

# 河南南阳独山角闪辉长岩地球化学特征 及对独山玉成因的制约

罗勇<sup>1</sup>, 李丹<sup>1</sup>, 姜玉航<sup>2,3</sup>, 李宁波<sup>2,3</sup>,  
严爽<sup>2,3</sup>, 单强<sup>2\*</sup>

(1. 南阳师范学院 南阳市独山玉研究重点实验室, 河南 南阳 473061; 2. 中国科学院 广州地球化学研究所, 广东 广州 510640;  
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 独山岩体位于河南省南阳市北郊, 出露岩石主要以角闪辉长岩为主, 中国四大名玉之一的“独山玉”呈透镜体或脉体产于岩体中, 并明显受构造裂隙的控制。本文对独山角闪辉长岩进行了系统的岩相学、主元素、微量元素研究。独山角闪辉长岩为亚碱性岩石, 低 SiO<sub>2</sub>、高 Mg<sup>#</sup>、贫碱; 明显富集大离子亲石元素 K、Rb、Sr、Pb, 亏损高场强元素 Th、Nb、Ta、Zr、Hf, 反映源区物质可能受到了流体交代作用。独山角闪辉长岩可能形成于板块汇聚边缘, 源区可能为受俯冲流体交代的富集石榴石-尖晶石橄榄岩地幔源区, 是其经历 1%~3% 部分熔融的产物。独山玉可能是富水的独山角闪辉长岩在区域动力变质作用下的产物, 在动力变质过程中形成了由重结晶的亚颗粒斜长石和石英及晶形完好的黝帘石组成的透镜体和脉体的独山玉。

**关键词:** 角闪辉长岩; 主元素; 微量元素; 独山玉

中图分类号: P595; P59 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2015)04-0402-11

## Geochemistry of evjite in Dushan (Nanyang, Henan Province): Implication for genesis of Dushan Yu

LUO Yong<sup>1</sup>, LI Dan<sup>1</sup>, JIANG Yu-hang<sup>2,3</sup>, LI Ning-bo<sup>2,3</sup>, YAN Shuang<sup>2,3</sup> and SHAN Qiang<sup>2\*</sup>

1. Nanyang City Key Laboratory of Dushan Jade, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China;  
2. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;  
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Dushan massif, located in the northern suburb of Nanyang City, Henan Province, consists mainly of evjite. As one of the four most famous youstones in China, “Dushan Yu” occurs in form of lenses or veins in the massif, which is apparently under the control of tectonic fractures in the region. This paper report results of petrologic, bulk-rock geochemical data for the Dushan evjite. Dushan evjite, mainly sub-alkaline basalts, is characterized by low SiO<sub>2</sub>, high Mg<sup>#</sup>, and poor alkaline, but is significantly enriched in large ion lithophile elements (LILEs) like K, Rb, Sr, Pb, depleted in high field strength elements (HFSEs) such as Th, Nb, Ta, Zr, Hf. These results reflect that the source substance may have been formed from fluid metasomatism. Dushan evjite may be formed at the edge of plate convergence, originated from a garnet-spinel-rich peridotite mantle source undergoing metasomatism of subducting fluid and 1%~3% partial melting. Dushan Yu may be resulted from regional dynamic metamorphism of water-rich evjite, as it occur in forms of lenses and veins, and consists of recrystallized sub-particles plagioclase and quartz and well crystallized zoisite in the process of dynamic metamorphism.

**Key words:** evjite; major elements; trace elements; Dushan Yu

收稿日期(Received): 2015-03-27; 改回日期(Revised): 2015-05-04; 接受日期(Accepted): 2015-05-14

基金项目: 国家自然科学基金(41402068, 41301443); 河南省高等学校重点科研项目(15A170004); 南阳师范学院高层次人才科研启动项目(ZX201300970337); 南阳师范学院教学研究项目(2014-14)

作者简介: 罗勇(1983-), 男, 讲师, 主要从事岩石地球化学研究。E-mail: yongluo\_geo@163.com

\* 通讯作者(Corresponding author): SHAN Qiang, E-mail: qshan@gig.ac.cn, Tel: +86-20-85290243

## 0 引言

独山玉因产于河南省南阳市北郊的“独山”而得名,具有“色俏质润”的特点,是与和田玉、岫岩玉、绿松石齐名的“中国四大名玉”之一,其开发利用历史可以追溯到7000年前的新石器时代<sup>[1]</sup>。独山玉是迄今为止世界上发现的唯一达到玉石工艺要求的斜长石质玉种。

李学清<sup>[2]</sup>首次对独山玉进行了较系统的岩相学研究,认为独山玉为角闪岩,为两个期次岩浆所结成:“第一时期之岩浆,所结成之矿物,为辉石与长石两种。第二时期之岩浆,侵入于上之两种矿物内,以成脉形,或其他之充填物,所结成之矿物,为石英与长石等,化学性质较第一时期之岩浆为酸性”。李劲松等<sup>[3]</sup>通过独山玉的硅酸盐分析和矿床地质研究,认为独山岩体的形成过程可以分为辉长岩期、辉石岩期、橄榄岩期和煌斑岩期,优质玉石可能是多期热液作用的结果,热液来源可能是辉石岩、煌斑岩、花岗岩等岩浆热液。张建洪等<sup>[4]</sup>认为独山玉化学成分以高钙、高铝和贫硅为特征,主要组成矿物为钙长石、黝帘石和铬云母等,主要为岩浆热液交代基性和超基性原岩所形成,其成玉温度低于200~300℃。邓燕华等<sup>[5]</sup>认为独山岩体可以分为成岩和成玉两期,其中成岩期又可细分为辉石岩和斜长岩两个亚期,并认为独山玉是斜长岩期后热液在350~430℃低压下充填交代辉石-辉长岩和斜长岩裂隙而成,它是一个高-中温热液矿床。廖宗廷等<sup>[6]</sup>认为独山玉的形成与基性-超基性后期经历变质改造有关。肖启云等<sup>[7]</sup>也认为独山玉是辉长岩受后期地质作用改造的产物,并将独山玉的形成过程划分为斜长石质玉、透水白玉和黝帘石质玉三个成矿阶段。

上述研究显示,目前人们对独山玉的研究以矿物组成和成矿阶段划分为主,对玉石矿的成因类型还存在着热液和变质改造之争,对其形成的特殊地质地球化学背景缺乏系统认识。本文对独山玉的赋矿围岩-独山角闪辉长岩进行系统的岩石学和地球化学特征研究,旨在揭示独山玉的形成机制和其独特的地质地球化学背景。

## 1 地质背景及岩相学特征

独山距河南省南阳市东北约10 km,行政区划上属卧龙区七里园乡,它为伏牛山脉之东延低山,

是南阳盆地九座孤山之一。在大地构造上,独山位于秦岭造山带东段北支,南阳-襄樊盆地北缘,方城-南阳隐伏断裂西侧。区内构造以断裂为主,褶皱次之。最主要的大断裂有朱阳关-夏馆断裂,它主体呈北西-南东方向展布,是长期活动、多期叠加的大型剪切带,可能是二郎坪构造地体与秦岭构造地体的分界<sup>[8]</sup>。区域性的朱阳关-夏馆断裂带控制了包括独山岩体在内的基性-超基性岩体的分布。

独山岩体呈椭圆状出露于地表,南北长约2.6 km,东西宽0.6~1.2 km,总面积约2 km<sup>2</sup>。已出露的岩石主要为角闪辉长岩,局部有辉石岩、煌斑岩出露。由于受构造应力的改造,在岩体边部出现了少量的糜棱岩(图1)。

独山岩体周围出露的地层主要有古元古界秦岭群、中元古界宽坪群、下古生界二郎坪群及中生界和新生界的地层。

区域岩浆活动强烈,中元古代以强烈的火山活动为主,形成的细碧-石英角斑岩系分布于宽坪群地层中,局部可见呈小岩株产出石英闪长岩和闪长岩;古生代则以侵入活动为主,分别形成了橄榄岩、角闪辉长岩、闪长岩、石英闪长岩、闪长花岗岩和黑云母花岗岩等岩浆岩,显示出(超)基性-中酸性-酸性序列的岩浆演化特征,其中早期侵入的角闪辉长岩在蚀变作用下形成次闪石化辉长岩和变辉长岩,主要分布在南阳的独山,为独山玉的主要成矿母岩;中生代也以侵入活动为主,形成了斑状花岗岩、花岗岩和花岗闪长岩等中酸性岩浆岩<sup>[10]</sup>。

