

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.210>



太行山南段教场闪长岩矿物学特征及其地质意义

史志伟¹, 董国臣^{1*}, 高庭², 刘延畅³, 宋卡迪⁴

1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

2. 广东省生态环境技术研究所, 广东广州 510650

3. 北京工业大学党委办公室, 北京 100124

4. 西北大学信息科学与技术学院, 陕西西安 710127

摘要: 太行山南段中生代杂岩体的成因与演化是近几十年来探索的热点话题之一。基于野外调研和电子探针分析, 对教场闪长岩的矿物学特征及其意义进行了研究。该闪长岩主要由斜长石、普通角闪石、黑云母、少量单斜辉石和橄榄石组成。SiO₂含量为 52.91%~53.39%, 具有高 Mg[#][100×Mg/(Mg+Fe²⁺)] 值 (60.28~62.39)、富 Na(Na₂O/K₂O=1.18~1.40) 特征。斜长石 An 介于 36~60, 属于中长石和拉长石, 具正环带结构, 含量约 50%。角闪石具有高 CaO(>10%)、MgO(>18%) 特征, 属富镁普通角闪石, 含量约 30%。黑云母 Mg[#][Mg/(Mg+Fe²⁺+Fe³⁺+Mn)] 值为 0.564~0.582, 属镁质黑云母, 含量约 12%。单斜辉石均属 Ca-Mg-Fe 辉石族, 含量约 5%, 为幔源岩浆在由深部向浅部运移过程中逐步结晶的产物。橄榄石 Fo 在 76~91, 为贵橄榄石和镁橄榄石, 含量约 2%, 属地幔捕虏晶。通过单斜辉石温压计计算获得其岩浆结晶温度为 1 060~1 094 °C, 压力为 0.24~0.55 GPa。结果表明, 岩浆源区壳幔混源特征, 在岩浆上升侵位过程中, 发生了弱结晶分异作用。教场闪长岩体现古太平洋板块俯冲及华北克拉通内部伸展的叠加构造背景。

关键词: 电子探针; 矿物温压计; 橄榄石捕虏晶; 闪长岩; 太行山南段; 岩石学。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2020)06-2103-14

收稿日期: 2019-05-05

Mineralogical Characteristics of Jiaochang Diorite in Southern Taihang Mountains and Geological Significance

Shi Zhiwei¹, Dong Guochen^{1*}, Gao Ting², Liu Yanchang³, Song Kadi⁴

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Guangdong Institute of Eco-Environmental Science & Technology, Guangzhou 510650, China

3. Office of the CPC Committee, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

4. School of Information Science and Technology, Northwest University, Xi'an 710127, China

Abstract: The petrogenesis and evolution of Mesozoic complex in the southern Taihang Mountains have been one of hot topics explored since last several decades. Based on field investigation and Electron Probe Microanalysis (EPMA), in the paper, it studies the mineralogy and its significance of Jiaochang diorite. The Jiaochang diorite is mainly composed of plagioclase, amphibole, biotite, and few clinopyroxene and olivine. The SiO₂ contents of the rocks range from 52.91% to 53.39% with high Mg[#][100×Mg/(Mg+Fe²⁺)] (60.28–62.39) and Na (Na₂O/K₂O=1.18–1.40). The plagioclases (about 50%) present An number of 36 to 60 with normal zoning, and belong to andesine and labradorite. The amphiboles (about 30%) has high CaO (>10%) and MgO (>18%), belonging to magnesian amphibole. With [Mg/(Mg+Fe²⁺+Fe³⁺+Mn)] of 0.564–0.582, the biotite (about 12%)

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.41103010); 中国地质调查局区域地质调查项目 (No.1212011120657)。

作者简介: 史志伟 (1990–), 男, 博士研究生, 主要从事岩浆岩石学研究。ORCID: 0000-0003-1637-8457。E-mail: 874869591@qq.com

* **通讯作者:** 董国臣, E-mail: donggc@cugb.edu.cn

引用格式: 史志伟, 董国臣, 高庭, 等, 2020. 太行山南段教场闪长岩矿物学特征及其地质意义. 地球科学, 45(6):2103–2116.

is magnesian. The clinopyroxenes (about 5%) belong to Ca-Mg-Fe pyroxene series, which were produced by gradual crystallization of mantle-derived magma during its upwelling from deep to shallow. The olivines (about 2%) as xenocrysts are composed of chrysolite and forsterite with Fo from 76 to 91. The crystallized temperature and pressure of the diorite by clinopyroxene geothermobarometry range from 1 060 °C to 1 094 °C and from 0.24 GPa to 0.55 GPa respectively. These characteristics suggest that the diorite formed by mantle derived materials from the magma sources. The magma had almost no differentiation during the upward process and the diorite reflects the dual tectonic background of the subduction of the ancient Pacific plate and the extension of North China craton.

Key words: EPMA; geothermometer; olivine xenocryst; diorite; southern Taihang Mountains; petrology.

华北克拉通是世界上最古老的克拉通之一,晚太古代—早元古代由多个微陆块拼合而成(Zhao *et al.*, 1999; 翟明国和彭澎, 2007), 形成了相对稳定的构造单元. 随后经历了多阶段地质演化, 特别是中生代以来, 其东部发生了大规模岩石圈减薄事件, 表现出强烈的构造—岩浆活动(吴福元和孙德有, 1999; 郑建平等, 1999; 邓晋福等, 2000; Xu, 2001; Gao *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2002). 太行山位于华北克拉通中部, 其南段发育一套中生代杂岩体, 其成因与演化是近几十年来探索的热点话题之一. 目前对这套岩石的成因机制仍存在不同的看法, 但有两种主流观点: 其一, 认为该套岩体的原始岩浆起源于岩石圈的拆沉作用(许文良和林景仟, 1990; 邓晋福等, 1994; 谭东娟和林景仟, 1994; 罗照华等, 1997). 其二, 认为该套岩体可能与热侵蚀作用有关(Xu, 2001; 彭头平等, 2004). 因此, 确定太行山南段中生代杂岩体的形成机制对反演华北克拉通中生代岩石圈深部过程具有重要的科学意义. 近年来, 多数学者对该岩体进行了较全面的研究工作, 涉及全岩地球化学、同位素地球化学等方面(宋新宇和冯钟燕, 1999; 牛利锋和张宏福, 2005; Xu *et al.*, 2010; 张海东等, 2014, 霍腾飞等, 2016). 然而, 对该岩体中的矿物特征研究较少. 矿物作为岩石的基本组成单元, 其特征与岩浆源区性质及其演化过程紧密相关, 对矿物特征的分析能够为岩浆源区性质、岩石成因、成岩物理化学条件的研究提供重要资料(周长勇等, 2005; 赵磊等, 2008). 本文较系统地研究了太行山南段教场闪长岩的多种矿物学特征, 对其进行了较详细的矿物化学分析, 并利用矿物温压计计算了成岩物理条件, 探讨了该岩体的地质意义.

1 地质背景

华北克拉通基底主要由东部陆块、西部陆块以及此二者之间的中部带(古元古代造山带)所构成

(Zhao *et al.*, 2000, 2001), 东部陆块和中部带发育许多中生代的小岩体, 多呈岩株或小岩盖分布. 大致可分为两类: (1) 含有幔源橄榄岩包体的闪长岩, 多见于太行山南段和鲁西地区(许文良等, 1993; 图 1a); (2) 二长闪长岩—正长闪长岩—花岗闪长岩, 多见于鲁西—苏北—皖北(林景仟等, 1996, 2000; 许文良等, 2002). 太行山南段位于华北克拉通中部带之上, 地处背斜隆起带的南端, 主要出露中上元古界碎屑岩地层和下古生界碳酸盐岩地层, 区内中生代早白垩世杂岩体(图 1b)侵位于元古界—古生界地层中, 包括邯郸—邢台地区的符山、固镇、矿山、洪山岩体, 安阳地区的东冶岩体以及长治地区的平顺、西安里岩体(Xu, 2001; 王春光等, 2011; 张海东等, 2014). 从区域构造上看, 这些岩体主要受 NNE 向断裂及 NNE 向和 NW 向断裂的交汇处控制. 教场闪长岩位于太行山东南缘, 紧邻东冶岩体, 沿东冶断裂带东侧分布, 与区域构造带展布方向一致, 长轴状(NNE)展布, 呈层状侵入到中奥陶第三段(O_2^3)灰岩中. 野外地质特征和时空分布一致性表明教场闪长岩(图 1c)与太行山南段东冶、符山及西安里杂岩体可能具有相同的成因联系.

