

米仓山新民角闪辉长岩地球化学特征及其构造意义

甘保平, 赖绍聪, 秦江锋

(西北大学 地质学系 大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069)

摘要: 扬子板块西北缘新元古代岩浆作用的研究对于探讨 Rodinia 超大陆的构造演化具有重要意义, 对米仓山新民地区角闪辉长岩的岩石学和地球化学分析结果表明, 岩石 SiO₂ 含量较低且变化范围较小, 岩石富 Al 和 Ca, 低 K、Ti、P, Mg[#] 值中等, 属于亚碱性低钾拉斑岩石系列。岩石具有稀土元素总量相对较低、相对富集轻稀土元素和轻重稀土元素分馏程度低的特征, 具弱 Eu 正异常, $\delta\text{Eu} = 1.03 \sim 2.36$ 。岩石总体上富集大离子亲石元素 (Rb、Ba、Sr), 亏损高场强元素 (Nb、Zr、Hf、Th 等), $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.703858$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512617$, $\epsilon\text{Nd}(t) = +3.1$ 。综合区域地质、地球化学特征, 该岩体岩浆起源于亏损地幔的部分熔融, 在上升侵位过程中可能受到了地壳物质的混染。在这时期, 扬子板块北缘处于汇聚环境, 新民角闪辉长岩形成于弧后盆地的构造环境, 是 Rodinia 超大陆在新元古代期间演化过程中岩浆作用的产物。

关键词: 米仓山; 角闪辉长岩; 地球化学; 弧后盆地; Rodinia 超大陆

中图分类号: P588.12⁺4; P59; P54

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2016)02-0213-16

Geochemistry of the bojite from the Xinmin area, Micang Mountain

GAN Bao-ping, LAI Shao-cong and QIN Jiang-feng

(State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: Neoproterozoic igneous rocks on the northwestern margin of the Yangtze block can provide important information about the evolution of Rodinia supercontinent. In this paper, the petrology, geochemistry and isotopic data of the bojite from the Xinmin area of Micang Mountain region are presented. The Xinmin bojite displays low and limited SiO₂ content, enrichment of Al and Ca, low K, Ti and P, and medium Mg[#], suggesting typical subalkaline, low-K theolite features. The low REE composition, enriched LREE patterns, and positive Eu anomalies ($\delta\text{Eu} = 1.03 \sim 2.36$) imply the accumulation of plagioclase. The large ion lithophile elements (Rb, Ba, Sr) show enrichment, whereas the high strength elements (Nb, Zr, Hf, Th) are relatively depleted. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.703858$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512617$, and $\epsilon\text{Nd}(t) = +3.1$. The regional geological and geochemical characteristics reveal that the primary melts were derived from partial melting of depleted mantle rocks and underwent significant crustal contamination in the emplacement process. During this period, the northern margin of the Yangtze block was in a convergence environment and the tectonic environment of the Xinmin bojite was the back arc basin, and hence the Xinmin bojite was the product of the evolution of Rodinia supercontinent in the Neoproterozoic period.

Key words: Micang Mountain; bojite; geochemistry; back arc basin; Rodinia supercontinent

收稿日期: 2015-07-06; 接受日期: 2015-10-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372067); 国家自然科学基金重大计划项目(41190072); 国家自然科学基金委创新群体项目(41421002); 教育部创新团队项目(IRT 1281)

作者简介: 甘保平(1989-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩石地球化学研究, E-mail: gannwu@163.com; 通讯作者: 赖绍聪(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石地球化学研究, E-mail: shaocong@nwu.edu.cn.

Fund support: National Natural Science Foundation of China(41372067); National Natural Science Fund Project(41190072); Natural Science Foundation Innovation Group(41421002); Ministry of Education Innovation Team(IRT1281)

新元古代是地球演化历史上最重大的变革时期之一,超大陆裂解与裂谷岩浆活动、埃迪卡拉群生物繁衍与寒武纪生命大爆发等,都与这个特殊时期的地球演化有关(郑永飞,2003)。米仓山位于汉南地区,地处扬子板块与秦岭造山带交接部位,其周缘地区新元古代岩浆活动非常强烈,形成了大量以中酸性岩石为主的侵入岩(凌文黎等,2002a, 2002b; Zhou *et al.*, 2002 a, 2002b; 陆松年等,2003; Zhao and Zhou, 2007, 2009; 李献华等, 2008; 林广春, 2013; 卓皆文等, 2015)。这些岩浆岩体的形成时代集中在 830 ~ 740 Ma, 主要侵位于中新元古界扬子型变质基底岩系中, 并被南华系或震旦系不整合覆盖(Li *et al.*, 2003; Liu *et al.*, 2008; 裴先治等, 2009)。关于扬子板块北缘新元古代岩浆岩的时代及大地构造归属, 目前仍然存在较大分歧: ① 岛弧环境(沈渭洲等, 2002; Zhou *et al.*, 2002 a, 2002b; 赖绍聪等, 2003; 王宗起等, 2009; Dong *et al.*, 2011a, 2011b, 2012)。② 裂谷环境(Li *et al.*, 2002, 2003; Ling *et al.*, 2003; 凌文黎等, 2006; Zheng *et al.*, 2007; 孙东, 2011)。显然, 对于该区基性岩的精细解析将有助于对该区地质构造环境属性及其动力学过程的重新认识。本文在详细的野外地质工作基础上, 试图通过对扬子板块北缘米仓山新民地区出露的新元古代角闪辉长岩的岩石学、地球化学及同位素地球化学研究, 探讨其岩石成因、源区性质、形成背景及大陆动力学意义, 旨在为扬子板块北缘新元古代的构造属性和 Rodinia 超大陆的裂解演化作用提供新的约束。

1 地质概况和岩体地质

米仓山总体位于龙门山构造带、秦岭造山带、大巴山构造带和四川盆地之间, 东侧接南大巴山弧形构造带西端, 西侧接龙门山构造带北段, 北接南秦岭造山带, 南为四川盆地(图 1a)。米仓山由一系列东西走向和北东走向的褶皱组成, 具复合的叠加构造特征, 大致与龙门山构造体系的褶皱带走向接近(肖安成等, 2011)。区内侵入岩广泛发育, 以太古宙-新元古代岩浆岩组合为特征, 分布面积广泛。区内太

古宇后河岩群包括 3 个构造岩石单元, 从上到下为河口混合岩(夹变粒岩及斜长角闪岩)、八角树片麻岩、汪家坪变粒岩, 它们共同组成了扬子板块结晶基底(何大伦等, 1995)。中元古界火地垭群包括上两组和麻窝子组地层, 共同组成扬子板块的褶皱基底, 二者之间为断层接触关系。其中上两组主要岩石组合为堇青石片岩、黑云石英片岩夹变砂岩, 底部为含砾变砂岩, 总体显示出细粒碎屑岩建造的特征; 麻窝子岩组不整合上覆于后河岩群之上, 主要岩石组合为一套中厚层-厚层块状白云质大理岩夹石英岩、长英质变粒岩、绢云母石英千枚岩、黑云母石英片岩等变质细碎屑岩。区内沉积盖层沿基底岩系边缘分布, 主要包括震旦系-侏罗系。上震旦统灯影组与基底岩系呈角度不整合接触, 沉积盖层除泥盆系和石炭系缺失外, 其余地层均有出露。震旦纪-中三叠世地层为典型的扬子板块沉积, 分布以海相为主的浅海碳酸盐岩, 碎屑岩建造; 晚三叠世-中侏罗世为陆相碎屑岩建造(马润泽等, 1997a, 1997b; 田云涛等, 2010; 李婷, 2010; 徐学义等, 2011)。

该区周围主要出露 4 类岩体, 从老到新分别为橄榄辉长苏长岩体、角闪辉长岩体、闪长岩体、花岗岩体, 它们属于一个大型复式岩体, 均侵入于中元古界麻窝子组和上两组一套变质细碎屑岩夹大理岩地层中。其中角闪辉长岩体侵入西侧橄榄辉长苏长岩体, 北侧的闪长岩体侵入于角闪辉长岩体中, 花岗岩形成最晚, 侵入于前面 3 个岩体中。

2 样品描述和分析方法

新民角闪辉长岩样品采于四川省巴中市南江县新民镇西南方向约 8 km 处。岩体呈近椭圆形分布, 面积约为 32 km², 采样坐标为北纬 32°29.931', 东经 106°46.334' (图 1b)。据野外和镜下观察表明, 岩石新鲜面呈深灰、暗绿色, 中粗粒结构, 块状构造(图 2a)。主要组成矿物有基性斜长石(40%~50%)、单斜辉石(30%~40%)、角闪石(5%~15%), 副矿物有磁铁矿、磷灰石以及少量锆石, 矿物粒度一般在 2~5 mm 之间(图 2b)。斜长石呈自形-半自形板状或宽板状, 发育聚片双晶, 粒径多在 1~2 mm 左右, 局