角闪辉长岩呈黑灰色,具有典型的块状构造。显微岩相学研究显示,独山角闪辉长岩具典型的斑状结构,斑晶为角闪石、辉石和斜长石,基质则主要由辉石和斜长石组成。在斑晶中角闪石含量相对较高,以短柱状及六边形产出,形态较规则,多为褐色,具多色性,干涉色普遍较低。辉石斑晶自形程度较角闪石低,无色,突起较高,常蚀变成纤角闪石和黑云母,但仍保留了辉石的假像。斜长石斑晶呈板条状产出,半自形至他形,具聚片双晶或卡钠复合双晶。角闪辉长岩后期蚀变以纤闪石化、钠黝帘石化、透闪石化、绿泥石化、绿帘石化为主。

角闪辉长岩经历了较强动力变质改造作用,具有典型的条带状构造和眼球构造,而辉石表现出明显的破碎,斜长石出现了变形双晶等的动力变质结构和构造。特别需要指出的是,在角闪辉长岩动力变质过程中岩石发生了重结晶,形成了由亚颗粒斜长石、石英和晶形完好的黝帘石组成的独山玉细脉(图2)。

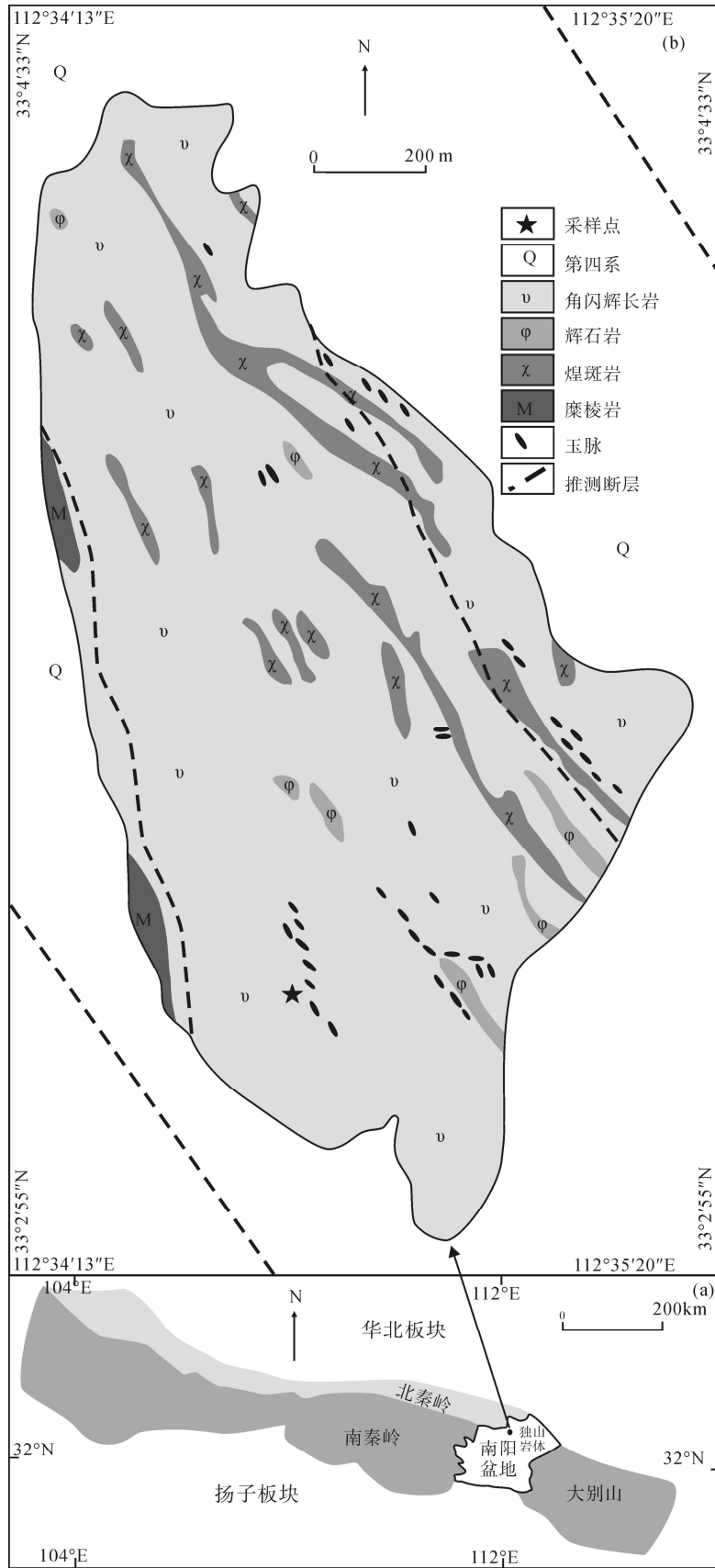


图 1 独山岩体大地构造位置图(a, 据文献[9]修改)和地质简图(b, 据文献[5]修改)

Fig.1 Tectonic setting map (a, modified from Reference [9]) and geological sketch map (b, modified from Reference [5]) of Dushan massif

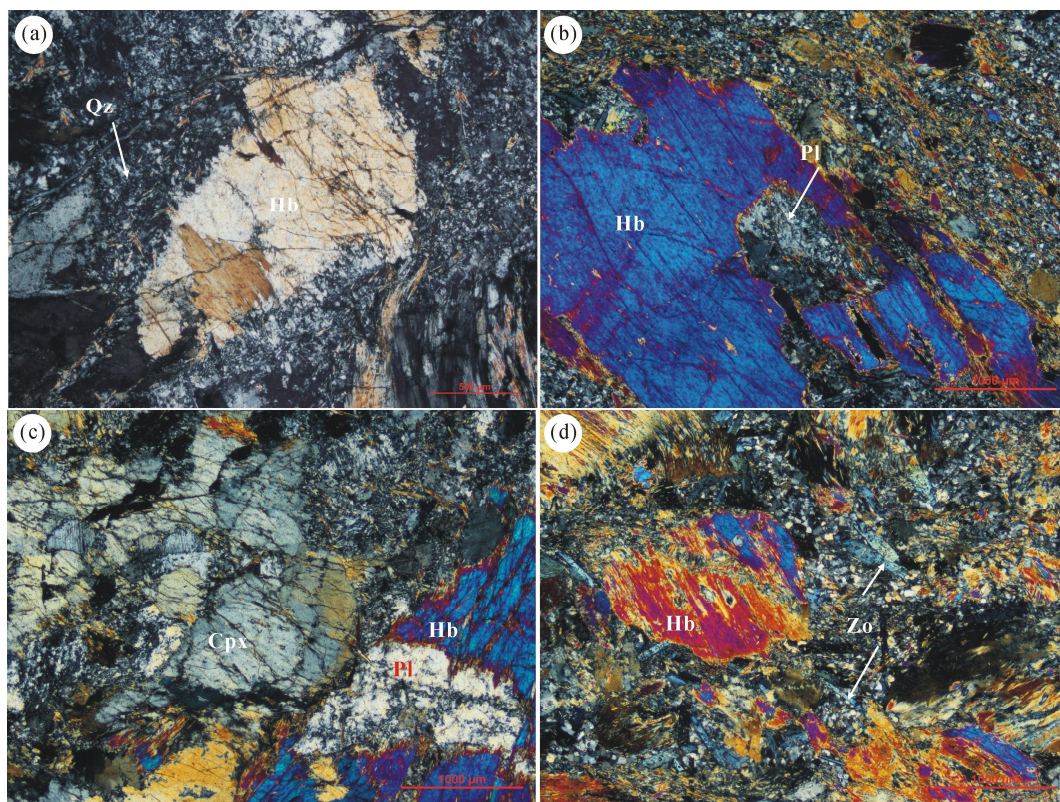


图 2 独山角闪辉长岩显微照片

Fig.2 Photomicrographs of evjite in Dushan

Cpx-单斜辉石; Hb-角闪石; Pl-斜长石; Zo-黝帘石。

Cpx - clinopyroxene; Hb - hornblende; Pl - plagioclase; Zo - zoisite.