2 岩体及其岩石学特征

教场闪长岩呈暗灰绿色, 色率约为 50, 半自形中细粒结构, 块状构造. 主要矿物为斜长石、角闪石、黑云母, 次要矿物为辉石, 亦含少量橄榄石捕虏晶. 其中, 斜长石呈半自形长条状, 粒径约为 0.2~1.2 mm, 具有明显的卡钠复合双晶、聚片双晶, 具环带结构, 部分长石高岭土化, 含量约为 50%. 角闪石呈他形粒状, 粒径约为 0.1~1.2 mm, 含量约为 30%, 部分角闪石绿泥石化, 析出磁铁矿. 黑云母呈半自形—自形片状, 粒径约为 0.3~1.5 mm, 含量约为 12%. 辉石主要为单斜辉石, 呈他形—半自形粒状充填在斜长石之间, 少部分辉石被包含于角闪石中呈反应边结构, 粒径约为 0.5~2.0 mm, 含量约为

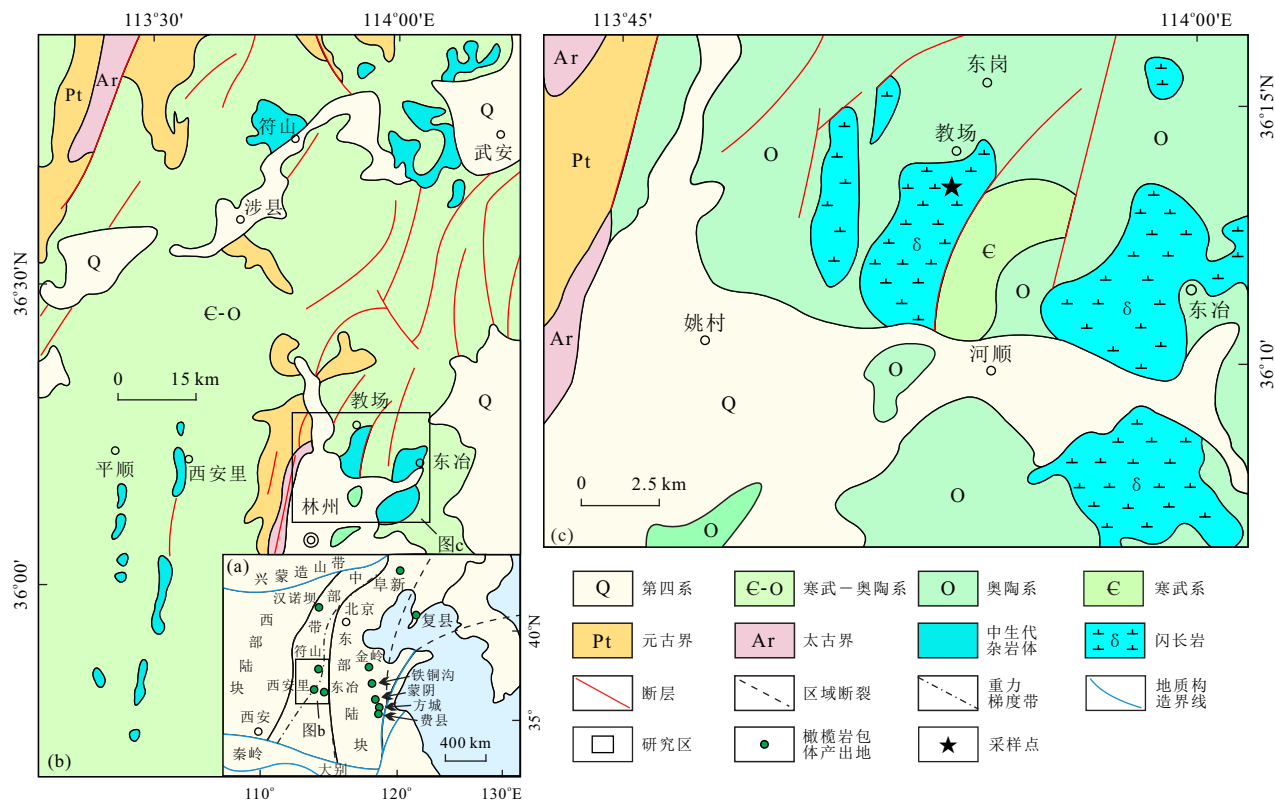


图1 太行山南段教场一带区域地质图

Fig.1 Regional geological map of the Jiaochang area in southern Taihang Mountains

a. 教场岩体区位图(据许文良等,2009);b. 太行山南段区域地质略图(据彭头平等,2004修改);c. 教场闪长岩地质分布图

5%. 橄榄石以捕虏晶形式作为他生矿物在岩石中存在,多呈半自形粒状,粒径约为0.6~3.0 mm,裂纹发育,已局部蛇纹石化,大部分橄榄石被包含于角闪石中呈反应边结构或者包含结构,含量约为2%. 副矿物主要为磁铁矿等.

3 分析方法

全岩主量元素分析在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成. 采用X-Ray Fluorescence (XRF)(RIGAKU2100型)玻璃熔片法测定, Fe_2O_3 、 FeO 含量单独用湿化法测定. 测试过程中,先测定了烧失量,然后加入助溶液及脱模剂等高温加热,最后将玻璃熔片放入XRF自动进样系统进行测试,具体实验方法参见Franzini *et al.* (1972),本次测试结果相对标准偏差大多 $<2\%$,实验室分析精度和准确度达到5%,数据结果见附表1.

单矿物元素分析在核工业北京地质研究院电子探针室完成. 采用JXA-8100型电子探针分析仪,工作条件为加速电压20 kV,电子束流 1×10^{-8} ,出射角 40° ,运用ZAF法修正. 首先将岩石制成标准探

针片,然后在电子探针仪镀膜薄片上测试各个单矿物的主量元素含量,具体实验方法参见李香庭(1980),其中主要氧化物的分析误差约为1%. 最后用Geokit软件对电子探针数据进行处理. 各矿物电子探针成分分析结果列于附表2-6.

4 分析结果

4.1 岩石化学成分

对教场闪长岩的6个样品进行了主量元素测试(附表1). 去除烧失量后,其 SiO_2 含量介于52.91%~53.39%之间,教场闪长岩的 TiO_2 为0.89%~0.97%, Al_2O_3 为12.86%~13.36%, MgO 为8.39%~9.32%, Na_2O 为2.76%~2.99%, K_2O 为2.05%~2.40%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值为1.18~1.40,同时具有高 $\text{Mg}^\#$ 特征($\text{Mg}^\#$ 为60.28~62.39). 由于包含了橄榄石捕虏晶, SiO_2 含量可能较正常值略低, MgO 和 FeO^T 较正常值略高,但由于橄榄石捕虏晶在岩石中含量极少(仅占约2%),对全岩影响很小,因此可认为高 MgO 和 FeO^T 及高 $\text{Mg}^\#$ 值是寄主岩浆本身的属性. 在侵入岩TAS图解中(图2),样品均落在辉长闪长

4.2 矿物学特征

4.2.1 斜长石 斜长石电子探针分析结果及以8个氧为基准计算的阳离子系数等部分参数见附表2, Ab值相对较高(40.27~63.59, 平均51.72), An值略低(36.17~59.61, 平均为47.79), Or值几乎可忽略不计(0.06~1.61, 平均0.49). 总体为中长石和拉长石, 具正环带结构(图4a, 4b), 从核部到边缘为拉长石、中长石交替发育, 并且由核部到边缘奇数带比偶数带更偏基性(核部编号为1, 向外依次编号), 奇数带(4-1、4-3、4-5)的 SiO_2 平均质量分数为54.53%, 偶数带(4-2、4-4)的 SiO_2 平均质量分数为56.51%. 从

核部到边缘, SiO_2 含量由51.97%增大到57.51%, Na_2O 含量由4.42%增大到6.58%, Al_2O_3 含量由29.3%减小到26.6%、 CaO 含量由11.84%减小到8.21%.

4.2.2 角闪石 角闪石电子探针分析结果及以23个氧为标准计算的阳离子系数(附表3). 附表3中数据显示均为钙质角闪石($\text{Ca} + \text{Na}_B \geq 1.00$, $\text{Na}_B < 0.50$), 表现为较高的 CaO 含量($>10\%$), 相对较高的 MgO 含量($>18\%$)和较低的 FeO 含量, TiO_2 含量低, 约0.01%, Na_2O 和 K_2O 含量分别为0.57%~0.65%和0.39%~0.47%. 按照 Leake *et al.* (1997)的角闪石分

