征 及其岩浆起源与演化

张金阳¹, 马昌前^{2,3}, 王人镜³, 陶继东⁴

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

4. 中国地质大学马克思主义学院, 湖北武汉 430074

摘要: 周口店岩体由三次侵入的中酸性岩石组成, 本次测得石英闪长岩锆石 U-Pb 年龄为 131.6 ± 2.1 Ma, 闪长玢岩锆石 U-Pb 年龄为 128.1 ± 1.4 Ma. 周口店岩体各种类型岩石属高钾钙碱性系列、偏铝质, $Mg^\#$ 较高, 重稀土元素和 Ta、Nb、P 以及 Ti 明显亏损, 轻稀土元素和 Ba、K 以及 Sr 相对富集, Eu 没有异常, Yb 元素含量小于 2×10^{-6} , $(La/Yb)_N$ 和 Sr/Y 比值较高. 斜长石复杂环带能谱线扫描表明, 花岗闪长岩中的斜长石核部牌号高, 完整的幔部由内向外由反环带和正环带组成, 微粒包体中的斜长石核部牌号低, 幔部以尘状环带开始, 然后演变为正环带, 这揭示存在多期基性岩浆的注入作用, 结合暗色微粒包体的形态、大小、数量、反向脉、矿物含量统计、矿物成分、地球化学和各类环带包体、岩墙状包体群等特征, 说明暗色微粒包体是在花岗闪长岩浆冷凝过程的不同阶段, 多期幔源基性岩浆注入并与酸性岩浆在围绕包体周缘的局部范围内发生不均一机械混合作用的结果. 周口店中酸性岩石体现埃达克质岩的地球化学特征, 岩浆成分主要受源区控制, 形成于加厚下地壳环境. 由石英闪长岩—花岗闪长岩至中酸性岩脉, 岩石 $(Er/Lu)_N$ 和 Nb/Ta 比值升高, 说明源区残留相矿物组合由角闪石+石榴石向石榴石+金红石变化, 岩浆源区不断变深.

关键词: 岩脉; 暗色微粒包体; 源区; 混合; 年代学; 周口店.

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2013)01-0068-19

收稿日期: 2012-05-28

Mineralogical, Geochronological and Geochemical Characteristics of Zhoukoudian Intrusion and Their Magmatic Source and Evolution

ZHANG Jin-yang¹, MA Chang-qian^{2,3}, WANG Ren-jing³, TAO Ji-dong⁴

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

4. Faculty of Marxism, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Zhoukoudian intrusion contains intermediate-acidic rocks with three magmatic pulses. LA-ICPMS zircon U-Pb ages of quartz diorite and diorite-porphry are 131.6 ± 2.1 Ma and 128.1 ± 1.4 Ma, respectively. All kinds of rocks are metaluminous and show high-K calc-alkaline affinity with high $Mg^\#$. Their LREE, Ba, K, and Sr contents are high and HREE, Ta, Nb, P, and Ti are low with no Eu anomaly, high $(La/Yb)_N$ and Sr/Y ratios. Zoned plagioclase with large mantle is common in granodiorite (second pulse) and mafic microgranular enclaves. Two such zoned plagioclase crystals are studied: One from granodiorite with high An compositions in cores and reverse-, normal-zoning outwardly in well-developed mantles; the other from mafic microgranular enclave with low An compositions in cores and beginning with dusty zoning and then showing normal-zoning in mantles, together with shape, size, quantity, reverse vein, statistics of mineral contents, mineral compositions, geochemistry, zoned structure, dyke-like swarms of mafic microgranular enclaves, a genesis of magma mingling between basic and acid magma is suggested. Magma mingling attained local equilibrium

基金项目: 国家科学技术部国际科技合作项目 (No. 2007DFA21230); 国家自然科学基金项目 (Nos. 40821061, 40334037, 40903017); 教育部和国家外国专家局高等学校学科创新引智计划 (No. B07039) 资助.

作者简介: 张金阳 (1977-), 男, 博士, 副教授, 从事岩浆岩石学及相关矿床研究. E-mail: zhangjinyang@cug.edu.cn

around enclaves and happened during whole solidified process of granodiorite due to multiple pulses of basic magma. The rocks from Zhoukoudian intrusion are adakitic and are partially melted within thickened lower crust. $(\text{Er}/\text{Lu})_N$ and Nb/Ta ratios increase from quartz diorite-granodiorite to intermediate-acidic dykes, which indicates that residual minerals in source region changed from amphibole + garnet to garnet + rutile and the source became deeper.

Key words: dyke; mafic microgranular enclave; source; magma mingling; geochronology; Zhoukoudian.

花岗岩浆的起源与演化是花岗岩研究永恒的主题,目前运用岩相学和地球化学数据探讨花岗岩的成因类型、分离结晶、岩浆混合与同化混染等问题得到了空前的发展,已经形成了一系列经典的判别图解和理论体系。然而,与玄武岩浆不同,花岗岩浆粘度大,温度低,多源于发生了复杂演化过程的大陆地壳,仅仅简单地依靠化学成分探讨花岗岩的成因演化问题,就可能会在花岗岩成因类型判别、是否发生分离结晶、岩浆混合与同化混染等方面形成错误的认识。近来,这种现象得到了明显的重视(吴福元等, 2007; 张旗等, 2008)。北京周口店岩体是呈环状的复式侵入体,研究历史悠久,研究程度较高,是探讨花岗岩浆起源与演化的天然实验室。

周口店岩体的研究历史大致可划分为以下 4 个阶段:(1)1920—1950 年,在《北京西山地质志》中将其命名为周口店岩体(叶良辅, 1920),随后开展了部分岩相学和初步的岩石成因研究(杨增威, 1928; 何作霖, 1935; 王述平, 1950)。(2)1960—1980 年,侧重于岩浆成因研究,并逐步注意到岩浆结晶的温压条件、侵位过程和岩浆对于变质围岩的热改造作用(邓晋福, 1978; 张德全, 1981; 刘国惠和伍家善, 1987)。(3)1980—1990 年,较系统地总结了岩体地球化学特征(黄福生和姜常义, 1985; 郑斯成等, 1987),开创并完成了岩浆动力学新领域的研究(马昌前, 1988; 王人镜和马昌前 1989; 王人镜等, 1990; Ma *et al.*, 1996)。(4)1990 年至今,矿物化学、年代学和岩石地球化学研究被广泛应用,钾长石巨晶是直接从不饱和水熔体中生长形成的(马昌前和王人镜, 1990),斜长石研究证实岩体中的微粒包体是岩浆混合成因(覃锋等, 2006),第二次侵入的中央相花岗闪长岩黑云母和角闪石 K-Ar 法年龄为 132.7~132.8 Ma(王松山, 1983),锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 130.7±1.4 Ma(蔡剑辉等, 2005),岩体成因与下地壳中基性火成岩有关(马芳等, 2003; Yan *et al.*, 2011)或与下地壳及富集岩石圈地幔有关(蔡剑辉等, 2005)。

周口店岩体的研究已经相当详细,但以下问题还有待深入探讨:(1)位于岩体西部的中酸性岩脉代

表最晚期的岩浆活动,其岩浆源区与早期岩石岩浆源区的联系与差别还不清楚;(2)暗色微粒包体成因研究还存在分歧(陶继东等, 2009; Sun *et al.*, 2010),若是岩浆混合成因,岩浆混合过程还不明晰。这构成本文的主要研究内容,通过这些研究,期望能对周口店岩体岩浆源区和微粒包体成因提供新认识。

1 区域地质背景

周口店地区处于 NNE 向太行山山脉、近 EW 向燕山山脉和华北平原接壤地带,大地构造单元隶属于华北克拉通北缘燕山构造带(赵温霞, 2003; Yan *et al.*, 2006, 2011)。其区域地质构造较为复杂,整体上构成变质核杂岩构造,平面形态呈近似等轴状,由核部—滑脱系—盖层组成典型的三层结构模式,核部为早白垩世周口店岩体和太古宇官地杂岩,上覆和外缘的盖层系统为厚度大为减薄的元古界—上古生界地层,中间为基底剥离断层(图 1)。太古界官地杂岩与上覆不同时代的地层呈剥离断层接触,主要岩石类型有黑云角闪斜长片麻岩、混合片麻岩、斜长角闪岩和黑云母角闪石变粒岩。元古界包括中、上古界长城系、蓟县系、青白口系,主要为滨海相碳酸盐岩、碎屑岩和泥质岩。下古生界包括寒武系和下奥陶统,主要为海相碳酸盐岩夹泥质岩。上古生界包括上石炭统和二叠系,主要为海陆交互相和陆相碎屑岩,含可采煤层。中生界包括三叠系及下、中侏罗统,主要为陆相含煤碎屑岩和火山沉积岩。

2 岩体地质和岩相学

周口店岩体位于北京市西南房山区边缘,侵入于周口店变质核杂岩核部,是一个燕山晚期两次侵入形成的近圆形复式岩体,平面上北西—南东长约 8 km,北东—南西宽约 7 km,出露面积约 47 km²(图 1)。第一次侵入的是闪长岩—石英闪长岩体,分布于复式岩体的边缘,被第二次侵入的花岗闪长岩体分割成东、南、北数块,总面积近 2 km²,岩石以暗

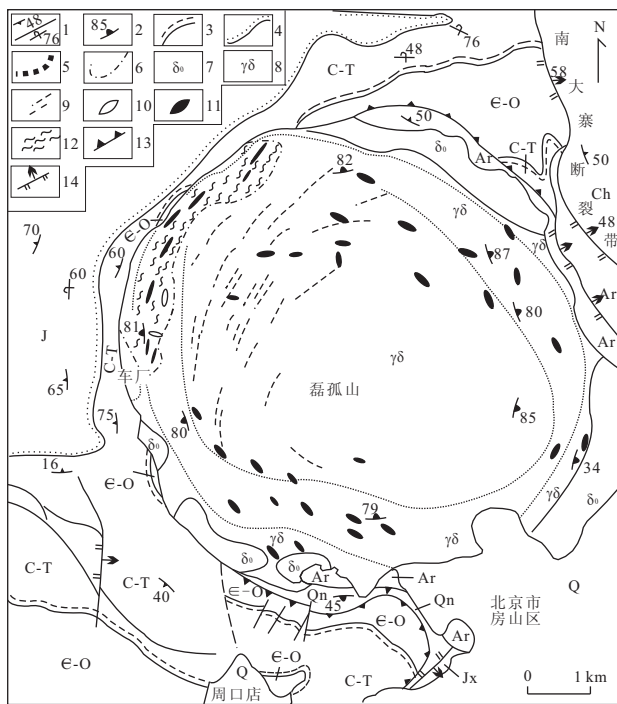


图 1 周口店岩体地质略图(据赵温霞, 2003 修改)

Fig. 1 Simplified geological map of the Zhoukoudian intrusion
 1. 正常与倒转岩层; 2. 岩体内面理; 3. 平行不整合; 4. 角度不整合; 5. 岩体相带界线; 6. 强变形区边界线; 7. 石英闪长岩及编号; 8. 花岗闪长岩及编号; 9. 垂直面理的破裂; 10. 闪长玢岩脉和花岗闪长斑岩脉; 11. 应变捕虏体(包体); 12. 挤压片理; 13. 剥离断层; 14. 逆断层. Q. 第四系; J. 侏罗系; C-T. 上石炭统一三叠系; e-O. 寒武系一下奥陶统; Qn. 青白口系; Jx. 蓟县系; Ch. 长城系; Ar. 官地杂岩

色中细粒—细粒结构为特征, 闪长岩主要矿物组成和含量分别为斜长石(55%)、普通角闪石(33%)、黑云母(7%)、钾长石(2%)、石英(2%)和副矿物(1%), 石英闪长岩主要矿物组成和含量分别为斜长石(45%)、正条纹长石(25%)、石英(15%)、角闪石(9%)、黑云母(5%)和少量副矿物, 其中条纹长石包裹有磷灰石和石英, 在斜长石与石英、钾长石与石英接触处发育蠕虫结构, 副矿物有浑圆状磁铁矿、长柱状磷灰石和信封状榍石. 第二次侵入的是花岗闪长岩体, 是周口店侵入体的主体, 面积约 45 km², 与第一次侵入的石英闪长岩呈明显的侵入接触关系, 依据钾长石斑晶的含量和特征划分为三个逐渐过渡的同心环状相带: 边缘相、过渡相和中央相, 主要矿物为斜长石、钾长石、石英、角闪石、黑云母和少量副矿物. 边缘相花岗闪长岩一般为中粒结构, 过渡相花岗闪长岩为似斑状结构, 斑晶含量一般在 15% 左右, 主要为斜长石、钾长石, 大小为 3~15 mm, 中央相花岗闪长岩为似斑状结构, 斑晶主要为钾长石, 还有少量斜长石, 钾长石斑晶一般为 11 mm×18 mm, 含量

约 3%~10%.

