

北大巴山高桥地区镁铁质岩单斜辉石矿物化学特征及其指示意义

王坤明¹, 王宗起¹, 张英利¹, 王刚²

(1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;
2. 中国地质大学, 北京 100083)

摘要:在北大巴山高桥地区广泛出露一套镁铁质岩, 岩石类型为辉绿岩、辉长辉绿岩、辉绿玢岩和辉石闪长岩等。主要组成矿物为单斜辉石、斜长石、角闪石和铁钛氧化物。本文利用电子探针针对单斜辉石进行了详细研究, 表明该区所有单斜辉石均属于普通辉石, 从辉绿玢岩和辉长辉绿岩到辉石闪长岩, 单斜辉石具有从富镁向富铁演化的趋势。单斜辉石内部四面体位置的 Al 含量为 0.02~0.20, $Al^{IV}/Al^{Tot} = 85\% \sim 100\%$, 指示其形成于不饱和的碱性玄武质岩浆中, 与单斜辉石碱性判别图解和岩石地化特征反映的碱性岩系列相一致。单斜辉石的平衡温度为 1132~1164°C, 压力为 $0.71 \times 10^2 \sim 9.30 \times 10^2$ MPa, 显示明显的深源特征。Al 对 Si 的替代所导致的电荷不平衡主要由 Fe^{3+} 来补偿, Ti 大多形成钛辉石, Al^{VI} 进入八面体形成契尔马克分子 $Ca(Mg, Al^{VI})[(Al^{IV}, Si)_2O_6]_2$, Ca^{2+} 和 Na^+ 的类质同像置换使得辉石具有较高 Ca 含量和较低的 Na_2O 含量。综合岩体地质产状以及单斜辉石对构造环境的指示意义, 认为高桥岩体形成于与俯冲相关的弧后盆地环境, 为弧后拉张作用的产物。

关键词: 高桥地区, 单斜辉石, 矿物化学特征, 指示意义

中图分类号: P578.954

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)03-0527-13

Mineral chemistry characteristics and indication significance of clinopyroxene in mafic rock of Gaoqiao area, North Daba Mountains

WANG Kun-ming¹, WANG Zong-qi¹, ZHANG Ying-li¹ and WANG Gang²

(1. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China;
2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The mafic rock is exposed in Gaoqiao area of the North Daba Mountains. It consists of diabase, gabbro-diabase, diabase-porphyrite, and pyroxene diorite, and the minerals mainly include clinopyroxene, plagioclase, hornblende and Fe-Ti oxide. The clinopyroxene, belonging exclusively to augite, was studied in detail using microprobe in this paper. The clinopyroxene has the evolution trend from Mg-richness to Fe-richness with the variation of the rock from diabase-porphyrite through gabbro-diabase to pyroxene diorite. The clinopyroxene shows high Al^{IV} ($Al^{IV} = 0.02 \sim 0.20$, $Al^{IV}/Al^{Tot} = 85\% \sim 100\%$), and has the feature implying that the pyroxene was formed in the undersaturated alkaline basaltic magma, which is coincident with characteristics of the alkali series, as shown by the alkaline discrimination diagram of clinopyroxene and geochemistry of mafic rock. The temperature and pressure of clinopyroxene are 1132~1164°C and $0.71 \times 10^2 \sim 9.30 \times 10^2$ MPa respective-

收稿日期: 2013-09-27; 修订日期: 2014-04-03

基金项目: 中国地质调查局地质调查资助项目(1212011121091, 12120114009401); 中央级公益性科研院所基本科研业务费(K1313); 国家自然科学基金(41302080)

作者简介: 王坤明(1984-), 男, 汉族, 在读博士研究生, 构造地质学专业, E-mail: kunmingwang1984@gmail.com; 通讯作者: 王宗起, 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事大地构造学与成矿研究, E-mail: kwzq@vip.sina.com

ly, suggesting obvious deep-derived characteristics. The electric charge unbalance caused by the replacement of Si by Al is mainly compensated by Fe^{3+} , Ti mainly forms titanite, and Al^{VI} enters the octahedra to form $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Al}^{\text{VI}})[(\text{Al}^{\text{IV}}, \text{Si})_2\text{O}_6]$. Because of the isomorphism of Ca^{2+} and Na^+ , the clinopyroxene has high Ca and low Na_2O . The geological background and geochemical characteristics of clinopyroxene indicate that mafic rock in Gaoqiao area is the product of extension in a back-arc basin.

Key words: Gaoqiao area; clinopyroxene; mineral chemistry characteristics; indication significance

在北大巴山弧形带内部发育一系列区域性北西-南东走向基性岩墙群或岩脉(王存智等, 2009)(图1),并向东出露于武当地块及湖北枣阳-随州一带,构成一条在我国大陆造山带中少见的长达近千公里的大规模岩墙群或岩脉(周鼎武等, 1997; 张成立等, 2002)。前人对这些镁铁质岩的研究主要集中在岩体的野外地质特征、岩石学及岩石地球化学特征以及矿物基本特征的描述(黄月华等, 1992; 张成立等, 2002; 晏云翔, 2005)和少量的 Sr-Nd 同位素组成方面(晏云翔, 2005; 张成立等, 2007)。同时对北大巴山地区构造环境提出不同认识,表现为:扬子地台北缘大陆裂谷或裂陷带(滕人林等, 1990; 黄月华等, 1990, 1992; 夏祖春等, 1992; 张欣, 2010; 邹先武等, 2011),地幔柱上涌导致的扬子地台北缘大陆拉张环境(张成立等, 2002; 晏云翔等, 2005; 王存智等, 2009; 李夫杰等, 2011),弧后盆地(王宗起等, 2009),大洋板内洋岛/海山环境(向忠金等, 2010)。火成岩中造岩矿物的成分记录了岩浆在岩浆房中演化的全过程,对其进行系统研究对探讨岩浆演化及其相关过程的物理化学条件具有重要意义(张招崇等, 2005)。已有的矿物学研究集中在北大巴山地区基性-超基性潜火山岩矿物成分、镁铁质熔岩矿物学及煌斑杂岩内的捕虏体的矿物成分(黄月华等, 1990; 1993; 夏祖春等, 1992; 徐学义等, 1996; 1997)。然而,针对北大巴山地区镁铁质岩的矿物化学的研究相对较少,特别是镁铁质岩的造岩矿物的化学成分特征及其指示意义尚未引起足够关注,严重制约了北大巴山地区镁铁质岩岩浆演化、物理化学条件的研究。

单斜辉石是北大巴山地区镁铁质岩主要造岩矿物之一,同时也是高桥岩体不同岩相内的主要造岩矿物,单斜辉石的化学成分对确定岩体母岩浆性质、岩浆演化、物理化学条件以及判断大地构造环境具有重要指示意义(Nisbet and Pearce, 1977)。北大巴山地区基性-超基性潜火山岩的辉石矿物化学研究反映区域岩浆来源为碱-过碱性岩浆,为地幔型岩

浆,形成于板内裂陷带(夏祖春等, 1992)。金云角闪辉石岩类的地幔捕虏体的辉石成分特征证明北大巴山火山岩浆为地幔交代作用的产物(黄月华等, 1993, 1995; 徐学义等, 1996, 1997)。本文选取位于北大巴山弧形断裂中部的陕西紫阳县高桥镁质岩体进行研究,试图通过对高桥地区镁铁质岩体不同岩相内主要造岩矿物——单斜辉石矿物化学特征的详细研究,探讨高桥岩体岩浆系列和物理化学条件,并为北大巴山地区构造环境提供约束条件。

1 区域地质特征

北大巴山地区大地构造位置属于扬子陆块北缘弧后盆地陆坡带(王宗起等, 2009; 图1a)。区域出露地层以下古生界为主,构造主要以断裂为主,典型断裂分别为红椿坝断裂、高桥断裂和城口断裂(图1b),其中城口断裂为北大巴山与南大巴山的分界线。区域内岩浆活动较强烈,具脉动式多期次、多类型活动的特点。岩浆岩体多呈脉状体分布,其次有岩墙、岩床等,岩体多沿断裂、层理等部位产出。脉状岩体规模较大,长度一般为 50~2 000 m,宽 10~200 m,长轴方向和区域构造线方向一致,呈 NW-SE 向产出,总体走向 $310^\circ \sim 330^\circ$,倾角 $50^\circ \sim 80^\circ$ (图1b)。岩浆岩岩石类型为辉绿岩、辉长岩、辉绿玢岩、辉长辉绿岩以及辉石闪长岩等。区域岩体形成时代为晚奥陶-早志留世,尤其是近年来高精度年代学结果表明区域岩体主要成岩时代为早志留世(张成立等, 2007; 王存智等, 2009; 张欣, 2010)。

紫阳高桥地区镁铁质岩石主要侵位于奥陶系高桥组,地层岩性主要以泥质碳酸盐岩及浅绿灰色泥质板岩组合为主,下部黑灰、黑色碳质泥岩、粉砂岩组合,串珠状、透镜状、条带状泥质板岩夹互层板岩和泥晶灰岩,上部为黑灰、绿灰色泥质板岩,含钙质泥质板岩夹稀疏的灰岩薄层,而在紫阳高桥至双河镇一带地层岩性变为灰色中厚层含粉砂泥灰岩,偶夹粘土胶结粉屑白云岩。高桥地区岩体呈岩墙群

