

沙坪沟钼矿区橄榄角闪石岩岩石成因

——矿物学特征约束

王莹¹, 谢玉玲¹, 吴皓然¹, 钟日晨¹, 梁培¹, 王爱国²

(1. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083; 2. 南京地质矿产研究所, 江苏 南京 210016)

摘要: 对位于秦岭-大别造山带的沙坪沟钼矿区出露的橄榄角闪石岩开展了系统的岩石学、岩相学及电子探针原位分析,厘定了其成岩物理化学条件,并探讨了岩石成因及形成的构造环境。橄榄角闪石岩主要造岩矿物为橄榄石、角闪石、金云母和辉石;副矿物为磷灰石、铬铁尖晶石、镁铁尖晶石、磁铁矿、磁黄铁矿、镍黄铁矿等。电子探针原位分析结果显示,橄榄石属于贵橄榄石系列,角闪石主要是韭闪石,辉石为透辉石,云母为金云母。造岩矿物结晶顺序为橄榄石-辉石-角闪石,结晶温度介于1 111.64 ~ 1 223.30℃之间,形成压力为350 ~ 740 MPa,形成于较高的氧逸度环境(角闪石结晶时的氧逸度范围为 $\text{NNO} + 0.59 \sim \text{NNO} + 2.27$)。角闪石和金云母的矿物学特征显示它们均是与幔源岩浆作用相关的原生矿物,表明该套基性-超基性岩与幔源岩浆作用有关。综合分析认为,在大别造山带中生代地壳减薄的伸展构造背景下,该橄榄角闪石岩母岩浆源于地幔,是经过地幔7.92%部分熔融的玄武质岩浆经结晶分异作用形成的幔源岩浆底侵下地壳的产物。

关键词: 橄榄角闪石岩;矿物学特征;岩石成因;沙坪沟;大别造山带

中图分类号: P588.12⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2019)02-0191-18

Petrogenesis of olivine hornblende in Shapinggou molybdenum ore district: Constraints from mineralogical characteristics

WANG Ying¹, XIE Yu-ling¹, WU Hao-ran¹, ZHONG Ri-chen¹, LIANG Pei¹ and WANG Ai-guo²

(1. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Nanjing Institute of Geology and Mineral Resource, Chinese Academy of Geological Sciences, Nanjing 210016, China)

Abstract: The Shapinggou molybdenum deposit is the second largest porphyry molybdenum deposit in the world. The mafic-ultramafic rock widely exposed in the area of Shapinggou molybdenum ore deposit is an important medium to reveal the deep information of the deposit. In this paper, the olivine-bearing amphibolite outcropped in the mining area were studied based on petrology, petrography and in situ analysis so as to clarify physicochemical conditions of diagenesis and discuss the petrogenesis and tectonic setting. The main rock-forming minerals contain olivine, amphibole, phlogopite and pyroxene, and the accessory minerals are apatite, chromium-iron spinel, mafic spinel, magnetite, pyrrhotite and pentlandite. The results of in-situ analysis of EPMA show that olivine belongs to the chrysolite series, amphibole is parasite, pyroxene is diopside and mica is phlogopite. The order of crystallization is olivine-pyroxene-amphibole, the temperature ranges from 1 111.64 to 1 223.30℃ and the formation pressure ranges from 350 to 740 MPa, with high oxygen fugacity (the oxygen fugacity varies from $\text{NNO} + 0.59$ to NNO

收稿日期: 2018-11-20; 接受日期: 2019-02-18; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 国土资源部公益性行业基金项目(201011011); 中国地质调查局资助项目(2014-01-020-010)

作者简介: 王莹(1980-), 女, 博士研究生, 采矿工程专业, E-mail: yingying8025@126.com; 通讯作者: 谢玉玲(1963-), 女, 教授, 主要从事矿床学和矿床地球化学方面研究, E-mail: yulingxie@263.net。

+ 2.27)。The mineralogical characteristics of phlogopite and amphibole indicate that phlogopite was related to mantle-derived magmatism. The study shows that the parent magma of olivine-bearing amphibolite originated from the mantle and was formed through crystallization differentiation of basalt magma which was partially melted by 7.92% of the mantle. The olivine-bearing amphibolite outcropped in the north of Shapinggou mining area should be the product of partial melting of mantle-derived magma under the extensional tectonic background.

Key words: olivine hornblende; mineralogical characteristics; petrogenesis; Shapinggou; Dabie orogenic belt

Fund support: Ministry of Land and Resources Public Welfare Industry Foundation of China Projects (201011011); China Geological Survey Commission (2014-01-020-010)

秦岭-大别造山带是世界著名的斑岩钼矿带(李诺等, 2007; 李俊平等, 2011; 李毅等, 2013), 该造山带经历了扬子板块与华北板块强烈的陆-陆碰撞造山过程, 形成了早白垩世强烈的岩浆活动记录(Mao *et al.*, 2011)。沙坪沟超大型钼矿即形成于早白垩世强烈的岩浆背景。沙坪沟钼矿是目前探明钼金属量最大的钼矿床(237.96×10^4 t)(张怀东等, 2012), 仅次于美国 Climax 钼矿床, 为世界第二大钼矿床。前人对沙坪沟钼矿进行了大量研究, 包括岩浆岩成岩年代学(徐晓春等, 2009; 黄凡等, 2011; 张红等, 2011; 孟祥金等, 2012; 陈红瑾等, 2013)、岩石地球化学(王波华等, 2007; 陈红瑾等, 2013; 徐刚等, 2012)、成矿年代学(黄凡等, 2011; 张红等, 2011; 孟祥金等, 2012)、矿床地质特征(张怀东等, 2012; 阳珊等, 2013; 任志等, 2015)和成矿流体特征(Ni *et al.*, 2005; 于文等, 2013; Gao *et al.*, 2015)等。但上述研究多集中于赋矿斑岩体的年代学和岩石地球化学的研究。超大型矿床的形成并非单一控制因素而成, 往往与地球深部活动密切相关, 而与超大斑岩型矿床有密切的时空共生关系的超基性-基性岩成为了解斑岩形成过程中地球深部信息的重要“岩石探针”, 如中国东部兴蒙造山带小兴安岭-张广才岭钼矿区(杨言辰等, 2012; 谭红艳等, 2012)、大别造山带西冲钼矿区等(谢玉玲等, 2015), 这些钼资源富集区都发育有成矿同期基性-超基性侵入的现象, 这些地质事实表明中国东部燕山期大规模成矿事件与幔源岩浆活动有关。基性岩可能为酸性岩浆房的演化提供了挥发分、S(可能还有 Mo)(Westra and Keith, 1981; Keith *et al.*, 1993; Carten *et al.*, 1993; Audétat, 2010)。野外地质调查发现沙坪沟超大型钼矿的西部、北部出露同期超基性岩和基性脉岩, 目前对该超基性岩体矿物学特征的研究工作很是薄弱。通过对这些基性-超基性岩中造岩矿物学特征进行分析研究, 有助于探讨岩

浆结晶分异、同化混染等岩浆演化的过程(张招崇等, 2003)。为此本文在系统的野外地质调查基础上, 主要利用电子探针原位分析, 对大别造山带沙坪沟斑岩钼矿区超基性岩橄榄角闪石岩的主要造岩矿物橄榄石、辉石、角闪石、云母成分进行系统的矿物学研究, 旨在厘定该超基性岩类矿物形成的物理化学条件, 深化对沙坪沟钼矿区超基性岩岩浆演化的认识, 探讨其岩石成因及形成的构造环境, 以期为解决大别造山带中生代壳幔演化、构造-岩浆活动提供矿物学尺度的约束。

1 区域地质

研究区大地构造位置处于秦岭-大别造山带, 大别造山带是中国中央造山带的重要组成部分, 是扬子板块与华北板块经历了洋壳俯冲、弧岩浆活动、弧陆碰撞、陆陆碰撞等地质过程而形成的(邓晋福等, 2000; 谢才富等, 2001)(图1)。

区域出露的地层主要是: 新太古界-古元古界的大别-桐柏变质核杂岩, 岩性以二长花岗质片麻岩、英云闪长质片麻岩和黑云斜长片麻岩为主(王运等, 2009; 李毅等, 2013); 中元古界的庐镇关岩群主要岩石类型有黑云变粒岩、浅粒岩、斜长角闪岩、大理岩、云母片岩等, 是一套变中基性火山-沉积岩组合(彭智等, 2015); 新元古界-早古生界的佛子岭岩群为一套中浅变质岩系, 主要由板岩、千枚岩和云母石英片岩等组成(戴圣潜等, 1992; 陈跃志等, 1995); 秦岭群变质杂岩、二郎坪群浅变质火山-沉积岩系, 被绢云石英片岩及炭质石英片岩覆盖; 红安岩群为一套浅中变质的片岩及片麻岩(Ren *et al.*, 2018)。

大别造山带发育了不同时期、不同规模、不同方向的断裂构造系统, 该区断裂构造十分复杂。区域内以两个方向的断裂构造最为发育: 一是与造山带

平行的NW向断裂,主要有明港-六安断裂、龟山-梅山断裂、晓天-磨子潭断裂、襄樊-广济断裂等;二是一组NE向断裂,主要有商城-麻城断裂、郟庐断裂等(邓晋福等,2000)。它们总体构成了NW向和NE向的网格状构造(图1)。

大别造山带岩浆活动频繁,各个地质时期均有不同程度的表现,以燕山期最为强烈。主要发育燕

山期中酸性花岗(斑)岩、陆相火山岩;晋宁期中酸性侵入岩、基性-超基性岩。燕山期火山岩包括两个火山旋回:第一旋回以形成于陆内挤压构造环境的安山岩-粗安岩-粗面岩组合为主,属高钾钙碱性岩石系列;第二旋回为形成于陆壳减薄拉张环境的一套玄武岩-碱性粗面岩-假白榴石响岩组合(杜建国,2000)。

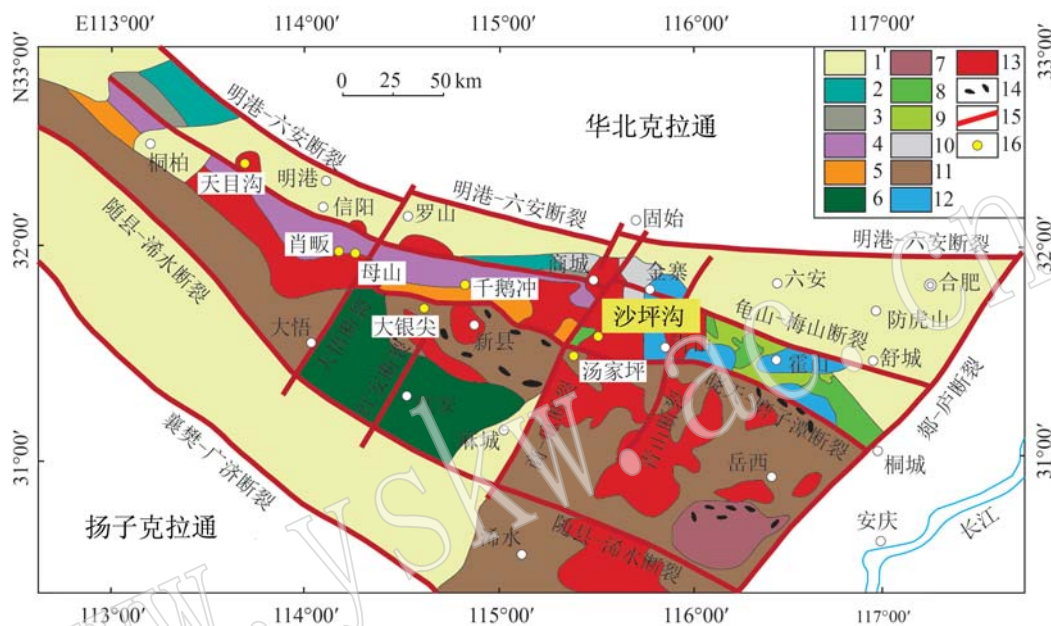


图1 大别造山带地质简图(据杨泽强,2007 修绘)