周口店岩体中广泛分布着闪长质暗色微粒包体, 过渡相花岗闪长岩中最多. 暗色微粒包体的形态多呈椭球形, 大小差别极大, 最大的包体长轴可达 2~3 m, 最小的包体长轴仅 2 cm. 暗色微粒包体往往发育有向内部弯曲的凹边(图 2a, 2b), 可见寄主岩细脉切穿并分割微粒包体(图 2b), 也可见被微粒包体包围的寄主岩团块(图 2c), 表明寄主岩浆挤入包体并发生了物质交换. 密集的暗色微粒包体群整体上呈岩墙形态, 说明长英质寄主岩浆冷凝过程中形成原生裂隙, 镁铁质岩浆沿这些裂隙贯入, 并发生物质交换. 环带状暗色微粒包体(图 2a)核部颜色较深, 暗色矿物含量高, 粒度相对较细, 边部一般较窄并发育不完全, 颜色较浅, 暗色矿物含量低, 粒度相对较粗, 浅色的边缘是包体与寄主岩物质发生交换的产物. 也可见中心为暗色微粒包体, 边部为富云包体组成的复合包体, 这是寄主岩浆中黑云母围绕暗色微粒包体集中分布的结果, 表明寄主岩浆处于未结晶的液相. 这些类型暗色微粒包体一方面说明包体与寄主岩存在物质交换, 另一方面说明镁铁质岩浆侵入贯穿于岩浆固结过程的始终, 即存在多期次镁铁质岩浆的侵入活动.

微粒包体呈斑状结构, 斑晶含量约为 3%~5% 左右, 主要有斜长石和少量黑云母、角闪石, 偶见钾长石. 斜长石斑晶形态多不规则, 边界不平直, 有的呈卵圆形, 其中可含黑云母、角闪石、磷灰石. 黑云母斑晶呈深褐色—浅黄色多色性, 内部可见针状磷灰石, 角闪石斑晶边角钝圆, 多色性呈草绿—褐黄色. 包体中除可见与寄主岩中相同的斑晶外, 横跨于包体与寄主岩边界的长石斑晶也很多, 表明包体中的长石与寄主岩中的长石相同, 包体中的长石来源于寄主岩, 且长石生长时包体未完全固结. 基质中, 角闪石呈半自形长柱状, 多色性与斑晶角闪石一致, 有的具简单双晶, 黑云母以半自形为主, 多色性与斑晶黑云母一致, 局部可见曲折现象, 长石多为半自形—自形, 石英具波状消光, 部分包体中含有少量的褐帘石. 基质中长石和石英含量达 50% 以上, 暗色矿物约占 45%~50%, 角闪石含量多于黑云母.

微粒包体和寄主岩中的斜长石呈现复杂的环带样式, 主要有以下几种样式: (1) 复杂韵律环带, 该类斜长石颗粒较大, 由无数韵律环带组成; (2) 简单韵律环带, 该类斜长石颗粒相对较小, 仅由 3~5 个环带组成韵律; (3) 尘状环带, 又被称为内环带、钉盖状环带、双峰式环带、钙质异常环带, 是一条包裹有细

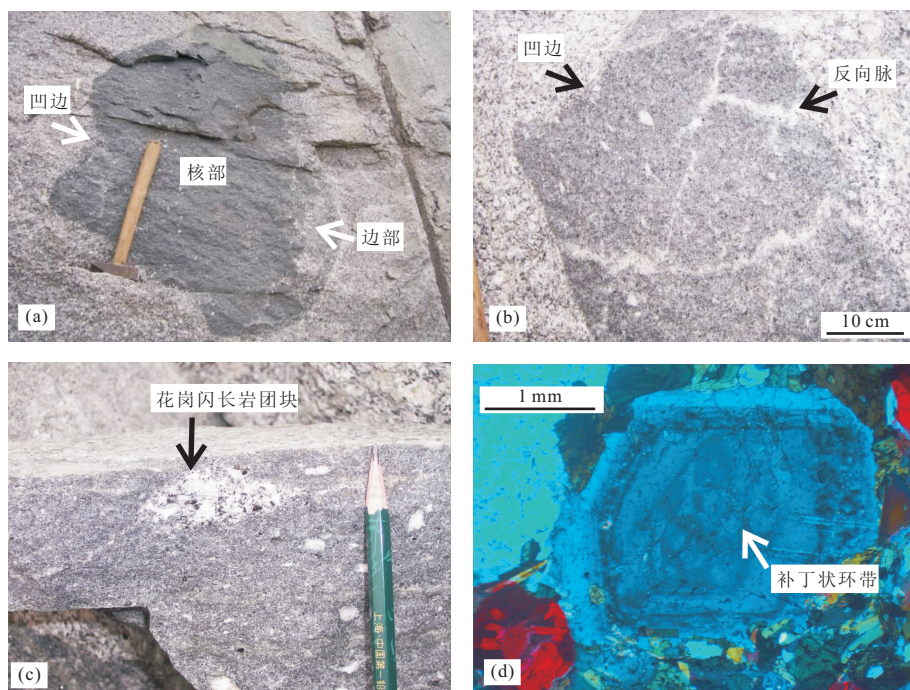


图 2 (a) 环带状暗色微粒包体及向内部弯曲的凹边, (b) 贯入暗色微粒包体的反向脉及向内弯曲的凹边, (c) 微粒包体包围的寄主岩花岗闪长岩团块, (d) 微粒包体(FS03-5)中复杂环带斜长石, 核部为补丁状环带

Fig. 2 (a) A zoned mafic microgranular enclave with concave margins, (b) the reverse dykes and concave margins within a mafic microgranular enclave, (c) the granodiorite globule within a mafic microgranular enclave, (d) the complex zoned plagioclase within a mafic microgranular enclave

小熔体、黑云母等矿物的窄环带, 该窄环带处斜长石牌号陡然升高; (4) 补丁状环带(图 2d), 多出现在斜长石中心, 表现为不规则形状的暗色区域和浅色区域相间出现的环带形式。

周口店岩体 NW 部车厂出露中酸性岩脉, 主要为闪长玢岩脉和花岗闪长斑岩脉, 岩脉露头宽度从 0.2 ~ 3.0 m 不等, 多沿 E-W 方向延伸, 少量沿 N-S 方向延伸。脉体产状较为稳定, 倾向多为 180° 左右, 倾角较陡, 约为 70°。岩脉主要侵入过渡相花岗闪长岩中, 边界截然。花岗闪长斑岩脉切过闪长玢岩脉, 显示闪长玢岩脉形成稍早于花岗闪长斑岩脉。闪长玢岩脉具冷凝边, 捕获有花岗闪长岩小团块, 且有闪长玢岩细脉伸入花岗闪长岩中。闪长玢岩脉为斑状结构, 斑晶主要为普通角闪石, 可见少量钾长石, 含量变化较大(1% ~ 15%), 基质为细粒结构。主要矿物组成和含量分别为斜长石(60%)、普通角闪石(15%)、黑云母(15%)、钾长石(4%)和石英(5%)。花岗闪长斑岩脉为斑状结构, 斑晶主要是斜长石、钾长石、普通角闪石、黑云母, 粗粒, 含量约为 10%; 基质为细粒结构, 主要矿物组成和含量分别为斜长石(55%)、石英(20%)、钾长石(10%)、黑云母(10%)

和普通角闪石(5%)。

3 测试方法

用于测年的全岩样品经破碎、淘洗和磁选后, 分离出锆石精样, 然后在双目镜下仔细挑选表面平整光洁且具不同长宽比例、不同柱锥面特征、不同颜色的锆石颗粒, 再将这些锆石排放在环氧树脂上, 待固结后, 对环氧树脂表面抛光至锆石表面暴露以待测试。在锆石反射光、透射光及阴极发光研究的基础上开展测年工作。锆石 U-Pb 同位素定年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室利用 LA-ICP-MS 分析完成。激光剥蚀系统为 GeoLas 2005, ICP-MS 为 Agilent 7500a, 束斑直径为 30 μm , 详细的仪器操作条件和数据处理方法见 Liu *et al.* (2010), 年龄与谐和图用 ISOPLOT(3.0) 处理。

由于偏光显微镜下非常清楚的斜长石环带在背散射图像上无法分辨, 不能利用电子探针精确地对每个环带开展定量测试, 为完整连续揭示斜长石环带提供的信息, 采用了半定量的能谱测试。斜长石能谱测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源

国家重点实验室环境扫描电子显微镜(Quanta200)上开展,利用能谱仪在样品表面进行元素的线扫描分析,线扫描步长约 $0.37 \mu\text{m}$ 。利用线扫描数据计算斜长石牌号。由于数据量大,在制作斜长石牌号剖面图时,利用 Excel 中的移动平均法拟合数据。

全岩样品碎至 200 目后,在湖北省岩矿测试中心用 X 荧光光谱和湿化学法测试了主量元素。在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室用 Agilent 7500a ICP-MS 测试了样品的微量元素,详细的样品处理过程、分析精密度和准确度同 Liu *et al.* (2008)。用表面热电离质谱仪(TIMMS)测试样品 Sr-Nd 同位素,分析方法和计算程序同马昌前等(2004)。

4 锆石年代学

用于定年的石英闪长岩样品取自周口店复式侵入体西南部的山口村,样品号为 07FS07-1。样品中分选出了大量锆石,绝大多数锆石在 $200\sim 400 \mu\text{m}$ 之间,锆石晶形多呈长柱状或短柱状,长宽比约在 $3:1\sim 1:1$ 之间。阴极发光图像表明锆石发育较好的振荡环带。由于岩浆结晶后受到流体的作用,使得锆石振荡环带受到改造,表现为在阴极发光图象上改造区域颜色明显变浅。在 20 颗锆石上共测定了 20 个数据点(表 1)。其中两个数据点位于锆石核部,得到元古代的年龄,它们的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分别为 $2426\pm 33 \text{ Ma}$ 和 $1816\pm 39 \text{ Ma}$, $2426\pm 33 \text{ Ma}$ 的年龄数据在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}-^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 图上位于谐和曲线上,锆石具有环带结构,Th/U 比值高达 1.3,该年龄代表早元古代早期一次岩浆活动事件。这一年龄与该区官地杂岩在 2.5 Ga 时发生高级变质作用和深熔作用的年代相近(颜丹平等, 2005; 刘兵等, 2008)。 $1816\pm 39 \text{ Ma}$ 的锆石没有发育环带,Th/U 比值几乎接近 0,代表一次变质作用事件,这也与官地杂岩经历过该时期的变质作用相吻合。剩余的 18 个锆石数据点可分为两组,第一组数据点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $131.6\pm 2.1 \text{ Ma}$;第二组数据点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $119.5\pm 2.1 \text{ Ma}$,它们的 Th/U 比值没有明显变化,单个比值大于 0.8,均值约为 1.1,数据点在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}-^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 图上均位于谐和曲线上(图 3a)。其中第一组数据点位于锆石振荡环带上,代表岩体的结晶年龄,第二组数据点位于锆石振荡环带受后期改造的浅色区域上,代表岩

浆结晶后流体作用的年龄。因此,石英闪长岩形成时代应为 $131.6\pm 2.1 \text{ Ma}$,与蔡剑辉等(2005)得到的中央相花岗闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 ($130.7\pm 1.4 \text{ Ma}$) 在误差内基本相当。

用于定年的中酸性岩脉样品采自周口店复式侵入体西部龙门口村,样品号为 CC01-4,岩性为闪长玢岩。样品中分选出了大量锆石,绝大多数锆石大小在 $150\sim 200 \mu\text{m}$ 之间,锆石晶体多呈短柱状,长宽比约在 $3:1\sim 1:1$ 之间。锆石阴极发光图像表明,锆石发育完好的振荡环带。共在 30 颗锆石上测定了 30 个数据点(表 1)。其中数据点 27、28、30 信号非常差,应予以剔除,数据点 2 的 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 比值误差很大,造成年龄误差增大,也应剔除。剩余的 26 个数据点数据质量好,其中数据点 19 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 给出了 $2501\pm 19 \text{ Ma}$ 的年龄,Th/U 比值为 0.7,数据点位于锆石核部,该年龄代表早元古代早期一次岩浆活动事件。其他 25 个数据点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $128.1\pm 1.4 \text{ Ma}$,MSWD 值为 2.4,Th/U 比值单个数据均大于 0.6,算术平均值为 0.8,数据点均位于锆石振荡环带发育的区域,该年龄代表闪长玢岩脉岩浆结晶的年龄(图 3b)。因此,闪长玢岩脉侵位年龄为 $128.1\pm 1.4 \text{ Ma}$,略晚于石英闪长岩和花岗闪长岩。

5 斜长石矿物化学

前人曾根据主要造岩矿物的矿物化学成果讨论了微粒包体和寄主岩的成因(覃锋等, 2006; 陶继东等, 2009)。在对复杂环带斜长石开展详细岩相学工作的基础上,本次选择环带样式复杂,但环带样式不同的斜长石开展能谱测试工作,连续完整的揭示斜长石复杂环带记录的信息。共测试了两个斜长石颗粒。复杂环带斜长石核—幔一边的划分是依照斜长石环带的成因(见下文)进行的。