岩脉群分布, 总体平行长条状产出, 长轴方向为北北西向, 可细分出十条岩墙/岩脉, 多数岩墙/岩脉规模较小(宽度 $< 50\text{ m}$), 较大的岩墙/岩脉有两条(宽 $150\sim 200\text{ m}$) (图1)。岩体整体为顺层侵入和切层侵入, 与围岩接触带厚度较小, 部分岩墙/岩脉与围岩的接触带由于后期第四系覆盖或风化难以准确识别。规模较小的岩墙/岩脉内部岩性单一, 主要为辉绿岩相, 而规模较大的岩墙/岩脉分带明显, 主要为

辉绿岩相、辉长辉绿岩相、辉绿玢岩相、辉石闪长岩相, 且各岩相之间均为渐变过渡接触, 各岩相中尤以辉绿岩出露面积最大, 辉绿玢岩分布在辉绿辉长岩之内, 辉石闪长岩仅局限分布在辉绿岩相内。高桥岩体冷凝边较窄或不清, 仅个别较规模较大岩体冷凝边较宽($\sim 20\text{ cm}$)。考虑到不同岩性的对比分析, 选择规模较大的岩相分带明显的岩墙/岩脉作为本文研究的重点。

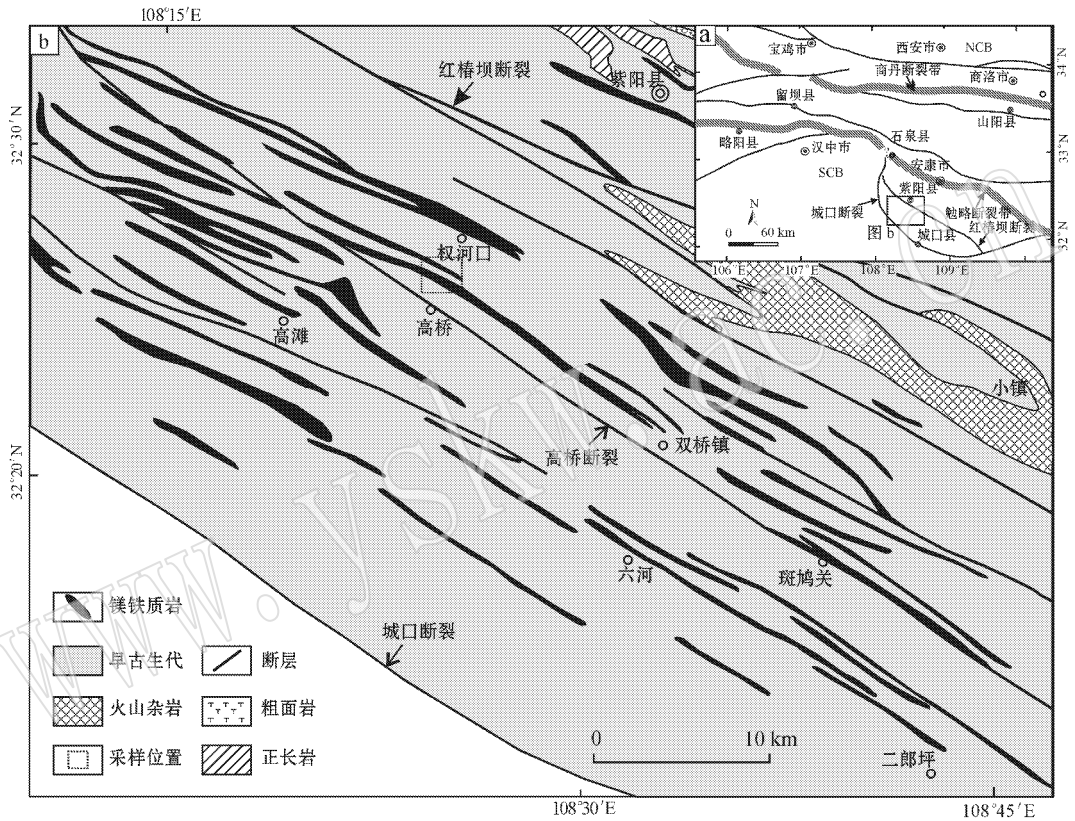


图1 秦岭大地构造简图(a, 据王宗起等, 2009)和北大巴山地区镁铁质岩分布图(b, 修改自陕西省地矿局, 1990^①)

Fig. 1 Simplified tectonic map of the Qinling orogenic belt (a, after Wang Zongqi *et al.*, 2009) and sketch map of mafic rocks for North Daba Mountains (b, after Shaanxi Bureau of Geology and Mineral Resources, 1990^①)

2 岩石学特征

辉绿岩是高桥地区的主要岩石类型, 辉绿岩呈灰绿色、灰黑色, 辉绿结构、嵌晶含长结构, 块状构造。单斜辉石含量约 $40\% \sim 45\%$, 多呈半自形粒状, 斜长石含量约 $45\% \sim 50\%$, 多呈细长条状晶体, 且穿插辉石颗粒现象明显, 常形成明显的辉绿结构和嵌晶含长结构(图2a), 铁钛氧化物多呈他形粒状晶体,

零星分布于辉石和长石颗粒之间, 角闪石含量较少(约 5%)。

辉绿玢岩呈灰绿、灰黑色, 斑状结构、块状构造, 斑晶主要为单斜辉石(图2b), 含量约 $40\% \sim 50\%$, 呈自形-半自形晶产出, 部分发生绿泥石化, 铁钛氧化物(钛铁矿、磁铁矿)多呈他形粒状晶体, 含量约 8% 左右, 主要分布于辉石颗粒之间, 少量包含于辉石颗粒内部, 基质主要由斜长石、单斜辉石、金属矿物、磷灰石等组成。

① 陕西省地矿局. 1990. 紫阳幅 I-49-31 1:20 万地质图说明书. 内部资料.

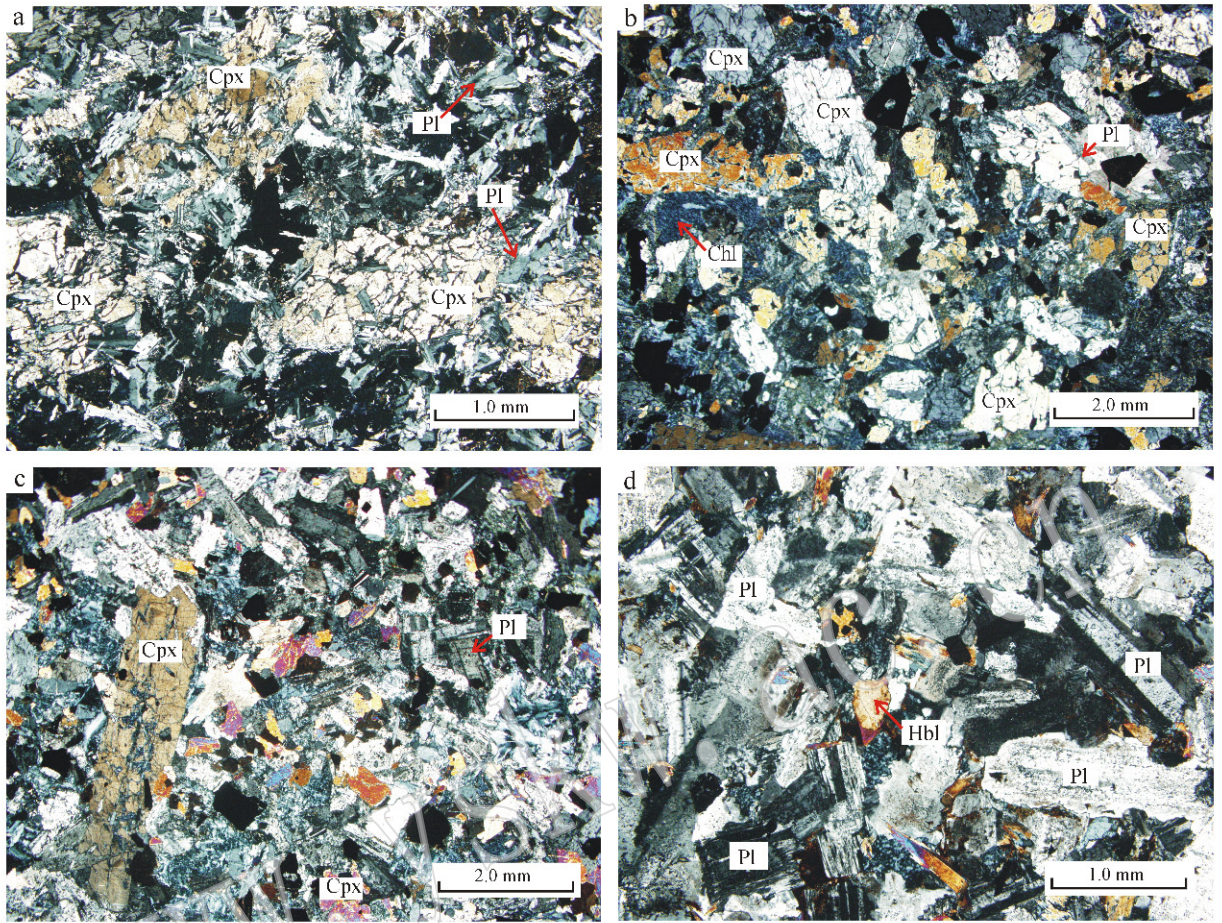


图 2 高桥地区镁铁质岩的显微照片(正交偏光)