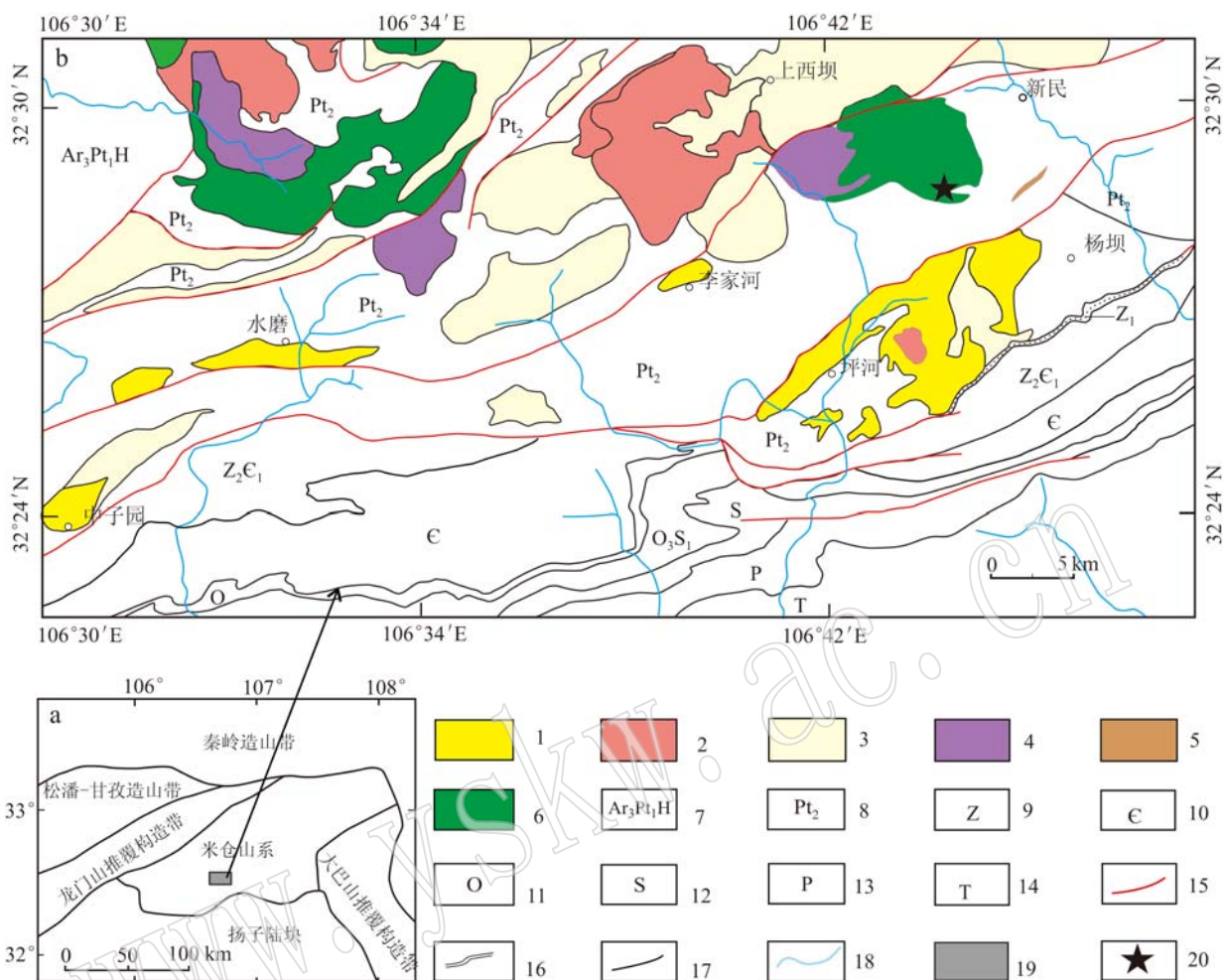


图 1 米仓山新民地区地质简图(据陕西省地质调查院, 2008)^①

Fig. 1 Sketch geological map of the Xinmin area, Micang Mountain (after Shaanxi Academy of Geological Survey, 2008)^①
 1—碱性岩; 2—花岗岩; 3—闪长岩; 4—橄榄辉长苏长岩; 5—闪长岩脉; 6—角闪辉长岩; 7—新太古-古元古界后河岩群; 8—中元古界华地垭群; 9—震旦系; 10—寒武系; 11—奥陶系; 12—志留系; 13—二叠系; 14—三叠系; 15—断层; 16—不整合界线; 17—地质界线; 18—水系; 19—研究区; 20—采样点

1—alkaline; 2—granite; 3—diorite; 4—olivine gabbro-norite; 5—diorite dyke; 6—bojite; 7—Neoproterozoic-Paleoproterozoic Houhe Group complex; 8—Mesoproterozoic Huadiya Group; 9—Sinian; 10—Cambrian; 11—Ordovician; 12—Silurian; 13—Permian; 14—Triassic; 15—fault; 16—angular unconformity; 17—geological boundary; 18—river system; 19—study area; 20—sampling location

部发生轻微的绢云母化; 单斜辉石颗粒两组解理发育, 大部分呈它形, 少数发育自形晶, 短柱状, 主要以普通辉石为主, 粒径多在 2~3 mm 左右, 局部发生蚀变; 普通角闪石多为不规则状, 部分呈自形-半自形柱状, 呈褐色, 两组斜交的解理清晰可见, 粒径多在 1~3 mm 左右, 充填在斜长石和单斜辉石之间, 图 2d 中角闪石边缘绿泥石化明显, 部分已被绿泥石所取代(图 2c)。

在对元素进行地球化学测试之前, 首先将岩石

样品洗净、烘干, 用小型颚式破碎机破碎至粒度为 5.0 mm 左右, 然后用玛瑙研钵托盘在振动式碎样机中碎至 200 目以下, 将碎后的粉末用二分之一均一缩分法分为 2 份, 其中 1 份作为副样, 另 1 份用来进行化学成分分析测试。岩石主量元素测试分析在中国科学院贵阳地球化学研究所采用 XRF 方法测定完成, 分析精度一般优于 5%。微量及稀土元素测试分析在中国科学院贵阳地球化学研究所采用 Bruker Aurora M90 ICP-MS 完成, 分析精度优于 5%, 分析

① 陕西省地质调查院. 2008. 中华人民共和国地质图 148C004004(南江市幅).

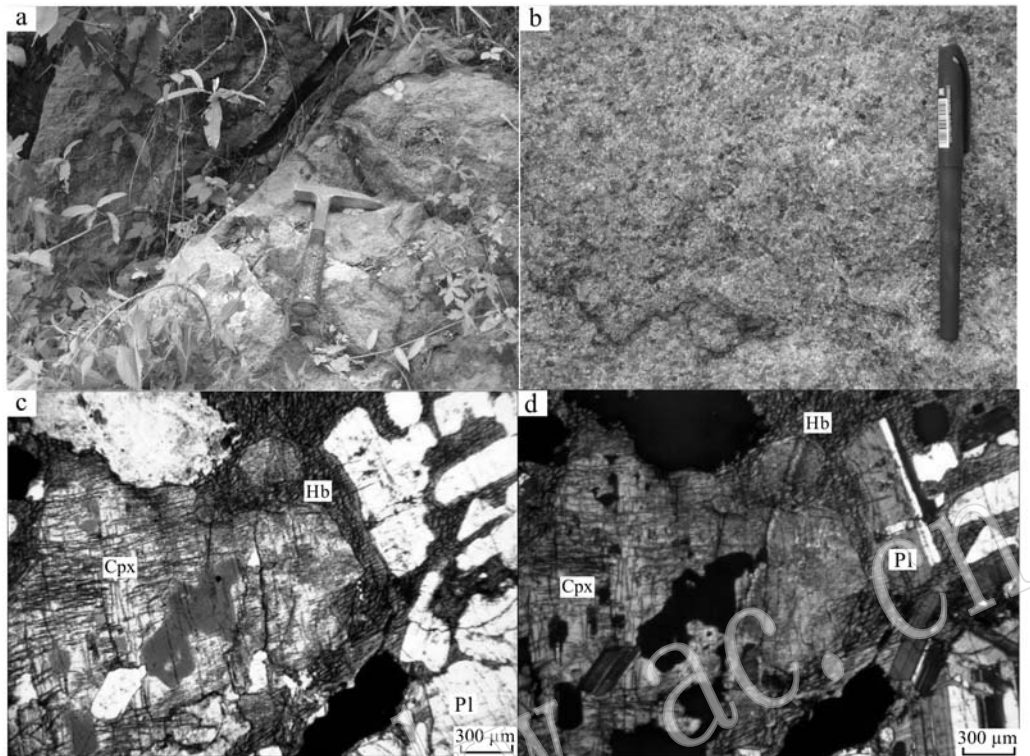


图 2 新民角闪辉长岩的野外及镜下照片(图 c 为单偏光,图 d 为正交偏光)

Fig. 2 Field and microscopic photos of the bojiert from the Xinmin area

Cpx—单斜辉石; Pl—斜长石; Hb—角闪石

Cpx—clinopyroxene; Pl—plagioclase; Hb—hornblende

流程参照(Qi *et al.*, 2000)。Sr-Nd 同位素分析在中国科学院贵阳地球化学研究所完成,采用 Neptune Plus 多接收器电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICPMS)测定,Sr、Nd 同位素分析采用具体方法参考文献(Chu *et al.*, 2009)。

3 岩石地球化学特征

3.1 主量元素特征

9 件角闪辉长岩样品的主量元素和微量元素分析结果及相关参数列于表 1。从表 1 中可以看出,新民角闪辉长岩的主量元素总体特征如下:SiO₂ 含量较低且变化范围较小,介于 49.85%~53.61%之间,TiO₂ 含量较低,介于 0.84%~1.34%之间,MgO=2.81%~3.56%,CaO 含量中等,变化范围较大,介于 9.91%~11.16%之间,P₂O₅ 含量较低,在 0.02%~0.08%之间,Al₂O₃ 含量相对较高(19.56%~21.20%)。Mg[#] 值中等,介于 43.70~47.50 之间。

里特曼指数在 0.99~1.72 之间,显示出亚碱性岩石特性。在 TAS 图解(图 3a)中,角闪辉长岩投影点几乎全部落入辉长岩区内,属于基性岩类。在 K₂O-SiO₂ 图解(图 3b)中,样品全部投影在(低钾)拉斑系列区域中,K₂O/Na₂O=0.07~0.37,比值较低,进一步表明了该区岩石具有低钾拉斑系列岩石特征。

3.2 微量及稀土元素特征

该区角闪辉长岩的稀土元素总量很低,变化于 14.68×10⁻⁶~26.85×10⁻⁶之间,平均为 22.04×10⁻⁶。轻稀土元素含量与重稀土元素含量比值为(∑LREE/∑HREE)3.19~4.00,平均为 3.65,表明轻稀土元素轻微富集。(La/Yb)_N 值介于 2.82~3.75 之间,平均为 3.26,表明轻、重稀土元素之间分馏相对明显。球粒陨石标准化稀土元素配分图(图 4a)上,显示为右倾富集型配分型式,其中 δEu=1.55~2.36,平均为 1.88,为正 Eu 异常,暗示可能存在斜长石的堆晶作用。

从微量元素分析结果(表 1)和不相容元素

表 1 新民角闪辉长岩主量元素($w_B/\%$)及微量元素分析结果($w_B/10^{-6}$)Table 1 Analytical results of major ($w_B/\%$) and trace elements ($w_B/10^{-6}$) of the bojite from the Xinmin area