## 2 角闪辉长岩的地球化学特征

独山角闪辉长岩的主元素和微量元素分析均在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成。样品处理时尽量选取新鲜的样品, 去除风化面, 手工破碎至 1~5 mm, 然后依次用 5%硝酸和 5%盐酸溶液在超声波清洗仪中清洗, 以去除杏仁体及碳酸盐化的影响, 在烘箱中 100 °C 烘干后, 粉碎过 200 目筛用于分析。岩石样品的主元素分析用 Rigaku 100e 型 X 射线荧光光谱仪(XRF)分析, 分析精度优于 1%~5%, 具体的流程见文献[11]; 微量元素分析则采用 Perkin-Elmer Sciex Elan 6000 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)完成, 称取约 40 mg 样品粉末于 bomb 中, 加入 HNO<sub>3</sub> 和 HF 溶样。内部标准溶液采用元素 Rh 来监控计数信号漂移。分析精度为 2%~5%, 具体的流程见文献[12-13]。

### 2.1 主元素地球化学特征

在分析前, 对拟分析的样品进行了详细的显微

岩相学研究, 确保样品新鲜且具有代表性。分析显示, 所研究的样品烧失量介于 0.67%~2.32%之间(表 1), 均小于 3%, 表明样品基本未受到后期蚀变的影响, 能反映其原始地球化学特征。主元素分析结果显示, 独山角闪辉长岩的 SiO<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MnO、MgO、CaO、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O 和 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量分别为 44.33%~47.63%、0.07%~0.27%、13.99%~26.11%、2.39%~7.95%、0.03%~0.12%、5.36%~14.04%、13.13%~16.95%、0.92%~1.35%、0.05%~0.73% 和 0.007%~0.016%(表 1)。角闪辉长岩的 MgO 含量变化范围为 5.36%~14.04%, 镁指数介于 75.84~86.49, 高于原生岩浆的范围(Mg<sup>#</sup> = 60~75)<sup>[14]</sup>, 由于钛铁氧化物结晶分离可能使其具有较高的镁指数, 而大部分样品具有较高的 MgO 含量则说明, 虽然有橄榄石的结晶分离, 但其程度较低。因此岩石还是接近原始岩浆成分, 只是 Fe 和 Ti 有所降低, MgO 含量的变化可能与不同样品中橄榄石结晶分离程度不同有关。

独山角闪辉长岩明显贫 Si、Ti、P 和碱而富 AL 和 Mg。在 TAS 岩石分类图中, 样品的投影点大都落在辉长岩区附近(图 3a); 在 K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> 图(图 3b)中,

表 1 独山角闪辉长岩的主元素(%)和微量元素( $\mu\text{g/g}$ )含量  
Table 1 Major (%) and trace ( $\mu\text{g/g}$ ) elements compositions of evjite in Dushan

样品号	DY1	DY2	DY3	DY4	DY5
SiO <sub>2</sub>	47.26	47.63	45.69	45.61	44.33
TiO <sub>2</sub>	0.27	0.15	0.08	0.07	0.19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.91	13.99	19.10	26.11	19.84
TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.95	5.93	4.97	2.39	4.52
MnO	0.12	0.10	0.07	0.03	0.06
MgO	10.71	14.04	11.34	5.36	12.42
CaO	14.23	15.10	14.90	16.95	13.13
Na <sub>2</sub> O	1.14	0.92	1.24	1.08	1.35
K <sub>2</sub> O	0.10	0.09	0.08	0.05	0.73
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
LOI	1.16	1.64	1.39	0.67	2.32
Total	98.87	99.60	98.87	98.33	98.90
Mg <sup>#</sup>	75.84	84.66	84.17	83.94	86.49
Sc	34.9	38.0	17.5	13.0	39.3
V	135	117	59.0	48.4	128
Cr	293	1147	359	298	416
Co	45.4	41.7	36.0	15.5	39.1
Ni	157	224	194	85.4	217
Cu	3.49	88.9	1.60	20.3	1.34
Zn	32.1	23.8	12.6	7.85	24.4
Ga	11.6	8.40	10.1	13.2	9.10
Ge	1.22	1.21	1.07	0.76	0.81
Rb	0.80	4.1	1.5	0.5	48.9
Sr	196.	100	184	312	189
Y	7.22	4.88	2.42	2.12	5.08
Zr	7.84	3.03	1.54	2.01	3.31
Nb	0.67	0.26	0.31	0.26	0.21
Cs	0.07	0.13	0.10	0.06	4.21
Ba	23.3	9.02	15.2	25.6	104
La	0.97	0.31	0.30	0.33	0.33
Ce	2.57	0.88	0.73	0.83	1.03
Pr	0.39	0.17	0.12	0.13	0.21
Nd	2.10	0.93	0.67	0.67	1.23
Sm	0.75	0.42	0.26	0.23	0.51
Eu	0.41	0.23	0.20	0.22	0.19
Gd	1.18	0.75	0.38	0.35	0.88
Tb	0.21	0.13	0.07	0.06	0.14
Dy	1.41	0.94	0.46	0.40	1.00
Ho	0.32	0.22	0.10	0.09	0.23
Er	0.87	0.58	0.27	0.26	0.63
Tm	0.12	0.08	0.04	0.03	0.08
Yb	0.77	0.48	0.26	0.21	0.53
Lu	0.11	0.07	0.03	0.03	0.08
Hf	0.28	0.13	0.06	0.07	0.13
Ta	0.05	0.02	0.03	0.02	0.02
Pb	3.20	0.52	0.52	1.68	0.88
Th	0.07	0.02	0.01	0.03	0.03
U	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01

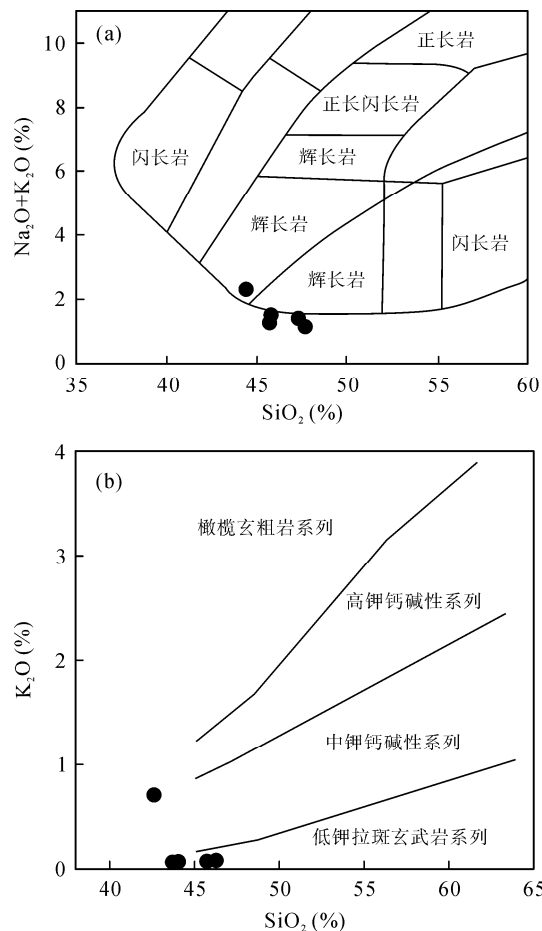


图 3 独山角闪辉长岩的 TAS 图(a, 据文献[14])和 K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> 图(b, 据文献[15])

Fig.3 Total alkalis vs. silica (TAS) diagram (a, after Reference [14]) and K<sub>2</sub>O vs. SiO<sub>2</sub> diagram (b, after Reference[15]) of evjite in Dushan

独山角闪辉长岩大都落在低钾区, 属低钾钙碱性岩石, 其中 1 个样品落在中钾区, 其烧失量较高为 2.32%, 可能受到轻微的后蚀变影响。

## 2.2 微量元素地球化学特征

独山角闪辉长岩的过渡族元素含量相对较高, 其 Cr、Co 和 Ni 的含量分别为 293~1147  $\mu\text{g/g}$ 、15.5~45.4  $\mu\text{g/g}$  和 85.4~224  $\mu\text{g/g}$ , 这也暗示岩石未发生明显的分离结晶作用, 其微量元素地球化学特征能基本反映原始岩浆的性质。

原始地幔标准化的微量元素蛛网图显示, 独山角闪辉长岩微量元素分布曲线呈略微右倾的趋势(图 4a), 大离子亲石元素 K、Rb、Sr、Pb 明显富集, 高场强元素 Th、Nb、Ta、Zr、Hf 明显亏损, 显示出聚合板块边缘岩浆岩的特征<sup>[17-19]</sup>。此外, 独山角闪辉长岩的 Nb/U 比值介于 21.8~38.9, 暗示岩浆源区可能受到地壳混染作用<sup>[20]</sup>。