Fig. 2 Photomicrographs (crossed nicols) of mafic rocks from Gaoqiao area

a—辉绿岩; b—辉绿玢岩; c—辉长辉绿岩; d—辉石闪长岩; Cpx—单斜辉石; Pl—斜长石; Hbl—角闪石

a—diabase; b—diabase-porphyrite; c—gabbro-diabase; d—pyroxene diorite; Cpx—clinopyroxene; Pl—plagioclase; Hbl—hornblende

辉长辉绿岩呈灰绿色,辉长结构,块状构造。斜长石自形-半自形粒状,含量约为 50%,单斜辉石含量约为 35%~37%,呈半自形晶产出,除个别辉石颗粒粒径较大外(>2 mm),多数辉石颗粒粒径与斜长石颗粒粒径相差不大,常和斜长石构成辉长结构,局部包含斜长石构成嵌晶结构(图 2c),铁钛氧化物(钛铁矿、磁铁矿)含量约为 5%左右,多呈他形粒状晶分布在辉石或长石颗粒之间,少量包含于辉石颗粒内部,副矿物磷灰石、榍石含量为 5%左右,磷灰石多呈细小的柱状晶体。

辉石闪长岩呈浅灰绿色,自形-半自形结构,块状构造,斜长石含量 60%~65%,呈长条状或短柱状,部分发生钠长石化(图 2d),角闪石和辉石含量 20%~25%,多呈半自形晶分布于长石颗粒之间,且部分发生绿泥石化,石英含量<5%,另含少量榍石、

磷灰石、磁铁矿、钛铁矿等,多呈他形粒状晶体产出,总含量约 5%左右,其中铁钛氧化物含量明显低于其他岩石类型。

高桥岩体内部岩石类型主要为辉长辉绿岩、辉绿岩、辉绿玢岩、辉石闪长岩,具有明显的辉长结构、辉绿辉长结构、辉绿结构、斑状结构,表明该区各类型岩石应为典型的中深成-浅成相的岩石序列,且岩体与地层围岩的侵入关系主要为顺层侵入和切层侵入,可见明显的宽度不等的冷凝边,表明岩体与围岩呈明显的深成-中深成-浅成侵入关系,同时结合该区岩体岩性主要为辉绿岩、岩体群总体规模较小,接触变质带厚度较小,认为该区应岩体该是以深成-中深成-浅成相为主的岩石序列和侵入关系,反映了明显的深成侵入特征。

3 单斜辉石矿物化学特征

3.1 样品分析及方法

样品主要取自高桥岩体内各岩相带内部,制备成 0.05 mm 厚的光薄片,进而对单斜辉石单矿物进行电子探针分析测试。电子探针分析测试在中国地质科学院矿产资源所电子探针实验室完成,仪器型号为 JXA-8230,硅酸盐、氧化物分析条件为加速电压 5 kV、电流 20 nA、束斑直径 5 μm ,标样采用天然矿物或合成金属国家标准,分析精度为 0.01%,测试结果见表 1。

3.2 矿物化学特征

该区辉石多呈自形-半自形结构,或呈单个辉石颗粒斑晶产出(图 2b、2c),单颗粒辉石内部未见变形和环带结构。辉石颗粒与长石形成明显的嵌晶含长结构(图 2a),指示该区岩体内部长石同时或早于辉石结晶。27 件辉石电子探针结果,阳离子数和端员组分见表 1,单斜辉石总体化学成分表现为 $\text{SiO}_2 =$

48.04% ~ 51.67%、 $\text{TiO}_2 = 0.79\% \sim 2.33\%$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 = 1.82\% \sim 4.63\%$ 、 $\text{FeO} = 7.66\% \sim 10.55\%$ 、 $\text{MgO} = 13.92\% \sim 15.95\%$ 、 $\text{CaO} = 20.68\% \sim 22.02\%$ 、 $\text{Na}_2\text{O} = 0.21\% \sim 0.43\%$,总体上表现为低 Na,高 Fe、Ti 特征。据 Morimoto(1988)的辉石分类命名方案,高桥岩体所有的单斜辉石为 Ca-Mg-Fe 单斜辉石系列(图 3a),在 Wo-En-Fs 图(图 3b)中,主要位于普通辉石区($\text{Wo}_{41.61 \sim 44.71} \text{En}_{39.92 \sim 44.05} \text{Fs}_{12.07 \sim 17.19}$)属普通辉石,与北大巴山笔架山-铜洞湾镁铁质熔岩内部辉石多为透辉石(仅个别为普通辉石)特征(黄月华等,1990)相区别。根据 Deer 等(1978)基于 TiO_2 含量的分类原则($\text{TiO}_2 < 1\%$ 称为普通辉石, $\text{TiO}_2 = 1\% \sim 2\%$ 为含钛普通辉石, $\text{TiO}_2 > 2\%$ 称为钛普通辉石),高桥岩体内部辉石主要为含钛普通辉石,少量为普通辉石和钛普通辉石。高桥岩体内部辉石种属的单一性,与北大巴山地区基性-超基性次火山岩内部辉石种属的多样性相区别,后者主要包括透辉石、普通辉石和霓辉石(霓辉石为含钠透辉石属于 Ca-Na 系列)(夏祖春等,1992)。

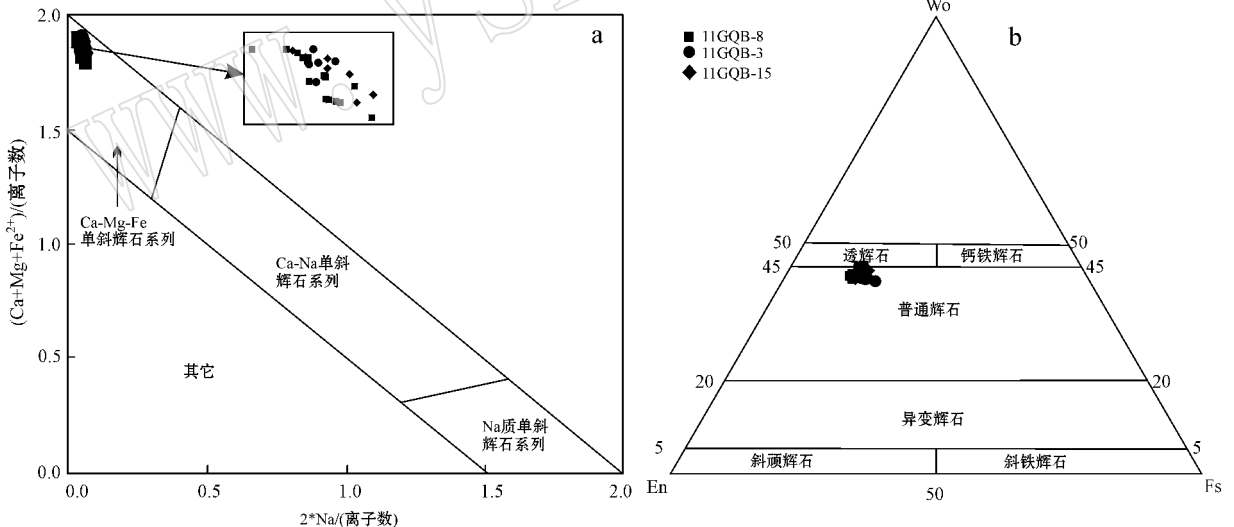


图 3 高桥地区镁铁质岩单斜辉石系列划分图解(a)和单斜辉石分类图解(b)据 Morimoto, 1988)

Fig. 3 Discrimination diagram of the series for pyroxene (a) and discrimination diagram of clinopyroxene (b) from mafic rock in Gaoqiao area (after Morimoto, 1988)

岩体内各岩性的单斜辉石的 $\text{Mg}^\#$ 普遍较高,表现为辉长辉绿岩中单斜辉石的 $\text{Mg}^\# = 75.19\% \sim 78.88\%$,辉绿岩中单斜辉石的 $\text{Mg}^\# = 70.83\% \sim 75.12\%$,辉石闪长岩中单斜辉石的 $\text{Mg}^\# = 73.28\% \sim 76.93\%$ 。其中,辉石闪长岩内部单斜辉石 $\text{Mg}^\#$ 高于辉绿岩的 $\text{Mg}^\#$,可能是因为其属于过渡岩性,

仍具有明显基性岩特征。单斜辉石各主要组分与 $\text{Mg}^\#$ 的线性关系具有一定的指示意义,其中 CaO 与 $\text{Mg}^\#$ 具正相关关系,FeO 与 $\text{Mg}^\#$ 反相关(图 4),表明随着岩浆演化,单斜辉石由富镁向富铁演化,而 TiO_2 、 Al_2O_3 与 $\text{Mg}^\#$ 之间没有明显的相关性,表明其经历了较弱的结晶分异过程。