一个斜长石颗粒位于微粒包体与寄主岩边界处、在过渡相寄主岩中(FS03-3,图 4),晶体宽约 7.5 mm ,长约 10 mm ,由核部—幔部—边部组成。核部较小,形态不规则,明显遭受熔蚀,牌号最高。幔部发育复杂的韵律环带,由内向外可分为 5 部分,每一部分均发育韵律环带,在棱角处均有轻微熔蚀现象,其中第 4 部分幔部与第 3 部分幔部分接触处形成了尘状环带,此处斜长石牌号升高。发育较完整的幔部由内向外由反环带和正环带组成,如第一幔部和第

表 1 周口店复式侵入体石英闪长岩(07FS07-1)和闪长岩岩脉(CC04-1)锆石 LA-ICPMS U-Pb 测年结果

Table 1 Zircon LA-ICPMS U-Pb data of quartz diorite (07FS07-1) and diorite porphyry dyke (CC04-1) from the Zhoukoudian intrusion

	Pb	U	Th	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1 σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1 σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1 σ
07FS07-1										
1	48.5	41.0	44.5	1.1	0.146 03	0.017 63	0.017 93	0.000 51	115.0	3.0
2	84.5	70.7	77.5	1.1	0.134 80	0.013 60	0.018 44	0.000 42	118.0	3.0
3	69.5	61.0	62.0	1.0	0.138 84	0.014 24	0.020 02	0.000 44	128.0	3.0
4	65.5	49.9	59.0	1.2	0.156 15	0.017 47	0.020 45	0.000 52	130.0	3.0
5	44.4	39.3	40.3	1.0	0.153 97	0.015 53	0.018 97	0.000 46	121.0	3.0
6	43.3	37.0	39.2	1.1	0.158 70	0.015 48	0.020 69	0.000 47	132.0	3.0
7	103.8	74.9	95.9	1.3	0.144 44	0.015 17	0.018 99	0.000 47	121.0	3.0
8	35.2	34.0	31.8	0.9	0.129 24	0.021 70	0.018 96	0.000 69	121.0	4.0
9	82.3	60.0	75.6	1.3	0.137 55	0.013 44	0.020 67	0.000 47	132.0	3.0
10	125.8	32.7	41.9	1.3	9.612 98	0.281 67	0.443 15	0.005 36	2 365.0	24.0
11	94.6	69.7	86.8	1.2	0.155 26	0.012 56	0.020 57	0.000 42	131.0	3.0
12	72.8	62.0	65.7	1.1	0.137 16	0.017 51	0.018 94	0.000 58	121.0	4.0
13	78.6	64.4	71.7	1.1	0.127 02	0.014 48	0.020 62	0.000 49	132.0	3.0
14	31.6	36.4	28.1	0.8	0.154 31	0.023 08	0.018 76	0.000 69	120.0	4.0
15	551.2	395.4	8.2	0.0	4.372 16	0.134 13	0.285 53	0.003 25	1 619.0	16.0
16	66.2	58.2	59.9	1.0	0.142 00	0.017 18	0.021 28	0.000 55	136.0	3.0
17	88.6	72.6	81.4	1.1	0.129 66	0.014 92	0.018 87	0.000 47	121.0	3.0
18	61.3	61.2	55.6	0.9	0.129 67	0.017 34	0.018 60	0.000 55	119.0	3.0
19	72.1	52.8	66.4	1.3	0.142 62	0.019 08	0.020 69	0.000 60	132.0	4.0
20	54.0	47.3	49.0	1.0	0.136 92	0.019 38	0.020 64	0.000 56	132.0	4.0
CC04-1										
1	7.2	257.9	233.3	0.9	0.154 57	0.008 31	0.020 01	0.000 28	127.7	1.7
2	7.6	246.4	196.6	0.8	0.360 33	0.151 53	0.020 61	0.000 31	131.5	2.0
3	6.6	242.8	194.3	0.8	0.134 85	0.007 82	0.019 45	0.000 30	124.2	1.9
4	7.1	266.7	190.9	0.7	0.161 89	0.009 48	0.018 95	0.000 28	121.0	1.8
5	5.7	195.1	150.1	0.8	0.170 38	0.009 94	0.019 68	0.000 76	125.6	4.8
6	5.1	172.9	151.4	0.9	0.183 78	0.009 40	0.019 77	0.000 37	126.2	2.3
7	2.9	89.2	104.1	1.2	0.251 18	0.015 27	0.019 36	0.000 44	123.6	2.8
8	4.0	148.7	99.7	0.7	0.148 43	0.008 83	0.019 95	0.000 35	127.3	2.2
9	6.4	231.3	171.3	0.7	0.141 16	0.009 68	0.019 74	0.000 33	126.0	2.1
10	5.2	188.9	119.1	0.6	0.179 16	0.012 09	0.019 96	0.000 34	127.4	2.1
11	5.7	198.7	154.5	0.8	0.184 30	0.010 13	0.019 94	0.000 27	127.3	1.7
12	3.7	135.0	108.7	0.8	0.171 79	0.010 43	0.020 00	0.000 35	127.7	2.2
13	10.0	344.8	350.8	1.0	0.151 91	0.009 92	0.019 97	0.000 25	127.5	1.6
14	6.4	221.1	186.8	0.8	0.183 56	0.011 52	0.020 25	0.000 31	129.2	1.9
15	2.5	91.2	68.2	0.7	0.205 44	0.012 65	0.020 46	0.000 39	130.6	2.4
16	5.0	184.9	129.7	0.7	0.208 26	0.020 34	0.019 82	0.000 37	126.5	2.3
17	6.6	229.6	201.9	0.9	0.192 57	0.016 94	0.020 10	0.000 38	128.3	2.4
18	5.6	196.4	157.3	0.8	0.211 87	0.018 77	0.019 96	0.000 41	127.4	2.6
19	76.0	119.3	83.8	0.7	10.230 53	0.333 38	0.448 47	0.004 44	2 388.5	19.8
20	2.8	89.1	86.0	1.0	0.236 18	0.017 77	0.021 38	0.000 43	136.4	2.7
21	6.6	223.7	167.7	0.7	0.217 19	0.016 76	0.020 47	0.000 31	130.6	2.0
22	4.8	152.1	167.8	1.1	0.210 85	0.014 54	0.020 48	0.000 36	130.7	2.3
23	6.6	218.5	182.1	0.8	0.210 91	0.011 22	0.021 06	0.000 29	134.3	1.8
24	5.1	167.6	124.3	0.7	0.245 08	0.015 26	0.021 01	0.000 41	134.1	2.6
25	5.2	193.1	134.0	0.7	0.179 70	0.014 13	0.019 94	0.000 32	127.3	2.0
26	4.8	169.7	127.3	0.8	0.179 96	0.009 86	0.020 36	0.000 29	129.9	1.8
27	8.3	221.9	229.6	1.0	0.370 28	0.031 45	0.022 29	0.000 40	142.1	2.5
28	6.5	188.2	130.5	0.7	0.394 42	0.023 92	0.022 17	0.000 39	141.4	2.4
29	6.6	245.8	178.5	0.7	0.210 22	0.018 73	0.020 15	0.000 35	128.6	2.2
30	3.8	105.2	104.9	1.0	0.370 69	0.023 13	0.021 85	0.000 51	139.4	3.2

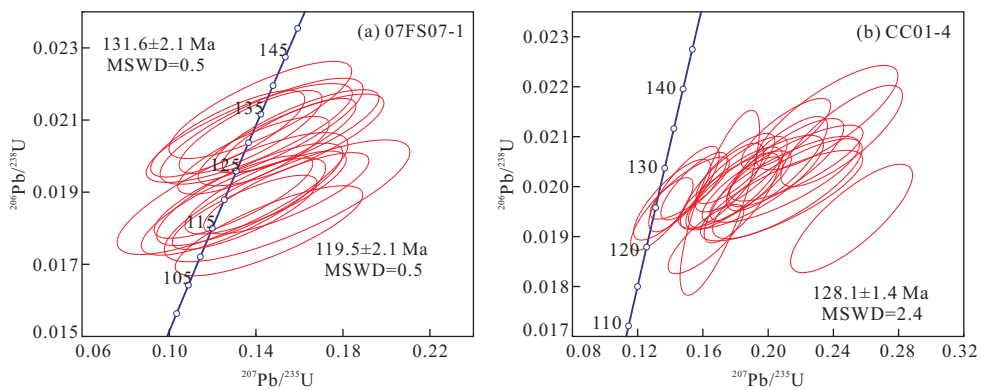


图 3 (a)石英闪长岩样品 07FS07-1 和(b)闪长玢岩脉样品 CC01-4 锆石 LA-ICPMS $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图

Fig. 3 Zircon LA-ICPMS $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ concordia diagrams of samples from quartz diorite (07FS07-1, a) and diorite porphyry dyke (CC01-4, b)

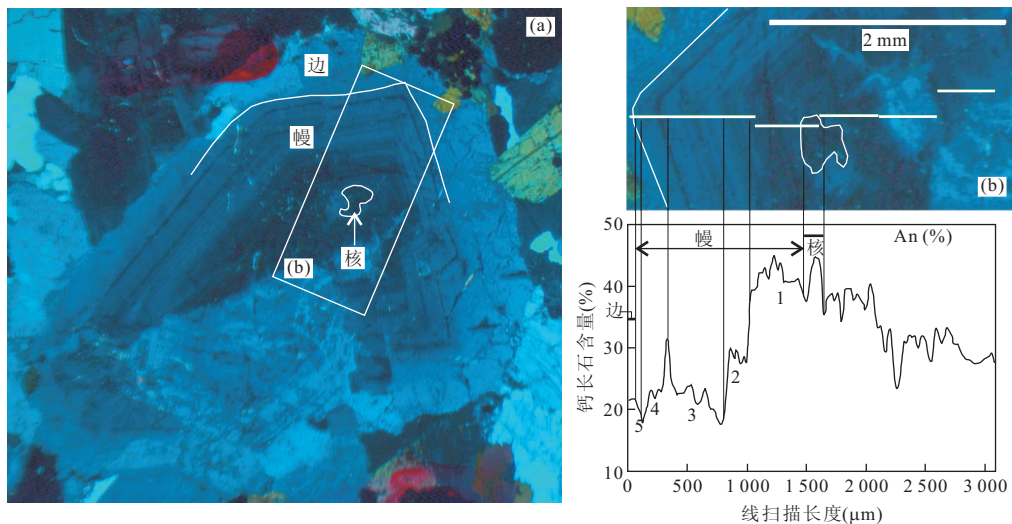


图 4 (a)过渡相花岗闪长岩 FS03-3 中斜长石复杂环带(正交光), (b)斜长石核部—幔部—边部 An 值剖面(正交光)

Fig. 4 (a) a complex zoned plagioclase grain from granodiorite sample in transitional facies (cross-polarized light), (b) section of the complex zoned plagioclase (cross-polarized light)

三幔部. 各个幔部斜长石牌号差别很大, 但是由里向外斜长石牌号整体上是减少的. 边部均一, 斜长石牌号最小.

另一个斜长石位于微粒包体与过渡相寄主岩交界处、在微粒包体中(FS03-5, 图 5), 晶体呈长柱状, 长约 2.5 mm, 宽约 1.0 mm. 斜长石由核部—幔部—边部组成, 核部较大, 发育宽窄不对称的环带, 斜长石牌号较低. 幔部可由 3 部分组成, 均以尘状环带开始, 尘状环带处斜长石牌号陡然升高, 尘状环带内部可见不同程度的熔蚀现象. 边部较窄, 斜长石牌号最小.

6 地球化学

周口店闪长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩和暗色

微粒包体前人已有一些质量可靠的地球化学数据(马昌前等, 1992; 马芳等, 2003; 蔡剑辉等, 2005), 本文重点对闪长玢岩脉、花岗闪长斑岩脉和同一微粒包体的不同部位开展了地球化学研究(表 2), 结合前人数据, 分析周口店岩体地球化学特征和岩石成因.