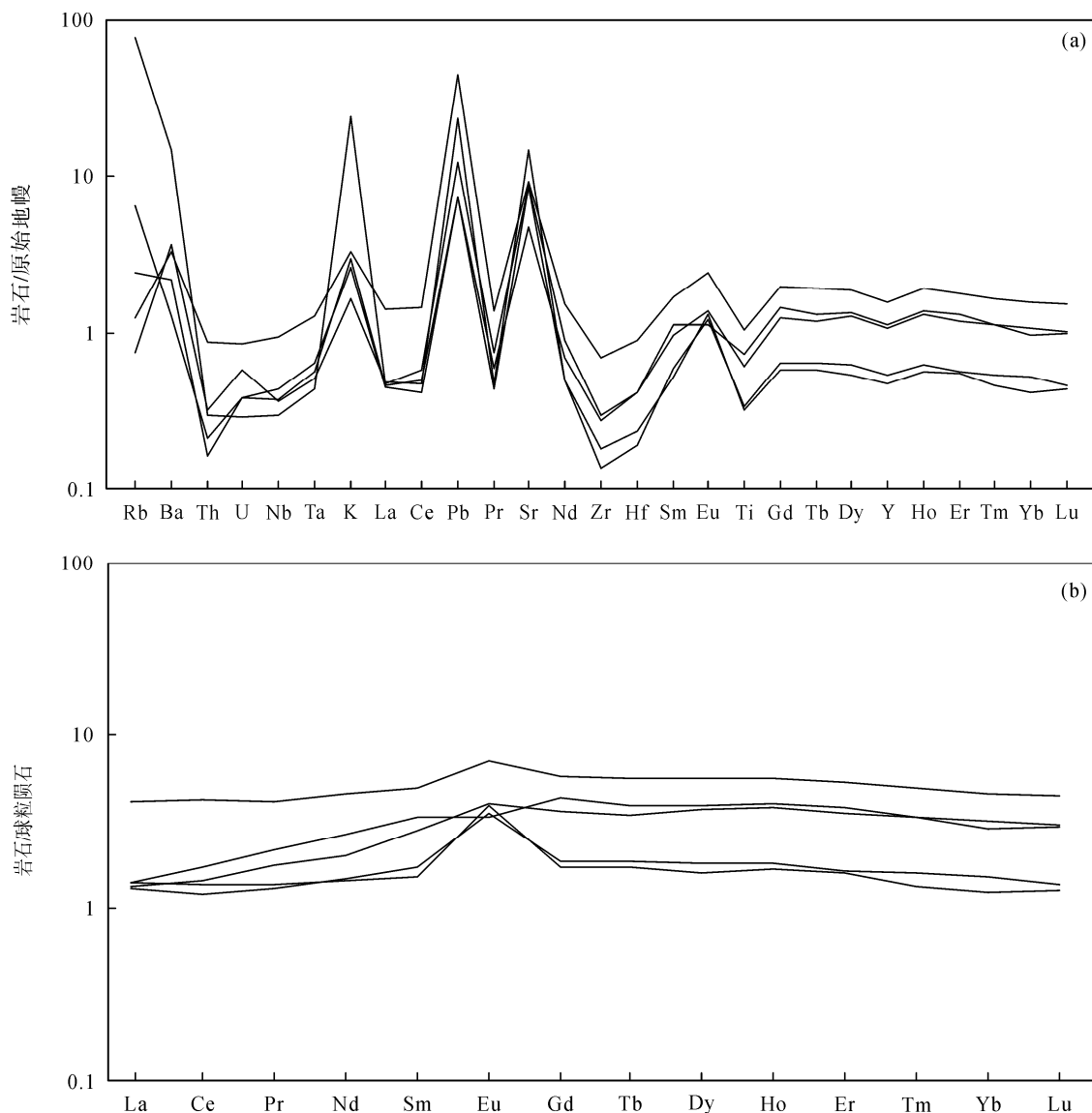


图4 独山角闪辉长岩微量元素蛛网图(a)和稀土元素分布模式(b) (球粒陨石和原始地幔数据值据文献[16])  
Fig.4 Primitive mantle-normalized trace element spider diagram (a) and chondrite-normalized REE distribution patterns diagram (b) for evjite in Dushan (Chondrite and primitive mantle values after Reference [16]) of evjite in Dushan

独山角闪辉长岩的稀土元素总量介于 3.85~12.2  $\mu\text{g/g}$  之间, 平均值为 6.63  $\mu\text{g/g}$ , 远低于 N-MORB 的 39.11  $\mu\text{g/g}$ <sup>[16]</sup>。球粒陨石标准化的独山角闪辉长岩稀土元素分布曲线相对平坦(图 4b), 轻重稀土元素分馏不明显( $\sum\text{LREE}/\sum\text{HREE} = 0.92\sim 1.69$ ,  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 0.44\sim 1.16$ ), 大多数样品显示出明显的 Eu 正异常( $\delta\text{Eu} = 0.87\sim 2.42$ ), 可能受斜长石结晶分异作用的影响。

### 3 讨论

#### 3.1 蚀变、混染和结晶分异作用对岩石的影响

显微岩相学研究显示, 独山角闪辉长岩经历了

较强的动力变质改造作用, 具有典型的条带状构造和眼球构造, 辉石表现出明显的破碎, 而斜长石则出现了变形双晶等动力变质结构和构造。这种动力变质改造是一个等化学过程, 岩石物质组成没有发生明显的变化。显微岩相学研究还显示, 独山角闪辉长岩在后期改造过程中形成了一些纤闪石、钠黝帘石、透闪石、绿泥石和绿帘石等含水矿物。主元素分析显示, 所研究的样品具有相对较低的烧失量(0.67%~2.32%), 考虑到岩石含有一定量的角闪石斑晶, 可以推测研究样品受后期热液的蚀变改造应不强烈。

岩相学研究显示, 独山角闪辉长岩的蚀变矿物

主要为纤角闪石和黑云母, 暗示独山角闪辉长岩在侵位后可能发生过热液蚀变或低级变质作用。一般主元素 Al、Ti、Fe、P 和 HFSE、REE(Ce、Eu 除外)、过渡族元素对流体活动反应不灵敏, 但 Na、K、Ca 和大离子亲石元素(LILE)在后期热液蚀变和绿片岩相至角闪岩相的变质作用过程中会发生变化<sup>[21-25]</sup>。Altherr *et al.*<sup>[17]</sup>研究发现, 热液蚀变作用会导致岩石的  $K_2O/Na_2O$  比值发生明显变化, 同时也会导致大离子亲石元素退耦, 其中 Rb 相对 Ba 的明显亏损与钾在热液蚀变过程的流失密切相关。独山角闪辉长岩的  $K_2O$  和  $Na_2O$  含量相对较低而稳定, 且随着  $K_2O$  含量的增加 Rb 和 Ba 的含量也相应增加(图 5), 并没有发生明显的退耦, 这暗示热液蚀变过程对岩石的影响相对较弱。

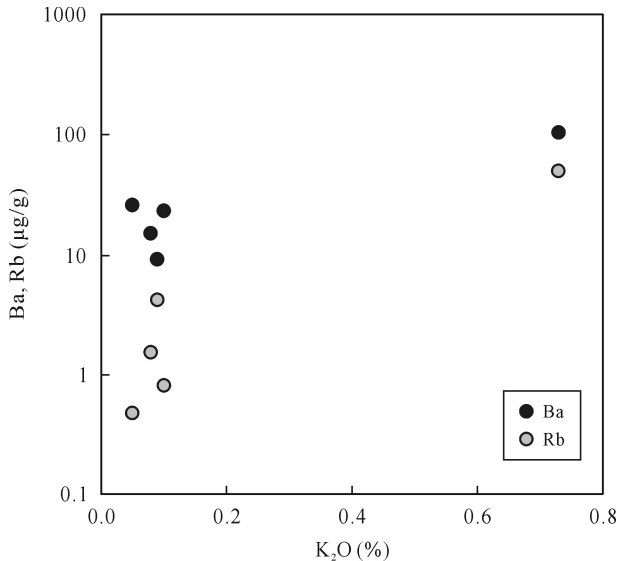


图 5 独山角闪辉长岩的 Ba 和 Rb- $K_2O$  图

Fig.5 Ba and Rb vs.  $K_2O$  diagram for evjite in Dushan

当基性岩浆受到壳源物质混染时, 岩浆中  $SiO_2$ 、 $K_2O$ 、Zr、Hf、LILE 增加会导致 La/Nb 比增高, Ce/Pb 降低<sup>[26]</sup>。独山角闪辉长岩的 La/Nb 比没有随着  $SiO_2$  增高而增高(图 6a), 同时 Ce/Pb 也没有随着  $SiO_2$  增高而降低(图 6b), 显示在岩浆上升过程中没有受到明显的地壳混染。