表1 高桥地区镁铁质岩内部单斜辉石电子探针分析结果

Table 1 The EPMA data of clinopyroxene from mafic rock for Gaoqiao area

岩石名称	辉长辉绿岩														w _B /%
	G8-1.2	G8-1.3	G8-1.4	G8-1.5	G8-1.6	G8-2.1	G8-2.2	G8-2.4	G8-2.5	G8-4.1	G8-4.2	G8-4.4	G8-4.5	G8-5.1	
样品号															
SiO ₂	51.38	49.06	51.08	48.94	51.29	50.49	48.77	48.04	51.16	49.29	49.43	50.47	51.20	51.51	
TiO ₂	1.41	2.11	1.28	2.01	1.29	1.28	2.31	2.33	1.30	1.82	1.84	1.28	1.28	1.04	
Al ₂ O ₃	2.72	4.63	2.82	4.46	2.61	2.75	4.40	4.57	2.50	4.06	3.69	2.61	2.64	2.16	
Cr ₂ O ₃	0.01	0.00	0.04	0.05	0.01	0.04	0.00	0.01	0.02	0.03	0.01	0.00	0.02	0.02	
FeO	7.86	8.35	7.92	8.02	7.67	7.66	8.58	8.44	8.14	8.33	7.75	8.11	7.85	8.28	
MnO	0.17	0.17	0.08	0.14	0.16	0.20	0.16	0.15	0.21	0.15	0.20	0.18	0.19	0.29	
MgO	15.72	14.32	15.50	14.48	15.59	15.90	14.45	14.21	15.94	14.85	14.50	15.95	15.67	15.91	
CaO	21.04	21.81	21.48	21.85	21.57	21.53	21.63	21.96	21.19	22.02	21.67	21.45	21.21	21.49	
Na ₂ O	0.28	0.35	0.31	0.35	0.30	0.34	0.37	0.43	0.32	0.37	0.40	0.35	0.32	0.21	
K ₂ O	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	
Total	100.62	100.85	100.57	100.31	100.55	100.25	100.72	100.13	100.77	100.92	99.53	100.41	100.41	100.93	
阳离子数(以6个氧原子为基础)															
Si	1.89	1.82	1.89	1.82	1.90	1.88	1.82	1.80	1.89	1.83	1.85	1.87	1.89	1.90	
Al ^{IV}	0.11	0.18	0.11	0.18	0.10	0.04	0.18	0.20	0.04	0.17	0.15	0.04	0.11	0.03	
Al ^{VI}	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	
Ti	0.04	0.06	0.04	0.06	0.04	0.04	0.06	0.07	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Fe ³⁺	0.05	0.09	0.07	0.10	0.07	0.12	0.11	0.14	0.09	0.13	0.08	0.13	0.07	0.09	
Fe ²⁺	0.19	0.16	0.17	0.15	0.17	0.12	0.15	0.12	0.16	0.12	0.16	0.11	0.17	0.16	
Mn	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	
Mg	0.86	0.79	0.85	0.80	0.86	0.88	0.80	0.79	0.88	0.82	0.81	0.88	0.86	0.88	
Ca	0.83	0.87	0.85	0.87	0.85	0.86	0.86	0.88	0.84	0.88	0.87	0.85	0.84	0.85	
Na	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
各端员组分及计算结果															
Wo	42.37	44.54	43.13	44.63	43.24	42.76	43.99	44.71	42.04	44.13	44.47	42.34	42.56	42.43	
En	44.05	40.70	43.29	41.16	43.49	43.93	40.89	40.24	44.00	41.41	41.40	43.80	43.77	43.69	
Fs	12.58	13.47	12.46	12.91	12.19	12.07	13.75	13.49	12.83	13.13	12.66	12.62	12.52	13.12	
Mg [#]	78.17	75.50	77.83	76.44	78.47	78.88	75.19	75.22	77.87	76.26	77.05	78.01	78.17	77.54	
t ₁ /°C	1.142	1.164	1.143	1.162	1.141	1.143	1.161	1.163	1.139	1.157	1.153	1.141	1.141	1.136	
t ₂ /°C	1.164	1.240	1.168	1.234	1.159	1.089	1.231	1.239	1.090	1.217	1.204	1.089	1.161	1.083	
p/10 ² MPa	2.31	9.30	2.69	8.75	1.91	8.53	9.24	7.21	6.02	7.21	6.02	2.03	2.03	2.03	

续表 1
Continued Table 1

岩石名称	辉绿岩										辉石闪长岩				
	G8-5.4	G3-2.1	G3-3.6	G3-4.3	G3-5.1	G3-5.9	G15-4.4	G15-3.1	1G15-3.3	G15-2.3	G15-1.1	G15-1.3	G15-1.4		
样品号	49.75	51.18	49.89	50.51	51.67	51.42	50.53	50.24	49.03	51.27	51.31	49.41	51.46		
SiO ₂	1.63	0.99	0.86	1.13	0.79	0.98	1.65	1.58	1.89	1.23	1.32	1.98	1.14		
TiO ₂	3.42	2.12	2.27	2.27	1.82	2.27	3.45	3.39	4.04	2.32	2.39	4.19	2.37		
Al ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.01	0.01	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00		
CaO	8.09	9.65	9.56	9.06	10.55	9.60	8.28	8.38	9.07	8.49	8.29	9.10	8.53		
FeO	0.19	0.30	0.35	0.26	0.45	0.30	0.11	0.04	0.15	0.23	0.25	0.21	0.24		
MnO	14.95	15.09	15.18	15.20	14.30	14.79	14.47	14.54	14.29	15.76	15.42	13.92	15.20		
MgO	21.97	21.24	21.24	21.18	20.68	21.14	21.88	21.66	21.72	21.11	21.29	21.13	21.49		
CaO	0.32	0.33	0.32	0.31	0.32	0.36	0.35	0.39	0.40	0.31	0.29	0.43	0.35		
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
K ₂ O	100.40	100.90	99.70	99.93	100.66	100.87	100.70	100.23	100.61	100.73	100.60	100.43	100.81		
Total	1.85	1.90	1.88	1.89	1.93	1.91	1.87	1.87	1.83	1.90	1.90	1.84	1.90		
Si	0.15	0.03	0.02	0.03	0.07	0.09	0.13	0.13	0.17	0.03	0.10	0.16	0.10		
Al ^{IV}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.03	0.01		
Al ^{VI}	0.05	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.05	0.04	0.05	0.03	0.04	0.06	0.03		
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Cr	0.11	0.11	0.16	0.11	0.06	0.08	0.06	0.07	0.12	0.09	0.06	0.07	0.08		
Fe ³⁺	0.14	0.19	0.13	0.17	0.27	0.21	0.20	0.18	0.16	0.17	0.19	0.21	0.19		
Fe ²⁺	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01		
Mn	0.83	0.84	0.85	0.85	0.80	0.82	0.80	0.81	0.80	0.87	0.85	0.77	0.84		
Mg	0.88	0.85	0.86	0.85	0.83	0.84	0.87	0.86	0.87	0.84	0.84	0.84	0.85		
Ca	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03		
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
K	44.17	42.03	41.99	42.27	41.61	42.24	44.51	44.09	43.93	41.92	42.67	43.57	42.90		
Wo	41.81	41.54	41.76	42.21	40.03	41.11	40.95	41.19	40.20	43.54	42.99	39.92	42.23		
En	12.87	15.24	15.09	14.39	17.19	15.33	13.25	13.29	14.40	13.42	13.30	14.90	13.60		
Fs	76.88	73.76	74.16	75.12	70.83	73.45	75.80	75.69	73.95	76.93	76.93	73.28	76.17		
Mg [#]	1.150	1.135	1.137	1.137	1.132	1.137	1.150	1.150	1.157	1.137	1.138	1.158	1.138		
t ₁ /°C	1.192	1.082	1.079	1.086	1.129	1.146	1.193	1.191	1.217	1.088	1.151	1.223	1.150		
t ₂ /°C	4.94					0.71	4.98	4.85	7.25	1.13	7.80		1.05		

各端员组分及计算结果

注: 本文数据是在中国地质科学院矿产资源所电子探针实验室采用 JXA-8230 电子探针分析, 电压 5 kV, 电流 20 nA, 束斑直径 5 μm, 分析精度为 0.01%。TFcO 为全铁氧化物, Mg[#] = 100 Mg/(Mg + Fe), Fe = Fe³⁺ + Fe²⁺, t₁、t₂ 为辉石温度 (t₁ = 1 097.135 + 33.133X^{Ca} - 0.764(X^{Ca})² + 11 Al₂O₃, t₂ = 1 056.898 6 + 902.797 8(Al)), p = -7.538 3 + 83.169 2(Al)。表格中的样号 G8、G3、G15 分别是样号 11GQB8、11GQB3、11GQB15 的缩写。