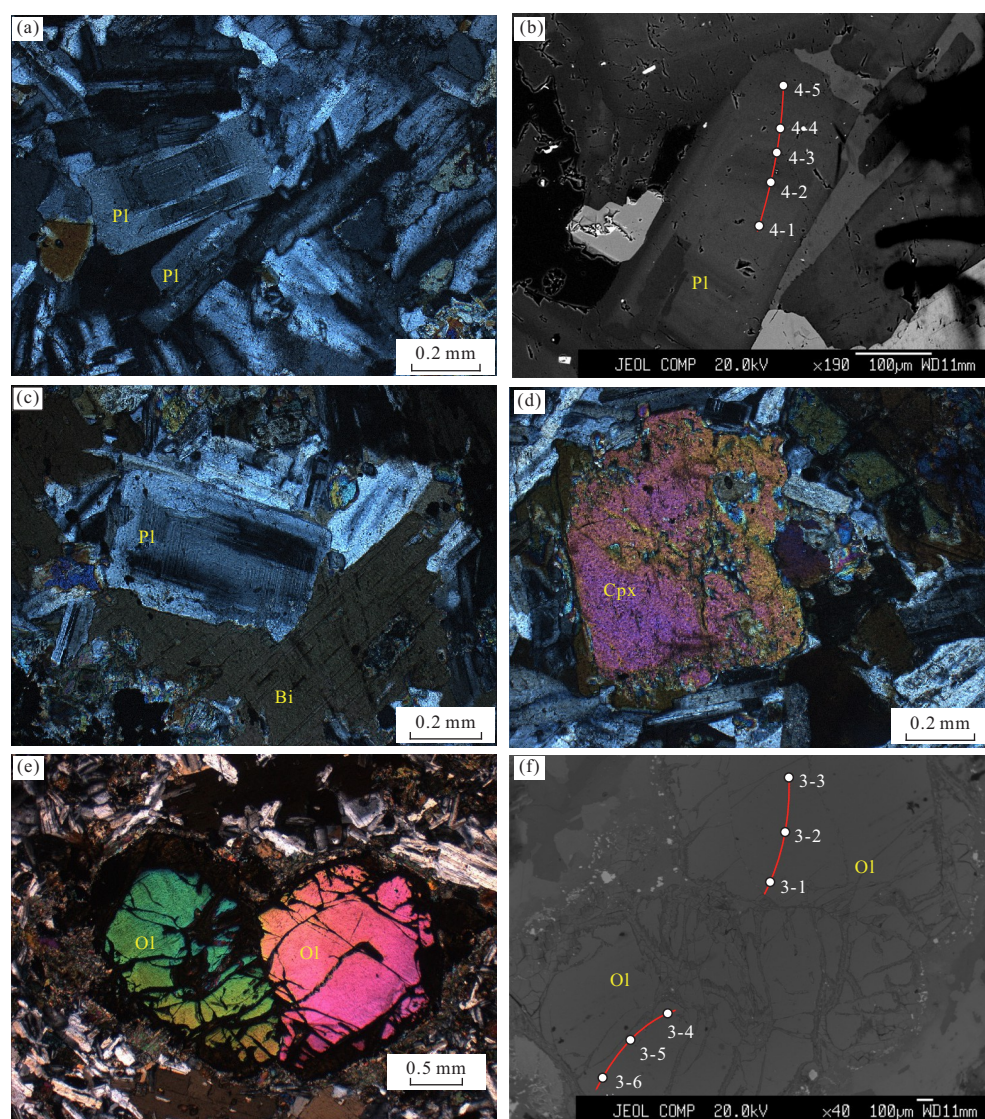


图4 教场闪长岩岩石学特征

Fig.4 Petrographic characteristics of Jiaochang diorite

a. 环带斜长石镜下特征(+); b. 斜长石电子探针剖面图(BSE); c. 黑云母及环带斜长石镜下特征(+); d. 辉石镜下特征(+); e. 橄榄石镜下特征(+); f. 橄榄石电子探针剖面图(BSE); (+). 正交偏光; BSE. 背散射图像; Pl. 斜长石; Bi. 黑云母; Cpx. 单斜辉石; Ol. 橄榄石

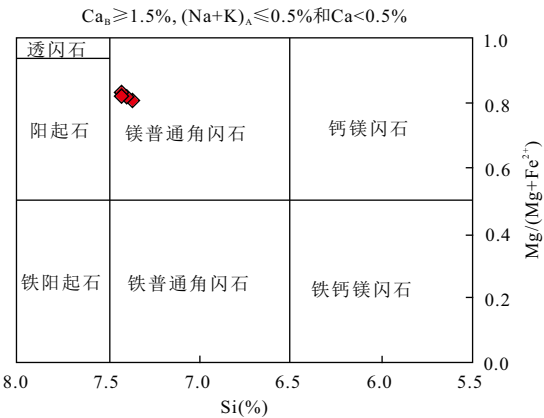


图 5 教场闪长岩角闪石成分分类

Fig.5 Classification diagram of amphiboles from the Jiaochang diorite

底图据 Leake *et al.*(1997)

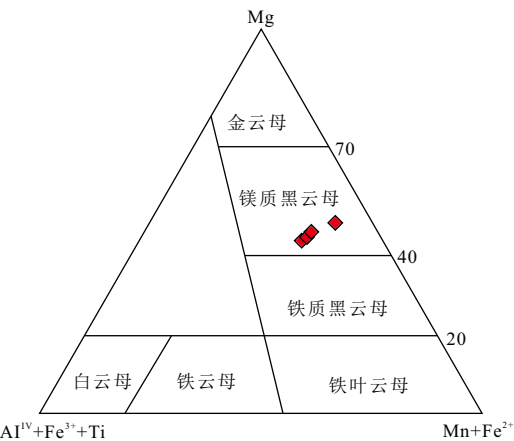


图 6 教场闪长岩黑云母成分分类

Fig.6 Classification diagram of biotites from the Jiaochang diorite

底图据 Foster(1960)

类方法(图 5),角闪石全部落入了镁普通角闪石的范围,与邻区东冶高镁质闪长岩中角闪石特征相似,不同于该区前寒武纪基性高压麻粒岩中(富铁、贫 Si^{IV})角闪石(Zhao *et al.*,2000, 2001).

4.2.3 黑云母 黑云母的电子探针分析结果及以 11 个氧为基准计算的阳离子系数和部分参数见附表 4.由附表 4 中数据可以看出黑云母的 MgO 含量为 14.04%~14.64%,FeO 含量为 18.11%~19.16%,含镁系数 $Mg^\#$ [$Mg^\# = Mg / (Mg + Fe^{2+} + Fe^{3+} + Mn)$] 为 0.564~0.582,Ti 含量变化较大(0.009~0.637).按 Foster 分类图解将黑云母投影到 $Mg-(Al^{VI}+Fe^{3+}+Ti)-(Mn+Fe^{2+})$ 图中(Foster,1960)

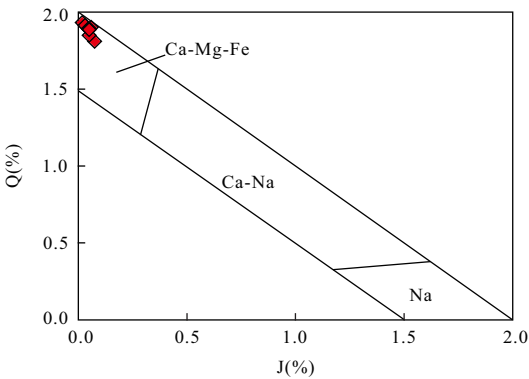


图 7 教场闪长岩单斜辉石系列 Q-J 图解

Fig.7 Diagram of Q-J series for clinopyroxenes from the Jiaochang diorite

$Q = Ca + Mg + Fe^{2+}$, $J = 2Na$; 据 Morimoto(1988)

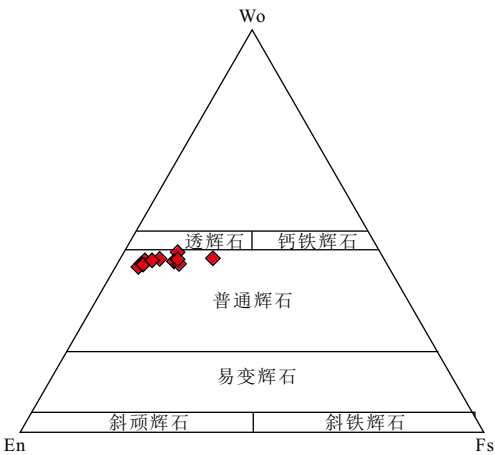


图 8 教场闪长岩单斜辉石分类图解

Fig.8 Diagram of classification for clinopyroxenes from the Jiaochang diorite

据 Morimoto(1988)

(图 6),从图中可以看出闪长岩的黑云母全部落入镁质黑云母范围.按云母成分变种的划分原则(谢应雯和张玉泉,1987),本区闪长岩的黑云母的 $MF = 1.1696 \sim 1.2075$ [$MF = Mg / (Mg + Fe^{2+} + Mn)$],也说明了研究区的黑云母为镁质黑云母.

