

# 南秦岭竹溪县天宝乡粗面岩地球化学特征与铌成矿

杨成, 刘成新, 刘万亮, 万俊, 段先锋, 张众

(湖北省地质调查院, 湖北 武汉 430034)

**摘要:** 南秦岭造山带大巴山东段大面积出露早志留世粗面岩, 夹于早志留世梅子垭组( $S_1m$ )下部层位含炭粉砂质板岩之中, 整体呈北西-南东向展布。这套粗面质火山岩与铌矿关系密切。竹溪县天宝铌矿床产于火山喷发沉积韵律的中下部层位, 赋矿岩石以粗面质熔结凝灰岩为主。粗面质熔岩地球化学数据显示其富碱质, 稀土元素总量高且轻稀土元素明显富集, 高场强元素 Nb、Ta、Zr、Hf 等富集, Sr、P、Ti 等亏损, 具有类似于 OIB 的地球化学性质, 来源于幔源玄武质岩浆的演化, 是形成于大陆裂谷环境的低压型粗面岩。矿体粗面岩类(熔结凝灰岩)与非矿体粗面岩(粗面质熔岩)相比, 具有略低的  $SiO_2$  含量, 高的  $Al_2O_3$ 、 $K_2O$ 、 $CaO$  含量, 低的  $P_2O_5$  含量, 更为富集的高场强元素(Nb、Ta、Zr、Hf)和轻稀土元素(La、Ce), 更强的负 Eu 异常、正 Ce 异常, 略强的 P、Ti 负异常以及更高的挥发分(F、 $CO_2$ )含量。天宝铌矿含铌矿物为易解石, 产于早期矿物的边缘、裂隙或晚期细脉中, 成矿阶段处于岩浆作用的晚期。铌的富集与挥发分(F、 $CO_2$  等)的运移、保存条件密切相关。该铌矿为火山岩型稀有金属矿床, 兼具岩浆型和岩浆热液型矿床特征, 与庙垭和杀熊洞铌-稀土矿床属同一成矿系列的不同类型矿床。

**关键词:** 南秦岭; 竹溪天宝乡; 粗面岩; 铌矿; 岩浆热液矿床

中图分类号: P588.14<sup>+</sup>.3; P618.79

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2017)05-0605-14

## Geochemical characteristics of trachyte and Nb mineralization process in Tianbao Township, Zhuxi County, Southern Qinling

YANG Cheng, LIU Cheng-xin, LIU Wan-liang, WAN Jun, DUAN Xian-feng and ZHANG Zhong  
(Hubei Geological Survey, Wuhan 430034, China)

**Abstract:** The large area of the eastern section of the North Dabai Mountain lies in North Qinling orogenic belt with extensive exposed trachyte, which was formed in early Silurian, sandwiched in lower level carbonaceous silty slates of the Early Silurian Meiziya Group ( $S_1m$ ) and spread from northwest to southeast. This trachyte is closely related to niobium mineralization. The Tianbao Nb deposit occurs in the middle to lower part of the volcanic sedimentary rhythm. The most important host rock is ignimbrite. The trachytes are alkali-rich, with high  $\Sigma$ REE and enriched LREE. High field strength elements such as Nb, Ta, Zr and Hf are enriched and Sr, P, and Ti are depleted, showing the characteristics of OIB. These characteristics of the trachytes indicate that trachyte magma originated from the evolution of mantle-derived basaltic magma. They are low pressure type trachytes formed in an intraplate rift tectonic environment. Compared with the barren trachyte, the ore-forming trachyte has lower  $SiO_2$ , higher  $Al_2O_3$ ,  $K_2O$ ,  $CaO$ , lower  $P_2O_5$ , higher high field strength elements(Nb, Ta, Zr, Hf)and light rare earth elements(La, Ce), stronger negative Eu anomalies, positive Ce anomalies, slightly strongly depleted in P and Ti, and higher volatiles(F,  $CO_2$ ). Niobium-containing mineral is aeschynite, which

收稿日期: 2016-12-08; 接受日期: 2017-08-04

基金项目: 中国地质调查局项目(1212011220508); 湖北省国土资源厅项目(ETZ2015A01)

作者简介: 杨成(1985-), 男, 汉族, 硕士, 工程师, 从事区域地质矿产调查, E-mail: yangcheng3245@qq.com

was generated along the early mineral edge, cracks or late veins. The metallogenic stage was in the late stage of magmatism. The enrichment process of element Nb was closely related to the migration and preservation of the volatiles (F, CO<sub>2</sub> etc.). This Nb deposit is a volcanic rare metal deposit, with the characteristics of magmatic type and magmatic hydrothermal deposits. The deposit type is different from that of Miaoya and Shaxiongong rare earth deposits; nevertheless, they belong to the same mineralization series.

**Key words:** Southern Qinling; Zhuxi Tianbao; trachyte; niobium mine; magmatic hydrothermal deposit

**Fund support:** Project of China Geological Survey(1212011220508); Project of Hubei Provincial Department of Land and Resources(ETZ2015A01)

南秦岭北大巴山地区出露大量早古生代碱性双峰式岩浆岩(由碱性玄武岩和粗面岩组成),整体呈北西南东向展布,从陕西延伸至鄂西北的竹溪、竹山地区(喻学惠,1992;邱家骧,1993)。前人对该套双峰式岩浆岩中的基性端员研究较多,积累了丰富的资料(夏祖春等,1992;夏林圻,1994;张成立等,2002;张成立等,2007;王存智等,2009),但对粗面岩的研究则相对较少,且人们多关注于研究其成因及构造环境(黄月华等,1992;王云斌,2007),并未对其含矿性引起足够重视。

近年来随着地质矿产工作程度的加深,不断有地勘单位在北大巴山陕西境内发现规模巨大的铌矿(化)带(邓盛波等,2003;贾润幸等,2004;段湘益等,2007;陈浦浦等,2014)。湖北省地质调查院近期也在鄂西北的竹溪地区发现了规模大、品位稳定的铌矿床——竹溪天宝大型铌矿床(刘万亮等,2015)。这些铌矿化(床)均与粗面岩类共生,区别于庙垭、杀熊洞两个与正长岩-碳酸岩杂岩体有关的岩浆型矿床(李石,1980,1991;Xu *et al.*,2008,2010;吴敏等,2011),是一种新类型的稀有金属矿床。这两种类型的稀有-稀土矿床在地质特征、成矿过程等方面有什么联系和区别,前人都未进行过研究和讨论。本文在前人研究基础上,以竹溪县天宝地区粗面岩为研究对象,通过对其地质学、岩石学和地球化学等方面的研究,初步探讨了本区粗面岩形成的大地构造背景及其与铌矿的关系,以为本区铌-稀土矿床(化)形成及对比研究提供一些新的资料。

## 1 地质背景和矿床地质

### 1.1 地质背景

研究区大地构造位置位于南秦岭造山带中段北大巴山弧形构造带内,东临武当隆起,南界为青峰-襄广断裂(图1a),属竹山地区金银铌-稀土Ⅳ级成矿

带(徐志刚,2008)。区内主要出露南华纪武当岩群至志留纪梅子垭组中浅变质地层。岩浆岩以早古生代双峰式岩浆岩为主。区内主构造线为北西-南东向,发育的区域性断裂有安康-竹山断裂和红椿坝-曾家坝断裂以及一系列由北东向南西的叠瓦状逆冲推覆构造,主体构造格局形成于印支期陆-陆碰撞造山期。本文研究对象位于北大巴山碱性岩带的最东段(图1b),是赋存于梅子垭组(S<sub>1m</sub>)底部粉砂质板岩之中的粗面岩。

### 1.2 岩相学特征

天宝粗面岩分布于下志留统大贵坪组以及梅子垭组底部,其与下伏地层大贵坪组炭质板岩、炭硅质板岩为整合接触,上部则整合覆盖梅子垭组泥质板岩。该粗面质火山岩由多个火山喷发沉积韵律组成,一个完整的沉积韵律岩性包括粗面质火山集块岩、粗面质(熔结)火山角砾岩、熔结凝灰岩(图2a)、粗面质熔岩(枕状构造)、火山碎屑岩、凝灰岩及少量火山间歇期沉积的炭硅质、炭泥质岩。粗面质火山岩中偶见有灰岩岩屑、生物礁灰岩砾石,局部层位甚至可见大量礁灰岩砾石,有磨圆特征,显示出其有一定距离的搬运。相应成分的侵入体不发育,仅分布有少量超浅成的次火山岩,以块状的黑云母粗面岩为主。靠近火山口则火山爆发相岩石占优,远离火山口则以火山碎屑岩占优。天宝地区火山机构喷发中心位于九华山-岱王沟一带。岩石板理发育,产状倾向近北东向,与层理近于平行。

粗面质火山角砾岩:块状构造,角砾状构造,碎屑物(80%)包括粗面岩岩屑、钾长石、灰岩岩屑、粘土岩屑;基质(20%)包括微晶长石、楣石、褐铁矿、方解石。角砾以钾长石及粗面岩角砾为主,可见极少量的灰岩角砾和粘土岩屑角砾。粗面岩角砾具粗面结构,主要由钾长石组成,有的内部具斑状结构,可见条纹长石斑晶,灰岩主要由方解石呈他形粒状紧相相接,粘土岩屑呈次棱角状,主要由粘土矿物组成。