样品号	Yb01	Yb02	Yb04	Yb06	Yb07	Yb08	Yb09	Yb10	Yb12
SiO ₂	53.06	49.85	53.61	52.06	50.96	50.56	50.87	52.52	51.43
TiO ₂	1.19	1.22	1.05	1.15	1.18	1.32	1.20	1.07	1.34
Al ₂ O ₃	20.52	21.20	19.94	20.32	20.46	20.20	20.73	20.71	19.56
Fe ₂ O ₃ ^T	8.24	9.02	8.07	8.87	9.12	9.38	8.78	8.28	9.38
MnO	0.13	0.12	0.13	0.14	0.15	0.14	0.14	0.13	0.14
MgO	3.02	3.11	2.81	3.33	3.04	3.35	3.41	2.82	3.56
CaO	10.07	11.16	10.47	9.91	10.49	10.79	10.34	10.49	10.41
Na ₂ O	2.88	3.22	2.96	2.90	2.89	2.76	3.02	3.05	2.89
K ₂ O	0.27	0.21	0.33	0.32	0.37	0.39	0.33	0.34	0.36
P ₂ O ₅	0.04	0.02	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.08
LOI	0.73	0.64	0.60	0.61	0.80	0.69	0.64	0.57	0.51
Total	100.15	99.77	100.03	99.67	99.52	99.64	99.52	100.05	99.66
Mg [#]	46.10	44.60	44.80	46.70	43.70	45.40	47.50	44.20	46.90
δ	0.99	1.72	1.02	1.14	1.34	1.31	1.43	1.21	1.25
AR	1.23	1.24	1.24	1.24	1.24	1.23	1.24	1.24	1.24
Li	3.88	9.57	7.25	7.76	9.57	8.03	6.08	7.56	6.37
Be	0.25	0.24	0.25	0.28	0.29	0.29	0.28	0.27	0.30
Sc	20.8	23.9	19.9	24.5	23.1	26.5	24.7	21.1	28.2
V	227	302	233	260	273	246	254	226	263
Cr	7.99	12.3	2.85	2.93	2.48	5.93	2.84	2.46	5.60
Co	30.8	30.7	36.3	32.2	31.9	27.8	32.9	36.2	31.5
Ni	10.1	37.4	8.10	8.32	8.12	8.32	8.48	7.95	9.62
Cu	26.2	47.1	26.6	30.6	23.1	23.9	27.5	26.2	33.8
Zn	113	103	151	155	204	155	147	151	144
Ga	19.9	19.6	18.2	18.3	19.1	17.5	18.4	18.6	18.5
As	4.82	18.0	6.04	6.98	6.73	6.55	5.87	5.83	5.76
Rb	4.34	3.96	8.95	7.92	10.8	9.91	7.53	9.39	9.19
Sr	716	668	664	654	665	618	653	681	626
Y	8.49	6.33	6.76	8.34	8.68	9.45	9.12	7.16	10.4
Zr	21.2	11.7	21.4	24.3	23.1	26.1	26.0	21.1	27.6
Nb	1.45	0.74	1.17	1.39	1.31	1.53	1.45	1.18	1.76
Cs	0.82	1.02	2.57	2.11	2.80	2.55	2.04	2.69	1.92
Ba	149	123	128	122	145	116	141	129	133
La	3.34	2.09	3.08	3.19	3.54	3.18	3.39	3.19	3.58
Ce	6.35	4.28	6.68	7.51	7.23	7.64	7.73	6.85	8.41
Pr	0.91	0.57	0.86	1.01	1.01	1.06	1.06	0.85	1.14
Nd	4.41	2.80	3.62	4.68	4.61	4.97	4.67	3.86	5.30
Sm	1.21	0.78	0.95	1.25	1.07	1.32	1.26	1.02	1.47
Eu	0.85	0.66	0.64	0.73	0.72	0.74	0.75	0.69	0.78
Gd	1.28	0.93	1.04	1.31	1.27	1.41	1.39	1.14	1.63
Tb	0.19	0.15	0.17	0.21	0.21	0.25	0.22	0.18	0.26
Dy	1.20	0.96	1.09	1.34	1.33	1.69	1.54	1.11	1.74
Ho	0.23	0.20	0.22	0.26	0.28	0.32	0.31	0.24	0.35
Er	0.65	0.58	0.65	0.80	0.81	0.85	0.89	0.65	1.00
Tm	0.10	0.08	0.10	0.11	0.11	0.13	0.12	0.10	0.14
Yb	0.66	0.52	0.61	0.75	0.69	0.81	0.79	0.61	0.91

续表 1

Continued Table 1

样品号	Yb01	Yb02	Yb04	Yb06	Yb07	Yb08	Yb09	Yb10	Yb12
Lu	0.11	0.08	0.09	0.11	0.10	0.11	0.11	0.09	0.14
Hf	0.62	0.38	0.60	0.75	0.65	0.72	0.77	0.63	0.81
Ta	0.53	0.17	0.26	0.12	0.13	0.24	0.11	0.10	0.18
W	44.2	36.1	44.3	53.4	55.1	45.0	73.2	36.6	43.0
Tl	0.03	0.03	0.07	0.06	0.07	0.08	0.07	0.08	0.07
Pb	7.78	4.62	23.8	34.8	33.6	12.0	38.9	27.7	13.5
Bi	0.06	0.03	0.15	0.08	0.17	0.10	0.10	0.08	0.12
Th	0.18	0.14	0.27	0.24	0.27	0.31	0.29	0.29	0.37
U	0.07	0.07	0.13	0.13	0.12	0.15	0.14	0.12	0.13
P	170	78.50	262	249	266	279	271	297	345
δEu	2.10	2.36	1.97	1.75	1.88	1.67	1.73	2.96	1.55
(La/Yb) _N	3.63	2.88	3.62	3.05	3.68	2.82	3.08	3.75	2.82
(Ce/Yb) _N	2.67	2.29	3.04	2.78	2.91	2.62	2.72	3.12	2.57
∑REE	21.49	14.68	19.80	23.26	22.98	24.48	24.23	20.58	26.85
∑LREE/∑HREE	3.86	3.19	3.99	3.76	3.79	3.40	3.51	4.00	3.35

注: $Mg^\# = 100 \times Mg / (Mg + Fe^{2+})$; $AR = (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O) / (Al_2O_3 + CaO - Na_2O - K_2O)$; $\delta = (K_2O + Na_2O)^2 / (SiO_2 - 43)$ (质量分数)。

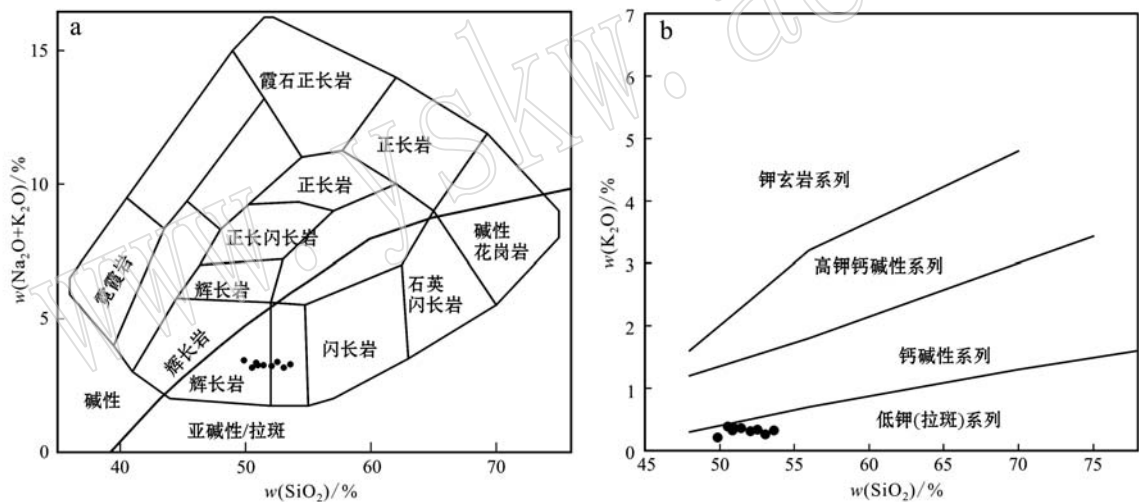


图 3 新民角闪辉长岩 TAS图(a)及 K₂O-SiO₂ 图解(b)

Fig. 3 TAS(a) and K₂O-SiO₂(b) diagrams for the bojiite in the Xinmin area

MORB 标准化图解(图 4b)中可以看出, 曲线呈现出向右平缓倾斜的“M”型多峰谷模式, HFSEs(Nb、Ta、Zr、Hf、Th、Ce、Ti)和 N-MORB 线分布较接近, 显示了大离子亲石元素(Ba、Sr)富集, Rb 亏损, 高场强元素(Nb、Zr、Hf、Th 等)相对亏损, 富集 Ce、Sr、Ti 等元素的特征。

3.3 Sr-Nd 同位素特征

本区角闪辉长岩样品 Yb06 的 Sr-Nd 同位素分析结果列于表 2 中。从表中可以看出, 岩石中 Sr 的含量为 654×10^{-6} , Rb 的含量为 7.92×10^{-6} , $^{87}Sr/^{86}Sr=0.703858$; 岩石中 Nd 的含量为 $4.68 \times$

10^{-6} , Sm 的含量为 1.25×10^{-6} , $^{143}Nd/^{144}Nd = 0.512617$ 。初始比值 $I_{Sr} = 0.703467$, $\epsilon Nd(t) = +3.1$, 单阶段模式年龄 t_{DM} 值为 1.55 Ga。

4 讨论

4.1 岩体成因以及源区性质

通过上述地球化学性质可以看出, 新民角闪辉长岩具有较低的 SiO₂ 含量($\leq 53\%$)、K₂O 含量($< 0.4\%$)、Al₂O₃ 含量相对较高(19.56%~21.20%)。Beard (1986)认为, 这是岩浆起源于活动大陆边缘(或岛弧

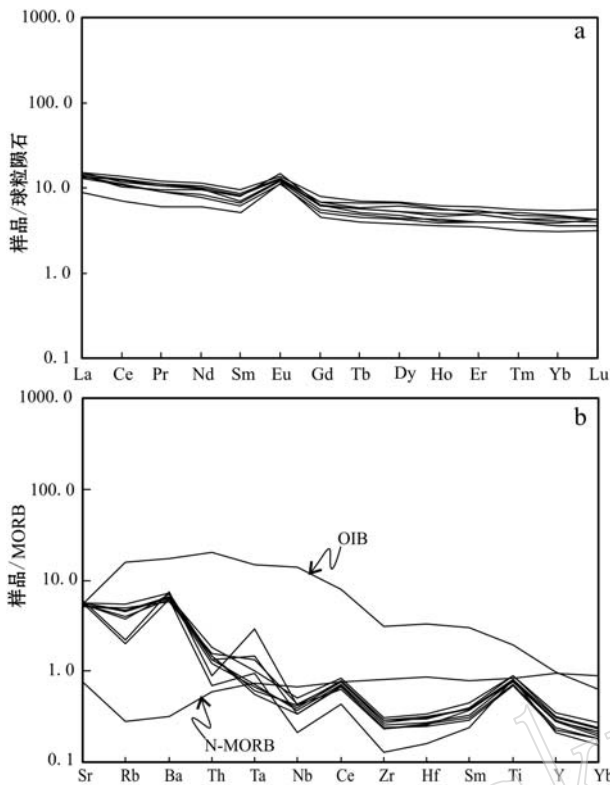


图4 新民角闪辉长岩稀土元素球粒陨石标准化配分图(a)和不相容元素 MORB 标准化蛛网图(b)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE (a) and primitive-mantle-normalized trace element patterns (b) of the Xinmin bojiite 球粒陨石标准值据 Wood 等(1979); OIB、E-MORB 标准化值据 Sun & McDonough(1989) chondrite normalized values after Wood *et al.*, 1979; OIB、E-MORB normalized values after Sun & McDonough, 1989

环境)的一个标志,因为陆壳物质为玄武岩浆富铝创造了最有利的条件。新民角闪辉长岩岩石 LREE 略富集,轻重稀土元素分馏相对明显,大离子亲石元素(Ba、Sr)富集,Rb 亏损,高场强元素(Nb、Zr、Hf、Th 等)相对亏损,富集Pb, Sr, Ti等元素;样品具有较低的 Zr (远小于 130×10^{-6})含量和 $Zr/Y = 1.85 \sim 3.17 (< 4)$ 值,类似于岛弧火山岩的特征;而大陆玄武岩,不管