4.2.4 单斜辉石 单斜辉石电子探针成分分析结果及以 6 个氧为基准计算的阳离子系数及部分参数见附表 5.根据前人提出的辉石分类命名方法(Morimoto, 1988),教场闪长岩中单斜辉石均属 Ca-Mg-Fe 辉石族(图 7).将单斜辉石投到 Wo(硅灰石)-En(顽火辉石)-Fs(铁辉石)三角图上,单斜辉石都落入普通辉石区(图 8).单斜辉石 SiO₂ 含量介于 50.09%~

53.42%, 平均为 52.20%, TiO_2 含量为 0~0.36%, 平均为 0.14%, Al_2O_3 含量较低 (0.34%~3.03%, 平均为 1.40%), FeO 含量为 6.48%~7.51%, 平均为 6.08%, MgO 含量为 12.78%~19.63%, 平均为 17.08%, CaO 含量为 20.46%~21.78%, 平均为 21.68%。 $\text{Mg}^\#$ [$\text{Mg}^\# = \text{Mg} / (\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$] 较高, 在 0.759~1.0 之间, 大部分在 0.88~1.0 之间。 $\text{Ca} / (\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Fe})$ (其中 $\text{Fe} = \text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} + \text{Mn}$) 也较高, 在 0.68~0.89 之间, 平均为 0.82, 表明具有高镁高钙的特征, 类似于东侧东冶高镁质辉长岩中单斜辉石特征。

4.2.5 橄榄石 橄榄石电子探针成分分析结果及以 4 个氧为基准计算的阳离子系数和部分参数见附表 6。从附表 6 中数据可以看出, SiO_2 含量变化不大 (38.32%~40.41%)。通常 Mg 较 Fe 在橄榄石中更相容 (苏本勋等, 2018), MgO 和 FeO 含量在一些样品变化不大, 而另一些变化较大。1 号橄榄石从核部到边缘 MgO 为 48.62%~49.70%, FeO 为 9.16%~10.04%, Fo 在 89.53~90.5 之间, 变化范围不大, 成分相对均匀, 为镁橄榄石。2 号橄榄石从核部到边缘 MgO 为 48.79%~42.73%, FeO 为 10.34%~17.66%, Fo 从 89.24 到 80.92, 成分变化较大, 核部为镁橄榄石, 边缘为贵橄榄石 (图 4e, 4f)。3、4、5 和 6 号橄榄石 MgO 含量在 39.61%~41.90% 之间, FeO 含量介于 18.74%~21.07%, Fo 为 76.67~79.66, 为贵橄榄石, 成分明显不同于 1、2 号橄榄石。

5 讨论

5.1 橄榄石捕虏晶

橄榄石是镁铁质—超镁铁质岩浆中常见的矿物, 也是最早晶出的造岩矿物, 能够对示踪地幔结构、组成和演化提供重要制约 (Thompson and Gibson, 2000; Frezzotti, 2001)。从镜下产状来看, 橄榄石捕虏晶的颗粒自形程度普遍较差, 多呈浑圆状、碎屑状, 具有反应边、熔蚀边, 背散射图像颜色偏深, 而岩浆成因橄榄石自形程度相对较好, 多为粒状, 解理较少。教场闪长岩中的橄榄石多具捕虏晶特征。

橄榄石的 CaO 含量也是判断其来源于岩浆结晶作用还是属于地幔捕虏晶的一个重要标志。根据世界范围岩浆结晶橄榄石和地幔橄榄石捕虏晶的成分对比发现, 岩浆结晶橄榄石 CaO 含量普遍 > 0.2%, 但橄榄岩包体中的橄榄石 CaO 含量远小于

该值, 通常地幔橄榄岩中的橄榄石 CaO 含量 $\leq 0.1\%$ (Gurenko *et al.*, 1996), 而教场闪长岩中的橄榄石 CaO 含量均 $\leq 0.05\%$, 暗示其为地幔捕虏晶。

Fo 值是判别橄榄石来源的另一个重要标志。通常认为橄榄石 Fo 值越大, 说明其形成深度和熔融程度越高 (熊发挥等, 2018)。岩浆成因橄榄石 Fo 值普遍偏低 (Fo 值约为 85 左右或更低), 而且由于岩浆演化后期更富 Fe , 导致数值分布范围较宽, 而橄榄石捕虏晶 Fo 值普遍较高 ($\text{Fo} \geq 90$) (张柳毅等, 2016)。教场闪长岩中, 1 号橄榄石由核部至边部 (Fo 值为 89.53~90.5) 基本保留了初始地幔捕虏晶成分, 2 号橄榄石的核部与边部对比来看, 核部是保留了初始地幔捕虏晶的化学成分 (Fo 值为 89.24), 而边部 Fo 值降低, 并且 MgO 含量明显偏低而 FeO 含量明显偏高, 这显然是与闪长质岩浆反应的结果 (吴福元等, 2008)。3、4、5、6 号橄榄石, 由于颗粒较小, 全部与岩浆体系进行了成分交换, 也表现出了低 Fo 值特征。这些证据表明, 教场闪长岩中的橄榄石应属地幔捕虏晶, 且经历了与寄主岩浆反应的过程。

5.2 岩浆物质来源

角闪石的化学组成在一定程度上可以指示源区特征。教场闪长岩的角闪石 $\text{Ca} + \text{Al}^{\text{IV}}$ 含量较高, 应属岩浆成因 (Strong and Taylor, 1984)。研究表明, 幔源型和壳幔混源型角闪石的 FeO^{T} 含量通常低于 18%, 而壳源型角闪石的 FeO^{T} 含量大于 20% (谢应雯和张玉泉, 1990)。教场闪长岩角闪石 FeO^{T} 含量在 11.72%~12.22%, 说明其具有一定的幔源或壳幔混源特征。

黑云母 MgO 含量可以反映岩浆物质来源的一些地球化学特征, 因此其成分特点也能够较好地反映寄主岩浆的形成环境。典型幔源黑云母 MgO 含量 > 15%, 壳源黑云母 MgO 含量 < 6% (丁孝石, 1988), 教场闪长岩黑云母 MgO 含量 14.04%~14.64%, 平均 14.26%, 具壳幔过渡的特点, 且非常接近幔源值。将黑云母电子探针数据投入镁铁云母 $\text{MgO} - \Sigma \text{FeO} / (\Sigma \text{FeO} + \text{MgO})$ 与岩浆物质来源关系图解 (图 9) 中, 样品都投在了壳幔混合源, 靠近幔源区域边界, 暗示岩浆来自地幔, 但有少量壳源物质加入。

通过全岩及矿物成分对比发现, 教场闪长岩 $\text{Mg}^\#$ [$100 \times \text{Mg} / (\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$] 为 60.28~62.39, 与区内同时期的东冶闪长岩 ($\text{Mg}^\#$ 值介于 49~62) 和符

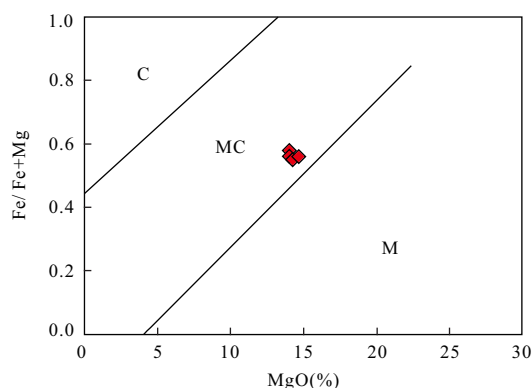


图9 教场闪长岩镁铁云母岩浆物质来源关系

Fig.9 The diagram of Mg-Fe micas in relation with the source of magmatic material from the Jiaochang diorite

据邱家骧(1993); M. 幔源; MC. 壳幔混源; C. 壳源

山闪长岩($Mg^\#$ 值介于51~64)相近(彭头平等, 2004; 许文良等, 2009), 教场闪长岩中橄榄石特征(核部 $Mg^\#=89\sim90$, $CaO=0.04\sim0.05$)与区内西安里辉长岩中地幔捕虏晶橄榄石高 $Mg^\#$ (核部 $Mg^\#=91\sim94$) 低 CaO ($CaO<0.1\%$)特征(王春光等, 2011)类似, 而在太行山南段东冶、符山和西安里的中生代岩体中均发现有地幔橄榄岩包体(黄福生和薛绥洲, 1990; 许文良和林景仟, 1991), 地球化学成分及矿物学特征显示这些岩体具有上地幔源区的属性, 同时以高 $Mg^\#$ 、富 Na 及高 Sr、Cr 和 Ni 为特征, 初始 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 介于 0.705 363~0.706 165(许文良等, 2004, 2009; Xu *et al.*, 2010), 也证实源区具有壳幔混源特征. 对于壳源物质从何而来, 全岩同位素特征显示, 该地区中生代岩体还具有较低的 Nd 值($\epsilon_{Nd}=-12.47\sim-16.75$); 以及相对于 $^{206}Pb/^{204}Pb$, 较高的 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 和 $^{208}Pb/^{204}Pb$ 比值 [$(^{206}Pb/^{204}Pb)_i=16.63\sim17.51$, $(^{207}Pb/^{204}Pb)_i=15.24\sim15.43$, $(^{208}Pb/^{204}Pb)_i=36.75\sim37.85$], Sm/Nd 比值也较低(0.17~0.19)(彭头平等, 2004; 许文良等, 2009), 这些数据表明, 太行山南段中生代杂岩体的源区具有 EMI 型岩石圈地幔 Sr-Nd-Pb 同位素特征, 暗示壳源物质来自地幔源区, 而非岩浆上升过程中地壳的混染. 众多学者通过对该地区高镁闪长岩及其橄榄岩包体的研究, 并结合大地构造背景, 认为该地区原始岩浆可能与古老地壳拆沉作用有关(邓晋福等, 2006; 高山等, 2009; 许文良等, 2009; 朱日祥等, 2011). 上述证据表明, 教场闪长岩与区内其他中生代岩体可能具有相同的物质来源, 均来自上地幔源区的部分熔融, 同时该源区可能有少量陆壳物质涉入.