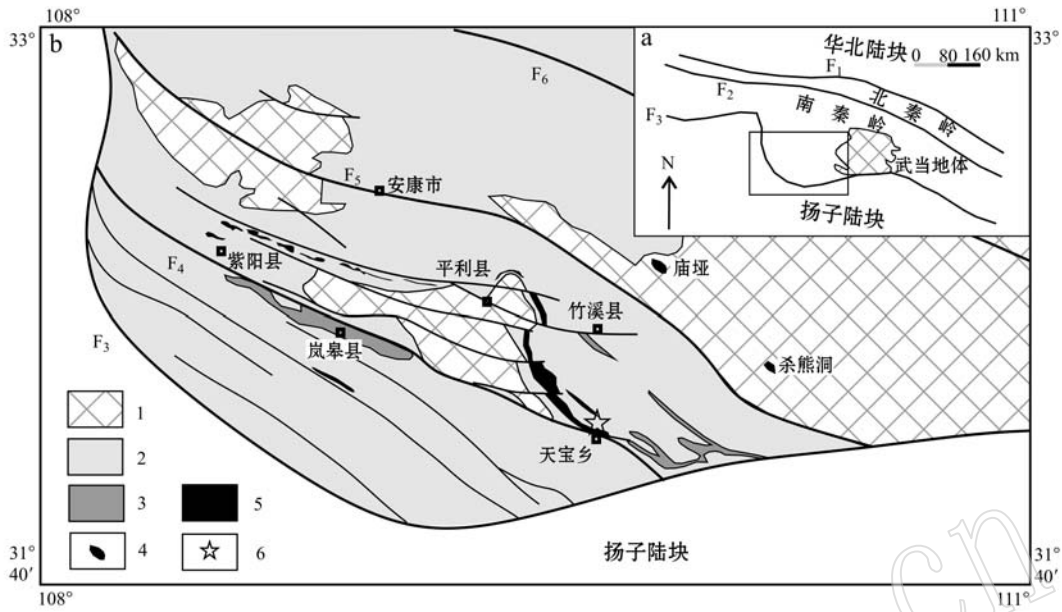


图 1 天宝地区及邻区地质略图(据张国伟等,1995; 陕西省地调院<sup>①</sup>; 湖北省地调院<sup>②</sup>)

Fig. 1 Sketch geological map of Tianbao and adjacent areas (after Zhang Guowei *et al.*, 1995; Shaanxi Geological Survey<sup>①</sup>; Hubei Geological Survey<sup>②</sup>)

1—新元古代地层; 2—古生代地层; 3—基性岩; 4—碳酸岩+正长岩杂岩体; 5—粗面岩、正长岩; 6—采样位置; F<sub>1</sub>—鲁山断裂; F<sub>2</sub>—商丹断裂; F<sub>3</sub>—青峰—襄广断裂; F<sub>4</sub>—红椿坝—曾家坝断裂; F<sub>5</sub>—安康—竹山断裂; F<sub>6</sub>—十堰断裂  
 1—Neoproterozoic strata; 2—Paleozoic strata; 3—basic rocks; 4—carbonatite and syenite complex; 5—trachyte and syenite; 6—sampling location; F<sub>1</sub>—Lushan fault; F<sub>2</sub>—Shangdan fault; F<sub>3</sub>—Qingfeng-Xiangguang fault; F<sub>4</sub>—Hongchunba-Zengjiaba fault; F<sub>5</sub>—Ankang-Zhushan fault; F<sub>6</sub>—Shiyan fault

黑云母粗面(斑)岩: 块状构造, 粗面结构、斑状结构, 矿物组成为钾长石(78%)、黑云母(15%)、磁铁矿(2%)、黄铁矿(1%)、方解石(1%)、白钛石(2%)、石英(1%)。岩石主要由钾长石、黑云母组成, 钾长石呈他形显微粒状, 以条纹长石居多, 粒径细小, 多在 0.001~0.03 mm, 偶见斑晶状钾长石、条纹长石, 具条纹状双晶、卡式双晶(图 2f), 呈半自形板状, 局部可见钾长石斑晶碎裂, 但离而不乱, 仍可对接, 具隐爆特征, 斑晶边缘分布着较多的鳞片状黑云母, 斑晶表面部分被方解石沾布和交代, 斑晶粒径 0.1~0.2 mm, 还可见少量磷灰石斑晶呈柱状, 黑云母呈显微鳞片状, 往往以集合体状分布于钾长石之间, 有时以脉状或网状交代钾长石, 应是蚀变产物, 具吸收多色性, 片径 0.001~0.01 mm, 黄铁矿呈半自形晶粒状, 散布于岩石中, 粒径可达 0.05~0.3 mm。

(熔结)岩屑晶屑凝灰岩: 含岩屑晶屑熔结凝灰岩结构(图 2e), 块状构造, 由碎屑物(15%)、假流纹状的熔岩基质(85%)(图 2b)和斑晶组成(图 2c), 碎屑

物包括钾长石(8%)、黑云母(2%)、钾长石+黑云母岩屑(5%); 基质(85%)包括微晶钾长石(64%)、黑云母(15%)、绢云母(2%)、楣石-白钛石(3%)、褐铁矿(1%); 斑晶以钾长石为主。岩石中的碎屑物为钾长石、黑云母以及它们的组合岩屑, 钾长石以正长石为主, 呈次棱角状或半自形板状, 有的斑晶呈完整的板状晶形, 粒径可达 3~7 mm, 呈自碎状, 且碎而不乱, 切穿多个微层, 在碎裂处被钠长石、黑云母和方解石所交代或充填。黑云母呈条片状, 黑云母+钾长石的岩屑呈次棱角, 次圆状, 它们在岩石中往往呈带状或透镜状分布, 具有一定距离的搬运特征, 是火山碎屑岩与熔岩的过渡类型。含方解石脉或方解钠长石脉, 局部还可见钠长石团块, 与周围凝灰岩界限清晰, 无交代关系。有的样品还可见灰岩岩屑, 其中可见缝合线构造。在矿体样品中还含有磷灰石、褐帘石、萤石。萤石呈紫色粒状, 可见菱形切面, 均质性, 多与钾长石伴生。该岩性是区内主要的含矿岩性。

① 湖北省地调院, 1:50 万湖北省区域地质图(待出版).  
 ② 陕西省地调院, 1:50 万陕西省区域地质图(待出版).

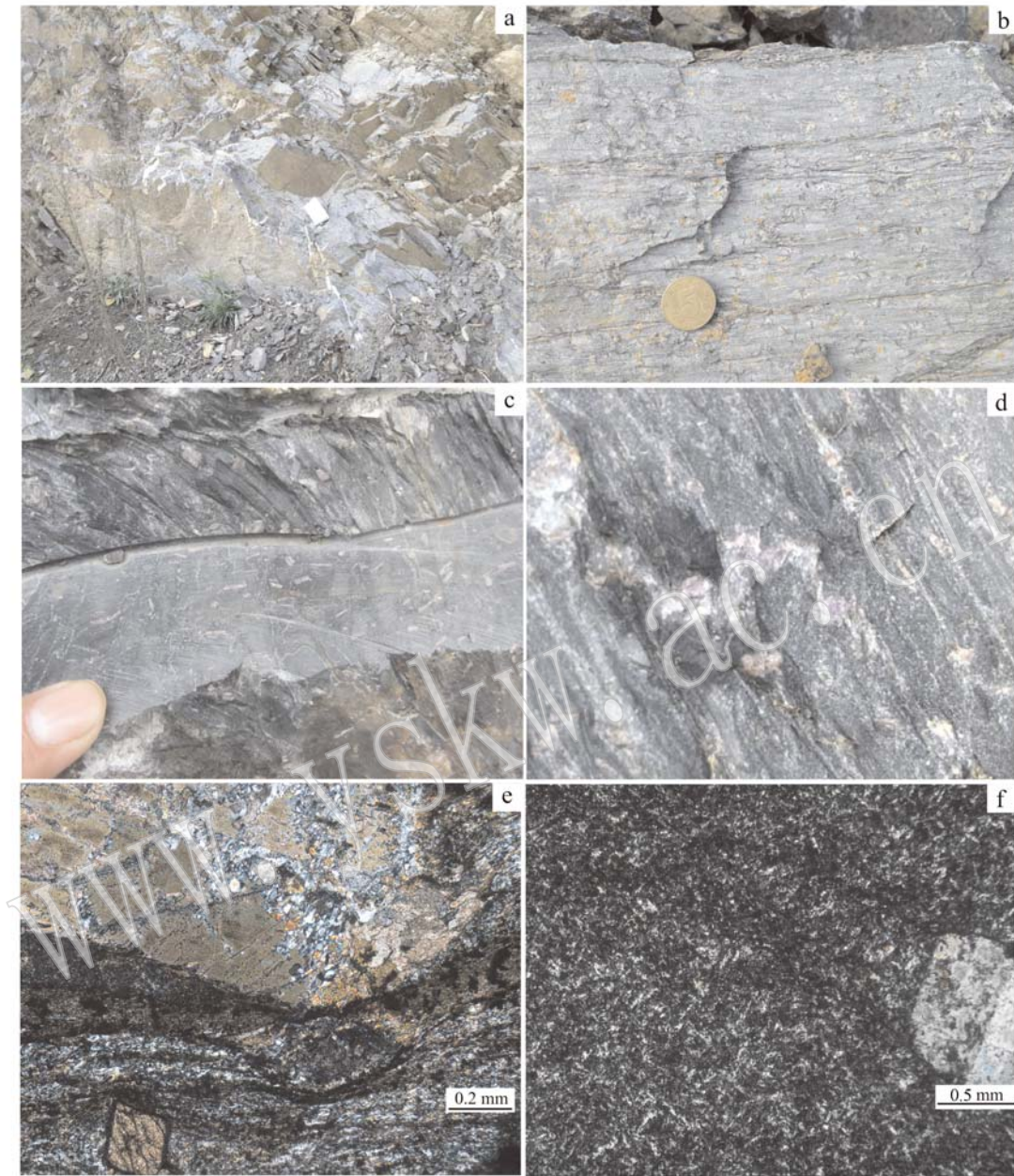


图 2 粗面岩野外地质特征及镜下矿物特征

Fig. 2 Geological characteristics and microscopic mineral characteristics in the field