是否遭受地壳或岩石圈混染,它都具有较高的 Zr ($> 70 \times 10^{-6}$)含量和 $Zr/Y (> 3)$ 值(夏林圻,2007),并且 Ba/La 值介于 $37 \sim 59 (> 30)$ 之间,也显示出与板块俯冲作用有关的岛弧火山岩的特征(Ajaji *et al.*, 1998)。此外,不相容元素 MORB 标准化曲线(图 4b)显示元素 Nb 的负异常,构造判别图解(图 8b、8d)也显示出新民角闪辉长岩具有岛弧玄武岩的地球化学特征,表明该岩体有弧的印记。

通常元素 Nb 和 Ta 可以指示岩浆成因,地壳物质具有亏损 Nb、Ta、Sr 的特征(赵正等,2012)。本区岩石 Nb 的含量在 $0.74 \times 10^{-6} \sim 1.76 \times 10^{-6}$ 之间, Ta 的含量介于 $0.1 \times 10^{-6} \sim 0.53 \times 10^{-6}$ 之间,高于原始地幔 Nb(0.713×10^{-6})和 Ta(0.041×10^{-6})的含量, Nb/Ta = $2.74 \sim 13.18$,介于原始地幔(Nb/Ta = 17.3)和地壳(Nb/Ta = 11~12)之间。本区角闪辉长岩具有轻微的 Nb、Ta 负异常, Sr 正异常。基性岩类 Sr 在斜长石和熔体之间的分配系数通常 > 1 。Sr 容易进入斜长石,新民角闪辉长岩中斜长石含量较高,表明 Sr 的正异常可能与斜长石的含量较高有关。研究表明,地壳混染的微量元素指标为极高的原始地幔标准化 Th/Nb 值(通常 > 1)(Saunders *et al.*, 1992)和较低的 Nb/La 值(Kieffer *et al.*, 2004),新民角闪辉长岩具有较低的 $(Nb/La)_N$ 值($0.35 \sim 0.49$)和较高的 $(Th/Nb)_N$ 值($1.0 \sim 2.1$)(李猷华等,2008;夏林圻等,2009)。此外,地壳混染可以通过 Nb/La 与 La/Sm、Th/La 和 Sm/Nd 的相关性得到论证(张宇昆,2014)。本区角闪辉长岩呈现 Nb/La 与 La/Sm、Nb/La 与 Th/La 的负相关关系, Nb/La 与 Sm/Nd 呈现正相关(图 5)。综合以上分析,可以推测新民角闪辉长岩可能受到轻微的地壳混染。

结合已有研究,扬子板块北缘新元古代基性火山岩同位素特征变化如图 6 所示。950~895 Ma 的西乡群玄武岩全岩 $\epsilon Nd(t)$ 值在 $+8.8 \sim +4.6$ 之间,

表2 新民角闪辉长岩 Sr-Nd 同位素分析结果
Table 2 Sr-Nd isotopic analyses of the Xinmin bojiite

样品号	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2_{Sm}	$w_B/10^{-6}$		$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2_{Sm}	$w_B/10^{-6}$		t_{DM}/Ga	$\epsilon Nd(t)$	I_{Sr}
			Sr	Rb			Nd	Sm			
Yb06	0.703 858	0.000 023	653.6	7.92	0.512 617	0.000 011	4.68	1.25	1.55	3.1	0.703 467

注: $\epsilon Nd(t) = [(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{样品}}(t) / (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}(t) - 1] \times 10^4$; $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.512 638$; $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.196 7$; 初始同位素组成根据 $t = 776.5 \text{ Ma}$ (据陕西省地质调查院,2008)^①计算。

① 陕西省地质调查院. 2008. 中华人民共和国地质图 148C004004(南江市幅).

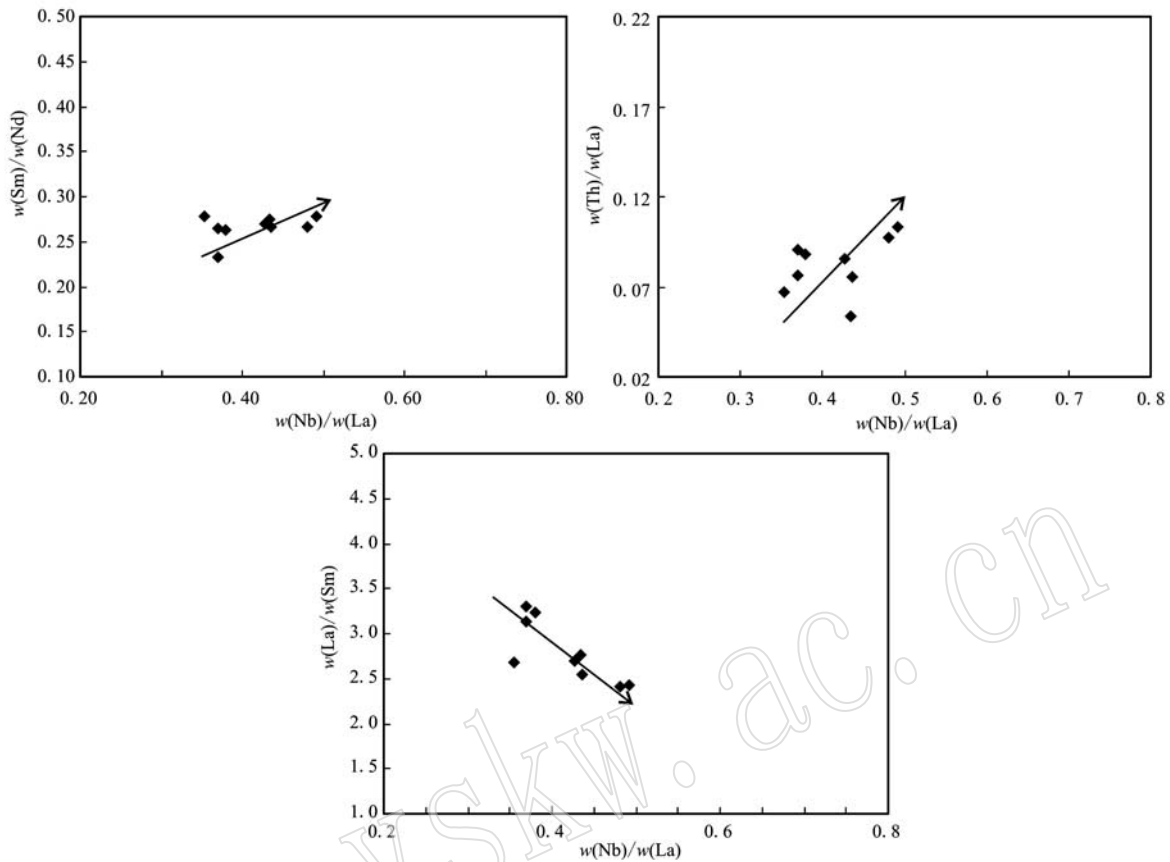


图5 新民角闪辉长岩 Nb/La 与 Sm/Nd、Th/La 和 La/Sm 相关图

Fig. 5 Nb/La versus Sm/Nd, Nb/La versus Th/La and Nb/La versus La/Sm diagrams for the bojite in the Xinmin area

具有岛弧地球化学特征, 来源于较亏损的地幔源区, 并受到地壳混染的影响(凌文黎等, 2002a); 840~

776 Ma 的碧口群玄武岩和玄武质安山岩的全岩 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值在 +7.9~+3.4 之间, 地幔源区具有从亏损向富集转变的趋势(闫全人等, 2004); 820 Ma 望江山基性岩体具有高的全岩 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值(+3.4~+3.8)和较低的 I_{Sr} 值(0.7033~0.7037), 表明其地幔源区相对亏损(Zhao *et al.*, 2009a); 815~800 Ma 碑坝岩体具有较低的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值(+0.2~+2.0)和较高的 I_{Sr} 值(0.7038~0.7061), 显示富集地幔源区特征(Zhao *et al.*, 2009a); 扬子板块北缘汉南地区 780~735 Ma 镁铁-超镁铁质岩体具有中等 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值(+0.9~+3.9), 较低的 I_{Sr} 值(0.7033~0.7039), 也显示亏损地幔的特征(Zhao *et al.*, 2009a); 778~667 Ma 的白水江群基性火山岩 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值为 +4.6~+1.1, 来源于富集地幔源区的洋岛玄武岩(王涛等, 2011); 武当山群和 632 Ma 耀岭河群基性火山岩的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值分别为 +7.25~+2.3 和 +3.0~-0.6, 南秦岭周庵超镁铁质岩体(637±4 Ma)也显示地幔源区相对亏损, 可以推测从 ~820 Ma 至 ~630 Ma, 扬子板块北缘新元古代镁

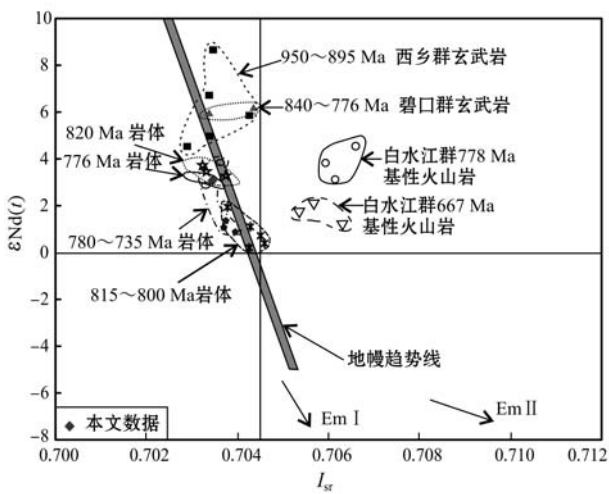


图6 新民角闪辉长岩 $I_{\text{Sr}} - \epsilon\text{Nd}(t)$ 相关图解
(据王梦玺等, 2012)

Fig. 6 I_{Sr} versus $\epsilon\text{Nd}(t)$ diagram for the bojite in the Xinmin area (after Wang Mengxi *et al.*, 2012)

铁-超镁铁质岩的地幔源区具有逐渐富集的趋势(王梦玺等, 2012)。

从 Sr-Nd 同位素数据(表 2)可以看到, 新民角闪辉长岩具有中等的 ϵ_{Nd} 值(+3.1)和 较低的 I_{Sr} 值(0.703 467), 分别低于和高于岩体形成时的亏损地幔值(分别为 8.1 和 0.702 04)(沈渭洲等, 2002)。该岩体与 820 Ma 望江山基性岩体具有相类似的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (+3.4~+3.8)、 I_{Sr} (0.703 3~0.703 7) 值, 所以可以推测其原始地幔相对亏损(图 6)。