6.1 元素地球化学

周口店岩体中的闪长岩具有最低的 SiO_2 (49.4%)、 K_2O (1.9%) 含量和最高的 MgO (4.9%)、 CaO (7.9%)、 FeO (4.0%)、 Fe_2O_3 (6.1%) 和 Al_2O_3 (19.0%) 含量, $\text{Mg}^\#$ 为 48.1, ACNK 值为 0.8, 在 SiO_2 - $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ 图上落入二长辉长岩的范围(图 6a). 石英闪长岩和花岗闪长岩主量元素具有基本相似的特征, 但石英闪长岩 SiO_2 、 Al_2O_3 、

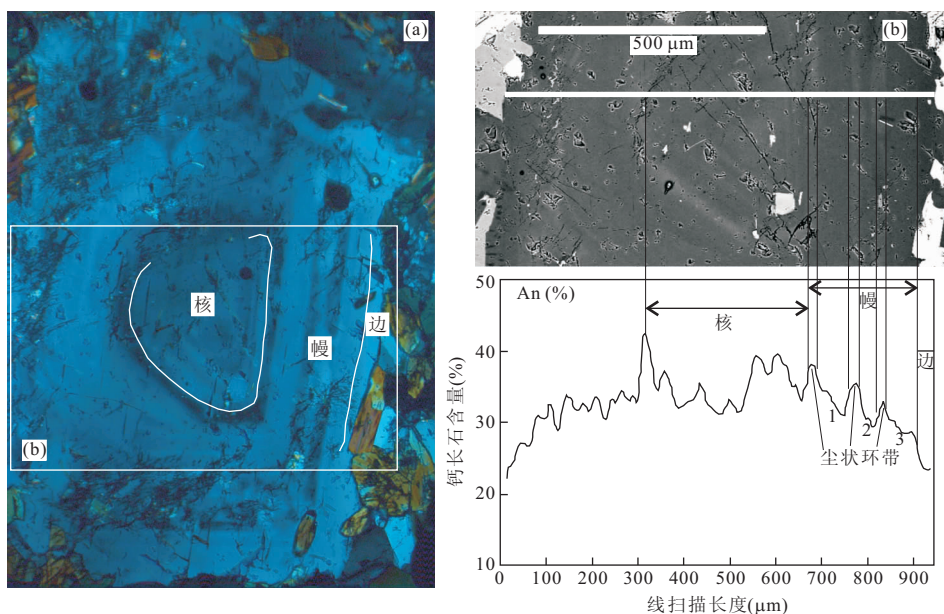


图 5 (a)过渡相花岗闪长岩中微粒包体 FS03-5 内斜长石复杂环带(正交光), (b)斜长石核部—幔部—一边部 An 值剖面(背散射)
 Fig. 5 (a) a complex zoned plagioclase grain from sample of mafic microgranular enclave in transitional granodiorite facies (cross-polarized light), (b) section of the complex zoned plagioclase (backscattered light)

K_2O 、 Na_2O 含量相对较低, MgO 、 CaO 、 FeO 、 Fe_2O_3 含量相对较高, 岩石 $Mg^\#$ 为 38.0~48.7 之间, 整体偏高, $ACNK$ 值介于 0.8~1.0, 在 $SiO_2-(K_2O+Na_2O)$ 图上, 石英闪长岩落入二长岩的范围 (图 6a), 花岗闪长岩落入石英二长岩的范围 (图 6a). 暗色微粒包体内外成分非常均一, 变化不显著, 它们整体上具有最低的 SiO_2 、 K_2O 含量和最高的 TiO_2 、 CaO 、 MgO 、 FeO 、 Fe_2O_3 含量, $Mg^\#$ 值最大, $ACNK$ 值介于 0.7~0.9, 在 $SiO_2-(K_2O+Na_2O)$ 图上落入二长闪长岩和二长岩的范围 (图 6a). 闪长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩和暗色微粒包体在 SiO_2-K_2O 图解上落入高钾钙碱性系列, 少数暗色微粒包体样品达到钾玄岩系列 (图 6b). 由微粒包体至闪长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩, 随着 SiO_2 含量的升高, 岩石 K_2O 含量线性降低, TiO_2 、 CaO 、 MgO 、 FeO 、 Fe_2O_3 、 $Mg^\#$ 和 P_2O_5 含量线性升高. 周口店岩体西缘的闪长玢岩脉 SiO_2 含量介于 55.7%~62.0% 之间, K_2O 含量介于 2.8%~3.3% 之间, CaO 含量介于 3.7%~5.7% 之间, FeO 含量介于 3.3%~5.1% 之间, MgO 含量介于 2.0%~4.3% 之间. 与闪长玢岩脉相比, 花岗闪长斑岩 SiO_2 和 K_2O 含量相对较高, CaO 、 FeO 和 MgO 含量相对较低. 花岗闪长斑岩脉和闪长玢岩脉的 $Mg^\#$ 介于 42.9~55.3 之间, 花岗闪长斑岩脉 $Mg^\#$ 较小. 岩脉 $ACNK$ 值介于 0.8~1.0 之间, 花岗闪长斑岩脉 $ACNK$ 值较高,

在 $SiO_2-(K_2O+Na_2O)$ 图上, 闪长玢岩脉落入二长岩的范围, 花岗闪长斑岩脉落入石英二长岩的范围 (图 6a), 在 SiO_2-K_2O 图解上处于高钾钙碱性系列 (图 6b).

闪长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩、暗色微粒包体、闪长玢岩脉和花岗闪长斑岩脉具有非常相似的稀土元素特征, 它们稀土元素的差别主要体现在重稀土元素方面. 总体来看, 它们的稀土元素配分曲线均呈右倾型式, 重稀土元素明显亏损, 轻稀土元素相对富集, Eu 没有异常, Yb 元素含量小于 2×10^{-6} , $(La/Yb)_N$ 比值较高 (图 7). 闪长岩稀土元素总量为 189.3×10^{-6} , δEu 约为 1.06, 轻、重稀土元素比值约为 15.7, $(La/Yb)_N$ 比值约为 19.2. 早期石英闪长岩稀土元素总量介于 $(152.4 \sim 251.4) \times 10^{-6}$ 之间, δEu 介于 0.82~0.97 之间, 轻、重稀土元素比值介于 11.0~15.0 之间, $(La/Yb)_N$ 比值约为 14.8~20.3 之间. 花岗闪长岩稀土元素总量介于 $(182.0 \sim 333.3) \times 10^{-6}$ 之间, δEu 介于 0.88~1.16 之间, 轻、重稀土元素比值介于 13.1~36.7 之间, $(La/Yb)_N$ 比值约为 18.3~106.8 之间. 微粒包体稀土元素总量介于 $(131.0 \sim 289.5) \times 10^{-6}$ 之间, δEu 介于 0.7~0.9 之间, 轻、重稀土元素比值介于 8.9~20.8 之间, $(La/Yb)_N$ 比值约介于 11.6~35.8 之间. 闪长玢岩脉稀土元素总量介于 $(244.0 \sim 304.3) \times 10^{-6}$ 之间, δEu 约在 1.0 附近变化, 轻、重稀土元素比值介

表 2 周口店岩体暗色微粒包体和中性岩脉主量(%)、微量元素(10^{-6})和 Sr-Nd 同位素测试结果

Table 2 Major, trace elements and Sr-Nd isotopic compositions of mafic microgranular enclaves and intermediate-acidic dykes within the Zhoukoudian intrusion

	CC01-2b*	CC01-2a*	FS04-2a	CC03-1	CC02-3	CC02-2	CC02-1	CC03-2	CC01-4	CC01-3
	暗色微粒包体			花岗闪长斑岩脉			闪长玢岩脉			
SiO ₂	54.87	53.86	59.52	63.67	65.39	61.43	60.20	55.73	61.91	62.01
TiO ₂	0.96	1.02	0.78	0.56	0.67	0.90	0.89	0.96	0.93	0.92
Al ₂ O ₃	16.91	16.99	15.41	16.81	15.89	16.50	17.09	16.94	16.89	16.89
Fe ₂ O ₃	2.19	2.44	1.37	1.52	1.08	1.13	1.42	1.82	1.56	1.49
FeO	5.55	5.78	4.30	2.55	2.58	3.75	4.08	5.10	3.30	3.35
MnO	0.14	0.14	0.12	0.06	0.04	0.06	0.07	0.10	0.06	0.06
MgO	4.36	4.57	4.06	1.69	1.63	2.52	2.53	4.24	2.00	1.98
CaO	5.98	5.96	4.55	3.31	2.93	4.00	4.14	5.73	3.67	3.70
Na ₂ O	4.54	4.49	3.42	4.36	4.63	4.70	4.63	4.37	4.65	4.62
K ₂ O	2.66	2.82	4.77	3.97	3.72	3.15	3.19	2.80	3.31	3.29
P ₂ O ₅	0.43	0.45	0.38	0.27	0.29	0.40	0.38	0.48	0.41	0.41
CO ₂	0.04	0.04	0.02	0.04	0.04	0.06	0.04	0.11	0.04	0.04
H ₂ O	1.07	1.12	0.93	0.75	0.68	0.95	0.90	1.14	0.83	0.80
Total	99.7	99.68	99.63	99.56	99.57	99.55	99.56	99.52	99.56	99.56
ACNK	0.80	0.80	0.81	0.96	0.94	0.9	0.92	0.82	0.94	0.94
Cr	133.00	53.20	50.30	17.60	32.70	41.80	21.80	61.20	16.00	14.00
Co	18.70	23.50	22.50	8.74	8.61	13.00	14.20	21.10	11.40	11.30
Ni	61.60	19.40	18.90	9.54	13.40	22.60	12.30	30.70	9.27	8.91
Sc	12.50	18.20	17.00	5.93	5.15	7.50	7.55	15.20	6.91	6.81
V	105.0	163.0	154.0	62.9	64.5	94.4	102.3	137.3	86.3	87.7
Ga	21.1	23.0	22.3	22.0	22.7	23.5	23.7	23.0	23.2	23.2
Rb	101.0	82.6	72.9	77.5	59.9	49.9	72.2	62.7	58.9	60.7
Sr	859	803	820	1320	1158	1581	1452	1693	1413	1438
Y	17.1	20.2	19.3	11.4	7.8	10.5	11.0	16.6	10.7	10.7
Nb	8.59	9.22	8.77	10.60	8.17	8.44	7.74	7.87	8.31	8.50
Zr	186	212	174	210	164	178	183	197	197	199
Ba	1842	1113	1106	2006	1719	1958	1944	2111	1993	2008
Hf	4.68	5.06	4.21	5.23	4.30	4.53	4.68	4.85	4.93	4.99
Ta	0.36	0.49	0.45	0.62	0.43	0.40	0.37	0.37	0.43	0.44
Pb	30.5	19.7	19.8	47.3	33	26.1	57.9	17.7	19.9	20.4
Th	10.40	8.78	8.49	9.17	5.52	3.96	3.54	5.46	4.26	4.26
U	1.32	1.26	1.08	2.18	1.19	1.35	1.06	1.45	0.94	1.02
La	66.8	65.0	65.3	59.1	48.1	55.1	56.4	66.0	58.0	57.4
Ce	124	121	118	112	95.4	106	108	132	111	111
Pr	15.2	14.8	14.5	12.9	11.7	13.4	13.5	16.7	13.5	13.7
Nd	57.9	57.1	55.5	45.6	42.7	50.5	50.6	62.5	50.3	50.9
Sm	9.02	9.27	8.99	6.55	6.37	7.60	7.65	9.36	7.50	7.53
Eu	1.87	2.01	1.97	1.86	1.77	2.17	2.21	2.60	2.11	2.15
Gd	6.23	6.82	6.63	4.40	3.94	5.02	5.26	6.35	5.02	5.15
Tb	0.72	0.81	0.78	0.50	0.43	0.56	0.57	0.73	0.55	0.57
Dy	3.67	4.15	3.99	2.35	1.74	2.45	2.63	3.53	2.47	2.5
Ho	0.63	0.76	0.73	0.42	0.29	0.40	0.43	0.63	0.41	0.41
Er	1.62	1.94	1.86	1.11	0.69	0.97	1.02	1.58	0.98	0.98
Tm	0.22	0.26	0.25	0.15	0.08	0.11	0.12	0.21	0.12	0.12
Yb	1.55	1.78	1.61	1.02	0.51	0.69	0.75	1.39	0.76	0.77
Lu	0.24	0.26	0.24	0.15	0.07	0.10	0.11	0.21	0.10	0.11
⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	0.339 0	0.297 6	0.257 4	0.169 8	0.149 7	0.091 3	0.143 7	0.107 2	0.120 5	0.122 2
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.705 767	0.705 846	0.705 872	0.705 665	0.705 729	0.705 365	0.705 426	0.705 358	0.705 675	0.705 677
2σ	4	5	5	5	5	5	4	4	5	5
I _{Sr}	0.705 141	0.705 296	0.705 396	0.705 351	0.705 452	0.705 196	0.705 16	0.705 16	0.705 452	0.705 451
¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	0.094 2	0.098 1	0.098 0	0.086 7	0.090 2	0.091	0.091 4	0.090 5	0.090 1	0.089 5
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	0.511 820	0.511 803	0.511 694	0.511 714	0.511 624	0.511 598	0.511 552	0.511 654	0.511 554	0.511 55
2σ	4	6	3	5	2	4	2	4	2	6
T _{2DM}	2.1	2.2	2.3	2.3	2.4	2.5	2.5	2.4	2.5	2.5
ε _{Nd} (t)	-14.3	-14.7	-16.8	-16.2	-18	-18.5	-19.4	-17.4	-19.4	-19.5

* a 表示样品取自微粒包体外部, b 表示取自微粒包体内部。

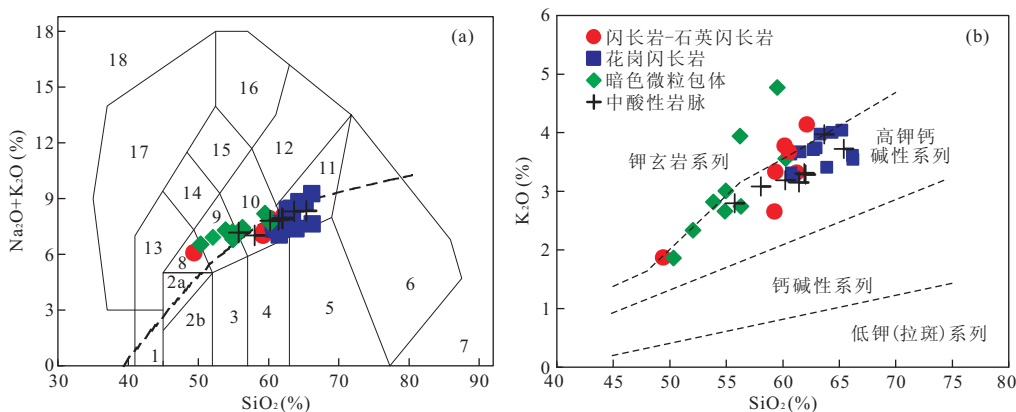


图 6 (a)周口店岩体各种岩石 SiO₂-(K₂O+Na₂O)图解(Middlemost, 1994)和(b)SiO₂-K₂O图解(实线据 Peccerillo and Taylor (1976), 虚线据 Middlemost (1985))