Fig. 1 Geological sketch map of the Dabie orogenic belt (after Yang Zeqiang, 2007)

- 1—中生代地层; 2—二郎坪群; 3—秦岭群; 4—信阳群; 5—苏家河群; 6—红安群; 7—宿松群; 8—庐镇关群; 9—佛子岭群; 10—梅山群; 11—大别-桐柏变质杂岩; 12—燕山期火山岩; 13—燕山期花岗岩; 14—超铁镁质岩; 15—断裂; 16—矿床
- 1—Mesozoic sedimentary rocks and Cenozoic sediments; 2—Erlangping Group; 3—Qinling Group; 4—Xinyang Group; 5—Sujiahe Group; 6—Hong'an Group; 7—Susong Group; 8—Luzhenguan Group; 9—Foziling Group; 10—Meishan Group; 11—Dabie-Tongbai complex; 12—Yanshanian volcanic rocks; 13—Yanshanian granites; 14—mafic rocks; 15—fault; 16—deposit

2 沙坪沟钼矿区地质概况

沙坪沟钼矿位于安徽省金寨县,大地构造位置处于大别造山带东段,晓天-磨子潭断裂与商城断裂交汇处的东北侧(张怀东等,2012)(图1)。

该区出露地层主要是中元古界庐镇关岩群的变火山-沉积岩。在沙坪沟矿区,由于强烈的岩浆侵入作用,变质地层呈残留体产出,主要岩性为角闪斜长片麻岩和花岗片麻岩(安徽省地质矿产勘查局313地质队,2011^①;孟祥金等,2012)(图2)。

矿区内断裂构造发育,晓天-磨子潭区域性深大

断裂从该区南部穿过,并发育一系列的次级断裂,次级断裂以NE向、NW向断裂为主,次为近SN向、近EW向断裂(安徽省地质矿产勘查局313地质队,2011^①;张红等,2011;张怀东等,2012)(图2)。

矿区内中生代侵入岩发育广泛,岩性从超基性岩-酸性岩-偏碱性岩均有分布,以中酸性为主。矿区中酸性侵入岩包括花岗闪长岩、正长岩、花岗岩、石英正长斑岩、花岗斑岩等(任志等,2015)。花岗闪长岩成岩时代为 127.5 ± 2.9 Ma(任志等,2015),深绿色,中粒结构,块状构造,主要出露于矿区北部洪家大山、银山畈地区,沙坪沟地区有局部出露,出露面积约10 km²,呈岩株状产出。正长岩成岩

① 安徽省地质矿产勘查局313地质队. 2011. 安徽省金寨县沙坪沟钼矿普查地质报告(内部资料)[R]. 1~18.

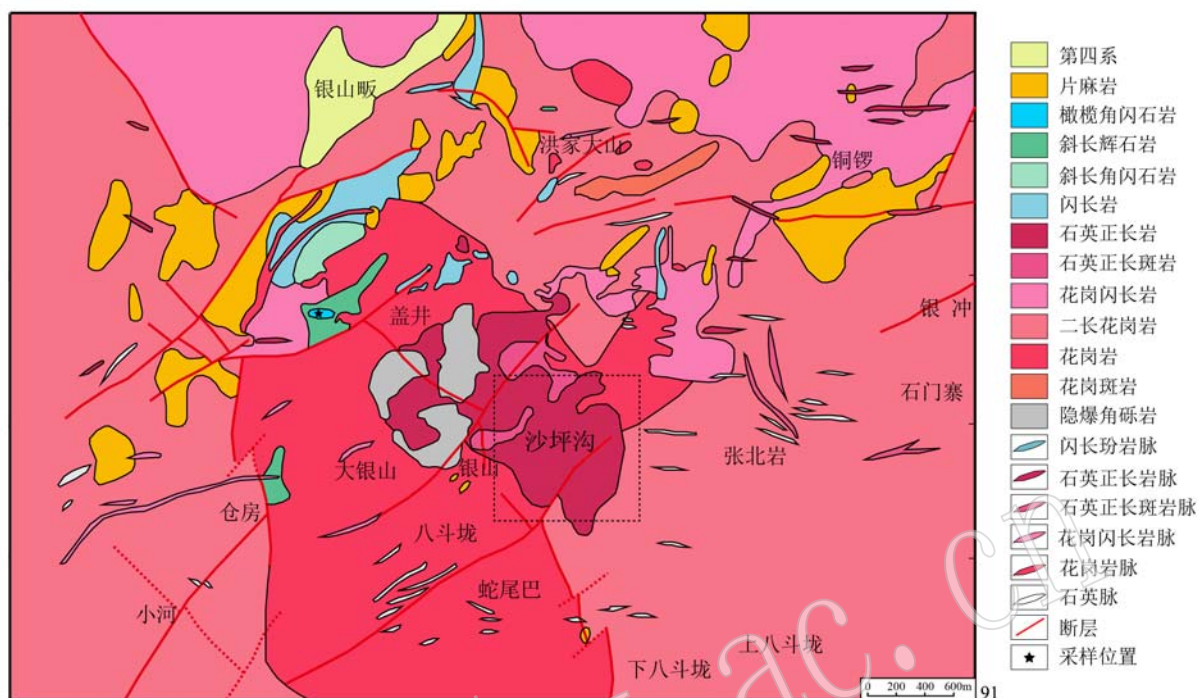


图2 安徽金寨沙坪沟钼矿区地质图(据张怀东, 2012 修绘)

Fig. 2 Geological sketch map of the Shapingou molybdenum ore district (after Zhang Huaidong, 2012)

时代为 $117.2 \pm 1.2 \text{ Ma}$ (任志等, 2015), 肉红色, 中-细粒结构, 块状构造, 出露于该区域中部银山-盖井地区。矿区南部主要出露花岗岩, 浅肉色, 粗-中粒花岗结构, 块状构造。花岗斑岩为矿区中部隐伏岩体, 呈小岩株状产出, 围岩主要为二长花岗岩和石英正长岩。石英正长斑岩为矿区中部隐伏岩体, 仅在钻孔中呈小岩脉状产出, 围岩主要为二长花岗岩和石英正长岩。

基性-超基性岩主要分布在矿区的北部和西部, 其中超基性岩橄榄角闪石岩成岩时代 $132.9 \pm 5.8 \text{ Ma}$ (另文发表), 位于盖井西侧, 沙坪沟钼矿床北西 1.5 km 处, 岩体出露面积约为 0.2 km^2 , 北东向延伸。斜长角闪石岩成岩时代为 133.7 Ma (王萍, 2013), 分布于盖井北西 2 km 处, 面积约为 0.5 km^2 , 岩体呈不规则岩枝状产出, 近椭圆形向北东延伸, 围岩为二长花岗岩和庐镇关岩群变火山-沉积岩。辉石岩成岩时代为 128.5 Ma (王萍, 2013), 分布于盖井西 800 m 处, 面积约为 0.9 km^2 , 呈不规则岩枝状, 围岩为二长花岗岩和角闪岩。矿区蚀变普遍发育, 围岩蚀变主要有钾硅化、黄铁矿化、绢云母化、绿泥石化等。

3 样品特征与测试方法

3.1 样品特征

本次测试岩石样品采自沙坪沟矿区西北部, 其岩性为橄榄角闪石岩, 具体采样位置地理坐标为 $N31^{\circ}33'27.86'' E115^{\circ}28'11.55''$ (图2)。为保证数据的可靠性, 采集的样品手标本新鲜, 未受蚀变影响, 显微镜观察显示样品新鲜。该超基性岩呈黑色或暗绿色, 块状构造, 具中-粗粒等粒粒状结构 (图3a)。

岩矿相及 SEM/EDS 结果表明其主要矿物为橄榄石 (20% 左右, 体积分数) 和角闪石 (65% ~ 70%), 少量辉石 (5% 左右)、金云母 (5% 左右)、绢云母、尖晶石, 副矿物有磷灰石、铬铁矿、黄铁矿、磁黄铁矿、镍黄铁矿等 (图3c)。

橄榄石多呈浑圆粒状, 粒径变化在 $0.3 \sim 2.5 \text{ mm}$, 表面裂理普遍发育, 沿裂理及边缘发生不同程度的蛇纹石化, 包于角闪石中或分布于角闪石间, 被蛇纹石交代 (图3b)。角闪石为褐色的普通角闪石, 粒度可达 $3 \sim 5 \text{ mm}$, 多呈他形充填于橄榄石和辉石间隙或呈镶嵌状包裹橄榄石, 有的已经绿泥石化。

辉石以单斜辉石为主,呈不规则粒状,无色透明,粒径在0.2~1.5 mm,多呈他形充填于橄榄石间隙,常发生闪石化、绿泥石化。金云母呈红褐色不规则鳞

片状,粒径在0.8~2.5 mm,常交代单斜辉石和角闪石。磷灰石为自形晶或浑圆状,粒径80~600 μm 左右不等,包含于金云母中(图3d)。

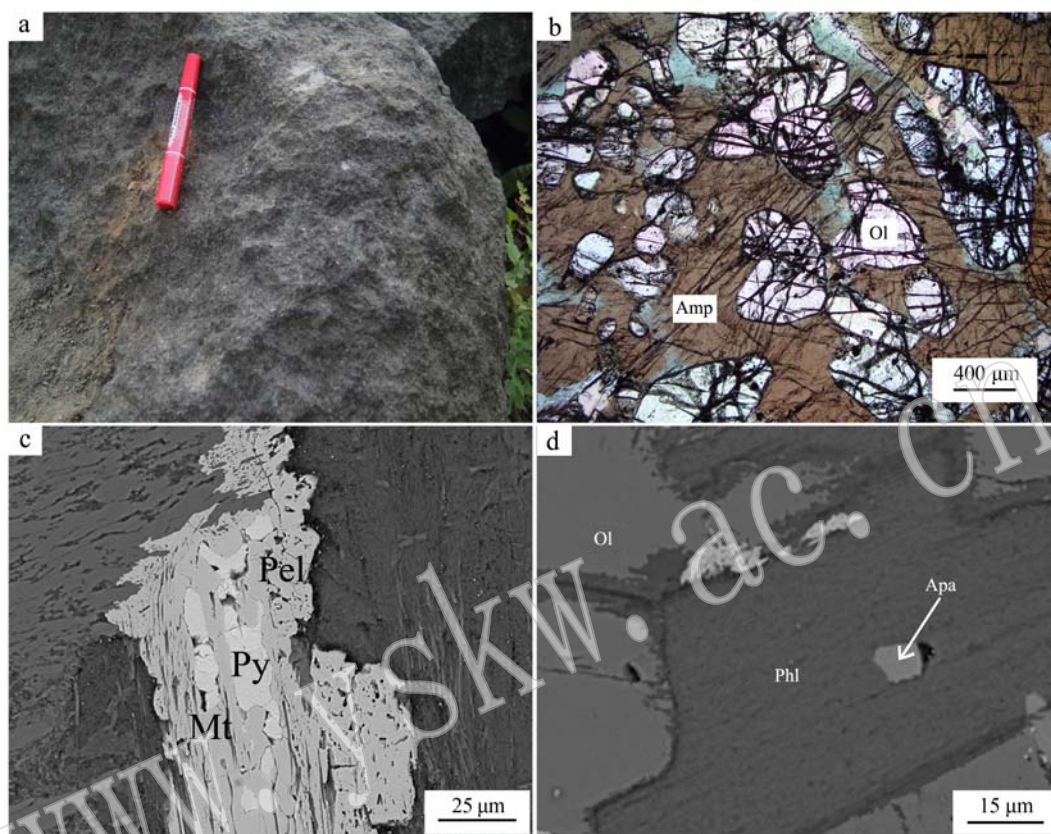


图3 沙坪沟橄榄角闪岩样品照片

Fig. 3 Photographs of olivine amphibolite in Shapinggou

a—橄榄角闪岩手标本照片; b—橄榄石为浑圆粒状,呈堆晶结构,沿裂隙发生了蛇纹石化,角闪石呈镶嵌状包裹橄榄石(+); c—金云母包含磷灰石(BSE); d—黄铁矿、镍黄铁矿、磁铁矿(BSE); Ol—橄榄石; Amp—角闪石; Phl—金云母; Apa—磷灰石; Mt—磁铁矿; Pel—镍黄铁矿; Py—黄铁矿

