

# 南秦岭勉略带铔厂沟火山岩锆石 U-Pb 年代学及地球化学研究\*

林振文<sup>1,2</sup> 秦艳<sup>1\*\*</sup> 周振菊<sup>3</sup> 岳素伟<sup>1,2</sup> 曾庆涛<sup>4</sup> 王立新<sup>5</sup>

LIN ZhenWen<sup>1,2</sup>, QIN Yan<sup>1\*\*</sup>, ZHOU ZhenJu<sup>3</sup>, YUE SuWei<sup>1,2</sup>, ZENG QingTao<sup>4</sup> and WANG LiXin<sup>5</sup>

1. 中国科学院广州地球化学研究所 成矿动力学重点实验室 广州 510640

2. 中国科学院大学 北京 100049

3. 北京大学 造山带与地壳演化教育部重点实验室 北京 100871

4. Center for Exploration Targeting, University of Western Australia, Perth 6009

5. 陕西省略阳县铔厂沟金矿 略阳 724312

1. Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Key Laboratory of Crustal and Orogenic Evolution, Peking University, Beijing 100871, China

4. School of Earth and Environment, University of Western Australia, Perth, WA 6009, Australia

5. Huachanggou Gold Mine of Lueyang County, Shaanxi Province, Lueyang 724312, China

2012-09-20 收稿, 2012-12-14 改回.

Lin ZW, Qin Y, Zhou ZJ, Yue SW, Zeng QT and Wang LX. 2013. Zircon U-Pb dating and geochemistry of the volcanic rocks at Huachanggou area, Mian-Lue suture, South Qinling. *Acta Petrologica Sinica*, 29(1): 83–94

**Abstract** The Huachanggou volcanic rocks in Southwest Shaanxi are mainly dacite (~90vol%) structurally interlayered with basalt tectonic lenses (~10vol%). The basalts have SiO<sub>2</sub> contents of 43.6%~54.7%, characterized by low contents of K and Ti, and high contents of Na and Mg. Their REE concentrations range  $24 \times 10^{-6}$ ~ $29 \times 10^{-6}$  with slightly enriched LREE and MREE, and slightly positive Eu and Sr anomalies. They show positive Rb and Ba anomalies and negative Nb and Zr anomalies, and yield (La/Yb)<sub>N</sub>, Th/Yb, Th/Nb, Nb/La and Hf/Th ratios of 1.81~2.87, 0.19~0.23, 0.11~0.2, 0.26~0.7 and 0.50~0.67, respectively, resembling the characteristics of sub-alkaline arc basalts. The dacites have SiO<sub>2</sub> contents of 59.5%~72.3%, REE concentrations of  $116 \times 10^{-6}$ ~ $187 \times 10^{-6}$  and negative Eu anomalies, and are rich in LILE (e.g. Rb, Ba, Th and K), but depleted in HFSE (e.g. Nb, P, Ti and Ta), similar to the volcanic rocks developed in volcanic arcs. The basalt sample yields zircon SHRIMP U-Pb age of  $801.7 \pm 4.7$  Ma (MSWD = 1.18; n = 12); which is same to the zircon LA-ICP-MS U-Pb age of  $802.1 \pm 5.3$  Ma (MSWD = 1.02; n = 19) obtained from the dacite. Hence, the volcanic rocks at Huachanggou area constitute a sub-alkaline basalt-to-dacite suite which suggests that there existed a southward subduction of an oceanic plate beneath the Yangtze craton in Neoproterozoic; and the Devonian sedimentary strata, together with their structurally sandwiched slices of the Neoproterozoic volcanic rocks, form a tectonic mélange resulted from Late Paleozoic-Triassic suturing of the Mian-Lue Ocean.

**Key words** Mian-Lue suture; Arc volcanic rocks; Zircon U-Pb age; Geochemistry; Neoproterozoic

**摘要** 陕西省西南部铔厂沟火山岩以英安岩为主(~90vol%),夹玄武岩构造透镜体(~10vol%)。玄武岩 SiO<sub>2</sub> 含量为 43.6%~54.7%,具有低 K、Ti,高 Na、Mg 的特征;稀土总量为  $24 \times 10^{-6}$ ~ $29 \times 10^{-6}$ ,中稀土轻微富集, Eu、Sr 轻微正异常;具有正 Rb、Ba 异常及负 Nb、Zr 异常, La<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub> 值为 1.81~2.87, Th/Yb 值为 0.19~0.23, Th/Nb 值为 0.11~0.20, Nb/La 值为 0.26~0.70, Hf/Th 值为 0.50~0.67,显示亚碱性弧玄武岩的特征。英安岩 SiO<sub>2</sub> 含量为 59.5%~72.3%,稀土总量较低( $116 \times$

\* 本文受国家自然科学基金项目(40730421、40425006)和全国危机矿山接替资源找矿项目(20089934)联合资助。

第一作者简介:林振文,男,1986年生,博士生,矿床学专业, E-mail: linzhenwen9704@163.com

\*\* 通讯作者:秦艳,女,1979年生,副研究员,地球化学专业, E-mail: qinyan@gig.ac.cn

$10^{-6} \sim 187 \times 10^{-6}$ ) ,为右倾式配分模式 ,Eu 负异常 ,富集大离子亲石元素(如 Rb、Ba、Th、K 等) ,亏损高场强元素(如 Nb、P、Ti、Ta 等) ,显示弧火山岩地球化学特征。获得玄武岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为  $801.7 \pm 4.7\text{Ma}$  (MSWD = 1.18; n = 12) ,英安岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为  $802.1 \pm 5.3\text{Ma}$  (MSWD = 1.02; n = 19) ,二者在误差范围内一致。因此 ,铔厂沟火山岩是一套火山弧环境的亚碱性玄武质-英安质火山岩组合 ,表明新元古代曾有大洋板块向南俯冲到扬子古板块北缘之下 ;这套火山岩裹挟于泥盆系沉积地层中 ,与泥盆系地层一起 ,共同组成了一套由晚古生代-三叠纪勉略洋闭合所致的构造混杂岩带。

关键词 勉略缝合带 ; 弧火山岩 ; 锆石 U-Pb 年代学 ; 地球化学 ; 新元古代

中图法分类号 P588.142; P588.145; P597.3

## 1 引言

勉略(勉县-略阳)构造混杂带(以下简称勉略带)是秦岭造山带内新厘定的除商丹缝合带外的另一条重要板块缝合带(图 1 b) (Zhang *et al.* , 1995; 陈衍景, 2010)。带内火山岩组成复杂 ,包含了洋壳蛇绿岩、岛弧火山岩、洋岛火山岩、双峰式火山岩等多种类型的岩块(夏林圻等, 1996; 李曙光等, 1996, 2003; 赖绍聪等, 1997, 1998, 2003; 许继峰, 2000; Xu *et al.* , 2000, 2002; 张宗清等, 2005; 闫全人等, 2007) ,其性质及形成时代一直是学界研究热点与争论焦点。前人多认为这些火山岩块形成于晚古生代(Zhang *et al.* , 1995; 张国伟等, 1995, 1996, 2003; 李曙光等, 1996, 2003; 赖绍聪等, 2003; 孙卫东等, 2000; 赖绍聪和秦江锋, 2010) ;而近年来的同位素年代学研究支持其形成于新元古代(张宗清等, 2005; 闫全人等, 2007) ,或至少存在着新元古代的火山岩块。这些争议表明勉略带岩浆及构造活动过程的复杂性。

铔厂沟火山岩位于勉略带南缘 ,南秦岭微陆块与碧口地块接触断层的上盘(图 1 c) ,呈近东西向出露于三河口群踏坡岩片中。值得一提的是 ,陕西省铔厂沟金矿床(典型的造山型金矿床)主矿体即赋存在其中的玄武岩透镜体中(周振菊等, 2011)。本文对铔厂沟火山岩进行了岩石地球化学与锆石 U-Pb 年龄研究 ,以探讨铔厂沟火山岩的地球化学特征、形成年代及构造背景。

## 2 火山岩地质特征

铔厂沟火山岩厚度约 300m ,由中酸性火山岩裹挟着 20 多个玄武岩构造透镜体组成(图 1 c) ,玄武岩与中酸性岩的体积比例约为 1 : 9。玄武岩透镜体 NWW-EW 向展布 ,长 135 ~ 600m 不等 ,长宽比约为 15 : 1 ,延深(沿倾向)大于延长(沿走向)。

玄武岩经历中浅变质(绿片岩相)作用 ,呈墨绿(绿帘石化) - 紫红色(含赤铁矿所致)(图 2 a-c, e) ,并有强烈剪切变形(图 2 a, b, e)。大部分基性岩块由于后期不同程度的热液蚀变而呈黄绿色或黄色(绿泥石化、碳酸盐化及绢云母化)(图 2 c)。岩石主要为变余间隐结构、变余交织结构、块状、杏仁状、斑杂状及定向构造(图 2 b, d, e)。岩石中变斑

晶少而小 ,含量在 1% 左右 ,以钠-更长石为主 ,伴有绢云母化。基质以板条状及糖粒状重结晶钠长石(50%)、绿帘石(20%)、绿泥石(5%)和赤铁矿(15%)(图 2 e)等变质矿物为主 ,副矿物有磷灰石、金红石等。杏仁体主要由石英、绿帘石、绿泥石及方解石组成 ,多经强烈剪切作用而定向排列(图 2 b)。玄武岩多发生绿泥石化、碳酸盐化、钠长石化、钾化、硅化、绢云母化 ,并伴随有金矿化而形成矿体(周振菊等, 2011)。本文用于地球化学测试的样品均采用墨绿色或紫红色弱变质的岩石并剔除杏仁体后进行各项分析测试。

中酸性火山岩(图 2 c, f)由中酸性凝灰质火山岩夹酸性熔岩构成。凝灰质火山岩中火山碎屑以晶屑为主 ,包括斜长石、钾长石、石英 ,棱角分明(图 2 f) ,基质主要由白云母及长英质矿物组成(图 2 f)。岩石构造变形强烈 ,呈千枚状构造 ,可见云母定向排列与石英拉丝结构 ,后期静态重结晶。酸性熔岩的主要矿物有斜长石(20% ~ 25%)、钾长石(30%)、石英(30% ~ 35%) ,斑状结构 ,经强烈构造变形后形成长英质糜棱岩。