a—熔结凝灰岩宏观特征；b—熔结晶屑岩屑凝灰岩，见假流纹构造、钾长石斑晶；c—槽壁可见大量钾长石晶屑；d—萤石细脉；e—熔结凝灰结构，假流纹状构造，钾长石（大自碎斑状），碎裂处被钠长石等充填；f—粗面斑岩中的斑状结构，基质具粗面结构，

钾长石斑晶发育卡式双晶

a—macro-characteristics of ignimbrite; b—ignimbrite, flow structure and potassium feldspar observed; c—potassium feldspar; d—fluorite veins; e—fused tuff structure, false rhyolitic structure, potassium feldspar, fissures filled with albite; f—porphyritic structure, matrix with rough surface structure, potassium feldspar porphyritic with Carlsbad twins

### 1.3 矿床地质

天宝钼矿有 3 条规模较大的钼矿化(体)，均位于火山喷发沉积韵律的中下部层位。矿化体底板为粗面质火山碎屑岩、角砾岩，为火山爆发相产物；顶

板为粗面质凝灰岩、硅质板岩，为火山作用间歇期的沉积产物。发育萤石(图 2d)、方解石和钠长石细脉。矿(化)体主要为(假流纹构造)熔结凝灰岩、粗面斑岩等，是介于爆发相与溢流相之间的产物。据鲁力、

刘爽等研究(未发表)表明本区铌矿(化)体的含铌矿物是易解石、铌易解石,与邻区陕西省朱家院粗面岩的含铌矿物一致(陈浦浦等,2014)。含铌矿物沿长石等矿物边缘、裂隙分布,或呈细脉状产出。矿(化)体  $Nb_2O_5$  的品位介于 0.060% ~ 0.092% 之间,按 0.08% 的工业品位估算,334 资源量可达 21.05 万吨(刘万亮等,2015)。

## 2 样品采集及测试方法

在野外剖面测制及路线地质调查的基础上,采集了以黑云母粗面岩、粗面斑岩、粗面质熔结凝灰岩为主的样品(采样位置见图 1),其中粗面质熔结凝灰岩样品为矿体样品,编号分别为 PM305/9-1、PM305/16-1 和 PM305/102-1,以下简称矿体样品,其它粗面质熔结岩类样品是非矿体样品。受低级区域变质作用影响,部分样品发生轻微蚀变。单个样品质量在 7~8 kg,所有样品全岩地球化学分析由湖北省地质实验测试中心完成。样品首先经玛瑙球磨机磨碎至 200 目左右。主量元素采用 X 射线荧光光谱仪测定,分析精度(relative standard deviation, RSD)小于 0.9%(除  $H_2O$ 、 $CO_2$ ), $H_2O^+$  采用高温加热-浓硫酸吸收-重量法测定; $H_2O^-$  是先将样品在 105℃ 温度下烘干,然后采用重量法进行测定; $CO_2$  采用非水滴定法测定;LOI 采用高温加热-重量法测定。大部分微量及稀土元素由电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)测定。F 采用离子选择性电极法在离子计(PX-1)上完成测试。

## 3 地球化学特征

### 3.1 主量元素特征

样品主量元素数据见表 1。非矿体粗面岩样品  $SiO_2$  的含量较高,为 58.74% ~ 64.58%,平均值 61.16%,且标准矿物中出现石英。 $TiO_2$  含量较低,为 1.04% ~ 1.74%,平均值 1.34%。 $Al_2O_3$  含量较高,15.26% ~ 18.49%,平均含量 16.19%,标准矿物中出现刚玉。 $K_2O$ 、 $Na_2O$  含量高, $K_2O$  含量 3.43% ~ 5.91%,平均含量 4.62%, $Na_2O$  含量 5.41% ~ 7.34%,平均含量 6.27%, $K_2O/Na_2O < 1$ ,岩石富钠。 $K_2O + Na_2O$  含量 9.76% ~ 11.63%,平均值为 10.89%。 $MgO$  含量变化较大,0.90% ~ 2.06%,平均为 1.44%, $CaO$  含量变化较大 0.42% ~ 2.35%,平均为 1.52%, $P_2O_5$  含量 0.16% ~ 0.52%,平均为 0.30%。分异指数 DI 较高,平均值为 83.58,说明岩浆经历了强烈的分离结晶作用。

由于岩石发生了轻微的蚀变,为了更为有效地区分岩石类型,采用受蚀变影响较小的高场强元素 Nb、Y、Zr、Ti 来确定本次样品的岩石类型。大部分非矿体样品在  $Zr/TiO_2 - Nb/Y$  分类图解(图 3a)中落入粗面岩区域,少量落入粗面安山岩与粗面岩的界线附近,且样品里特曼指数  $\delta$  为 5.35~7.67,属碱性岩。在  $K_2O - SiO_2$  图中(图 3b)样品主要落入钾玄武岩系列区域。综上表明本区粗面岩属富钠的高钾碱性岩类。

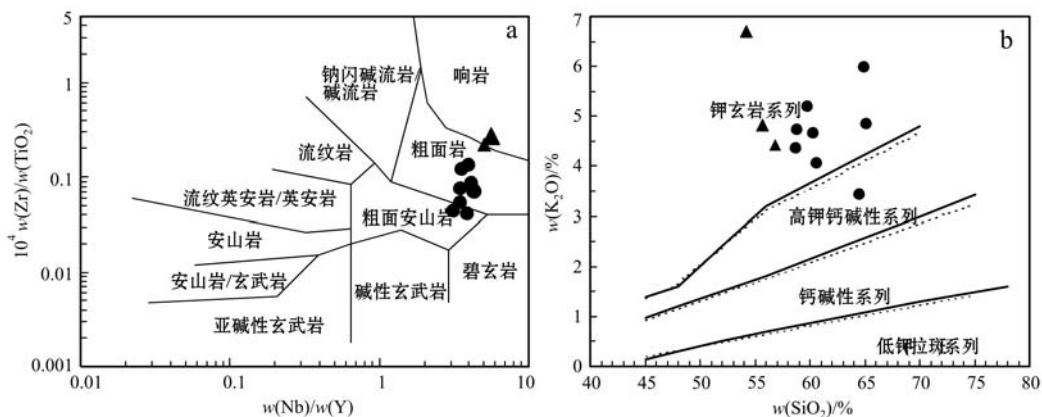


图 3 天宝地区粗面岩  $Zr/TiO_2 - Nb/Y$  图解(a, 据 Peccerillo and Taylor, 1976)和  $K_2O - SiO_2$  图解(b, 实线据 Peccerillo and Taylor, 1976; 虚线据 Middlemost, 1985)

Fig. 3  $Zr/TiO_2 - Nb/Y$  (a, after Peccerillo and Taylor, 1976) and  $K_2O - SiO_2$  (b, black line after Peccerillo and Taylor, 1976, dotted line after Middlemost, 1985) diagrams of the trachyte in Tianbao area