Fig. 6 (a) SiO₂-(K₂O+Na₂O) (Middlemost, 1994) and (b) SiO₂-K₂O (Peccerillo and Taylor, 1976; Middlemost, 1985) diagrams of all kinds of rocks from the Zhoukoudian intrusion

1. 橄榄辉长岩; 2a. 碱性辉长岩; 2b. 亚碱性辉长岩; 3. 辉长闪长岩; 4. 闪长岩; 5. 花岗闪长岩; 6. 花岗岩; 7. 石英岩; 8. 二长辉长岩; 9. 二长闪长岩; 10. 二长岩; 11. 石英二长岩; 12. 正长岩; 13. 副长石辉长岩; 14. 副长石二长闪长岩; 15. 副长石二长正长岩; 16. 副长正长岩; 17. 副长深成岩; 18. 霓方钠岩/磷霞岩/粗白榴岩

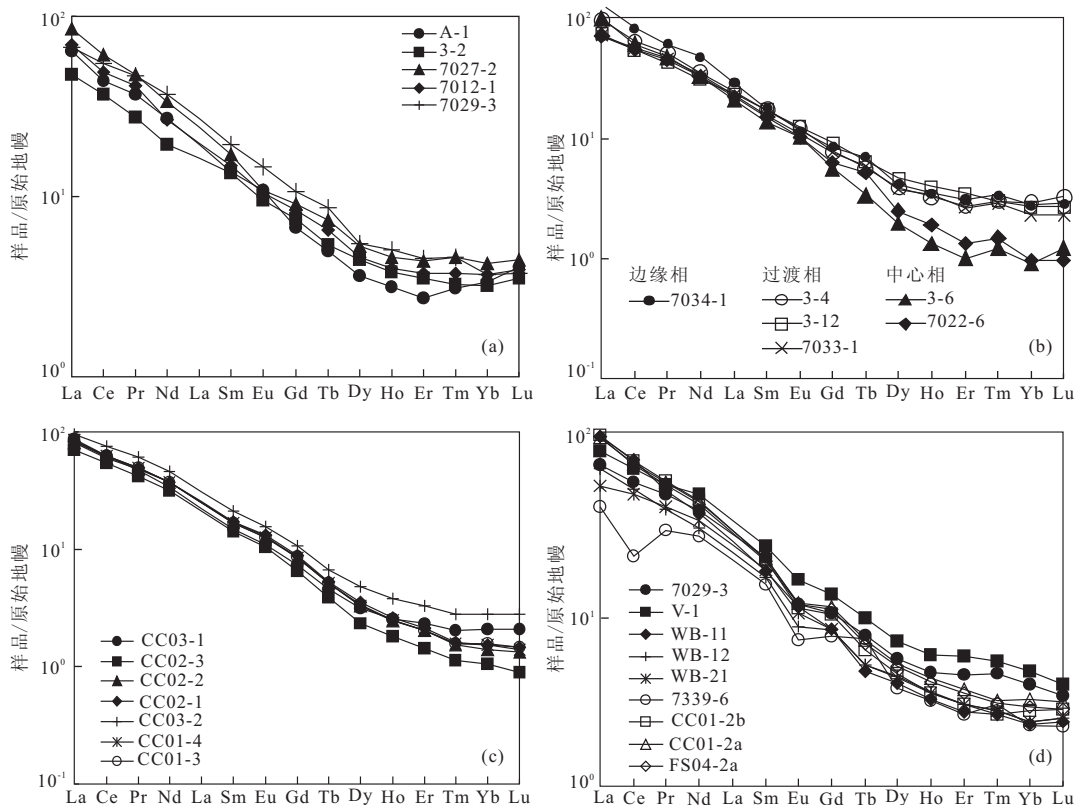


图 7 周口店岩体早期闪长岩-石英闪长岩(a)、晚期花岗闪长岩(b)、中酸性岩脉(c)和暗色微粒包体(d)稀土元素原始地幔标准化配分图(标准化值见 Wood et al. (1979, 1981))

Fig. 7 Primitive mantle normalized REE patterns of diorite-quartz diorite (a), granodiorite (b), intermediate-acidic dykes (c) and mafic microgranular enclaves (d) from the Zhoukoudian intrusion

于 18.0~23.3 之间, (La/Yb)_N 比值约介于 28.9~57.6 之间. 花岗闪长斑岩脉稀土元素总量介于

(231.7~247.7) × 10⁻⁶ 之间, δEu 约在 1.0 附近变化, 轻、重稀土元素比值介于 23.5~26.6 之间,

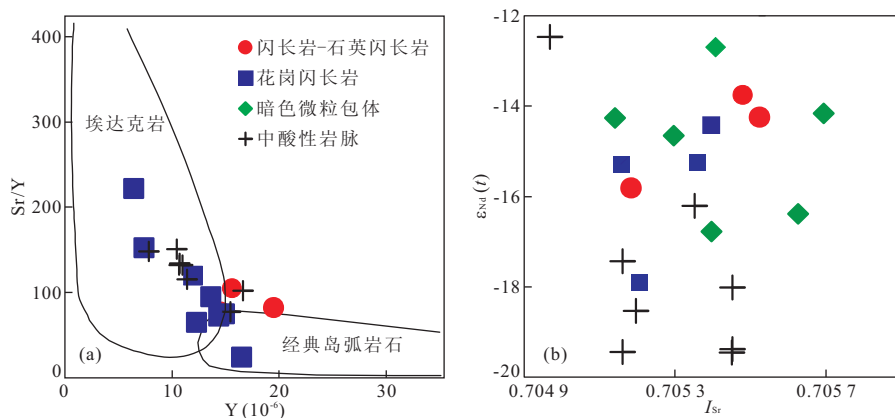


图 8 周口店岩体各类岩石 Sr/Y-Y 图解(a)和 Sr 同位素初始比值与 $\epsilon_{\text{Nd}}(130 \text{ Ma})$ 图解(b)

Fig. 8 Sr/Y-Y diagram (a) and initial Sr isotopic ratios (I_{Sr}) vs. epsilon Nd ($\epsilon_{\text{Nd}}(t)$) values diagram (b) of all kinds of rocks from the Zhoukoudian intrusion

$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 比值约介于 41.5~67.1 之间。

闪长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩、暗色微粒包体、闪长玢岩脉、花岗闪长斑岩脉微量元素变化特征基本一致,总体上, Ta、Nb、P 和 Ti 元素强烈亏损, Ba、K、Sr、La、Sm 较为富集, Sr/Y 比值很高(图 8a), 闪长岩为 82.0, 石英闪长岩为 76.6~105.1(仅一个样品为 24.2), 花岗闪长岩为 65.0~221.9, 闪长玢岩脉为 77.4~151.0, 花岗闪长斑岩脉为 115.7~148.3。

6.2 Sr-Nd 同位素地球化学

闪长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩和暗色微粒包体具有相似的 Sr-Nd 同位素特征, 它们的 Sr 同位素初始比值(I_{Sr})变化在 0.705 155~0.705 524 之间, $\epsilon_{\text{Nd}}(130 \text{ Ma})$ 变化在 -17.9~-13.8 之间, $T_{2\text{DM}}$ 在 2.1~2.4 Ga 之间。花岗闪长斑岩脉、闪长玢岩脉 Sr-Nd 同位素特征整体非常相似, 样品 Sr 同位素初始比值(I_{Sr})变化在 0.705 160~0.705 452 之间, $\epsilon_{\text{Nd}}(130 \text{ Ma})$ 变化在 -16.2~-19.5 之间, $T_{2\text{DM}}$ 在 2.3~2.6 Ga 之间。与周口店主岩体的 Sr-Nd 同位素特征相比, 岩脉 $\epsilon_{\text{Nd}}(130 \text{ Ma})$ 值变小(图 8b)。

7 讨论

7.1 分离结晶与同化混染

花岗岩浆是否发生相分离的结晶作用是一个非常具有争议的科学问题, 赞成者多依据哈克图解, 反对者基于花岗岩浆粘度大、密度与其中所含主要矿物密度相当、缺乏有力的野外证据而认为很难发生(如张旗等, 2008)。在周口店岩体中, 花岗闪长岩的相带

变化是以晶体沉降为主的分离结晶作用形成, 还是岩浆对流作用下热扩散效应的结果一直存在争论(马昌前, 1988)。尽管花岗闪长岩由边缘相、过渡相至中心相 SiO_2 含量增加, 但主要矿物的化学成分特征基本保持不变; 岩体中不仅缺少矿物堆晶体, 而且缺少高 Rb 低 Sr 的强分异酸性岩浆; 迎峰坡下多处花岗闪长岩中可见不同尺度的环状流动构造, 这是岩浆对流的有力证据。上述特征表明, 由于哈克图解上相关关系的解释只有紧密联系地质特征才能得出合理的答案(Cortés, 2009), 尽管周口店花岗闪长岩在哈克图解上 SiO_2 与 MgO 、 CaO 和 FeO 线性反相关, 与 K_2O 和 Na_2O 线性正相关, 考虑到花岗岩浆粘度较大, 温度较低, 主要矿物密度与熔体密度相当, 因此这种相关性不应该与以晶体沉降为主的分离结晶作用相联系, 在岩浆对流作用下元素扩散效应能更好地解释这些现象, 在该机制下, Mg、Ca、Ti、Mn、Fe 及与之有亲缘关系的元素整体上向外迁移, 而 Si、Na、K 向内迁移, 马昌前(1988)在考虑晶体半径、重力加速度、屈服强度、晶体与熔体间密度差等因素的基础上, 从岩浆动力学角度对该模型作过深入的讨论, 证实了该模型的合理性。花岗闪长岩的内部相带和成分差异是岩浆对流作用下热扩散效应的结果, 花岗闪长岩整体成分仍然主要受源区控制。

周口店侵入体中的捕虏体位于岩体南部及北部边缘相, 形态以棱角状为主, 与寄主岩之间有明显的界线, 占包体总量的 4%。岩体与围岩之间热接触变质岩发育, 岩浆与围岩以热交换为主, 本次研究也未发现属于围岩同化混染成因的斜长石, 证实大规模围岩同化混染对岩浆成分影响的可能性较小。然而, 部分捕虏体被认为与寄主岩存在物质交换(陶继东

等, 2009); 本次及前人研究在石英闪长岩中发现的继承锆石只能由围岩同化混染来解释(Sun *et al.*, 2010). 因此, 围岩同化混染对岩浆的成分有一定的影响.

7.2 岩浆混合过程

周口店岩体中广泛分布着闪长质暗色微粒包体. 对暗色微粒包体常规的野外观察(Gagnevin *et al.*, 2008)、微观不平衡结构的识别(Anderson, 1983; Vernon, 1990)、矿物(Carlier and Lorand, 2008)和全岩化学成分(马昌前等, 1992)分析, 以及矿物结构定量分析(Perugini *et al.*, 2003)、矿物微区成分和同位素分析(Morgan *et al.*, 2007)和多学科(如分形理论; Perugini *et al.*, 2005)综合研究表明, 出露于钙碱性花岗岩中的暗色微粒包体主要有 5 种成因: (1) 基性岩浆与酸性岩浆混合作用(Vernon, 1990); (2) 岩浆早期结晶(Dodge and Kistler, 1990; Dahlquist, 2002); (3) 岩浆源区岩石(Chappell *et al.*, 1987); (4) 捕虏岩改造(张德全, 1981; Holden *et al.*, 1987); (5) 液态不混熔(王德滋等, 1992), 其中基性岩浆与酸性岩浆混合成因被大多数学者所接受(王德滋和谢磊, 2008). 基性岩浆与酸性岩浆混合时, 完全或不完全混合取决于两种岩浆达到热平衡后的物理性质和两者之间的比例(Sparks and Marshall, 1986; Leshner, 1990), 完全混合仅仅发生于热平衡后两种岩浆呈液相或大量酸性岩浆与演化的基性岩浆之间, 多数情况下发生不完全混合作用, 在酸性岩体中形成暗色微粒包体(Sparks and Marshall, 1986), 这些微粒包体与其寄主岩仅仅在围绕包体周缘的范围内达到部分或完全的成分平衡(Allen, 1991).

