

北大巴山滔河镁铁质岩中钛闪石的厘定及指示意义

王坤明, 王宗起, 张英利, 王 刚

(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)

摘要: 滔河岩体位于北大巴山地区岚皋县, 滔河镁铁质岩的岩石类型与区域镁铁质岩石类型一致, 主要为辉绿岩、辉长岩、辉长辉绿岩及富含钛闪石的闪长岩, 各相邻镁铁质岩呈明显的渐变过渡状态, 指示为同期岩浆作用的产物。闪长岩内部角闪石呈细长条状、针状巨晶产出, 粒径为 1~3 cm 不等, 自形程度较高, 具有明显的高铝($Al = 1.93 \sim 2.06$)、高钛($TiO_2 = 4.54\% \sim 5.50\%$)特征, 其种属为钛闪石。钛闪石结晶温度为 $1\,062 \sim 1\,129^\circ C$, 形成深度为 19.11~22.64 km, 氧逸度变化范围为 $-0.36 \sim -0.01$, 说明岩浆来源较深且上侵速度较快。钛闪石的存在指示岩体的源区在部分熔融前发生了明显的地幔交代作用, 地幔交代和岩体形成都与俯冲消减作用存在内在的成因联系。岩体具有明显的深源特征、与俯冲消减作用有关及区域岩体的地壳混染特征, 共同指示滔河岩体可能形成于与俯冲相关的弧后拉张环境。

关键词: 北大巴山; 钛闪石; 矿物学; 地幔交代作用; 构造环境

中图分类号: P578.955

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2016)03-0506-11

Determination of kaersutite and its implication for mafic rock in Taohe area, North Daba Mountain

WANG Kun-ming, WANG Zong-qi, ZHANG Ying-li and WANG Gang

(MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China)

Abstract: The Taohe mafic rock is located in Langao County of Daba Mountain. The types of Taohe mafic rock are consistent with those of regional mafic rocks, mainly consisting of diabase, gabbro, gabbro diabase and kaersutite-rich diorite, with the adjacent mafic rocks showing a gradual transition state, indicating the same period of magmatism. The amphibole inside the diorite is kaersutite, characterized by long stripe and needle megacrystal, particle size of 1~3 cm, obvious euhedral crystal, and significant high aluminum ($Al = 1.93 \sim 2.06$) and high titanium ($TiO_2 = 4.54\% \sim 5.50\%$). The temperature is $1\,062 \sim 1\,129^\circ C$, the formation depth is 19.11~22.64 km, and the oxygen fugacity ranges from $NNO = -0.36$ to $NNO = -0.01$. The magma was derived from deeper source and intruded rapidly. The presence of kaersutite shows an apparent mantle metasomatism before the partial melting, and mantle metasomatism and formation of mafic rock had a necessarily close connection with subduction. Obvious deep source characteristics and subduction-related and crustal contamination characteristics indicate that the Taohe mafic rocks were formed in an extensional environment related to subduction.

收稿日期: 2015-09-01; 接受日期: 2016-03-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41302080); 中国地质调查局地质调查项目(1212011121091, 12120114009401)

作者简介: 王坤明(1984-), 男, 汉族, 博士后, 矿产普查与勘探专业, E-mail: kunming12345678@163.com; 通讯作者: 王宗起(1960-), 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: kcwzq@vip.sina.com。

Key words: North Daba Mountain; kaersutite; mineralogy; mantle metasomatism; tectonic environment

Fund support: National Natural Sciences Foundation of China (41302080); China State Geological Investigation Program (1212011121091, 12120114009401)

在北大巴山弧形带内部发育一系列区域性北西-南东走向的基性岩墙群或岩脉(王存智等, 2009), 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)。关于镁铁质岩形成的动力学背景, 主要有扬子地台北缘大陆裂谷或裂陷拉张(滕人林等, 1990; 黄月华等, 1990, 1992; 夏祖春等, 1992; 张欣, 2010; 邹先武等, 2011)、与地幔柱上涌导致的扬子地台北缘大陆拉张(张成立等, 2002; 晏云翔, 2005; 王存智等, 2009; 李夫杰等, 2011)及弧后拉张(王宗起等, 2009; Wang *et al.*, 2015)几种不同认识。众所周知, 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), 特别是钛闪石对地幔交代作用具有明显的指示意义(Richter and Carmichael, 1993)。前人对镁铁质岩内的单斜辉石、云母类矿物进行了大量研究, 已有的研究集中在北大巴山地区基性-超基性潜火山岩矿物成分、镁铁质岩熔岩矿物学及煌斑杂岩内捕虏体的矿物成分研究(黄月华等, 1990, 1995; 夏祖春等, 1992; 黄月华, 1993; 徐学义等, 1996, 1997), 而针对北大巴山地区镁铁质岩内角闪石的矿物化学研究则相对较少, 其化学成分特征及地幔动力学指示意义尚未引起足够关注, 极大制约了北大巴山地区镁铁质岩岩浆演化及成岩动力学背景的研究。

本文采用电子探针测试方法对岚皋县滔河镇附近镁铁质岩内部首次发现的长条状钛闪石自形晶进行研究, 试图通过对钛闪石的物理化学条件、地幔动力学以及构造环境的指示意义研究, 对北大巴山地区镁铁质岩体的岩石成因及形成环境提供一定的约束。

1 区域地质背景

北大巴山大地构造位置属于扬子陆块北缘弧后盆地陆坡带(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 1), 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, 岩浆岩体一般多呈脉状分布, 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°~330°, 倾角 50°~80°(图 1)。岩石类型为辉绿岩、辉长岩、辉绿玢岩、辉长辉绿岩及辉石闪长岩等。区域岩体形成时代为晚奥陶世一早志留世, 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)。