表 1 天宝地区粗面岩地球化学数据表  
Table 1 Geochemical data of the trachyte in Tianbao area

样品 编号 岩性	非矿物样品										矿物样品				
	PM305/50-1 黑云母粗 面岩	PM305/64-1 黑云母粗 面岩	PM305/107-1 黑云母粗 面岩	PM306/1-1 黑云母粗 面岩	PM306/19-1 黑云母粗 面岩	PM306/9-1 粗面斑岩	PM305/92-1 黑云母粗面 斑岩	PM306/16-1 黑云母粗面 斑岩	PM305/9-1 粗面质含岩屑 晶屑凝灰岩	PM305/16-1 粗面质含晶屑 凝灰岩	PM305/102-1 粗面质含晶屑 凝灰岩				
SiO <sub>2</sub>	59.80	64.48	58.74	64.58	64.09	59.29	58.82	59.45	56.88	54.16	55.71				
TiO <sub>2</sub>	1.16	1.09	1.74	1.07	1.04	1.19	1.72	1.69	1.19	1.06	0.94				
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.60	15.35	15.56	15.90	15.96	18.49	15.26	15.42	18.62	19.85	19.92				
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.24	0.94	1.69	0.68	1.91	1.49	1.67	3.50	1.20	1.58	1.45				
FeO	2.75	3.53	4.73	3.33	2.37	2.73	5.03	3.22	3.55	3.05	2.98				
MnO	0.32	0.28	0.30	0.25	0.24	0.31	0.27	0.26	0.33	0.35	0.30				
MgO	2.06	1.00	1.72	0.94	0.90	1.27	1.85	1.74	3.08	2.67	2.10				
CaO	1.55	0.93	2.26	0.58	0.42	2.02	2.35	2.08	1.68	2.52	2.24				
Na <sub>2</sub> O	6.09	7.34	5.41	6.82	5.68	6.74	5.78	6.27	6.69	4.47	5.88				
K <sub>2</sub> O	5.20	3.43	4.35	4.81	5.91	4.58	4.72	3.98	4.42	6.70	4.81				
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.23	0.16	0.52	0.17	0.18	0.17	0.46	0.47	0.13	0.10	0.09				
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	1.20	0.75	1.61	0.64	1.06	1.08	1.30	1.39	1.51	1.93	2.00				
CO <sub>2</sub>	0.54	0.59	0.99	0.12	0.14	0.14	0.44	0.22	0.55	1.38	1.33				
LOI	1.46	0.99	2.07	0.44	0.61	0.96	1.27	1.24	1.69	2.89	3.01				
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	0.35	0.38	0.43	0.39	1.07	0.55	0.50	0.59	0.46	0.35	0.32				
DI	83.49	86.47	78.17	87.56	90.44	83.16	78.30	81.05	80.15	77.50	79.85				
δ	7.59	5.40	6.05	6.27	6.37	7.87	6.97	6.39	8.89	11.18	8.99				
La	170.00	201.40	125.80	212.40	163.20	218.50	122.60	154.70	253.00	234.60	124.40				
Ce	293.76	360.96	238.37	384.48	286.27	414.43	246.77	266.59	622.46	607.01	586.18				
Pr	34.00	43.53	29.72	44.99	33.58	48.33	30.52	34.09	70.79	70.57	65.87				
Nd	109.92	139.27	102.70	141.36	111.63	156.56	105.63	116.85	202.26	199.31	183.73				
Sm	18.49	24.68	18.34	24.43	18.68	25.98	19.36	21.19	32.02	31.25	28.23				
Eu	4.84	5.03	5.19	4.39	4.10	6.61	5.48	5.62	4.20	3.97	3.49				
Gd	14.37	19.34	13.83	18.45	14.13	19.69	14.52	16.74	23.95	23.92	21.14				
Tb	2.21	3.00	2.00	2.94	2.13	2.94	2.29	2.55	4.02	3.80	3.53				
Dy	11.26	15.49	9.77	15.63	11.29	14.78	11.80	13.04	22.47	21.50	19.93				
Ho	1.97	2.72	1.66	2.74	1.98	2.55	2.00	2.24	4.19	3.94	3.74				
Er	5.14	7.13	4.27	7.14	5.15	6.53	5.11	5.73	11.98	11.26	10.58				
Tm	0.77	1.08	0.59	1.09	0.75	0.99	0.75	0.82	1.95	1.83	1.70				
Yb	4.60	6.43	3.43	6.49	4.27	5.73	4.42	4.82	11.93	11.42	10.76				

续表 1  
Continued Table 1

样品 编号 岩性	非矿体样品										矿体样品			
	PM305/50-1 黑云母粗 面岩	PM305/64-1 黑云母粗 面岩	PM305/107-1 黑云母粗 面岩	PM306/1-1 黑云母粗 面岩	PM306/19-1 黑云母粗 面岩	PM306/9-1 粗面斑岩	PM305/92-1 黑云母粗 面岩	PM306/16-1 黑云母粗 面岩	PM305/9-1 粗面质含岩 晶屑凝灰岩	PM305/16-1 粗面质含岩 凝灰岩	PM305/102-1 粗面质含岩 屑凝灰岩			
Lu	0.69	0.96	0.49	0.97	0.64	0.85	0.65	0.71	1.85	1.70	1.67			
Y	55.75	75.27	48.47	75.71	54.22	66.80	55.52	60.26	123.30	116.80	109.80			
ΣREE	672.00	831.01	556.15	867.51	657.80	924.46	571.89	645.68	1267.08	1226.09	1064.94			
LREE	631.01	774.87	520.11	812.05	617.45	870.41	530.36	599.04	1184.73	1146.71	991.90			
HREE	41.00	56.14	36.04	55.45	40.34	54.05	41.53	46.64	82.35	79.39	73.05			
L/H	15.39	13.80	14.43	14.64	15.30	16.11	12.77	12.84	14.39	14.44	13.58			
(La/Yb) <sub>N</sub>	25.00	21.15	24.80	22.11	25.82	25.78	18.75	21.71	14.33	13.88	7.81			
(La/Sm) <sub>N</sub>	5.79	5.14	4.32	5.47	5.50	5.29	3.99	4.60	4.97	4.73	2.77			
(Gd/Yb) <sub>N</sub>	2.53	2.44	3.27	2.30	2.68	2.79	2.66	2.82	1.63	1.70	1.59			
δEu	0.88	0.68	0.96	0.61	0.74	0.86	0.96	0.88	0.45	0.43	0.42			
δCe	0.86	0.87	0.89	0.89	0.87	0.91	0.93	0.83	1.08	1.10	1.49			
Ba	1304.14	272.20	2432.28	114.80	143.00	1916.60	2062.09	1712.54	311.02	268.44	977.40			
Rb	77.93	56.29	81.27	51.72	75.57	42.26	61.70	65.27	130.20	185.20	114.90			
Sr	176.25	123.43	236.60	60.97	49.72	2250.78	272.62	198.55	347.36	353.42	576.58			
Zr	829.80	1387.90	755.60	1256.00	779.60	1014.20	806.40	945.20	2380.10	2503.10	2381.80			
Nb	237.20	296.50	187.20	271.70	190.40	273.70	177.50	212.20	604.90	638.40	597.90			
Th	13.57	15.49	12.03	14.26	7.11	17.49	11.72	14.78	50.69	57.41	39.23			
Pb	11.29	11.09	8.66	11.27	7.63	8.94	9.38	8.37	26.64	27.31	23.65			
Ga	27.03	38.75	31.07	39.56	33.50	24.43	30.21	31.95	35.94	47.19	43.72			
Ni	1.73	1.79	4.60	0.82	1.39	2.34	2.51	2.88	9.25	1.94	1.97			
V	84.80	45.03	73.78	26.59	27.49	102.62	64.14	64.20	56.58	53.44	51.23			
Cr	3.40	3.94	10.02	4.81	3.58	5.85	6.48	10.24	16.38	4.86	4.17			
Hf	16.83	26.68	16.70	27.86	15.61	20.57	18.14	20.35	51.30	53.51	51.31			
Ta	13.47	16.29	10.62	14.29	10.35	15.77	10.15	11.60	32.21	35.52	30.85			
U	2.63	2.19	2.46	1.92	1.35	3.35	2.20	2.07	11.40	16.38	7.59			
Cl	24.13	26.60	30.21	24.32	23.28	34.77	27.46	26.89	29.74	23.85	20.14			
F	1960.80	1590.70	1384.10	1231.60	1350.80	952.60	1229.10	1381.30	3248.00	3324.80	3710.10			
Zn	159.80	193.30	180.60	268.10	169.00	138.30	181.90	217.10	255.20	270.20	222.10			
Au	0.48	0.43	0.27	0.35	0.26	0.77	0.47	0.40	0.82	0.58	0.73			

注：主量元素含量单位为%，Au 元素的含量单位为 10<sup>-9</sup>，其它微量元素含量单位为 10<sup>-6</sup>。

矿体粗面岩样品  $\text{SiO}_2$  含量平均为 55.58%,  $\text{TiO}_2$  平均含量 1.06%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  平均含量 19.46%,  $\text{K}_2\text{O}$  平均含量 5.31%,  $\text{Na}_2\text{O}$  平均含量 5.68%,  $\text{K}_2\text{O}$  含量几乎与  $\text{Na}_2\text{O}$  相同。 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  平均含量 10.99%。 $\text{MgO}$  平均含量 2.62%,  $\text{CaO}$  平均含量 2.15%,  $\text{P}_2\text{O}_5$  平均含量 0.11%。与非矿体样品相比,矿体样品  $\text{SiO}_2$  略低,具有高的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{CaO}$  的含量和低的  $\text{P}_2\text{O}_5$  含量。

### 3.2 稀土元素特征

样品稀土元素数据见表 1。天宝地区非矿体样品稀土元素总量为  $556.15 \times 10^{-6} \sim 924.46 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $715.81 \times 10^{-6}$ , 轻稀土含量  $520.11 \times 10^{-6} \sim 870.41 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $669.41 \times 10^{-6}$ , 重稀土含量  $36.04 \times 10^{-6} \sim 56.14 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $46.40 \times 10^{-6}$ , LREE/HREE 为 12.77~16.11, 平均值为 14.41,  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  平均值为 23.14, 轻稀土元素强烈