a—hand specimens of olivine amphibolite; b—round granular olivine with cumulus structure serpentinized along cracks, amphibole with mosaic texture enwrapping olivine(+); c—phlogopite containing apatite (BSE); d—pyrite, pentlandite, magnetite (BSE); Ol—olivine; Amp—amphibole; Phl—phlogopite; Apa—apatite; Mt—magnetite; Pel—pentlandite; Py—pyrite

3.2 测试方法

通过岩相学观察及扫描电镜分析,圈定新鲜的橄榄石、角闪石、辉石、金云母用于矿物成分的电子探针成分分析。探针片喷碳与样品测试工作均在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。分析仪器为日本电子JOEL公司生产的JXA-8100电子探针分析仪。工作条件为:加速电压为20 kV,电流为 1×10^{-8} A,分析束斑直径为3 μm 。分析的主量元素包括 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Na_2O 、 K_2O 、 FeO 、 MgO 、 MnO 、 TiO_2 、 CaO 等,检出限为0.01%。

4 矿物成分特征

4.1 橄榄石

橄榄角闪岩中的橄榄石颗粒电子探针分析及计算的端员分子结果如表1。橄榄石的端员组分 F_o 值介于76.23~80.15,均值78.32。橄榄石的 F_o 值越大,形成深度和熔融程度越高(刘飞等,2013)。自橄榄石中心到边部采集数据,结果显示无明显差异,说明成分较均一,且未见环带特征,均属贵橄榄

表 1 沙坪沟橄榄角闪岩橄榄石主要氧化物成分($w_B/\%$)及 Ni 含量($w_B/10^{-6}$)Table 1 Major oxide ($w_B/\%$) and Ni ($w_B/10^{-6}$) content of olivine in olivine hornblende from Shapingou

样品号	点位	Na ₂ O	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	FeO	NiO	SiO ₂	MnO	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Total	Fo	Ni
SPC2004	边部	0.03	-	0.01	39.23	20.22	0.20	39.30	0.51	0.01	0.05	-	99.56	77.57	1 518.01
SPC2004-1	边部	-	-	0.03	39.93	20.99	0.18	38.44	0.50	-	0.02	-	100.09	77.23	1 366.21
SPC2004-2	边部	-	-	-	40.01	21.11	0.19	38.32	0.55	0.02	-	-	100.20	77.16	1 442.11
SPC2004-3	核部	0.02	-	0.02	38.58	21.45	0.15	38.73	0.44	-	0.01	-	99.40	76.23	1 138.51
SPC2004-4	核部	0.02	-	-	38.66	21.17	0.13	38.28	0.50	0.01	0.01	-	98.78	76.50	986.71
SPC2005-1	边部	0.04	-	-	41.11	20.01	0.22	38.68	0.21	-	0.03	-	100.30	78.55	1 669.81
SPC2005-2	核部	0.02	-	-	41.25	18.95	0.16	39.15	0.25	-	-	-	99.78	79.51	1 214.41
SPC2006-1	边部	-	-	-	40.83	19.80	0.18	38.76	0.20	-	0.02	0.02	99.81	78.62	1 366.21
SPC2006-2	核部	-	-	-	41.26	19.66	0.18	38.78	0.34	-	-	-	100.22	78.91	1 366.21
SPC2007-1	边部	0.02	-	-	39.42	20.37	0.13	37.27	0.33	-	0.01	-	97.55	77.53	986.71
SPC2007-2	核部	0.04	-	-	40.84	19.95	0.13	38.96	0.26	-	0.01	-	100.19	78.49	986.71
SPC2008-1	边部	-	0.10	0.02	40.11	19.46	0.23	40.02	0.22	-	0.01	0.03	100.20	78.61	1 745.71
SPC2008-2	核部	-	0.05	0.02	41.61	18.37	0.15	39.25	0.33	-	0.02	-	99.80	80.15	1 138.51
SPC2092-1	边部	-	-	0.02	40.14	20.75	0.21	38.58	0.26	-	0.01	-	99.97	77.52	1 593.91
SPC2092-1	核部	-	-	0.04	40.22	20.26	0.12	38.85	0.27	0.01	-	-	99.77	77.97	910.80
SPC2092-2	边部	0.02	-	-	40.62	19.98	0.14	38.70	0.26	-	0.02	-	99.74	78.38	1 062.61
SPC2092-3	核部	-	-	0.02	41.22	19.64	0.11	38.62	0.32	-	0.02	-	99.95	78.91	834.90
SPC2092-4	边部	-	-	0.03	41.00	19.06	0.20	38.95	0.31	-	0.01	-	99.56	79.32	1 518.01
SPC2092-5	核部	-	-	-	40.75	19.42	0.13	39.01	0.26	0.01	0.01	0.02	99.61	78.91	986.71
SPC2003-1	边部	0.04	-	-	41.40	18.96	0.17	39.04	0.37	-	0.05	-	100.03	79.56	1 290.31
SPC2003-2	核部	-	-	-	41.35	19.37	0.16	38.97	0.30	-	0.03	-	100.18	79.19	1 214.41

石(路凤香等, 2001)。橄榄石 Ni 含量变化范围为 $986.71 \times 10^{-6} \sim 1\,745.71 \times 10^{-6}$ 。NiO 含量变化范围 0.11% ~ 0.23%, 均值为 0.17%, 而 Cr_2O_3 含量相对较少为 0.05% ~ 0.1%, 反映母岩熔融程度较高。CaO 含量为 0.01% ~ 0.05%, 均值为 0.02%。本文橄榄角闪石岩的橄榄石与地幔橄榄石中主要氧化物含量的变化范围一致(Thompson *et al.*, 2007)。

4.2 角闪石

角闪石电子探针分析测试结果如表 2。依据 Powell 等(1998)提出的计算方法, 计算角闪石的 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 值, 基于 23 个氧原子为单位计算角闪石的阳离子数及相关参数。数据显示该角闪石具有如下特征: 富镁($\text{MgO} = 14.56\% \sim 17.57\%$)、贫铁($\text{FeO} = 8.20\% \sim 8.85\%$)、富钙($\text{CaO} = 11.43\% \sim 12.19\%$)、贫钾($\text{K}_2\text{O} = 0.55\% \sim 1.13\%$)、富钠($\text{Na}_2\text{O} = 2.46\% \sim 2.85\%$), 属于富镁贫铁的角闪石。角闪石阳离子特征为 $\text{Ca}_B = 1.74 \sim 1.92$, ($\text{Na} + \text{K}$)_A = 0.61 ~ 0.95。按照 Leak(1997)提出的分类,

角闪石 $\text{Ca}_B \geq 1.5$, ($\text{Na} + \text{K}$)_A ≥ 0.5 , 该角闪石为钙质角闪石。又按照钙质角闪石的分类, 沙坪沟超基性岩橄榄角闪石岩中角闪石 $\text{Si}^{4+} = 6.11 \sim 6.70$, $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}) = 0.75 \sim 0.91$, 投影到 $\text{Si} - \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$ 图解上为韭闪石、镁绿钙闪石(图 4)。

4.3 辉石

沙坪沟橄榄角闪石岩的辉石主要为单斜辉石。样品中单斜辉石电子探针分析结果如表 3。单斜辉石主要氧化物含量变化范围为 SiO_2 (51.30% ~ 51.88%)、 MgO (15.09% ~ 15.68%)、 Al_2O_3 (2.53% ~ 3.29%)、 CaO (22.40% ~ 22.95%)、 FeO (5.59% ~ 6.01%)。单斜辉石的 En 变化范围为 43.38 ~ 44.69, Wo 变化范围为 46.11 ~ 47.42, 在 Wo - En - Fs 三端员图解中投影在透辉石范围内(图 5)。

4.4 云母

橄榄角闪石岩中的云母电子探针分析测试结果如表 4。结果显示该橄榄角闪石岩云母具有高镁

表 2 沙坪沟橄榄角闪石岩角闪石的主要氧化物成分

$w_B/\%$

Table 2 Major oxide content of hornblende in olivine hornblende from Shapinggou

样品号	SPG2001	SPG2002	SPG2003	SPG2006	SPG2006	SPG2092-1	SPG2092	SPG2092	SPG2005	SPG2005	SPG2005
SiO_2	42.29	47.01	45.64	42.10	42.04	43.54	41.68	43.43	42.67	42.55	42.92
TiO_2	3.19	0.19	0.16	2.97	2.70	1.70	2.63	1.17	2.65	2.13	2.24
Al_2O_3	12.11	8.82	9.81	12.36	12.22	11.87	12.27	11.49	12.32	12.12	11.79
Cr_2O_3	0.98	0.19	0.22	0.68	0.66	0.47	0.51	0.41	0.77	0.55	0.56
MgO	15.19	17.57	16.98	15.23	15.34	16.08	14.56	16.02	15.04	16.51	16.09
FeO	8.20	8.58	8.62	8.42	8.78	8.57	8.49	8.24	8.85	8.48	8.63
MnO	0.10	0.11	0.08	0.11	0.19	0.06	0.13	0.07	0.13	0.00	0.05
CaO	12.11	11.43	11.70	12.19	12.17	11.77	12.11	11.66	11.94	11.87	12.04
Na_2O	2.71	2.77	2.90	2.46	2.68	2.62	2.81	2.82	2.75	2.52	2.85
K_2O	1.10	0.55	0.65	1.12	1.11	0.98	1.12	1.03	1.13	1.12	1.04
Total	97.98	97.24	96.76	97.64	97.96	97.66	96.31	96.39	98.25	97.85	98.21
阳离子占位											
T	Si^{IV}	6.15	6.70	6.59	6.13	6.12	6.26	6.20	6.34	6.18	6.19
	Al^{IV}	1.85	1.30	1.41	1.87	1.88	1.74	1.80	1.66	1.82	1.81
	Al^{VI}	0.23	0.19	0.25	0.25	0.21	0.28	0.35	0.32	0.29	0.19
	Ti	0.35	0.02	0.02	0.33	0.30	0.18	0.29	0.13	0.29	0.24
	Mn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01
C	Fe^{3+}	0.06	0.69	0.55	0.18	0.25	0.50	0.00	0.39	0.18	0.37
	Fe^{2+}	0.94	0.33	0.49	0.84	0.82	0.53	1.06	0.61	0.89	0.67
	Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Mg	3.30	3.74	3.65	3.31	3.33	3.45	3.23	3.49	3.49	3.49
B	Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Ca	1.89	1.75	1.81	1.90	1.90	1.81	1.93	1.82	1.85	1.86
	Na	0.11	0.25	0.19	0.10	0.10	0.19	0.07	0.18	0.15	0.14
A	Na	0.65	0.51	0.62	0.60	0.65	0.54	0.74	0.62	0.63	0.66
	K	0.20	0.10	0.12	0.21	0.21	0.18	0.21	0.19	0.21	0.19