滔河镁铁质岩主要侵位于奥陶系高桥组, 地层内部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钙质板岩和泥晶灰岩, 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。滔河岩体呈岩脉状展布, 长轴方向为北北西向, 向西逐渐分为两条岩脉(图 1)。岩体与地层呈明显的顺层侵入和切层侵入两种方式(图 2), 岩体与围岩接触带厚度较小, 局部可见明显的宽度不等的冷凝边, 岩脉内部岩性单一, 分带明显, 主要为辉绿岩相、辉长辉绿岩相、辉长岩相及闪长岩相, 各岩相中尤以辉绿岩出露面积最大。

2 岩石学及矿物学特征

滔河镁铁质岩内部岩石类型与区域镁铁质岩石类型大体一致, 岩石类型主要为辉绿岩、辉长辉绿岩、辉长岩及富含钛闪石的闪长岩, 具有明显的辉长结构、辉绿辉长结构、辉绿结构, 为典型的中深成-浅成相的岩石序列, 而宽度不等的冷凝边指示岩体与地层呈明显的深成-中深成-浅成侵入关系, 总体指示岩体为明显的深成侵入特征。同时, 滔河岩体内部各岩石类型呈明显的渐变过渡状态(图 2), 指示其为同一期岩浆作用的产物。

辉长岩: 灰绿色, 辉长结构(图 3a、3d)。主要矿物为单斜辉石(35%~40%)、斜长石(45%~55%)、角闪石(~5%)、金属矿物(钛铁矿、磁铁矿)(~8%);

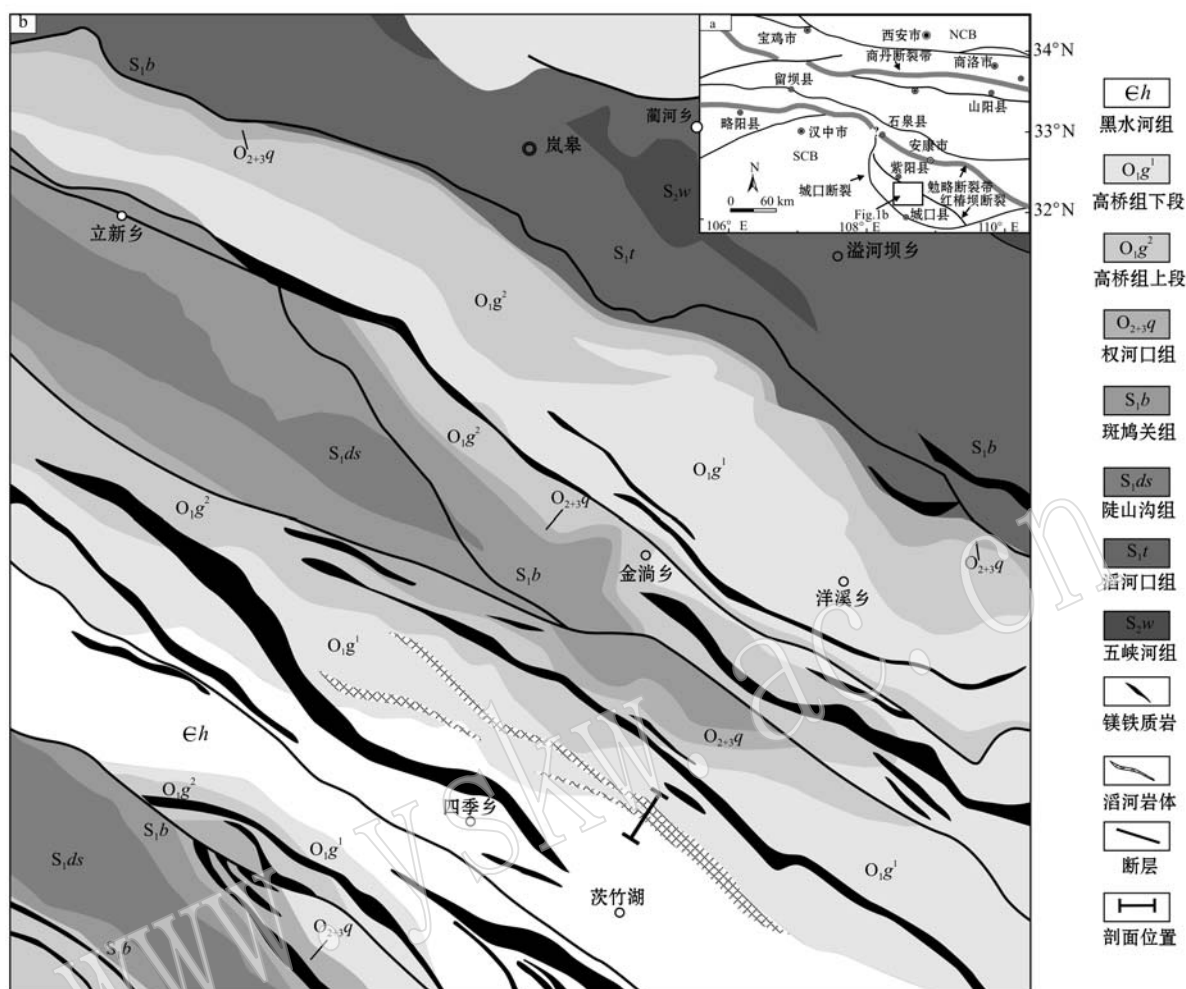


图1 秦岭大地构造简图[a, 据王宗起等(2009)简编]和滔河地区镁铁质岩分布图[b, 据陕西地质矿产勘查开发局第七地质队(1996)^①修编]

Fig. 1 Simplified tectonic map of Qinling orogenic belt (a, modified after Wang Zongqi *et al.*, 2009) and simplified geological map for Taohe mafic rock (b, modified after No.7 Geological Party of Shaanxi Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, 1996)^①