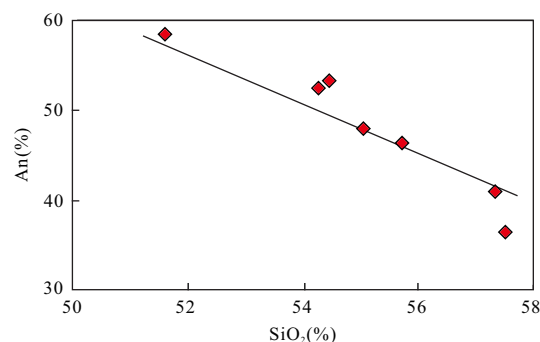
图10 教场闪长岩斜长石 SiO_2 -An 相关图

Fig.10 Diagram of chemical variation of SiO_2 -An in plagioclases from the Jiaochang diorite

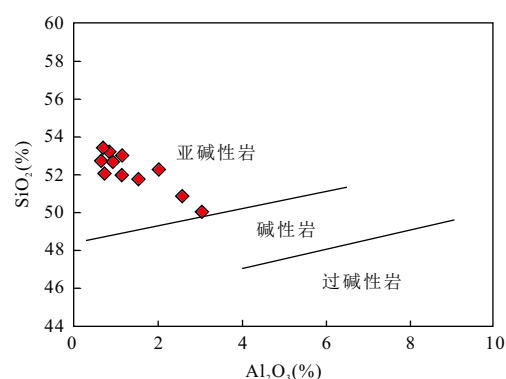
图11 教场闪长岩单斜辉石 SiO_2 - Al_2O_3 图

Fig.11 SiO_2 vs. Al_2O_3 diagram of clinopyroxenes from the Jiaochang diorite

据 Nisbet and Pearce(1977)

5.3 岩浆分异演化

Harker 图解(图3)是判别岩浆结晶分异作用的有效方法之一, 由西安里杂岩体, 经教场、东冶到符山杂岩体, 随着 SiO_2 含量升高, Na_2O 和 K_2O 有逐渐升高的趋势, 这种变化很可能是原始岩浆演化形成的, 同时 CaO 、 MgO 、 FeO 和 TiO_2 随岩浆演化呈线性降低, 暗示岩浆演化过程中存在镁铁质矿物的分离结晶作用.

斜长石的 SiO_2 -An 相关图解(图10)上可以看出教场闪长岩斜长石 An 值和 SiO_2 含量变化范围较小, 而且呈明显的负相关, 这符合岩浆缓慢结晶的特征.

研究表明, 单斜辉石的成分能够更好地反映其母岩浆的成分变化特征(Leterrier *et al.*, 1982; Seyler and Bonatti, 1994; 邱家骧和廖群安, 1996). 单斜辉石 SiO_2 - Al_2O_3 图解显示, 教场闪长岩的单斜辉石主要集中在亚碱性岩区域, 有少数靠近碱性岩区域(图11), 表明该岩体的母岩浆属亚碱性系列, 有向

碱性系列演化的趋势.辉石中类质同像离子置换现象十分普遍,通过分析其类质同像转换过程,有助于深入理解辉石的组分关系及其成因.辉石中阳离子的置换主要受电价平衡、阳离子半径和温度影响(Cambell and Borley, 1974; Hode *et al.*, 2005).Al在单斜辉石中既可以替代Si进入四面体(Al^{IV}),也可以六次配位(Al^{VI})进入八面体,而岩浆结晶作用是 Al^{VI} 增加的过程(陈光远等, 1998).阳离子计算结果表明(附表5),教场闪长岩中单斜辉石的Al主要替代Si进入四面体(Al^{IV}),其四面体位置的 Al^{IV} (0.028~0.111,平均为0.081)占全铝的90.52%,还有少量进入八面体位置的 Al^{VI} (0~0.024,平均为0.005),表明岩浆发生了较弱的分离结晶作用.在Si- Al^{IV} 关系图解(图12)上,单斜辉石均位于拉斑玄武岩区域,且Si与 Al^{IV} 呈良好的负相关线性关系,表明单斜辉石是幔源岩浆在由深部向浅部运移过程中逐步结晶的产物.

根据Boyd(1973)单斜辉石温度计 $t(^{\circ}C) = 2\ 258.55 \sim 27.217 [Ca / (Ca + Mg + Fe^{2+})]$ Cpx (mol%)计算教场闪长岩单斜辉石结晶的温度为950~1 077 $^{\circ}C$,再根据闪长岩中单斜辉石 Al_2O_3 的质量分数校正(马昌前等, 1994),校正后温度为958~1 086 $^{\circ}C$,平均温度为1 033 $^{\circ}C$.邱家骧和增广策(1987)应用Tompson的实验数据,进一步提出了不同系列的玄武岩中的Cpx的Al与结晶时 t (单位 $^{\circ}C$)、 P (单位0.1 GPa)的关系.对于亚碱性玄武岩(即拉斑玄武岩),相应的温压计为 $t = 997.0685 + 721.1729Al, r = 0.9938; P = -3.2459 + 64.9210Al, r = 0.9901$.根据公式获得温度和压力分别为1 060~1 094 $^{\circ}C$, 0.24~0.55 GPa,计算温度与上述Boyd(1973)单斜辉石温度计计算的结果非常接近.按照0.1 GPa $\approx$ 3.3 km,对应单斜辉石结晶深度为7.92~18.15 km,在如此宽的深度范围内,暗示单斜辉石在岩浆上升过程中可能是逐渐晶出的.由于早白垩世太行山南段受到华北克拉通岩石圈减薄影响,且处于伸展构造背景(吴福元等, 2008),地温梯度相对有所升高(嵇少丞等, 2009),同等压力下,实际结晶深度范围可能比计算深度略大.

上述证据表明,教场闪长岩的母岩浆在上升过程中,发生了较弱程度的结晶分异作用,并且是由深部向浅部运移过程中逐步结晶的产物.

5.4 大地构造背景

单斜辉石成分对构造环境具有较好的指示作

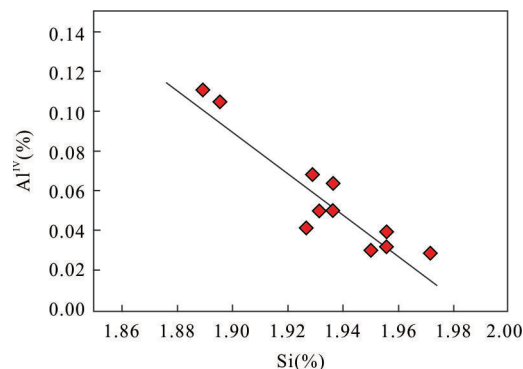


图12 教场闪长岩单斜辉石 Si- Al^{IV} 关系图解

Fig.12 Si- Al^{IV} diagram of clinopyroxenes from the Jiaochang diorite
据 Kushiro(1960)

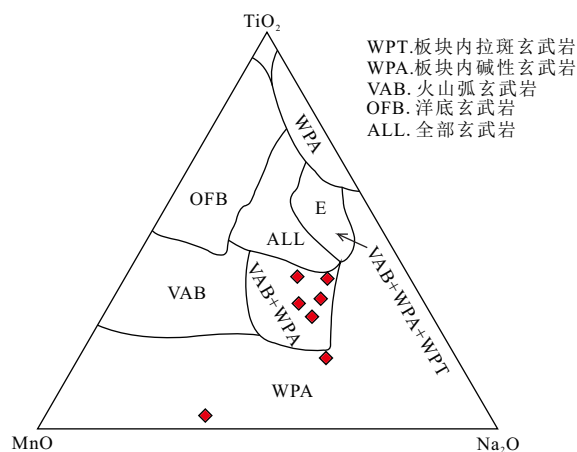


图13 教场闪长岩单斜辉石 TiO_2 -MnO- Na_2O 图解

Fig.13 TiO_2 -MnO- Na_2O diagram of clinopyroxenes from the Jiaochang diorite
据 Nisbet and Pearce(1977)

用(孙洋等, 2017).教场闪长岩的单斜辉石具有高MgO(平均17.08%)高CaO(平均21.68%)特征,且 $Mg^{\#}$ 值(平均0.91)较高,同时显示出拉斑玄武岩浆的演化趋势(图12),表现出弧岩浆的特点.在Nisbet *et al.*(1977)提出的辉石 TiO_2 -MnO- Na_2O 构造环境判别图解(图13)中,样品全部落在火山弧玄武岩和板内碱性玄武岩区域,而这两种岩性分别指示了俯冲环境和板内伸展环境,反映出研究区叠加的构造背景.同时这种特征与太行山南段其它中生代杂岩体(许文良等, 2009;王春光等, 2011;张海东等, 2014)及华北克拉通东部的构造背景一致.