玄武岩构造透镜体“右行斜列”裹挟于中酸性火山岩中(图 1 c) ,断层滑脱接触(图 2 c) ,两者均强烈面理化 ,且面理呈大角度相交 ,可能是大型剪切作用造成的。

## 3 样品及分析方法

全岩测试样品采自矿区坑道 1150 中段(1150-28-2、H-1150-13、1150-28-9、1150-28-4、1150-16-7)、1110 中段(1110-11)以及矿区地表 144 号勘探线附近(H-P2-7、H-P2-11、H-P2-13)。通过镜下观察 ,基性岩选取墨绿色或紫红色弱蚀变的样品并剔除杏仁体后进行各项分析测试 ,中酸性火山岩选取弱蚀变样品进行各项分析测试。主量元素采用硼酸锂/偏硼酸锂熔融 ,X 射线荧光光谱法(XRF)分析 ,精度优于 0.5%。微量元素和稀土元素采用多酸(四酸)消解 ,电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)分析 ,相对标准偏差小于 5%。岩石地球化学成分分析在澳实分析检测(广州)有限公司完成。

为准确厘定铔厂沟矿区火山岩时代 ,本文分别对基性及中酸性火山岩进行了锆石 U-Pb 定年。用于 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年的玄武岩样品(W-2)采于矿区 1150 中段 7 号勘探线 ,岩石呈紫红色 ,轻微蚀变。用于 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年的酸性火山岩样品(H-P4-3)已变质为石英绢云千枚岩 ,采样点坐标为 E:  $114^{\circ}46'3.088''$  ,N:  $33^{\circ}18'29.826''$ 。岩石经碎

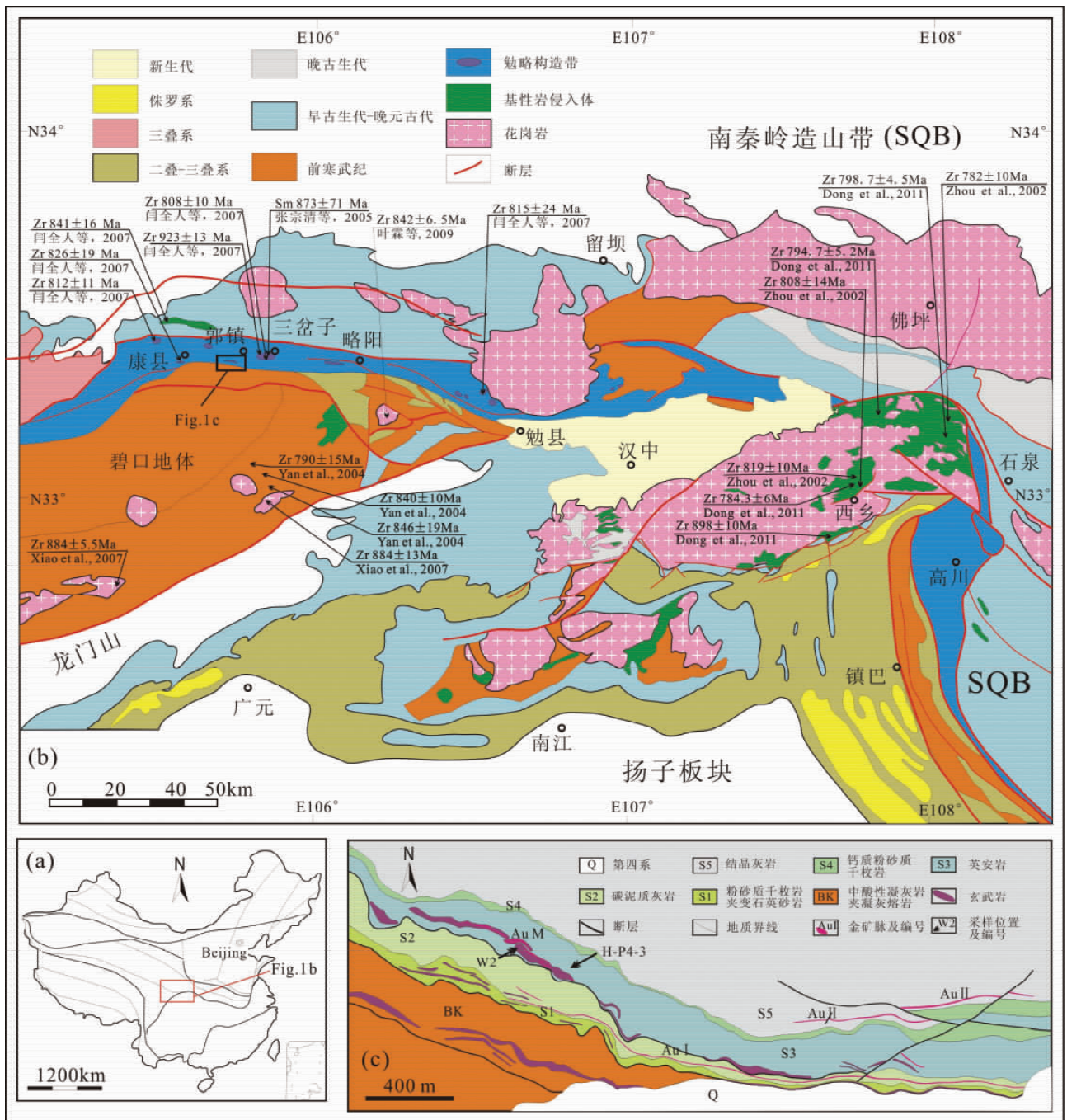


图1 勉略缝合带钒厂沟金矿区火山岩地质图

(a) 秦岭造山带位置; (b) 区域地质图 指示新元古代侵入体分布及钒厂沟金矿床位置(据 Dong *et al.*, 2011 修改); (c) 钒厂沟金矿床地质简图(据周振菊等 2011 修改)

Fig.1 Geological map of the volcanic rocks at Huachanggou Au deposit , Mian-Lue suture

(a) tectonic map of China , showing the location of the Qinling Orogen; (b) regional geological map , showing Neoproterozoic intrusion distribution and the location of the Huachanggou Au deposit ( after Dong *et al.* , 2011); (c) simplified geologic map of the Huachanggou Au deposit ( modified after Zhou *et al.* , 2011)

样、磁选及重液选等选出锆石 经人工提纯后 制成环氧树脂样品靶并抛光。利用光学显微镜及电子探针阴极发光( CL) 观察选出晶形较好的、无裂纹及包裹体不发育的锆石晶体进

行测试。

锆石 SHRIMP U-Pb 测试在西澳大利亚大学 SHRIMP II 仪器上进行,其操作流程及数据处理详见 Stern *et al.*

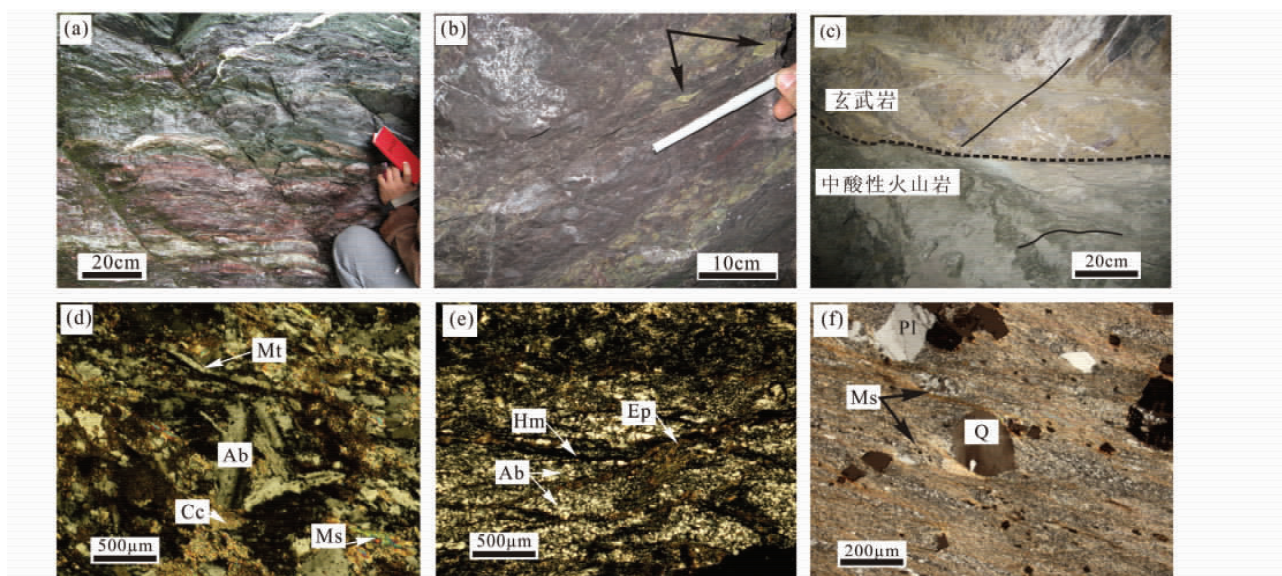


图2 铔厂沟火山岩岩相学照片

(a) 片理化玄武岩, 呈紫红色及墨绿色; (b) 紫红色玄武岩呈杏仁构造, 杏仁体被剪切成眼球状; (c) 中酸性火山岩与玄武岩断层接触(虚线), 二者线理方向(实线所示)不同; (d) 玄武岩显微照片(正交偏光), 间隐结构; (e) 玄武岩显微照片(正交偏光), 岩石发生韧性变形, 矿物发生细粒化, 其中细粒钠长石集合体呈透镜体状分布, 细粒赤铁矿与绿帘石呈条带状分布; (f) 中酸性火山岩显微照片(正交偏光), 岩石发生韧性变形, 斑晶为长石和石英, 基质为石英和白云母。Ab-钠长石; Cc-方解石; Ep-绿帘石; Hm-赤铁矿; Ms-白云母; Mt-磁铁矿; Pl-斜长石; Q-石英

