

# 太行山北段王安镇岩基超镁铁质岩中 角闪石成因意义

翟媛媛, 谢锦程, 董国臣

(中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083)

**摘要:** 太行山北段中生代岩基中发育有基性-超基性岩体。本文以太行山北段王安镇岩基中的窑沟岩体为研究对象,对橄榄辉石角闪石岩中角闪石的矿物学特征以及形成条件进行初步研究,探讨其成因意义。结果表明,窑沟岩体橄榄辉石角闪石岩中的角闪石属于岩浆成因,并且角闪石环带发育,核部呈棕色,边缘为绿色,两者具有共同的特征,其 $(Ca + Na)_B \geq 1.00$ ,  $Na_B < 0.50$ 均属于钙质角闪石。它们的 $Si/(Si + Ti + Al)$ 值的范围为0.7042~0.7885,属幔源角闪石。 $Na, K, Ti, Al$ 和 $Fe^{3+}$ 的相对含量存在差异,其棕色部分为镁绿钙闪石,绿色部分为镁绿钙闪石质普通角闪石以及浅闪石质普通角闪石。角闪石的环带特征反映出同一期岩浆结晶的不同阶段,体现出压力和温度等生成条件的变化。角闪石环带中核部的镁绿钙闪石结晶时温度和压力较高,深度较大,属于下地壳环境,而边缘角闪石在较低压地壳环境生成。角闪石所体现的岩浆来源于上地幔,并且在燕山运动前期的晚三叠世开始集聚,先其周围的中酸性岩体侵位,暗示在晚三叠世华北克拉通岩石圈就已发生部分熔融和华北克拉通破坏的开始。

**关键词:** 超镁铁质岩, 角闪石环带, 构造意义, 太行北段, 华北克拉通

中图分类号: P578.955

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)02-0273-10

## The genetic significance of amphiboles from the ultramafic rocks of Wang'anzen batholith in northern Taihang Mountains

ZHAI Yuan-yuan, XIE Jin-cheng and DONG Guo-chen

(School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Basic-ultrabasic rocks are developed in Taihang Mountain area. With olivine pyroxene hornblende from the Yaogou hornblende body in the Wang'anzen batholith of north Taihang Mountains as the study object, the authors carried out a preliminary study of the mineralogical characteristics and formation conditions of the amphiboles so as to investigate their genetic significance. The results show that there are two kinds of amphiboles in the olivine pyroxene hornblende, which belong to calcic amphibole with  $(Ca + Na)_B \geq 1.00$  and  $Na_B < 0.50$ . Their  $Si/(Si + Ti + Al)$  ratios are between 0.7042 and 0.7885, indicating that they are mantle amphiboles. Based on the relative content of Na, K, Ti, Al and  $Fe^{3+}$ , the authors further divided the calcic amphibole into magnesium hastingsite in brown color and magnesium hastingsitic hornblende to edenitic hornblende in green color. The amphibole zonation indicates that the amphiboles were formed at different stages of the same magma crystallization characterized by different pressure and temperature conditions. The magnesium hastingsite was crystallized at high temperature and pressure and in great depth, belonging to the lower crustal environment. The edge of the amphibole was generated in a lower pressure crustal environment. The amphibole magma

收稿日期: 2013-07-23; 修订日期: 2014-02-10

基金项目: 国家重点基金(90914002), 长江学者和创新团队发展计划(IRT1083), 111计划项目(B07011)

作者简介: 翟媛媛(1992-), 女, 汉, 本科生, 资源勘查工程(固矿海外班)专业, E-mail: zhaiyuanyuancugb@126.com; 通讯作者: 董国臣, 男, 教授, E-mail: donggc@cugb.edu.cn

was derived from the upper mantle and began to concentrate before the Yanshanian movement in late Triassic. Later, intermediate-acid magma was emplaced to form a granitic batholith. These data indicate that partial melting in the lithosphere of the North China Craton took place in late Triassic and that the North China Craton started to be destroyed at that time.

**Key words:** ultramafic rocks; zoned amphiboles; tectonic significance; northern Taihang Mountains; North China Craton

太行山地处华北克拉通北部中段,由巨型构造-岩浆岩带组成,它起源于早中元古代东、西两大太古宙陆块拼结作用(Zhao *et al.*, 2000)。自早中生代开始,太行山地区与华北克拉通一起,伴随着克拉通破坏出现了大规模的岩浆活动(樊祺诚等, 2001; 邓晋福等, 2003; 刘玲等, 2009),形成了大量超基性及中酸性侵入岩及火山岩,如王安镇岩基、大河南岩基等。克拉通破坏也因此成为近年国内外地学界关注的热点之一(路凤香等, 2006; 许文良等, 2009)。太行山地区的岩浆活动作为华北中生代岩浆活动的一部分,对其研究将会为揭示华北克拉通自中生代以来岩石圈减薄的途径提供重要信息。

岩浆岩具有“深部探针”属性,是深部作用的响应。岩浆在上升的过程中,可以对它穿过的不同圈层的岩石进行“采样”,并带到地壳的上部甚至地表(莫宣学, 2011),因此来自地球深部的岩石“样品”为提供地球内部特别是上地幔和地壳的直接信息发挥着重要作用。而基性-超基性岩正是这些深部岩石样品的代表,它们所体现的岩浆活动反映着区域深部岩浆作用过程,而岩浆岩造岩矿物的结构和成分又记录了这些岩浆在岩浆房中演化的全过程,包括岩浆生成、结晶分异、地壳混染以及岩浆混合等,因此,造岩矿物的成因矿物学研究无疑对厘定相关过程的物理化学条件、探讨岩浆演化均具有重要意义(张招崇等, 2005)。前人对于太行山北段基性-超基性岩的研究只局限在岩体及岩石成因方面(常兆山等, 2000; 刘玲等, 2009),而对于基性-超基性岩的矿物学研究尚薄弱。因此,本文试图通过对王安镇岩基超基性岩体中造岩矿物角闪石的系统研究,探讨其成因意义,揭示角闪石所反映的岩浆的性质及演化过程,为岩浆演化和华北克拉通破坏提供约束。