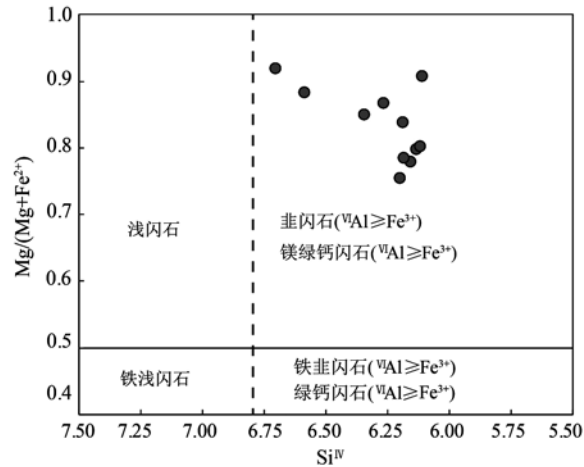


图 4 沙坪沟橄榄角闪石岩的角闪石分类与命名
(据 Leake, 1997)

Fig. 4 Classification of the hornblende of olivine hornblende in Shapinggou (after Leake, 1997)

表 3 沙坪沟橄榄角闪石岩辉石主要氧化物成分 $w_B/\%$
Table 3 Major oxide content of clinopyroxene in olivine hornblende from Shapinggou

样号	SPG2004	SPG2005	SPG2092-1	SPG2092-2	SPG2006	SPG2007
SiO ₂	51.42	51.34	51.30	51.88	51.81	51.33
TiO ₂	0.84	0.63	0.65	0.32	0.54	0.57
Al ₂ O ₃	3.29	2.82	3.01	2.53	2.75	2.77
Cr ₂ O ₃	0.60	0.58	0.49	0.40	0.34	0.60
MgO	15.10	15.57	15.09	15.44	15.68	15.51
FeO	5.60	5.73	5.71	6.01	5.59	5.57
MnO	0.10	0.09	0.06	0.19	0.14	0.16
CaO	22.90	22.90	22.95	22.40	22.64	22.70
Na ₂ O	0.47	0.42	0.66	0.34	0.64	0.43
Total	100.32	100.08	99.92	99.51	100.13	99.64
Si(T)	1.88	1.88	1.88	1.92	1.89	1.89
Al ^{IV} (T)	0.12	0.12	0.12	0.08	0.11	0.11
Al ^{VI} (M1)	0.03	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01
Ti(M1)	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02
Cr(M1)	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02
Fe ³⁺	0.06	0.09	0.10	0.05	0.10	0.08
Mg(M1 + M2)	0.83	0.85	0.83	0.85	0.85	0.85
Fe ²⁺	0.11	0.09	0.08	0.13	0.07	0.09
Mn(M2)	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Ca(M2)	0.90	0.90	0.90	0.89	0.89	0.90
Na(M2)	0.03	0.03	0.05	0.02	0.05	0.03
K(M2)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

(MgO = 22.17% ~ 24.88%)、低铝(Al₂O₃ = 10.44% ~ 15.67%)、低铁(FeO^T = 5.71% ~ 6.68%)的特征。在云母的 Mg-(Al^{VI} + Fe³⁺ + Ti)-(Fe²⁺ + Mn) 分类图解中(Foster, 1960),沙坪沟橄榄角闪石岩的云母成分投点均在金云母区域(图6)。

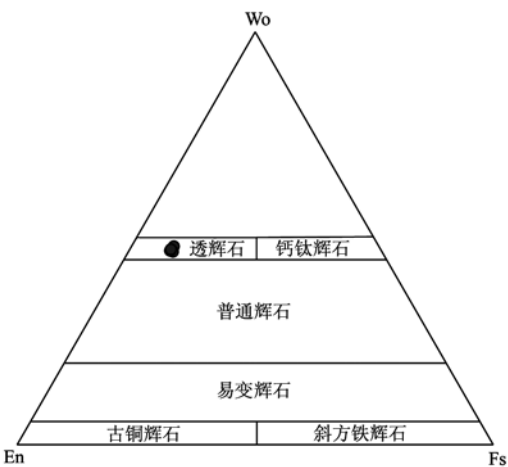


图 5 沙坪沟橄榄角闪石岩辉石 En-Fs-Wo 判别图
Fig. 5 En-Fs-Wo diagrams of pyroxene of olivine hornblende in Shapinggou

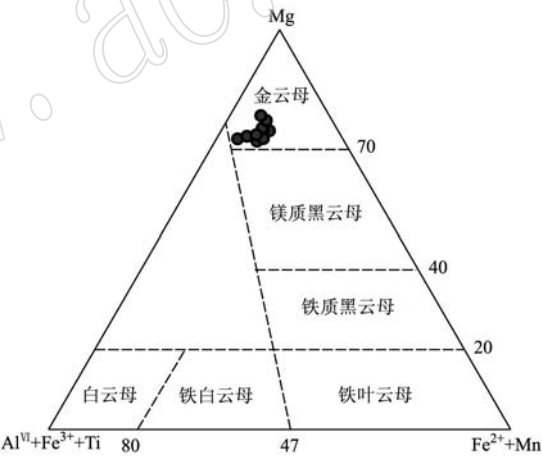


图 6 沙坪沟橄榄角闪石岩云母 Mg-(Al^{VI} + Fe³⁺ + Ti)-(Fe²⁺ + Mn)分类图解(据 Foster, 1960)
Fig. 6 Mg-(Al^{VI} + Fe³⁺ + Ti)-(Fe²⁺ + Mn) diagram of phlogopite in olivine hornblende in Shapinggou (after Foster, 1960)

5 讨论

5.1 矿物结晶物理化学条件

岩浆成岩时因结晶分异、同化混染、新岩浆注入而使物理化学条件(温度、压力、氧逸度)发生变化,矿物成分和岩相分异因物理化学条件的改变而受影响(薛君治等, 1986)。因此物理化学条件这些参数的特征及变化对探讨岩石成因和岩浆演化具有重要指示意义。

表 4 沙坪沟橄榄角闪岩云母主要氧化物成分

Table 4 Major oxide content of phlogopite in olivine hornblende from Shapinggou

样品号	SPC2004-1	SPC2004-2	SPC2004-3	SPC2004-4	SPC2004-5	SPC2004-6	SPC2092-1	SPC2092-2	SPC2092-3	SPC2092-4	SPC2092-5	SPC2005-1	SPC2005-2	SPC2005-3	SPC2005-4
SiO ₂	40.08	39.01	39.69	40.92	39.67	40.32	40.13	39.83	39.66	39.78	39.37	38.91	40.33	40.25	43.62
Na ₂ O	1.98	2.51	2.17	1.82	2.05	2.37	1.96	1.05	2.37	2.37	2.41	1.57	2.17	1.55	0.32
MgO	22.38	22.17	22.82	23.19	22.39	23.49	23.52	23.15	22.56	22.22	22.54	24.88	22.32	22.79	24.51
Al ₂ O ₃	14.70	15.39	15.17	14.33	14.61	14.62	15.10	14.04	15.67	15.47	15.40	14.23	14.62	14.82	10.44
SiO ₂	40.08	39.01	39.69	40.92	39.67	40.32	40.13	39.83	39.66	39.78	39.37	38.91	40.33	40.25	43.62
K ₂ O	7.10	6.78	6.98	7.60	7.14	6.57	6.80	7.95	7.03	6.92	7.06	5.63	7.05	7.91	7.53
CaO	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07
FeO	6.33	6.37	6.03	5.88	6.30	6.56	5.80	5.77	6.29	6.68	6.20	6.44	6.62	6.18	5.71
TiO ₂	0.15	0.82	0.30	0.21	0.14	0.11	0.18	0.26	0.34	0.32	0.59	0.32	0.22	0.34	0.43
NiO	0.08	0.13	0.06	0.15	0.10	0.07	0.04	0.08	0.10	0.13	0.10	0.06	0.08	0.09	0.05
MnO	0.00	0.00	0.06	0.00	0.06	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cr ₂ O ₃	0.09	0.24	0.00	0.00	0.08	0.06	0.00	0.00	0.12	0.11	0.16	0.11	0.05	0.11	0.12
Total	92.89	93.43	93.28	94.10	92.54	94.17	93.57	92.13	94.14	94.00	93.83	92.15	93.46	94.04	92.80
阳离子占位															
T 位	Si	3.17	3.08	3.13	3.19	3.16	3.15	3.14	3.18	3.12	3.09	3.09	3.18	3.15	3.42
	Al ^{IV}	0.83	0.92	0.87	0.81	0.84	0.85	0.86	0.82	0.88	0.91	0.91	0.82	0.85	0.58
	Al ^{VI}	0.54	0.51	0.53	0.51	0.53	0.49	0.53	0.50	0.55	0.52	0.42	0.53	0.52	0.39
	Ti	0.01	0.05	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.02	0.03
	Fe ³⁺	0.06	0.26	0.08	0.07	0.06	0.05	0.05	0.07	0.11	0.18	0.10	0.07	0.11	0.13
Y 位	Fe ²⁺	0.36	0.16	0.32	0.32	0.36	0.38	0.33	0.31	0.33	0.23	0.32	0.36	0.29	0.24
	Mn	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
	Mg	2.64	2.61	2.68	2.70	2.66	2.73	2.74	2.75	2.60	2.64	2.94	2.62	2.66	2.87
	Ca	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
	Na	0.30	0.38	0.33	0.28	0.32	0.36	0.30	0.16	0.36	0.37	0.24	0.33	0.24	0.05
X 位	K	0.72	0.68	0.70	0.76	0.72	0.65	0.68	0.81	0.69	0.71	0.57	0.71	0.79	0.75

5.1.1 温度和压力估算

根据岩石相平衡原理可以推算矿物形成温度。玄武质岩浆中结晶最早的主要造岩矿物有橄榄石,其结晶温度可近似代表岩浆结晶的初始温度(徐义刚, 1993)。橄榄石的结晶温度根据公式(1)计算(邱家骧等, 1991):

$$t(^{\circ}\text{C}) = 1\,056.6 + 17.3 \text{ MgO} \pm 26 \quad (1)$$

其中 MgO 为母岩浆中镁的质量分数。依据橄榄石-熔体平衡原理,母岩浆中的 MgO 含量利用堆晶相岩石中橄榄石最高 Fo 值以及全岩组分可以计算得出(Irvine, 1977),计算公式为(张招崇等, 2003):

$$\text{MgO} = 0.56 K_d \cdot \text{Fo} \cdot \text{FeO} / (1 - \text{Fo}) \quad (2)$$