在 Rb/Nb - Rb/Zr 图解(图 7a)中, 角闪辉长岩表现出正斜率直线型平衡部分熔融演化趋势, 可推测新民角闪辉长岩是幔源物质部分熔融的产物。在 $(\text{Tb}/\text{Yb})_{\text{P}} - (\text{Yb}/\text{Sm})_{\text{P}}$ 图解(图 7b)上可进一步判断地幔源区物质的熔融程度, 角闪辉长岩落在石榴子石橄榄岩熔融曲线上, 同时也指示其熔融程度大约为 2%~7%。图 7b 中, 网格指示了熔融程度的范

围, 分别为 1%、5%、10% 和 15%; 熔融模式为分离熔融(Shaw, 1970), 橄榄岩的熔融发生在石榴石的存在量从 0 到 100%; 熔体在石榴子石相的比例用虚线表示(Gar), 黑线表示熔体分数; 源区假定为平均的亏损地幔(Workman & Hart, 2005)和富集地幔橄榄岩(Ito & Mahoney, 2005)1:1 的混合, 分配系数根据 Salters & Stracke (2004); 未熔融的橄榄岩假定由 53% 橄榄石、30% 斜方辉石、10% 单斜辉石和 7% 石榴子石或尖晶石组成, 这些矿物的熔融比例分别假定为 10%、10%、40% 和 40%(Janney *et al.*, 2000)。但需要指出的是, 由于选择的熔融模式、分配系数、源区组成和矿物比例不同, 得出的部分熔融程度肯定会有所不同(张招崇等, 2006)。综合上述分析, 新民角闪辉长岩源区显示出亏损地幔的特征, 岩浆起源于幔源物质, 经过不同程度部分熔融形成, 并且在上升的过程中可能受到轻微地壳混染。

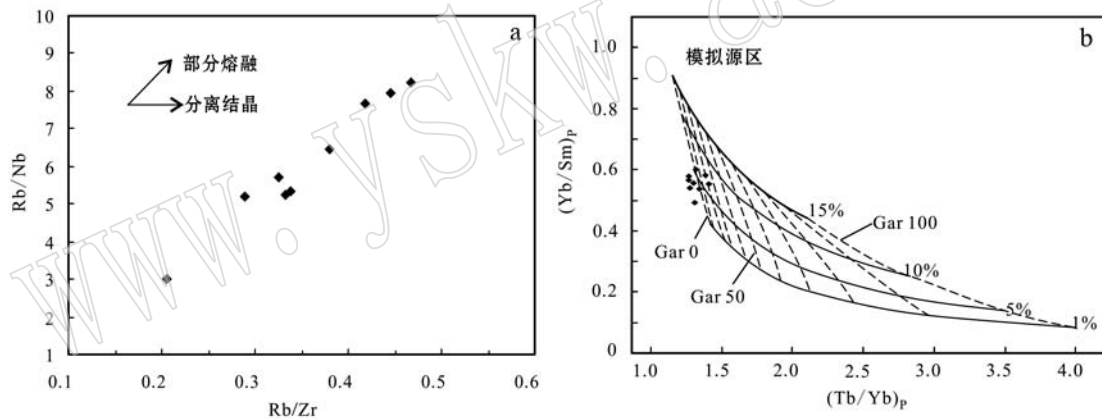


图 7 新民角闪辉长岩相容元素部分熔融判别图(图 a 据张贵山等, 2009 修改; 图 b 据 Zhang *et al.*, 2006 修改)

Fig. 7 Discrimination diagrams of partial melting for compatible elements of the Xinmin bojite (Fig. a modified after Zhang Guishan *et al.*, 2009; Fig. b modified after Zhang *et al.*, 2006)

4.2 构造环境及其意义

扬子板块北缘豫东地区辉长苏长岩和角闪辉长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分别为 764 ± 38 Ma 和 757 ± 32 Ma(徐学义等, 2011)。新民角闪辉长岩的形成年龄为 776.5 ± 26.1 Ma(据陕西省地质调查院, 2008)^①(锆石 U-Pb 法测定), 该年龄与豫东地区角闪辉长岩的年龄在误差允许范围内大致吻合, 都属于新元古代末期岩浆作用的产物。新民角闪辉长岩的 $\text{Zr}/\text{Y} = 1.85 \sim 3.51$ (平均为 2.78), 在图 8a 中

几乎全部位于板内玄武岩(或大陆边缘弧)环境中; 在 $\text{TiO}_2 - 10 \text{ MnO} - 10 \text{ P}_2\text{O}_5$ 和 $2 \text{ Nb} - \text{Zr}/4 - \text{Y}$ 判别图解上(图 8b、8d), 样品点位于岛弧玄武岩区域内, 反映新民角闪辉长岩具有大陆边缘弧玄武岩的特征; 在玄武岩 $\text{Hf}/3 - \text{Th} - \text{Nb}/16$ 三角构造判别图解(图 8c)上, 样品点几乎全部落在钙碱性玄武岩(CAB)的范围内。

Th、Nb、La 都是强不相容元素, 可最有效地指示源区特征。Th、Nb、La 在海水蚀变及变质过程中是

^① 陕西省地质调查院. 2008. 中华人民共和国地质图 148C004004(南江市幅).

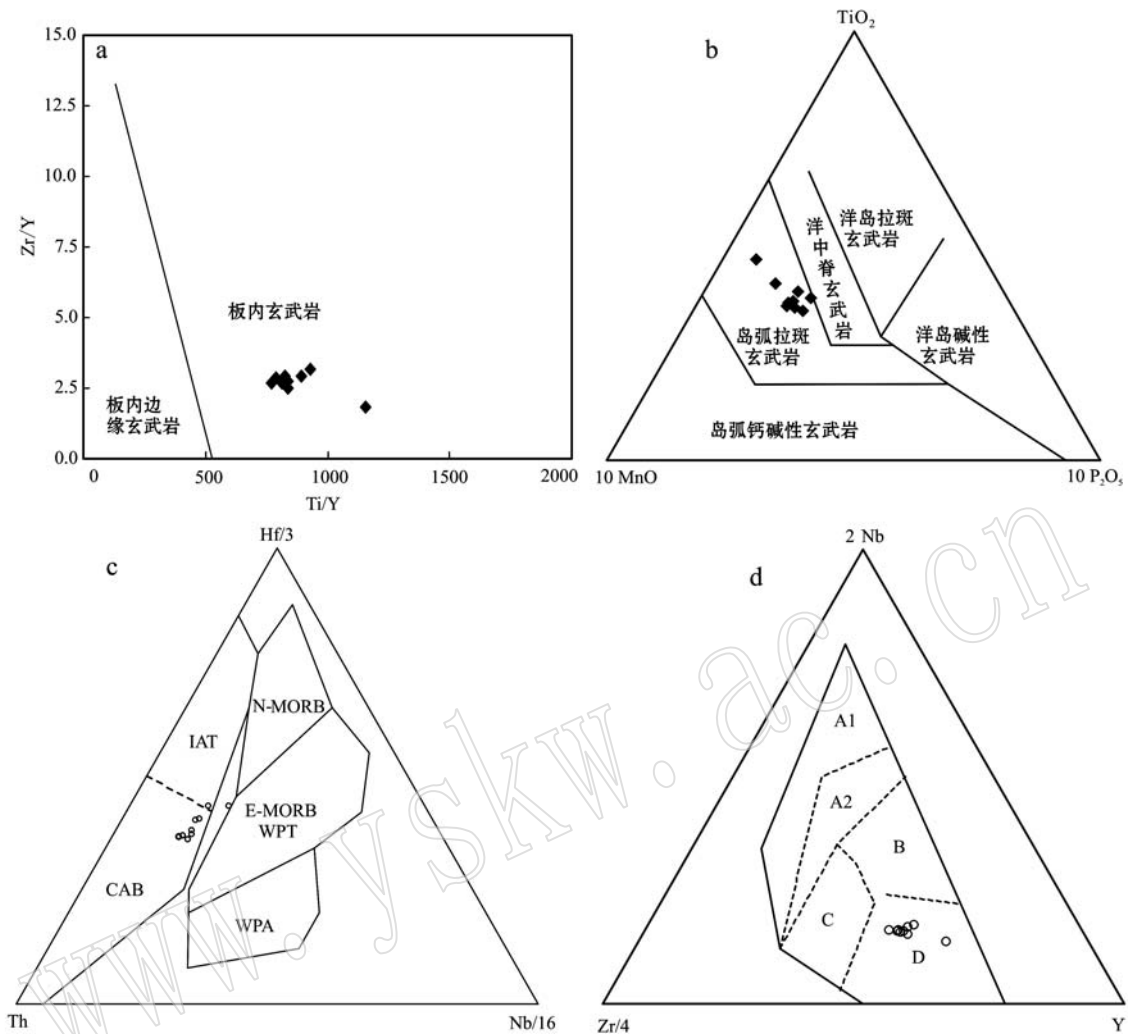


图 8 新民角闪辉长岩构造环境判别图解

Fig. 8 Tectonic setting discrimination diagrams of the bojite from the Xinmin area

a—Zr/Y - Ti/Y 判别图解[据 Pearce 等(1982)]; b—TiO₂ - 10 MnO - 10 P₂O₅ 判别图解[据 Mullen (1983)]; c—Hf/3 - Th - Nb/16 判别图解[据 Wood (1979)]; d—2 Nb - Zr/4 - Y 判别图解[据 Meschede (1986)]

WPA—板内玄武岩; E-MORB—富集型洋中脊玄武岩; N-MORB—亏损型洋中脊玄武岩; IAT—岛弧拉斑玄武岩; CAB—钙碱性玄武岩; A1、A2—板内碱性玄武岩, A2、C—板内拉斑玄武岩, B—P-MORB, D—N-MORB, C、D—火山弧玄武岩

a—Zr/Y - Ti/Y discrimination diagram (after Pearce *et al.*, 1982); b—TiO₂ - 10 MnO - 10 P₂O₅ discrimination diagram (after Mullen, 1983); c—Hf/3 - Th - Nb/16 discrimination diagram (after Wood, 1979); d—2 Nb - Zr/4 - Y discrimination diagram (after Meschede, 1986); WPA—intraplate basalt; E-MORB—enrichment of mid-ocean ridge basalt; N-MORB—depletion of mid-ocean ridge basalt; IAT— island arc tholeiite; CAB—calc-alkali basalt; A1, A2—intraplate alkaline basalts; A2 and C—intraplate tholeiite; B—P-MORB; D—N-MORB; C, D—volcanic arc basalt

稳定或比较稳定的元素,所以利用 Nb/Th - Nb 和 La/Nb - La 图解可以区分洋脊、岛弧和洋岛玄武岩(李曙光,1993)。从图 9b、9c 中可以看出,本区火山岩均处在岛弧火山岩范围内。Ta/Yb 主要与地幔部分熔融及幔源性质有关,对于鉴别火山岩的源区特征有重要意义(Peacrer, 1983)。在 Th/Yb - Ta/Yb 图解(图 9a)中,新民角闪辉长岩位于钙碱性玄武岩区域内,无 MORB 和 OIB 型演化趋势,这种地球化