## 1 地质背景

王安镇岩基是大兴安岭-太行山构造-岩浆岩带的一部分,其产状受 NNE 向展布的紫荆关深断裂带

控制,构造上处在乌龙沟-上黄旗断裂(北支)和紫荆关-灵山断裂(南支)的交汇处(图 1a, 常兆山等, 2000)。

王安镇岩基岩性复杂,由相继侵入的 10 多个侵入体组成。已有地质成果将该岩基进行了划分和研究(河北省地质矿产局, 1989; 常兆山等, 1996; 蔡剑辉等, 2003)。其主要岩性为花岗闪长岩、二长花岗岩、斑状二长花岗岩和斑状花岗岩等(Feng and Chang, 1998),大致呈同心环形构造,按照岩石的接触关系和同位素年龄,可划分为 3 期:早期主要是基-中性岩类, K-Ar 同位素年龄为 223.1 Ma(常兆山等, 1996),主要出露于王安镇岩基东部;中期构成王安镇岩基的主体,其岩性为中酸性岩类如花岗闪长岩和二长花岗岩,其 Rb-Sr 等时线年龄为 145.7 Ma(蔡剑辉等, 2003),晚期主要是富碱的中酸性岩类如钾长花岗岩、石英二长岩和石英正长岩,其 Rb-Sr 等时线年龄为 126.4 Ma(阎国翰等, 2007)。王安镇岩基中超镁铁质岩出露很少,集中分布在王安镇窑沟和紫荆关西南鸭子村一带(图 1a)。本文将窑沟岩体中的橄榄辉石角闪石岩为代表进行详细的研究。

## 2 岩相学及岩石学特征

窑沟橄榄辉石角闪石岩出露于王安镇岩基北部,属于该岩基的一部分。野外调研发现,窑沟岩体橄榄辉石角闪石岩的直接围岩主要为辉石二长闪长岩,还有少量黑云母石英闪长岩(图 1b)。从中间至边缘依岩性可划分为橄榄辉石角闪石岩相-辉石二长闪长岩相-黑云母石英闪长岩相。辉石二长闪长岩与黑云母石英闪长岩呈渐变过渡接触关系。橄榄辉石角闪石岩呈不规则的团块状产于闪长岩类中,靠近窑沟橄榄辉石角闪石岩,闪长岩中的暗色矿物含量较高,并含有辉石(图 1b),向外过渡为黑云母石英闪长岩。已有研究表明,橄榄辉石角闪石岩是王安镇岩基中最早形成的岩石,其 K-Ar 年龄为 223 Ma,属于晚三叠世(常兆山等, 1996)。石英闪长岩

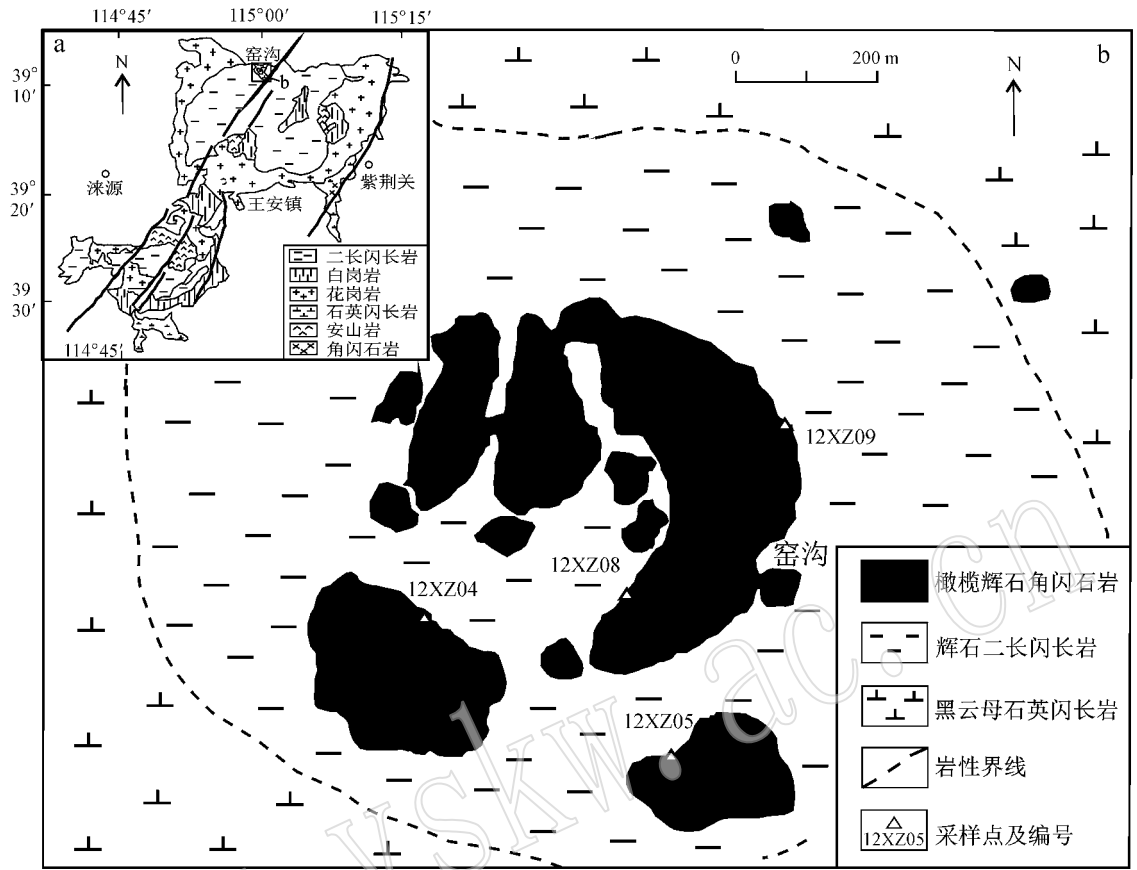


图 1 太行山北段窑沟橄榄辉石角闪石岩地质简图(据常兆山等, 2000 修编)

Fig. 1 Sketch map of olivine pyroxene hornblende from Yaogou in northern Taihang orogeny( after Chang Zhaoshan *et al.* , 2000 )

的年龄为 187 Ma( K-Ar 法,常兆山等, 2000 ),属于早侏罗世。

窑沟橄榄辉石角闪石岩的主要矿物为角闪石( 50% ~ 60% )、辉石( 20% ~ 25% )、橄榄石( 10% ~ 15% )、次要矿物为黑云母( 5% ~ 10% )、斜长石( < 5% )、蛇纹石( < 5% )、绿泥石( < 5% )、副矿物为磁铁矿、黄铜矿等( < 5% )。角闪石颗粒较大,粒度为 0.5 ~ 2 mm,自形到半自形,具有颜色环带,核部为棕色,边部为绿色,其中棕色角闪石含量约 30%,绿色角闪石含量约 20%,角闪石中还常包裹橄榄石、辉石、斜长石、磁铁矿等矿物;橄榄石以粒状为主,少量短柱状,部分颗粒的边缘和裂隙中充填有细小毛发状的磁铁矿;辉石颗粒自形到半自形,主要为斜方辉石( 15% ~ 20% ),有的呈被角闪石和黑云母交代的残余,并且包含少量粒状的橄榄石;黑云母多取代辉石和橄榄石;斜长石呈它形填隙状,发育聚片双晶或卡钠复合双晶;副矿物主要是磁铁矿和黄铜矿,黄铜矿在棕色角闪石中呈小球状,磁铁矿以细小的毛发