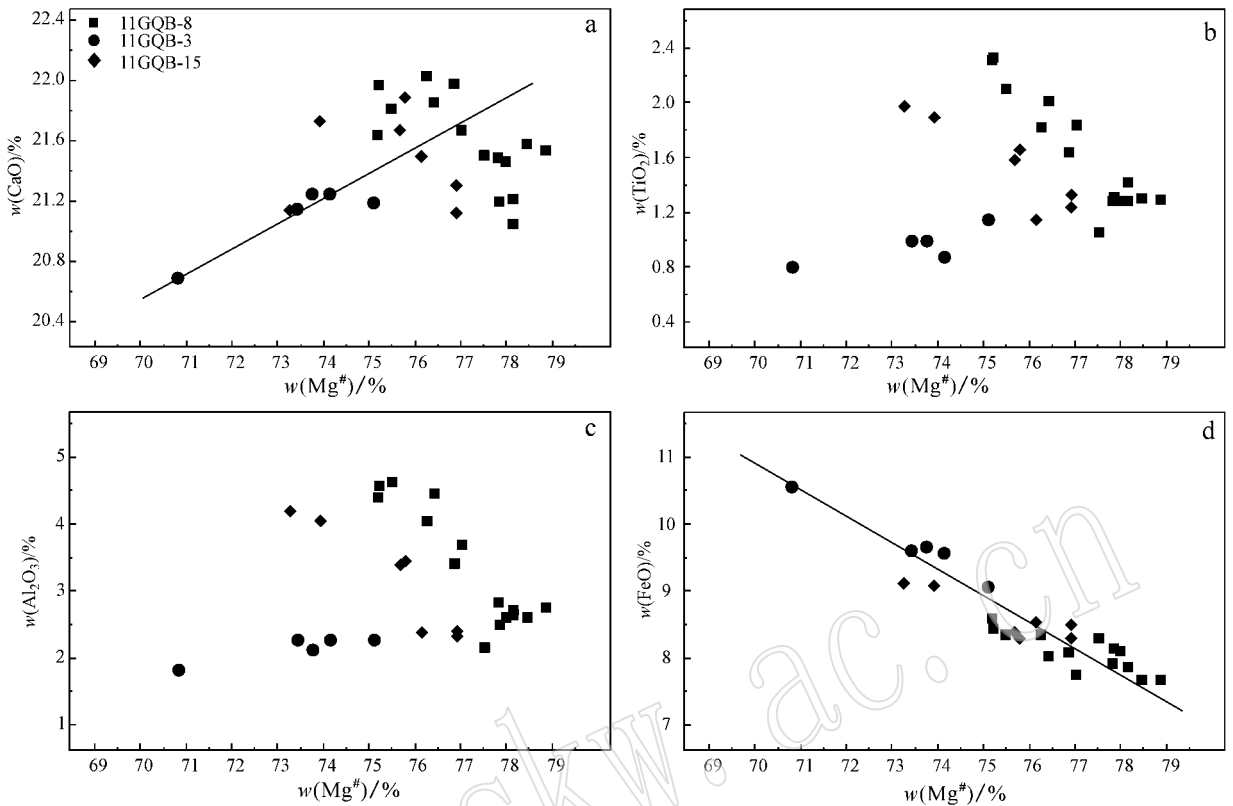


图4 高桥地区镁铁质岩单斜辉石内部各组分与 $Mg^{\#}$ 之间的相关图解

Fig. 4 Correlation diagrams of chemical composition versus $Mg^{\#}$ for clinopyroxene from mafic rock in Gaoqiao area

4 讨论

4.1 岩体母岩浆成分系列

研究表明,火成岩中单斜辉石的 Si 与 Al 具互不相容性,是确定母岩浆类型的标型元素之一(Kushiro, 1960; LeBas, 1962)。而且在 SiO_2 过饱和的拉斑玄武质岩浆中结晶出的单斜辉石,四面体中 Si 的含量比例较高,而 Al 的含量较低,来自不饱和和碱性玄武质岩浆中的单斜辉石,其四面体中的 Si 含量较低,而 Al 的含量较高(Kushiro, 1960)。

高桥岩体标准矿物内部出现二氧化硅不饱和和矿物——霞石,表明该区岩石为碱性、过碱性岩石系列,而且辉石内部四面体位置的 Al(Al^{IV})含量较高[变化区间为 0.02~0.20(平均为 0.10),且 $Al^{IV}/Al^{Tot} = 85\% \sim 100\%$ (平均为 94%) (Al^{Tot} 为 Al 总量)]与不饱和碱性岩浆系列具有明显的对应关系。在 Ti-(Ca+Na)图解(图 5)中,样品全部位于碱性玄武岩,说明母岩浆为碱性岩系列。

依靠岩体的岩石地化特征对高桥镁铁质岩体的

岩浆系列进行验证,该区大部分辉绿岩类 SiO_2 的含量小于 45%,因此该区辉绿岩类岩石主要依据矿物组合和组构特征而定名(黄月华等, 1992),高桥岩体的岩石地球化学特征显示其具有高 Na_2O (1.78%~5.28%)、高 $Na_2O + K_2O$ (变化于 2.09%~10.26%)、高里特曼指数(σ)变化区间为 3.34~11.59 特征,为明显的弱碱性和碱性岩(表 2)。与单斜辉石成分反映出的岩浆系列相一致,进一步说明高桥岩体母岩浆为碱性岩系列。

此外,较高的 La/Sm ($La/Sm > 4.5$)、(Th/Nb)_N (≥ 1)和 (Th/Ta)_N (≥ 1)是地壳混染的标志(Saunders *et al.*, 1992; Lassiter and DePaolo, 1997; Neal *et al.*, 2002),高桥岩体内部辉石闪长岩高 La/Sm (5.16)、(Th/Nb)_N (0.94)和 (Th/Ta)_N (1.06),明显不同于辉绿岩类的相应值(2.90~3.48, 0.67~0.82, 0.62~0.72),指示该区辉石闪长岩应该是地壳混染的产物。同时, Zr 和 Hf 在地壳中相对富集(Rudnick, 1995; Wedepohl, 1995),高桥岩体辉石闪长岩的 Zr 和 Hf (683×10^{-6} , 16.70×10^{-6})明显高于辉绿岩类($92.40 \times 10^{-6} \sim 198 \times 10^{-6}$, $3.33 \times 10^{-6} \sim$

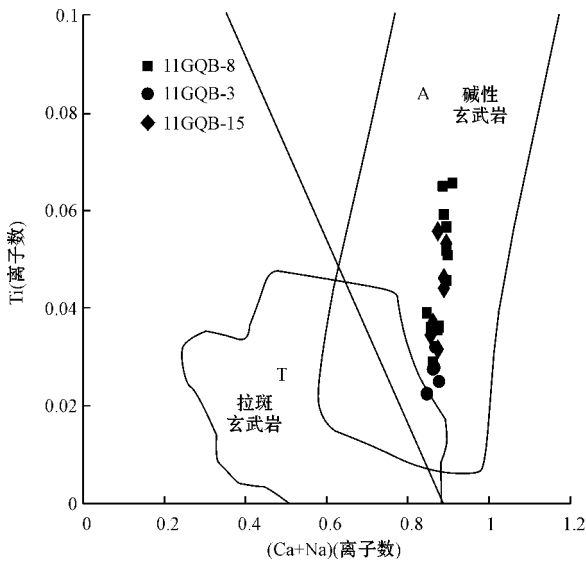


图 5 高桥地区镁铁质岩单斜辉石 Ti-(Ca+Na) 图解 据 Leterrier *et al.*, 1982)

Fig. 5 Ti-(Ca+Na) diagram of clinopyroxene from mafic rock in Gaoqiao area (after Leterrier *et al.*, 1982)

表 2 高桥地区镁铁质岩内部单斜辉石寄主岩石
主量元素分析结果 $\omega_B/\%$

Table 2 The geochemistry analyses result of host rock for the clinopyroxene in mafic rock for Gaoqiao area

岩性	辉绿玢岩		辉长辉绿岩		辉石闪长岩
样号	111GQB7	111GQB11	111GQB3	111GQB9	111GQB14
SiO ₂	42.41	41.79	44.21	43.93	58.75
TiO ₂	3.57	5.40	4.06	4.34	1.28
Al ₂ O ₃	14.13	13.57	13.93	13.13	17.09
TFe ₂ O ₃	14.98	15.75	14.87	16.17	7.19
MnO	0.16	0.22	0.24	0.23	0.11
MgO	6.64	5.59	4.74	7.31	1.72
CaO	13.06	11.14	8.27	8.61	2.48
Na ₂ O	1.78	2.37	4.42	2.94	5.28
K ₂ O	0.31	0.43	0.27	0.02	4.98
P ₂ O ₅	0.19	0.63	1.75	0.45	0.36
LOI	2.70	2.74	2.38	2.83	0.78
总量	99.93	99.63	99.14	99.96	100.02
σ	4.28	11.59	7.43	3.34	6.53
Na ₂ O+K ₂ O	2.09	2.8	4.69	2.96	10.26
Zr/10 ⁻⁶	92.40	161	198	162	683
Hf/10 ⁻⁶	3.33	5.21	5.79	5.21	16.70
La/Sm	2.90	3.45	3.05	3.48	5.16
(Th/Nb) _N	0.82	0.67	0.68	0.76	0.94
(Th/Ta) _N	0.69	0.64	0.62	0.72	1.06
标准矿物(CIPW)					
霞石	0.58	0.74	0.62	0	0