学特征表明新民角闪辉长岩总体具有火山弧的大地构造环境。从不相容元素 MORB 标准化蛛网图(图 4b)中可以看出,新民角闪辉长岩高场强元素(HFS-Es)和 N-MORB 较接近,明显不同于洋岛玄武岩(OIB),大离子亲石元素较高场强元素相对富集,该时期扬子板块西北缘主要受俯冲作用的改造,导致新民角闪辉长岩中微量元素 Nb 亏损较大,Ta、Ti 和 Ce 却显示正异常,虽然这与典型的岛弧环境下形成

的火山岩特征不同,但以上地球化学指标表明其具有弧的印记。新民角闪辉长岩同位素具有中等的 ϵ_{Nd} 值(+3.1)和较低的 I_{Sr} 值(0.703 467),说明源区具有亏损地幔的特征,在其上升的过程可能受到了地壳的混染。结合米仓山新元古代地质演化历史,认为研究区在~830 Ma 之前处于一个早期弧构造背景,之后在

北部西乡-汉南地块发生一系列构造热事件,该时期扬子板块北缘处于汇聚环境,米仓山处于残余弧或弧后盆地的环境。综合以上分析,推测新民角闪辉长岩可能形成于弧后盆地的构造环境中(图 10)。

研究表明,1 000~825 Ma 前,扬子北缘(包括西北缘)可能已与其它大的陆块相连或中间以小

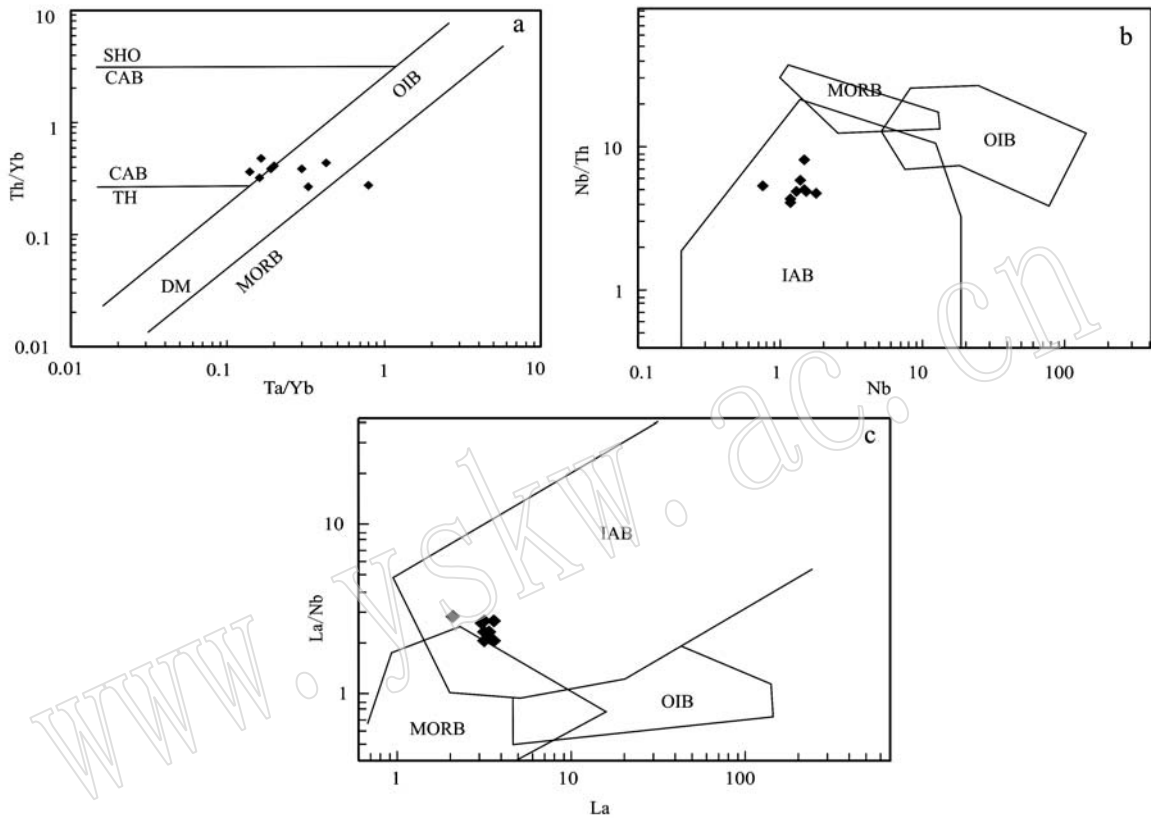


图 9 Ta/Yb-Th/Yb、Nb-Nb/Th 和 La-La/Nb 图解(图 a 据 Pearce, 1983; 图 b、c 据李曙光, 1993)

Fig. 9 Ta/Yb-Th/Yb, Nb-Nb/Th and La-La/Nb diagrams (a after Pearce, 1983; b and c after Li Shuguang, 1993)

SHO—钾玄武岩; CAB—钙碱性玄武岩; TH—拉斑玄武岩; DM—亏损地幔; MORB(N-MORB)—正常洋脊玄武岩; IAB—岛弧玄武岩;
OIB—洋岛玄武岩

SHO—shoshonite; CAB—calc-alkali basalt; TH—tholeiite; DM—depletes mantle; MORB—mid-ocean ridge basalt; IAB— island-arc basalts;
OIB—ocean-island basalts

规模的洋盆相隔,未发生大规模的岩浆作用(Zheng *et al.*, 2006),扬子板块新元古代最主要构造热事件发生在 830 Ma 左右(Liu *et al.*, 2008),而发生自北西向南东方向的洋壳俯冲以及弧陆碰撞造山作用时间主要在 810 Ma 之前(Chen *et al.*, 2005; 陈岳龙等, 2006; 裴先治等, 2009; 李佐臣, 2013),之后进入 Rodinia 超大陆的裂解阶段,期间发生扬子板块西北缘、北缘龙门山构造带、汉南-米仓山构造带上大规

模包含火山喷发-沉积事件及侵入活动在内的岩浆活动(陆松年, 1998; 李献华等, 2002; 卓皆文等, 2015)。到 780 Ma 左右,至少在扬子板块北缘,形成了新元古代洋盆(陕西省地质调查院, 2008)^①,洋壳向南俯冲于扬子板块之下,形成了扬子板块北缘较为广泛的大陆边缘弧岩浆作用,该岩浆构造热事件可能一直持续到 680 Ma(Wu *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2006; 许志琴等, 2006)。

① 陕西省地质调查院. 2008. 1:25 万南江市幅区域地质调查成果报告(内部资料).

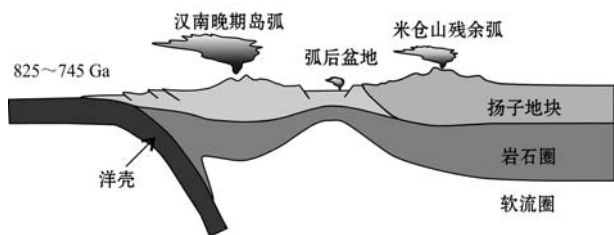


图 10 扬子板块西北缘米仓山地区新元古代构造演化图
(据 Dong *et al.*, 2012 修改)

Fig. 10 Neoproterozoic tectonic evolution on the Micangshan area of northwestern margin of Yangtze block (modified after Dong *et al.*, 2012)

综合前人研究结果、区域地质特征以及本文的地球化学及同位素研究结果,有理由认为新民角闪辉长岩具有岛弧玄武岩地球化学特征。从扬子北缘局部范围来看,780~745 Ma 大陆边缘岩浆事件亦是 Rodinia 超大陆裂解事件发生过程中陆块边缘洋陆俯冲的地质记录(徐学义等,2011; Dong *et al.*, 2011b)。

新元古代期间,扬子板块北缘汉南-米仓山地块总体处于活动大陆边缘弧的俯冲带环境(Dong *et al.*, 2012)。新元古代在整个地球历史中是一段十分重要且具有特殊意义的地质阶段,在经过中元古代相对平静的地质历史以后,从中元古代晚期开始,一些分散的古陆块逐步汇聚,形成命名为“Rodinia”的超大陆(Moores, 1991; Dalziel, 1991; Powell *et al.*, 1993)。目前,扬子板块被认为是全球最完整的保存了新元古代中期与 Rodinia 超大陆早期裂解相关的岩浆活动和沉积作用记录的区域,它在 Rodinia 超大陆重建中具有“核心”位置,是连接冈瓦纳古陆和劳亚古陆的桥梁(李献华等,2012),因此,扬子板块是研究 Rodinia 超大陆的关键地区之一。新民角闪辉长岩是 Rodinia 超大陆在新元古代时期岩浆作用的产物,对其进行精细解析和研究对于进一步深入探讨 Rodinia 超大陆的形成和演化具有重要的科学意义。

5 结论

(1) 新民角闪辉长岩起源于亏损地幔岩石的局部熔融,其岩浆在上升过程中可能受到了地壳的轻微混染。

(2) 新民角闪辉长岩形成于弧后盆地的构造环境,是 Rodinia 超大陆在新元古代期间演化过程中岩

浆作用的产物。

References

- Ajaji T, Weis D, Giret A, *et al.* 1998. Coeval potassic and sodic calc-alkaline series in the post-collisional Hercynian Tanncherfi intrusive complex, northeastern Morocco: Geochemical, isotopic and geochronological evidence[J]. *Lithos*, 45 (1~4): 371~393.
- Beard J S. 1986. Characteristic mineralogy of arc-related cumulate gabbros: implication for the tectonic setting of gabbroic plutons and for andesite genesis[J]. *Geology*, 14: 848~851.
- Chen Y L, Luo Z H, Zhao J X, *et al.* 2005. Petrogenesis and dating of the Kangding complex, Sichuan Province[J]. *Science in China (Ser. D)*, 48(5): 622~634.
- Chen Yuelong, Tang Jinrong, Liu Fei, *et al.* 2006. Elemental and Sm-Nd isotopic geochemistry of clastic sedimentary rocks in the Garze-Songpan block and Longmen Mountains[J]. *Geology in China*, 33 (1): 109~118(in Chinese with English abstract).
- Chu Z Y, Chen F K, Yang Y H, *et al.* 2009. Precise determination of Sm, Nd concentrations and Nd isotopic compositions at the nanogram level in geological samples by thermal ionization mass spectrometry [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 24 (11): 1 534~1 544.
- Dalziel I W D. 1991. Pacific margins of Laurentia and East Antarctica-Australia as a conjugate rift pair: Evidence and implication for an Encambrian supercontinent[J]. *Geology*, 19: 598~601.
- Dong Y P, Liu X M, Santosh M, *et al.* 2011b. Neoproterozoic subduction tectonics of the Yangtze Block in South China: Constrains from zircon U-Pb geochronology and geochemistry of mafic intrusions in the Harman Massif[J]. *Precambrian Research*, 189(1): 66~90.
- Dong Y P, Liu X M, Santosh M, *et al.* 2012. Neoproterozoic accretionary tectonics along the northwestern margin of the Yangtze Block, China: Constraints from zircon U-Pb geochronology and geochemistry[J]. *Precambrian Research*, 196: 247~274.
- Dong Y P, Zhang G W, Hauenberger C, *et al.* 2011a. Palaeozoic tectonics and evolutionary history of the Qinling orogen: evidence from geochemistry and geochronology of ophiolite and related volcanic rocks[J]. *Lithos*, 122(1): 39~56.
- He Dalun, Liu Dengzhong, Deng Mingsen, *et al.* 1995. Age of crystalline basement of Yangtze platform in the michang mountains, Sichuan[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 15(3): 176~183 (in Chinese).
- Ito G & Mahoney J J. 2005. Flow and melting of a heterogeneous man-