状分布于橄榄石颗粒的边缘和裂隙中。

辉石二长闪长岩主要由角闪石( 45% ~ 50% )、斜长石( 30% ~ 35% )、钾长石( 10% )、单斜辉石( 5% ~ 8% )组成,还含有少量石英( 2% )、黑云母、绿泥石、绿帘石和磁铁矿( < 5% )。辉石二长闪长岩中角闪石主要为普通角闪石,浅绿-绿色多色性,半自形-它形,多聚成团块;斜长石呈板柱状,以半自形为主,强烈绢云母化,钾长石呈半自形,有时可见内部斜长石交代残余;单斜辉石呈半自形-它形,部分颗粒外围发育绿色的角闪石反应边;石英呈它形粒状充填于粒间。

黑云母石英闪长岩主要由斜长石( 50% ~ 55% )、角闪石( 20% ~ 25% )、石英( 5% ~ 10% )和黑云母( 5% ~ 10% )组成,另外含有少量的钾长石( 5% )、单斜辉石( < 5% )和磁铁矿( < 5% )。斜长石呈半自形板状,发育聚片双晶和卡钠复合双晶,蚀变类型为绿泥石化和高岭土化。

### 3 角闪石矿物化学特征

研究表明, 窑沟橄榄辉石角闪石岩中的角闪石结晶程度较好, 呈自形-半自形晶, 并包含有许多粒状的橄榄石(图 2a~2c), 为典型的岩浆成因角闪石。

多数角闪石发育颜色环带, 矿物中心与边缘的不同环带颜色和多色性具有显著差异。环带表现出不同的颜色, 核部为棕色, 边部为绿色。在二者的接触带上呈现棕绿色的过渡(图 2a、2b)。核部棕色角闪石呈淡棕色-棕褐色; 边部的绿色角闪石呈淡黄-绿色(图 2c、2d)。

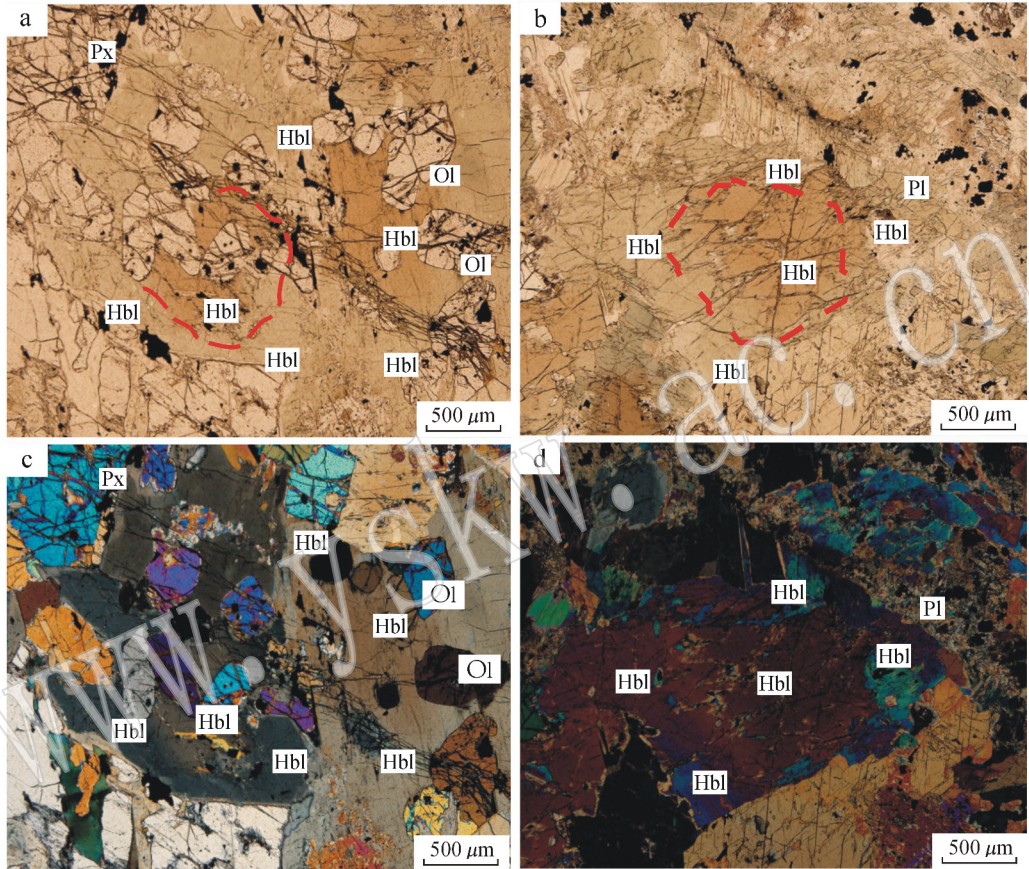


图 2 窑沟附近橄榄辉石角闪石岩的岩石学特征(矿物缩写符号参考沈其韩, 2009)

Fig. 2 Microphotographs of zoned amphiboles in olivine pyroxene hornblendite (mineral abbreviation after Shen Qihan, 2009)

对橄榄辉石角闪石中具有明显颜色的角闪石进行了成分分析(图 3、表 1)。鉴于电子探针分析结果不能确定  $Fe^{2+}$  和  $Fe^{3+}$  的配比, 本文以 23 个氧原子为基准, 并采用 Schumacher(1997)(王立本编译, 2001a, 2001b)提出的角闪石电子探针分析数据中三价铁的估算方法对橄榄辉石角闪石岩中角闪石的阳离子数及  $Fe^{2+}$ 、 $Fe^{3+}$  的配比值进行计算。

图 2 中角闪石具有两层环带, 核部棕色角闪石颜色较深, 并且计算结果显示从核部到边部  $Mg^{\#}$  呈现上升趋势。环带状角闪石的中心部位组成稳定, 其边缘部分 Si 和 Mg 逐渐升高, 而 Al、Na 和 Ti 逐渐降低。两种角闪石中 CaO 的含量较高, 均超过了