岩石具有较高的  $MgO$  含量(主要为 10.71%~14.04%,  $DY4 = 5.36\%$ )和相对较高的 Cr、Ni 含量(分别为 293~1147  $\mu g/g$  和 85.4~224  $\mu g/g$ ), 显示出原始岩浆的特征。CaO/ $Al_2O_3$ -FeOt/ $MgO$ 、Ni-Cr、V-Cr 图显示, 独山角闪辉长岩的化学组成变化主要受斜长石、橄榄石、磁铁矿的结晶分异作用的制约(图 7)。岩石的 Eu 正异常程度与其 CaO 和  $Al_2O_3$  呈明显的

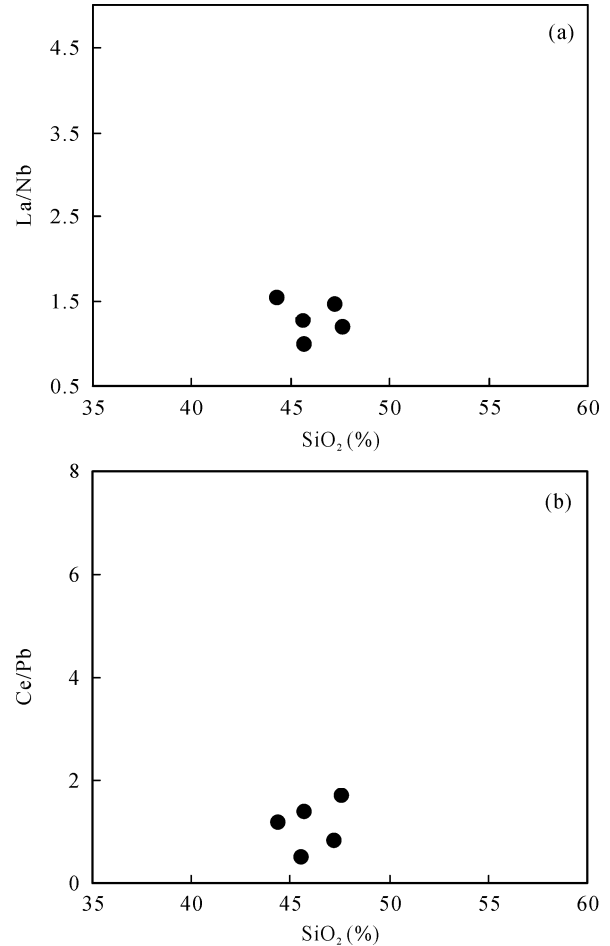


图 6 独山角闪辉长岩的 La/Nb- $SiO_2$  图(a)

和 Ce/Pb- $SiO_2$  图(b)

Fig.6 La/Nb vs.  $SiO_2$  diagram (a) and Ce/Pb vs.  $SiO_2$  diagram (b) for evjite in Dushan

正相关关系(表 1), 也暗示其地球化学特征受斜长石结晶分异作用的影响。

高 Al ( $Al_2O_3$  13.99%~26.11%)、高 Ca ( $CaO$  13.13%~16.95%)显示独山角闪辉长岩主要由高铝玄武质岩浆结晶而成。岩相学观察表明独山角闪辉长岩中的矿物可以分成两期, 早期主要为无水矿物, 包括单斜辉石、斜长石、磁铁矿。在这个阶段, 斜长石结晶形成斜长岩, 斜长石牌号从  $An_{97}$ ~ $An_{100}$ <sup>[5]</sup>。残余熔体继续演化, 形成富水的玄武质岩浆。岩浆富水导致大量角闪石结晶, 形成角闪石斑晶并消耗岩浆中的水, 残余岩浆结晶成斜长石等造岩矿物并充填矿物间隙, 形成典型的斑状结构。

### 3.2 岩石源区特征

稀土元素被广泛地用来限定基性岩浆岩的源区性质。Dy/Yb 是诊断源区特征的重要地球化学指标, 如果部分熔融发生在石榴子石稳定区, 其熔体的

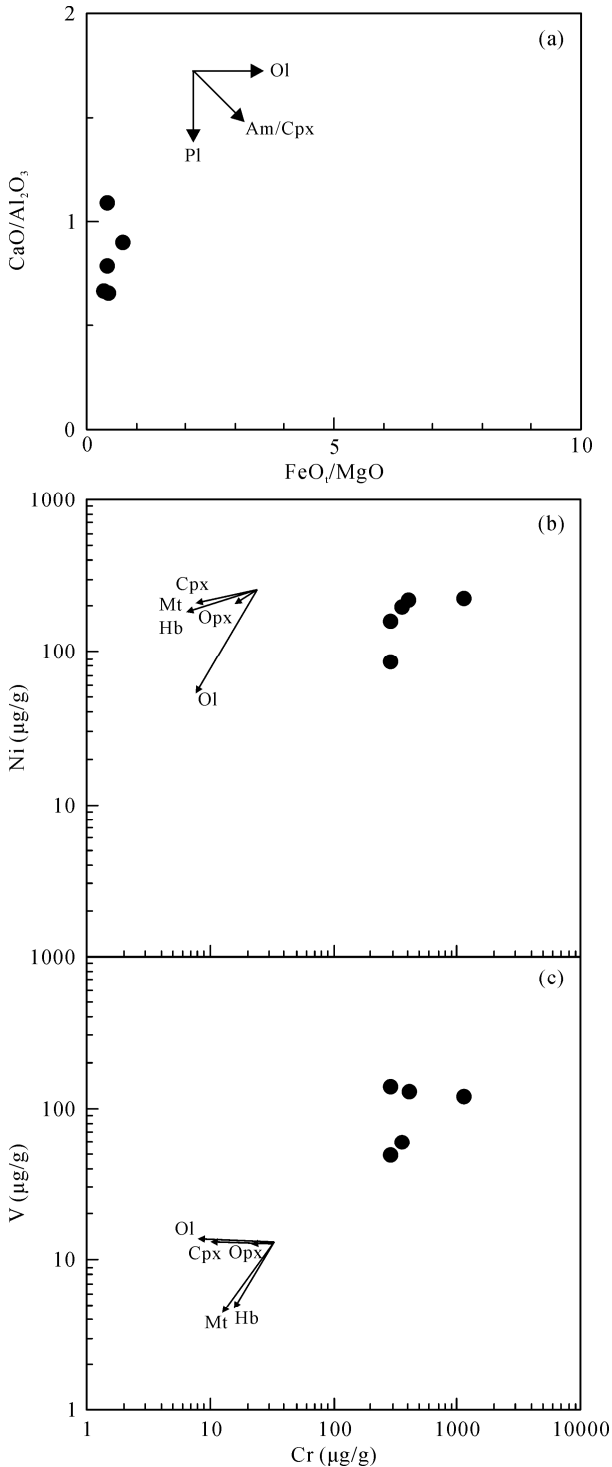


图 7 独山角闪辉长岩的 CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-FeO/MgO 图(a, 据文献 [27])、Ni-Cr 图(b, 据文献[28])和 V-Cr 图(c, 据文献[28])

Fig.7 CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs. FeO/MgO diagram (a, after Reference [27]), Ni vs. Cr diagram (b, after Reference [28]) and V vs. Cr diagram (c, after Reference [28]) for evjite in Dushan

Am-角闪石; Cpx-单斜辉石; Hb-普通角闪石; Mt-磁铁矿; Ol-橄榄石; Opx-斜方辉石; Pl-斜长石; Zo-黝帘石。

Am - amphibole; Cpx - clinopyroxene; Hb - hornblende; Mt - magnetite; Ol - olivine; Opx - orthopyroxene; Pl - plagioclase; Zo - zoisite.