注：测试单位为国家地质实验测试中心。其中 $\sigma = \omega(Na_2O + K_2O) / \omega(SiO_2 - 43)$

5.79×10^{-6}), 同样说明辉石闪长岩为地壳混染产物。

4.2 辉石结晶的物理化学条件

依据马鸿文(1985)提出的单斜辉石与温度的关系式： $t_1 = 1097.135 + 33.133X_{Ca}^{Cpx} - 0.764(X_{Ca}^{Cpx})^2 + 11Al_2O_3$ 。其中 $X_{Ca}^{Cpx} = Ca / (Ca + Mg + Fe^{2+})$ ，高桥岩体的单斜辉石的结晶温度为 $1132 \sim 1164^\circ C$ 。应用Thompson(1974)提出的Al含量与温度之间的关系式： $t_2 = 1056.8986 + 902.7978(Al)$ ，得出的温度为 $1079 \sim 1240^\circ C$ 。根据二者温度值的变化区间，认为 t_1 的温度值代表了辉石的结晶温度。依据Thompson(1974)给出的公式， $p = -7.5383 + 83.1692(Al)$ ，计算本区辉石斑晶的结晶压力为 $0.71 \times 10^2 \sim 9.30 \times 10^2$ MPa(表1) 相对应的形成深度为 $2.34 \sim 30.69$ km(按照 100 MPa 相当于 3.3 km 深度计算)。高桥岩体内部不同岩性的辉石颗粒成分中Al含量的变化区间较大，进而导致压力计算结果的变化区间较大，研究发现压力的变化特征与不同岩性的产出特征形成较好的对应关系，其中辉绿岩内的单斜辉石结晶时的温度、压力较低，温度为 $1132 \sim 1137^\circ C$ ，压力变化区间为 $\leq 0.71 \times 10^2$ MPa，与辉绿岩的浅成成因相一致，辉石闪长岩内的单斜辉石温度、压力中等，温度为 $1137 \sim 1158^\circ C$ ，压力变化主要集中于 $4.85 \times 10^2 \sim 7.80 \times 10^2$ MPa，与辉石闪长岩的深成成因相一致，而辉长辉绿岩内部单斜辉石温度、压力变化区间较大，温度为 $1136 \sim 1164^\circ C$ ，压力主要集中于 $1.91 \times 10^2 \sim 9.30 \times 10^2$ MPa，与辉长辉绿岩为辉长岩、辉绿岩的过渡岩性而具有深成—浅成成因相一致。单斜辉石结晶温度较高，深度变化区间较大，辉石结晶深度明显大于大洋地壳的平均厚度($5 \sim 6$ km)，反映了明显的深源特征，与高桥岩体为深成—中深成—浅成相为主的岩石序列特征相一致。

4.3 辉石成因的指示意义

单斜辉石四面体内Al含量受其结晶时岩浆中SiO₂的浓度决定，SiO₂不足时，Al^{IV}进入四面体来充填其位置上Si的不足所引起的空缺，而且四面体位置Al对Si的置换越多，辉石中Ti含量越高(Verhoogen, 1962) 本区标准矿物霞石的出现，说明岩浆体系为低SiO₂浓度，因此Al大量进入四面体位置，Al与Si的关系符合 $y = 2 - x$ (图6a) x, y 分别为Al离子数和Si离子数，而Al对Si的替代所导致的多余负电荷将由Ti、Al和Fe³⁺进入八面体位置来补

偿。本区单斜辉石典型的铝代硅现象,说明普通辉石具有岩浆作用成因的特点。进入八面体的 Al 主要是呈六次配位的 Al, Al^{VI} 进入八面体即通过 $Mg + Si = Al^{VI} + Al^{IV}$ 的替代反应方式形成契尔马克分子 $Ca(Mg, Al^{VI})[(Al^{IV}, Si)_2O_6]$, 进入到八面体内部的 Al^{VI} 占 Al 总量的 0~15%, 平均为 6%。Ti 和 Fe³⁺ 与 Si 呈负相关表明可以来补偿多余的电荷, 如果进入八面体位置是 Fe³⁺, 则 Fe³⁺ 与 Si 的关系大致沿着 $y = 2 - x$ 趋势线分布, 若进入的是 Ti, 则 Ti 与 Si 关系大致位于 $y = 1 - 0.5x$ 趋势线两侧(牛晓露等,

2009) x, y 分别为 Fe³⁺ 离子数和 Ti 离子数, x 为 Si 离子数)。该区 Ti 与 Si 虽然负相关性较好, 但都位于 $y = 1 - 0.5x$ 趋势线之下(图 6b), 只有少量形成 $CaMg_{0.5}Ti_{0.5}AlSiO_6$, 而辉石内部 Fe³⁺ 与 Si 的关系大致沿着 $y = 2 - x$ 分布其两侧(图 6c), Fe³⁺ 进入到八面体, 以 $Mg + Si = Fe^{3+} + Al^{IV}$ 的反应形式形成钙铁铝辉石, 即 $Ca(Fe^{2+}, Fe^{3+})[(Al, Si)_2O_6]$, 由此可见, 由 Al 对 Si 替代引起的电荷不平衡主要是由 Fe³⁺ 来补偿的。

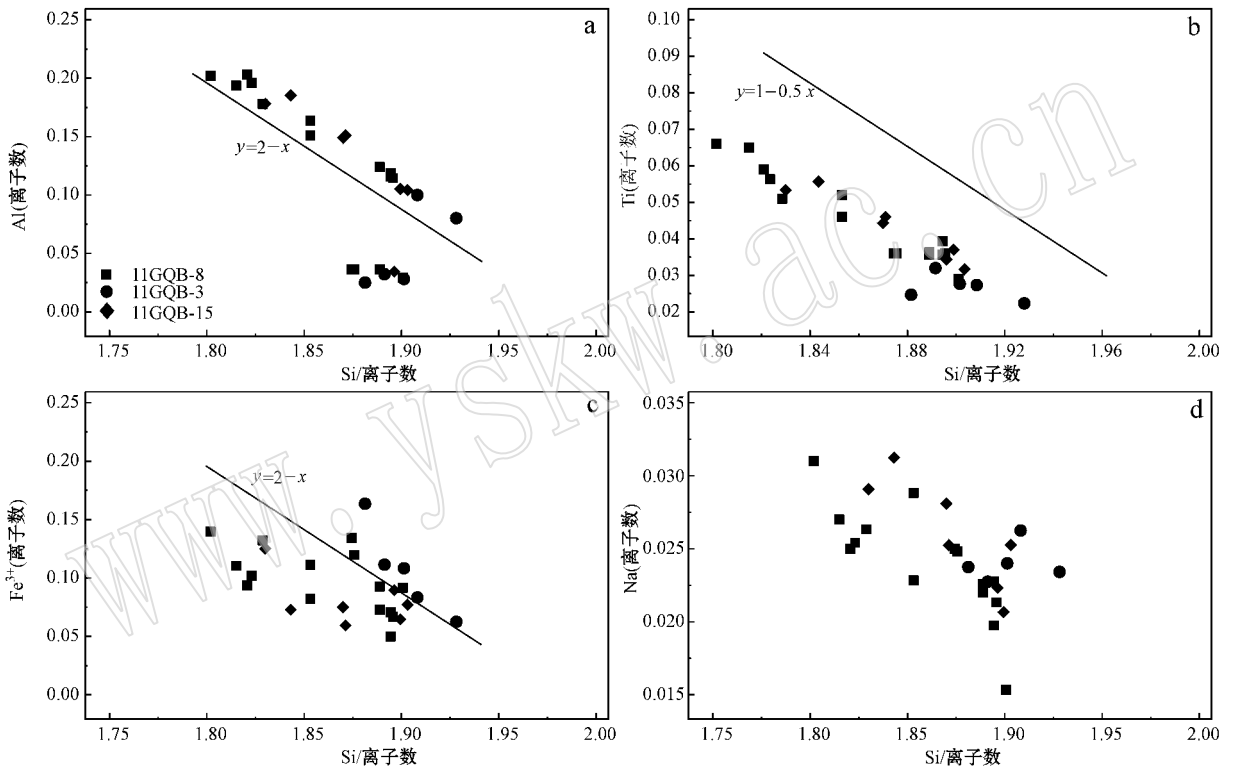


图 6 高桥地区镁铁质岩单斜辉石各阳离子组成的相关关系

Fig. 6 Correlation diagrams of the positive ion composition for clinopyroxene from mafic rock in Gaoqiao area

而进入单斜辉石八面体中的 Ti 少部分用于补偿多余电荷, 大多数是以 $Si + Mg = Al^{IV} + Mg_{0.5}Ti_{0.5}$ 的替代反应形式形成钛辉石 ($NaMg_{0.5}Ti_{0.5}Si_2O_6$), 与该区含钛辉石的普遍出现相一致, 但由于 Ti 的含量经过之前补偿电荷有部分消耗, 所以形成的钛辉石内部辉石 Ti 含量稍微偏低, 以含钛普通辉石为主。Na 与 Ti 也呈明显的负相关关系, 但二者不具明显的线性关系(图 6d), 同时 Na 也可以补偿多余电荷, 由于辉石内部 Na 含量较少, 主要与 Ti 生成钛辉石, 没有足够的 Na 生成霓石, 另一方面, 高桥岩体辉石 $Fe^{3+}/(Fe^{2+} + Fe^{3+}) = 0.19 \sim 0.55$, 平均为

0.36, 不高的氧逸度造成该区碱性岩未出现霓辉石和或霓石-霓辉石系列, 原因是 Fe 主要以 Fe²⁺ 形式存在, 没有足够的 Fe³⁺ 生成霓石。考虑到该区岩石的岩石化学特征为高 Na₂O, 而辉石内部 Na 含量 (Na₂O = 0.27% ~ 0.88%) 较低, 究其原因是 Ca²⁺ 和 Na⁺ 的类质同像置换所致, 两者半径相似而价位不同, 进行类质同像较高的 Ca²⁺ 较 Na⁺ 优先进入辉石晶格, 而 Na 则进入较晚形成的矿物, 因此 Ca 绝大部分都进入了辉石晶格(与辉石高钙特征相一致), 钠则主要进入了随后结晶的长石晶格中。