10%; 绿色角闪石具有较高的  $Mg^{\#}$ , 而棕色角闪石的  $Mg^{\#}$  则明显偏低。这两种角闪石阳离子特征为  $(Ca + Na)_B \geq 1.00$ ,  $N_{AB} < 0.50$ , 根据角闪石命名法——国际矿物学协会新矿物及矿物命名委员会角闪石专业委员会的报告(Leake *et al.*, 1997), 两种角闪石均属钙质角闪石。按钙角闪石的进一步分类命名原则, 角闪石  $Na_A + K_A < 0.5$ ,  $Ti < 0.5$ ,  $Fe^{3+} > Al^{VI}$ ,  $Si = 6.0447 \sim 6.5787$ ,  $Mg / (Mg + Fe^{2+}) = 4.4934 \sim 5.1046$ , 对其进行分类(图 4)。从图中可看出棕色角闪石属于镁绿钙闪石, 绿色角闪石属于普通角闪石中的浅闪石质普通角闪石和镁绿钙闪石质普通角闪石。

表 1 橄榄辉石角闪石岩中环带角闪石电子探针分析结果

 $w_B/\%$ 

Table 1 Electron microprobe analyses of amphiboles from olivine pyroxene hornblendite

角闪石 编号	核→边				核→边			核→边		
	a	a	a	a	b	b	b	c	c	c
	6An(棕) <sub>c</sub>	4An(棕) <sub>m</sub>	0An(棕) <sub>m</sub>	1An(棕) <sub>r</sub>	7An(棕) <sub>c</sub>	3An(棕) <sub>m</sub>	2An(棕) <sub>r</sub>	8An(棕) <sub>c</sub>	9An(棕) <sub>m</sub>	5An(棕) <sub>r</sub>
Na <sub>2</sub> O	2.83	3.01	2.80	3.06	2.74	2.97	2.92	2.87	3.03	2.94
MgO	15.45	15.61	15.66	17.23	14.94	16.08	17.00	15.28	16.03	17.24
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.12	11.63	11.62	9.99	12.57	11.00	9.67	12.50	11.72	10.05
SiO <sub>2</sub>	40.80	42.26	42.30	44.54	41.07	43.58	44.93	40.91	44.04	44.79
K <sub>2</sub> O	1.07	1.01	1.01	0.64	1.19	0.99	0.63	1.17	0.93	0.76
CaO	10.74	10.90	10.90	10.48	11.38	10.84	10.19	11.31	10.26	10.53
TiO <sub>2</sub>	3.21	2.21	2.22	0.23	3.23	1.03	1.20	3.26	1.85	1.19
MnO	0.27	0.05	0.18	0.20	0.17	0.10	0.29	0.07	0.17	0.08
FeO	10.71	10.42	10.49	10.85	9.89	10.81	10.26	9.99	9.81	10.40
以 23 个氧为基准计算的阳离子数										
Si <sub>T</sub>	6.053 9	6.243 7	6.244 9	6.540 8	6.074 0	6.409 7	6.578 7	6.044 7	6.396 6	6.511 0
Al <sub>T</sub>	1.946 1	1.756 3	1.755 1	1.459 2	1.926 0	1.590 3	1.421 3	1.955 3	1.603 4	1.489 0
Al <sub>C</sub>	0.173 4	0.268 8	0.266 7	0.269 8	0.265 0	0.316 5	0.247 5	0.221 4	0.402 9	0.232 8
Fe <sub>C</sub> <sup>3+</sup>	0.000 0	0.000 0	0.006 5	0.000 0	0.023 8	0.000 0	0.072 0	0.000 0	0.089 1	0.017 2
Ti <sub>C</sub>	0.358 3	0.245 6	0.246 6	0.025 4	0.359 4	0.114 0	0.132 2	0.362 4	0.202 2	0.130 1
Mg <sub>C</sub>	3.417 5	3.438 1	3.446 6	3.772 0	3.293 9	3.525 7	3.710 8	3.365 7	3.470 9	3.736 0
Fe <sub>C</sub> <sup>2+</sup>	1.050 7	1.047 4	1.033 6	0.932 7	1.058 0	1.043 8	0.837 6	1.050 5	0.834 9	0.883 8
Fe <sub>B</sub> <sup>2+</sup>	0.278 3	0.240 1	0.255 1	0.399 8	0.141 5	0.285 9	0.346 8	0.183 9	0.267 6	0.363 3
Mn <sub>B</sub>	0.033 9	0.006 3	0.022 5	0.024 9	0.021 3	0.012 5	0.036 0	0.008 8	0.020 9	0.009 9
Ca <sub>B</sub>	1.687 8	1.725 5	1.722 4	1.575 3	1.803 3	1.701 7	1.598 6	1.790 5	1.596 7	1.626 9
Na <sub>B</sub>	0.000 0	0.028 2	0.000 0	0.000 0	0.034 0	0.000 0	0.018 6	0.016 8	0.114 7	0.000 0
Ca <sub>A</sub>	0.019 7	0.000 0	0.001 8	0.073 7	0.000 0	0.006 6	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.013 2
Na <sub>A</sub>	0.814 1	0.834 1	0.801 5	0.871 3	0.751 7	0.846 9	0.810 4	0.805 4	0.738 5	0.828 6
K <sub>A</sub>	0.202 5	0.190 4	0.190 2	0.119 9	0.224 5	0.185 8	0.117 7	0.220 5	0.172 3	0.140 9
Mg <sup>#</sup>	0.720 0	0.727 5	0.727 9	0.739 0	0.733 1	0.726 1	0.758 0	0.731 6	0.758 9	0.749 7
Si/(Si + Ti + Al)	6.053 9	0.733 3	0.733 5	0.788 5	0.704 3	0.760 3	0.743 4	0.704 2	0.743 4	0.778 6
种属	镁绿钙 闪石	镁绿钙 闪石	镁绿钙 闪石	浅闪石质 普通角闪石	镁绿钙 闪石	镁绿钙闪 石质普通 角闪石	浅闪石质 普通角 闪石	镁绿钙 闪石	镁绿钙闪 石质普通 角闪石	浅闪石质 普通角 闪石
P <sub>H87</sub>	6.216 0	5.145 6	5.138 7	3.469 8	6.102 7	4.209 2	3.256 0	6.268 1	4.282 9	3.638 2
P <sub>S92</sub>	6.253 4	5.350 0	5.344 2	3.935 7	6.157 9	4.559 7	3.755 3	6.297 4	4.622 0	4.077 8