许文良等(2004)对教场闪长岩东侧的东冶角闪闪长岩普通角闪石 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 定年结果为127 Ma,即形成于早白垩世;东冶角闪闪长岩SHRIMP锆石

U-Pb 定年结果为 125.9 ± 0.9 Ma(彭头平等, 2004); 西安里角闪辉长岩和符山高镁闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年的加权平均年龄分别为 125 ± 1 Ma(许文良等, 2009)和 131 ± 1 Ma(王春光等, 2011). 测年结果表明太行山南段杂岩体形成时代主要集中在 $125 \sim 131$ Ma, 暗示太行山南段在早白垩世发生过一次非常强烈的构造—岩浆事件, 这与中国东部在早白垩世发生过大规模岩浆、成矿事件相吻合(吴福元等, 2008). 此时期, 古太平洋板块已经开始向欧亚大陆之下斜向俯冲(Maruyama and Send, 1986), 并且华北克拉通岩石圈减薄达到高峰期(许文良等, 2004; Wu *et al.*, 2005). 由此可见, 教场闪长岩的形成可能与中生代古太平洋板块斜向俯冲及华北克拉通内部伸展两大构造背景有关.

6 结论

(1) 教场闪长岩具有高 $Mg^{\#}$ ($60.28 \sim 62.39$)、富 Na(Na_2O/K_2O 比值 > 1) 等岩石化学特征, 且包含地幔橄榄石捕虏晶, 与太行山南段中生代东冶、符山、西安里等高镁闪长岩成分类似, 认为具有相同的成因, 可能与陆壳拆沉作用有关.

(2) 单斜辉石温压计所获得的结晶温压条件分别为 $1\ 060 \sim 1\ 094$ °C 和 $0.24 \sim 0.55$ GPa, 对应的结晶深度大约在 $7.92 \sim 18.15$ km.

(3) 教场闪长岩具壳幔混源矿物学特征, 显示弱结晶分异现象, 并且是由深部向浅部运移过程中逐步结晶的产物, 同时体现了古太平洋板块俯冲及华北克拉通内部伸展的叠加构造背景.

附表见本刊官网(<http://www.earth-science.net>).

致谢: 衷心感谢中国地质大学(北京)柯珊老师对本文给予的建议与帮助, 感谢河北省区域地质矿产调查研究所实验室及核工业北京地质研究院电子探针室工作人员的协助, 感谢两位评审专家及编辑为本文提出了宝贵修改意见. 在此一并致谢!

References

- Boyd, F. R., 1973. A Pyroxene Geotherm. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37(12): 2533—2546.
- Campbell, I. H., Borley, G. D., 1974. The Geochemistry of Pyroxenes from the Lower Layered Series of the Jimberlana Intrusion, Western Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 47(4): 281—297.
- Chen, G. Y., Sun, D. S., Yin, H. A., 1998. Genetic Mineralogy and Prospecting Mineralogy. Chongqing Press, Chongqing(in Chinese).
- Deng, J. F., Mo, X. X., Zhao, H. L., et al., 1994. Lithosphere Root/De-Rooting and Activation of the East China Continent. *Geoscience*, 8(3): 349—356(in Chinese with English abstract).
- Deng, J. F., Su, S. G., Liu, C., et al., 2006. Discussion on the Lithospheric Thinning of the North China Craton: Delamination or Thermal Erosion and Chemical Metasomatism? *Earth Science Frontiers*, 13(2): 105—119(in Chinese with English abstract).
- Deng, J. F., Zhao, G. C., Zhao, H. L., et al., 2000. Yanshanian Igneous Petrotectonic Assemblage and Orogenic-Deep Processes in East China. *Geological Review*, 46(1): 41—48(in Chinese with English abstract).
- Ding, X. S., 1988. Study of Typomorphic Characteristics of Micas from Granitoids in Central-Southern Xizang and Their Geological Significance. *Bulletin of the Institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences*, (1): 33—49(in Chinese with English abstract).
- Dong, J. H., Chen, B., Zhou, L., 2003. Genesis of the Fushan Rock Mass in the Southern Taihang Mountains: Petrological and Geochemical Evidence. *Progress in Natural Science*, 13(7): 767—774(in Chinese).
- Foster, M. D., 1960. Interpretation of the Composition of Trioctahedral Micas. *Geological Survey Professional Paper*, 354: 11—49.
- Franzini, M., Leoni, L., Saitta, M., 1972. A Simple Method to Evaluate the Matrix Effects in X-Ray Fluorescence Analysis. *X-Ray Spectrometry*, 1(4): 151—154. <https://doi.org/10.1002/xrs.1300010406>
- Frezzotti, M. L., 2001. Silicate-Melt Inclusions in Magmatic Rocks: Applications to Petrology. *Lithos*, 55(1—4): 273—299. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(00\)00048-7](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(00)00048-7)
- Gao, S., Rudnick, R. L., Carlson, R. W., et al., 2002. Re-Os Evidence for Replacement of Ancient Mantle Lithosphere beneath the North China Craton. *Earth & Planetary Science Letters*, 198(3—4): 307—322. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(02\)00489-2](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(02)00489-2)
- Gao, S., Zhang, J. F., Xu, W. L., et al., 2009. Delamination and Destruction of the North China Craton. *Chinese Sci. Bull.*, 54(14): 1962—1973(in Chinese).
- Gurenko, A. A., Hansteen, T. H., Schmincke, H. U., 1996. Evolution of Parental Magmas of Miocene Shield Basalts of Gran Canaria (Canary Islands): Constraints from Crystal, Melt and Fluid Inclusions in Minerals. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 124(3—4): 422—435. <https://doi.org/10.1007/s004100050201>
- Hode, V. J., Halenius, U., Whitehouse, M. J., et al., 2005.

- Compositional Variations (Major and Trace Elements) of Clinopyroxene and Ti-Andradite from Pyroxenite, Ijolite and Nepheline Syenite, Alno Island, Sweden. *Lithos*, 81 (1-4): 55-77. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.09.021>
- Huang, F.S., Xue, S.Z., 1990. The Discovery of the Mantle-Derived Ultramafic Xenoliths in Handan-Xingtai Intrusive Complex and Their Mineralogical-Geochemical Characteristics. *Acta Petrologica Sinica*, 6(4): 40-45 (in Chinese with English abstract).
- Huo, T.F., Yang, D.B., Shi, J.P., et al., 2016. Petrogenesis of the Early Cretaceous Alkali-Rich Intrusive Rocks in the Central North China Block: Constraints from Zircon U-Pb Chronology and Sr-Nd-Hf Isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 32(3): 697-712 (in Chinese with English abstract).
- Ji, S.C., Wang, Q., Yang, W.C., 2009. Correlation between Crustal Thickness and Poisson's Ratio in the North China Craton and Its Implication for Lithospheric Thinning. *Acta Geologica Sinica*, 83(3): 324-330 (in Chinese with English abstract).
- Kushiro, I., 1960. Si-Al Relation in Clinopyroxenes from Igneous Rocks. *American Journal of Science*, 258(8): 548-554. <https://doi.org/10.2475/ajs.258.8.548>
- Leake, B.E., Woolley, A.R., Arps, C.E.S., et al., 1997. Nomenclature of Amphiboles Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names. *European Journal of Mineralogy*, 9(3): 623-651. <https://doi.org/10.1127/ejm/9/3/0623>
- Leterrier, J., Maury, R.C., Thonon, P., et al., 1982. Clinopyroxene Composition as a Method of Identification of the Magmatic Affinities of Paleo-Volcanic Series. *Earth and Planetary Science Letters*, 59: 139-154. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(82\)90122-4](https://doi.org/10.1016/0012-821x(82)90122-4)
- Li, X.T., 1980. Electron Probe Microanalysis. *Chinese Journal of Silicate*, (4): 63-73 (in Chinese).
- Lin, J.Q., Tan, D.J., Jin, Y., 1996. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ages of Mesozoic Igneous Activities in Western Shandong. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 15(3): 213-220 (in Chinese with English abstract).
- Lin, J.Q., Tan, D.J., Li, J.H., et al., 2000. Early Jurassic Banjing Intrusive Complex of Southern Marginal Zone of North China Block, Xuzhou. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 30(3): 209-214 (in Chinese with English abstract).
- Luo, Z.H., Deng, J.F., Zhao, G.C., et al., 1997. Characteristics of Magmatic Activities and Orogenic Process of Taihangshan Intraplate Orogen. *Earth Science*, 22(3): 279-284 (in Chinese with English abstract).
- Ma, C.Q., Yang, K.G., Tang, Z.H., et al., 1994. Granitic Magmatic Dynamics-Theoretical Methods and Case Studies of Granitic Rocks in Eastern Hubei. China University of Geosciences Press, Wuhan, 210-212 (in Chinese).
- Maruyama, S., Send, T., 1986. Orogeny and Relative Plate Motions: Example of the Japanese Islands. *Tectonophysics*, 127(3-4): 305-329. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(86\)90067-3](https://doi.org/10.1016/0040-1951(86)90067-3)
- Middlemost, E.A.K., 1994. Naming Materials in the Magma/Igneous Rock System. *Earth-Science Reviews*, 37(3-4): 215-224. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90029-9)
- Morimoto, N., 1988. Nomenclature of Pyroxenes. *Mineralogy and Petrology*, 39(1): 55-76. <https://doi.org/10.1007/bf01226262>
- Nisbet, E.G., Pearce, J.A., 1977. Clinopyroxene Composition in Mafic Lavas from Different Tectonic Settings. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 63(2): 149-160. <https://doi.org/10.1007/bf00398776>
- Niu, L.F., Zhang, H.F., 2005. Mineralogy and Petrogenesis of Amphiboles from Intermediate-Mafic Intrusions in Southern Taihang Mountains. *Geotectonica et Metallogenia*, 29(2): 269-277 (in Chinese with English abstract).
- Peng, T.P., Wang, Y.J., Fan, W.M., et al., 2004. SHRIMP Zircon U-Pb Geochronology of the Diorites for Southern Taihang Mountains in the North China Interior and Its Petrogenesis. *Acta Petrologica Sinica*, 20(5): 1253-1262 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, J.X., 1993. Alkaline Rock in Qinba. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Qiu, J.X., Liao, Q.A., 1996. Petrogenesis and Cpx Mineral Chemistry of Cenozoic Basalts from Zhejiang and Fujian of Eastern China. *Volcanology & Mineral Resources*, 17(1): 16-25 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, J.X., Zeng, G.C., 1987. The Main Characteristics and Petrological Significance of Low Pressure Clinopyroxenes in the Cenozoic Basalts from Eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 3(4): 1-9 (in Chinese with English abstract).
- Seyler, M., Bonatti, E., 1994. Na, Al^{IV} and Al^{VI} in Clinopyroxenes of Subcontinental and Suboceanic Ridge Peridotites: A Clue to Different Melting Processes in the Mantle? *Earth and Planetary Science Letters*, 122(3-4): 281-289. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(94\)90002-7](https://doi.org/10.1016/0012-821x(94)90002-7)
- Song, X.Y., Feng, Z.Y., 1999. Minor Element Geochemistry of Mesozoic Magmatic Intrusions of Southern Taihang