富集,  $(\text{La}/\text{Sm})_N = 3.99 \sim 5.79$ , 平均值为 5.01,  $(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 2.30 \sim 3.72$ , 平均值为 2.69, 轻稀土元素分馏明显, 显著右倾(图 4a), 而重稀土元素分馏不明显。 $\text{Ce}$  平均含量为  $311.50 \times 10^{-6}$ 。 $\delta\text{Eu}$  为 0.61~0.96, 平均值为 0.82, 表现出弱的负 Eu 异常,  $\delta\text{Ce}$  为 0.83~0.93, 平均值为 0.88。

矿体样品稀土元素总量平均为  $1186.04 \times 10^{-6}$ , 轻稀土元素含量平均值为  $1107.78 \times 10^{-6}$ , 重稀土元素含量平均值为  $78.26 \times 10^{-6}$ , LREE/HREE 平均值为 14.14,  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  平均值为 12.01,  $(\text{La}/\text{Sm})_N$  平均值为 4.16,  $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$  平均值为 1.64,  $\text{Ce}$  的平均含量  $605.20 \times 10^{-6}$ ,  $\delta\text{Eu}$  平均值为 0.43,  $\delta\text{Ce}$  平均值为 1.22。与非矿体样品相比,其具有显著高的稀土元素总量、轻稀土元素总量及  $\text{Ce}$  含量(图 4a),  $\text{Eu}$  异常更为显著,  $\text{Ce}$  为正异常, 呈现单一稀土分异现象(杨志明等, 2003)。

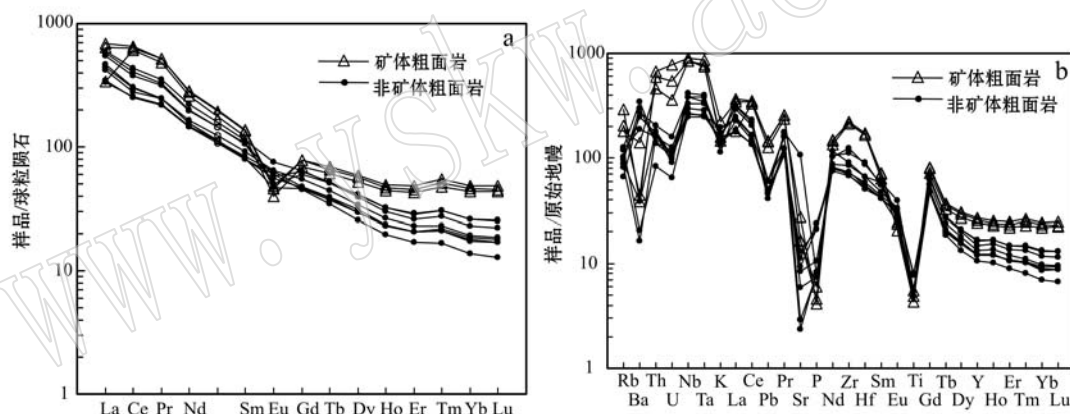


图 4 天宝地区粗面岩稀土元素标准化配分曲线(a, 球粒陨石标准化值采用 McLennan, 1985)和微量元素蛛网图(b, 原始地幔标准化值采用 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 4 REE distribution patterns (a, normalization values after McLennan, 1985) and spider diagram of trace element (b, normalization values after Sun and McDonough, 1989) of the trachyte in Tianbao area

### 3.3 微量元素特征

样品微量元素数据见表 1。非矿体样品微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 4b)总体显示高场强元素的富集, 如 Nb、Ta、Zr、Hf 等, 大离子亲石元素亏损, 呈“双背隆”的右倾谱型。强烈亏损 Sr、P、Ti, 相对比较亏损 Rb、K, 轻微亏损 Y。P 和 Ti 的亏损可能表明发生过磷灰石和钛铁矿的分离结晶, Ba 含量显示出一定的差异性, 可能是岩浆作用后期改造过程中 Ba 存在迁入与带出。矿体样品的微量元素特征与非矿体样品相似, 但矿体样品的高场强元素和重稀土标准化后比值全面高于非矿体样品, 在蛛

网图中则表现为曲线明显处于高位。P、Ti 的负异常更明显, 表明矿体样品磷灰石和钛铁矿的分离结晶作用更强。

## 4 讨论

### 4.1 岩石成因和起源

已有报道邻区碱质火山杂岩中包裹有大量幔源辉石岩捕虏体(黄月华等, 1992; 夏林圻等, 1994), 说明幔源岩浆上升速度很快, 岩浆上升过程中很难遭受地壳混染作用影响。粗面质熔岩样品无 Pb 的



正异常,且样品 Nb/U 值较高,平均为 89.25,明显高于大陆地壳的 Nb/U 值(9.7)(Campbell, 2002),基本排除本区粗面质岩浆存在地壳混染。在 Hacker 图解(图 5)中, SiO<sub>2</sub> 除与 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 的线性关系不明显

外,与其他氧化物具有明显线性关系,表明形成粗面岩的母岩浆经历了分离结晶作用。另外 Sr、Eu 的负异常也说明斜长石分离结晶作用的存在,尽管 Eu 负异常不太明显。

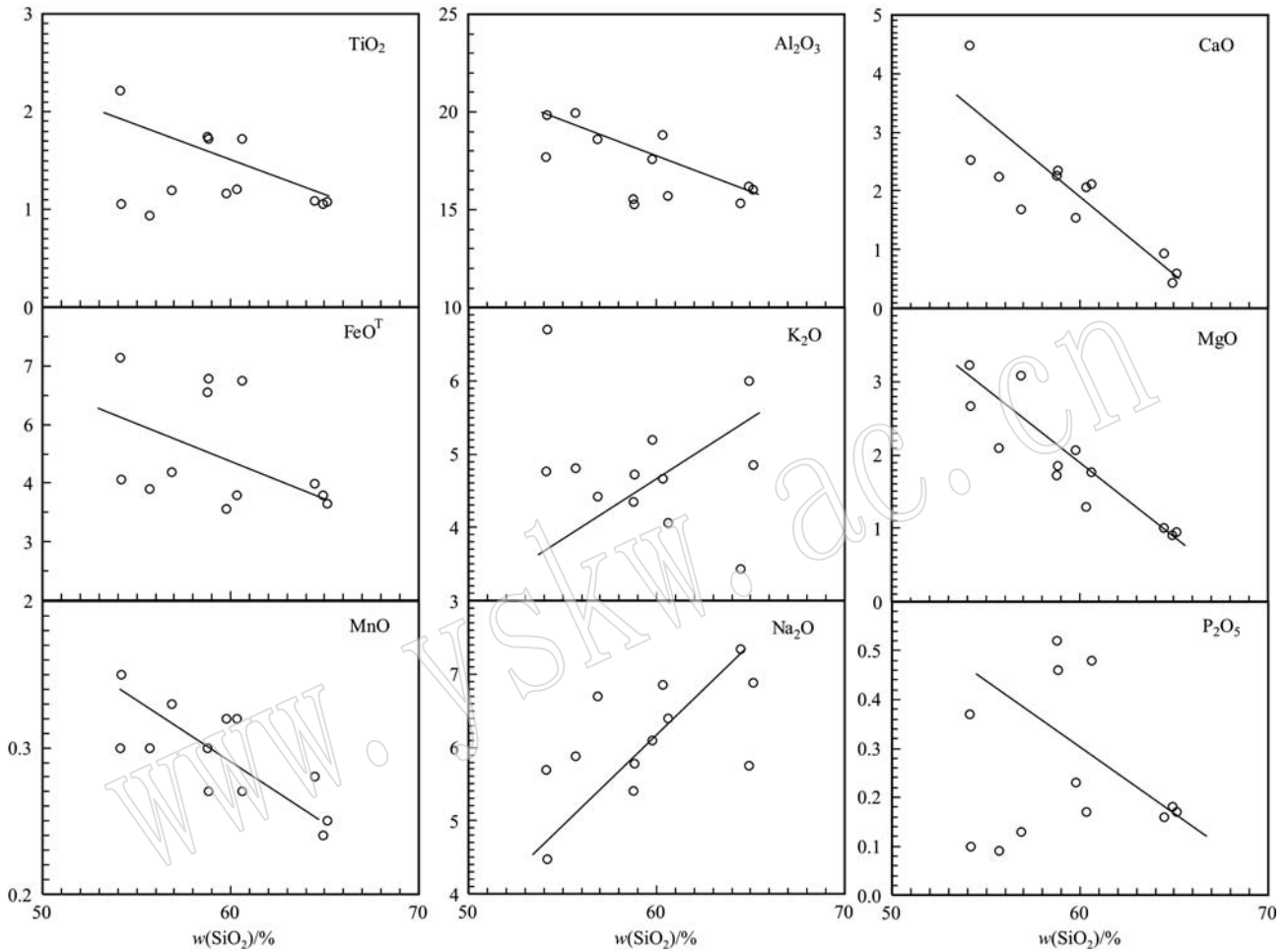


图 5 天宝地区粗面质火山岩 Hacker 图解

Fig. 5 Hacker diagrams of trachyte in Tianbao area

关于粗面岩的成因模式主要有：① 粗面岩与铁镁质岩为相同幔源岩浆不同演化阶段的产物(Olsen *et al.*, 1983); ② 粗面质岩浆独立起源于富集地幔的部分熔融(Lauri and Manttari, 2002); ③ 粗面质岩浆由幔源玄武质岩浆与壳源花岗质岩浆混合产生(Mingram *et al.*, 2000); ④ 加厚地壳底部局部部分熔融形成粗面质岩浆(Wyllie, 1977; Deng *et al.*, 1998)。本区粗面岩样品富集高场强元素,地球化学特征与洋岛玄武岩(OIB)相似,区域上与粗面岩对应的基性端员同样也表现出 OIB 地球化学属性,两个端员的岩石均具有相似的稀土和微量元素特征,两者应具有相同的岩浆源区,是同源岩浆演化的