注：电子探针分析在中国地质大学（北京）地质实验中心 EPMA-1600 电子探针仪上完成。实验员：尹京武。压力计： $P_{H87} = (-4.76 + 5.64Al_T) \times 10^8$  Pa (Hollister *et al.*, 1987)  $P_{S92} = (-3.01 + 4.76 Al_T) \times 10^8$  Pa (Schmidt, 1992)。其中  $Al_T$  为角闪石结构式中 Al 原子总数。c 表示中心，m 表示中间，r 表示边缘。

## 4 讨论

### 4.1 角闪石的成因

角闪石族矿物具有重要的成因意义，通过相关研究不仅可以确定角闪石的成因类型，而且可以为探讨岩石成因和物质来源提供重要的地球化学信息。

从窑沟岩体的产出特征来看，橄榄辉石角闪石岩分布较为集中，在与闪长岩的接触带上有结晶分

异和岩浆晚期交代现象，前人认为窑沟橄榄辉石角闪石岩是一次独立岩浆活动的产物，而不是由闪长岩岩浆结晶分异引起的（常兆山等，2000）。即橄榄辉石角闪石岩和闪长岩不是同一岩浆结晶分异的产物，橄榄辉石角闪石岩来源深且较早形成，闪长岩来源浅且形成较晚。笔者对橄榄辉石角闪石岩中角闪石的成因研究结果也与这一结论相符。从角闪石成因矿物族三角图解（图 5）上可以看出，两种角闪石电子探针的分析数据均落在了基性-超基性成因区，且变化差异不大，表明这些角闪石为超基性-基性岩浆



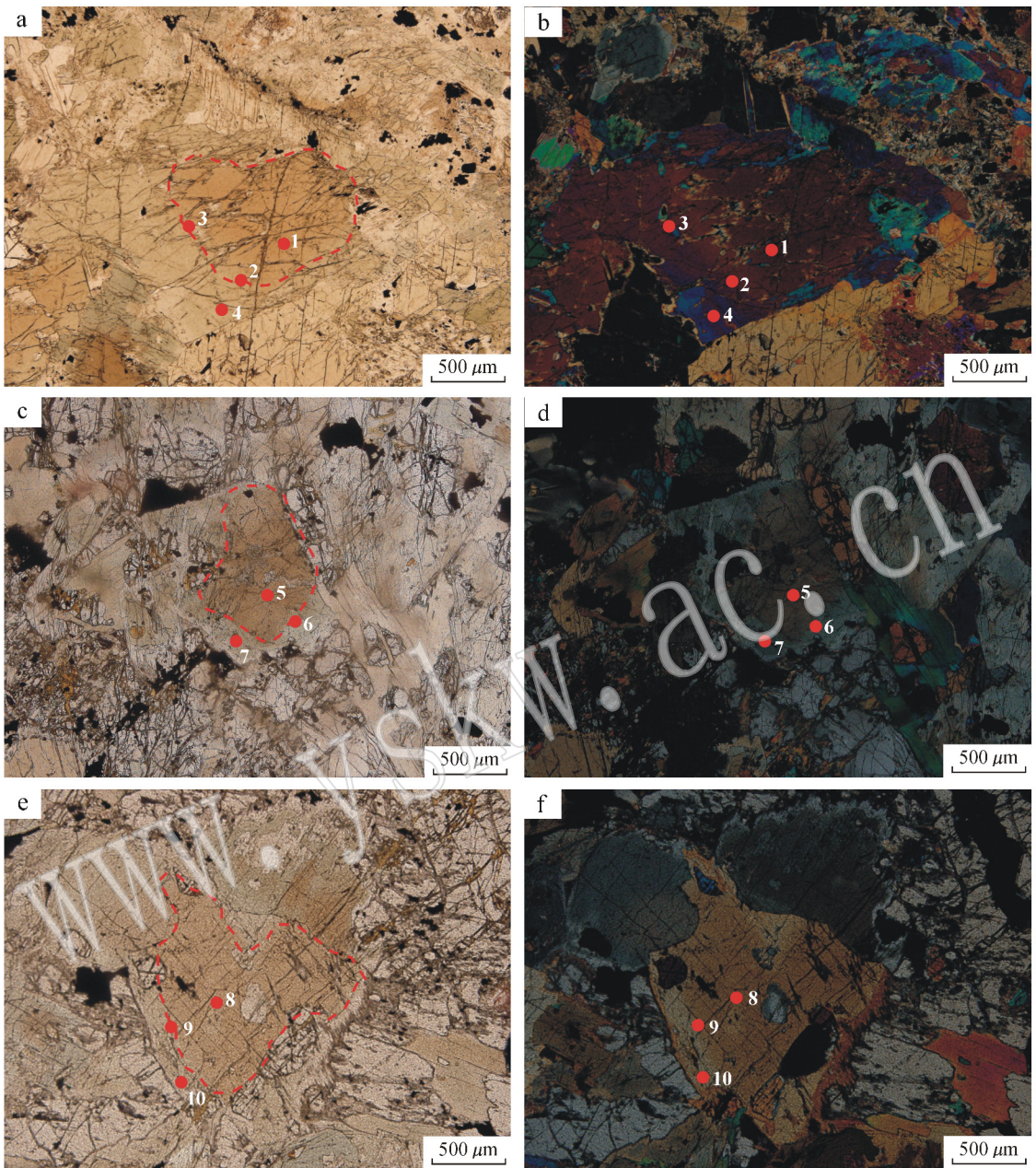


图 3 窑沟橄榄辉石角闪岩中环带角闪石电子探针图

Fig. 3 Electron microprobe photos of zoned amphiboles from Yaogou pyroxene hornblende

结晶的产物。橄榄辉石角闪岩中的角闪石以镁绿钙闪石为主, 而镁绿钙闪石 Al、Ti 含量较高, 并有限硫铁出现, 反映角闪石形成于来源较深的岩浆。

橄榄辉石角闪岩中斜长石含量较少 (<5%), 而且也并未发现斜长石发育复杂的成分和结构不平衡现象。同时根据已有的研究成果 (常兆山等, 2000), 窑沟橄榄辉石角闪岩并非包体, 而是一次独立的岩浆活动的产物。这就意味着橄榄辉石角闪

石岩浆中并未有后期的幔源碱性-超碱性岩浆的注入, 所以角闪石并未表现出成因上的差异, 应属于同一期岩浆结晶的产物。这一结论也得到角闪石成因矿物族三角图解 (图 5) 的支持。