副矿物磷灰石、榍石。单斜辉石多呈自形-半自形晶产出, 少量绿泥石化, 长石多呈半自形宽板状, 少量钠长石化, 钛铁矿多呈他形粒状晶体, 磷灰石呈细小的自形晶。

辉绿岩: 黑绿色, 辉绿结构, 块状构造(图 3b), 主要矿物为单斜辉石(35%~40%)、长石(50%~55%); 副矿物有少量铁钛氧化物、榍石、磷灰石。辉石呈自形-半自形晶, 部分发生绿泥石化; 斜长石呈短长条状及宽板状, 自形程度较好的斜长石搭成三脚架状, 形成典型的辉绿结构, 宽板状长石与辉石则形成辉长结构, 蚀变类型为钠黝帘石化、绿泥石化。

辉长辉绿岩: 灰绿色, 辉长辉绿结构(图 3c), 块状构造, 主要矿物为单斜辉石(35%~40%)、长石(50%~55%)、角闪石(~5%); 副矿物有少量铁钛氧化物、榍石、磷灰石。辉石呈自形-半自形晶, 部分发生绿泥石化; 斜长石呈短长条状及宽板状, 自形程度较好的斜长石搭成三脚架状, 形成典型的辉绿结构, 宽板状长石与辉石则形成辉长结构, 蚀变类型为钠黝帘石化、绿泥石化。

闪长岩: 灰白色, 主要矿物为角闪石(35%~40%)、长石(50%~55%); 副矿物为少量铁钛氧化物。角闪石呈细长条状、针状巨晶产出, 粒径为

① 陕西地质矿产勘查开发局第七地质队. 1996. 1:50000 岚皋县幅地质图.

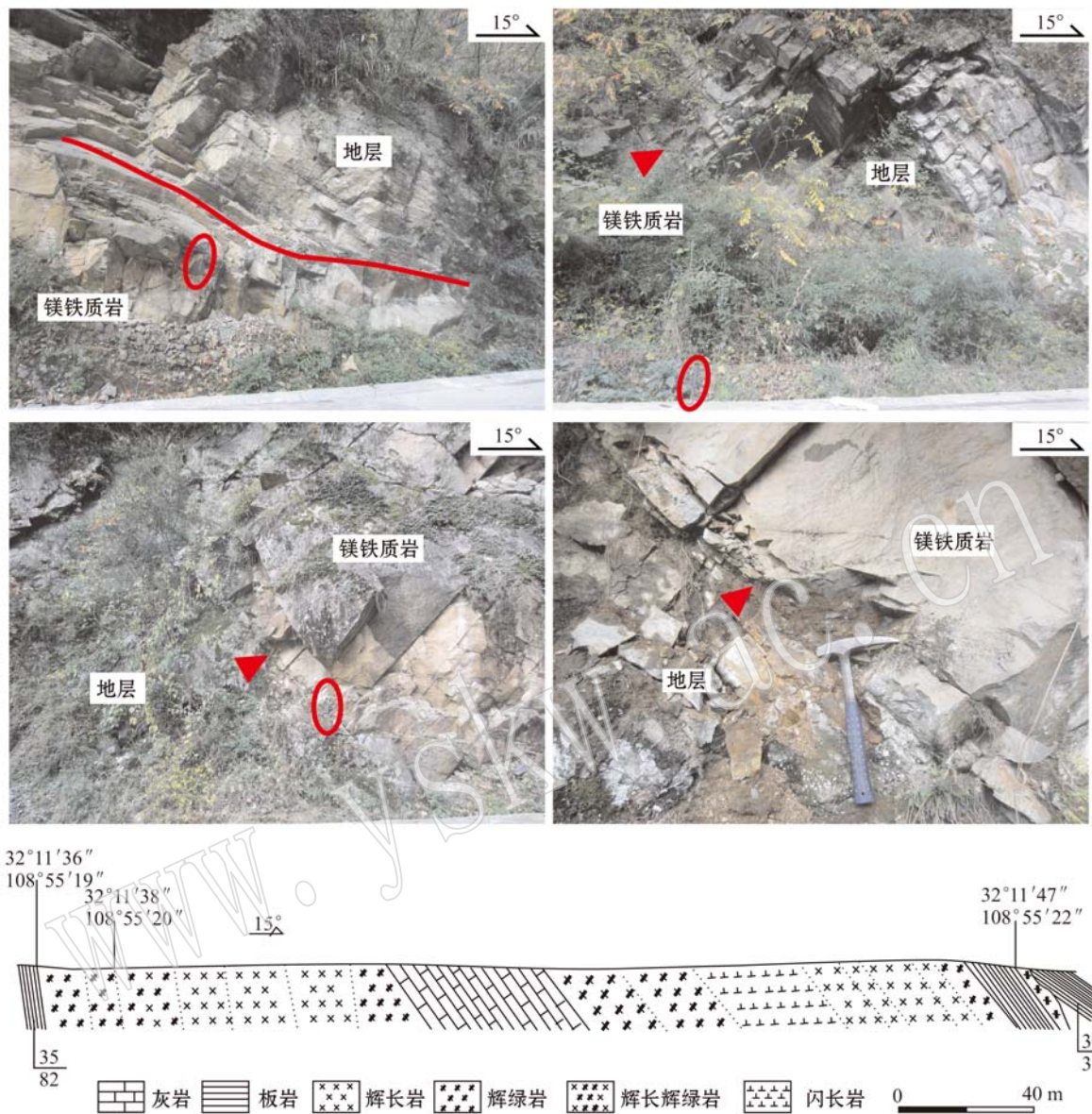


图2 滔河镁铁质岩野外接触关系及实测剖面图

Fig. 2 Field contact relations and measured geological section for Taohe mafic rock

1~3 cm 不等,自形程度较高(图 3e、3f),无出溶及变形结构,镜下有明显的多色性,单偏光下为褐色,正交偏光下为红褐色,长石多呈长板状,自形程度中等,多数发生钠长石化。