产物,而不是独立起源于地幔。样品具有高的 Nb/U 值,没有地壳混染的现象,可以排除其是幔源玄武质岩浆与壳源花岗质岩浆混合的产物。加厚地壳底部部分熔融形成的是高压型粗面岩,而高压型粗面岩不具负 Eu 异常(Deng *et al.*, 1998),并且南秦岭地区在早古生代并不存在加厚地壳。综合分析后认为本区粗面岩起源于幔源玄武质岩浆的演化。

对于地幔源区的性质,前人做过大量同位素方面的研究。徐学义等(2001)认为岚皋地区粗面岩源区为含金云母和单斜辉石的交代地幔,且地幔主要组分为 HIMU 端员;王刚(2014)认为紫阳、岚皋等地粗面岩可能来源于富集地幔 HIMU 和 EM II 端员

的混合,并发生了地幔交代作用;Zhu 等(2016)认为庙垭正长岩岩浆源区地幔组分以 HIMU 端员为主,次为 EM I 端员。本区粗面岩岩浆源区地幔组分很可能也以 HIMU 端员为主。

粗面质岩浆中富集组分与成矿关系密切,而本区粗面岩具有类似于 OIB 的地球化学特征,其与 OIB 具有相似的源区特征。牛耀龄等(2010)认为 OIB 中的富集组分是岩浆起源的,而且最有可能与熔融程度很低的熔体的交代作用有关,不是来源于循环的陆壳和洋壳。这对于粗面岩浆中富集组分的来源同样适用。

#### 4.2 成岩构造环境

一般认为研究区所属的北大巴山地区双峰式岩浆岩是形成于地幔柱影响下的大陆裂谷环境,代表古生代扬子北缘的裂解事件(张成立等,2002)。大陆裂谷的形成除了与地幔柱有关的主动机制,还有一种与俯冲作用有关的被动机制,可在弧后形成拉张环境(马昌前等,2004a,2006)。王宗起等(2009)则认为秦岭洋存在双向俯冲,将大巴山地区划为岛弧杂岩带;王刚(2014)也认为紫阳地区粗面岩形成于岛弧相关的构造环境,而岚皋地区粗面岩则形成于相应的弧后拉张环境。近年来刘成新等(2013)、万俊等(2016)在对竹山地区梅子垭组基性火山岩、粗面岩研究后认为本区在早志留世为裂谷环境;Zhu 等(2016)通过对庙垭正长岩-碳酸岩杂岩体的研究认为本区是在地幔上涌影响下形成的裂谷环境。虽然对于本区的大地构造演化过程及动力学机制存在

较多的不同认识,但本区在早志留世处于拉张环境的构造背景是较为肯定的。区域上该粗面岩及侵入相的正长岩已获得较多的锆石 U-Pb 同位素年龄数据,其成岩年龄均在 440 Ma 左右(马昌前等,2004b; Xu *et al.*, 2008; 王刚,2014; 万俊等,2016; Zhu *et al.*, 2016),属早古生代志留纪,表明在早志留世位于扬子北缘的南秦岭北大巴山地区发育规模巨大的裂谷带。

本区粗面岩虽属钾玄岩系列,但  $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ ,是钠质高钾岩石而不是钾质岩(邓晋福,2004),高钾岩石中  $\text{Na}_2\text{O}$  可以比  $\text{K}_2\text{O}$  多(Le Maitre, 1989),故未采用钾质火山岩的判别图解,样品在中酸性火成岩构造环境判别图解(图 6)中均落入板内环境。本区粗面岩是玄武质岩浆通过分离结晶作用形成的,这种粗面岩属低压型粗面岩,而低压型粗面岩常常发育在洋岛和大陆裂谷环境(邓晋福,2004)。在区域地质方面,志留纪本区并不存在成熟大洋,粗面岩形成于洋岛环境可能性不大,故综合认为本区粗面岩形成于大陆裂谷环境。另外本区缺失志留纪之后的地层,暗示该裂谷在志留纪之后夭折,这可能与秦岭当时处于扬子板块向华北板块之下俯冲的收敛期(张国伟等,1997)、区域构造体制发生了转变有关。

#### 4.3 成岩与成矿关系

天宝砷矿床是全岩矿化的矿床,未达到工业品位(0.08%)的粗面岩类(非矿体粗面岩)的砷含量一般也可达到 0.024% 左右。3 个矿体样品的砷含量显著高于非矿体样品,高场强元素(Zr、Hf 等)及相关

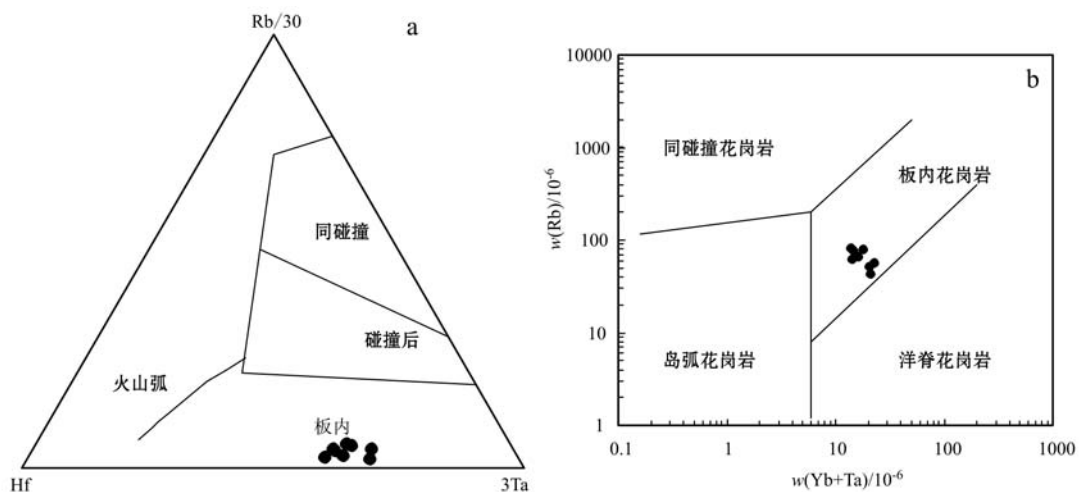


图 6 天宝地区粗面质熔岩类 Rb/30 - Hf - 3 Ta 图解(a, 据 Harris *et al.*, 1986)和 Rb - (Yb + Ta)图解(b, 据 Pearce, 1996)

Fig. 6 Rb/30 - Hf - 3 Ta diagram (a, after Harris *et al.*, 1986) and Rb - (Yb + Ta) diagram (b, after Pearce, 1996)

of trachyte in Tianbao area

的稀有稀土元素(Ta、Ce等)同样发生了强烈富集。一般来讲,高场强元素(HFSE)的富集与挥发分(F、CO<sub>2</sub>等)密切相关,并且铌钽等稀有金属矿床的矿化与钠长石化密切相关(王盘喜等,2015)。3个矿体粗面岩样品F元素的含量为 $3\ 248 \times 10^{-6} \sim 3\ 710 \times 10^{-6}$ ,非矿体粗面岩平均值 $1\ 375 \times 10^{-6}$ ,高出非矿体粗面岩2倍多。CO<sub>2</sub>的含量也相对较高,但Cl含量相差不大,并且在矿(化)体层位可见萤石、方解石、钠长石细脉,这些细脉的存在从侧面反映矿体粗面质火山岩中富含挥发分。据报道,邻区陕西大磨沟粗面岩中产有萤石矿(魏东等,2009),粗面岩富含挥发分为萤石矿的形成提供了物质基础。另外值得注意的一点是,3个矿体粗面岩样品具有相对明显的负 $\delta\text{Eu}$ 异常和正的 $\delta\text{Ce}$ 异常,其中正的 $\delta\text{Ce}$ 异常显然与矿化作用过程有关,这说明伴随着矿化作用过程,斜长石的分离结晶作用加强,究竟是何种机制造成Eu元素更亏损以及过程如何还需要进一步研究。

刘万亮等(2015)对天宝铈矿含矿岩石的电镜扫描研究认为,含铈矿物主要分布于钾长石、钛铁矿等早期结晶矿物的周缘或裂隙之中,说明成矿元素的进一步富集要略晚于岩石结晶。该铈矿床是全岩矿化的矿床,在岩浆形成初期就具有较高的铈含量,在火山韵律喷发沉积作用过程的中下部层位成矿元素进一步富集而达到工业品位,含矿岩性以粗面质熔结凝灰岩为主,上被炭硅质岩、凝灰岩层等覆盖。而其它火山岩相的岩石,包括火山角砾岩、火山碎屑岩、凝灰岩等层位却没有发生成矿元素的富集过程。矿床的这些产出特征与西澳大利亚的布罗克曼火山岩型稀有金属矿床(Ramsden *et al.*, 1993)相似,说明富F流体在火山喷发作用之后在一定部位进行运移和贮积,而作为矿(化)体顶板的炭硅质岩、凝灰岩则能较好的防止富F流体的逃逸,使得成矿过程更为充分,含铈矿物最终定位于粗面质熔结凝灰岩矿物之间的裂隙中或细脉形式穿插于岩石中。所以,天宝火山岩型铈矿在成因类型上可能属于过渡类型的矿床,兼具岩浆型和岩浆热液型矿床的特征。