#### 4.2 角闪石结晶条件及深度差异

前已证实, 窑沟橄榄辉石角闪岩中的角闪石为碱性-超碱性岩浆结晶成因。但通过研究发现环带角闪石中两种角闪石的矿物学特征和成分上却存

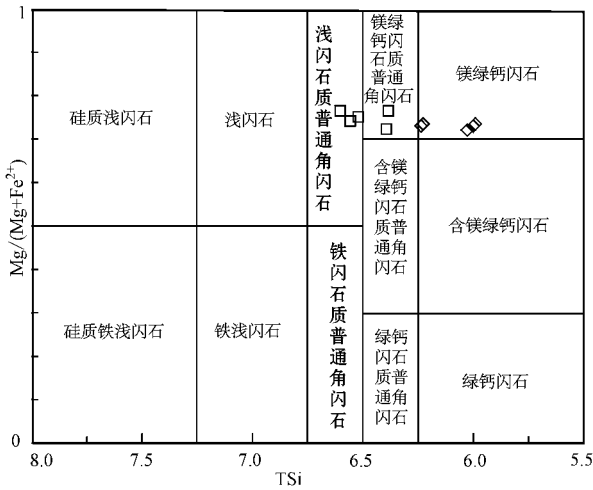


图 4 窑沟橄辉石角闪岩中角闪石的分类图解 (底图据许文良等, 2009)

Fig. 4 Classification of amphiboles from olivine pyroxene hornblende (after Xu Wenliang *et al.*, 2009)

钙质角闪石  $n_{Na_A} + K_A < 0.5, Ti < 0.5, Fe^{3+} > Al^{VI}$ ;  
 ◇—内环棕色角闪石; □—外环绿色角闪石

calcic amphibole  $n_{Na_A} + K_A < 0.5, Ti < 0.5, Fe^{3+} > Al^{VI}$ ; ◇—magnesian hastingsite in brown color; □—magnesian hastingsite hornblende to edenitic hornblende in green color

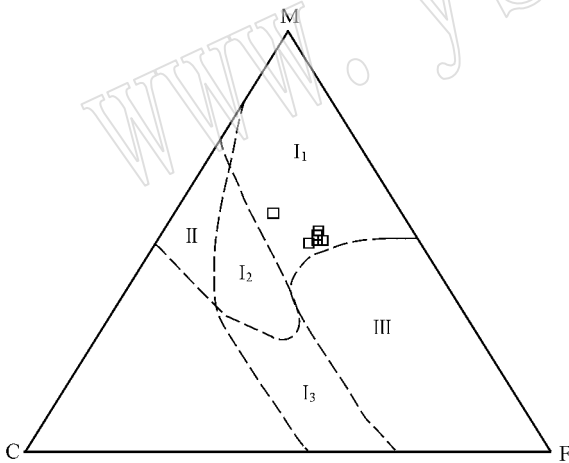


图 5 角闪石成因矿物族三角图解 (据陈光远等, 1987)

Fig. 5 Genetic triangular diagram of amphiboles from Yaogou (after Chen Guangyuan *et al.*, 1987)

岩浆成因区、区域正变质成因区、超变质成因区: I<sub>1</sub>—超基性-基性成因区; I<sub>2</sub>—中-酸性成因区; I<sub>3</sub>—碱性成因区; II—接触交代成因区; III—区域副变质成因区; M—Mg; C—LiNaKCa (不分); F—Fe<sup>2+</sup> + Fe<sup>3+</sup>

magma genetic area, regional genesis of orthometamorphism area, ultra-metamorphic genetic area: I<sub>1</sub>—basic-ultrabasic genetic area; I<sub>2</sub>—intermediate acidic genetic area; I<sub>3</sub>—alkaline genetic area; II—contact metasomatic genetic area; III—regional parametamorphic genetic area; M—Mg; C—LiNaKCa; F—Fe<sup>2+</sup> + Fe<sup>3+</sup>

在差异,这种差异可能是岩浆演化的不同阶段的表现。来源于深部的基性-超基性岩浆在上升的过程中经历了不同的物理化学条件,在角闪石的结晶的过程中可能造成了环带的组分变化。因此,笔者对角闪石的形成温压条件进行了计算和研究。Hammarstrom 和 Zerk (1986)最早观察到火成岩中角闪石的 Al 含量与平衡压力之间存在较好地线性关系,并得到如下经验公式:  $p = (-3.92 + 5.03 Al_T) \times 10^8$  Pa。其中 Al<sub>T</sub> 是角闪石结构式中 Al 原子总数。

随后 Hollister 等 (1987) 和 Schmidt (1992) 分别通过实验对该经验公式进行了改进(牛利峰等, 2005):  $p = (-4.76 + 5.64 Al_T) \times 10^8$  Pa,  $p = (-3.01 + 4.76 Al_T) \times 10^8$  Pa。以此经验公式来估算窑沟橄辉石角闪岩中角闪石结晶时的压力。内核镁绿钙闪石贫 Si 富 Al, 两个公式的计算结果(表 1)基本一致,显示其结晶时的压力为  $6.27 \times 10^8 \sim 5.14 \times 10^8$  Pa, 大致相当于 23~18 km 的(岩浆房)深度,表明岩浆侵位并结晶于下地壳环境。而浅闪石质普通角闪石和镁绿钙闪石质普通角闪石结晶时的压力为  $4.56 \times 10^8 \sim 3.76 \times 10^8$  Pa, 大致相当于 16~15 km 深度,表明岩浆侵位后在上升过程中物理化学条件变化,在较低压的地壳环境中结晶。

角闪石的结晶温度能够通过 Blundy and Holland (1994) 提供的钙长石体系的角闪石-斜长石地质温度计来计算。角闪石和斜长石均符合地质温度计的计算要求,斜长石  $An < 92$ , 角闪石  $Si < 7.8$ , 为钙角闪石。计算式为:  $t = (0.077p - 48.98 + Y) / (-0.0616 - 0.08314 \ln k)$ , 式中,  $p$  分别取两种角闪石结晶压力的平均值,可得到核部棕色角闪石的结晶温度为 850~950℃, 边缘绿色角闪石的结晶温度为 700~800℃。两种角闪石结晶温度的差异同样也反映了两种角闪石结晶时物理化学条件的不同。因此角闪石环带的组成变化反映了同一期岩浆演化的不同阶段,体现着矿物结晶时物理化学条件和成生深度的差异。