4.4 构造环境指示意义

对于北大巴山构造环境判断,前人分别从镁铁质侵入岩和火山岩岩石化学、潜火山岩和火山岩矿物化学、沉积岩及岩石组合角度已做过详细的工作。进而得出以下几种观点:① 扬子地台北缘大陆裂谷或裂陷带(滕人林等,1990;黄月华等,1990,1992;夏祖春等,1992;张欣,2010;邹先武等,2011);② 与地幔柱上涌导致的扬子地台北缘大陆拉张环境(张成立等,2002;晏云翔等,2005;王存智等,2009;李夫杰等,2011);③ 弧后盆地(王宗起等,2009);④ 大洋板内洋岛/海山环境(向忠金等,2010)。鉴于北大巴山构造环境存在着诸多争议,本文在前人研究基础上试图从高桥地区镁铁质岩单斜辉石矿物化学成分角度对该区构造环境进行讨论,以期对北大巴山地区构造环境判断提供一定的理论依据。

高桥岩体岩石化学成分特征表现为高 TiO_2 (1.28%~5.4%)、 Na_2O (1.78%~5.28%)、高碱性特征,指示其为典型的板内碱性玄武岩。单斜辉石的成分对构造环境有良好的指示作用,特别是一些特征元素如 Ti、Al、Na、Ca 成分,而且高桥岩体单斜辉石具有高 Al (0.02~0.20, 平均为 0.11)、高 Ti (0.02~0.07, 平均为 0.04) 和低 Si (1.80~1.93, 平均为 1.87) 特征,显示板内碱性玄武岩内部辉石的特征(Nisbet and Pearce, 1977)。在 Nisbet 等(1977)提出的利用辉石进行构造环境判别的 $TiO_2 - MnO - Na_2O$ 图解(图7)中,该区样品主要落于板内碱性岩区域(对于投于全部玄武岩区(All 区域)的样品,由于反映的构造环境为所有可能的构造环境,因此无构造判别意义),同样说明该区岩体形成于板内环境。结合岩体具有的深成-中深成-浅成岩石序列及侵入关系、辉石结晶深度明显大于大洋地壳平均厚度(5~6 km),具有明显的深源性,综合认为该区岩体形成于大陆板内环境。

碱性玄武岩为主的岩石组合为大陆拉张作用阶段的产物,高桥岩体内辉石矿物化学特征和岩石地化特征表明该区为典型的碱性岩,结合岩体的锆石 U-Pb 年龄为 439.2 ± 4.5 Ma (另见文发表),说明高桥地区在早志留纪存在着一期明显的大陆拉张作用,进而形成高桥岩体。考虑到辉石闪长岩具有明显的地壳混染,指示该区可能存在着俯冲作用,俯冲板片混染了下部上涌的岩浆,使得岩体具有明显的地壳混染。结合高桥岩体形成于大陆板内拉张环境的

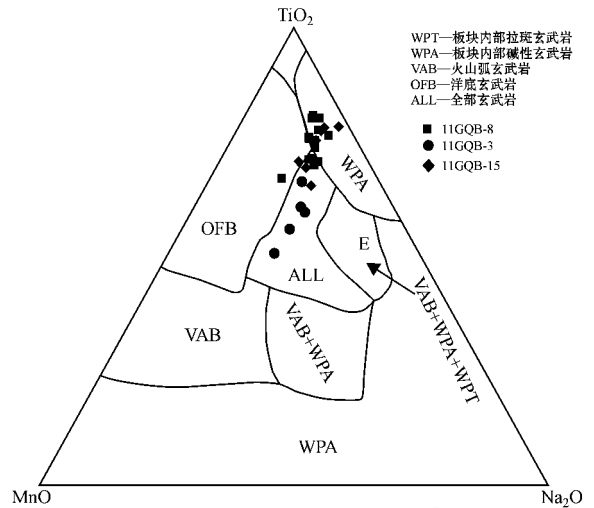


图7 高桥地区镁铁质岩单斜辉石 $TiO_2 - MnO - Na_2O$ 图解(据 Nisbet and Pearce, 1977)

Fig. 7 $TiO_2 - MnO - Na_2O$ diagram of clinopyroxene from mafic rock in Gaoqiao area (after Nisbet and Pearce, 1977)

结论,进一步推测高桥岩体形成于与俯冲相关的弧后盆地环境,为弧后盆地拉张作用的产物。

镁铁质岩石侵入的奥陶系高桥组为深海相泥质碳酸盐岩、泥质板岩和粉砂岩组合,为扬子北缘的外陆棚沉积;与镁铁质岩石形成时代相当的滔河口组碱性火山岩也具有陆壳混染的地球化学特征(向忠金等,2010);且整个北大巴山地区没有大洋型岩石出露,因此弧后拉张作用并未形成洋壳,孤立产出的活动型碳酸盐岩在深海盆地中以岛链状喷发的火山岩为基底的洋岛或海山(闫臻等,2011)。

5 结论

(1) 高桥岩体由辉绿岩、辉长辉绿岩、辉绿玢岩和辉石闪长岩组成,表现为深成-中深成-浅成相为主的岩石序列和侵入关系。辉石化学成分为低 Cr、Al、Na, 高 Fe、Ti 特征。随着岩浆演化,单斜辉石 $Mg^\#$ 降低, FeO 含量略为增大,具有从富镁向富铁的变化趋势。

(2) 单斜辉石化学成分特征指示岩浆为碱性岩系列,与单斜辉石寄主岩石的碱性程度相一致,共同指示岩体母岩浆为碱性玄武岩。

(3) 单斜辉石的结晶温度范围为 $1132 \sim 1164^\circ C$, 压力为 $0.71 \times 10^2 \sim 9.30 \times 10^2$ MPa, 形成深度 2.34~30.69 km, 单斜辉石形成深度明显大于大洋地壳的平均厚度(5~6 km), 反映了明显的深源

特征。Al对Si的替代所导致是电荷不平衡主要是由 Fe^{3+} 来补偿, Ca^{2+} 和 Na^+ 的类质同像置换使得辉石具有较高Ca含量,较低的 Na_2O 含量。

(4)综合岩体地质产状、单斜辉石的构造环境判别特征,认为高桥岩体形成于与俯冲相关的弧后盆地环境,为弧后拉张作用的产物。

致谢 电子探针测试过程中得到中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室陈振宇老师和陈晓丹硕士的帮助,论文成文过程中得到赵一鸣研究员、王晓霞研究员、陈雷博士和蒋宗胜博士的帮助,在此一并表示感谢,最后感谢两位审稿人细致的审阅。

References

- Deer W A, Howie R A and Zussman J. 1978. Rock-forming Minerals, Single-chain Silicates(2nd edition) [M]. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Huang Yuehua. 1993. Mineral characteristics of phlogopite-amphibole-pyroxenite mantle xenolith in alkaline basic-ultrabasic subvolcanic complex in North Daba mountain [J]. Acta Petrologica Sinica, 9(4): 367~378 (in Chinese with English abstract).
- Huang Yuehua, Ren Youxiang, Xia Linqi, et al. 1992. Bi-modal volcanic rock in North Daba mountain-dabase in Gaotan and trachyte in Haoping [J]. Acta Petrologica Sinica, 8(3): 243~256 (in Chinese).
- Huang Yuehua and Yang Jianye. 1990. Petrological study for Bijiaoshan-Tongdongwan alkali-mafic lavas from North Daba Mountain [J]. Northwest Geoscience, 28: 15~24 (in Chinese with English abstract).
- Huang Yuehua, Xu Xueyi, Xia Zuchun, et al. 1995. Mineralogy and geological implication of green-pyroxenite xenoliths from Langao county, Shaanxi province [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 14(2): 141~150 (in Chinese with English abstract).
- Kushiro I. 1960. Si-Al relation in clinopyroxenes from igneous rock [J]. American Journal of Science, 258: 518~551.
- Lassiter J C and DePaolo D J. 1997. Plume/lithosphere interaction in the generation of continental and oceanic flood basalts: chemical and isotopic constraints [A]. Mahoney J J and Coffin M F. Large Igneous Provinces, Continental, Oceanic and Planetary Flood Volcanism: Geophysical Monograph 100 [C]. Washington D C: American Geophysical Union, 335~355.
- LeBas M J. 1962. The rock of aluminium in igneous clinopyroxenes with relation to their parentage [J]. American Journal of Science, 260: 267~288.
- 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 [J]. Earth and Planetary Science Letters, 59: 139~154.
- Li Fujie and Yang Jun. 2011. Tectonic meaning of mafic dyke swarms in Zhenba Eastern area in Shannan [J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering (Natural Science Edition), 24(2): 238~243 (in Chinese with English abstract).
- Ma Hongwen. 1985. Introduction of the improved clinopyroxene thermometer [J]. Geological Science and Technology Information, 4(2): 82~84 (in Chinese).
- Morimoto N. 1988. Nomenclature of Pyroxenes [J]. Mineralogy and Petrology, 39: 55~76.
- Nisbet E G and Pearce J A. 1977. Clinopyroxene composition in mafic lavas from different tectonic settings [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 63(2): 149~160.
- Neal C R, Mahoney J J and Chazey W J. 2002. Mantle sources and the highly variable role of continental lithosphere in basalt petrogenesis of the Kerguelen Plateau and Broken Ridge LIP: Results from ODP Leg 183 [J]. Journal of Petrology, 43(7): 1177~1205.
- Niu Xiaolu, Chen Bin and Ma Xu. 2009. Clinopyroxene from the Fashan pluton [J]. Acta Petrologica Sinica, 25(2): 359~373 (in Chinese with English abstract).
- Rudnick R L. 1995. Making continental crust [J]. Nature, 378: 571~578.
- Saunders A D, Storey M, Kent R W, et al. 1992. Consequences of plume-lithosphere interaction [A]. Storey B C, Alabaster T and Pankhurst R J. Magmatism and Cause of Continental Breakup [C]. Geological Society of London Special Publications, 68: 41~60.
- Thompson R N. 1974. Some high-pressure pyroxenes [J]. Mineralogical Magazine, 39: 768~778.
- Teng Renlin and Li Yujing. 1990. On the lithochemical features and the diagenetic environment of the Caledonian magmatic rocks in the northern Dabashan, Shaanxi province [J]. Geology of Shaanxi, 8(1): 37~52 (in Chinese with English abstract).
- Verhoogen J. 1962. Distribution of titanium between silicates and oxides in igneous rocks [J]. American Journal of Science, 260: 211~220.
- Wang Cunzhi, Yang Kunguang, Xu Yang, et al. 2009. Geochemistry and LA-ICP-MS Zircon U-Pb age of Basic dike swarms in North Daba mountains and Its tectonic significance [J]. Geological Science and Technology Information, 4(2): 82~84 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zongqi, Yan Quanren, Yan Zhen, et al. 2009. New division of the main tectonic units of the Qinling Orogenic belt, Central China [J]. Acta Geologica Sinica, 83(11): 1527~1546 (in Chinese with English abstract).
- Wedepohl K H. 1995. The composition of the continental crust [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 59: 1217~1232.
- Xia Zucun, Xia Linqi and Zhang Cheng. 1992. The study of pyroxene minerals of alkali-basic-ultrabasic subvolcanic complex from North Daba mountain [J]. Northwest Geoscience, 13(2): 32~30 (in Chinese with English abstract).
- Xiang Zhongjin, Yan Quanren, Yan Zhen, et al. 2010. Facies succession and architecture of volcanoclastic rocks of the Taohoukou formation: implication for Early Silurian volcanism in the North Dabashan