邻区已发现的庙埡和杀熊洞矿床是与碳酸岩-正长岩杂岩体有关的稀土矿床(李石,1980,1991),这两个矿床的正长岩与本区粗面岩均具有一致的地球化学特征(Xu *et al.*, 2008; Xu *et al.*, 2010),它们可能是同源异相的产物。天宝铈矿与庙埡和杀熊洞铈-稀土矿床应属同一成矿系列的不同类型矿床,该矿的发现丰富了本区的矿床类型,对该稀有稀土

成矿带的下一步找矿工作有一定指导意义。

## 5 结论

(1) 天宝地区粗面岩属富钠高钾的碱性岩,富集高场强元素如Nb、Ta、Zr、Hf等,亏损Sr、P、Ti等,与OIB具相似的地球化学特征,起源于幔源玄武质岩浆的演化,是形成于大陆裂谷环境的低压型粗面岩。

(2) 矿体粗面岩类(熔结凝灰岩)与非矿体粗面岩(粗面质熔岩)相比,具有略低的SiO<sub>2</sub>含量、高的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>O、CaO含量,低的P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量,更为富集的高场强元素(Nb、Ta、Zr、Hf)和轻稀土元素(La、Ce)、更强的负Eu异常、正Ce异常,略强的P、Ti负异常以及更高的挥发分(F、CO<sub>2</sub>)含量。

(3) 天宝铈矿的形成与富F流体的贮积、运移密切相关,矿体层位发育萤石、方解石和钠长石细脉,含铈矿物就位于矿体粗面岩(粗面质熔结凝灰岩)早期矿物的边缘、裂隙或晚期细脉中。矿化阶段处于岩浆作用晚期,属火山岩型稀有金属矿床,兼具岩浆型和岩浆热液型矿床的特征。

## References

- Campbell I H. 2002. Implications of Nb/U, Th/U and Sm/Nd in plume magmas for the relationship between continental and oceanic crust formation and the depleted mantle[J]. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 66(9): 1 651~1 661.
- Chen Pupu, Yin Jingwu, Nie Xiao, *et al.* 2014. Study on the Mineralogy of aeschynite from alkaline trachyte in Zhujiayuan of Pingli County, Shaanxi Province[J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 33(1): 46~54(in Chinese with English abstract).
- Deng Jinfu, Luo Zhaohua, Su Shangguo, *et al.* 2004. Petrogenesis, Tectonic Setting and Mineralization[M]. Beijing: Geological Publishing House, 381(in Chinese).
- Deng Jinfu, Luo Zhaohua, Zhao Hailing, *et al.* 1998. Trachyte and syenite: petrogenesis constrained by the petrological phase equilibrium[J]. *Proceedings of International Geoscience Conference*, 754~757.
- Deng Shengbo, Wang Weihong and Wang Xianjun. 2003. The geological characteristics of the alkali-intermediate rocks and their ore-bearing(columbotantalite) features in the Ziyang-Langao Areas[J]. *Shaanxi Geology*, 21(2): 19~26(in Chinese with English ab-

- stract).
- Duan Xiangyi and Wang Haiyuan. 2007. Geological and geochemical characteristics of the Nb deposit in some area of Ankang, Shaanxi [J]. *Mineral Resources and Geology*, 21 (6): 657~661(in Chinese with English abstract).
- Harris N B W, Pearce J A and Tindle A G. 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism[J]. *Geological Society of London Special Publications*, 19(5): 67~81.
- Huang Yuehua, Ren Youxiang, Xia Linqi, *et al.* 1992. Early Paleozoic bimode igneous suite in Northern Daba Mountains—Gaotan diabase and Haopin trachyte as examples [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31 (3): 245~250(in Chinese with English abstract).
- Jia Runxing, He Ying, Guo Jian, *et al.* 2004. Geochemical characteristics of rare metal and REE for subvolcanic alkaline rock in Hongyang area, Zhenping, Shaanxi[J]. *Geology and Exploration*, 40 (5): 56~60(in Chinese with English abstract).
- Lauri L S and Manttari I. 2002. The Kynsijarvi quartz alkali feldspar syenite, Koillismaa, eastern Finland—Silicic magmatism associated with 2.44 Ga continental rifting[J]. *Precambrian Research*, 119: 121~140.
- Le Maitre R W. 1989. *A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks*[M]. Blackwell.
- Li Shi. 1980. Geochemical features and petrogenesis of Miaoya carbonatites, Hubei[J]. *Geological Laboratory*, (4): 345~355 (in Chinese with English abstract).
- Li Shi. 1991. Geochemical and petrogenesis of the Shaxiongdong carbonatite complex, Hubei Province[J]. *Geochemistry*, (3): 245~254(in Chinese with English abstract).
- Liu Chengxin, Hu Zhengxiang, Mao Xinwu, *et al.* 2013. The discovery of oceanic island basalts in the Zhushan area, southern Qinling orogenic belt and its tectonic significance[J]. *Resources Environment & Engineering*, 27(2): 109~108 (in Chinese with English abstract).
- Liu Wanliang, Liu Chengxin, Yang Cheng, *et al.* 2015. Geological characteristics and prospecting potential of niobium ore of Tianbao area, Zhuxi, southern Qinling[J]. *Resources Environment & Engineering*, 29(6): 779~784(in Chinese with English abstract).
- Ma Changqian, She Zhenbing, Xu Pin, *et al.* 2004b. Silurian A-type granitoids in the southern margin of the Tongbai-Dabieshan: Evidence from SHRIMP zircon geochronology and geochemistry[J]. *Science in China Ser. D Earth Sciences*, 34 (12): 1100~1110 (in Chinese).
- Ma Changqian, She Zhenbing, Zhang Jinyang, *et al.* 2006. Crustal roots, orogenic heat and magmatism[J]. *Earth Science Frontiers*, 13(2): 130~139(in Chinese with English abstract).
- McLennan B. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*[M]. Blackwell Scientific Publication.
- Middlemost E A K. 1985. *Magma and Magmatic Rocks: An Introduction to Igneous Petrology*[M]. Longman.
- Mingram B, Trumbull R B, Littman S, *et al.* 2000. A petrogenetic study of anorogenic felsic magmatism in the Cretaceous Paresis ring complex, Namibia: evidence for mixing of crust and mantle-derived components[J]. *Lithos*, 54: 1~22.
- Niu Yaoling. 2010. Some basic concepts and problems on the petrogenesis of intra-plate ocean island basalts [J]. *Chinese Sci. Bull.*, 55(2): 103~114(in Chinese).
- Olsen B A, McSween H Y and Sando T W. 1983. Petrogenesis of the concord gabbro-syenite complex, North Carolina [J]. *American Mineralogist*, 68: 315~333.
- Pearce J A. 1996. Source and settings of granitic rocks[J]. *Episodes*, 19: 120~125.
- Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63~81.
- Qiu Jiaxiang. 1993. *Alkaline Rock of Qinba*[M]. Geological Publishing House, 1~183(in Chinese).
- Ramsden A R, French D H and Chalmers D I. 1993. Volcanic-hosted rare-metals deposit at Brockman, Western Australia[J]. *Mineralium Deposita*, 28(1): 1~12.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[A]. Sauder A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins*[C]. *Geological Society Special Publication*, 42 (5): 313~345.
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. The geochemical evolution of the ocean crust[J]. *Review Geophysics*, 33 (6): 241~265.
- Wan Jun, Liu Chengxin, Yang Cheng, *et al.* 2016. Geochemical characteristics and LA-ICP-MS zircon U-Pb age of the trachytic volcanic rocks in Zhushan area of Southern Qinling Mountains and their significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 35(7): 1134~1143(in Chinese with English abstract).
- Wang Cunzhi, Yang Kunguang, Xu Yang, *et al.* 2009. Geochemical and LA-ICP-MS zircon U-Pb age of basic dike swarms in north Daba Mountains and its tectonic significance[J]. *Geological Science*