据此可以看出,角闪石环带中核部的镁绿钙闪石结晶时温度和压力较高,深度较大,属于下地壳环境,而边缘角闪石在较低压地壳环境生成。

### 4.3 源区性质及其构造意义

岩浆岩中钙质角闪石的化学成分与岩浆来源之间密切相关(马润则等, 1997)。随着温度和压力的增高,钙质角闪石的 Si 含量有规律地降低,角闪石的 Si/(Si + Ti + Al) 值在壳源区和幔源区之间出现间断

(姜常义等, 1984)。研究表明, 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。窑沟橄榄辉石角闪石岩体中角闪石分析结果(表 1)显示角闪石的  $Al_2O_3$  均大于 10%,  $Si/(Si + Ti + Al)$  值的范围为 0.7042~0.7885, 应属幔源角闪石。在角闪石的  $TiO_2 - Al_2O_3$  关系图上(图 6)均位于幔源区, 表明岩浆应来源于上地幔。

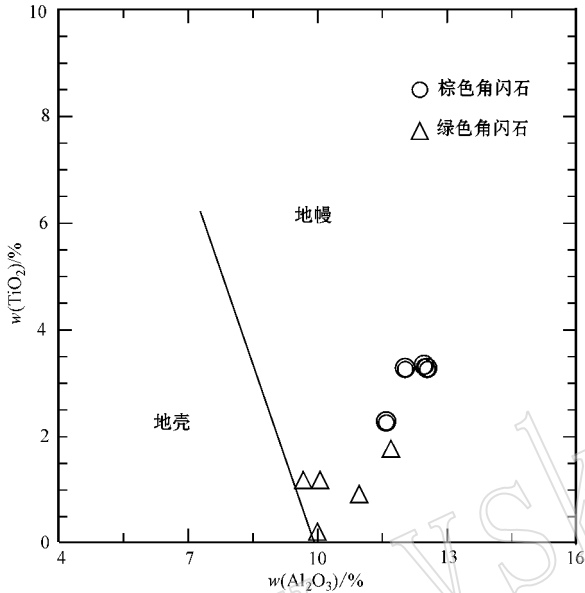


图 6 两种角闪石的  $Al_2O_3 - TiO_2$  与岩浆来源关系图  
(据姜常义等, 1984)

Fig. 6 Relationship between  $Al_2O_3 - TiO_2$  of amphibole and magmatic source (after Jiang Changyi *et al.*, 1984)

从岩石的构造关系来看, 窑沟橄榄辉石角闪石岩位于深大断裂附近, 为角闪石岩浆的深源侵位提供了通道条件, 这与上述分析的结果是一致的。因此, 来源于上地幔的橄榄辉石角闪石岩浆沿断裂上升, 最先侵位, 在下地壳开始结晶, 并伴随着岩浆演化形成环带角闪石。后期其周围的中酸性岩体相继侵位, 且规模也越来越大, 整个过程受深大断裂的控制。

窑沟橄榄辉石角闪石岩形成于 230 Ma 的晚三叠世(常兆山等, 2000), 而王安镇岩基主体形成于晚侏罗世-早白垩世时期, 说明在晚三叠世华北克拉通上地幔岩石圈就已经开始出现部分熔融, 形成幔源岩浆并沿深大断裂开始侵位了, 暗示着华北克拉通破坏早在晚三叠世就已经开始了。

## 5 结论

(1) 窑沟橄榄辉石角闪岩中的角闪石为岩浆成因, 其中以镁绿钙闪石为主,  $Al$ 、 $Ti$  含量较高, 反映岩浆来源较深。

(2) 角闪石具有不同环带, 内环角闪石为镁绿钙闪石, 外环为浅闪石质普通角闪石和镁绿钙闪石质普通角闪石, 两种角闪石形成于同一期岩浆演化的不同阶段, 体现着矿物结晶时的物理化学条件和成生深度的差异。即角闪石环带中核部的镁绿钙闪石结晶时温度和压力较高, 深度较大, 属于下地壳环境; 而边缘角闪石在较低压地壳环境生成。

(3) 窑沟橄榄辉石角闪石岩中角闪石应属幔源物质成因, 表明岩浆应来源于上地幔, 说明晚三叠世华北克拉通上地幔岩石圈已出现部分熔融, 暗示着华北克拉通破坏早在晚三叠世就已经开始了。

致谢 感谢中国地质大学(北京)地学实验中心电子探针室尹京武教授的帮助; 论文撰写还得到了董美玲、罗微和王鹏等研究生的帮助, 在此一并表示衷心感谢!

## References

- Blundy J D and Holland T J B. 1994. Calcic amphibole balance and a new amphibole plagioclase geothermometer [J]. *Foreign Mineral Deposits*, 3: 38-61.
- Cai Jianhui, Yan Guohan, Chang Zhaoshan, *et al.* 2003. Petrological and geochemical characteristics of the Wang 'anzhen complex and discussion on its genesis [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(1): 81-92 (in Chinese with English abstract).
- Chang Zhaoshan and Feng Zhongyan. 1996. The Alteration and Mineralization of Zhijiazhuang Iron Deposit, Hebei Province [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 32(6): 724-733 (in Chinese with English abstract).
- Chang Zhaoshan, Feng Zhongyan and Chen Tingli. 2000. Research on the ultramafic rocks in the Laiyuan batholith, Hebei Province [J]. *Geology and Prospecting*, 36(3): 36-39 (in Chinese with English abstract).
- Chen Guangyuan, Sun Daisheng and Yin Huian. 1987. Genetic Mineralogy and Prospecting Mineralogy [M]. Chongqing: Chongqing Publishing House, 586-590 (in Chinese).