Fig. 2 Photographs showing petrography of the Huachangou volcanic rocks

(a) -foliated basalt presents fuchsia and dark green; (b) -fuchsia basalt shows amygdaloidal structure, amygdaloid bodies were sheared to eyeball shaped; (c) -fault contact between intermediate-felsic and basalt (dashed line), the lineations of the two (showed by solid line) were different; (d) -micrograph of basalt (CPL), intersertal texture; (e) -micrograph of basalt (CPL), showing ductile deformation, grains refinement, fine-grained Ab aggregates in the lens-shaped distribution, while fine-grained Hm and Ep banded distribution; (f) -intermediate-felsic volcanic rocks experienced ductile deformation, phenocrysts are composed of Pl and Q while matrix consists Q and Ms (CPL). Ab-albite; Cc-calcite; Ep-epidote; Hm-hematite; Ms-muscovite; Mt-magnetite; Pl-plagioclase; Q-quartz

(2009)。锆石标样采用 BR266 与 TEMORA, 数据处理采用 Ludwig 的 SQUID 1.0 与 ISOPLOT 3.0 (Ludwig, 2003) 程序, 文中均值为加权平均年龄(置信度为 95%)。

锆石微量元素含量和 LA-ICP-MS U-Pb 同位素定年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)利用 LA-ICP-MS 分析完成。激光剥蚀系统为 GeoLas 2005, ICP-MS 为 Agilent 7500a。详细的仪器操作条件和数据处理方法同 Liu *et al.* (2010)。锆石标样采用 91500。数据处理采用软件 ICPMSDataCal 7.2 (Liu *et al.*, 2010) 与 Isoplot 3.0 (Ludwig, 2003) 完成。为减少继承铅、铅丢失等对年龄的影响, 在  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  图中谐和度低于 95% 的年龄数据将不用于加权平均年龄的计算。

## 4 主量和微量元素地球化学

### 4.1 主量元素组成

测试获得铔厂沟玄武岩样品的  $\text{SiO}_2$  含量变化范围在 43.63% ~ 54.76%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3^T$  含量为 8.0% ~ 10.7% (表 1)。

总体上, 样品具有贫  $\text{K}_2\text{O}$  (0.11% ~ 0.28%)、 $\text{TiO}_2$  (0.70% ~ 0.92%), 富  $\text{Na}_2\text{O}$  (3.61% ~ 4.72%)、 $\text{MgO}$  (3.76% ~ 5.71%) 的特征,  $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ 。个别样品的  $\text{K}_2\text{O}$  含量较高 (1.03%), 其对应的 Rb、Ba 含量及烧失量均较高, 说明个别样品高  $\text{K}_2\text{O}$  含量是后期钾化的结果, 而不代表原岩特征。这与野外及镜下观察到的部分样品发生绢云母化的现象(图 2d) 吻合。然而, 除开这些活泼元素, 其他非活泼元素如 Ti、Zr、Y、Nb 等高场强元素含量变化很小(即使是  $\text{K}_2\text{O}$  含量较高的样品), 这些元素在热液、海底蚀变作用以及中高级变质作用条件下是稳定的 (Rollinson, 1993)。因此, 这些元素可以代表原岩特征。鉴于部分火山岩样品受到后期热液作用而引起的硅化、钾化等蚀变可能导致 K、Rb、Sr、U 等活泼元素发生变化, 本文主要选用蚀变过程中的不活泼元素 (Ti、Zr、Y、Nb) 进行岩石分类 (Winchester and Floyd, 1977)。Zr/ $\text{TiO}_2$ -Nb/Y 判别图(图 3) 表明, 铔厂沟玄武岩落入亚碱性玄武岩范围内。

中酸性火山岩样品的  $\text{SiO}_2$  含量为 59.51% ~ 72.35%,  $\text{K}_2\text{O}$  含量为 2.73% ~ 5.81%,  $\text{Na}_2\text{O}$  含量低, 为 0.68% ~ 2.77%,

表 1 铔厂沟火山岩主量元素 (wt%) 及微量元素 ( $\times 10^{-6}$ ) 组成Table 1 Major elements (wt%) and trace elements ( $\times 10^{-6}$ ) composition of the Huachanggou volcanic rocks

| 样品号   | 1150-28-2 | H-1150-13 | 1150-28-9 | 1150-28-4 | 1150-16-7 | 1110-11 | H-P2-7 | H-P2-11 | H-P2-13 |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|--------|---------|---------|
| 岩性  | 玄武岩       |           |           |           | 英安岩       |         |        |         |         |
| SiO <sub>2</sub>                            | 53.76     | 43.63     | 47.12     | 46.28     | 59.51     | 66.44   | 70.37  | 71.35   | 72.35   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>              | 13.26     | 12.84     | 14.04     | 11.75     | 16.33     | 15.37   | 13.07  | 15.12   | 11.74   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>T</sup> | 9.8       | 9.6       | 8.4       | 10.7      | 6.0       | 4.3     | 4.7    | 2.8     | 5.1     |
| CaO   | 5.43      | 7.77      | 6.60      | 5.46      | 1.80      | 0.81    | 0.66   | 0.06    | 0.64    |
| MgO   | 4.12      | 5.71      | 3.76      | 4.27      | 2.26      | 1.45    | 1.82   | 1.03    | 1.70    |
| Na <sub>2</sub> O                           | 4.11      | 4.72      | 4.60      | 3.61      | 1.83      | 2.77    | 1.96   | 1.02    | 0.68    |
| K <sub>2</sub> O                            | 0.11      | 0.28      | 0.98      | 1.03      | 4.16      | 3.34    | 2.73   | 5.81    | 3.13    |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>              | 0.03      | 0.02      | 0.03      | 0.02      | 0.01      | <0.01   | 0.01   | 0.01    | <0.01   |
| TiO <sub>2</sub>                            | 0.74      | 0.85      | 0.70      | 0.92      | 0.70      | 0.46    | 0.49   | 0.33    | 0.55    |
| MnO   | 0.21      | 0.23      | 0.18      | 0.21      | 0.13      | 0.11    | 0.19   | 0.07    | 0.35    |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>               | 0.08      | 0.04      | 0.41      | 0.11      | 0.14      | 0.09    | 0.10   | 0.05    | 0.12    |
| SrO   | <0.01     | 0.01      | 0.01      | <0.01     | 0.02      | 0.01    | 0.01   | 0.02    | 0.01    |
| BaO   | 0.01      | 0.01      | 0.02      | 0.01      | 0.05      | 0.05    | 0.05   | 0.15    | 0.05    |
| LOI   | 6.74      | 12.9      | 12.9      | 14.1      | 6.98      | 4.53    | 4.03   | 2.22    | 3.53    |
| Total                                       | 98.37     | 98.58     | 99.39     | 98.45     | 99.94     | 99.7    | 100.15 | 100.05  | 99.92   |
| La  | 3.2       | 2.4       | 4.2       | 2.8       | 28.3      | 23.3    | 19.2   | 30.8    | 35.3    |
| Ce  | 7.19      | 6.25      | 8.30      | 7.64      | 67.30     | 51.50   | 53.80  | 62.20   | 74.10   |
| Pr  | 1.16      | 1.01      | 1.35      | 1.29      | 6.79      | 6.20    | 4.61   | 7.6     | 8.86    |
| Nd  | 5.7       | 5.3       | 6.3       | 6.9       | 27.0      | 24.0    | 17.1   | 29.0    | 34.7    |
| Sm  | 1.92      | 1.81      | 1.86      | 2.34      | 5.70      | 5.84    | 3.89   | 6.35    | 7.29    |
| Eu  | 0.71      | 0.63      | 0.72      | 0.70      | 1.12      | 1.15    | 0.97   | 1.41    | 1.37    |
| Gd  | 2.22      | 1.82      | 1.93      | 2.09      | 5.68      | 6.48    | 3.99   | 6.25    | 6.76    |
| Tb  | 0.41      | 0.33      | 0.33      | 0.35      | 0.96      | 1.22    | 0.73   | 0.95    | 1.05    |
| Dy  | 2.49      | 1.96      | 1.90      | 1.83      | 5.86      | 8.18    | 4.72   | 5.65    | 6.71    |
| Ho  | 0.51      | 0.39      | 0.38      | 0.34      | 1.22      | 1.75    | 0.98   | 1.21    | 1.36    |
| Er  | 1.41      | 1.08      | 1.09      | 0.99      | 3.52      | 5.03    | 2.84   | 3.47    | 4.24    |
| Tm  | 0.20      | 0.16      | 0.16      | 0.15      | 0.47      | 0.64    | 0.38   | 0.55    | 0.66    |
| Yb  | 1.27      | 1.04      | 1.05      | 1.01      | 3.34      | 4.79    | 2.73   | 3.31    | 4.19    |
| Lu  | 0.19      | 0.15      | 0.17      | 0.17      | 0.50      | 0.73    | 0.44   | 0.53    | 0.66    |
| Y   | 12.0      | 9.2       | 10.2      | 8.1       | 30.8      | 37.1    | 33.3   | 46.4    | 25.3    |
| Rb  | 6.4       | 16.2      | 42.9      | 53.2      | 139.5     | 105.5   | 86.5   | 175.5   | 95.1    |
| Ba  | 120       | 120       | 170       | 90        | 424       | 492     | 493    | 1390    | 506     |
| Th  | 0.3       | 0.2       | 0.2       | 0.2       | 10.1      | 10.7    | 10.2   | 11.9    | 9.7     |
| U   | 0.1       | 0.1       | 0.1       | <0.1      | 2.0       | 2.2     | 1.3    | 2.1     | 1.2     |
| Nb  | 1.5       | 1.7       | 1.1       | 1.0       | 12.7      | 11.5    | 9.8    | 15.3    | 9.6     |
| Zr  | 42        | 27        | 22        | 21        | 199       | 201     | 134    | 182     | 132     |
| Hf  | 0.2       | 0.1       | 0.1       | 0.1       | 5.6       | 6.1     | 4.0    | 6.0     | 3.9     |
| Ta  | 0.1       | 0.1       | 0.1       | 0.1       | 0.9       | 1.0     | 0.9    | 1.4     | 0.9     |
| Sr  | 115.5     | 259.0     | 160.5     | 103.5     | 86.6      | 34.1    | 17.4   | 20.5    | 12.5    |
| Cr  | 107       | 93        | 141       | 67        | 60        | 20      | 50     | 10      | 40      |
| Ni  | 61.8      | 64.0      | 60.8      | 71.5      | 35.0      | 21.0    | 37.0   | 10.0    | 36.0    |
| V   | 186       | 208       | 91        | 162       | 100       | 53      | 77     | 28      | 103     |
| Pb  | 2.2       | 2.5       | 1.7       | 1.2       | 11.0      | 11.0    | 12.0   | 10.0    | 10.0    |
| La/Yb                                       | 1.81      | 1.66      | 2.87      | 1.99      | 6.08      | 3.49    | 5.04   | 6.67    | 6.04    |
| Sr/Y  | 9.63      | 28.15     | 15.74     | 12.78     | 2.81      | 0.92    | 0.52   | 0.44    | 0.49    |