- and Technology Information, 28(3): 19~26(in Chinese with English abstract).
- Wang Gang. 2014. Metallogeny of the Mesozoic and Paleozoic Volcanic Igneous Event in Ziyang-Langao Areas, North Daba Mountain[D]. China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Wang Panxi and Bao Minwei. 2015. General situation and prospecting revelation of tantalum-niobium rare metal deposits in China[J]. Metal Mine, 44(6): 92~97(in Chinese with English abstract).
- Wang Yunbin. 2007. Geological Characteristics and Significance of Early Paleozoic Alkali Volcanic in South-Qinling, Langao-Pingli, Shaanxi Province[D]. Chang'an University, 1~68(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).
- Wei Dong, Chen Ximin and Wu Bangchao. 2009. Geological characteristics and ore prospects of zinc-fluorite deposit in Pingli Damoguo, Shaanxi[J]. Northwest Geology, 42(3): 77~85(in Chinese with English abstract).
- Wu Min, Xu Cheng, Wang Linjun, *et al.* 2011. A preliminary study on genesis of REE deposit in Miaoya[J]. Acta Mineral Sinica, 31(3): 478~484(in Chinese with English abstract).
- Wyllie P J. 1977. Crustal anatexis: An experimental review[J]. Tectonophysics, 43: 41~71.
- Xia Linqi, Xia Zhuchun, Zhang Cheng, *et al.* 1994. Petrogeochemistry of Alkali Basic, Ultrabasic Subvolcanic Complex from Northern Daba Mts, China[M]. Geological Publishing House, 1~95(in Chinese with English abstract).
- Xia Zhuchun, Xia Linqi and Zhang Cheng. 1992. The study of pyroxene minerals of alkali-basic-ultrabasic subvolcanic complex from northern Daba MTS[J]. Northwest Geoscience, 13(2): 23~30(in Chinese with English abstract).
- Xu Cheng, Campbell I H, Allen C M, *et al.* 2008. U-Pb zircon age, geochemical and isotopic characteristics of carbonatite and syenite complexes from the Shaxiongdong, China[J]. Lithos, 105(1~2): 118~128.
- Xu Cheng, Kynicky J, Chakhmouradian A R, *et al.* 2010. Trace-element modeling of the magmatic evolution of rare-earth-rich carbonatite from the Miaoya deposit, Central China[J]. Lithos, 118(1~2): 145~155.
- Xu Xueyi, Xia Linqi, Xia Zhuchun, *et al.* 2001. Geochemical characteristics and petrogenesis of the Early Paleozoic alkali lamprophyre complex from Langao County[J]. Acta Geoscientia Sinica, 22(1): 55~60(in Chinese with English abstract).
- Xu Zhigang, Chen Yuchuan, Wang Denghong, *et al.* 2008. The Scheme of the Classification of the Minerogenetic Units in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~145(in Chinese with English abstract).
- Yang Zhuming, Song Rengui, Tao Kejie, *et al.* 2003. Rare earth compositional variation of aeschynite-group minerals[J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 21(6): 716~720(in Chinese with English abstract).
- Yu Xuehui. 1992. The relation of alkaline rocks in the Qinling-Daba Mountains region and the tectonic evolution of the orogen and their features[J]. Regional Geology of China, 3: 233~240(in Chinese with English abstract).
- Zhang Chengli, Gao Shan, Yuan Honglin, *et al.* 2007. the Early Paleozoic mantle properties of South Qinling: Sr-Nd-Pb isotope evidences from super- mafic, mafic dike and volcanic rocks[J]. Science in China Ser. D Earth Sciences, 37(7): 857~865(in Chinese).
- Zhang Chengli, Gao Shan, Zhang Guowei, *et al.* 2002. The geochemistry and geological significance of the Early Paleozoic alkali dyke swarms in South Qinling[J]. Science in China: Earth Sciences, 32(10): 819~829(in Chinese).
- Zhang Guowei, Dong Yunpeng and Yao Anping. 1997. The crustal compositions, structures and tectonic evolution of the Qinling orogenic belt[J]. Geology of Shaanxi, 15(2): 1~14(in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Meng Qingren and Lai Shaocong. 1995. Structural tectonics of the Qinling Orogenic Belt[J]. Science in Chinese, 25(9): 994~1003(in Chinese).
- Zhu J, Wang L, Peng S, *et al.* 2016. U-Pb zircon age, geochemical and isotopic characteristics of the Miaoya syenite and carbonatite complex, central China[J]. Geological Journal, Doi: 10.1002/gj.2859.

## 附中文参考文献

- 陈浦浦, 尹京武, 聂满, 等. 2014. 陕西省平利县朱家院碱性岩中易解石矿物学研究[J]. 电子显微学报, 33(1): 46~54.
- 邓晋福. 2004. 岩石成因、构造环境与成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 1~381.
- 邓盛波, 王炜红, 汪显均. 2003. 紫阳-岚皋地区碱中性岩地质特征及其含矿(铌钽)性研究[J]. 陕西地质, 21(2): 19~26.
- 段湘益, 王海元. 2007. 陕西省安康某地区铌矿地质地球化学特征

- [J]. 矿产与地质, 21(6): 657~661.
- 黄月华, 任有祥, 夏林圻, 等. 1992. 北大巴山早古生代双模式火成岩套: 以高滩辉绿岩和蒿坪粗面岩为例[J]. 岩石学报, 31(3): 245~250.
- 贾润幸, 赫英, 郭键, 等. 2004. 陕西镇坪洪阳地区碱性次火山岩中稀有稀土元素地球化学特征[J]. 地质与勘探, 40(5): 56~60.
- 李石. 1980. 湖北庙垭碳酸岩地球化学特征及岩石成因探讨[J]. 地球化学, (4): 345~355.
- 李石. 1991. 湖北杀熊洞碳酸岩杂岩体地球化学特征及其成因探讨[J]. 地球化学, (3): 245~254.
- 刘万亮, 刘成新, 杨成, 等. 2015. 南秦岭竹溪天宝一带钨矿地质特征及找矿前景分析[J]. 资源环境与工程, 29(6): 779~784.
- 刘成新, 胡正祥, 毛新武, 等. 2013. 南秦岭竹山地区洋岛型玄武岩的发现及构造意义[J]. 资源环境与工程, 27(2): 109~118.
- 马昌前, 明厚利, 杨坤光. 2004. 大别山北麓的奥陶纪岩浆弧: 侵入岩年代学和地球化学证据[J]. 岩石学报, 20(3): 393~402.
- 马昌前, 余振兵, 许聘, 等. 2004. 桐柏-大别山南缘的志留纪 A 型花岗岩类: SHRIMP 锆石年代学和地球化学证据[J]. 中国科学: 地球科学, 34(12): 1100~1110.
- 马昌前, 余振兵, 张金阳, 等. 2006. 地壳根-造山热与岩浆作用[J]. 地学前缘, 13(2): 130~139.
- 牛耀龄. 2010. 板内洋岛玄武岩(OIB)成因的一些基本概念和存在的问题[J]. 科学通报, 55(2): 103~114.
- 邱家骧. 1993. 秦巴碱性岩[M]. 北京: 地质出版社.
- 万俊, 刘成新, 杨成, 等. 2016. 南秦岭竹山地区粗面质火山岩地球化学特征、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其大地构造意义[J]. 地质通报, 35(7): 1134~1143.
- 王存智, 杨坤光, 徐扬, 等. 2009. 北大巴基性岩墙群地球化学特征、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其大地构造意义[J]. 地质科技情报, 28(3): 19~26.
- 王刚. 2014. 北大巴山紫阳-岚皋地区古生代火山岩浆事件与中生代成矿作用[D]. 中国地质大学(北京).
- 王盘喜, 包民伟. 2015. 我国钽铌等稀有金属矿概况及找矿启示[J]. 金属矿山, 44(6): 92~97.
- 王云斌. 2007. 陕西省岚皋-平利一带古生代碱性火山岩的特征及地质意义[D]. 长安大学.
- 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.
- 魏东, 陈西民, 吴邦朝. 2009. 陕西平利大磨沟锌、萤石矿床地质特征及找矿前景分析[J]. 西北地质, 42(3): 77~85.
- 吴敏, 许成, 王林均, 等. 2011. 庙垭碳酸岩型稀土矿床成矿过程初探[J]. 矿物学报, 31(3): 478~484.
- 夏林圻. 1994. 北大巴山碱质基性-超基性潜火山杂岩岩[M]. 地质出版社.
- 夏祖春, 夏林圻, 张诚. 1992. 北大巴山碱质基性-超基性潜火山杂岩的辉石矿物研究[J]. 西北地质科学, 13(2): 23~30.
- 徐学义, 夏林圻, 夏祖春, 等. 2001. 岚皋早古生代碱质煌斑杂岩地球化学特征及成因探讨[J]. 地球学报, 22(1): 55~60.
- 徐志刚. 2008. 中国成矿区带划分方案[M]. 北京: 地质出版社.
- 杨志明, 宋仁奎, 陶克捷, 等. 2003. 易解石族矿物的稀土成分变化特征[J]. 中国稀土学报, 21(6): 716~720.
- 喻学惠. 1992. 秦巴地区碱性岩与造山带构造演化关系及其特征[J]. 中国区域地质, 3: 233~240.
- 张成立, 高山, 袁洪林, 等. 2007. 南秦岭早古生代地幔性质: 来自超镁铁质、镁铁质岩脉及火山岩的 Sr-Nd-Pb 同位素证据[J]. 中国科学, 37(7): 857~865.
- 张成立, 高山, 张国伟, 等. 2002. 南秦岭早古生代碱性岩墙群的地球化学及其地质意义[J]. 中国科学: 地球科学, 32(10): 819~829.
- 张国伟, 董云鹏, 姚安平. 1997. 秦岭造山带基本组成与结构及其构造演化[J]. 陕西地质, 15(2): 1~14.
- 张国伟, 孟庆任, 赖绍聪. 1995. 秦岭造山带的结构构造[J]. 中国科学 B 辑, 25(9): 994~1003.