其中 K_d 为橄榄石与熔浆间 Fe-Mg 分配系数; Fo 为橄榄石的镁橄榄石值; FeO 为母岩浆中铁的质量分数。根据 Roeder 等(1970)的研究,橄榄石与熔浆间 Fe-Mg 分配系数 K_d 是定值在 0.3 ~ 0.34 之间。Fo 值最高的橄榄石组分可能更接近于液相线橄榄石的组成(徐向珍等, 2011),本文橄榄石最高 Fo 值为 80.15,可以推算其共存熔体的 $\text{MgO}/\text{FeO} = 0.67$ (取 $K_d = 0.3$)。与沙坪沟橄榄角闪石岩橄榄石最高 Fo 值对应全岩样品的 FeO 含量 $\text{FeO} = 14.39\%$ (另文发表),代入上述公式 $\text{MgO}/\text{FeO} = 0.67$, 计算得出与其平衡熔体的 $\text{MgO} = 9.64\%$ 。计算得到橄榄石结晶温度约为 $1\,223.3 \pm 26^{\circ}\text{C}$ 。该温度值可以代表沙坪沟橄榄角闪石岩岩浆结晶的初始温度。

通过 $\text{Ca}/(\text{Ca} + \text{Na} + \text{K})$ 数值得出角闪石结晶温度的公式(邓晋福, 1983):

$$t(^{\circ}\text{C}) = [1.0674 - \text{Ca}/(\text{Ca} + \text{Na} + \text{K})] / 0.000\,365\,344 \quad (3)$$

其中 Ca、Na、K 分别为以 23 个氧原子数为标准计算的阳离子数。依据公式(3)计算角闪石结晶温度为 $1\,065 \sim 1\,147^{\circ}\text{C}$, 均值为 $1\,111.64^{\circ}\text{C}$ 。另利用沙坪沟橄榄角闪石岩中角闪石的化学成分,根据角闪石结晶温度的公式(Ridolfi *et al.*, 2010):

$$t(^{\circ}\text{C}) = -151.487 \text{ Si}^* + 2\,041 \quad (4)$$

$$\text{Si}^* = \text{Si} + \text{Al}^{\text{IV}}/15 - 2 \text{ Ti} - \text{Al}/2 + \text{Ti}/1.8 + \text{Fe}^{3+}/9 + \text{Fe}^{2+}/3.3 + \text{Mg}/26 + \text{Ca}_B/5 + \text{Na}_B/1.3 - \text{Na}_A/15 + \text{K}_A/2.3 \quad (5)$$

其中上述阳离子为分别以 23 个氧原子数为标准计算的阳离子数; Ca_B 、 Na_B 分别为 B 配位上所占据的 Ca、Na 阳离子数; Na_A 、 K_A 分别为 A 配位上所占据的 Na、K 阳离子数。计算得出角闪石结晶温度为 $921 \sim 1\,047^{\circ}\text{C}$, 均值为 $1\,008.20^{\circ}\text{C}$ 。

Ca 单斜辉石经验温度计方程式为(马鸿文, 1985):

$$t(^{\circ}\text{C}) = 1\,097.135 + 33.133 X_{\text{Ca}}^{\text{Cpx}} - 0.764 (X_{\text{Ca}}^{\text{Cpx}})^2 + 11 \text{ Al}_2\text{O}_3 \quad (6)$$

$$X_{\text{Ca}}^{\text{Cpx}} = \text{Ca} / (\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Fe}^{2+}) \quad (7)$$

其中 Ca、Mg、 Fe^{2+} 为分别以 6 个氧原子数为标准计算的阳离子数。利用上述公式计算得出单斜辉石的结晶温度为 $1\,140.50 \sim 1\,149.36^{\circ}\text{C}$, 均值为 $1\,144.61^{\circ}\text{C}$ 。由岩相学镜下观察可知主要造岩矿物结晶顺序为橄榄石-辉石-角闪石,与上述温度计算结果相一致。

依据 Hammarstrom 等(1986)总结的钙角闪石全铝压力计公式:

$$p_{\text{H86}} (\text{MPa}) = 100(-3.92 + 5.03 \text{ Al}^{\text{T}}) \quad (8)$$

Hollister 等(1987)总结的钙角闪石全铝压力计公式:

$$p_{\text{H87}} (\text{MPa}) = 100(-4.76 + 5.64 \text{ Al}^{\text{T}}) \quad (9)$$

Schmidt(1992)总结的钙角闪石全铝压力计公式:

$$p_{\text{S92}} (\text{MPa}) = 100(-3.01 + 4.76 \text{ Al}^{\text{T}}) \quad (10)$$

其中 Al^{T} 为以 4 个共价键与氧相连的铝原子数。按照公式(8)、(9)、(10)计算得出角闪石结晶压力分别为 $350 \sim 690 \text{ MPa}$ 、 $360 \sim 740 \text{ MPa}$ 、 $400 \sim 720 \text{ MPa}$, 可近似代表岩浆结晶的压力。按 $100 \text{ MPa} \approx 3.3 \text{ km}$ 推算结晶深度约 $12 \sim 24 \text{ km}$, 可知造岩矿物在地壳中结晶。

5.1.2 氧逸度

影响岩浆演化过程的因素除温度和压力等物理化学性质外,岩浆的氧逸度也是最重要的因素(Richards, 2003)。角闪石和金云母中均含有变价元素 Fe,其 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 比值是影响氧逸度(f_{O_2})变化的敏感因素。

利用角闪石分子式计算其结晶时的氧逸度。根据公式(Ridolfi *et al.*, 2010):

$$\Delta\text{NNO} = 1.644 \text{ Mg}^* - 4.01 \quad (11)$$

$$\text{Mg}^* = \text{Mg} + \text{Si}/47 - \text{Al}^{\text{VI}}/9 - 1.3 \text{ Ti}^{\text{VI}} + \text{Fe}^{3+}/3.7 + \text{Fe}^{2+}/5.2 - \text{Ca}_B/20 - \text{Na}_A/2.8 + \text{K}_A/9.5 \quad (12)$$

其中上述阳离子为分别以 23 个氧原子数为标准计算的阳离子数; Ca_B 为 B 配位上所占据的 Ca 阳离子数; Na_A 、 K_A 分别为 A 配位上所占据的 Na、K 阳离子数。计算出角闪石结晶时氧逸度变化范围在 $\text{NNO} + 0.59$ 到 $\text{NNO} + 2.27$ 之间,均值为 $\text{NNO} + 1.26$, 显示高氧逸度特征(Ridolfi *et al.*, 2010)。

另依据金云母 $\text{Fe}^{3+} - \text{Fe}^{2+} - \text{Mg}$ 三元图解,数据

投点大多处于 Ni-NiO 出溶线之上(图7),说明金云母结晶时的氧逸度与角闪石利用公式计算得出的氧逸度相吻合。通过分析角闪石和金云母两种矿物的氧逸度变化范围,表明橄榄角闪石岩形成于较高的氧逸度环境。

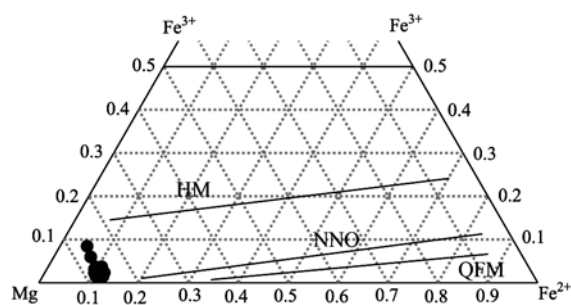


图7 沙坪沟橄榄角闪石岩金云母 Fe^{3+} - Fe^{2+} -Mg 三元图解(据 Wones and Eugster, 1965)

Fig. 7 Fe^{3+} - Fe^{2+} -Mg ternary diagram of olivine hornblende in Shapinggou (after Wones and Eugster, 1965)

5.2 岩石成因

5.2.1 角闪石、金云母成因

显微镜下角闪石为嵌晶状结构,并且显示均干涉色,表明其角闪石是岩浆成因,而非后期热液蚀变产物(Luan *et al.*, 2014)。将角闪石 Al_2O_3 和 TiO_2 数据投到钙质角闪石的 TiO_2 - Al_2O_3 分类图解(图8a)上,全部数据点落在幔源岩浆角闪石范围内。Al-(Na+K)图解(图8b)也显示角闪石来源于地幔。由

此可知橄榄角闪石岩中角闪石具有幔源岩浆角闪石的特征。将金云母的数据投点在 $\text{FeO}^T/(\text{MgO} + \text{FeO}^T)$ -MgO 图上,主要落在幔源岩浆区域(图8c,周作侠,1986,1988),表明其金云母的形成与幔源岩浆作用有关。综上所述橄榄角闪石岩其角闪石和金云母均是与幔源岩浆作用相关的原生矿物。

5.2.2 母岩浆性质

单斜辉石的主量元素成分可以反映母岩浆特征(Leterrier *et al.*, 1982; 邱家骧等, 1987)。单斜辉石数据投于 SiO_2 - Al_2O_3 图解都落于亚碱性系列(图9a),而 Al-Ti 图解中几乎全部数据落于钙碱性玄武岩范围内,反映出岩体的母岩浆属亚碱性系列,具有钙碱性玄武岩特征。

判定是否为结晶分异作用形成的原始玄武岩浆可依据橄榄石中 NiO 含量(Sato, 1977)。原始的玄武质岩浆因结晶分异作用,橄榄石中 NiO 含量会骤然降低(倪志耀, 1991)。沙坪沟橄榄角闪石岩中橄榄石的 NiO 含量为 0.11%~0.22%,均值为 0.16%,低于与地幔岩平衡的原始玄武质岩浆结晶的橄榄石 NiO 含量(0.4%)(倪志耀, 1991),从而可以说明原始玄武质岩浆因结晶分异作用导致 NiO 亏损,其母岩浆为其派生岩浆。

橄榄石的 NiO、 Cr_2O_3 等组分能够反映母岩浆熔融程度(冯宏业等, 2014)。本文橄榄石富 NiO (0.11%~0.22%),而 Cr_2O_3 含量相对较少(0.05%~0.1%)反映母岩浆熔融程度较高。

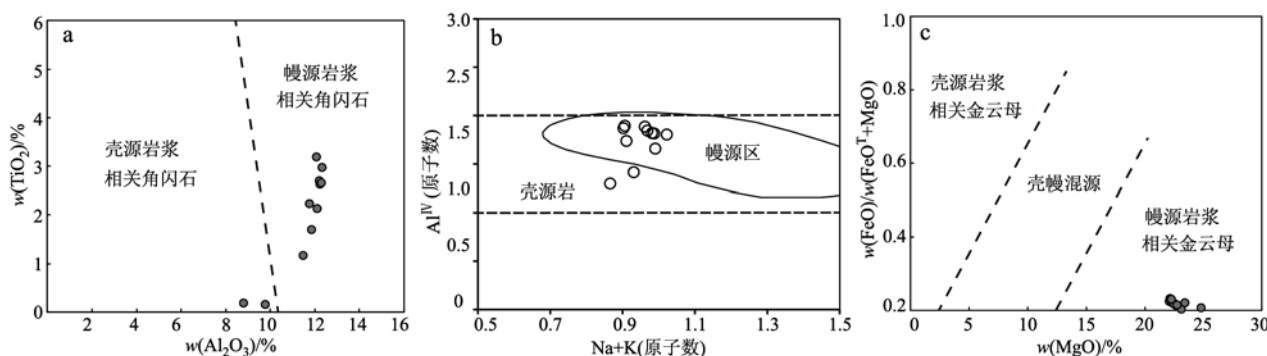


图8 沙坪沟橄榄角闪石岩角闪石和金云母成因判别图解

Fig. 8 Binary plots of hornblende and phlogopite

a—角闪石 TiO_2 - Al_2O_3 图解(据姜常义等, 1984); b—角闪石 Al^{IV} -(Na+K)判别图(据 Kay *et al.*, 1983);

c—金云母 $\text{FeO}^T/(\text{FeO}^T + \text{MgO})$ -MgO 图解(据周作侠, 1988)

a— TiO_2 - Al_2O_3 diagram of hornblende (after Jiang Changyi *et al.*, 1984); b— Al^{IV} -(Na+K) diagram of hornblende (after Kay *et al.*, 1983);

c— $\text{FeO}^T/(\text{FeO}^T + \text{MgO})$ -MgO diagram of phlogopite (after Zhou Zuoxia, 1988)