TiO<sub>2</sub> 含量为 0.33% ~ 0.70% ,显示高钾低钠特征。如前所述,中酸性火山岩包括了中酸性凝灰质火山岩及酸性熔岩,这种岩性岩相上的区别可能会导致主量上造成较大的差别,如 SiO<sub>2</sub> 成分间隔较大。在 Zr/TiO<sub>2</sub>-Nb/Y 判别图中,多数样

品落入英安岩范围内,另有一个样品落入与安山岩交界部位(图 3),因此,将中酸性火山岩统称为英安岩。

总体而言,铔厂沟火山岩两类岩石在岩相上迥异,地球化学成分存在着明显的成分间断(Daly 间断)(Daly, 1925),

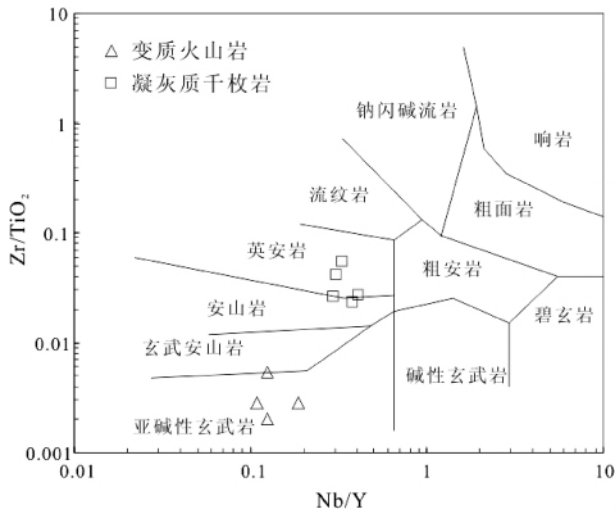


图3 火山岩 Zr/TiO<sub>2</sub>-Nb/Y 判别图(据 Winchester and Floyd, 1977)  
Fig. 3 Zr/TiO<sub>2</sub>-Nb/Y discrimination diagrams of the volcanic rocks (after Winchester and Floyd, 1977)

其 SiO<sub>2</sub> 成分间隔为 54.7% ~ 59.5% ,是一套亚碱性玄武质-英安质火山岩组合。

#### 4.2 稀土元素和微量元素地球化学

玄武岩样品的稀土总量低,基本在  $24 \times 10^{-6} \sim 29 \times 10^{-6}$  之间,稀土元素(REE)球粒陨石标准化配分型式为中轻稀土轻微富集型(图 4a),轻稀土元素(LREE)与重稀土元素(HREE)分异程度较低,  $(La/Yb)_N$  值为 1.81 ~ 2.87。Eu 轻微正异常,  $\delta Eu$  值为 0.95 ~ 1.15,可能是由于玄武岩富钠更长石, Eu 与 Ca 发生类质同象进入斜长石所致。

铔厂沟玄武岩的 Nb ( $1.0 \times 10^{-6} \sim 1.7 \times 10^{-6}$ )、Ta ( $0.06 \times 10^{-6} \sim 0.11 \times 10^{-6}$ )、Cr ( $< 141 \times 10^{-6}$ )、Ni ( $< 71.5 \times 10^{-6}$ ) 含量较低, Nb/La 值为 0.26 ~ 0.71, La/Ta 值为 21.8 ~ 60, Th/Yb 值为 0.19 ~ 0.23, Th/Nb 值为 0.11 ~ 0.2, Hf/Th 值为 0.5 ~ 0.67。在原始地幔标准化的微量元素配分图解中,铔厂沟玄武岩显示 Rb、Ba 的正异常及 Nb、Ta、Zr 的负异常, Ti 负异常不明显(图 4b)。上述特征符合大陆边缘弧玄武岩地球化学特征(Winter, 2001),但明显有别于 N-MORB。

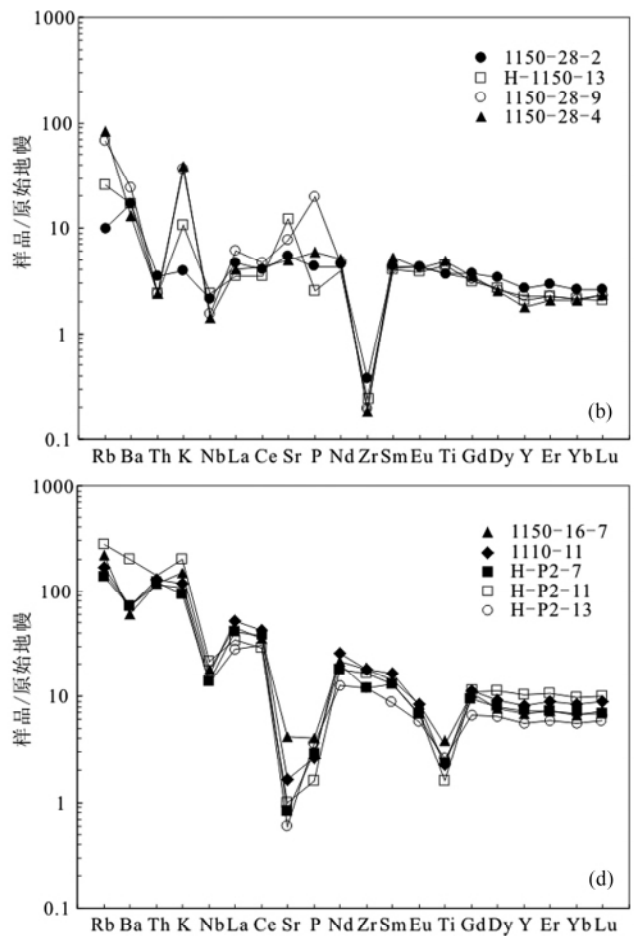
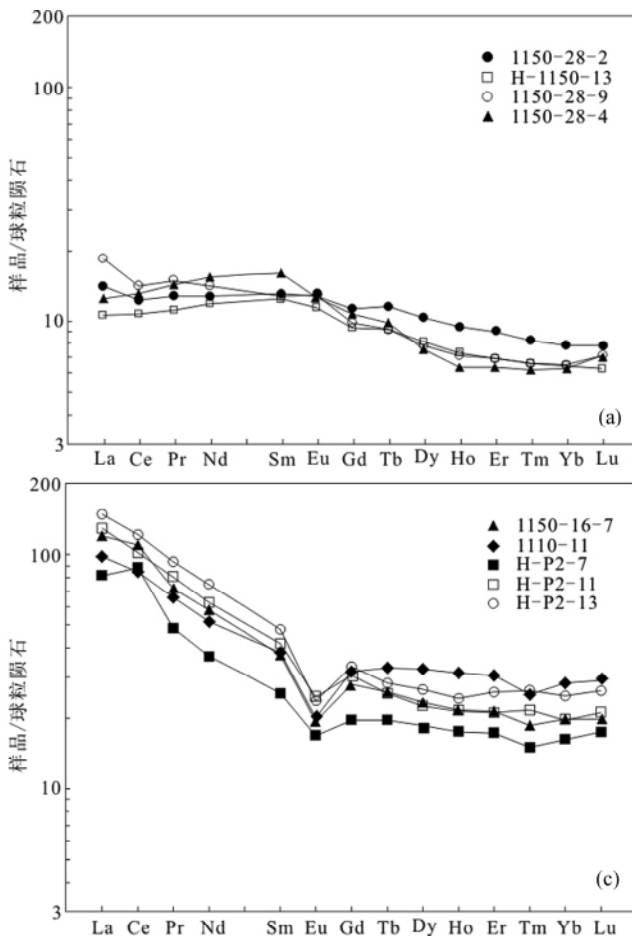


图4 铔厂沟火山岩稀土及微量元素分配型式(球粒陨石和原始地幔值据 Sun and McDonough, 1989)  
(a, b) 玄武岩; (c, d) 英安岩

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle normalized trace element patterns of the Huachangou volcanic rocks (data of chondrite and primitive mantle after Sun and McDonough, 1989)  
(a, b) -basalt; (c, d) -dacite