Dy/Yb>2.5; 如果熔融作用发生在尖晶石稳定区, 其熔体的 Dy/Yb < 1.5<sup>[29]</sup>。独山角闪辉长岩具有相对稳

定的 Dy/Yb 比值(介于 1.77~1.95 之间), 暗示其源区为石榴石和尖晶石稳定区的过渡带。Sm/Yb 比值也可以有效指示岩浆岩的源区<sup>[30]</sup>。在 Sm/Yb-La/Sm 图解中, 独山角闪辉长岩的样品均落在石榴石橄榄岩批式熔融线之下和尖晶石橄榄岩批式熔融线之上(图 8b), 也暗示地幔源区为石榴石和尖晶石稳定区的过渡带。

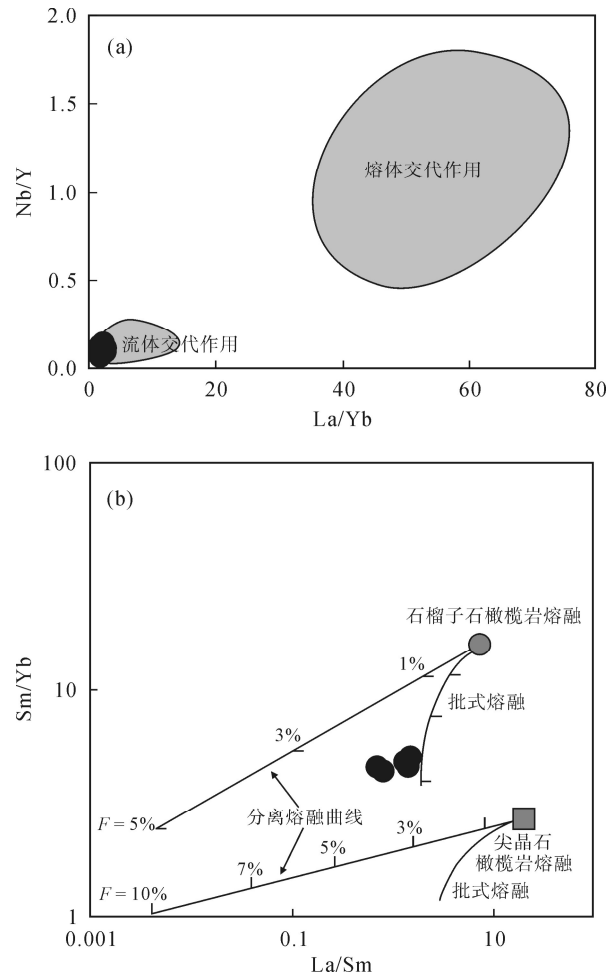


图 8 独山角闪辉长岩的 Nb/Y-La/Yb 图(a, 据文献[31])和 Sm/Yb-La/Sm 图(b, 据文献[32])

Fig.8 Nb/Y vs. La/Yb diagram (a, after Reference [31]) and Sm/Yb vs. La/Sm diagram (b, after Reference [32]) for evjite in Dushan

在 Nb/U-(La/Sm)<sub>N</sub> 图解中, 独山角闪辉长岩的投影点落在下地壳和正常洋中脊玄武岩之间, 暗示其源区为富集地幔(图 9)。大离子亲石元素富集和 Nb-Ta、Zr-Hf、Ti 亏损, 并排除了岩浆上升过程中的明显混染, 这也表明其源区为富集地幔源区。在 La/Yb - Nb/Y 图解中, 独山角闪辉长岩的投影点均落在流体交代作用的区域内, 这表明地幔源区的富集主要受流体交代作用的制约(图 8a)。前人研究显示, 与俯冲板片脱水有关的流体 Ba、Rb、Sr、U、



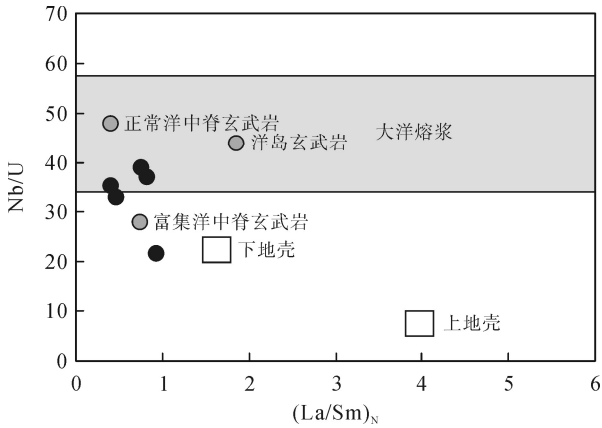


图9 独山角闪辉长岩的 Nb/U-(La/Sm)<sub>N</sub> 图(据文献[33])  
Fig.9 Nb/U vs. (La/Sm)<sub>N</sub> diagram for evjite in Dushan (after Reference [33])

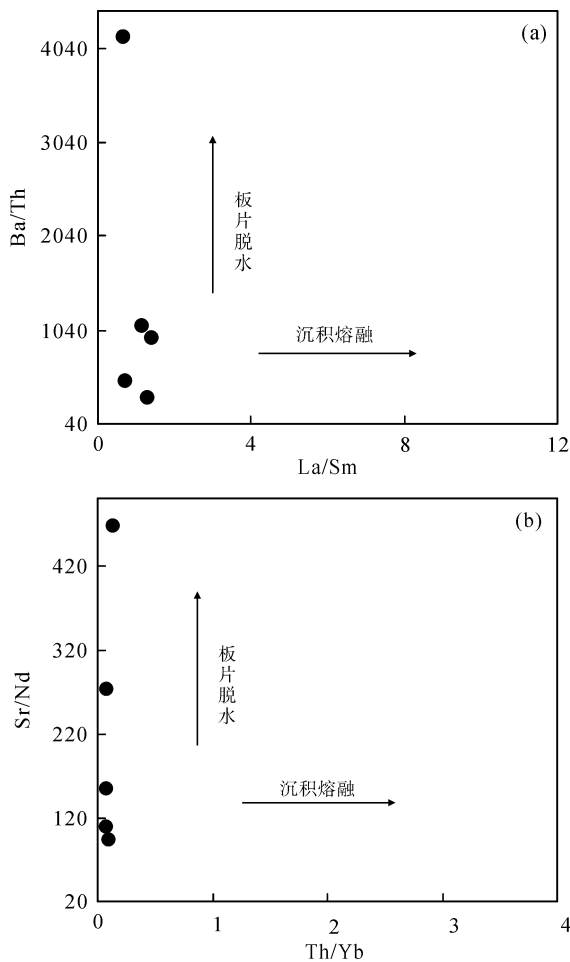


图10 独山角闪辉长岩的 Ba/Th-La/Sm 图解(a, 据文献[38])和 Sr/Nb-Th/Yb 图解(b, 据文献[39])

Fig.10 Ba/Th vs. La/Sm diagram (a, after Reference [38]) and Sr/Nb vs. Th/Yb diagram (b, after Reference [39]) for evjite in Dushan

Pb 含量较高, 这会导致受其交代的地幔源区具有较高的 Ba/Th、U/Th 和 Sr/Th 比值<sup>[34]</sup>; 反之, 俯冲大洋沉积作用的熔体高度富集 Th 和 LREE, 具有较高的 Th/Ce 比值<sup>[35-38]</sup>。独山角闪辉长岩具有高 Sr/Th 比值

(2651~13129)和较低的 Th/U 比值(1.75~4.17), 这也表明其地幔源区富集主要受俯冲流体交代作用的影响<sup>[29,35]</sup>。在 Ba/Th-La/Sm 和 Sr/Nd-Th/Yb 图(图 10)中, 独山角闪辉长岩的投影点与 Ba/Th 轴和 Sr/Nd 轴几近平行, 也表明独山角闪辉长岩的源区主要受俯冲流体交代的制约。大量角闪石斑晶的存在也表明, 独山角闪辉长岩源区是“湿幔源”<sup>[40-41]</sup>。

### 3.3 独山玉成因

独山玉主要呈细脉分布于独山角闪辉长岩体的构造裂隙中。独山角闪辉长岩体地处秦岭造山带内, 而秦岭洋是存在于新元古代-早中生代(约 840~220 Ma)的原始大洋盆<sup>[42]</sup>, 华北与扬子板块最终碰撞可能发生于二叠纪-三叠纪<sup>[43-46]</sup>, 导致秦岭洋盆最终关闭于三叠纪以后<sup>[42]</sup>。