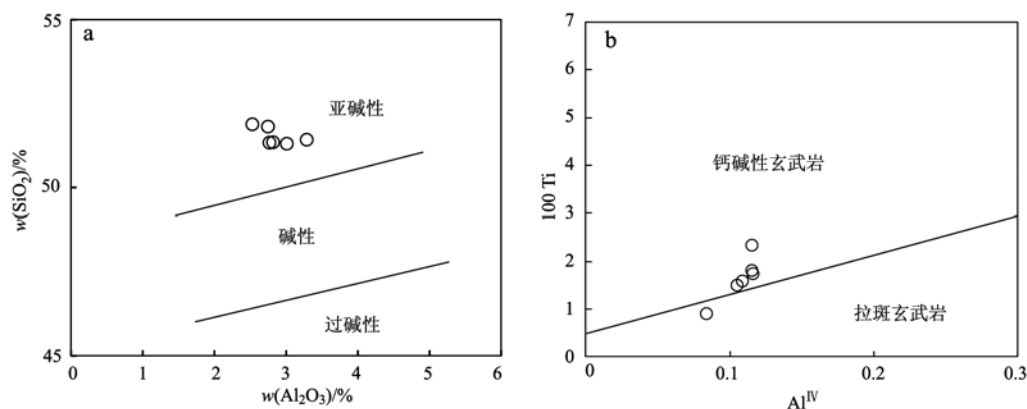


图9 沙坪沟橄榄角闪石岩单斜辉石岩石系列判别图(据 Leterrier *et al.*, 1982)

Fig. 9 Discrimination diagrams of clinopyroxenes of olivine hornblende in Shapinggou (after Leterrier *et al.*, 1982)

另根据 Niu (1997) 提出的经验公式可以推算其部分熔融程度:

$$F = 0.03249 \text{ MgO}_{\text{melt}} - 0.234 \quad (13)$$

其中 F 表示部分熔融程度; MgO_{melt} 表示母岩浆中 MgO 的质量分数。如前所述,利用橄榄石最高 Fo 值以及全岩组分分析计算,可得其母岩浆中 MgO 含量为 9.64%,代入公式(13)得出岩体母岩浆是地幔经过 7.92% 的部分熔融形成的。

综上,沙坪沟橄榄角闪石岩母岩浆为地幔源区发生 7.92% 部分熔融的玄武质岩浆经结晶分异作用形成的派生岩浆。

5.2.3 构造意义

前人研究已经证实大别造山带中生代经历了 3 个阶段演化过程:超高压岩石变质阶段(230 Ma 以前)(Cong, 1996; Hacker *et al.*, 2000; 王清晨等, 2002);同碰撞折返阶段(230 ~ 170 Ma)(江来利等, 1999; Hacker *et al.*, 2000; 李曙光, 2004)和伸展阶段(140 ~ 85 Ma)(Ratschbacher *et al.*, 2000)。同位素年代学研究表明,沙坪沟钼矿所形成形成于 113 ~ 110 Ma(黄凡等, 2011; 孟祥金等, 2012; 张红等, 2011),正值大别造山带造山伸展阶段,此时(140 ~ 85 Ma)大别造山带岩石圈发生了强烈的伸展,出现了“山根”的主体拆沉作用使北大别造山带快速隆升(何永胜, 2011; 李曙光等, 2013),并形成以罗田穹窿为核心的大型穹窿构造(洪大卫等, 2003)。热穹窿的形成代表着强烈伸展作用的发生,是大别地区岩石圈开始减薄的地表响应(洪大卫等, 2003; Chikara *et al.*, 2014)。沙坪沟斑岩型钼矿床中橄榄角闪石岩 U-Pb 定年为 132.9 ± 5.8 Ma(另文发表),表明了其侵位时间为早白垩世,与大别造山带中生代地

壳减薄时间耦合,因而其正是形成于大陆岩石圈伸展与减薄背景。

大量的地球物理研究也表明,在 130 ~ 120 Ma 期间,减薄后的大陆岩石圈发生大规模克拉通破坏(郑永飞等, 2018),从而引发加厚镁铁质地壳的拆沉,岩石圈地幔发生部分熔融,同时伴随地幔上涌,达到 7.92% 的部分熔融程度的幔源岩浆底侵下地壳。地幔岩浆底侵,导致加厚镁铁质地壳中下部地热梯度急剧升高(赵子福等, 2009),可能导致镁铁质地壳物质加入。

通常认为酸性岩浆比基性岩浆更富 Mo,地球的 Mo 主要来自地壳(Wallace *et al.*, 1978; Chen *et al.*, 2000; Sinclair, 2007)。从钼矿床附近发育基性岩的现象(杨言辰等, 2012; 谭红艳等, 2012; 谢玉玲等, 2015),表明基性岩浆在 Mo 的形成过程中扮演着一定角色。正如 Stein 等(1985)在研究 Henderson 矿床与成矿有关的侵入岩时,提出金属来源于深部岩浆而不是上地壳。也有研究表明基性岩可能为酸性岩浆房的演化提供了挥发分、S、可能还有 Mo(Westra and Keith, 1981; Carten *et al.*, 1993; Keith *et al.*, 1993; Audétat, 2010)。而沙坪沟钼矿区北部、西部出露的超基性岩橄榄角闪石岩,其形成时代与沙坪沟钼矿成矿时代都是燕山期早白垩世,二者都形成于大别造山带地壳减薄的大地构造背景之下。如前所述橄榄角闪石岩形成于较高的氧逸度环境,指示岩浆高氧逸度特征,较高的氧逸度也有利于 Mo 在残余熔体中富集(Candela, 1989),可以为酸性岩浆在演化过程中 Mo 的富集提供条件。

综上,在伸展构造背景下,岩石圈减薄,下地壳拆沉,岩石圈地幔熔融形成的幔源岩浆底侵大别造

山带下地壳,形成沙坪沟钼矿区超基性岩橄榄角闪石岩。

6 结论

(1) 沙坪沟橄榄角闪石岩主要造岩矿物橄榄石为贵橄榄石,角闪石为韭闪石,辉石为透辉石,其结晶顺序为橄榄石→辉石→角闪石,结晶温度为 $1\,111.64 \sim 1\,223.30^{\circ}\text{C}$ 。形成压力为 $350 \sim 740\text{ MPa}$,岩浆房深度距地表约 $12 \sim 24\text{ km}$ 。角闪石和金云母结晶时的氧逸度为 $\text{NNO} + 0.59$ 到 $\text{NNO} + 2.27$ 间,均值为 $\text{NNO} + 1.26$,具有高氧逸度特征。

(2) 沙坪沟橄榄角闪石岩的原始岩浆来源于地幔,是地幔源区发生 7.92% 部分熔融的玄武质岩浆经结晶分异作用形成的派生岩浆。

(3) 在伸展构造背景下,岩石圈地幔的部分熔融,形成的幔源岩浆底侵大别造山带下地壳过程中加入了部分下地壳物质,从而形成沙坪沟钼矿区超基性岩橄榄角闪石岩。

致谢 本文电子探针测试工作得到了核工业北京地质研究院分析测试研究中心葛老师、邵老师的支持和帮助,同时评审专家对本文提出了宝贵的修改意见,在此一并致以诚挚的谢意!

References

- Audétat A. 2010. Source and evolution of molybdenum in the porphyry Mo(-Pb) deposit at Cave Peak, Texas [J]. *Journal of Petrology*, 51(8): 1 739 ~ 1 760.
- Candela P A. 1989. Felsic magmas, volatiles, and metallogenesis[J]. *Reviews in Economic Geology*, 4: 223 ~ 233.
- Carten R B, White W H and Stein H J. 1993. High-grade granite-related molybdenum systems classification and origin. *Mineral Deposit Modeling*[J]. *Geological Association of Canada Special Paper*, 40: 521 ~ 554.
- Cong B L. 1996. Ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabie-Sulu region of China[J]. Beijing: Science Press, China and Kluwer Acad Pub, Dordrecht, 224 ~ 228.
- Chen Hongjin, Chen Yanjing, Zhang Jing, *et al.* 2013. Zircon U-Pb ages and Hf isotope characteristics of the ore-bearing intrusion from the Shapinggou molybdenum deposit, Jinzhai County, Anhui Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(1): 132 ~ 145 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y J, Li C, Zhang J, *et al.* 2000. Sr and O isotopic characteristics of porphyries in the Qinling molybdenum deposit belt and their implication to genetic mechanism and type[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 43: 82 ~ 94.
- Chen Yuezhi and Sang Baoliang. 1995. Metamorphic petrology and metamorphism of the foziling group in northern Huaiyang and its age[J]. *Regional Geology of China*, 14(3): 280 ~ 288 (in Chinese with English abstract).
- Chiara G, Franco R, Yican Liu, *et al.* 2014. P-T evolution of elusive UHP eclogites from the Luotian dome (North Dabie Zone, China): How far can the thermodynamic modeling lead us? [J]. *Lithos*, 226(6): 183 ~ 200.
- Dai Shengqian, Xu Jiacong, Shi Qianhua, *et al.* 1992. New recognition of the foziling group in the eastern part of northern Huaiyang[J]. *Regional Geology of China*, 11(4): 369 ~ 375 (in Chinese with English abstract).
- Deng Jinfu. 1983. *Melt-mineral Equilibrium Thermodynamics*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 74 ~ 92 (in Chinese).
- Deng Jinfu, Dai Shengqian, Wu Zongxu, *et al.* 2000. Petrological structure and thermal structure of the Dabie orogenic belt and its geological implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 74(3): 207 ~ 215 (in Chinese with English abstract).
- Du Jianguo. 2000. On Researching of Mesozoic Magmatism and Geochemistry of Mineralization in Dabie Orogenic belt[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 14 ~ 36 (in Chinese with English abstract).
- Feng Hongye, Xu Yingxia, Tang Dongmei, *et al.* 2014. Mineralogical characteristics of olivine and spinel from Getashankou Cu-Ni-bearing maficultramafic intrusions in eastern Tianshan, NW China[J]. *Geology and Exploration*, 50(2): 346 ~ 359 (in Chinese with English abstract).
- Foster M D. 1960. Interpretation of the Composition of Trioctahedral Micas[M]. Washington: Mineral Society of America, 11 ~ 49.
- Gao Y, Mao J W and Ye H S. 2015. A review of the geological characteristics and geodynamic setting of the late Ealy cretaceous molybdenum deposits in the East Qinling-Dabie Molybdenum belt, East China [J]. *Journal of Asia Eath Science*, 108: 81 ~ 96.
- Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, *et al.* 2000. Exhumation of ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Late Triassic-Early Jurassic tectonic unroofing[J]. *Journal of Geophysical Research*