表 2 玄武岩锆石 SHRIMP U-Pb 分析结果

Table 2 Zircon SHRIMP data of the basalt

| 测点号   | U<br>( $\times 10^{-6}$ ) | U<br>/Th | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ | % err | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$ | % err | $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ | % err | $\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$ | % err | $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$<br>Age( Ma) | 1 $\sigma$ err | 注释  |
|-------|---------------------------|----------|---|-------|--|-------|--|-------|---|-------|--|----------------|-----|
| W2-1  | 1762.5                    | 22.8     | 0.10314                                   | 0.59  | 1.51933                                  | 0.78  | 0.10684                                  | 0.52  | 0.03989                                   | 1.55  | 654.4  | 3.2            | 高 U |
| W2-2  | 187.67                    | 2.2      | 0.16310                                   | 0.57  | 9.47652                                  | 0.95  | 0.42141                                  | 0.76  | 0.11036                                   | 1.31  | 2266.9   | 14.5           | 不协调 |
| W2-3  | 41.00                     | 1.0      | 0.06774                                   | 3.24  | 1.27140                                  | 3.55  | 0.13612                                  | 1.45  | 0.04209                                   | 2.70  | 822.7  | 11.2           |     |
| W2-4  | 25.36                     | 1.0      | 0.16952                                   | 1.43  | 11.32937                                 | 2.24  | 0.48471                                  | 1.73  | 0.13345                                   | 2.48  | 2547.7   | 36.3           | 老核  |
| W2-5  | 132.12                    | 1.3      | 0.06394                                   | 3.09  | 1.15786                                  | 3.42  | 0.13134                                  | 1.48  | 0.04105                                   | 2.22  | 795.5  | 11.1           |     |
| W2-6  | 121.74                    | 0.9      | 0.06796                                   | 1.89  | 1.23196                                  | 2.35  | 0.13148                                  | 1.39  | 0.04058                                   | 1.88  | 796.3  | 10.4           |     |
| W2-7  | 56.42                     | 1.1      | 0.06439                                   | 3.93  | 1.17730                                  | 4.14  | 0.13260                                  | 1.31  | 0.04087                                   | 2.47  | 802.7  | 9.9            |     |
| W2-8  | 84.90                     | 0.8      | 0.06858                                   | 6.01  | 1.23686                                  | 6.13  | 0.13081                                  | 1.19  | 0.04525                                   | 1.91  | 792.5  | 8.9            |     |
| W2-9  | 264.31                    | 1.3      | 0.06723                                   | 1.37  | 1.22718                                  | 1.54  | 0.13239                                  | 0.71  | 0.04070                                   | 1.26  | 801.5  | 5.4            |     |
| W2-10 | 168.26                    | 1.4      | 0.06620                                   | 2.44  | 1.19750                                  | 2.58  | 0.13119                                  | 0.85  | 0.03981                                   | 1.59  | 794.7  | 6.4            |     |
| W2-11 | 36.20                     | 0.3      | 0.05556                                   | 5.24  | 1.01060                                  | 5.47  | 0.13191                                  | 1.57  | 0.04058                                   | 2.23  | 798.8  | 11.8           |     |
| W2-12 | 86.29                     | 0.9      | 0.06556                                   | 2.38  | 1.20462                                  | 2.62  | 0.13326                                  | 1.09  | 0.04144                                   | 1.88  | 806.4  | 8.3            |     |
| W2-13 | 80.52                     | 0.8      | 0.06467                                   | 2.92  | 1.18153                                  | 3.14  | 0.13250                                  | 1.15  | 0.04108                                   | 1.96  | 802.1  | 8.7            |     |
| W2-14 | 132.64                    | 1.6      | 0.06734                                   | 2.06  | 1.29195                                  | 2.26  | 0.13914                                  | 0.92  | 0.04152                                   | 1.84  | 839.8  | 7.3            | 不协调 |
| W2-15 | 92.67                     | 1.3      | 0.06310                                   | 3.48  | 1.18203                                  | 3.64  | 0.13587                                  | 1.08  | 0.04204                                   | 2.09  | 821.3  | 8.3            |     |
| W2-16 | 19.95                     | 0.9      | 0.06592                                   | 5.81  | 1.27902                                  | 6.17  | 0.14072                                  | 2.07  | 0.04190                                   | 3.81  | 848.7  | 16.5           | 不协调 |
| W2-17 | 124.00                    | 0.9      | 0.06683                                   | 2.37  | 1.21079                                  | 2.56  | 0.13139                                  | 0.97  | 0.03971                                   | 1.63  | 795.8  | 7.3            |     |
| W2-18 | 223.28                    | 1.3      | 0.06542                                   | 1.95  | 1.22045                                  | 2.09  | 0.13531                                  | 0.77  | 0.04137                                   | 1.44  | 818.1  | 5.9            | 高 U |

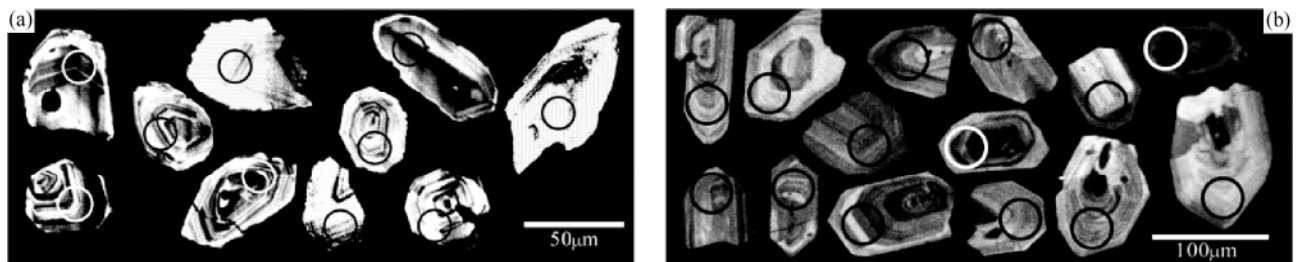


图 5 铔厂沟火山岩锆石 CL 图像和测点位置

(a) 玄武岩锆石 CL 图; (b) 英安岩锆石 CL 图

Fig. 5 CL images of zircons in Huachanggou volcanic rocks and spot sit

(a) -CL images of zircon grains from the basalt; (b) -CL images of zircon grains from the dacite

铔厂沟英安岩稀土总量较低,一般在  $116 \times 10^{-6} \sim 187 \times 10^{-6}$  之间。在球粒陨石标准化的稀土配分图解(图 4c)中,样品显示出轻稀土富集,为典型的右倾型稀土配分模式。 $(\text{La}/\text{Yb})_N$  值为 3.49 ~ 6.67,  $\text{Eu}$  负异常中等,  $\delta\text{Eu}$  值为 0.57 ~ 0.75。个别样品出现  $\text{Ce}$  正异常(图 4c)。

英安岩中富集  $\text{Rb}$ 、 $\text{Ba}$ 、 $\text{K}$ 、 $\text{Th}$  等大离子亲石元素,亏损高场强元素,具有明显的  $\text{Nb}$ 、 $\text{Sr}$ 、 $\text{P}$  及  $\text{Ti}$  谷值(图 4d),显示弧火山岩地球化学特征。 $\text{Sr}$ 、 $\text{Eu}$  的负异常表明其源区残留了较多的斜长石,或是岩浆分离结晶作用中有大量斜长石晶出; $\text{P}$ 、 $\text{Ti}$  谷值说明岩浆可能经历了明显的含磷、钛矿物的分离结晶作用。 $\text{Ta}$  丰度为  $0.9 \times 10^{-6} \sim 1.4 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Nb}$  丰度为  $9.6 \times 10^{-6} \sim 12.7 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Nb}/\text{La}$  值为 0.27 ~ 0.51,  $\text{La}/\text{Ta}$  值为 22 ~ 39.2,  $\text{Th}/\text{Yb}$  为 2.24 ~ 3.6,  $\text{Th}/\text{Nb}$  值为 0.78 ~ 1.03,  $\text{Hf}/\text{Th}$  值为 0.39 ~ 0.56。

## 5 锆石 U-Pb 年代学研究

样品 W-2 锆石采自玄武岩,锆石晶体呈浅黄色-无色透明,自形短柱状,颗粒较小,粒径在  $10 \sim 90 \mu\text{m}$  之间。根据透射光及 CL 图像观察,表面有少量溶蚀、碎裂现象,CL 图像韵律环带清晰(图 5a)。选取了 18 颗锆石进行 SHRIMP 分析(表 2),获得样品点的  $\text{U}/\text{Th}$  比值为 0.3 ~ 1.4,结合结构特征表明其为岩浆成因。排除 5 颗异常高 U 的、谐和度小于 95% 的测试点后,获得其他样品点的加权平均年龄为  $801.7 \pm 4.7 \text{Ma}$  ( $\text{MSWD} = 1.18$ ,  $n = 12$ )(图 6a)。另获得一粒不含环带结构的锆石继承核年龄为  $2547.7 \pm 36.3 \text{Ma}$ 。

样品 H-P4-3 锆石来自英安岩,锆石晶体呈浅黄色,自形短柱状,颗粒粒径在  $50 \sim 120 \mu\text{m}$  之间,棱角分明,部分破碎。

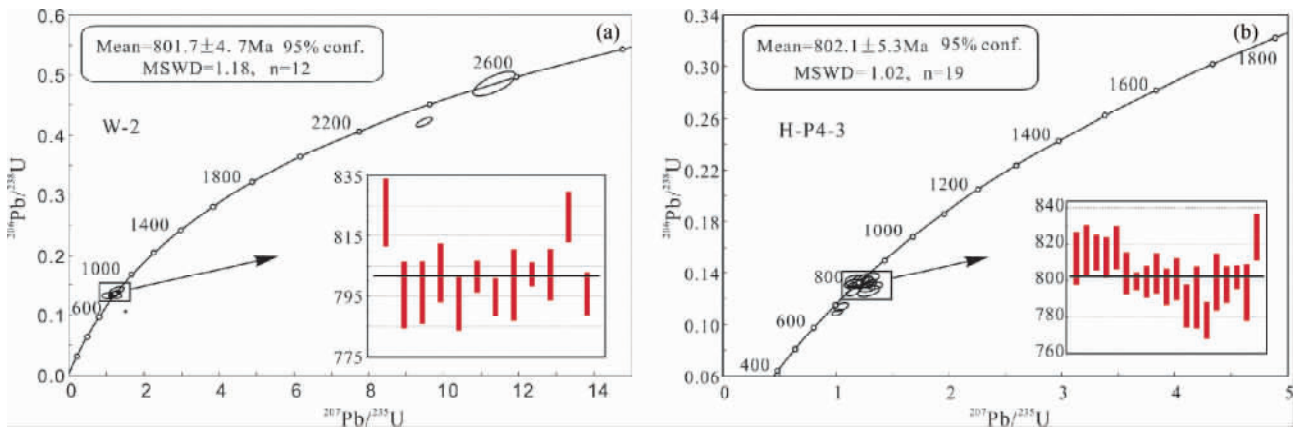


图6 铀厂沟火山岩锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄谐和图及加权平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄图

Fig. 6 Zircon U-Pb concordia plots and recalculated weighted mean  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  ages for the Huachangou volcanic rocks

CL 图像显示韵律环带清晰(图 5 b), LA-ICP-MS 分析获得其 U/Th 比值为 0.7 ~ 1.7, 为岩浆成因。选取了 30 颗锆石进行 LA-ICP-MS U-Pb 年龄测试(表 3), 其中 5 个分析点表现出轻稀土或 Ti 超量的特征, 可能是由于被分析锆石包含了富 LREE 的磷酸盐矿物(如独居石和磷灰石)或富 Ti 矿物(赖绍聪和秦江锋, 2010)。排除 9 个富含 LREE、Ti 高 U 以及谐和度低于 95% 的测试点后, 获得其他测试点的加权平均年龄为  $802.1 \pm 5.3\text{Ma}$  (MSWD = 1.02,  $n = 19$ ) (图 6 b)。