总的来说,辉绿岩和辉长辉绿岩呈现明显的长石穿插单斜辉石现象,说明岩体内部辉石结晶时间早于斜长石结晶,形成明显的辉绿结构或辉长辉绿结构,岩石结构显示出岩体的快速结晶特性。闪长岩内部钛闪石呈明显的长条状或针状自形晶产出,自形程度较好,仅见少量长石穿插钛闪石的现象,怀疑是其结晶之后快速就位导致,而且钛闪石的出现

本身也说明岩浆上侵是一个快速过程(King *et al.*, 1999)。

3 钛闪石矿物化学特征

3.1 样品分析及方法

样品主要取自滔河岩体内闪长岩内部,制备成 0.05 mm 厚的光薄片,对钛闪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

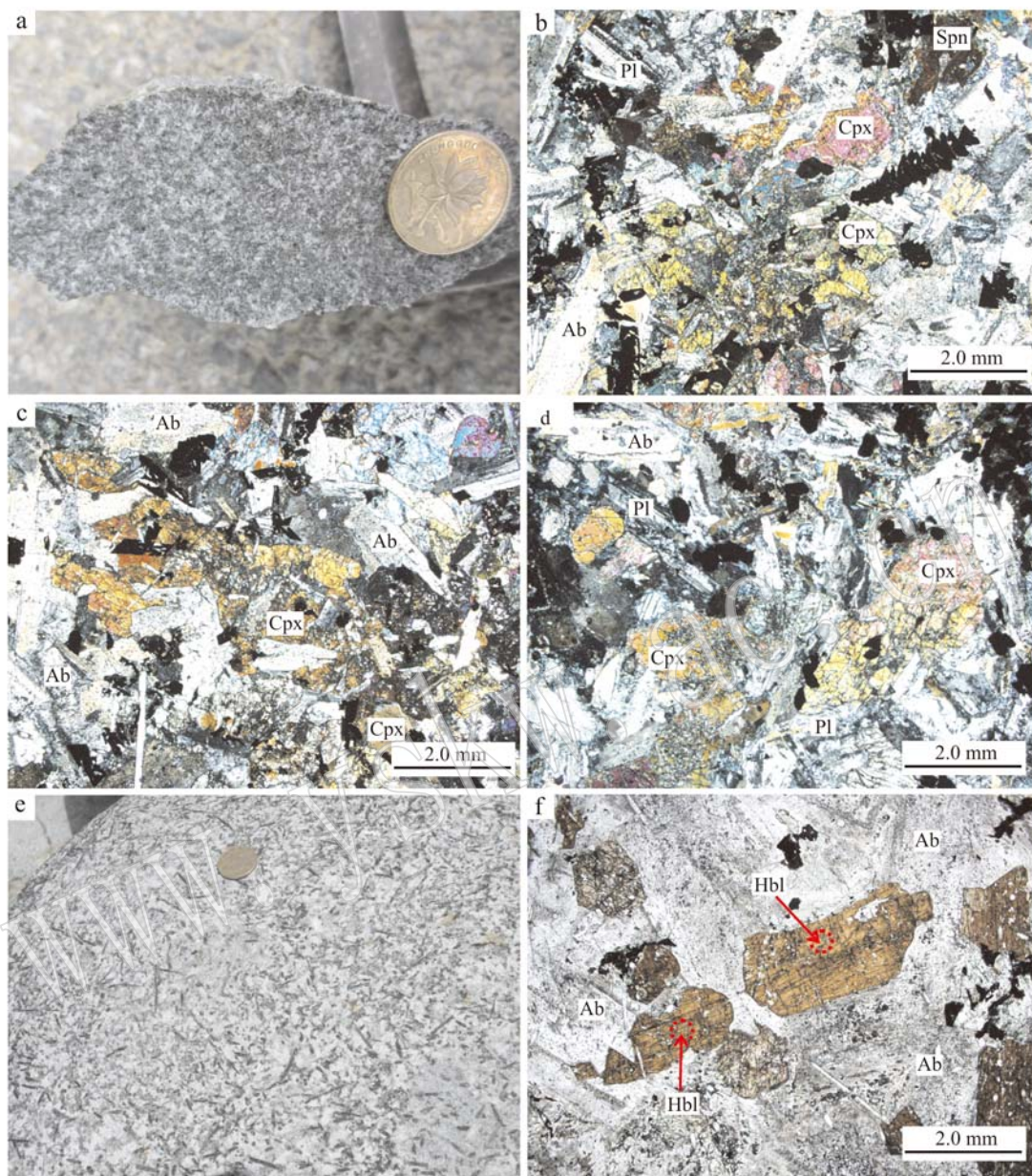


图 3 滔河镁铁质岩手标本及镜下照片

Fig. 3 Hand specimen and photomicrographs of Taohe mafic rock

Cpx—单斜辉石; Hbl—角闪石; Pl—斜长石; Ab—钠长石; Spn—榍石

Cpx—clinopyroxene; Hbl—hornblende; Pl—plagioclase; Ab—albite; Spn—sphene

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

重点选择滔河岩体内部闪长岩内的 7 个钛闪石巨晶进行研究, 根据国际矿物协会 (IMA) 角闪石委员会提出的分类命名方案 (Leake *et al.*, 1997), 巨

晶角闪石种属为钛闪石 (图 4a)。Si = 6.04 ~ 6.18, $\text{TiO}_2 = 4.54\% \sim 5.50\%$, $(\text{Na} + \text{K})_{\text{A}} = 0.63 \sim 0.72$, $\text{Ca} = 1.72 \sim 1.83$, $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}) = 0.71 \sim 0.73$, 与我国东部新生代碱性玄武岩中的角闪石巨晶 (池际尚, 1988) 类似。樊祺诚等 (1992) 提出我国上地幔成因角闪石以高铝 (一般 $\text{Al} > 2.0$) 为特征, 并以 $\text{TiO}_2 (> 4\%)$ 、 Cr_2O_3 的含量差异进一步划