独山角闪辉长岩体周围主要出露地层为古元古界秦岭群、中元古界宽坪群、下古生界二郎坪群及中生界和新生界的地层<sup>[7]</sup>, 邓艳华等<sup>[5]</sup>推测独山角闪辉长岩形成晚于岩体深部的科马提岩, 即震旦纪后。肖启云<sup>[7]</sup>根据附近同属于朱阳关-夏馆断裂北侧的二龙辉长岩体同位素年龄为 321~383 Ma, 推测独山岩体形成于海西期。而据最近的报道, 独山岩体临近的桐柏山二郎坪群的辉长岩锆石 U-Pb 年龄为 440 Ma<sup>[47]</sup>, 因此推测独山岩体形成的时代可能为早古生代。

独山岩体可能形成于板块汇聚边缘, 大量的幔源基性岩浆受到俯冲流体的交代而形成富水的独山角闪辉长岩。独山角闪辉长岩体后期受到区域动力变质作用的影响, 岩体出现破裂和糜棱岩化, 由于韧性剪切作用的加剧, 角闪辉长岩发生了重结晶, 导致该岩石具有典型的条带状构造和眼球构造, 其中的辉石表现出明显的破碎, 斜长石出现了变形双晶等的动力变质结构和构造, 并且发生了脆性碎裂到塑性变形, 在晶粒间拉力最强部位由于错位结晶出亚颗粒斜长石、石英和晶形完好的黝帘石组成的独山玉细脉。

## 4 结 论

(1) 岩石地球化学特征显示, 独山角闪辉长岩主要为亚碱性岩石, 低 SiO<sub>2</sub>、高 Mg<sup>#</sup>、贫碱, 明显富集大离子亲石元素 K、Rb、Sr 和 Pb, 明显亏损高场强元素 Th、Nb、Ta、Zr 和 Hf;

(2) 独山角闪辉长岩可能形成于板块汇聚边缘,

源区为受俯冲流体交代的富集石榴石-尖晶石橄榄岩地幔源区, 是该类地幔岩 1%~3% 部分熔融的产物;

(3) 独山玉是富水的独山角闪辉长岩区域动力变质作用的产物, 在变质改造过程中动力重结晶形成的亚颗粒斜长石、石英和晶形完好的黝帘石是独山玉的主要组成矿物。

#### 参考文献(References):

- [1] 江富建. 南阳黄山新石器时代玉器的玉质研究[J]. 中国宝玉石, 2007 (5): 106-108.  
Jiang Fu-jian. The quality of the jade for the Neolithic from Huangshan in Nanyang [J]. China Gems Jades, 2007 (5): 106-108 (in Chinese).
- [2] 李学清. 河南南阳独山之玉石[J]. 地质论评, 1936, 1(1): 55-60.  
Li Xue-qing. The stone of Dushan in Nanyang, Henan province [J]. Geol Rev, 1936, 1(1): 55-60 (in Chinese).
- [3] 李劲松, 蒋祥明, 钱宽红. 独玉及其矿床特征[J]. 河南地质, 1984 (1): 1-8.  
Li Jin-song, Jiang Xiang-ming, Qian Kuan-hong. The ore geology of Dushan Jade [J]. Geol Henan, 1984 (1): 1-8 (in Chinese).
- [4] 张建洪, 李朝晖, 汪雪芳. 南阳独山玉的矿物学研究[J]. 岩石矿物学杂志, 1989, 8(1): 53-64.  
Zhang Jian-hong, Li Zhao-hui, Wang Xue-fang. Mineralogical studies of jade from Dushan, Nanyang [J]. Acta Petrol Mineral, 1989, 8(1): 53-64 (in Chinese with English abstract).
- [5] 邓燕华, 缪秉魁. 独玉成因及成岩成玉模式[J]. 桂林冶金地质学院学报, 1991, 11(S1): 8-16.  
Deng Yan-hua, Miao Bing-kui. The genetic model for rocks and jade and the range of reconnaissance in dushan, Nanyang, Henan [J]. J Gulin Colleg Geol, 1991, 11(S1): 8-16 (in Chinese with English abstract).
- [6] 廖宗廷, 赵娟, 周祖翼, 朱静昌. 南阳独山玉矿的成矿构造背景及成因[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2000, 28(6): 702-706.  
Liao Zong-ting, Zhao Juan, Zhou Zu-yi, Zhu Jing-chang. On the tectonic setting and origin of Dushan jade deposit in Nanyang [J]. J Tongji Univ (Nat Sci ed), 2000, 28(6): 702-706 (in Chinese with English abstract).
- [7] 肖启云. 河南南阳独山玉的宝石学及其成因研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2007.  
Xiao Qi-yun. A study on gemology and genesis of Dushan jade in Nanyang, Henan Province, China [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2007 (in Chinese with English abstract).
- [8] 肖启云, 蔡克勤, 江富建. 河南南阳独山玉矿物碎裂成玉过程研究[J]. 地球学报, 2009, 30(5): 607-615.  
Xiao Qi-yun, Cai Ke-qin, Jiang Fu-jian. Tentative discussion on the mineral cataclasis jade-forming process of Dushan Jade in Nanyang City, Henan Province [J]. Acta Geosci Sinica, 2009, 30(5): 607-615 (in Chinese with English abstract).
- [9] 刘少峰, 王平, 胡明卿, 郜塘郡, 王凯. 中、上扬子北部盆地系统演化与动力学机制[J]. 地学前缘, 2010, 17(3): 14-26.  
Liu Shao-feng, Wang Ping, Hu Ming-qing, Gao Tang-jun, Wang Kai. Evolution and geodynamic mechanism of basin-mountain systems in the north-ern margin of the Middle-Upper Yangtze [J]. Earth Sci Front, 2010, 17(3): 14-26 (in Chinese with English abstract).
- [10] 杨东晓. 南阳独山玉矿床地质特征及成因探讨[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2012, 94(1): 38-42.  
Yang Dong-xiao. Discussion on the geological characteristics and genesis of Dushan chalciguite deposit in Nanyang [J]. China Non-Metall Mineral Ind, 2012, 94(1): 38-42 (in Chinese with English abstract).
- [11] Li X H, Liu Y, Li Q L, Guo C H. Precise determination of Phanerozoic zircon Pb/Pb age by multicollector SIMS without external standardization [J]. Geochem Geophys Geosyst, 2009, 10(4): 1525-2027.
- [12] 李献华, 刘颖, 涂湘林, 胡光黔, 曾文. 硅酸盐岩石化学组成的 ICP-AES 和 ICP-MS 准确测定: 酸溶与碱溶分解样品方法的对比[J]. 地球化学, 2002, 31(3): 289-294.  
Li Xian-hua, Liu Ying, Tu Xiang-lin, Hu Guang-qian, Zeng Wen. Precise determination of chemical compositions in silicate rocks using ICP-AES and ICP-MS: A comparative study of sample digestion techniques of alkali fusion and acid dissolution [J]. Geochimica, 2002, 31(3): 289-294 (in Chinese with English abstract).
- [13] 刘颖, 刘海臣, 李献华. 用 ICP-MS 准确测量岩石样品中的 40 余种微量元素[J]. 地球化学, 1996, 25(6): 552-558.  
Liu Ying, Liu Hai-chen, Li Xian-hua. Simultaneous and precise determination of 40 trace elements in rock samples using ICP-MS [J]. Geochimica, 1996, 25(6): 552-558 (in Chinese with English abstract).
- [14] Wilson M. Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach [M]. London: Chapman, 2007: 1-466.
- [15] Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey [J]. Contrib Mineral Petrol, 1976, 58(1): 63-81.
- [16] Sun S-s, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [M]//Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42(1): 313-345.
- [17] Altherr R, Topuz G, Siebel W, Şen C, Meyer H P, Satir M, Lahaye Y. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic characteristics of Paleocene plagioclinites from the eastern Pontides (NE Turkey) [J]. Lithos, 2008, 105(1/2): 149-161.
- [18] Boari E, Avanzinelli R, Melluso L, Giordano G, Mattei M, De Benedetti A A, Morra V, Conticelli S. Isotope geochemistry (Sr-Nd-Pb) and petrogenesis of leucite-bearing volcanic rocks from "Colli Albani" volcano, Roman Magmatic Province, Central Italy: Inferences on volcano evolution and magma genesis [J]. Bull Volcanol, 2009, 71(9): 977-1005.
- [19] Foley S F, Venturelli G, Green D H, Toscani L. The ultrapotassic rocks: Characteristics, classification, and constraints for petrogenetic models [J]. Earth Sci Rev, 1987, 24(2): 81-134.
- [20] 周长勇, 吴福元, 葛文春, 孙德有, Rahman A A, 张吉衡, 程瑞玉. 大兴安岭北部塔河堆晶辉长岩体的形成时代、地球化学特征及其成因[J]. 岩石学报, 2005, 21(3): 763-775.  
Zhou Chang-yong, Wu Fu-yuan, Ge Wen-chun, Sun De-you, Rahman A A, Zhang Ji-heng, Cheng Rui-yu. Age, geochemistry and petrogenesis of the cumulate gabbro in Tahe, north-