- search, OS(B6): 13 339 ~ 13 364.
- Hammarstrom J M and Zen E A. 1986. Aluminum in hornblende: An empirical igneous geobarometer[J]. *American Mineralogist*, 71: 1 297 ~ 1 313.
- He Yongsheng. 2011. Geochemistry of Post-collisional Granitic Magmatism from the Dabie Orogen: Constraints on Removal Processes and Architecture of the Mountain Root[D]. Hefei: University of Science and Technology of China(in Chinese with English abstract).
- Hollister L S, Grissom G C, Peters E K, *et al.* 1987. Confirmation of the empirical correlation of al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons[J]. *American Mineralogist*, 72: 231 ~ 239.
- Hong Dawei, Wang Tao, Tong Ying, *et al.* 2003. Mesozoic granitoids from North China Block and Qinling-Dabie-Sulu orogenic belt and their deep dynamic process[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 231 ~ 256(in Chinese with English abstract).
- Huang Fan, Wang Denghong, Lu Sanming, *et al.* 2011. Molybdenite Re-Os isotopic age of Shapinggou Mo deposit in Anhui Province and Mesozoic Mo ore-forming stages in East Qinling-Dabie Mountain region[J]. *Mineral Deposits*, 30(6): 1 040 ~ 1 057(in Chinese with English abstract).
- Irvine T N. 1977. Origin of chromitite layers in the Muskox intrusion and other stratiform intrusions: A new interpretation[J]. *Geology*, 5: 273 ~ 277.
- 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).
- Jiang Laili, Liu Yican, Wu Weiping, *et al.* 1999. The deformation history and exhumation process of the UHPM rocks in the Dabieshan[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 34(4): 432 ~ 441(in Chinese with English abstract).
- Kay S M, Snedden W T, Foster B P, *et al.* 1983. Upper mantle and crustal fragments in the Ithaca kimberlites[J]. *Journal of Geology*, 91(3): 277 ~ 290.
- Keith J D, Christiansen E H and Carten R B. 1993. The genesis of giant porphyry molybdenum deposits[J]. *Giant Ore Deposits*, Society of Economic Geologists Special Publication, 2: 285 ~ 316.
- Leake B E. 1997. Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphibole of the International Mineralogical Association, Commission on new minerals and mineral names[J]. *Amer. Mineral.*, 82: 1 019 ~ 1 037.
- 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 & Planetary Science Letters*, 59(1): 139 ~ 154.
- Li Junping, Li Yongfeng, Luo Zhengchuan, *et al.* 2011. Geological features of molybdenum deposits and ore prospecting in northern slope of the Dabie Mountain, China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 4(3): 457 ~ 468(in Chinese with English abstract).
- Li Nuo, Chen Yanjing, Zhang Hui, *et al.* 2007. Molybdenum deposits in East Qinling[J]. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 186 ~ 198(in Chinese with English abstract).
- Li Shuguang. 2004. Exhumation mechanism of the ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabie Mountains and continental collision process between the North and South China blocks[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 63 ~ 70(in Chinese with English abstract).
- Li Shuguang, He Yongsheng, Wang Shuitong, *et al.* 2013. Process and mechanism of mountain-root removal of the Dabie Orogen: Constraints from geochronology and geochemistry of post-collisional igneous rocks[J]. *China Sci. Bull.*, 58(23): 2 316 ~ 2 322(in Chinese with English abstract).
- Li Yi, Li Nuo, Yang Yongfei *et al.* 2013. Geological features and geodynamic settings of the Mo deposits in the northern segment of the Dabie Mountains[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(1): 95 ~ 106(in Chinese with English abstract).
- Liu Fei, Yang Jingsui, Chen Songyong, *et al.* 2013. Geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopic composition of mafic rocks in the western part of Yarlung Zangbo suture zone: Evidence for intra-oceanic supra-subduction within the Neo-Tethys[J]. *Geology in China*, 40(3): 742 ~ 755(in Chinese with English abstract).
- Lu Fengxiang, Shang Longkang, Wu Jinhua, *et al.* 2001. *Petrology*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1 ~ 338(in Chinese).
- Luan Y, Song X Y, Chen L M, *et al.* 2014. Key factors controlling the accumulation of the Fe-Ti oxides in the Hongge layered intrusion in the Emeishan Large Igneous Province, SW China[J]. *Ore Geol. Rev.*, 57: 518 ~ 538.
- Ma Hongwen. 1985. A formula about modified geothermograph of clinopyroxene[J]. *Geological Science and Technology Information*, 4(2): 82 ~ 84(in Chinese).
- Mao J W, Pirajno F and Xiang J F. 2011. Mesozoic molybdenum deposits in the East Qinling-Dabie Orogenic belt: Characteristics and tectonic

- settines[J]. *Ore Geoloev Reviews*, 43: 264 ~ 293.
- Meng Xiangjin, Xu Wenyi, Lü Qingtian, *et al.* 2012. Zircon U-Pb dating of ore-bearing rocks and molybdenite Re-Os age in Shapinggou porphyry molybdenum deposit, Anhui Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(3): 487 ~ 494(in Chinese with English abstract).
- Ni Zhiyao. 1991. Chemical composition and petrologic significance of olivines in Huangshandong mafic-ultramafic complex in Hami, Xinjiang, China[J]. *Mineralogy and Petrology*, 11(3): 40 ~ 47(in Chinese with English abstract).
- Ni Pei, Wang Guoguang, Wen Yu, *et al.* 2005. Evidence of fluid inclusions for two stages of fluid boiling in the formation of the giant Shapinggou porphyry Mo deposit, Dabie Orogen, Central China[J]. *Ore Geology Reviews*, 65(3): 1 078 ~ 1 094.
- Niu Yaoling, Charles H L, Rosamond J, *et al.* 1997. The origin of abyssal peridotites a new perspective[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 152(4): 251 ~ 265.
- Peng Zhi, Du Jianguo, Chen Fang, *et al.* 2015. Geochemical characteristics and LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology of the Tongxingsi alkaline intrusion in the Eastern North Huaiyang and their geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(4): 701 ~ 714(in Chinese with English abstract).
- Powell R H T and Worley B. 1998. Calculating phase diagrams involving solid solutions via non-linear equations, with examples using THERMOCALC[J]. *Metamorphic Geol.*, 16(4): 577 ~ 588.
- Qiu Jiaxiang and Liao Qun'an. 1987. The main characteristics and genetic information of clinopyroxene megacrysts in Cenozoic basalt of Eastern China[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 6(1): 53 ~ 63(in Chinese with English abstract).
- Qiu Jiaxiang and Lin Jingqian. 1991. *Lithochemistry*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 140 ~ 156(in Chinese).
- Ratschbacher L, Hareker B R, Webb L E, *et al.* 2000. Exhumation of the ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Cretaceous and Cenozoic unroofing and the Tan-Lu fault[J]. *Journal of Geophysical Research*, 105 (B6): 13 303 ~ 13 338.
- Ren Zhi, Zhou Taofa, Pete Hollings, *et al.* 2018. Magmatism in the Shapinggou district of the Dabie Orogen, China: Implications for the formation of porphyry Mo deposits in a collisional orogenic belt[J]. *Lithos*, 308 ~ 309: 346 ~ 363.
- Ren Zhi, Zhou Taofa, Zhang Dayu, *et al.* 2015. Characteristics of alteration and mineralization of Shapinggou porphyry molybdenum deposit, Dabie orogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(9): 2 708 ~ 2 723(in Chinese with English abstract).
- Richards J. 2003. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation[J]. *Econ. Geol.*, 98(8): 1 515 ~ 1 533.
- 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]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160(1): 45 ~ 66.
- Roeder P L and Emslie R F. 1970. Olivine-liquid equilibrium[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 29: 275 ~ 289.
- Sato H. 1977. Nickel content of basaltic magmas: Identification of primary magma and a measure of the degree of olivine fractionation[J]. *Lithos*, 10(4): 113 ~ 120.
- 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 & Petrology*, 110: 304 ~ 310.
- Sinclair W. 2007. Mineral deposits of Canada: A synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods[J]. *Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication*, 5(1): 223 ~ 243.
- Stein H J and Hannah J L. 1985. Movement and origin of ore fluids in Climax-type systems[J]. *Geology*, 13(7): 469 ~ 474.
- Tan Hongyan, Shu Guanglong, Lü Junchao, *et al.* 2012. LA-ICP-MS zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating for the Luming large-scale molybdenum deposit in Xiao Hinggan mountains and its geological implication[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 42(6): 1 758 ~ 1 764(in Chinese with English abstract).
- Thompson A B, Aerts M and Hack A C. 2007. Liquid immiscibility in silicate melts and related systems[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 65: 99 ~ 127.
- Wallace S R, MacKenzie W B, Blair R G, *et al.* 1978. Geology of the Urad and Henderson molybdenite deposits, Clear Creek County, Colorado, with a section on a comparison of these deposits with those at Climax, Colorado[J]. *Economic Geology*, 73(3): 325 ~ 368.
- Wang Bohua, Wu Zongling, Zhang Huaidong, *et al.* 2007. Geological and geochemical features of Mesozoic igneous rocks in the Yinsha area, Jinzhai Anhui Province, and the implications[J]. *Geology of Anhui*, 17(4): 245 ~ 248(in Chinese with English abstract).
- Wang Ping. 2013. The Characteristics and Genesis of Magmatic Rocks in