- tle: 1. Importance to the geochemistry of ocean island and midocean ridge basalts[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 230: 29~46.
- Janney P E, Macdougall J D, Natland J H, *et al.* 2000. Geochemical evidence from the Pukapuka volcanic ridge system for a shallow enriched mantle domain beneath the South Pacific superswell[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 181: 47~60.
- Kieffer B, Arndt N, Lapierre H, *et al.* 2004. Flood and shield basalts from Ethiopia: Mggmas from the African superswell[J]. *Journal of Petrology*, 45(4): 793~834.
- Lai Shaocong, Li Sanzhong and Zhang Guowei. 2003. Tectonic settings of the volcano-sedimentary rock association from Xingxiang Group, Shannxi Province: volcanic rock geochemistry constraints[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(1): 143~152(in Chinese with English abstract).
- Li Shuguang. 1993. Ba-Nb-Th-La diagrams used to identify tectonic environments of ophiolite[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 9(2): 146~157(in Chinese with English abstract).
- Li T. 2010. The Study of Neoproterozoic Tectonic-magmatic Events in the Northern Margin of the Yangtze Continental[D]. Xi'an: Chang'an University(in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua, Li Wuxian and He Bin. 2012. Building of the South China Block and its relevance to assembly and breakup of Rodinia supercontinent: Observations, interpretations and tests[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 31(6): 543~559(in Chinese with English abstract).
- Li X H, Li Z X, Ge W C, *et al.* 2003. Neoproterozoic granitoids in South China: Crustal melting above a mantle plume at ca. 825Ma? [J]. *Precambrian Res.*, 122: 45~83.
- Li Xianhua, Li Zhengxiang, Zhou Hanwen, *et al.* 2002. U-Pb Zircon geochronological, geochemical and Nd isotopic study of Neoproterozoic basaltic magmatism in Western Sichuan: petrogenesis and geodynamic implications[J]. *Earth Science Frontiers*, 9(4): 329~338(in Chinese with English abstract).
- Li X H, Li Z X, Zhou H W, *et al.* 2002. U-Pb zircon geochronology geochemistry and Nd isotopic study of Neoproterozoic bimodal volcanic rocks in the Kangdian Rift of South China: implications for the initial rifting of Rodinia[J]. *Precambrian Research*, 113: 135~155.
- Li Xianhua, Wang Xuance, Li Wuxian, *et al.* 2008. Petrogenesis and tectonic significance of Neoproterozoic basaltic rocks in South China: From orogenesis to intracontinental rifting[J]. *Geochimica*, 37(4): 382~398(in Chinese with English abstract).
- Li Zuo Chen, Pei Xianzhi, Li Ruibao, *et al.* 2013. Geochronological and geochemical study on Datan granite in Liujiaoping area, northwest Yangtze Block and its tectonic sitting[J]. *Geological Review*, 59(5): 869~884(in Chinese with English abstract).
- Li Z X, Li X H, Kinny P D, *et al.* 2003. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia[J]. *Precambrian Research*, 122: 85~109.
- Lin Guangchun. 2013. Petrogenesis and tectonic significance of the Neoproterozoic Danba metabasalt in western Yangtze block[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(4): 485~495(in Chinese with English abstract).
- Ling Wenli, Cheng Jianping, Wang Xinhua, *et al.* 2002b. Geochemical features of the Neoproterozoic igneous rocks from the Wudang region and their implications for the reconstruction of the Jinning tectonic evolution along the south Qinling orogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(1): 25~36(in Chinese with English abstract).
- Ling Wenli, Gao Shan, Cheng Jianping, *et al.* 2006. Neoproterozoic magmatic events within the Yangtze continental interior and along its northern margin and their tectonic implication: constraint from the ELA-ICYMS U-Pb geochronology of zircons from the Huangling and Harman complexes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 387~396(in Chinese with English abstract).
- Ling Wenli, Gao Shan, Ouyang Jianping, *et al.* 2002a. The age and tectonic setting of the Xixiang group: constraints of isotope geochronology and geochemistry[J]. *Science in China(Series D)*, 32(2): 101~112(in Chinese).
- Ling W L, Gao S, Zhang B R, *et al.* 2003. Neoproterozoic tectonic evolution of the northwestern Yangtze craton, South China: implications for amalgamation and break-up of the Rodinia Supercontinent [J]. *Precambrian Research*, 122(1): 111~140.
- Liu X M, Gao S, Diwu C R, *et al.* 2008. Precambrian crustal growth of Yangtze craton as revealed by detrital zircon studies[J]. *American Journal of Sciences*, 308(4): 421~468.
- Liu Y Q, Gao L Z, Liu X Y, *et al.* 2006. Zircon U-Pb dating for the earliest Neoproterozoic mafic magmatism in the southern margin of the North China Block[J]. *Chinese Science Bulletin*, 51(19): 2375~2382.
- Lu S N. 1998. A review of advance in the research on the Neoproterozoic Rodinia Supercontinent[J]. *Geological Review*, 44(5): 489~495(in Chinese with English abstract).
- Lu Songnian, Li Huaikun, Chen Zhihong, *et al.* 2003. Characteristics, sequence and ages of Neoproterozoic thermo-tectonic events between

- tarim and Yangzi blocks—a hypothesis of Yangzi-Tarim connection [J]. *Earth Science Frontiers*, 10(4): 321~326 (in Chinese with English abstract).
- Ma Runze, Xiao Yuanpu, Wei Xiangui, *et al.* 1997a. Research on the geochemical property and genesis of basic and ultrabasic rocks of Jinning period in the Micangshan area, Sichuan province [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 17(supplment): 34~47 (in Chinese).
- Ma Runze, Xiao Yuanpu, Wei Xiangui, *et al.* 1997b. The magmatic activity and tectonic evolution in the Miangshan area, Chian [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 17(supplment): 76~82 (in Chinese).
- Meschede M. 1986. A method of discriminating between different type of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram [J]. *China Geology*, 56: 207~218.
- Moore E W. 1991. Southwest U. S.-East Antarctic (Sweat) connection: A hypothesis [J]. *Geology*, 44: 815~832.
- Mullen E D. 1983. MnO/TiO₂/P₂O₅: A minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for Petrogenesis [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 62: 53~62.
- Pearce J A. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries [J]. *Orogenic Andesites & Related Rocks*, 528~548.
- Pearce J A. 1983. The role of sub-continental lithosphere in magma genesis at destructive plate margins [A]. Hawkesworth C J and Norry M J. *Continental Basalts and Mantle Xenoliths* [C]. Nantwich Shiva, 230~249.
- Pei Xianzhi, Ding Saping, Li Zuochen, *et al.* 2009. Zircon SHRMP U-Pb age of the neoproterozoic Jiaoziding granite in the Longmenshan orogenic belt and their tectonic significance [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 39(3): 425~433 (in Chinese with English abstract).
- Powell C M, Li Z X, Mc Elhinny M W, *et al.* 1993. Paleomagnetic constrains on timing of the Neoproterozoic break up of Rodinia and the Cambrian formation of Gondwana [J]. *Geology*, 23: 271~287.
- Qi L, Hu J and Cregoire D C. 2000. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Talanta*, 51 (3): 507~513.
- Salters V J M & Stracke A. 2004. Composition of the depleted mantle [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 5, Q05004, doi: 05010.01029/02003GC000597.
- Saunders A D, Storey M, Kent R W, *et al.* 1992. Consequences of plume-lithosphere interactions [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 65(1): 41~60.
- Shaw D M. 1970. Trace element fractionation during anatexis [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 34: 237~243.
- Shen Weizhou, Gao Jianfeng, Xu Shijin, *et al.* 2002. Geochemical characteristics and genesis of the qiaotou Basic complex, Luding County, Western Yangtze Block [J]. *Geological Journal of China Universities*, 8(4): 380~389 (in Chinese with English abstract).
- Sun Dong. 2011. The structural character and Meso-Cenozoic of Micang Mountain structural Zone, Northern Sichuan Basin, China [D]. Chengdu: Doctor of Science, Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of ocean basins: Implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D and Norry M J. *Magmatism of the Ocean Basins* [C]. *Geological Society of London, Special Publication*, 42: 325~345.
- Tian Yuntao, Zhu Chuanqing, Xu Ming, *et al.* 2010. Exhumation history of the Micangshan-Hannan Dome since Cretaceous and its tectonic significance: evidences from Apatite Fission Track analysis [J]. *Chinese Journal Geophysics*, 53(4): 920~930 (in Chinese with English abstract).
- Wang Mengxi, Wang Yan and Zhao Jun. 2012. Zircon U/Pb dating and Hf-O isotopes of the Zhouan ultramafic intrusion in the northern margin of the Yangtze Block: Constraints on the nature of mantle source and timing of the supercontinent Rodinia breakup [J]. *Chinese Sci. Bull.*, 57(34): 2383~2394 (in Chinese).
- Wang Tao, Wang Zongqi, Yan Quanren, *et al.* 2011. The formation age and geochemical characteristics of the metavolcanic rock blocks of the Baishuijiang Group in South Qinling [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(3): 645~656 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zongqi, Yan Quanren, Yan Zhen, *et al.* 2009. New division of the main tectonic units of the Qinling orogenic belt, central China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(11): 1527~1546 (in Chinese with English abstract).
- Wood D A. 1979. A variably veined suboceanic upper mantle-genetic significance for mid-ocean ridge basalts from geochemical evidence [J]. *Geology*, 7: 499~503.
- Workman R K & Hart S. R. 2005. Major and trace element composition of the depleted MORB mantle (DMM) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 231: 53~72.
- Wu Y B, Zheng Y F and Zhou J B. 2004. Neoproterozoic granitoid in northwest Sulu and its bearing on the North China-South China Blocks boundary in East China [J]. *Geophysical Research Letters*, 31: L07616, doi: . 1029/2004GL019785.