- ern Da Hinggan Mountain [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2005, 21(3): 763–775 (in Chinese with English abstract).
- [21] Winchester J A, Floyd P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements [J]. *Chem Geol*, 1977, 20: 325–343.
- [22] Rollinson H R. *Using Geochemical Data: Evaluation Presentation Interpretation* [M]. London: Longman Group, 1993: 1–352.
- [23] Hawkesworth C J, Turner S P, McDermott F, Peate D W, van Calsteren P. U-Th isotopes in arc magmas: Implications for element transfer from the subducted crust [J]. *Science*, 1997, 276(5312): 551–555.
- [24] Polat A, Kerrich R, Wyman D A. Geochemical diversity in oceanic komatiites and basalts from the late Archean Wawa greenstone belts, Superior Province, Canada: Trace element and Nd isotope evidence for a heterogeneous mantle [J]. *Precamb Res*, 1999, 94(3/4): 139–173.
- [25] Polat A, Hofmann A W, Rosing M T. Boninite-like volcanic rocks in the 3.7–3.8 Ga Isua greenstone belt, West Greenland: Geochemical evidence for intraoceanic subduction zone processes in the early Earth [J]. *Chem Geol*, 2002, 184(3/4): 231–254.
- [26] Sun W D, Hu Y H, Kamenetsky V S, Eggins S M, Chen M, Arculus R J. Constancy of Nb/U in the mantle revisited [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2008, 72(14): 3542–3549.
- [27] Whitechurcha H, Omranib J, Agardc P, Humberta F, Montignya R, Jolivetd L. Evidence for Paleocene-Eocene evolution of the foot of the Eurasian margin (Kermanshah ophiolite, SW Iran) from back-arc to arc: Implications for regional geodynamics and obduction [J]. *Lithos*, 2013, 182–183: 11–32.
- [28] Peng P, Zhai M G, Guo J H, Kusky T, Zhao T P. Nature of mantle source contributions and crystal differentiation in the petrogenesis of the 1.78 Ga mafic dykes in the central North China craton [J]. *Gondw Res*, 2007, 12(1/2): 29–46.
- [29] Jiang Y H, Jiang S Y, Dai B Z, Liao S Y, Zhao K D, Ling H F. Middle to late Jurassic felsic and mafic magmatism in southern Hunan province, southeast China: Implications for a continental arc to rifting [J]. *Lithos*, 2009, 107(3): 185–204.
- [30] Keskin M. Domal uplift and volcanism in a collision zone without a mantle plume: Evidence from eastern Anatolia [EB/OL]. (2005-06-20). <http://www.mantleplumes.org/Anatolia.html>.
- [31] Hoffer G, Eissen J P, Beate B, bourdon E, Fornari M, Cotton J. Geochemical and petrological constraints on rear-arc magma genesis processes in Ecuador: The Puyo cones and Mera lavas volcanic formations [J]. *J Volcanol Geotherm Res*, 2008, 176(1): 107–118.
- [32] Genc S C, Tuysuz O. Tectonic setting of the Jurassic bimodal magmatism in the Sakarya Zone (Central and Western Pontides), Northern Turkey: A geochemical and isotopic approach [J]. *Lithos*, 2010, 118(1/2): 95–111.
- [33] Cirrincione R, Fiannacca P, Lustrino M, Romano V, Tranchina A. Late Triassic tholeiitic magmatism in Western Sicily: A possible extension of the Central Atlantic Magmatic Province (CAMP) in the Central Mediterranean area? [J]. *Lithos*, 2014, 188: 60–71.
- [34] Condomines M, Hemond C, Allègre C J. U-Th-Ra radioactive disequilibria and magmatic processes [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1988, 90(3): 243–262.
- [35] Hawkesworth C J, Gallagher K, Hergt J M, McDermott F. Mantle and slab contributions in arc magmas [J]. *Ann Rev Earth Planet Sci*, 1993, 21: 175–204.
- [36] Johnson M C, Plank T. Dehydration and melting experiments constrain the fate of subducted sediments [J]. *Geochem Geophys Geosyst*, 2000, 1(12): 1007.
- [37] Plank T. Constraints from thorium/lanthanum on sediment recycling at subduction zones and the evolution of the continents [J]. *J Petrol*, 2005, 46(5): 921–944.
- [38] Labanieh S, Chauvel C, Germa A, Quidelleur X. Martinique: A clear case for sediment melting and slab dehydration as a function of distance to the trench [J]. *J Petrol*, 2012, 53(12): 2441–2464.
- [39] Woodhead J D, Eggins S M, Johnson R W. Magma genesis in the New Britain Island Arc: Further insights into melting and mass transfer processes [J]. *J Petrol*, 1998, 39(9): 1641–1668.
- [40] Munteanu M, Wilson A, Yao Y, Harris C, Chunnett G, Luo Y. The Tongde dioritic pluton (Sichuan, SW China) and its geotectonic setting: Regional implications of a local-scale study [J]. *Gondw Res*, 2010, 18(2/3): 455–465.
- [41] Ma L, Wang Q, Wyman D A, Jiang Z Q, Yang J H, Li Q L, Gou G N, Guo H F. Late Cretaceous crustal growth in the Gangdese area, southern Tibet: Petrological and Sr-Nd-Hf-O isotopic evidence from Zhengga diorite-gabbro [J]. *Chem Geol*, 2013, 349–350: 54–70.
- [42] 闫全人, 王宗起, 向忠金, 闫臻, 王涛, 张宏远, 陈隽璐, 覃小锋. 秦岭洋及其演化过程刍议[C]//2014年中国地球科学联合学术年会——专题46: 中央造山带构造演化与成矿论文集. 2014, 4: 2248–2251.
- Yan Quan-ren, Wang Zong-qi, Xiang Zhong-jin, Yan Zhen, Wang Tao, Zhang Hong-yuan, Chen Jun-lu, Qin Xiao-feng. The evolution of Qinlin Ocean [C]//2014 Chinese Earth Science International Conference — Topic 46: Set of Tectonic Evolution and Mineralization of the Central Orogenic Belt. 2014, 4: 2248–2251 (in Chinese).
- [43] Ratschbacher L, Franz L, Enkelmann E, Jonckheere R, Pörschke A, Hacker B R, Dong S, Zhang Y. The Sino-Korean-Yangtze suture, the Huwan detachment, and the Paleozoic-Tertiary exhumation of (ultra) high-pressure rocks along the Tongbai-Xinxian-Dabie Mountains [C]//Hacker B R, McClelland W C, Liou J G. Ultrahigh-Pressure Metamorphism: Deep Continental Subduction. Geological Society of America Special Paper, 2006, 403: 45–75.
- [44] Ames L, Tilton G R, Zhou G Z. Timing of collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons: U-Pb zircon dating of coesite bearing eclogites [J]. *Geology*, 1993, 21(4): 339–342.
- [45] Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, Ireland T, Walker D, Dong S. U-Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh pressure Qinling-Dabie Orogen, China [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1998, 161(1–4): 215–230.
- [46] Liu X C, Jahn B M, Dong S W, Lou Y X, Cui J J. High-pressure metamorphic rocks from Tongbaishan, central China: U-Pb and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age constraints on the provenance of protoliths and timing of metamorphism [J]. *Lithos*, 2008, 105(1–3): 301–318.
- [47] 王浩. 东秦岭-桐柏造山带新元古代-早古生代不同阶段演化的变质和岩浆作用[D]. 武汉: 中国地质大学, 2014.
- Wang Hao. Neoproterozoic-Early Paleozoic metamorphism and magmatism during the multistage evolution of the eastern Qinling-Tongbai Orogenic Belt [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2014 (in Chinese with English abstract).