在周口店复式侵入体中, 暗色微粒包体的形态、大小、数量、反向脉、矿物含量与成分、斜长石各种复杂环带样式和各类环带包体、岩墙状包体群说明暗色微粒包体是幔源基性岩浆与酸性岩浆发生不均一的机械混合作用的结果. 暗色微粒包体是二长闪长质至二长质岩石, 与石英闪长岩、花岗闪长岩、中酸性岩脉相比, 具有最低的 SiO_2 、 K_2O 、 ACNK 值和最高的 TiO_2 、 CaO 、 MgO 、 FeO 、 Fe_2O_3 、 $\text{Mg}^\#$ 值, 在稀土元素、微量元素、Sr-Nd 同位素特征上, 除 Eu、Ni、Y 和 Ba 等微量元素存在差别外, 微粒包体与石英闪长岩和花岗闪长岩非常相似; 花岗闪长岩和暗色微粒包体中锆石原位 Hf 同位素和磷灰石原位 Nd 同位素很不均一(孙金凤等, 2008; Sun *et al.*, 2010), 这些成分特征进一步说明暗色微粒包体是基

性岩浆与酸性岩浆在围绕包体周缘的局部范围内发生不均一机械混合作用的结果.

由于岩浆混合作用, 使得由微粒包体来恢复幔源基性岩浆变得非常困难, 深成岩浆保存早期造岩矿物结构的能力远不如火山熔岩, 因此研究岩浆混合作用的过程就非常困难. 周口店岩体中的斜长石保留有复杂的环带样式, 通过斜长石环带记录的信息, 反演岩浆混合过程是一种可能的途径.

斜长石环带常见的主要有正常环带、反环带、韵律环带, 少见尘状环带、补丁状环带. 在体系总组分没有改变的前提下, 斜长石反环带可以在以下 3 种情况下形成: (1) 岩浆迅速冷却, 形成加速减小的过冷条件; (2) 岩浆体系水压增大; (3) 在干体系中, 压力降低, 在火山岩中多见. 反环带斜长石外围易观察到熔蚀现象. 斜长石正常环带可由以下 3 种情况下形成: (1) 岩浆逐渐持续快速冷却, 形成匀速减小的过冷条件, 在浅成岩和喷出岩的斜长石中多见; (2) 岩浆体系水压减小; (3) 在干体系中, 压力升高. 斜长石韵律环带最易在水压反复变化的情况下形成. 当体系总组分改变时(如基性岩浆注入酸性岩浆房发生岩浆混合作用或岩浆与围岩发生同化混染作用), 在岩浆混合作用下, 当富钙相斜长石处于贫钙熔体中时, 富钙相斜长石不会变化, 当富钠相斜长石处于富钙熔体中时, 富钠相斜长石一般会被熔蚀, 并与富钙相熔体反应形成富钙的尘状环带(Tsuchiyama, 1985), 在同化混染作用下, 岩浆与围岩反应会形成富钙岩浆, 富钙岩浆与斜长石相互作用一般会形成蜂窝状和骸骨状斜长石结构(Castro, 2001).

通过与实验岩石学(Tsuchiyama, 1985)和岩石学模拟(Loomis, 1982)成果的对证, 周口店岩体中斜长石复杂环带样式在总体系组成不变的条件下形成已经很难成立, 考虑幔源基性岩浆周期性注入花岗岩浆房, 并发生岩浆混合作用来解释斜长石复杂环带样式是可行的. 覃锋等(2006)对周口店岩体中斜长石环带的研究也支持这一观点, 并认为根据斜长石晶体中尘状环带的数量可判断周期性注入基性岩浆的次数, 因此揭示斜长石幔部形成机制是认识岩浆混合过程的关键. 本次研究中, 花岗闪长岩中的斜长石(FS03-3, 图 4)核部牌号最高, 较完整的幔部由内向外由反环带和正环带组成, 微粒包体中的斜长石(FS03-5, 图 5)核部牌号较低, 幔部以尘状环带斜长石开始, 然后演变为正环带. 岩浆混合作用发生时, 富钙斜长石处于过热体系下, 在迅速冷却形成加速减小的过冷条件下形成反环带, 随后在逐渐

持续快速冷却形成匀速减小的过冷条件下形成正常环带(FS03-3,图 4);富钠斜长石易于熔蚀并形成尘状环带,混合作用影响结束后,在逐渐持续快速冷却形成匀速减小的条件下形成正常环带(如 FS03-5,图 5).岩浆混合作用发生时,如果斜长石体系组成发生变化一次就代表一次幔源基性岩浆注入的话,那么至少有 5 次幔源基性岩浆的注入.

值得说明的是:(1)与实验岩石学、岩石学模拟、典型的岩浆混合作用实例(Janoušek *et al.*, 2004)比较,周口店复式侵入体斜长石牌号偏低,越向晚期,混合作用形成的尘状环带斜长石牌号越低.与中国东部早白垩世幔源基性岩石(Fan *et al.*, 2005)对比后,认为这可能是幔源基性岩浆中斜长石牌号低导致的,而且晚期的混合作用可能是在酸性岩浆与演化的基性岩浆之间发生的.(2)周口店石英闪长岩和花岗闪长岩形成的时间间隔极短,说明幔源基性岩浆周期性注入和岩浆混合作用发生的时间尺度是很短的,这与现代火山岩研究成果一致(Izbekov *et al.*, 2002).(3)暗色微粒包体分布说明,周口店各种类型岩石形成过程中都存在幔源基性岩浆的注入作用,只是在过渡相花岗闪长岩中幔源岩浆周期性注入作用最为明显,也说明该时期幔源岩浆的活动达到高潮.(4)由于基性岩浆与酸性岩浆粘度差较大(吴福元等, 2007; 张旗等, 2008),岩体中微粒包体的数量有限(陶继东等, 2009),微粒包体和邻近寄主岩中残留有宏观或微观不平衡结构,这些都证实暗色微粒包体是基性岩浆与酸性岩浆在围绕包体周缘的局部范围内发生不均一机械混合作用的结果.微粒包体集中分布于过渡相花岗闪长岩中,岩浆混合的规模和程度都受到限制,远离微粒包体的花岗闪长岩的成分受岩浆混合作用的影响微弱,可以用来限定岩浆的来源.

7.3 岩浆源区探讨

周口店岩体各类岩石形成于早白垩世,具有埃达克质岩的地球化学特征.目前关于埃达克质岩的成因模式主要有以下 4 种:加厚(拆沉)下地壳的部分熔融(张旗等, 2001a, 2001b; Gao *et al.*, 2004; Xu *et al.*, 2006)、俯冲(残留)洋壳部分熔融(汪洋等, 2004)、分离结晶作用(钱青等, 2002; Macpherson *et al.*, 2006)、岩浆混合作用(Chen *et al.*, 2003; 陈斌等, 2006; Streck *et al.*, 2007),其中加厚下地壳部分熔融的成因模式已被大多数人所熟悉.由于周口店岩体各类岩石 Sr-Nd 同位素具有与 I 类富集地幔相似的特征, Mg[#] 和地幔相容元素(如

Ni)较低(图 9a),其成因与俯冲(残留)洋壳或拆沉下地壳部分熔融关系不大.如前所述,周口店石英闪长岩与花岗闪长岩、花岗闪长岩与中酸性岩脉之间的侵入接触关系明显,系由 3 次部分熔融作用形成,其中花岗闪长岩的内部相带由元素热扩散所致,岩浆混合仅仅在围绕微粒包体的周缘达到局部平衡,围岩同化混染的作用也有限,因此三个期次岩石的成分不可能完全由分离结晶作用、岩浆混合作用或围岩同化混染作用控制,加厚下地壳环境下,基性岩石的部分熔融形成周口店石英闪长岩—花岗闪长岩和中酸性岩脉的模型更为合理.

在加厚下地壳部分熔融成因模式中,对于源岩、残留相矿物组合、熔融的温压条件等方面的认识还存在分歧,如:张旗等(2001a, 2001b)认为它们是镁铁质岩石在高压下部分熔融形成的,残留相矿物含石榴石,源区深度至少大于 50 km; Ge *et al.* (2002)认为其源自玄武质下地壳物质部分熔融,残留相矿物组合为角闪石、石榴石和斜长石,形成深度为 30~45 km; Xiong *et al.* (2006)认为这些岩石产生在大约 50 km 以上,残留相矿物组合中包括金红石.在周口店岩体中,如下事实不容忽视:

(1)周口店岩体各类岩石重稀土元素 Er、Tm、Yb、Lu 在稀土元素配分曲线上表现很不相同,部分样品的稀土元素配分曲线上在 Er 元素处呈明显的拐点,使得配分曲线在元素 Er、Tm、Yb、Lu 处呈左倾的型式,如早期石英闪长岩样品 A-1(图 7a).用元素对 $(Er/Lu)_N$ 衡量这种变化,若 $(Er/Lu)_N$ 约等于 1,这 4 个元素的配分曲线呈平坦的型式,若 $(Er/Lu)_N$ 小于 1,这 4 个元素的配分曲线呈左倾的型式,若 $(Er/Lu)_N$ 大于 1,这 4 个元素的配分曲线呈右倾的型式.周口店岩体各类岩石 $(Er/Lu)_N$ 变化于 0.7~1.6 之间,由石英闪长岩—花岗闪长岩至中酸性岩脉, $(Er/Lu)_N$ 值整体上呈现由小变大的趋势(图 9b).

(2)周口店岩体各类岩石 Nb、Ta 及 Nb/Ta 比值差别明显,由石英闪长岩—花岗闪长岩至中酸性岩脉, Nb 与 Ta 含量降低, Nb/Ta 比值升高(图 9b).

(3)石英闪长岩—花岗闪长岩与中酸性岩脉具有明显不同的 Sr-Nd 同位素特征,中酸性岩脉的 Sr-Nd 同位素表现更为富集的特征,表明石英闪长岩—花岗闪长岩与中酸性岩脉来自不同的源区.

与玄武岩不同,花岗岩的地球化学特征主要反映其源区的性质(Pearce *et al.*, 1984; Forster

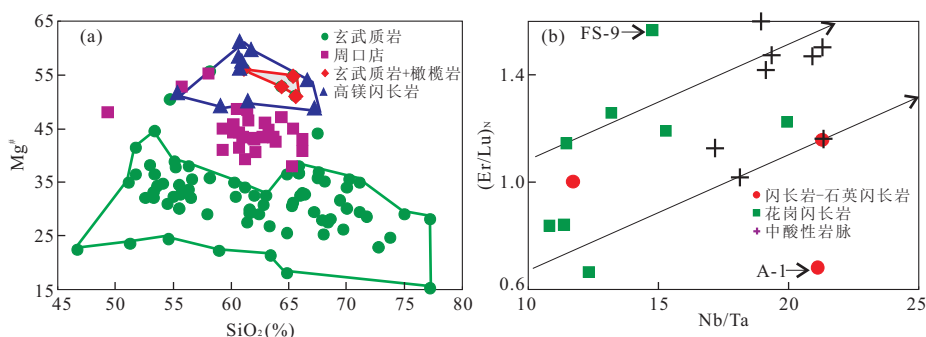


图 9 (a) 周口店岩体各类岩石与实验岩石学结果、中国东部早白垩世高镁闪长岩 SiO₂-Mg[#] 图解, (b) 周口店岩体各类岩石 (Er/Lu)_N-Nb/Ta 图解

Fig. 9 (a) SiO₂-Mg[#] diagram of quartz diorites, granodiorites and intermediate-acidic dykes from the Zhoukoudian intrusion, (b) (Er/Lu)_N-Nb/Ta diagram of quartz diorites, granodiorites and intermediate-acidic dykes from the Zhoukoudian intrusion

a. 玄武质岩: 玄武质岩石熔融实验的熔体(Rushmer, 1991; Sen and Dunn, 1994; Rapp and Watson, 1995); 周口店: 周口店岩体各类岩石; 玄武质岩+橄榄岩: 玄武质岩石与橄榄岩熔融实验的熔体(Rapp *et al.*, 1999); 高镁闪长岩: 中国东部高镁闪长岩(许文良等, 2006); b. 由石英闪长岩—花岗闪长岩至中酸性岩脉, (Er/Lu)_N 值和 Nb/Ta 比值升高

et al., 1997). 上述 3 方面的差别说明, 虽然整体上周口店岩体各类岩石由加厚下地壳部分熔融形成, 但是各类岩石的源区仍存在一定的差别。

重稀土元素含量的差别与残留相矿物组合的差别有关. 实验岩石学证明, 重稀土元素 Yb 和 Lu 在石榴石中的分配系数最大, Dy、Ho、Er 在角闪石中的分配系数最大(干国樑, 1993), 当源区残留相出现石榴石时, 熔体具有倾斜的 HREE 配分模式, (Er/Lu)_N 比值较大, 且大于 1, 源区压力下限为 1.0 GPa, 压力范围约为 1.8~2.6 GPa(张旗等, 2001a). 当角闪石为主要源区残留相时, 形成的熔体具有较为平坦甚至左倾的 HREE 配分模式, (Er/Lu)_N 小于或者等于 1, 形成的压力约在 0.9~1.3 GPa 之间(Ge *et al.*, 2002). 周口店岩体各类岩石重稀土元素的差别说明, 从早到晚, 由石英闪长岩—花岗闪长岩至中酸性岩脉, 岩浆源区主要残留相矿物由角闪石+石榴石变化为石榴石, 岩浆源区变深。

由于金红石对中酸性岩浆 Nb 和 Ta 元素的分配系数远远大于金云母和角闪石, Nb 和 Ta 元素异常应由金红石控制, 实验限定金红石仅仅在压力为 1.5 GPa 以上才能稳定. 除压力外, 当温度大于 1050 °C 时, D_{Nb}/D_{Ta} 小于 0.6~0.7, 表明在相对贫 H₂O 的高温熔融条件下, 熔体的 Nb/Ta 将被抬高(Xiong *et al.*, 2006; 赵振华等, 2008). 实验岩石学证实残留相出现金红石比石榴石需要更高的压力. 周口店岩体各类岩石 Nb/Ta 比值的差别说明, 中酸性岩脉的岩浆源区残留相矿物组合中出现金红

石, 进一步印证了中酸性岩脉的岩浆源区比早期石英闪长岩和花岗闪长岩更深. 需要说明的是, 周口店岩体各类岩石 Nb-Ta 的亏损与源岩 Nb-Ta 亏损有关, Nb/Ta 比值的变化与源区深度变化有关。

8 结论

(1) 周口店岩体形成于燕山晚期, 由 3 次侵入的不同类型岩石组成, 第一次闪长岩、石英闪长岩, 第二次花岗闪长岩, 第三次闪长玢岩脉和花岗闪长斑岩脉, 花岗闪长岩中暗色微粒包体发育. 本次测得石英闪长岩锆石 U-Pb 年龄为 131.6±2.1 Ma, 闪长玢岩锆石 U-Pb 年龄为 128.1±1.4 Ma.