- Mountains. *Jour. Geol. & Min. Res. North China*, 14(1): 1—17(in Chinese with English abstract).
- Strong, D. F., Taylor, R. P., 1984. Magmatic-Subsolidus and Oxidation Trends in Composition of Amphiboles from Silica-Saturated Peralkaline Igneous Rocks. *Mineralogy and Petrology*, 32(4):211-222.
- Su, B. X., Xiao, Y., Chen, C., et al., 2018. Potential Applications of Fe and Mg Isotopes in Genesis of Chromite Deposits in Ophiolites. *Earth Science*, 43(4): 1011—1024(in Chinese with English abstract).
- Sun, Y., Ma, C. Q., Liu, B., 2017. Record of Late Yanshanian Mafic Magmatic Activity in the Middle-Lower Yangtze River Metallogenic Belt. *Earth Science*, 42(6): 891—908 (in Chinese with English abstract).
- Tan, D. J., Lin, J. Q., 1994. Mesozoic Potassium Magmatic Region of the North China Platform. Seismology and Geology Press, Beijing(in Chinese).
- Thompson, R. N., Gibson, S. A., 2000. Transient High Temperatures in Mantle Plume Heads Inferred from Magne-sian Olivines in Phanerozoic Picrites. *Nature*, 407: 502—506. <https://doi.org/10.1038/35035058>
- Vuagnat, M., 1992. Proterozoic Ophiolites from Yanbian and Shimian (Sichuan Province, China): Petrography, Geochemistry, Petrogenesis, and Geotectonic Environment. *Schweizerische Mineralogische Und Petrographische Mitteilungen*, 72(3):389—413.
- Wang, C. G., Xu, W. L., Wang, F., et al., 2011. Petrogenesis of the Early Cretaceous Xi'anli Hornblende-Gabbros from the Southern Taihang Mountains: Evidence from Zircon U-Pb Geochronology, Hf Isotope and Whole-Rock Geochemistry. *Earth Science*, 36(3): 471—482(in Chinese with English abstract).
- Wu, F. Y., Lin, J. Q., Wilde, S. A., et al., 2005. Nature and Significance of the Early Cretaceous Giant Igneous Event in Eastern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 233 (1—2) : 103—119. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.02.019>
- Wu, F. Y., Sun, D. Y., 1999. The Mesozoic Magmatism and Lithospheric Thinning in Eastern China. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 29(4): 313—318(in Chinese with English abstract).
- Wu, F. Y., Xu, Y. G., Gao, S., et al., 2008. Lithospheric Thinning and Destruction of the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1145—1174(in Chinese with English abstract).
- Xie, Y. W., Zhang, Y. Q., 1987. Typomorphic Peculiarities of Biotites from Different Genetic Types of Granite in the Hengduan-shan Region. *Acta Mineralogica Sinica*, 7(3): 245—254(in Chinese with English abstract).
- Xie, Y. W., Zhang, Y. Q., 1990. Peculiarities and Genetic Significance of Hornblende from Granite in the Hengduan-shan Region. *Acta Mineralogica Sinica*, 10(1): 35—45(in Chinese with English abstract).
- Xiong, F. H., Yang, J. S., Xu, X. Z., et al., 2018. Inclusions in Olivine and Implications—Based on Mineral Research of Dunite of Bulqiza Ophiolite, Albania. *Earth Science*, 43(5): 1464—1473(in Chinese with English abstract).
- Xu, W. L., Chi, X. G., Yuan, C., et al., 1993. Mesozoic Diorites and Deep Source Inclusions in the Central Part of the North China Platform. Geological Publishing House, Beijing(in Chinese).
- Xu, W. L., Lin, J. Q., 1990. The Magmatic Evolution of Hb-Diorite Series of Yanshan Stage in Han-Xing District, China: The Amphibole-Dominated Fractional Crystallization. *Journal of Changchun University of Earth Science*, 20(3):259—264(in Chinese with English abstract).
- Xu, W. L., Lin, J. Q., 1991. The Discovery and Study of Mantle-Derived Dunite Inclusions in Hornblende-Diorite in the Handan-Xingtai Area, Hebei. *Acta Geologica Sinica*, 65(1):33—41(in Chinese with English abstract).
- Xu, W. L., Wang, C. G., Yang, D. B., et al., 2010. Dunite Xenoliths and Olivine Xenocrysts in Gabbro from Taihang Mountains: Characteristics of Mesozoic Lithospheric Mantle in Central China. *Journal of Earth Science*, 21(5): 692—710. <https://doi.org/10.1007/s12583-010-0121-1>
- Xu, W. L., Wang, D. Y., Liu, X. C., et al., 2002. The Discovery and Geological Significance of Eclogite Inclusions in Early Jurassic Intrusive Complex in Xuhuai Area. *Chinese Science Bulletin*, 47(8):618—622(in Chinese).
- Xu, W. L., Wang, D. Y., Wang, Q. H., et al., 2004. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating of Hornblende and Biotite in Mesozoic Intrusive Complex from the North China Block: Constraints on the Time of Lithospheric Thinning. *Geochimica*, 33(3):221—231(in Chinese with English abstract).
- Xu, W. L., Yang, D. B., Pei, F. P., et al., 2009. Petrogenesis of Fushan High-Mg[#] Diorites from the Southern Taihang Mts. in the Central North China Craton: Resulting from Interaction of Peridotite-Melt Derived from Partial Melting of Delaminated Lower Continental Crust. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8):1947—1961(in Chinese with English abstract).
- Xu, Y. G., 2001. Thermo-Tectonic Destruction of the Archean Lithospheric Keel beneath the Sino-Korean Craton in China: Evidence, Timing and Mechanism. *Physics & Chemistry of the Earth Part A Solid Earth & Geodesy*, 26(9—10): 747—757. <https://doi.org/10.1016/s1464->