表 1 滔河镁铁质岩内钛闪石矿物化学成分组成

 $w_B/\%$

Table 1 Mineral composition of kaersutite in Taohe mafic rock

测试点	THB2-2.1	THB2-4.2	THB2-1.1	THB11-2.1	THB11-2.2	THB11-3.2	THB11-1.1
SiO ₂	40.67	40.72	40.63	40.58	40.51	41.20	40.80
TiO ₂	5.21	5.50	4.92	5.60	5.50	4.54	5.29
Al ₂ O ₃	11.53	11.55	11.34	11.72	11.62	10.91	11.15
Fe ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO	10.44	10.51	10.75	10.24	9.95	11.11	10.77
MnO	0.20	0.20	0.15	0.27	0.22	0.14	0.16
MgO	13.42	13.40	13.41	13.37	13.36	13.21	13.23
CaO	11.44	11.38	11.40	11.33	11.28	10.72	11.14
Na ₂ O	2.73	2.75	2.62	2.75	2.78	2.78	2.72
K ₂ O	0.46	0.45	0.55	0.42	0.46	0.52	0.44
P ₂ O ₅	0.06	0.06	0.04	0.01	0.04	0.06	0.07
Total	96.16	96.52	95.79	96.28	95.72	95.19	95.76
阳离子数(以 23 个氧原子计算)							
Si	6.07	6.06	6.08	6.04	6.07	6.18	6.11
Ti	0.59	0.62	0.55	0.63	0.62	0.51	0.60
Al	2.03	2.02	2.00	2.06	2.05	1.93	1.97
Fe ³⁺	0.08	0.08	0.19	0.07	0.02	0.31	0.14
Fe ²⁺	1.22	1.23	1.15	1.20	1.22	1.08	1.21
Mn ²⁺	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02
Mg	2.99	2.97	2.99	2.97	2.98	2.96	2.96
Ca	1.83	1.81	1.83	1.81	1.81	1.72	1.79
Na	0.79	0.79	0.76	0.79	0.81	0.81	0.79
K	0.09	0.09	0.10	0.08	0.09	0.10	0.08
Total	15.72	15.71	15.70	15.70	15.72	15.63	15.67
不同配位阳离子及计算结果							
Si(T)	6.07	6.06	6.08	6.04	6.07	6.18	6.11
Al(T)	1.93	1.94	1.92	1.96	1.93	1.82	1.89
Al(C)	0.10	0.08	0.08	0.10	0.12	0.11	0.08
Ti(C)	0.59	0.62	0.55	0.63	0.62	0.51	0.60
Fe ³⁺ (C)	0.08	0.08	0.19	0.07	0.02	0.31	0.14
Mg(C)	2.99	2.97	2.99	2.97	2.98	2.96	2.96
Fe ²⁺ (C)	1.22	1.23	1.15	1.20	1.22	1.08	1.21
Mn ²⁺ (B)	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01
Fe ²⁺ (B)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca(B)	1.83	1.81	1.83	1.81	1.81	1.72	1.79
Na(B)	0.16	0.17	0.17	0.18	0.18	0.27	0.20
Na(A)	0.63	0.62	0.59	0.62	0.63	0.54	0.59
Ca(A)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K(A)	0.09	0.09	0.10	0.08	0.09	0.10	0.08
(Na + K) _A	0.72	0.71	0.70	0.70	0.72	0.63	0.67
Mg/(Mg + Fe ²⁺)	0.71	0.71	0.72	0.71	0.71	0.73	0.71
Si/(Si + Al + Ti)	0.70	0.70	0.70	0.69	0.69	0.72	0.70
T = Ca/(Ca + Na + K)	1 072.26	1 078.22	1 062.61	1 075.77	1 090.12	1 129.12	1 082.11
Mg*	2.29	2.24	2.38	2.22	2.23	2.43	2.28
NNO	-0.24	-0.32	-0.11	-0.36	-0.35	-0.01	-0.26

分为韭闪石和钛角闪石两大类。本区钛闪石高铝(Al = 1.93~2.06)、高钛(TiO₂ = 4.54%~5.50%)特征,与中国东部上地幔成因钛闪石相似,且与世界范围钛闪石成分相近(樊祺诚等,1992)。

考虑到壳源角闪石的 Si/(Si + Ti + Al)值不低于 0.775,而幔源角闪石则不大于 0.765,幔源角闪石的 Al₂O₃ 含量极少低于 10%,壳源角闪石 Al₂O₃ 含量极少高于 10%(姜常义等,1984),本区角闪石低

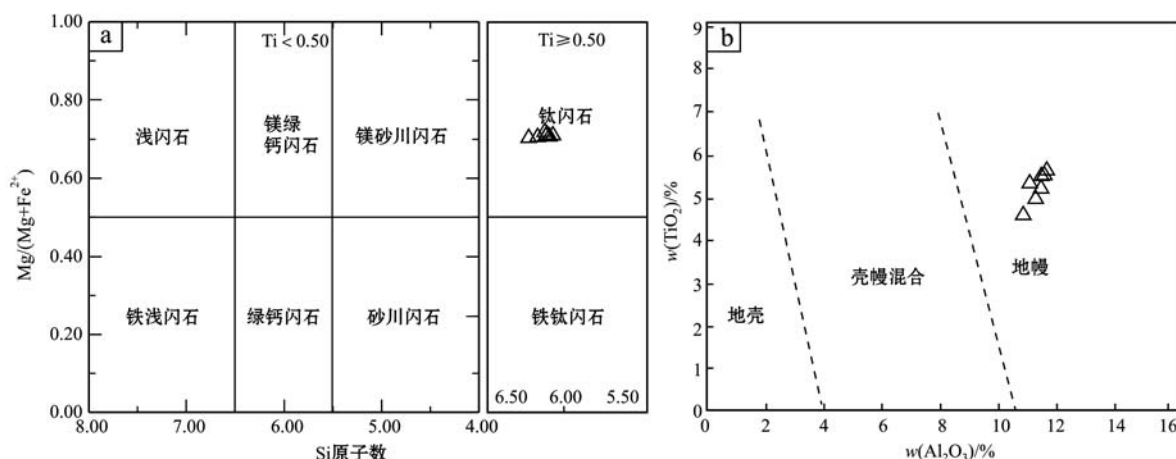


图 4 滔河镁铁质岩体角闪石分类图解(a, 底图据 Leake 等, 1997)及 $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ 图(b, 据姜常义等, 1984)