(2) 斜长石复杂环带能谱线扫描表明存在多期基性岩浆的注入作用. 结合暗色微粒包体的形态、大小、数量、反向脉、矿物含量统计、矿物成分、地球化学和各类环带包体、岩墙状包体群等特征, 说明暗色微粒包体是在花岗闪长岩浆冷凝过程的不同阶段, 多期幔源基性岩浆注入并与酸性岩浆在围绕包体周缘的局部范围内发生不均一机械混合作用的结果。

(3) 周口店岩体内各类岩石体现埃达克质岩的地球化学特征, 形成于加厚下地壳环境, 主要受部分熔融作用控制, 由石英闪长岩—花岗闪长岩至中酸性岩脉, 岩石源区残留相矿物组合由角闪石+石榴石向石榴石+金红石变化, 岩浆源区不断变深。

致谢: 湖北岩矿测试中心和地质过程与矿产资源国家重点实验室的老师们对样品测试给予了大力支持, 在此表示感谢。

References

- Allen, C. M., 1991. Local Equilibrium of Mafic Enclaves and Granitoids of the Turtle Pluton, Southeast California: Mineral, Chemical, and Isotopic Evidence. *American Mineralogist*, 76, 574–588.
- Anderson, A. T., 1983. Oscillatory Zoning of Plagioclase: Nomarski Interference Contrast Microscopy of Etched Polished Sections. *American Mineralogist*, 68 (1–2): 125–129.
- Cai, J. H., Yang, G. H., Mou, 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).
- Carlier, G., Lorand, J. P., 2008. Zr-Rich Accessory Minerals (Titanite, Perrierite, Zirconolite, Baddeleyite) Record Strong Oxidation Associated with Magma Mixing in the South Peruvian Potassic Province. *Lithos*, 104: 54–70. doi: 10.1016/j.lithos.2007.11.008
- Castro, A., 2001. Plagioclase Morphologies in Assimilation Experiments. Implications for Disequilibrium Melting in the Generation of Granodiorite Rocks. *Mineralogy and Petrology*, 71 (1–2): 31–49. doi: 10.1007/s007100170044
- Chappell, B. W., White, A. J. R., Wyborn, D., 1987. The Importance of Residual Source Material (Restite) in Granite Petrogenesis. *Journal of Petrology*, 28: 1111–1138. doi: 10.1093/petrology/28.6.1111
- Chen, B., Liu, C. Q., Tian, W., 2006. Magma-Mixing between Mantle- and Crustal-Derived Melts in the Process of Mesozoic Magmatism, Taihangshan: Constraints from Petrology and Geochemistry. *Earth Science Frontiers*, 13(2): 140–147 (in Chinese with English abstract).
- Chen, B., Zhai, M. G., Shao, J. A., 2003. Petrogenesis and Significance of the Mesozoic North Taihang Complex: Major and Trace Element Evidence. *Science in China (Seri. D)*, 46(9): 941–953.
- Cortés, J. A., 2009. On the Harker Variation Diagrams; A Comment on “the Statistical Analysis of Compositional Data. Where Are We and Where Should We Be Heading?” by Aitchison and Egozcue (2005). *Mathematical Geosciences*, 41(7), 817–828. doi: 10.1007/s11004-009-9222-8
- Dahlquist, J. A., 2002. Mafic Microgranular Enclaves: Early Segregation from Metaluminous Magma (Sierra de Chepes), Pampean Ranges, NW Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 15: 643–655. doi: 10.1016/S0895-9811(02)00112-8
- Deng, J. F., 1978. Thermodynamic Calculations for Metamorphic Reactions Involved in the Formation of Sillimanite-Hornfels. *Geochimica*, 3: 234–241 (in Chinese with English abstract).
- Dodge, F. C. W., Kistler, R. W., 1990. Some Additional Observations on Inclusions in the Granitic Rocks of the Sierra Nevada. *Journal of Geophysical Research*, 95: 17841–17848.
- Fan, Q. C., Zhang, H. F., Sui, J. L., et al., 2005. Magma Underplating and Hannuoba Present Crust-Mantle Transitional Zone Composition: Xenolith Petrological and Geochemical Evidence. *Science in China (Seri. D)*, 48(8): 1089–1105.
- Forster, H. J., Tischendorf, G., Trumbull, R. B., 1997. An Evaluation of the Rb vs. (Y+Nb) Discrimination Diagram to Infer Tectonic Setting of Silicic Igneous Rocks. *Lithos*, 40: 261–293. doi: 10.1016/S0024-4937(97)00032-7
- Gagnevin, D., Daly, J. S., Poli, G., 2008. Insights into Granite Petrogenesis from Quantitative Assessment of the Field Distribution of Enclaves, Xenoliths and K-Feldspar Megacrysts in the Monte Capanne Pluton, Italy. *Mineralogical Magazine*, 72 (4): 925–940. doi: 10.1180/minmag.2008.072.4.925
- Gan, G. L., 1993. Mineral-Melt Element Partition Coefficients: Data and Major Variation Regularities. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 12(2): 144–181 (in Chinese with English abstract).
- Gao, S., Rudnick, R. L., Yuan, H. L., et al., 2004. Recycling Lower Continental Crust in the North China Craton. *Nature*, 432: 892–897. doi: 10.1038/nature03162
- Ge, X. Y., Li, X. H., Chen, Z. G., et al., 2002. Geochemistry and Petrogenesis of Jurassic High Sr Low Y Granitoids in Eastern China: Constrains on Crustal Thickness. *Chinese Science Bulletin*, 47(11): 962–968.
- He, Z. L., 1935. The Granitic Intrusion from the Western Mountain. The State-Run Central Academia Cluster Publishes, Beijing, 5 (in Chinese).
- Holden, P., Halliday, A. N., Stephes, W. E., 1987. Neodymium and Strontium Isotope Content of Microdiorite Enclaves Points to Mantle Input to Granitoid Production. *Nature*, 330(5): 53–56. doi: 10.1038/330053a0
- Huang, F. S., Jiang, C. Y., 1985. Geological Geochemical Characteristics of Fang Shan Intrusion and Origin Research. *Journal of Chang'an University Earth Science Edition*, 7 (3): 9–29 (in Chinese with English abstract).

- Izbekov, P. E., Eichelberger, J. C., Patino, L. C., et al., 2002. Calcic Cores of Plagioclase Phenocrysts in Andesite from Karymsky Volcano: Evidence for Rapid Introduction by Basaltic Replenishment. *Geology*, 30(9): 799–802. doi:10.1130/0091-7613(2002)030<0799:CCOPPI>2.0.CO;2
- Janoušek, V., Braithwaite, C. J. R., Bowes, D. R., 2004. Magma-Mixing in the Genesis of Hercynian Calc-alkaline Granitoids: An Integrated Petrographic and Geochemical Study of the Sázava Intrusion, Central Bohemian Pluton, Czech Republic. *Lithos*, 78: 67–99. doi:10.1016/j.lithos.2004.04.046
- Leshner, C. E., 1990. Decoupling of Chemical and Isotopic Exchange during Magma Mixing. *Nature*, 344(15), 235–237. doi:10.1038/344235a0
- Liu, B., Ba, J., Zhang, L., et al., 2008. Zircon LA-ICP-MS U-Pb Dating of Metamorphism and Anatexis of the Guandi Complex, Zhoukoudian Area, Beijing. *Geological Science and Technology Information*, 27(6): 37–42 (in Chinese with English abstract).
- Liu, G. H., Wu, J. S., 1987. Metamorphic Zones of the Fangshan Area in Beijing. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 16: 113–137 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. S., Gao, S., Hu, Z. C., et al., 2010. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons of Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51: 537–571. doi:10.1093/petrology/egp082
- Liu, Y. S., Zong, K. Q., Kelemen, P. B., et al., 2008. Geochemistry and Magmatic History of Eclogites and Ultramafic Rocks from the Chinese Continental Scientific Drill Hole: Subduction and Ultrahigh-Pressure Metamorphism of Lower Crustal Cumulates. *Chemical Geology*, 247: 133–153. doi:10.1016/j.chemgeo.2007.10.016
- Loomis, T. P., 1982. Numerical Simulations of Crystallization Processes of Plagioclase in Complex Melts: The Origin of Major and Oscillatory Zoning in Plagioclase. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 81: 219–229. doi:10.1007/BF00371299
- Ma, C. Q., 1988. The Magma-Dynamic Mechanism of Emplacement and Compositional Zonation of the Zhoukoudian Stock, Beijing. *Acta Geological Sinica*, 62(4): 329–341 (in Chinese with English abstract).
- Ma, C. Q., Ming, H. L., Yang, K. G., 2004. An Ordovician Magmatic Arc at the Northern Foot of Dabie Mountains: Evidence from Geochronology and Geochemistry of Intrusive Rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 393–402 (in Chinese with English abstract).
- Ma, C. Q., Wang, R. J., 1990. The Characteristic Features and Origin of K-Feldspar Megacrysts in the Zhoukoudian Pluton, Beijing. *Acta Mineralogica Sinica*, 10(4): 323–331 (in Chinese with English abstract).
- Ma, C. Q., Wang, R. J., Qiu, 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 (in Chinese with English abstract).
- Ma, C. Q., Wang, R. J., Yang, K. G., 1996. Magmatic Thermodynamic Structures of the Zhoukoudian Granodioritic Intrusion in the Western Hills of Beijing, Field Trip Guide of 30th International Geological Congress. Geological Publishing House, Beijing, 1–14.
- Ma, F., Mu, Z. G., Liu, Y. L., 2003. Fangshan Intrusion, Beijing: Constraints from Trace and Rare Earth Elements As Well As Sr-Isotope Composition. *Acta Geoscientia Sinica*, 24(2): 105–110 (in Chinese with English abstract).
- Macpherson, C. G., Dreher, S. T., Thirlwall, M. F., 2006. Adakites without Slab Melting: High Pressure Differentiation of Island Arc Magma, Mindanao, the Philippines. *Earth and Planetary Science Letters*, 243(3–4): 581–593. doi:10.1016/j.epsl.2005.12.034
- Middlemost, E. A. K., 1985. Magmas and Magmatic Rocks: An Introduction to Igneous Petrology. Longman, London.
- Middlemost, E. A. K., 1994. Naming Materials in the Magma/Igneous Rock System. *Earth Science Reviews*, 37: 215–224. doi:10.1016/0012-8252(94)90029-9
- Morgan, D. J., Jerram, D. A., Chertkoff, D. G., et al., 2007. Combining CSD and Isotopic Microanalysis: Magma Supply and Mixing Processes at Stromboli Volcano, Aeolian Islands, Italy. *Earth and Planetary Science Letters*, 260: 419–431. doi:10.1016/j.epsl.2007.05.037
- Pearce, J. A., Harris, B. W., Tindle, A. G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956–983. doi:10.1093/petrology/25.4.956
- Peccerillo, A., Taylor, S. R., 1976. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58: 63–81. doi:10.1007/BF00384745
- Perugini, D., Poli, G., Christofides, G., et al., 2003. Magma Mixing in the Sithonia Plutonic Complex, Greece: Evi-