总之, W-2 和 H-P4-3 锆石年龄在误差范围内一致, 暗示其可能是同时期火山活动的产物。

## 6 讨论

### 6.1 铀厂沟火山岩组合及构造背景

铀厂沟玄武岩以透镜体状“右行斜列”裹挟于英安岩中, 在空间上紧密联系; 加之锆石年代学的研究表明二者结晶时间在误差范围内一致, 这就表明了玄武岩与英安岩可能为同时期喷发产物; 二者存在着明显的成分间隔。因此, 二者共同构成一套玄武岩-英安岩火山岩组合。

一般而言, 地幔橄榄岩派生的岩石具有高 Ni ( $250 \times 10^{-6}$  ~  $300 \times 10^{-6}$ )、高 Cr ( $500 \times 10^{-6}$  ~  $600 \times 10^{-6}$ ) 的特征; 随橄榄石和尖晶石、单斜辉石的分离结晶作用 Ni 和 Cr 丰度降低 (Wilson, 1989); 而弧火山岩具有低的 Ni、Cr 元素含量, 表明其不是原始岩浆。铀厂沟玄武岩与英安岩具有较低的 Ni、Cr 含量, 类似于弧火山岩。从地球化学特征上讲, 铀厂沟地区玄武岩微量元素原始地幔标准化配分图解中显示 Nb、Ta、Zr 负异常, 同时含有较低的  $\text{TiO}_2$  含量, 多介于 0.70% ~ 0.92%, 均暗示铀厂沟玄武岩可能形成于大陆边缘弧环境。同时, 显著的地壳混染或地壳重熔是大陆边缘弧火山岩区别于岛弧火山岩的重要标志 (陈衍景和富士谷, 1992; Chen, 1996; Winter, 2001)。在玄武岩锆石 SHRIMP U-Pb 测试结果中发现个别锆石存在太古宙的古老继承核, 表明岩浆在上

升过程中受到了较强的古老地壳物质混染, 或者来源于古老地壳重熔, 进一步暗示铀厂沟火山岩可能形成于大陆边缘弧环境。同时, 英安岩原始地幔标准化配分图解亦具有强烈的 Nb、Ti 负异常, 与大陆边缘弧岩浆的分配型式 (Pearce *et al.*, 1984) 一致。上述元素地球化学分析表明, 铀厂沟火山岩形成于大陆边缘弧构造环境, 与板块俯冲作用有关。

### 6.2 勉略带形成时代及期次

勉略带内火山岩块的形成时代具有较大的争议, 主要有 3 种观点: 一种观点认为是晚古生代 (487 ~ 242Ma) (Zhang *et al.*, 1995; 张国伟等, 1995, 1996, 2003; 李曙光等, 1996, 2003; 赖绍聪等, 2003, 2010; 孙卫东等, 2000); 二是形成于新元古代 (913 ~ 808Ma) (张宗清等, 2005; 闫全人等, 2007) 或至少存在着新元古代的火山活动; 三是由多期构造事件叠加的构造活动带, 既有印支期构造事件证据, 也存在大量晋宁期强烈板块构造活动证据 (张宗清等, 2005)。

铀厂沟矿区玄武岩(旧称细碧岩)及英安岩一直以来被认为形成于古生代, 并同所赋存的踏坡岩片沉积岩一起被认为是一套层序火山-沉积岩序 (白忠, 1995)。笔者通过对铀厂沟玄武岩及英安岩进行锆石年代学研究, 表明玄武岩形成年龄为  $801.7 \pm 4.7\text{Ma}$ , 英安岩形成年龄为  $802.1 \pm 5.3\text{Ma}$ , 二者均属于新元古代。最新的踏坡岩片沉积岩碎屑锆石 U-Pb 年龄指示其最老沉积年龄应  $< 450\text{Ma}$  (作者未发表数据)。因此, 上述火山岩与沉积岩间不协调的成岩年龄及构造接触的地质事实 (图 1 c) 表明, 踏坡岩片是由不同时代、不同性质的岩片经构造作用堆叠形成的构造混杂岩。

### 6.3 大地构造意义

近年来研究表明, 勉略带分布着以蛇绿岩块-镁铁质岩块组成的新元古代残余洋壳、岛弧-弧前盆地火山岩组合 (夏林圻等, 1996; 张宗清等, 2005; 王宗起等, 2009; 闫全人等, 2007), 表明古秦岭洋在新元古代发生了一系列的裂解、



表 3 英安岩锆石 LA-ICP-MS 分析结果  
Table 3 Zircon LA-ICP-MS data of the dacite

| 测点号       | U ( $\times 10^{-6}$ ) | U/Th | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | $1\sigma$ err | $^{206}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | $1\sigma$ err | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | $1\sigma$ err | $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ | $1\sigma$ err | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$<br>Age (Ma) | $1\sigma$ err | 注释     |
|-----------|------------------------|------|-----------------------------------|----------------------------------|---------------|----------------------------------|---------------|----------------------------------|---------------|-----------------------------------|---------------|--|---------------|--------|
| H-P4-3-01 | 125.41                 | 1.1  | 0.06256                           | 1.15696                          | 0.00269       | 0.04986                          | 0.13424       | 0.00260                          | 0.00124       | 0.03885                           | 0.00124       | 812.0  | 14.8          |        |
| H-P4-3-02 | 69.79                  | 1.3  | 0.06708                           | 1.23409                          | 0.00327       | 0.05733                          | 0.13501       | 0.00250                          | 0.00130       | 0.03817                           | 0.00130       | 816.4  | 14.2          |        |
| H-P4-3-03 | 202.91                 | 0.8  | 0.06465                           | 1.19557                          | 0.00212       | 0.03809                          | 0.13482       | 0.00172                          | 0.00090       | 0.03899                           | 0.00090       | 815.3  | 9.8           |        |
| H-P4-3-04 | 202.93                 | 1.1  | 0.06564                           | 1.22355                          | 0.00222       | 0.04495                          | 0.13433       | 0.00196                          | 0.00109       | 0.04141                           | 0.00109       | 812.5  | 11.2          |        |
| H-P4-3-05 | 125.15                 | 1.1  | 0.06593                           | 1.23033                          | 0.00267       | 0.05009                          | 0.13528       | 0.00210                          | 0.00111       | 0.03862                           | 0.00111       | 817.9  | 11.9          |        |
| H-P4-3-06 | 362.36                 | 0.9  | 0.06696                           | 1.01123                          | 0.00189       | 0.02934                          | 0.10925       | 0.00137                          | 0.00076       | 0.03193                           | 0.00076       | 668.4  | 8.0           | 富 LREE |
| H-P4-3-07 | 136.55                 | 1.1  | 0.06620                           | 1.21247                          | 0.00300       | 0.05330                          | 0.13282       | 0.00206                          | 0.00124       | 0.04043                           | 0.00124       | 803.9  | 11.7          |        |
| H-P4-3-08 | 194.01                 | 0.9  | 0.06307                           | 1.14173                          | 0.00221       | 0.03839                          | 0.13116       | 0.00176                          | 0.00093       | 0.03864                           | 0.00093       | 794.5  | 10.1          |        |
| H-P4-3-09 | 376.66                 | 1.5  | 0.06523                           | 1.19681                          | 0.00173       | 0.03210                          | 0.13198       | 0.00156                          | 0.00094       | 0.04169                           | 0.00094       | 799.2  | 8.9           |        |
| H-P4-3-10 | 230.18                 | 1.7  | 0.06461                           | 1.19126                          | 0.00219       | 0.04032                          | 0.13280       | 0.00199                          | 0.00125       | 0.04176                           | 0.00125       | 803.8  | 11.3          |        |
| H-P4-3-11 | 130.34                 | 1.3  | 0.07452                           | 1.33658                          | 0.00264       | 0.04626                          | 0.12957       | 0.00180                          | 0.00123       | 0.04355                           | 0.00123       | 785.4  | 10.3          | 富 Ti   |
| H-P4-3-12 | 113.81                 | 1.1  | 0.06688                           | 1.04383                          | 0.00258       | 0.03917                          | 0.11332       | 0.00158                          | 0.00107       | 0.03789                           | 0.00107       | 692.0  | 9.1           | 富 LREE |
| H-P4-3-13 | 165.87                 | 0.8  | 0.06233                           | 1.12622                          | 0.00209       | 0.03543                          | 0.13153       | 0.00179                          | 0.00094       | 0.03943                           | 0.00094       | 796.6  | 10.2          |        |
| H-P4-3-14 | 233.51                 | 1.5  | 0.14257                           | 2.20833                          | 0.00659       | 0.12477                          | 0.10766       | 0.00203                          | 0.00278       | 0.06953                           | 0.00278       | 659.1  | 11.8          | 不协调    |
| H-P4-3-15 | 248.68                 | 1.2  | 0.06642                           | 1.14483                          | 0.00214       | 0.03748                          | 0.12452       | 0.00179                          | 0.00096       | 0.03761                           | 0.00096       | 756.5  | 10.3          |        |
| H-P4-3-16 | 104.77                 | 1.4  | 0.06610                           | 1.19901                          | 0.00276       | 0.04823                          | 0.13226       | 0.00207                          | 0.00133       | 0.04390                           | 0.00133       | 800.7  | 11.8          |        |
| H-P4-3-17 | 176.60                 | 0.8  | 0.06729                           | 1.20444                          | 0.00211       | 0.03855                          | 0.12967       | 0.00207                          | 0.00098       | 0.03981                           | 0.00098       | 786.0  | 11.8          |        |
| H-P4-3-18 | 447.51                 | 0.9  | 0.08991                           | 1.34962                          | 0.01920       | 0.29552                          | 0.10811       | 0.00954                          | 0.00391       | 0.03580                           | 0.00391       | 661.7  | 55.5          | 富 U    |
| H-P4-3-19 | 136.72                 | 1.5  | 0.06629                           | 1.19622                          | 0.00303       | 0.05259                          | 0.13133       | 0.00208                          | 0.00140       | 0.04274                           | 0.00140       | 795.4  | 11.8          | 不协调    |
| H-P4-3-20 | 131.87                 | 1.0  | 0.06731                           | 1.21284                          | 0.00410       | 0.07348                          | 0.13048       | 0.00302                          | 0.00138       | 0.04100                           | 0.00138       | 790.6  | 17.2          |        |
| H-P4-3-21 | 180.69                 | 1.1  | 0.18606                           | 3.70715                          | 0.00574       | 0.14114                          | 0.14114       | 0.00254                          | 0.00267       | 0.09092                           | 0.00267       | 851.1  | 14.4          | 富 Ti   |
| H-P4-3-22 | 277.29                 | 1.3  | 0.06817                           | 1.21149                          | 0.00223       | 0.03934                          | 0.12825       | 0.00180                          | 0.00096       | 0.03887                           | 0.00096       | 777.9  | 10.3          |        |
| H-P4-3-23 | 153.51                 | 1.5  | 0.06703                           | 1.20874                          | 0.00266       | 0.04290                          | 0.13199       | 0.00276                          | 0.00120       | 0.04268                           | 0.00120       | 799.2  | 15.7          |        |
| H-P4-3-24 | 142.02                 | 1.5  | 0.06633                           | 1.21136                          | 0.00235       | 0.04341                          | 0.13172       | 0.00180                          | 0.00107       | 0.03932                           | 0.00107       | 797.7  | 10.3          |        |
| H-P4-3-25 | 218.78                 | 1.0  | 0.07217                           | 1.27927                          | 0.00253       | 0.04417                          | 0.12825       | 0.00199                          | 0.00100       | 0.04080                           | 0.00100       | 777.9  | 11.4          | 富 LREE |
| H-P4-3-26 | 76.28                  | 0.7  | 0.07508                           | 1.28893                          | 0.00399       | 0.06311                          | 0.12548       | 0.00283                          | 0.00159       | 0.04110                           | 0.00159       | 762.0  | 16.2          |        |
| H-P4-3-27 | 124.87                 | 1.5  | 0.06854                           | 1.25890                          | 0.00282       | 0.05044                          | 0.13364       | 0.00239                          | 0.00136       | 0.04411                           | 0.00136       | 808.6  | 13.6          |        |
| H-P4-3-28 | 83.57                  | 1.6  | 0.06934                           | 1.26695                          | 0.00318       | 0.06088                          | 0.13098       | 0.00274                          | 0.00156       | 0.04081                           | 0.00156       | 793.4  | 15.6          |        |
| H-P4-3-29 | 132.15                 | 1.2  | 0.07934                           | 1.28795                          | 0.00291       | 0.05045                          | 0.11661       | 0.00174                          | 0.00096       | 0.03825                           | 0.00096       | 711.0  | 10.1          | 不协调    |
| H-P4-3-30 | 80.50                  | 0.9  | 0.06944                           | 1.30072                          | 0.00302       | 0.05456                          | 0.13632       | 0.00226                          | 0.00117       | 0.04024                           | 0.00117       | 823.8  | 12.8          |        |