Fig. 4 Discrimination diagram (a, after Leake *et al.*, 1997) and discrimination diagram of $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ (b, after Jiang Changyi *et al.*, 1984) for hornblende in Taohe mafic rock

$\text{Si}/(\text{Si} + \text{Ti} + \text{Al})$ 值 (0.69 ~ 0.72)、高 Al_2O_3 值 (10.91% ~ 11.72%) 的特征同样指示其属于幔源角闪石。同时, 在判别角闪石成因的图解(图 4b)上, 角闪石巨晶也主要落于幔源区, 显示明显的幔源成因特征。

4 讨论及意义

4.1 钛闪石结晶的物理化学条件

区别于低压角闪石的 $\text{Al} < 2.0$, 本区钛闪石具有高钠 (0.76 ~ 0.81)、铝 (1.93 ~ 2.06) 特征, 属于上地幔成因角闪石, 反映明显的高压成因的特点 (樊祺诚等, 1992), 而且也与高压环境形成的钙质角闪石具有高铝含量特征相一致 (Hammarstrom and Zen, 1986)。采用邓晋福 (1983) 计算角闪石结晶温度的公式: $\text{Ca}/(\text{Ca} + \text{Na} + \text{K}) = -0.000365344t + 1.0674$, 计算出滔河岩体角闪石的结晶温度为 1062 ~ 1129°C, 同时依据前人的压力计算公式 $p_{\text{HZ86}} (\text{MPa}) = (-3.92 + 5.03 \text{Al}^{\text{Tot}}) \times 10^2$ (Hammarstrom and Zen, 1986)、 $p_{\text{H87}} (\text{MPa}) = (5.64 \text{Al}^{\text{Tot}} - 4.76) \times 10^2$ (Hollister *et al.*, 1987)、 $p_{\text{BH90}} (\text{MPa}) = (5.03 \text{Al}^{\text{Tot}} - 3.53) \times 10^2$ (Blundy and Holland, 1990), 其中 Al^{Tot} 是钙角闪石结构式中 Al 原子总数, 分别估算其结晶压力如下: $p_{\text{HZ86}} = 5.79 \times 10^2 \sim 6.44 \times 10^2 \text{ MPa}$, $p_{\text{H87}} = 6.13 \times 10^2 \sim 6.86 \times 10^2 \text{ MPa}$, $p_{\text{BH90}} = 6.18 \times 10^2 \sim 6.83 \times 10^2 \text{ MPa}$, 各计算结果相近, 压力主要变化于 $5.79 \times 10^2 \sim 6.86 \times 10^2 \text{ MPa}$ 之间, 换算

求得巨晶形成深度为 19.11 ~ 22.64 km。考虑到钛闪石与中国东部上地幔成因钛角闪石相似, 而且钛闪石的出现说明区域岩浆上侵是一个快速过程, 否则钛闪石就会分解, 不能以矿物巨晶的形式出现在碱性玄武岩中 (King *et al.*, 1999), 因此, 钛闪石的结晶深度进一步指示寄主岩浆来源较深, 与镁铁质岩岩石组合反映的深源特征相一致。采用 Ridolfi 等 (2008) 根据角闪石分子式计算其结晶时氧逸度的公式和校正公式 (Ridolfi *et al.*, 2010): $\text{NNO} = 1.644 \text{Mg}^* - 4.01$, 其中 $\text{Mg}^* = \text{Mg} + \text{Si}/47 - \text{Al}/9 - 1.3 \text{Ti} + \text{Fe}^{3+}/3.7 + \text{Fe}^{2+}/5.2 - {}^{\text{B}}\text{Ca}/20 - {}^{\text{A}}\text{Na}/2.8 + {}^{\text{A}}\text{K}/9.5$, 计算得出钛闪石结晶时的氧逸度变化范围为 $\text{NNO} = -0.36 \sim -0.01$ 。

4.2 地幔交代作用及指示

钛闪石为碱性玄武岩中特征的巨晶矿物, 属于上地幔来源的 Ca-Na 系列闪石, 是地幔交代作用的产物 (Richter and Carmichael, 1993; Haggerty, 1995)。我国上地幔成因角闪石以高铝 (一般 > 2.0) 为特征, 不管其产出方式如何 (填隙、嵌晶、巨晶和包裹体矿物), 都直接或间接与地幔流体的交代作用有关 (樊祺诚等, 1992)。本区钛闪石的出现及高铝特征与北大巴山岚皋地区碱质基性-超基性潜火山杂岩内部金云角闪辉石岩捕虏体指示源区部分熔融前发生明显的地幔交代作用 (黄月华, 1993; 徐学义等, 1996, 1997) 的认识相一致, 二者互相验证, 共同指示该区存在着明显的地幔交代作用。