- area, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(3): 311~328 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xueyi, Huang Yuehua, Xia Linqi, *et al.* 1996. Characteristics of phlogopite-amphibole pyroxenite xenoliths from Langao county, Shaanxi province [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 15(3): 193~202 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xueyi, Huang Yuehua, Xia Linqi, *et al.* 1997. Phlogopite-Amphibole-Pyroxenite Xenoliths in Langao, Shaanxi Province: Evidences for Mantle Metasomatism [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 13(1): 1~12 (in Chinese with English abstract).
- Yan Yunxiang. 2005. Research on geochemistry and Sr, Nd and Pb isotope of the basic dyke swarms [D]. Xi'an: Chang'an University, 1~50 (in Chinese with English abstract).
- Yan Zhen, Wang Zongqi, Zhang Yingli, *et al.* 2011. Sedimentary features and tectonic environments of silurian volcanic-related carbonates in the North Daba Mountain [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 29(1): 31~40 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chengli, Gao Shan, Zhang Guowei, *et al.* 2002. Geochemistry and significance of alkaline dyke swarms in Early Pleistocene, Southern Qinling [J]. *Science in China (Series D: Geoscience)*, 32(10): 819~828 (in Chinese).
- Zhang Chengli, Gao Shan, Yuan Honglin, *et al.* 2007. Characteristics of the mantle in Early Paleozoic: from the Sr-Nd-Pb evidence of the mafic-ultramafic dyke and volcanic rock [J]. *Science in China (Series D: Geoscience)*, 37(7): 857~865 (in Chinese).
- Zhang Xin. 2010. The dynamic mechanism and Geological significance of Mafic intrusion in the Ziyang-Zhenba area, South Qinling [D]. Xi'an: Chang'an University, 1~67 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Dingwu, Zhang Chengli, Wang Juli, *et al.* 1997. Initial research and geological significance for basic dyke swarms in Wudang block [J]. *Chinese Science Bulletin*, 42(23): 2546~2549 (in Chinese).
- Zou Xianwu, Zhang Chengli, Wang Juli, *et al.* 2011. SHRIMP zircon U-Pb dating and lithochemical characteristics of diabase from Zhenping area in North Daba mountain [J]. *Geology in China*, 38(2): 282~291 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaocong, Xiao Xuchang, Wang Jun, *et al.* 2005. Mineral chemistry of the Pulu Cenozoic volcanic rocks in the west Kunlun Mountains and its constraints on the magmatic process [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 25(3): 237~248 (in Chinese with English abstract).
- 岩石学研究 [J]. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊, 28: 15~24.
- 黄月华. 1993. 岚皋碱性镁铁-超镁铁质潜火山杂岩中金云角闪辉石岩类地幔捕虏体矿物学特征 [J]. *岩石学报*, 9(4): 367~378.
- 黄月华, 徐学义, 夏祖春, 等. 1995. 岚皋绿色辉石捕虏体矿物学及其地质意义 [J]. *岩石矿物学杂志*, 14(2): 141~150.
- 李夫杰, 杨骏. 2011. 陕南镇巴东部地区基性岩墙群的构造意义 [J]. *四川理工学院学报(自然科学版)*, 24(2): 238~243.
- 马鸿文. 1985. 介绍改进的单斜辉石地质温度计公式 [J]. *地质科技情报*, 4(2): 82~84.
- 牛晓露, 陈斌, 马旭. 2009. 河北矾山杂岩体中单斜辉石的研究 [J]. *岩石学报*, 25(2): 359~373.
- 滕人林, 李育敬. 1990. 陕西北大巴山加里东期岩浆岩的岩石化学特征及其生成环境的探讨 [J]. *陕西地质*, 8(1): 37~52.
- 王存智, 杨坤光, 徐扬, 等. 2009. 北大巴基性岩墙群地球化学特征、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其大地构造意义 [J]. *地质科技情报*, 4(2): 82~84.
- 王宗起, 闫全人, 闫臻, 等. 2009. 秦岭造山带主要大地构造单元的新划分 [J]. *地质学报*, 83(11): 1527~1546.
- 夏祖春, 夏林圻, 张诚. 1992. 北大巴山碱质基性-超基性潜火山杂岩的辉石矿物研究 [J]. *西北地质科学*, 13(2): 32~30.
- 向忠金, 闫全人, 闫臻, 等. 2010. 北大巴山志留系滔河口组火山碎屑岩相序、组构特征及古火山作用环境分析 [J]. *地质学报*, 84(3): 311~328.
- 徐学义, 黄月华, 夏林圻, 等. 1996. 岚皋金云角闪辉石岩类捕虏体特征 [J]. *岩石矿物学杂志*, 15(3): 193~202.
- 徐学义, 黄月华, 夏林圻, 等. 1997. 岚皋金云角闪辉石岩类捕虏体: 地幔交代作用的证据 [J]. *岩石学报*, 13(1): 1~12.
- 晏云翔. 2005. 陕西紫阳-岚皋地区碱-基性岩墙群的岩石地球化学及 Sr, Nd, Pb 同位素地球化学研究 [D]. 西安: 长安大学, 1~50.
- 闫臻, 王宗起, 张英利, 等. 2011. 北大巴山与志留纪火山作用相关的碳酸盐岩沉积学特征及形成环境 [J]. *沉积学报*, 29(1): 31~40.
- 张成立, 高山, 袁洪林, 等. 2007. 南秦岭早古生代地幔性质: 来自超镁铁质、镁铁质岩脉及火山岩的 Sr-Nd-Pb 同位素证据 [J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 37(7): 857~865.
- 张成立, 高山, 张国伟, 等. 2002. 南秦岭早古生代碱性岩墙群的地球化学及其地质意义 [J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 32(10): 819~828.
- 张欣. 2010. 南秦岭紫阳-镇巴地区基性侵入体动力学机制及地质意义讨论 [D]. 西安: 长安大学, 1~67.
- 周鼎武, 张成立, 王居里, 等. 1997. 武当地块基性岩墙群初步研究及其地质意义 [J]. *科学通报*, 42(23): 2546~2549.
- 邹先武, 段其发, 汤朝阳, 等. 2011. 北大巴山镇坪地区辉绿岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年和岩石地球化学特征 [J]. *中国地质*, 38(2): 282~291.
- 张招崇, 肖序常, 王军, 等. 2005. 西昆仑普鲁新生代火山岩的矿物化学特征及其对岩浆演化过程的约束 [J]. *矿物学报*, 25(3): 237~248.

附中文参考文献

- 黄月华, 任有祥, 夏林圻, 等. 1992. 北大巴山古生代双模式火成岩套——以高滩辉绿岩和蒿坪粗面岩为例 [J]. *岩石学报*, 8(3): 243~256.
- 黄月华, 杨建业. 1990. 北大巴山笔架山-铜洞湾碱性镁铁质熔岩的