- 1895(01)00124-7
- Zhai, M. G., Peng, P., 2007. Paleoproterozoic Events in the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2665—2682(in Chinese with English abstract).
- Zhang, H.D., Liu, J.C., Chen, Z.L., et al., 2014. Petrogenesis of the Pingshun Complexes in the Southern Taihang Mountains: Petrology, Geochronology and Geochemistry. *Geotectonica et Metallogenia*, 38(2): 454—471(in Chinese with English abstract).
- Zhang, H.F., Sun, M., Zhou, X.H., et al., 2002. Mesozoic Lithosphere Destruction beneath the North China Craton: Evidence from Major-, Trace-Element and Sr-Nd-Pb Isotope Studies of Fangcheng Basalts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 144(2): 241—254. <https://doi.org/10.1007/s00410-002-0395-0>
- Zhang, L. Y., Li, N., Prelević, D., 2016. The Research Status of Olivine Trace Elements In-Situ Analysis and Perspectives of Its Application. *Acta Petrologica Sinica*, 32(6): 1877—1890(in Chinese with English abstract).
- Zhao, G. C., Cawood, P. A., Wilde, S. A., et al., 2000. Metamorphism of Basement Rocks in the Central Zone of the North China Craton: Implications for Paleoproterozoic Tectonic Evolution. *Precambrian Research*, 103(1—2): 55—88.
- Zhao, G. C., Wilde, S. A., Cawood, P. A., et al., 1999. Thermal Evolution of Two Textural Types of Mafic Granulites in the North China Craton: Evidence for Both Mantle Plume and Collisional Tectonics. *Geological Magazine*, 136(3): 223—240. <https://doi.org/10.1017/s001675689900254x>
- Zhao, G. C., Wilde, S. A., Cawood, P. A., et al., 2001. Archean Blocks and Their Boundaries in the North China Craton: Lithological, Geochemical, Structural and P-T Path Constraints and Tectonic Evolution. *Precambrian Research*, 107(1—2): 45—73. [https://doi.org/10.1016/s0301-9268\(00\)00154-6](https://doi.org/10.1016/s0301-9268(00)00154-6)
- Zhao, L., Wu, T. R., Luo, H. L., et al., 2008. Petrology, Geochemistry and Tectonic Implications of the Wengeng Gabbros in Wulatezhongqi Area, Inner Mongolia. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 44(2): 201—211(in Chinese with English abstract).
- Zheng, J. P., Lu, F. X., O'Reilly, S. Y., et al., 1999. Comparison between Palaeozoic and Cenozoic Lithospheric Mantle in the Eastern Part of the North China Block. *Acta Geologica Sinica*, 73(1): 47—56(in Chinese with English abstract).
- Zhou, C. Y., Ge, W. C., Wu, F. Y., et al., 2005. Petrological Characteristics and Tectonic Implications of the Tahe Gabbro in the Northern Part of the Great Xing'an Range. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 35(2): 143—149(in Chinese with English abstract).
- Zhu, R. X., Chen, L., Wu, F. Y., et al., 2011. Timing, Scale and Mechanism of the Destruction of the North China Craton. *Science China: Earth Science*, 41(5): 583—592(in Chinese).

附中文参考文献

- 陈光远, 孙岱生, 殷辉安, 1998. 成因矿物学与找矿矿物学. 重庆: 重庆出版社.
- 邓晋福, 莫宣学, 赵海玲, 等, 1994. 中国东部岩石圈根/去根作用与大陆“活化”. 现代地质, 8(3): 349—356.
- 邓晋福, 苏尚国, 刘翠, 等, 2006. 关于华北克拉通燕山期岩石圈减薄的机制与过程的讨论: 是拆沉, 还是热侵蚀和化学交代? 地学前缘, 13(2): 105—119.
- 邓晋福, 赵国春, 赵海玲, 等, 2000. 中国东部燕山期火成岩构造组合与造山—深部过程. 地质论评, 46(1): 41—48.
- 丁孝石, 1988. 西藏中南部花岗岩类中云母矿物类型特征及其地质意义. 矿床地质研究所所刊, (1): 33—49.
- 董建华, 陈斌, 周凌, 2003. 太行山南段符山岩体的成因: 岩石学和地球化学证据. 自然科学进展, 13(7): 767—774.
- 高山, 章军锋, 许文良, 等, 2009. 拆沉作用与华北克拉通破坏. 科学通报, 54(14): 1962—1973.
- 黄福生, 薛绥洲, 1990. 邯邢侵入体中幔源超镁铁质岩包体的发现及其矿物地球化学特征. 岩石学报, 6(4): 40—45.
- 霍腾飞, 杨德彬, 师江朋, 等, 2016. 华北地块中部早白垩世富碱侵入岩的成因: 锆石 U-Pb 年代学和 Sr-Nd-Hf 同位素制约. 岩石学报, 32(3): 697—712.
- 嵇少丞, 王茜, 杨文采, 2009. 华北克拉通泊松比与地壳厚度的关系及其大地构造意义. 地质学报, 83(3): 324—330.
- 李香庭, 1980. 电子探针显微分析. 硅酸盐, (4): 63—73.
- 林景仟, 谭东娟, 金烨, 1996. 鲁西地区中生代火成活动的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄. 岩石矿物学杂志, 15(3): 213—220.
- 林景仟, 谭东娟, 厉建华, 等, 2000. 华北陆块南缘带早侏罗世徐州班井侵入杂岩体. 长春科技大学学报, 30(3): 209—214.
- 罗照华, 邓晋福, 赵国春, 等, 1997. 太行山造山带岩浆活动特征及其造山过程反演. 地球科学, 22(3): 279—284.
- 马昌前, 杨坤光, 汤仲华, 等, 1994. 花岗岩类岩浆动力学—理论方法及鄂东花岗岩类例析. 武汉: 中国地质大学出版社, 210—212.
- 牛利锋, 张宏福, 2005. 南太行山地区中基性侵入岩中角闪石的矿物学及其成因. 大地构造与成矿学, 29(2): 269—277.
- 彭头平, 王岳军, 范蔚茗, 等, 2004. 南太行山闪长岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及岩石成因研究. 岩石学报, 20(5): 1253—1262.

- 邱家骧, 1993. 秦巴碱性岩. 北京: 地质出版社.
- 邱家骧, 廖群安, 1996. 浙闽新生代玄武岩的岩石成因学与 Cpx 矿物化学. 火山地质与矿产, 17(1): 16–25.
- 邱家骧, 曾广策, 1987. 中国东部新生代玄武岩中低压单斜辉石的矿物化学及岩石学意义. 岩石学报, 3(4): 1–9.
- 宋新宇, 冯钟燕, 1999. 太行山南段中生代侵入体微量元素地球化学及岩浆源区性质探讨. 华北地质矿产杂志, 14(1): 1–17.
- 苏本勋, 肖燕, 陈晨, 等, 2018. Fe-Mg 同位素在蛇绿岩中铬铁矿床成因研究中的应用潜力. 地球科学, 43(4): 1011–1024.
- 孙洋, 马昌前, 刘彬, 2017. 长江中下游地区燕山晚期基性岩浆活动的记录. 地球科学, 42(6): 891–908.
- 谭东娟, 林景仟, 1994. 华北地台中生代钾质岩浆区. 北京: 地震地质出版社.
- 王春光, 许文良, 王枫, 等, 2011. 太行山南段西安里早白垩世角闪辉长岩的成因: 锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素和岩石地球化学证据. 地球科学, 36(3): 471–482.
- 吴福元, 孙德有, 1999. 中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄. 长春科技大学学报, 29(4): 313–318.
- 吴福元, 徐义刚, 高山, 等, 2008. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论. 岩石学报, 24(6): 1145–1174.
- 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.
- 谢应雯, 张玉泉, 1990. 横断山区花岗岩类中角闪石的标型特征及其成因意义. 矿物学报, 10(1): 35–45.
- 熊发挥, 杨经绥, 徐向珍, 等, 2018. 阿尔巴尼亚布尔其泽纯橄榄岩壳中橄榄石的包裹体研究. 地球科学, 43(5): 1464–1473.
- 许文良, 迟效国, 袁朝, 等, 1993. 华北地台中部中生代闪长质岩石及深源岩石包体. 北京: 地质出版社.
- 许文良, 林景仟, 1990. 邯邢地区燕山期角闪闪长岩系的岩浆演化: 角闪石占主导的矿物分离结晶作用. 长春地质学院学报, (3): 259–264.
- 许文良, 林景仟, 1991. 河北邯邢地区角闪闪长岩中地幔纯橄榄岩包体的发现与研究. 地质学报, 65(1): 33–41.
- 许文良, 王冬艳, 刘晓春, 等, 2002. 徐淮地区早侏罗世侵入杂岩体中榴辉岩类包体的发现及其地质意义. 科学通报, 47(8): 618–622.
- 许文良, 王冬艳, 王清海, 等, 2004. 华北地块中东部中生代侵入杂岩中角闪石和黑云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年: 对岩石圈减薄时间的制约. 地球化学, 33(3): 221–231.
- 许文良, 杨德彬, 裴福萍, 等, 2009. 太行山南段符山镁闪长岩的成因: 拆沉陆壳物质熔融的熔体与地幔橄榄岩反应的结果. 岩石学报, 25(8): 1947–1961.
- 翟明国, 彭澎, 2007. 华北克拉通古元古代构造事件. 岩石学报, 23(11): 2665–2682.
- 张海东, 刘建朝, 陈正乐, 等, 2014. 太行山南段平顺杂岩体成因: 岩石学、年代学和地球化学证据. 大地构造与成矿学, 38(2): 454–471.
- 张柳毅, 李霓, Prelević, D., 2016. 橄榄石微量元素原位分析的现状及其应用. 岩石学报, 32(6): 1877–1890.
- 赵磊, 吴泰然, 罗红玲, 等, 2008. 内蒙古乌拉特中旗温更辉长岩类的岩石学、地球化学特征及其构造意义. 北京大学学报(自然科学版), 44(2): 201–211.
- 郑建平, 路凤香, O' Reilly, S. Y., 等, 1999. 华北地台东部古生代与新生代岩石圈地幔特征及其演化. 地质学报, 73(1): 47–56.
- 周长勇, 葛文春, 吴福元, 等, 2005. 大兴安岭北段塔河辉长岩的岩石学特征及其构造意义. 吉林大学学报(地球科学版), 35(2): 143–149.
- 朱日祥, 陈凌, 吴福元, 等, 2011. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制. 中国科学: 地球科学, 41(5): 583–592.