增生及俯冲事件。铍厂沟火山岩岩石地球化学特征及年代学研究进一步证明,勉略带内存在新元古代的亚碱性大陆边缘弧型玄武质-英安质火山岩组合,即存在着新元古代的大洋及其俯冲作用引起的火山弧活动。此外,在勉略带以南的扬子克拉通北缘及东北缘也发现了大量的新元古代洋岛、岛弧及大陆岩浆弧火山岩组合(图1b),如:碧口岛弧与横丹弧前盆地组合(Yan *et al.*, 2003, 2004; Druschke *et al.*, 2006; Xiao *et al.*, 2007; 叶霖等, 2009)、西乡洋岛-弧火山岩(Ling *et al.*, 2002; Zhou *et al.*, 2002; Dong *et al.*, 2011)、镇安岛弧(凌文黎等, 2002b)、耀岭河岛弧(张宏飞等, 1997; 凌文黎等, 2002a)等。这些新元古代火山岩的形成时代略有差异,但其主体时代与本文获得的铍厂沟玄武岩及英安岩年代一致。这可以说明在新元古代曾有大洋板块自北朝南俯冲到扬子古板块北缘之下。前人研究也证明了在扬子克拉通北缘及西北缘存在着 840 ~ 750Ma 之间的大洋板块俯冲(Zhou *et al.*, 2002; Dong *et al.*, 2011)。

## 7 结论

(1) 铍厂沟火山岩由玄武岩及英安岩组成,二者在时空上具有紧密联系。岩石地球化学特征表明二者属于低钾亚碱性弧火山岩组合。

(2) 铍厂沟玄武岩及英安岩均形成新元古代:  $801.7 \pm 4.7$  Ma 及  $802.1 \pm 5.3$  Ma。结合铍厂沟地区地质及沉积岩碎屑锆石年龄,发现踏坡岩片是由不同的时期、不同性质的岩块经构造作用堆叠而成的一套构造混杂岩。勉略带应是由多期构造事件叠加的构造活动带。

(3) 地球化学和年龄结果表明,在新元古代曾有大洋板块自北朝南俯冲到扬子古板块北缘之下。

致谢 研究工作得到陈衍景教授的指导,野外工作得到西北大学张复新教授的指导和铍厂沟金矿余康伟工程师及其他同行们的大力支持,实验工作得到了中国地质大学(武汉)胡兆初教授的指导,论文写作得到毛世东博士的帮助,李诺博士对论文做了详细修改并提出宝贵意见,两位评审人给出了很多建设性的意见,特致谢意!

## References

Bai Z. 1995. Ore-forming geological character of Huachanggou gold deposit in Shaanxi. *Journal of Southwest China Institute of Technology*, 10(2): 30–39 (in Chinese with English abstract)  
 Chen YJ and Fu SG. 1992. Gold Mineralization in West Henan. Beijing: Seismological Press, 1–234 (in Chinese with English abstract)  
 Chen YJ. 1996. New understanding of relationship between volcanic and their tectonic setting: Volcanic DI as indicator of tectonic settings. In: Chen YJ, Lu B and Hao ZG (eds.). *China's Postdoctors' Contributions to the 30<sup>th</sup> International Geological Congress*. Beijing: China Petroleum Industry Press, 134–143  
 Chen YJ. 2010. Indosinian tectonic setting, magmatism and

metallogenesis in Qinling Orogen, Central China. *Geology in China*, 37(4): 854–865 (in Chinese with English abstract)  
 Daly RA. 1925. The geology of Ascension Island. *Proc. Amer. Acad. Arts Sci.*, 60(1): 3–80  
 Dong YP, Liu XM, Santosh M, Zhang XN, Chen Q, Yang C and Yang Z. 2011. Neoproterozoic subduction tectonics of the northwestern Yangtze Block in South China: Constrains from zircon U-Pb geochronology and geochemistry of mafic intrusions in the Hannan Massif. *Precambrian Research*, 189(1–2): 66–90  
 Druschke P, Hanson AD, Yan QR, Wang ZQ and Wang T. 2006. Stratigraphic and U-Pb SHRIMP detrital zircon evidence for a Neoproterozoic continental arc, Central China: Rodinia implications. *The Journal of Geology*, 114(5): 627–636  
 Lai SC, Zhang GW, Yang YC and Chen JY. 1997. Petrology and geochemistry features of the metamorphic volcanic rocks in Mianxian Lueyang suture zone, South Qinling. *Acta Petrologica Sinica*, 13(4): 563–573 (in Chinese with English abstract)  
 Lai SC, Zhang GW, Yang YC and Chen JY. 1998. Geochemistry of the ophiolite and island arc volcanic rock in the Mianxian-Lueyang suture zone, southern Qinling and their tectonic significances. *Geochimica*, 27(3): 283–293 (in Chinese with English abstract)  
 Lai SC, Zhang GW, Pei XZ and Yang HF. 2003. Geochemistry of the ophiolite and oceanic island volcanic rock in the Kangxian-Pipasi-Nanping tectonic melange zone, southern Qinling and their tectonic significance. *Science in China (Series D)*, 33(1): 10–19 (in Chinese)  
 Lai SC and Qin JF. 2010. Zircon U-Pb dating and Hf isotopic composition of the diabase dike swarm from Sanchazi area, Mianlue Suture: Chronology evidence for the Paleo-Tethys oceanic crust subduction. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 32(1): 27–33 (in Chinese with English abstract)  
 Li SG, Sun WD, Zhang GW, Chen JY and Yang YC. 1996. Chronology and geochemistry of metavolcanic rocks from Heigouxia Valley in Mianlue tectonic zone, South Qinling: Evidence for a Paleozoic oceanic basin and its close time. *Science in China (Series D)*, 26(3): 223–230 (in Chinese)  
 Li SG, Hou ZH, Yang YC, Sun WD, Zhang GW and Li QL. 2003. Geochemical features and forming age of the Sanchazi palaeo magma-arc in the Mian-Lue tectonic zone, South Qinling. *Science in China (Series D)*, 33(12): 1163–1173 (in Chinese)  
 Ling WL, Gao S, Ouyang JP, Zhang BR and Li HM. 2002. Time and tectonic setting of the Xixiang Group: Constraints from zircon U-Pb geochronology and geochemistry. *Science in China (Series D)*, 45(9): 818–831  
 Ling WL, Cheng JP, Wang XH and Zhou HW. 2002a. 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. *Acta Petrologica Sinica*, 18(1): 25–36 (in Chinese with English abstract)  
 Ling WL, Wang XH, Cheng JP, Yang YC and Gao S. 2002b. Recognition and geological significance of Zhen'an are volcanic suite, South Qinling orogenic belt. *Geochimica*, 31(3): 222–229 (in Chinese with English abstract)  
 Liu YS, Hu ZC, Zong KQ, Gao CG, Gao S, Xu J and Chen HH. 2010. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535–1546  
 Ludwig KR. 2003. *User's Manual for Isoplot 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley Geochronology Centre, Special Publication, 4  
 Pearce JA, Nigel BW and Andrew GT. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956–983  
 Rollinson HR. 1993. *Using geochemical data: Evaluation presentation and interpretation*. New York: Longman, 1–352  
 Stern RA, Bodorkos S, Kamo SL, Hickman AH and Corfu F. 2009. Measurement of SIMS instrumental mass fractionation of Pb isotopes during zircon dating. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 33