- Shapinggou Molybdenum Ore District, Jinzhai, Anhui[D]. Hefei: Hefei University of Technology(in Chinese with English abstract).
- Wang Qingchen and Lin Wei. 2002. Geodynamics of the Dabieshan collisional orogenic belt[J]. *Earth Science Frontiers*, 9(4): 257 ~ 265 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yun, Chen Yanjing, Ma Hongwei, *et al.* 2009. Study On ore geology and fluid inclusion of the Tangjiaping Mo deposit, Shangcheng County, Henan Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 469 ~ 480(in Chinese with English abstract).
- Westra G and Keith S B. 1981. Classification and genesis of stockwork molybdenum deposits[J]. *Economic Geology*, 76(4): 844 ~ 873.
- Wones D R and Eugster H P. 1965. Stability of biotite: Experiment, theory, and application[J]. *Am. Miner.*, 50(9): 1 228 ~ 1 272.
- Xie Caifu, Xiong Chengyun, Hu Ning, *et al.* 2001. A study on regional metallogenic regularity of the East Qinling-Dable orogenic belt[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 17(3): 15 ~ 21(in Chinese with English abstract).
- Xie Yuling, Li Lamei, Guo Xiang, *et al.* 2015. Chronology, petrochemistry of fine grained granite and their implication to Mo-Cu mineralization in Xichong Mo deposit, Anhui Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(7): 1 929 ~ 1 942(in Chinese with English abstract).
- Xu Gang, Tang Zhongli, Jiao Jiangang, *et al.* 2012. The comparative study on small intrusion type molybdenum deposits of Shapinggou and Jinduicheng[J]. *Northwestern Geology*, 45(4): 359 ~ 369(in Chinese with English abstract).
- Xu Xiangzhen, Yang Jingsui, Guo Guolin, *et al.* 2011. Lithological research on the Purang mantle peridotite in western Yarlung Zangbo suture zone in Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(11): 3 179 ~ 3 196(in Chinese with English abstract).
- Xu Xiaochun, Lou Jinwei, Lu Sanming, *et al.* 2009. Re-Os ages of molybdenum-lead-zinc polymetallic deposits and ^{40}Ar - ^{39}Ar ages of related magmatic rocks in Yinshan area, Jinzhai, Anhui Province[J]. *Mineral Deposits*, 28(5): 621 ~ 632(in Chinese with English abstract).
- Xu Yigang. 1993. Geothermometers applicable to the mantle xenoliths[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 9(2): 167 ~ 180(in Chinese with English abstract).
- Xue Junzhi, Bai Xuerang and Chen Wu. 1986. *Genetic Mineralogy*[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 114 ~ 121(in Chinese).
- Yang Shan, Wang Bohua, Wang Feng, *et al.* 2013. The occurrence of niobium in Shapinggou molybdenum deposits, Jinzhai County, Anhui Province[J]. *Rock And Mineral Analysis*, 32(2): 269 ~ 277(in Chinese with English abstract).
- Yang Yanchen, Han Shijiong, Sun Deyou, *et al.* 2012. Geological and geochemical features and geochronology of porphyry molybdenum deposits in the Lesser Xing'an Range-Zhangguangcai Range metallogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 379 ~ 390(in Chinese with English abstract).
- Yang Zeqiang. 2007. Re-Os isotopic ages of Tangjiaping molybdenum deposit in Shangcheng County, Henan and their geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 26(3): 289 ~ 295(in Chinese with English abstract).
- Yu Wen, Ni Pei, Wang Guoguang, *et al.* 2013. Evolution of ore-forming fluids of the Shapinggou porphyry molybdenum[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 48(3): 241 ~ 255(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong and Wang Fusheng. 2003. A method for identifying primary magma—Examples from pickite and alkali basalts[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 33(2): 130 ~ 134(in Chinese with English abstract).
- Zhao Zifu and Zheng Yongfei. 2009. Remelting of subducted continental lithosphere: Petrogenesis of Mesozoic magmatic rocks in the Dabie-Sulu orogenic belt[J]. *Sci. China Ser. D—Earth Sci.*, 39(7): 888 ~ 909(in Chinese with English abstract).
- Zhang Hong, Sun Weidong, Yang Xiaoyong, *et al.* 2011. Geochronology and Metallogenesis of the Shapinggou Giant Porphyry Molybdenum Deposit in the Dabie Orogenic Belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(12): 2 040 ~ 2 059(in Chinese with English abstract).
- Zhang Huaidong, Wang Bohua, Hao Yuejin, *et al.* 2012. Geological characteristics and comprehensive ore-prospecting information of Shapinggou porphyry-type molybdenum deposit in Anhui Province[J]. *Mineral Deposits*, 31(1): 41 ~ 51(in Chinese with English abstract).
- Zheng Yongfei, Xu Zheng, Zhao Zifu, *et al.* 2018. Mesozoic mafic magmatism in North China: Implications for thinning and destruction of cratonic lithosphere[J]. *Science China: Earth Sciences*, 48(4): 379 ~ 414(in Chinese with English abstract).
- Zhou Zuoxia. 1986. The origin of intrusive mass in Fengshandong, Hubei Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2(1): 59 ~ 70(in Chinese with English abstract).
- Zhou Zuoxia. 1988. Chemical characteristics of mafic mica in intrusive

rocks and its geological meaning [J]. Acta Petrologica Sinica, 4(3): 63~73 (in Chinese with English abstract).

Zhou Zuoxia. 1991. Application of Mg-Fe mica chemical composition, rare elements, REE, Cu, Cl, F to distinguishing petrogenetic types [A]. Wu Liren and Li Binglun. Two Great Mesozoic Types of Porphyry Ore Deposits in the East of China [C]. Beijing: Science Press, 76~82 (in Chinese).

附中文参考文献

- 陈红瑾, 陈衍景, 张静, 等. 2013. 安徽省金寨县沙坪沟钼矿含矿岩体锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 29(1): 132~145.
- 陈跃志, 桑宝梁. 1995. 佛子岭群变质岩石学变质作用及时代的初步研究[J]. 中国区域地质, 14(3): 280~288.
- 邓晋福. 1983. 熔浆-矿物平衡热力学[M]. 北京: 地质出版社, 74~92.
- 邓晋福, 戴圣潜, 吴宗絮, 等. 2000. 大别造山带岩石学结构和热结构及其地质意义[J]. 地质学报, 74(3): 207~215.
- 戴圣潜, 徐家聪, 石乾华, 等. 1992. 北淮阳东段佛子岭群新认识[J]. 中国区域地质, 11(4): 369~375.
- 杜建国. 2000. 大别造山带中生代岩浆作用与成矿地球化学研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 14~36.
- 冯宏业, 许英霞, 唐冬梅, 等. 2014. 东天山圪塔山口铜镍矿区镁铁-超镁铁质岩体橄榄石与尖晶石矿物学特征[J]. 地质与勘探, 50(2): 346~359.
- 何永胜. 2011. 大别造山带碰撞后花岗质岩浆作用地球化学: 对去山根过程及山根结构的制约[D]. 合肥: 中国科学技术大学.
- 洪大卫, 王涛, 童英, 等. 2003. 华北地台和秦岭-大别-苏鲁造山带的中生代花岗岩与深部地球动力学过程[J]. 地学前缘, 10(3): 231~256.
- 黄凡, 王登红, 陆三明, 等. 2011. 安徽省金寨县沙坪沟钼矿辉钼矿 Re-Os 年龄-兼论东秦岭-大别山中生代钼成矿作用期次划分[J]. 矿床地质, 30(6): 1040~1057.
- 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.
- 江来利, 刘贻灿, 吴维平, 等. 1999. 大别山超高压变质岩的变形历史及折返过程[J]. 地质科学, 34(4): 432~441.
- 李俊平, 李永峰, 罗正传, 等. 2011. 大别山北麓钼矿找矿重大进展及其矿床地质特征研究[J]. 大地构造与成矿学, 4(3): 457~468.
- 李诺, 陈衍景, 张辉, 等. 2007. 东秦岭斑岩钼矿带的地质特征和成矿构造背景[J]. 地学前缘, 14(5): 186~198.
- 李曙光. 2004. 大别山超高压变质岩折返机制与华北-华南陆块碰撞过程[J]. 地学前缘, 11(3): 63~70.
- 李曙光, 何永胜, 王水炯. 2013. 大别造山带的去山根过程与机制: 碰撞后岩浆岩的年代学和地球化学制约[J]. 科学通报, 58(23): 2316~2322.
- 李毅, 李诺, 杨永飞, 等. 2013. 大别山北麓钼矿床地质特征和地球动力学背景[J]. 岩石学报, 29(1): 95~106.
- 刘飞, 杨经绥, 陈松永, 等. 2013. 雅鲁藏布江缝合带西段基性岩地球化学和 Sr-Nd-Pb 同位素特征: 新特提斯洋内俯冲的证据[J]. 中国地质, 40(3): 742~755.
- 路凤香, 桑隆康, 郭金华, 等. 2001. 岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 1~338.
- 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.
- 孟祥金, 徐文艺, 吕庆田, 等. 2012. 安徽沙坪沟斑岩钼矿锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄[J]. 地质学报, 86(3): 487~494.
- 倪志耀. 1991. 新疆哈密黄山东镁铁-超镁铁杂岩体中橄榄石的化学成分及其岩石学意义[J]. 矿物岩石, 11(3): 40~47.
- 彭智, 杜建国, 陈芳, 等. 2015. 北淮阳东段同兴寺碱性岩体地球化学特征、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 89(4): 701~714.
- 邱家骧, 廖群安. 1987. 中国东部新生代玄武岩中单斜辉石巨晶的主要特征及成因信息[J]. 岩石矿物学杂志, 6(1): 56~63.
- 邱家骧, 林景任. 1991. 岩石化学[M]. 北京: 地质出版社, 140~156.
- 任志, 周涛发, 张达玉, 等. 2015. 大别山地区沙坪沟斑岩型钼矿床蚀变及矿化特征研究[J]. 岩石学报, 31(9): 2708~2723.
- 谭红艳, 舒广龙, 吕骏超, 等. 2012. 小兴安岭鹿鸣大型钼矿 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 42(6): 1758~1764.
- 王波华, 郭宗玲, 张怀东, 等. 2007. 安徽省金寨银沙地区中生代岩浆岩地质地球化学特征及其找矿意义[J]. 安徽地质, 17(4): 245~248.
- 王萍. 2013. 安徽金寨沙坪沟钼矿区岩浆岩特征及成因[D]. 合肥: 合肥工业大学.
- 王清晨, 林伟. 2002. 大别山碰撞造山带的地球动力学[J]. 地学前缘, 9(4): 257~265.
- 王运, 陈衍景, 马宏卫, 等. 2009. 河南省商城县汤家坪钼床地质和流体包裹体研究[J]. 岩石学报, 25(2): 469~480.

- 谢才富,熊成云,胡 宁,等. 2001. 东秦岭-大别造山带区域成矿规律研究[J]. 华南地质和矿产, 17(3): 15~21.
- 谢玉玲,李腊梅,郭 翔,等. 2015. 安徽西冲钼矿床细粒花岗岩的岩石定年、岩石化学及与成矿的关系研究[J]. 岩石学报, 31(7): 1 929~1 942.
- 徐 刚,汤中立,焦建刚,等. 2012. 金堆城与沙坪沟小岩体型斑岩钼矿床对比研究[J]. 西北地质, 45(4): 359~369.
- 徐向珍,杨经绥,郭国林,等. 2011. 雅鲁藏布江缝合带西段普兰蛇绿岩中地幔橄榄岩的岩石学研究[J]. 岩石学报, 27(11): 3 179~3 196.
- 徐义刚. 1993. 适用于幔源包体的地质温度计[J]. 岩石学报, 9(2): 167~180.
- 徐晓春,楼金伟,陆三明,等. 2009. 安徽金寨银山钼-铅-锌多金属矿床 Re-Os 和有关岩浆岩 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄测定[J]. 矿床地质, 28(5): 621~632.
- 薛君治,白学让,陈 武. 1986. 成因矿物学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 114~121.
- 阳 珊,王波华,王 枫,等. 2013. 安徽金寨县沙坪沟钼矿区铈赋存状态研究[J]. 岩矿测试, 32(2): 269~277.
- 杨泽强. 2007. 河南商城县汤家坪钼矿辉钼矿铼-钨同位素年龄及地质意义[J]. 矿床地质, 26(3): 289~295.
- 杨言辰,韩世炯,孙德有,等. 2012. 小兴安岭-张广才岭成矿带斑岩型钼矿床岩石地球化学特征及其年代学研究[J]. 岩石学报, 28(2): 379~390.
- 于 文,倪 培,王国光,等. 2013. 安徽金寨县沙坪沟斑岩钼矿床成矿流体演化特征[J]. 南京大学学报(自然科学), 48(3): 241~255.
- 赵子福,郑永飞. 2009. 俯冲大陆岩石圈重熔: 大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩成因[J]. 中国科学 D 辑-地球科学, 39(7): 888~909.
- 张 红,孙卫东,杨晓勇,等. 2011. 大别造山带沙坪沟特大型斑岩钼矿床年代学及成矿机理研究[J]. 地质学报, 85(12): 2 040~2 059.
- 张怀东,王波华,郝越进,等. 2012. 安徽沙坪沟斑岩型钼矿床地质特征及综合找矿信息[J]. 矿床地质, 31(1): 41~51.
- 张招崇,王福生. 2003. 一种判断原始岩浆的方法-以苦橄岩和碱性玄武岩为例[J]. 吉林大学学报, 33(2): 130~134.
- 郑永飞,徐 峥,赵子福,等. 2018. 华北中生代镁铁质岩浆作用与克拉通减薄和破坏[J]. 中国科学: 地球科学, 48(4): 379~414.
- 周作侠. 1986. 湖北丰山洞岩体成因探讨[J]. 岩石学报, 2(1): 59~70.
- 周作侠. 1988. 侵入岩的镁铁云母化学成分特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 4(3): 63~73.