- dence From Mafic Microgranular Enclaves. *Mineralogy and Petrology*, 78: 173—200. doi: 10. 1007/s00710—002—0225—0
- Perugini, D. , Poli, G. , Valentini, L. , 2005. Strange Attractors in Plagioclase Oscillatory Zoning; Petrological Implications. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 149: 482—497. doi: 10. 1007/s00410—005—0667—6
- Qian, Q. , Zhong, S. L. , Li, T. Y. , et al. , 2002. Geochemical Characteristics and Petrogenesis of the Badaling High Ba-Sr Granitoids; A Comparison of Igneous Rocks from North China and the Dabie-Sulu Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 275—292 (in Chinese with English abstract).
- Qin, F. , Xu, X. X. , Luo, Z. H. , 2006. Mixing and Mingling in Petrogenesis of the Fangshan Intrusion, Beijing. *Acta Petrologica Sinica*, 22(12): 2957—2970 (in Chinese with English abstract).
- Rapp, R. P. , Shimizu, N. , Norman, M. D. , et al. , 1999. Reaction between Slab-Derived Melts and Peridotite in the Mantle Wedge; Experimental Constraints at 3. 8 GPa. *Chemical Geology*, 160: 335—356.
- Rapp, R. P. , Watson, E. B. , 1995. Dehydration Melting of Metabasalt at 8—32 Kbar; Implications for Continental Growth and Crust-Mantle Recycling. *Journal of Petrology*, 36: 891—931. doi: 10. 1093/petrology/36. 4. 891
- Rushmer, T. , 1991. Partial Melting of Two Amphibolites; Contrasting Experimental Results Under Fluid-Absent Conditions. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 107: 41—59. doi: 10. 1007/BF00311184
- Sen, C. , Dunn, T. , 1994. Dehydration Melting of a Basaltic Composition Amphibolite at 1. 5 and 2. 0 GPa: Implications for the Origin of Adakites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 117: 394—409. doi: 10. 1007/BF00307273
- Sparks, R. S. J. , Marshall, L. A. , 1986. Thermal and Mechanical Constraints on Mixing between Mafic and Silicic Magmas. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 29(1—4): 99—124. doi: 10. 1016/0377—0273(86)90041—7
- Streck, M. J. , Leeman, W. P. , Chesley, J. , 2007. High—Magnesian Andesite from Mount Shasta; A Product of Magma Mixing and Contamination, Not a Primitive Mantle Melt. *Geology*, 35(4): 351—354. doi: 10. 1130/G23286A. 1
- Sun, J. F. , Yang, J. H. , Wu, F. Y. , 2008. Magma Mixing Origin of the Fangshan Pluton; Mineral in situ Hf and Nd Isotopic Evidences. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27(Suppl.): 388 (in Chinese).
- Sun, J. F. , Yang, J. H. , Wu, F. Y. , et al. , 2010. Magma Mixing Controlling the Origin of the Early Cretaceous Fangshan Ganic Pluton, North China Craton; In Situ U-Pb Age and Sr-, Nd-, Hf- and O-Isotope Evidence. *Lithos*, 120: 421—438. doi: 10. 1016/j. lithos. 2010. 09. 002
- 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).
- Tsuchiyama, A. , 1985. Dissolution Kinetics of Plagioclase in Melt of the System Diopside-Albite-Anorthite, and the Origin of Dusty Plagioclase in Andesites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 89: 1—16. doi: 10. 1007/BF01177585
- Vernon, R. H. , 1990. Crystallization and Hybridism in Microgranitoid Enclave Magmas; Microstructural Evidence. *Journal of Geophysical Research*, 95: 17849—17859.
- 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, D. Z. , Zhou, X. M. , Xu, X. S. , et al. , 1992. On Genesis of Microgranitoid Enclaves. *Journal of Guilin College of Geology*, 12(3): 235—241 (in Chinese with English abstract).
- Wang, R. J. , Ma, C. Q. , 1989. Features and Emplacement of the Zhoukoudian Stock, Beijing. *Journal of China University of Geosciences*, 14(4): 399—406 (in Chinese with English abstract).
- Wang, R. J. , Ma, C. Q. , Li, Z. Z. , et al. , 1990. Thermodynamic Structures and Emplacement Mechanism of the Zhoukoudian Intrusion. *Regional Geology of China*, 1: 1—7 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. P. , 1950. Petrogenesis Study on the Fangshan Intrusions. *Geological Review*, 15: 13—32 (in Chinese).
- Wang, S. S. , 1983. Age Determinations of ^{40}Ar - ^{40}K , ^{40}Ar - ^{39}Ar and Radiogenic ^{40}Ar Released Characteristics on K-Ar Geostandards of China. *Chinese Journal of Geology*, 4: 315—323 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. , Deng, J. F. , Ji, G. Y. , 2004. A Perspective on the Geotectonic Setting of Early Cretaceous Adakite-Like Rocks in the Lower Reaches of Yangtze River and Its Significance for Copper-Gold Mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 297—314 (in Chinese with English abstract).

- Wood, D. A., Joron, J. L., Treuil, M., et al., 1979. Elemental and Sr Isotope Variations in Basic Lavas from Iceland and the Surrounding Ocean Floor. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 70: 319—339. doi: 10. 1007/BF00375360
- Wood, D. A., Tarney, J., Weaver, B. L., 1981. Trace Element Variations in Atlantic Ocean Basalts and Proterozoic Dykes From Northwest Scotland: Their Bearing Upon the Nature and Geochemical Evolution of the Upper Mantle. *Tectonophysics*, 75: 91—112. doi: 10. 1016/0040—1951(81)90211—0
- Wu, F. Y., Li, X. H., Yang, J. H., et al., 2007. Discussions on the Petrogenesis of Granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217—1238 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, X. L., Adam, J., Green, T. H., et al., 2006. Trace Element Characteristics of Partial Melts Produced by Melting of Metabasalts at High Pressures: Constraints on the Formation Condition of Adakitic Melts. *Science in China Series D-Earth Science*, 49(9): 915—925. doi: 10. 1007/s11430—006—0915—2
- Xu, W. L., Gao, S., Wang, Q. H., et al., 2006. Mesozoic Crustal Thickening of the Eastern North China Craton: Evidence from Eclogite Xenoliths and Petrologic Implications. *Geology*, 34(9): 721—724. doi: 10. 1130/G22551. 1
- Xu, W. L., Yang, C. H., Yang, D. B., et al., 2006. Mesozoic High-Mg Diorites in Eastern North China Craton: Constraints on the Mechanism of Lithospheric Thinning. *Earth Science Frontiers*, 13(2): 120—129 (in Chinese with English abstract).
- Yan, D. P., Zhou, M. F., Song, H. L., et al., 2005. A Geochronological Constraint to the Guandi Complex, Western Hills of Beijing, and Its Implications for the Tectonic Evolution. *Earth Science Frontiers*, 21: 332—337 (in Chinese with English abstract).
- Yan, D. P., Zhou, M. F., Song, H. L., et al., 2006. Mesozoic Extensional Structures of the Fangshan Tectonic Dome and Their Subsequent Reworking during Collisional Accretion of the North China Block. *Journal of the Geological Society*, 163(1): 127—142. doi: 10. 1144/0016—764904—154
- Yan, D. P., Zhou, M. F., Zhao, D. G., et al., 2011. Origin, Ascent and Oblique Emplacement of Magmas in a Thickened Crust: An Example From the Cretaceous Fangshan Adakitic Pluton, Beijing. *Lithos*, 124, 102—120. doi: 10. 1016/j. lithos. 2010. 11. 015
- Yang, Z. W., 1928. Zhoukoudian Granite in the Western Mountain of Beijing. *Academical Record of Geology Department of Peking University*, 3: 10—14 (in Chinese).
- Ye, L. F., 1920. Geology of Westhill in Beijing. Ministry of Commerce and Agriculture, Beijing, 30—31 (in Chinese).
- Zhang, D. Q., 1981. The Characteristics and Origin of the Dioritic Inclusions in the Fangshan-Intrusion, Beijing. *Geological Review*, 27: 143—149 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Qian, Q., Wang, E. Q., et al., 2001a. An East China Plateau in Mid-Late Yanshanian Period: Implication from Adakites. *Scientia Geologica Sinica*, 36(2): 248—255 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Wang, Y., Qian, Q., et al., 2001b. The Characteristics and Tectonic-Metallogenic Significances of the Adakites in Yanshan Period from Eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 236—244 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Wang, Y., Xiong, X. L., et al., 2008. Adakite and Granite: Challenge and Opportunity. China Land Press, Beijing (in Chinese).
- Zhao, W. X., 2003. Geology of Zhoukoudian and Field Geological Working Methods, Advanced Technology Application. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Zhao, Z. H., Xiong, X. L., Wang, Q., et al., 2008. Some Aspects on Geochemistry of Nb and Ta. *Geochimica*, 37(4): 304—320 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, S. C., Huang, F. S., Jiang, C. Y., et al., 1987. Oxygen, Hydrogen and Carbon Isotope Studies for Fangshan Granitic Intrusion. *Acta Petrologica Sinica*, 3: 13—22 (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.
- 陈斌, 刘超群, 田伟, 2006. 太行山中生代岩浆作用过程中的壳幔岩浆混合作用: 岩石学和地球化学证据. *地学前缘*, 13(2): 140—147.
- 邓晋福, 1978. 硅线石角岩形成时变质反应的热力学计算. *地球化学*, 3: 234—241.
- 干国樑, 1993. 矿物—熔体间元素分配系数资料及主要变化规律. *岩石矿物学杂志*, 12(2): 144—181.
- 何作霖, 1935. 西山花岗岩侵入体. 北平: 国立中央研究院丛刊, 5.
- 黄福生, 姜常义, 1985. 房山岩体的地质—地球化学特征及其成因探讨. *西安地质学院学报*, 7(3): 9—29.

- 刘兵,巴金,张璐,等,2008.北京周口店官地杂岩变质—深熔作用的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年.地质科技情报,27(6):37—42.
- 刘国惠,伍家善,1987.北京房山地区的变质带.中国地质科学院院报,16:113—137.
- 马昌前,1988.北京周口店岩株侵位和成分分带的岩浆动力学机理.地质学报,62(4):329—341.
- 马昌前,明厚利,杨坤光,2004.大别山北麓的奥陶纪岩浆弧:侵入岩年代学和地球化学证据.岩石学报,20(3):393—402.
- 马昌前,王人镜,1990.北京周口店岩体中钾长石巨晶的特征及成因.矿物学报,10(4):323—331.
- 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.
- 马芳,穆治国,刘玉琳,2003.北京房山侵入岩体:微量元素、稀土元素及 Sr 同位素组成对其成因的制约.地球学报,24(2):105—110.
- 钱青,钟孙霖,李通艺,等,2002.八达岭基性岩和高 Ba-Sr 花岗岩地球化学特征及成因探讨:华北和大别—苏鲁造山带中生代岩浆岩的对比.岩石学报,18(3):275—292.
- 孙金凤,杨进辉,吴福元,2008.房山岩体的岩浆混合成因:矿物原位微区 Hf、Nd 同位素证据.矿物岩石地球化学通报,27(增刊):388.
- 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,22(12):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.
- 王德滋,周新民,徐夕生,等,1992.微粒花岗岩类包体的成因.桂林冶金地质学院学报,12(3):235—241.
- 王人镜,马昌前,1989.北京周口店侵入体特征及其侵位机制.地球科学,14(4):399—406.
- 王人镜,马昌前,李志中,等,1990.周口店岩体热动力构造及定位机制研究.中国区域地质,1:1—7.
- 王述平,1950.房山侵入体之岩石成因学的研究.地质论评,15:13—32.
- 王松山,1983.我国 K-Ar 法标准样 ^{40}Ar - ^{40}K 和 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄测定及放射性成因 ^{40}Ar 的析出特征.地质科学,4:315—323.
- 汪洋,邓晋福,姬广义,2004.长江中下游地区早白垩世埃达克质岩的大地构造背景及其成矿意义.岩石学报,20(2):297—314.
- 吴福元,李献华,杨进辉,等,2007.花岗岩成因研究的若干问题.岩石学报,23(6):1217—1238.
- 许文良,杨承海,杨德彬,等,2006.华北克拉通东部中生代高 Mg 闪长岩—对岩石圈减薄机制的制约.地学前缘,13(2):120—129.
- 颜丹平,周美夫,宋鸿林,等,2005.北京西山官地杂岩的形成时代及构造意义.地学前缘,21:332—337.
- 杨增威,1928.北京西山周口店花岗岩.北京大学地质系学会志,3:10—14.
- 叶良辅,1920.北京西山地质志.北京:农商部地质调查所,30—31.
- 张德全,1981.北京房山侵入体闪长质包体的特征及其成因意义.地质论评,27:143—149.
- 张旗,钱青,王二七,等,2001a.燕山中晚期的中国东部高原:埃达克岩的启示.地质科学,36(2):248—255.
- 张旗,王焰,钱青,等,2001b.中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造—成矿意义.岩石学报,17(2):236—244.
- 张旗,王焰,熊小林,等,2008.埃达克岩和花岗岩:挑战与机遇.北京:中国大地出版社.
- 赵温霞,2003.周口店地质及野外地质工作方法与高新技术应用.武汉:中国地质大学出版社.
- 赵振华,熊小林,王强,等,2008.铌与钽的某些地球化学问题.地球化学,37(4):304—320.
- 郑斯成,黄福生,姜常义,等,1987.房山花岗岩岩体氧碳的同位素研究.岩石学报,3:13—22.