- (2): 145 - 168
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in Oceanic Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313 - 345
- Sun WD, Li SG, Chen YD and Li YJ. 2000. Zircon U-Pb dating of granitoids from South Qinling, Central China and their geological significance. *Geochimica*, 29(3): 209 - 216 (in Chinese with English abstract)
- Wang ZQ, Yan QR, Yan Z, Wang T, Jiang CF, Gao LD, Li QG, Chen JL, Zhang YL, Liu P, Xie CL and Xiang ZJ. 2009. New division of the main tectonic units of the Qinling Orogenic Belt, Central China. *Acta Geologica Sinica*, 83(11): 1527 - 1546 (in Chinese with English abstract)
- Wilson BM. 1989. *Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach*. London: Unwin Hyman, 1 - 466
- Winchester JA and Floyd PA. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20: 325 - 343
- Winter JD. 2001. *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. New Jersey: Prentice Hall, 316 - 342
- Xia LQ, Xia ZC and Xu XY. 1996. The characteristics of the Mid-Late Proterozoic volcanic rocks in South Qinling and continent rifting in the Precambrian. *Science in China (Series D)*, 26(3): 237 - 243 (in Chinese)
- Xiao L, Zhang HF, Ni PZ, Xiang H and Liu XM. 2007. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of early Neoproterozoic mafic-intermediate intrusions from NW margin of the Yangtze Block, South China: Implication for tectonic evolution. *Precambrian Research*, 154(3 - 4): 221 - 235
- Xu JF, Wang Q and Yu XY. 2000. Geochemistry of high-Mg andesites and adakitic andesite from the Sanchazi block of the Mian-Lue ophiolitic melange in the Qinling Mountains, Central China: Evidence of partial melting of the subducted Paleo-Tethyan crust. *Geochemical Journal*, 34(5): 359 - 378
- Xu JF, Yu XY, Li XH, Zhang BR and Han YW. 2000. Geochemistry of the Anzishan ophiolitic complex in the Mian-Lue Belt of Qinling Orogen: Evidence and implication of the palaeo-ocean crust. *Acta Geologica Sinica*, 74(1): 39 - 50 (in Chinese with English abstract)
- Xu JF, Paterno RC, Li XH, Yu XY, Zhang BR and Han YW. 2002. MORB-type rocks from the Paleo-Tethyan Mian-Lueyang northern ophiolite in the Qinling Mountains, Central China: implications for the source of the low  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  and high  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  mantle component in the Indian Ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 198(3 - 4): 323 - 337
- Yan QR, Wang ZQ, Hanson AD, Druschke PA, Yan Z, Liu DY, Jian P, Song B, Wang T and Jiang CF. 2003. SHRIMP age and geochemistry of the Bikou volcanic terrane: Implications for Neoproterozoic tectonics on the northern margin of the Yangtze Craton. *Acta Geologica Sinica*, 77(4): 479 - 490
- Yan QR, Hanson AD, Wang ZQ, Druschke PA, Yan Z, Wang T, Liu DY, Song B, Jian P, Zhou H and Jiang CF. 2004. Neoproterozoic subduction and rifting on the northern margin of the Yangtze Plate, China: Implications for Rodinia reconstruction. *International Geology Review*, 46(9): 817 - 832
- Yan QR, Wang ZQ, Yan Z, Xiang ZJ, Chen JL and Wang T. 2007. SHRIMP analyses for ophiolitic-mafic blocks in the Kangxian-Mianxian section of the Mianxian-Lueyang melange: Their geological implications. *Geological Review*, 53(6): 755 - 764 (in Chinese with English abstract)
- Ye L, Cheng ZT, Lu LN, Gao W and Pan ZP. 2009. Petrological geochronology and zircon SHRIMP U-Pb of Tongchang diorites, Mianlue area, southern Shaanxi Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2866 - 2876 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GW, Meng QR and Lai SC. 1995. Tectonics and structure of Qinling orogenic belt. *Science in China (Series B)*, 19(11): 994 - 1003
- Zhang GW, Zhang ZQ and Dong YP. 1995. Nature of main tectono-lithostratigraphic units of the Qinling Orogen: Implications for the tectonic evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 11(2): 101 - 114 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GW, Meng QR, Yu ZP, Sun Y, Zhou DW and Guo AL. 1996. Orogenesis and dynamics of the Qinling Orogen. *Science in China (Series D)*, 26(3): 193 - 200 (in Chinese)
- Zhang GW, Dong YP, Lai SC, Guo AL, Meng QR, Liu SF, Cheng SY, Yao AP, Zhang ZQ, Pei XZ and Li SZ. 2003. Mianlue tectonic zone and Mianlue suture zone on southern margin of Qinling Dabie orogenic belt. *Science in China (Series D)*, 33(12): 1121 - 1135 (in Chinese)
- Zhang HF, Zhang BR, Lin WL, Gao S and Ouyang JP. 1997. Late Proterozoic crustal accretion of South Qinling: Nd isotopic study from granitic rocks. *Geochimica*, 26(5): 16 - 24 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZQ, Tang SH, Zhang GW, Yang YC and Wang JH. 2005. Ages of metamorphic mafic-andesitic volcanic rock blocks and tectonic evolution complexity of Mianxian-Lueyang ophiolitic melange belt. *Acta Geologica Sinica*, 79(4): 531 - 539 (in Chinese with English abstract)
- Zhou MF, Kennedy AK, Sun M, Malpas J and Lesher CM. 2002. Neoproterozoic arc-related mafic intrusions along the northern margin of South China: Implications for the accretion of Rodinia. *The Journal of geology*, 110(5): 611 - 618
- Zhou ZJ, Qin Y, Lin ZW, Wang LX and Wang ZQ. 2011. Study of fluid inclusion characteristic and genetic type of the Huachanggou gold deposit, West Qinling Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 27(5): 1311 - 1326 (in Chinese with English abstract)

#### 附中文参考文献

- 白忠. 1995. 陕西铔厂沟金矿床成矿地质特征. *西南工学院学报*, 10(2): 30 - 39
- 陈衍景, 富士谷. 1992. 豫西金矿成矿规律. 北京: 地震出版社, 1 - 234
- 陈衍景. 2010. 秦岭印支期构造背景、岩浆活动及成矿作用. *中国地质*, 37(4): 854 - 865
- 赖绍聪, 张国伟, 杨永成, 陈家义. 1997. 南秦岭勉县-略阳结合带变质火山岩岩石地球化学特征. *岩石学报*, 13(4): 563 - 573
- 赖绍聪, 张国伟, 杨永成, 陈家义. 1998. 南秦岭勉县-略阳结合带蛇绿岩与岛弧火山岩地球化学及其大地构造意义. *地球化学*, 27(3): 283 - 293
- 赖绍聪, 张国伟, 裴先治, 杨海峰. 2003. 南秦岭康县-琵琶寺-南坪构造混杂带蛇绿岩与洋岛火山岩地球化学及其大地构造意义. *中国科学(D辑)*, 33(1): 10 - 19
- 赖绍聪, 秦江锋. 2010. 勉略缝合带三岔子辉绿岩墙锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素组成——古特提斯洋壳俯冲的年代学证据. *地球科学与环境学报*, 32(1): 27 - 33
- 李曙光, 孙卫东, 张国伟, 陈家义, 杨永成. 1996. 南秦岭勉略构造带黑沟峡变质火山岩的年代学和地球化学——古生代洋盆及其闭合时代的证据. *中国科学(D辑)*, 26(3): 223 - 230
- 李曙光, 侯振辉, 杨永成, 孙卫东, 张国伟, 李秋立. 2003. 南秦岭勉略构造带三岔子古岩浆弧的地球化学特征及形成时代. *中国科学(D辑)*, 33(12): 1163 - 1173
- 凌文黎, 程建萍, 王歆华, 周汉文. 2002a. 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. 岩

- 石学报, 18(1): 25-36
- 凌文黎, 王歆华, 程建萍, 杨永成, 高山. 2002b. 南秦岭镇安岛弧火山岩的厘定及其地质意义. 地球化学, 31(3): 222-229
- 孙卫东, 李曙光, Chen YD, 李育敬. 2000. 南秦岭花岗岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义. 地球化学, 29(3): 209-216
- 王宗起, 闫全人, 闫臻, 王涛, 姜春发, 高联达, 李秋根, 陈隽璐, 张英利, 刘平, 谢春林, 向忠金. 2009. 秦岭造山带主要大地构造单元的新划分. 地质学报, 83(11): 1527-1546
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 1996. 南秦岭中-晚元古代火山岩性质与前寒武纪大陆裂解. 中国科学(D辑), 26(3): 237-243
- 许继峰, 于学元, 李献华, 张本仁, 韩吟文. 2000. 秦岭勉略带中鞍子山蛇绿杂岩的地球化学——古洋壳碎片的证据及意义. 地质学报, 74(1): 39-50
- 闫全人, 王宗起, 闫臻, 向忠金, 陈隽璐, 王涛. 2007. 秦岭勉略构造混杂带康县-勉县段蛇绿岩块-铁镁质岩块的 SHRIMP 年代及其意义. 地质评论, 53(6): 755-764
- 叶霖, 程增涛, 陆丽娜, 高伟, 潘自平. 2009. 陕南勉略宁地区铜厂闪长岩岩石地球化学及 SHRIMP 锆石 U-Pb 同位素年代学. 岩石学报, 25(11): 2866-2876
- 张国伟, 张宗清, 董云鹏. 1995. 秦岭造山带主要构造岩石地层单元的构造性质及其大地构造意义. 岩石学报, 11(2): 101-114
- 张国伟, 孟庆任, 于在平, 孙勇, 周鼎武, 郭安林. 1996. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征. 中国科学(D辑), 26(3): 193-200
- 张国伟, 董云鹏, 赖绍聪, 郭安林, 孟庆任, 刘少锋, 程顺友, 姚安平, 张宗清, 裴先治, 李三忠. 2003. 秦岭-大别造山带南缘勉略构造带与勉略缝合带. 中国科学(D辑), 33(12): 1121-1135
- 张宏飞, 张本仁, 凌文黎, 高山, 欧阳建平. 1997. 南秦岭新元古代地壳增生事件: 花岗质岩石钨同位素示踪. 地球化学, 26(5): 16-24
- 张宗清, 唐索寒, 张国伟, 杨永成, 王进辉. 2005. 勉县-略阳蛇绿混杂岩带镁铁质-安山质火山岩块年龄和该带构造演化的复杂性. 地质学报, 79(4): 531-539
- 周振菊, 秦艳, 林振文, 王立新, 汪志强. 2011. 西秦岭铔厂沟金矿床流体包裹体特征研究及矿床成因. 岩石学报, 27(5): 1311-1326