考虑到区域镁铁质岩 Sr-Nd 同位素所指示的

HIMU、EM I 和 EM II 混合富集地幔源区特征(张成立等, 2007; Wang *et al.*, 2015), 而交代作用造成岩石圈地幔同位素组成的富集抑或亏损在很大程度上取决于熔/流体的性质和来源(赵新苗等, 2007)。岩石学、岩石地球化学及同位素地球化学的研究表明, 熔/流体有 3 种来源: 软流圈深部、地幔柱和消减板片俯冲带再循环物质(Stevenson, 1997; MacDonald *et al.*, 2001)。首先, 区域上缺乏早古生代与地幔柱有关的沉积-岩浆-构造响应的记录(张欣, 2010), 基本排除了地幔柱来源的熔/流体的可能性。其次, 软流圈来源的熔/流体对岩石圈地幔的大规模交代作用会造成岩石圈地幔同位素组成的适度亏损(赵新苗等, 2007)。相反, 俯冲板片物质形成的熔体/流体交代上覆岩石圈地幔却可以造成岩石圈地幔的快速富集(Zhang *et al.*, 2002)。结合区域镁铁质岩体本身具有富集地幔源区特征, 初步认为来自消减板片俯冲带再循环物质的熔体/流体交代上覆岩石圈地幔的可能性最大。而且区域镁铁质岩具有相对富集 LILE 和 LREE 的岩石地球化学特征(滕人林等, 1990; 黄月华等, 1992; 张成立等, 2002, 2007; 晏云翔, 2005; 王存智等, 2009; 张欣, 2010; 邹先武等, 2011; Wang *et al.*, 2015), 很可能与大洋俯冲消减析出流体引起地幔源区流体交代作用直接相关(Perry *et al.*, 1987; Wilson and Downes, 1991; Rogers *et al.*, 1995), 同时考虑到镁铁质岩具有较大的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 变化范围以及高放射性成因 Pb 特征, 也是因为其地幔源区受到俯冲蚀变洋壳流体交代作用, 进而导致亏损软流圈地幔 Sr 同位素改变的结果(张成立等, 2002), 种种迹象表明区域岩体交代作用和岩体形成可能都与俯冲消减作用存在着内在的成因联系。

4.3 对构造环境的指示意义

滔河镁铁质岩所属的北大巴山地区早古生代的构造环境的分歧表现为明显的被动大陆边缘裂谷环境(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)以及志留纪的弧后拉张环境(王宗起等, 2009; Wang *et al.*, 2015)等。

大量镁铁质岩的矿物学及岩石地球化学投图结果指示北大巴山地区岩体形成于板内环境已基本达成共识, 考虑到本区镁铁质岩体大呈致平行的长条

脉状展布, 与围岩接触关系呈顺层和切层侵入, 岩体与地层接触带可见明显冷凝边, 岩体的岩性主要为辉绿岩、辉长辉绿岩、辉长岩和闪长岩, 总体表现为一套明显的深成-中深成-浅成侵入相岩石序列及侵入关系。岩体内钛角闪石结晶压力为 $5.79 \times 10^2 \sim 6.86 \times 10^2$ MPa, 结晶深度(19.11~22.64 km)明显大于大洋地壳的平均厚度(5~6 km), 指示岩体具有明显的深源特征。结合镁铁质岩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, 并且整个北大巴山地区没有大洋型岩石出露, 共同指示区域镁铁质岩体形成于大陆板内环境。考虑到北大巴山地区镁铁质岩为一套碱性玄武岩为主的岩石组合, 是典型的大陆拉张作用的产物(张成立等, 2002), 区域上许河岩体的锆石 U-Pb 年龄为 439.2 ± 4.5 Ma(Wang *et al.*, 2015), 共同指示北大巴山地区在早志留世存在着—期明显的大陆板内拉张作用。钛闪石指示该区域存在明显的地幔交代作用, 区域镁铁质岩相对富集 LILE 和 LREE 的岩石地球化学特征、较大的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 变化范围及高放射性成因 Pb 特征(前已论述), 共同指示地幔交代作用及岩体的形成与俯冲消减作用存在着内在的成因联系。区域上, 许河岩体内部辉石闪长岩的地壳混染成因(Wang *et al.*, 2015)及与镁铁质岩形成时代相当的滔河口组碱性火山岩指示的陆壳混染特征(向忠金等, 2010), 也指示区域上存在着—期志留纪的俯冲作用。同时, 考虑到研究区北侧存在安康-平利古岛弧, 志留纪时期岛弧北侧的古秦岭洋发生了南向俯冲, 此时的北大巴山地区为弧后盆地且发生了明显弧后拉张作用的认识(王宗起等, 2009), 本文倾向性地认为区域镁铁质岩体的侵入就位就是这期俯冲消减导致的弧后拉张作用的产物, 滔河岩体即形成于与俯冲相关的弧后拉张环境, 俯冲消减作用析出流体发生交代作用, 从而导致 HIMU、EM II 和 EM I 混合富集源区特征。

5 结论

(1) 滔河镁铁质岩岩石类型为辉绿岩、辉长辉绿岩、辉长岩及富含钛闪石的闪长岩, 其中闪长岩为该区域钛闪石的寄主岩石。钛闪石具高铝、高钛特征, 与中国东部上地幔成因钛角闪石相似, 与世界范围钛角闪石成分相近。

(2) 滔河岩体总体表现为一套明显的深成-中深成-浅成侵入相岩石序列及侵入关系,角闪石的结晶温度为 $1\,062\sim 1\,129^{\circ}\text{C}$,压力为 $5.79\times 10^2\sim 6.86\times 10^2\text{ MPa}$,结晶深度($19.11\sim 22.64\text{ km}$)明显大于大洋地壳的平均厚度($5\sim 6\text{ km}$),共同指示岩体具有明显的深源特征。

(3) 钛闪石的出现、具有高铝特征以及岚皋地区碱质基性-超基性潜火山杂岩内部金云角闪辉石岩具捕虏体特征,共同说明该区存在地幔交代作用,且地幔交代作用和岩体形成都与俯冲消减作用存在明显的成因联系。