- Deng Jinfu, Su Shangguo, Zhao Hailing, *et al.* 2003. Deep processes of Mesozoic Yanshanian lithosphere thinning in North China[ J ]. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 41~50( in Chinese with English abstract ).
- Fan Qicheng, Sui Jianli, Liu Ruoxin, *et al.* 2001. Eclogite facies garnet-pyroxenolite xenolith in Hannuo ba area: New evidence of magma underplating[ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 1~6( in Chinese with English abstract ).
- Feng Zhongyan and Chang Zhaoshan. 1998. Magmatic setting of the northern Taihang mountains metallogenetic province, proceedings of the ninth quadrennial IAGOD symposium, Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung[ A ]. 69~275.
- Hammarstrom J M and Zen E A. 1986. Aluminum in hornblende: an empirical igneous geobarometer[ J ]. *American Mineralogist*, 71: 1297~1313.
- Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources. 1989. Regional geology of Tianjin and Beijing city in Hebei province[ M ]. Beijing: Geological Press, 1~50( in Chinese ).
- Hollister L S, Grissom G C, Peters E K, *et al.* 1987. Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with products of solidification in calc-alkaline plutons[ J ]. *American Mineralogist*, 72: 231~239.
- Jiang Changyi and An Sanyuan. 1984. Chemical compositions and petrology significance of calcium amphibole in the igneous rock[ J ]. *Journal of Mineral and Petrology*, 4(3): 10~15( in Chinese with English abstract ).
- 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 Commission on New Minerals and Mineral Names[ J ]. *Mineralogical Magazine*, 61: 295~321.
- Liu Ling, Chen Bin and Liu Ankun. 2009. Petrogenesis of the Zijinguan Mafic Pluton, Northern Taihang Orogen: Constraints from petrology and geochemistry[ J ]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 34(1): 165~178( in Chinese with English abstract ).
- Lu Fengxiang, Zheng Jianping, Shao Ji'an, *et al.* 2006. Asthenospheric upwelling and lithospheric thinning in Late Cretaceous-Cenozoic in eastern North China[ J ]. *Earth Science Frontiers*, 13(2): 86~92( in Chinese with English abstract ).
- Ma Runze, Xiao Yuanfu, Wei Xiangui, *et al.* 1997. Research on the geochemical property and genesis of basic and ultrabasic rocks of Jinning period in the Micangshan area, Sichuan province[ J ]. *Journal of Mineral and Petrology*, 17( supplement ): 35~47( in Chinese with English abstract ).
- Mo Xuanxue. 2011. Magma and magmatic/igneous rocks: a lithoprobe into the deep earth and records of the earth's evolution[ J ]. *Chinese journal of nature*, 33(5): 255~259( in Chinese with English abstract ).
- Niu Lifeng and Zhang Hongfu. 2005. Mineralogy and petrogenesis of amphiboles from intermediate-mafic intrusions in southern Taihang mountain[ J ]. *Geotectonica et Metallogenia*, 29(2): 269~277( in Chinese with English abstract ).
- Schmidt M W. 1992. Amphibole composition in tonalite, as a function of pressure: An experimental calibration of the Al in hornblende barometer[ J ]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 110: 304~310.
- Shen Qihan. 2009. The recommendation of a systematic list of mineral abbreviations[ J ]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(5): 495~500( in Chinese with English abstract ).
- Xu Wenliang, Yang Debin, Pei Fuping, *et al.* 2009. Mesozoic lithospheric mantle modified by delaminated lower continental crust in the North China craton: Constraints from compositions of amphiboles from peridotite xenoliths[ J ]. *Journal of Jilin University( Earth Science Edition )*, 39(4): 605~617( in Chinese with English abstract ).
- Yan Guohan, Cai Jianhui, Ren Kangxu, *et al.* 2007. Intraplate extensional magmatism of North Craton and break-up of three supercontinents and their deep dynamics[ J ]. *Geological Journal of China Universities*, 13(2): 161~174( 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 processes[ J ]. *Acta Mineralogica Sinica*, 25(3): 237~248( in Chinese with English abstract ).
- Zhao Guochun, Wilde S A, Cawood P A, *et al.* 2000. Petrology and P-T path of the Fuping mafic granulites: implications for tectonic evolution of the central zone of the North China Craton[ J ]. *Journal of Metamorphic Geology*, 18: 375~391.

## 附中文参考文献

- 蔡剑辉, 阎国翰, 常兆山, 等. 2003. 王安镇岩体岩石地球化学特征及成因探讨[ J ]. *岩石学报*, 19(1): 81~92.
- 常兆山, 冯钟燕. 1996. 河北涞源支家庄铁矿的蚀变矿化[ J ]. *北京大学学报(自然科学版)*, 32(6): 724~733.
- 常兆山, 冯钟燕, 陈廷礼. 2000. 河北涞源岩基中的超镁铁质岩研究[ J ]. *地质与勘探*, 36(3): 36~39.
- 陈光远, 孙岱生, 殷辉安. 1987. 成因矿物学与找矿矿物学[ M ]. 重庆: 重庆出版社, 586~590.
- 邓晋福, 苏尚国, 赵海玲, 等. 2003. 华北地区燕山期岩石圈减薄的深部过程[ J ]. *地学前缘*, 10(3): 41~50.
- 樊祺诚, 隋建立, 刘若新, 等. 2001. 汉诺坝榴辉岩相石榴辉石岩——岩浆底侵作用新证据[ J ]. *岩石学报*, 17(1): 1~6.

- 河北省地质矿产局. 1989. 河北省北京市天津市区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1~50.
- 姜常义,安三元. 1984. 论火成岩中钙质角闪石的化学成分及其岩石学意义[J]. 矿物岩石, 4(3): 10~15.
- 刘玲,陈斌,刘安坤. 2009. 北太行紫荆关基性岩体的成因:岩石学和地球化学证据[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 34(1): 165~178.
- 路凤香,郑建平,邵济安,等. 2006. 华北东部中生代晚期-新生代软流圈上涌与岩石圈减薄[J]. 地学前缘, 13(2): 86~92.
- 马润则,肖渊甫,魏显贵,等. 1997. 四川米苍山地区晋宁期基性超基性岩地球化学性质及其成因研究[J]. 矿物岩石, 17(增刊): 35~47.
- 莫宣学. 2011. 岩浆与岩浆岩“地球深部”探针”与演化记录[J]. 自然杂志, 33(5): 255~259.
- 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[J]. 大地构造与成矿学, 29(2): 269~277.
- 沈其韩. 2009. 推荐一个系统的矿物缩写表[J]. 岩石矿物学杂志, 28(5): 495~500.
- 王立本(编译). 2001a. 角闪石命名法——国际矿物学协会新矿物及矿物命名委员会角闪石专业委员会的报告[J]. 岩石矿物学杂志, 20(1): 84~100.
- 王立本(编译). 2001b. 角闪石电子探针分析数据中三价铁的估算方法[J]. 岩石矿物学杂志, 20(2): 189~198.
- 许文良,杨德彬,裴福萍,等. 2009. 华北克拉通中生代拆沉陆壳物质对岩石圈地幔的改造:来自橄榄岩捕虏体中角闪石的成分制约[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 39(4): 605~617.
- 阎国翰,蔡剑辉,任康旭,等. 2007. 华北克拉通板内拉张性岩浆作用与三个超大陆裂解及深部地球动力学[J]. 高校地质学报, 13(2): 161~174.
- 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.

www.yskw.ac.cn