- Xia Linqi, Xia Zuchun, Ma Zhongping, *et al.* 2009. Petrogenesis of volcanic rocks from Xixiang Group in middle part of South Qinling Mountains[J]. *Northwestern Geology*, 42(2): 1~37(in Chinese with English abstract).
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, *et al.* 2007. The discrimination between continental basalt and island arc basalt based on geochemical method[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(1): 77~89(in Chinese with English abstract).
- Xiao Ancheng, Wei Guoqi, Shen Zhongyan, *et al.* 2011. Basin-mountain system and tectonic coupling between Yangtze block and South Qinling orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(3): 601~611(in Chinese with English abstract).
- Xu Xueyi, Li Ting, Chen Junlu, *et al.* 2011. Zircon U-Pb age and petrogenesis of intrusions from Mengzi area in the northern margin of Yangtze plate[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(3): 699~720(in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Liu Fulai, Qi Xuexiang, *et al.* 2006. Record for Rodinia supercontinent breakup event in the south Sulu ultra-high pressure metamorphic terrane[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(7): 1745~1760(in Chinese with English abstract).
- Yan Quanren, Hanson A D, Wang Zongqi, *et al.* 2004. Geochemistry and tectonic setting of the Bikou volcanic terrane on the northern margin of the Yangtze plate[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 23(1): 1~11(in Chinese with English abstract).
- Zhang Guishan, Wen Hanjie, Li Shilei, *et al.* 2009. Geochemical characteristics of bojiite in northern Fujian Province and their geodynamic significance[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 29(2): 244~252(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yukun. 2014. The Northern Margin of the Yangtze Dahan Mountain Gabbro in Petrology, Geochemistry and Geochronology[D]. Xi'an: Northwestern University(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z C, Mahoney J J, Mao J W, *et al.* 2006. Geochemistry of picritic and associated basalt flows of the western Emeishan flood basalt province, China[J]. *Journal of Petrology*, 47(10): 1997~2019.
- Zhang Zhaochong, Mahoney J J, Wang Fusheng, *et al.* 2006. Geochemistry of picritic and basalt flows of the western Emeishan flood basalt province, China: evidence for a plume-head origin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1538~1552(in Chinese with English abstract).
- Zhao J H and Zhou M F. 2007. Neoproterozoic adakitic plutons and arc magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China[J]. *Journal of Geology*, 115: 675~689.
- Zhao J H and Zhou M F. 2009a. Secular evolution of the Neoproterozoic lithospheric mantle underneath the northern margin of the Yangtze Block, South China[J]. *Lithos*, 107: 152~168.
- Zhao J H and Zhou M F. 2009b. Melting of newly formed mafic crust for the formation of Neoproterozoic I-type granite in the Hannan region, South China[J]. *Journal of Geology*, 117: 54~70.
- Zhao Zheng, Chen Yuchuan, Chen Zhenghui, *et al.* 2012. SHRIMP U-Pb dating of the Gaoshanjiao granodiorite in the Yinkeng ore-field of the South Jiangxi region and its relations to mineralization[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 31(3): 536~542(in Chinese with English abstract).
- Zheng Yongfei. 2003. Neoproterozoic magmatic activities and global change[J]. *Chinese Science Bulletin*, 48(6): 1705~1720(in Chinese).
- Zheng Y F, Zhang S B, Zhao Z F, *et al.* 2006. Zircon U-Pb age, Hf and O isotope constraints on protolith origin of ultrahigh-pressure eclogite and gneiss in the Dabie orogen[J]. *Chemical Geology*, 231: 135~158.
- Zheng Y F, Zhang S B, Zhao Z F, *et al.* 2007. Contrasting zircon Hf and O isotopes in the two episodes of Neoproterozoic granitoids in South China: Implications for growth and reworking of continental crust[J]. *Lithos*, 96: 127~150.
- Zhou M F, Kennedy A K, Sun M, *et al.* 2002a. Neo-proterozoic arc-related mafic intrusions in the northern margin of South China: Implications for accretion of Rodinia[J]. *Geology*, 110: 611~618.
- Zhou M F, Yan D P, Kennedy A K, *et al.* 2002b. SHRIMP zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc-related magmatism along the western margin of the Yangtze block, South China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 196: 51~67.
- Zhuo Jiewen, Wang Xinsheng, Wang Jian, *et al.* 2015. Zircon Shrimp U-Pb age of sedimentary tuff at the bottom of neoproterozoic Kaijianqiao formation in Western Sichuan and its geological implication[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 35(1): 91~99(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈岳龙, 唐金荣, 刘飞, 等. 2006. 松潘-甘孜碎屑沉积岩的地球化学与Sm-Nd同位素地球化学[J]. *中国地质*, 33(1): 109~118.
- 何大伦, 刘登忠, 邓明森, 等. 1995. 四川米仓山地区扬子地台结晶基底的时代归属[J]. *四川地质学报*, 15(3): 176~183.
- 赖绍聪, 李三忠, 张国伟. 2003. 陕西西乡群火山沉积岩系形成构造环境: 火山岩地球化学约束[J]. *岩石学报*, 19(1): 141~152.
- 李婷. 2010. 扬子陆块北缘碑坝-西乡地区新元古代构造-岩浆作

- 用研究[D]. 西安:长安大学硕士学位论文.
- 李曙光. 1993. 蛇绿岩生成构造环境的 Ba-Th-Nb-La 判别图[J]. 岩石学报, 9(2): 146~157.
- 李献华, 李武显, 何 斌. 2012. 华南陆块的形成与 Rodinia 超大陆聚合-裂解-观察、解释与检验[J]. 矿物岩石地球化学通报, 31(6): 543~559.
- 李献华, 李正祥, 周汉文, 等. 2002. 川西新元古代玄武质岩浆岩的锆石 U-Pb 年代学、元素和 Nd 同位素研究: 岩石成因与地球动力学意义[J]. 地学前缘, 9(4): 329~338.
- 李献华, 王选策, 李武显, 等. 2008. 华南新元古代玄武质岩石成因与构造意义: 从造山运动到陆内裂谷[J]. 地球化学, 37(4): 382~398.
- 李佐臣, 裴先治, 李瑞保, 等. 2013. 扬子板块西北缘刘家坪地区大滩花岗岩体年代学、地球化学及其构造环境[J]. 地质论评, 59(5): 869~884.
- 林广春. 2013. 川西丹巴地区新元古代变质玄武岩成因及构造意义[J]. 岩石矿物学杂志, 32(4): 485~495.
- 凌文黎, 程建萍, 王歆华, 等. 2002b. 武当地区新元古代岩浆岩地球化学特征及其对南秦岭晋宁期区域构造性质的指示[J]. 岩石学报, 18(1): 25~36.
- 凌文黎, 高山, 程建萍, 等. 2006. 扬子陆核与陆缘新元古代岩浆事件对比及其构造意义: 来自黄陵和汉南杂岩 LA-ICP-MS 石 U-Pb 同位素年代学的约束[J]. 岩石学报, 22(2): 387~396.
- 凌文黎, 高山, 欧阳建平, 等. 2002a. 西乡群的时代与构造背景: 同位素年代学及地球化学制约[J]. 中国科学(D 辑): 地球科学, 32(2): 101~112.
- 陆松年. 1998. 新元古时期 Rodinia 超大陆研究进展述评[J]. 地质论评, 44(5): 489~495.
- 陆松年, 李怀坤, 陈志宏. 2003. 塔里木与扬子新元古代热-构造事件特征、序列和时代: 扬子与塔里木连接(YZ-TAR)假设[J]. 地学前缘, 10(4): 321~326.
- 马润则, 肖渊甫, 魏显贵, 等. 1997a. 四川米仓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): 34~47.
- 马润则, 肖渊甫, 魏显贵, 等. 1997b. 米仓山地区岩浆活动与构造演化. 矿物岩石, 17(增刊): 76~82.
- 裴先治, 丁仁平, 李佐臣, 等. 2009. 龙门山造山带轿子顶新元古代花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 西北大学学报(自然科学版), 39(3): 425~433.
- 沈渭洲, 高剑峰, 徐士进, 等. 2002. 扬子板块西缘泸定桥头基性杂岩体的地球化学特征和成因[J]. 高校地质学报, 8(4): 380~389.
- 孙 东. 2011. 米仓山构造带构造特征及中-新生代构造演化[D]. 成都: 成都理工大学理学博士学位论文.
- 田云涛, 朱传庆, 徐 明, 等. 2010. 白垩纪以来米仓山-汉南穹窿剥蚀过程及其构造意义: 磷灰石裂变径迹的证据[J]. 地球物理学报, 53(4): 920~930.
- 王 涛, 王宗起, 闫全人, 等. 2011. 南秦岭白水江群变基性火山岩块体的形成时代及其地球化学特征[J]. 岩石学报, 27(3): 645~656.
- 王梦玺, 王 焰, 赵 军. 2012. 扬子板块北缘周庵超镁铁质岩体锆石 U-Pb 年龄和 Hf-O 同位素特征: 对源区性质和 Rodinia 超大陆裂解时限的约束[J]. 科学通报, 57(34): 2383~2394.
- 王宗起, 闫全人, 闫 臻, 等. 2009. 秦岭造山带主要大地构造单元的新划分[J]. 地质学报, 83(11): 1527~1546.
- 夏林圻, 夏祖春, 马中平, 等. 2009. 南秦岭中段西乡群火山岩岩石成因[J]. 西北地质, 42(2): 1~37.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 2007. 利用地球化学方法判别大陆玄武岩和岛弧玄武岩[J]. 岩石矿物学杂志, 26(1): 77~89.
- 肖安成, 魏国齐, 沈中延, 等. 2011. 扬子板块与南秦岭造山带的盆山系统与构造耦合[J]. 岩石学报, 27(3): 601~611.
- 徐学义, 李 婷, 陈隽璐, 等. 2011. 扬子台台北缘缘子地区侵入岩年代格架和岩石成因研究[J]. 岩石学报, 27(3): 699~720.
- 许志琴, 刘福来, 戚学祥, 等. 2006. 南苏鲁超高压变质地体中罗迪尼亚超大陆裂解事件的记录[J]. 岩石学报, 22(7): 1745~1760.
- 闫全人, Hanson A D, 王宗起, 等. 2004. 扬子板块北缘碧口群火山岩的地球化学特征及其构造环境[J]. 岩石矿物学杂志, 23(1): 1~11.
- 张贵山, 温汉捷, 李石磊, 等. 2009. 闽北角闪辉长岩的地球化学特征及其地球动力学意义[J]. 矿物学报, 29(2): 244~252.
- 张宇昆. 2014. 扬子北缘大汉山辉长岩体岩石学、地球化学及锆石年代学研究[D]. 西安: 西北大学硕士学位论文.
- 张招崇, Mahoney J J, 王福生, 等. 2006. 峨眉山大火成岩省西部苦橄岩及其共生玄武岩的地球化学: 地幔柱头部熔融的证据[J]. 岩石学报, 22(6): 1538~1552.
- 赵 正, 陈毓川, 陈郑辉, 等. 2012. 赣南银坑矿田高山角闪岩 SHRIMP U-Pb 定年及其与成矿的关系[J]. 岩矿测试, 31(3): 536~542.
- 郑永飞. 2003. 新元古代岩浆活动与全球变化[J]. 科学通报, 48(6): 1705~1720.
- 卓皆文, 江新胜, 王 剑, 等. 2015. 川西新元古界开建桥组底部凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 矿物岩石, 35(1): 91~99.