(4) 滔河镁铁质岩具有明显的深源成因、与俯冲消减作用有关及区域岩体的地壳混染特征,共同指示岩体形成于与俯冲相关的弧后拉张环境。

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,两位审稿人进行了细致的评阅,在此一并表示感谢。

References

- Blundy J D and Holland T J B. 1990. Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 104(2): 208~224.
- Chi Jishang. 1988. The Research of Cenozoic Basalt and Upper Mantle in Oriental China (Additional Kimberlite)[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 24~263(in Chinese with English abstract).
- Deng Jinfu. 1983. Melt-mineral Equilibrium Thermodynamics[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Fan Qicheng, Liu Ruoxin and Ma Baolin. 1992. The significance of genesis for upper mantle amphibole in China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 12(4): 352~358(in Chinese with English abstract).
- Haggerty S E. 1995. Upper-mantle mineralogy[J]. *Journal of Geodynamics*, 20: 331~364.
- Hammarstrom J M and Zen E A. 1986. Aluminum in hornblende: An empirical igneous geobarometer[J]. *American Mineralogist*, 71: 1 297~1 313.
- Hollister L S, Grissom G C and Peters E K. 1987. Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons[J]. *American Mineralogist*, 72: 231~239.
- 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-diabase in Gaotan and trachyte in Haoping[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 8(3): 243~256(in Chinese).
- 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).
- Huang Yuehua and Yang Jianye. 1990. Petrological study for Bijiashan-Tongdongwan alkali-mafic lavas from North Daba Mountain[J]. *Northwest Geoscience*, 28: 15~24(in Chinese with English abstract).
- Jiang Changyi and An Sanyuan. 1984. On chemical characteristics of calcic amphiboles from igneous rocks and their petrogenesis significance[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 4(3): 1~9(in Chinese with English abstract).
- King P I, Hering R L, Holloway J R, *et al.* 1999. Oxy-substitution and dehydrogenation in mantle-derived amphibole megacrysts[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63: 3 635~3 651.
- 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[J]. *The Canadian Mineralogist*, 35: 219~246.
- 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).
- MacDonald R, Rogers N W, Fitton J G, *et al.* 2001. Plume-lithosphere interactions in the generation of the basalts of the Kenya Rift, East Africa[J]. *Journal of Petrology*, 42: 877~900.
- Perry F V, Baldrige W S and De Paola D J. 1987. Role of asthenosphere and lithosphere in the genesis of Late Cenozoic basaltic rocks from the Rio Grande rift and adjacent regions of the southwestern United States[J]. *J. Geophys. Res.*, 92: 9 193~9 213.
- Ridolfi F, Puerini M, Renzulli A, *et al.* 2008. The magmatic feeding system of El Reventador volcano (Sub-Andean zone, Ecuador) constrained by texture mineralogy and thermobarometry of the 2002

- erupted products[J]. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 176(1): 94~106.
- Ridolfi F, Renzulli A and Puerini M. 2010. Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: An overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes[J]. *Contrib. Mineral Petrol.*, 160(1): 45~66.
- Righter and Carmichael. 1993. Mega-xenocrysts in alkali olivine basalts: Fragments of disrupted mantle-assemblages[J]. *American Mineralogist*, 78: 1230~1245.
- Rogers N W, Hawkeworth C J and Ormerod D S. 1995. Late Cenozoic basaltic magmatism in the western Great basin, California and Nevada[J]. *J. Geophys. Res.*, 100: 10287~10303.
- Stevenson R, Upton B G J and Steenfelt A. 1997. Crust-mantle interaction in the evolution of the Ilimaussaq Complex, South Greenland: Nd isotope studies[J]. *Lithos*, 40: 189~202.
- 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).
- 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 Kunming, Wang Zongqi, Zhang Yingli, *et al.* 2015. Geochronology and geochemistry of mafic rock in the Xuhe, Shaanxi, China: Implications on petrogenesis and mantle dynamics[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 89(1): 187~202.
- 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).
- Wilson M and Downes H. 1991. Tertiary-Quaternary extension-related alkaline magmatism in western and central Europe[J]. *J. Petrol.*, 32: 811~849.
- Xia Zuchun, 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 Taohekou 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).
- 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 Chengli, Gao Shan, Zhang Guowei, *et al.* 2002. Geochemistry and significance of alkaline dyke swarms in Early Paleozoic, Southern Qinling[J]. *Science in China (Series D: Geoscience)*, 32(10): 819~828(in Chinese).
- 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 [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 144: 241~253.
- 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).
- Zhang Zhaochong, 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).
- Zhao Xinmiao, Zhang Hongfu, Zhu Xiangkun, *et al.* 2007. Metasomatism of Mesozoic and Cenozoic lithospheric mantle beneath the North China Craton: evidence from phlogopite-bearing mantle xenoliths [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1281~1293(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, Duan Qifa, Tang Chaoyang, *et al.* 2011. SHRIMP zircon U-Pb dating and lithogeochemical characteristics of diabase from Zhenping area in North Daba mountain[J]. *Geology in China*, 38(2): 282~291(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 池际尚. 1988. 中国东部新生代玄武岩及上地幔研究(附金伯利岩)[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 24~263.
- 邓晋福. 1983. 熔浆-矿物平衡热力学[M]. 北京: 地质出版社.
- 樊祺诚, 刘若新, 马宝林. 1992. 中国上地幔角闪石及其成因意义[J]. *矿物学报*, 12(4): 352~358.
- 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, 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, 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.
- 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.
- 姜常义, 安三元. 1984. 论火成岩中钙质角闪石的化学组成特征及其岩石学意义[J]. *矿物岩石*, 4(3): 1~9.
- 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.
- 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): 1 527~1 546.
- 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.
- 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.
- 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.
- 赵新苗, 张宏福, 朱祥坤, 等. 2007. 华北中、新生代岩石圈地幔的交代作用: 含金云母地幔提供的证据[J]. *岩石学报*, 23(6): 1 281~1 293.
- 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): 2 546~2 549.
- 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.